# CENTRO NACIONAL DE ACELERADORES

# Memoria de Investigación 2017-2018

# Research Report 2017-2018





Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

Índice / Index



Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

Capítulo / Chapter	Página	
1. Introducción / Introduction	11	
2. Estructura y Personal / Structure and Staff	21	
2.1 Dirección del Centro / Centre Management		
2.2 Junta Rectora / Governing Board		
2.3 Comité Científico / Scientific Committee	22	
2.4 Personal del Centro / Centre Staff	22	
2.4.1 Unidad Técnica y de Servicios / Administration and Technical Unit	22	
2.4.2 Unidad de Investigación de Técnicas de Análisis y Modificación de	23	
Materiales con Haces de Iones / Ion Beam Analysis and Modification of Materials Research Unit		
2.4.3 Unidad de Irradiación Fotónica y de Partículas / Photonic and Particle	23	
Irradiation Unit		
2.4.4 Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica / Basic Nuclear Physic Besearch Unit	24	
2.4.5 Unidad de Investigación Ciclotrón / Cyclotron Research Unit	24	
2.4.6 Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con	24	
Aceleradores (AMS) / Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Unit	24	
2.4.7 Unidad de Divulgación Científica (UCC+i) / Outreach Unit (UCC+i)	25	
2.5 Datos del Centro / Centre information	25	
3. Infraestructuras / Facilities	29	
3.1 Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator	30	
3.1.1 Líneas de haz / Beam Lines	31	
3.1.2 Otras líneas / Other lines	34	
3.1.3 Técnicas disponibles en el Acelerador Tándem 3 MV / Available	37	
techniques at 3 MV Tandem accelerator		
3.1.4 Laboratorios del Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem	40	
3 2 Ciclotrón / Cyclotron	45	
3.2.1 Línea de Haz de Experimentación / Experimental Beam Line	45	
3.2.2 Laboratorios asociados al Ciclotrón / Cyclotron laboratories	47 51	
3.2.3 Radiofarmacia e Imagen Molecular / Radiopharmacy and Molecular	56	
Imaging	50	
3.2.4 Tomógrafo PET y TAC para pequeños animales y estabulario / Small	58	
animal PET and CT and animal cabinet		
3.2.5 Procesamiento de imágenes médicas clínicas y preclínicas / Clinical	59	
and preclinical medical image processing		
3.3 Tomógrafo PET/TAC para humanos / PET/CT human scanner	62	
3.4 Acelerador Tandetrón de 1 MV con Espectrómetro de Masas (AMS) / 1	64	
MV Tandetron Accelerator with Mass Spectrometer (AMS)		

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3.4.1 Laboratorio asociado al Acelerador Tandetrón de 1 MV con	68		
Espectrometro de Masas / AMS Laboratory			
3.5.1 Servicio de Datación nor Radiocarbono / Radiocarbon Dating Service			
3.5.2 Laboratorio de grafitización del Centro Nacional de Aceleradores			
(AGE) / Automated Granhitisation Equipment (AGE)			
3.6 Laboratorio de Radiación Gamma / Gamma Radiation Laboratory			
A Investigación / Research	00		
4. Investigación / Research			
4.1 Omulau de investigación de recincas de Analisis y Modificación de Materiales con Haces de Jones / Jon Beam Analysis and Modificación of	84		
Materials Research Unit			
4 1 1 Ciencia de Materiales / Materials Science	0.4		
4.1.2 Centro para Ensavos de Irradiación / Irradiation Testing Facility	04		
4.1.2 Centro para Ensayos de madiación / madiación resultig Facility			
4.1.5 Patrimonio Cultural / Cultural Hentage			
4.1.5 Ciencia del Plasma y Tecnología de Fusión / Plasma Science and	129		
Fusion Technology	129		
4.2 Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica / Basic Nuclear Physic	124		
Research Unit	154		
4.2.1 Física experimental de neutrones / Experimental neutron physics	134		
4.2.2 Blancos sólidos con alta cantidad de He para estudio de reacciones	137		
nucleares / Solid targets with high amount of He for the study of nuclear	107		
reactions			
4.2.3 Medidas de tasas de producción de 11C y 13N para verificación de	139		
rango en protonterapia / Measurements of production rates of 11C and 13N			
for range verification in proton therapy			
4.3 Unidad de Investigación Ciclotrón / Cyclotron Research Unit	141		
4.3.1 Radiofarmacia / Radiopharmacy	141		
4.3.2 Imagen Molecular / Molecular Imaging			
4.4 Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con Aceleradores	161		
(AMS) / Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Unit			
4.4.1 Medidas de actinidos / Actinides measurements	161		
4.4.2 Medidas de <sup>41</sup> Ca / <sup>41</sup> Ca measurements	166		
4.4.3 Medida de <sup>14</sup> C / <sup>14</sup> C measurements	167		
4.4.4 Medidas de <sup>129</sup> I / <sup>129</sup> I measurements	169		
5. CNA y Sociedad / CNA and Society	175		
5.1 El CNA y la Salud / CNA and Health	175		
5.2 El CNA y el Medio Ambiente / CNA and Environment			
5.3 El CNA y el Patrimonio Cultural / CNA and Cultural Heritage			
5.4 El CNA y la Empresa / CNA and Business	178		
6. Cultura Científica / Outreach	181		
6.1 Presentación / Presentation			
6.2 Acciones / Activities			
6.3 Impacto de actividades / Activities impact			

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

6.3.1 Visitantes de las instalaciones por año / Annual visitants	186		
6.3.2 Procedencia de los centros visitantes / Origin of visitant centers	186		
6.3.3 Visitantes a exposiciones y ferias / Visitants of exhibitions			
6.3.4 Comunicación Científica / Scientific press notes	187		
7. Producción Científica / Scientific Production	191		
7.1 Participación en Proyectos, Convenios y Contratos / Research Projects,	191		
Agreements and Contracts			
7.1.1 Proyectos Internacionales / International Projects	191		
7.1.2 Proyectos Nacionales y Autonómicos / National and Autonomic	192		
Projects			
7.1.3 Convenios y contratos / Agreements and Contracts	194		
7.2 Artículos publicados / Published Articles			
7.2.1 Artículos ISI / ISI Articles			
7.2.2 Artículos NON ISI / NON ISI Articles			
7.2.3 Capítulos en libros / Chapters in books	211		
7.3 Participación en Congresos / Meeting Participations	212		
7.3.1 Congresos Internacionales / International Meetings	212		
7.3.2 Congresos Nacionales / National Meetings	223		
7.4 Tesis Doctorales y Trabajo Fin de Master / Theses and Final Master	230		
Projects			
7.4.1 Tesis Doctorales/ Theses	230		
7.4.2 Proyecto de Fill de Master / Fillal Master Project	230		
7.5 Cursos, Coloquios y Eventos / Courses, Seminars and Meetings			
7.5.1 Cursos / Courses			
7.5.2 Coloquios / Serimars 7.5.3 Eventos / Meetings	232		
	233		
8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators	237		
Analytics and users			
8.1 Estadísticas de uso de las instalaciones del CNA / CNA Facilities use	237		
analytics			
8.1.1 Usuarios segun tipo de entidad / Users according to type of entity	238		
8.1.2 Usuarios segun origen / Users according to origin	239		
8.1.3 Producción de radiotarmacos / Radiopharmaceutical production	240		
8.1.4 Evolution historica del numero de solicitudes de uso / Evolution of	240		
2.2 Llouarios de las Instalaciones del CNA / CNA Escilitios usors	244		
8.2.1 Universidades / Universities	241		
8.2.2 Centros de Investigación / Research Centres	241		
8 2 3 Otras entidades / Other entities	241		
8.2.3 Empresas / Companies	242		
	242		
9. Calidad / Quality	245		
9.1 Componentes de la Unidad de Calidad / Quality Unit Members	247		

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)



# 1. Introducción / Introduction

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

1. Introducción / Introduction

1. Introducción / Introduction

# 1. Introducción / Introduction

El Centro Nacional de Aceleradores (CNA) es un centro mixto de la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que tiene como misión el desarrollo de investigación en aceleradores de partículas y sus múltiples aplicaciones. El Centro está reconocido como Instalación Científico-Técnica Singular (ICTS) de localización única, siendo por ello un centro abierto para que la comunidad científica y tecnológica nacional e internacional pueda desarrollar investigaciones utilizando sus instalaciones. Este reconocimiento como ICTS de localización única ha sido recientemente renovado en noviembre 2018, conjuntamente con la aprobación del plan estratégico del centro para el periodo 2017-2020.

Esta memoria, que tradicionalmente realiza el Centro con carácter bianual, tiene como objetivos el presentar una visión actual de la estructura, el personal, y el equipamiento del centro, así como el dar una información detallada de la investigación realizada durante los años 2017 y 2018. Y todo ello, con el ánimo de favorecer el establecimiento de colaboraciones con los sectores científicos y tecnológicos.

Durante el bienio 2017-2018 hemos continuado sacando pleno rendimiento a las seis grandes instalaciones del CNA: 1) El acelerador Tándem de 3 MV, herramienta potente y versátil para Ciencia de Materiales e Instrumentación Nuclear, cuya potencialidad se ha incrementado con la incorporación de una nueva línea para experimentación con neutrones. b) El acelerador Ciclotrón, factoría de radiofármacos y con una línea de haz externo cada vez más demandada para experimentos de irradiación con partículas cargadas c) El acelerador Tandetrón para AMS, que encuentra radionucleidos de vida larga en el medioambiente en proporciones ínfimas, con grandes demandas en aplicaciones oceanográficas d) El acelerador compacto MICADAS, dedicado a la datación de muestras de muy diversos origen por <sup>14</sup>C, con un incremento muy notable en su uso forense e) El irradiador de <sup>60</sup>Co, fuente de fotones para irradiación de componentes fundamentalmente aeroespaciales, pero también biológicas, y f) el tomógrafo PET-TAC, complemento del ciclotrón para el diagnóstico de cáncer. Estas seis grandes instalaciones son las reconocidas como "oustandings facilities" en la evaluación realizada recientemente como ICTS y son por ello las infraestructuras del CNA susceptibles de recibir financiación para su mejora y mantenimiento dentro del programa nacional de consolidación de infraestructuras de estas instalaciones singulares.

La situación económica en el bienio 2017-2018 mostró ciertas mejoras, respecto al bienio previo, con indicios claros de haberse superado las épocas más críticas de crisis. La contribución de las instituciones del CNA (Universidad de Sevilla, Junta de Andalucía y CSIC) se ha mantenido estable, con la novedad de que al final del 2018 y tras numerosos años de paralización en la estabilización del personal del centro se han convocado dos plazas permanentes, a cubrir durante 2019: una de técnico de grado medio (Universidad de Sevilla) y una de técnico auxiliar (CSIC). Ello no mitiga la muy

**1. Introducción / Introduction** 

elevada y crónica temporalidad de la plantilla del centro, pero esperamos que sea el indicativo de un cambio de tendencia muy necesario.

La alta temporalidad en la plantilla se encuentra íntimamente ligada a la captación de recursos por el centro. Durante el bienio 2017-2018, el Centro ha continuado captando recursos con los que mantener la contratación del personal clave, manteniendo la facturación por uso de las instalaciones, y la financiación por contratos con otras instituciones. El Servicio Andaluz de Salud (SAS), la empresa de radiofármacos Curium, la empresa de componentes aeroespaciales ALTER, la empresa ENRESA, y otras empresas y entidades, proporcionan un porcentaje importante de la financiación del CNA, que nos ha permitido mantener, no sin dificultad, nuestro nivel de calidad científica y tecnológica.

Por otra parte, la cuantía de los proyectos de investigación nacionales se ha incrementado levemente respecto al bienio anterior, y se ha continuado incrementando la financiación a través de proyectos europeos

El plan estratégico del centro 2013-2016, asociado a nuestro carácter de Infraestructura Científico-Técnica Singular (ICTS) se cerró en el bienio cubierto en esta memoria, habiendo recibido por el comité asesor de infraestructuras singulares una valoración muy positiva. El 100% de los objetivos de dicho plan estratégico han sido cubiertos, así como prácticamente el 100% de las actividades previstas. Esos objetivos, resumidamente, fueron los siguientes:

1.- Desarrollo de Técnicas de Análisis por Haces de Iones (IBA) para análisis de materiales.

- 2.- Desarrollo de pruebas de irradiación de componentes tecnológicos y biológicos.
- 3.- Desarrollo de detectores de radiación e instrumentación nuclear.
- 4.- Avances en Espectrometría de masas por aceleradores (AMS) y datación por <sup>14</sup>C.
- 5.- Producción de radiofármacos e imagen molecular.

Un nuevo plan estratégico para el periodo 2017-2020 ya se encuentra en plena aplicación tras su formulación por el Comité Director del Centro y su aprobación por el comité asesor de las infraestructuras singulares (CAIS). Este plan contempla, además de los objetivos del plan previo, los siguientes: a) una apuesta decidida por instalar, en colaboración con el Servicio Andaluz de Salud, un acelerador de más energía que permita tratar el cáncer usando la técnica llamada Protonterapia, b) un incremento notable en la implicación en el desarrollo de instrumentación relevante para grandes instalaciones internacionales, c) una consolidación de la nueva línea del acelerador Tándem para experimentación con neutrones, y d) un esfuerzo especial por incrementar la internacionalización de servicios.

El acceso al CNA puede realizarse a través de los diversos servicios prestados por el centro. El CNA mantiene un alto nivel de calidad en el uso de sus instalaciones como

**1. Introducción / Introduction** 

prestadoras de servicios. Realizamos por ejemplo medidas por técnicas IBA, datación por radiocarbono, irradiación de componentes tecnológicos, imagen TAC de objetos de interés arqueológicos y medidas por AMS de las trazas de elementos radioactivos en muestras naturales. Investigadores, empresas o particulares, pueden enviar sus muestras al CNA, y obtener informes, por procedimientos avalados por certificaciones de calidad. En esta línea, es especialmente relevante la Unidad de Diagnóstico por Imagen molecular del CNA, desarrollada en colaboración con el personal del Servicio Andaluz de Salud, por el que más de 1000 pacientes al año se benefician de las técnicas de imagen PET-TAC para el diagnóstico del cáncer.

El CNA desde sus primeros pasos y como institución de carácter público ha dado una enorme importancia a que la Sociedad conozca y valore la investigación científica realizada en el Centro. Por ello, mantenemos un programa de divulgación muy activo, reconocido por su calidad e implicación con numerosas distinciones en los últimos años. Este plan de divulgación incluye visitas al centro todos los viernes lectivos del año, principalmente de grupos de alumnos de secundaria y bachillerato, pero también de universitarios, profesionales y público general. También participamos en la Feria de la Ciencia de Sevilla, y en la Semana de la Ciencia del CSIC, y mantenemos una presencia muy activa en las redes sociales.

Justo al final del bienio recopilado en esta memoria, se ha producido un cambio en la Dirección del Centro. El profesor Gómez Camacho tras una dedicación encomiable de casi una década a la dirección del centro, ha decidido volver a dedicarse plenamente de nuevo a su vocación docente e investigadora. Es prácticamente imposible resumir en estas líneas la ingente labor realizada durante su dirección, y remitimos al lector simplemente a un repaso de las memorias bianuales de la última década del centro para ver el progreso, los avances y la consolidación de las infraestructuras y de las diversas unidades de investigación en los últimos años. Esta labor fue reconocida unánimemente tanto por la Junta Rectora como por el Comité Científico del Centro en las últimas sesiones celebradas. Y su labor todavía adquiere mayor relevancia si tenemos en cuenta que su periodo de dirección ha coincidido con los años de grave crisis económica de nuestro país que tuvo una enorme incidencia en la actividad científica.

El nuevo director, y autor de esta introducción, quiere resaltar que la magnífica imagen que se deduce del CNA en esta memoria debe asociarse a la labor y el trabajo del profesor Gomez Camacho. Y le agradece enormemente que además de continuar con su labor investigadora en el centro, haya aceptado la propuesta de colaborar muy activamente en dos objetivos esenciales del CNA para el futuro cercano: la incorporación de una instalación de protonterapia a las infraestructuras del centro y la internacionalización de sus actividades. Su experiencia en ambos casos será de enorme utilidad.

El CNA tiene unas infraestructuras de calidad, de carácter único a nivel nacional, siendo reconocida como una instalación estratégica de nuestro país por el comité

**1. Introducción / Introduction** 

asesor de infraestructuras singulares. Sin embargo, estas infraestructuras no serían de ningún valor, sin el equipo humano asociado. El personal del CNA ha de afrontar, en el día a día, retos cambiantes para desarrollar su labor. Los usuarios externos plantean situaciones nuevas que tienen que resolver los técnicos del CNA. Los investigadores del CNA combinan su propia investigación con el desarrollo de las capacidades del centro, y el apoyo a los usuarios externos. El personal administrativo debe afrontar los requerimientos de las tres instituciones que conforman el CNA, gestionar las diversas fuentes de financiación, y apoyar la gestión de los proyectos del personal del centro. El personal del CNA realiza todas esas funciones con eficacia y eficiencia, a pesar de que sus situaciones contractuales no sean las deseables en la mayoría de los casos. El intentar revertir, en una situación económica más favorable esas situaciones contractuales, logrando una armonización entre la excelencia de la investigación que se viene realizando en el centro con un equipo humano estabilizado y motivado al 100% es lo que me llevó a aceptar el reto de tomar la responsabilidad de la dirección del Centro. En ello pondré todos mis esfuerzos.

Esta memoria se ha realizado con las aportaciones del personal del centro, fundamentalmente de los responsables de las diversas unidades o servicios, lo que agradezco profundamente. Y especial mención merece Sergio David León Dueñas por su dedicación y desvelos en el trabajo de coordinación y edición de este documento.

*Miércoles, 20 de marzo de 2019 Rafael García-Tenorio Director del CNA* 

1. Introducción / Introduction

The National Accelerator Centre (CNA) is a joint center depending on the University of Seville, the Junta de Andalucía and the High Council of Scientific Research (CSIC). It has the mission of carrying out research in particle accelerators and its multiple applications. CNA is recognized as a Singular Scientific and Technological Facility and it is open for the national and international scientific community to carry out research using its equipment. This recognition as Singular Facility has been recently extended in November 2018, together with the approval of the strategic plan of the center for the period 2017-2020.

This report, traditionally performed bi-annually, is an introduction to the structure, the personnel and the facilities of the center, and it contains the research carried out during 2017-2018. We display CNA capabilities, to promote collaborations with the scientific and technological communities.

During 2017-2018 we have made full usage of the six large facilities of CNA: a) The 3 MV Tandem accelerator, a versatile tool for materials science and nuclear instrumentation, recently updated with a new line for neutron experiments, b) The cyclotron accelerator, a factory of radiopharmaceuticals and a source of irradiation with charged particles, c) The AMS tandetron accelerator which finds radionuclides in the environment in tiny fractions, with high demands in oceanographic research, d) The compact accelerator MICADAS, used for <sup>14</sup>C dating, with a notably increment in forensic applications, e) The <sup>60</sup>Co irradiator, a source of photons for irradiating aerospace components and biological samples, and f) The PET-CT scanner, the complement of the Cyclotron for cancer diagnosis. These six large facilities are the recognized ones as "outstanding facilities" in the evaluation recently done as Singular facility, and for that reason are the preferential ones for receiving additional funds for their update and maintenance.

The economic situation in 2017-2018 slightly improves in relation with the last years. Several indicators show this slight improvement. The contributions of the institutions that constitute CNA (U. Sevilla, J. Andalucía and CSIC) to the running costs of CNA have been maintained, with the novelty that at the end of 2018 and after several years of interruption on the stabilization of the personnel, two permanent positions (U. de Sevilla and CSIC) have been announced. These positions do not solve the chronic temporality affecting the center, but we believe that can be an indicative of a change in the tendency observed in last years. National research funding continues being stable although we obtain more from European sources. Despite these difficulties, we have obtained resources to maintain key personnel, and have increased substantially trainee personnel. We maintain the external funding through the usage fees of our facilities and the funds associated to contracts with other institutions. The Andalusian Health Service (SAS), the radiopharmacy company Curium, the aerospace company ALTER, ENRESA, and other companies and institutions provide an important fraction of CNA funding, which allowed us to maintain, no without difficulties, our level of scientific and technological quality.

1. Introducción / Introduction

The strategic plan 2013-2016 was evaluated in the period covered by this memory. This evaluation performed by the ICTS evaluation committee has been extremely positive indicating that 100% of the objectives of the strategic plan were covered, as well as near 100% of the planned activities. These objectives, in summary were the following:

- 1.- Development of Ion beam Analysis (IBA) Techniques for material analysis.
- 2.-Development of irradiation trials of technologic components and biological samples.
- 3.- Development of radiation detectors and nuclear instrumentation.

4.- Accelerator mass Spectrometry (AMS) and <sup>14</sup>C dating.

5.- Radiopharmaceutical production and molecular imaging

A new strategic plan for the period 2017-2020 is now in full application after its formulation by the Steering Committee of the center and its approval by the evaluation committee of the Singular Facilities. This plan, in addition to the objectives of the previous plan, introduce some new ones: a) A determined attempt for the installation, in collaboration with the Andalusian Health Service, of a high-energy accelerator for cancer treatment by applying the Protontherapy technique, b) an increase in the implication of the center in the development of instrumentation to be used in large international facilities, c) the consolidation of the new Tandem line devoted to neutron experimentation, and d) an special effort to increase the internationalization of the center in the running of projects as well as in providing services.

CNA facilities can be accessed through the services provided. We have continued improving the use of our facilities by performing measurements by IBA techniques, radiocarbon dating, irradiation of technological components, TAC imaging of archeological objects, and AMS measurements of radioactive elements in natural samples. Researchers, companies, or individuals can send their samples to CNA, and obtain information reports performed following quality certificated procedures. Especially relevant is the Molecular Imaging Diagnostic Unit, in collaboration with the personnel of the Andalusian Health Service (SAS), through which more than 1000 patients every year benefit from the PET-CT imaging techniques for cancer diagnosis.

The CNA since its first steps has given as a public institution an enormous importance to inform to the general society about the research and work carried out in the center. With this end, we maintain a divulgation program very active, quite well recognized with different prizes at regional and national level. This divulgation plan includes visits to the center every Friday during the scholar year mainly of secondary school students but also of university undergraduate students, professionals and public in general. The center also participates in the Science week organized by CSICS and in scientific fairs, and maintain a very active presence, a high profile, in social networks.

Just at the end of the period covered by this report, the director of the center has changed. Professor Gomez Camacho, after a laudable dedication during a decade to the direction of center, has decided to return to devote his efforts in his teaching and research career. Is practically impossible to summarize in these lines the huge work

1. Introducción / Introduction

done during his direction, and for that reason we redirect to the reader to follow the evolution of the center by looking the different biannually reports produced since 2007. This labor has been unanimously recognized by the Governing Committee of the center as well as by the Scientific Committee in their last sessions. Its labor should be also put in proper context if we have in consideration that its direction has been performed during years of high economic crisis that affected enormously to the scientific activity in our country.

The new director, as an author of this introduction, like to remark that the good image that can be deduced of the CNA through reading this memory, is a merit that should be associated to the work and dedication of professor Gomez Camacho. Additionally, the new director deeply acknowledges that in addition to continue his research in the center, the professor Camacho agrees to collaborate quite actively in two of the essential objectives of CNA in the near future: The addition of one protontherapy installation to the facilities of the center and the internationalization of the activities. His experience in both cases will be of enormous utility.

The CNA has infrastructures of very high quality, unique at national level, being recognized for that as a strategic installation in our country by the evaluation committee of the Spanish Singular Facilities. However, these facilities would be useless without the human team associated. The CNA personnel have to face new challenges every day. The researchers should combine their own research with the development of the capabilities of the center. The technicians should respond efficiently to the different needs associated to services or research and the administrative personnel should respond to the requirements of the three parent institutions of the CNA, to manage the different financial sources, and to help in the economic management of the different projects of the researchers. The CNA personnel do their job with efficacy and efficiency, in spite of the fact that the contractual situations are no the desired ones in the majority of the cases. To try to change these situations, in an economic situation more favorable, and trying the harmonization between the excellence in the research that is performed in the center with a human team stabilized and motivated 100%, is what decided me to accept the responsibility of the direction of the center. I will put all my efforts in fulfilling this final objective.

This report has been performed with the contributions of the personnel of the center, mainly the heads of the different units or services, fact that is deeply acknowledged. Special mention is finally deserved to Sergio David Leon Dueñas due to his dedication in the coordination and edition work associated to this document.

Wednesday, March 20, 2019 Rafael García-Tenorio CNA Director

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

1. Introducción / Introduction

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

2. Estructura y Personal / Structure and Staff



# 2. Estructura y Personal / Structure and Staff

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

2. Estructura y Personal / Structure and Staff

2. Estructura y Personal / Structure and Staff

# **2. Estructura y Personal / Structure and Staff**

El CNA surge del acuerdo entre la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Una Junta Rectora del Centro, formada por representantes de las tres instituciones, marca las líneas generales del gobierno del Centro que ejecuta su Director. Existe, además, un Comité Científico, formado por científicos de prestigio nombrados a propuesta de las tres instituciones, que asesora al Director del CNA en la política científica del mismo y distribuye y ordena el uso de las infraestructuras del Centro.

El personal científico del Centro se distribuye en Unidades de Investigación, formadas por personal de distintas instituciones, y que se crean alrededor de las distintas infraestructuras y capacidades científicas del Centro. El citado personal desarrolla toda o buena parte de su actividad investigadora en el CNA. Además, existe una Unidad Técnica y de Servicios en la que se integra el personal de administración del Centro y el personal técnico de apoyo a los usuarios externos del CNA.

The CNA was originated from an agreement among the Universidad de Sevilla, the Junta de Andalucía and the CSIC. The Governing Board of the Centre, constituted by spokesmen of the three institutions, indicates the general strategy and policy issues of the Centre, which are carried out by the CNA Director. There is also a Scientific Committee, with scientists proposed by the three institutions, which advices the Director on the scientific strategy and regulates the use of CNA facilities.

The scientific personnel of the Centre are distributed in Research Units, which have professionals from diverse institutions. These units are organized around the different infrastructures and capabilities of the Centre and the personnel carry out all or most of the research activity at CNA. Besides that, there is an Administration and Technical Unit which provides administrative and technical support to the Centre and to the external CNA users.

#### 2.1 Dirección del Centro / Centre Management

Director: Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda Vicedirector: Dr. José María López Gutiérrez Gerente: Dr. Jerónimo Castilla Guerra Subdirector Área Técnica: Dr. Celestino Ignacio Sánchez Angulo Coordinador del Acelerador Tándem de 3 MV: Dr. Francisco Javier García López Coordinador del Acelerador Tandetrón de 1 MV: Dr. José María López Gutiérrez

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

2. Estructura y Personal / Structure and Staff

#### **2.2 Junta Rectora / Governing Board**

-Dr. José Ramón Urquijo Goitia, Vicepresidente de Organización y Relaciones Internacionales (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)

-Dra. Margarita Paneque Sosa, Coordinadora institucional en Andalucía (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)

-Dr. Julián Martínez Fernández, Vicerrector de Investigación (Universidad de Sevilla) -Dr. José Guadix Martín, Vicerrector de Transferencia Tecnológica (Universidad de Sevilla) Sevilla)

-D. Juan Francisco Navarro, Coordinador Universitario (Junta de Andalucía)

-Dr. Manuel García León, Director General de Investigación, Tecnología y Empresa (Junta de Andalucía)

-Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Director del CNA -Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Gerente

#### 2.3 Comité Científico / Scientific Committee

-Dr. Miguel Ángel Aguirre Echanove, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla

-Dra. Josefa Capel Martínez, Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Granada

-Dra. Dolores Cortina Gil, Departamento de Física de Partículas, Universidad de Santiago de Compostela

-Dr. José Manuel Llamas Elvira, Servicio de Medicina Nuclear, Hospital Virgen de las Nieves de Granada

-Dr. Sebastián Cerdán García de Esteller, Instituto de Investigaciones Biomédicas "Alberto Sols", Consejo Superior de Investigaciones Científicas

-Dr. José Gonzalo de los Reyes, Instituto de Óptica "Daza de Valdés", Consejo Superior de Investigaciones Científicas

-Dr. Jordi Fraxedas Calduch, Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

-Dr. Daniel Cano Ott, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

-Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Director del CNA

-Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Gerente

#### 2.4 Personal del Centro / Centre Staff

#### 2.4.1 Unidad Técnica y de Servicios / Administration and Technical Unit

-Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Gerente, Director de Servicio, Universidad de Sevilla -Dr. Celestino Ignacio Sánchez Angulo, Titulado Superior, Director Técnico, Universidad de Sevilla

#### 2. Estructura y Personal / Structure and Staff

-D. Miguel Calderón Reyes, Gestor, Universidad de Sevilla

-D. Jaime García de Vinuesa Pacheco, Auxiliar Administrativo, Universidad de Sevilla

-D. Juan Ángel Labrador Bernal, Titulado de Grado Medio para Investigación, Universidad de Sevilla

-D. Antonio Manuel Casado Sola, Técnico Auxiliar de Laboratorio, Universidad de Sevilla

-D. Ángel Jesús Romero Serrano, Titulado Superior para Aceleradores, Contrato CNA

-D. Juan Alcalde García, Titulado de Grado medio para Aceleradores, Contrato CNA

-D. Sergio David León Dueñas, Titulado Superior para Divulgación Científica y Comunicación, Contrato CNA

-D. Francisco Calle Blanco, Titulado de Grado Medio para Informática, Contrato CNA
 -D. Miguel Ángel Seller López, Titulado de Grado Medio para Aceleradores, Personal Técnico de Apoyo Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

-Dª. Patricia Zúñiga Ariza, Titulada Superior para Apoyo a la Administración, Contrato CNA

# **2.4.2 Unidad de Investigación de Técnicas de Análisis y Modificación de Materiales con Haces de Iones / Ion Beam Analysis and Modification of Materials Research Unit**

-Dr. Miguel Ángel Respaldiza Galisteo, Catedrático, Universidad de Sevilla

-Dr. Francisco Javier García López, Profesor Titular, Universidad de Sevilla

-Dr. Francisco José Ager Vázquez, Profesor Titular, Universidad de Sevilla

-Dra. Blanca María Gómez Tubio, Profesora Titular, Universidad de Sevilla

-Dra. Yolanda Morilla García, Titulada Superior para Investigación, Universidad de Sevilla

-Dr. Manuel García Muñoz, Investigador, Profesor Titular, Universidad de Sevilla -Dra. Anabelle Kriznar, Profesora ayudante doctoral Interina, Universidad de Sevilla

-Dra. Eleonora Viezzer, Investigadora, Contratada Marie Curie, Universidad de Sevilla

-Dra. Inés Ortega Feliu, Investigadora, Programa Acceso Plan Propio Universidad de Sevilla

-Dr. Francisco Javier Ferrer Fernández, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA

-Dra. María del Carmen Jiménez Ramos, Titulada Superior para Investigación, Contrato CNA

-Dr. Juan Manuel Ayllón Guerola, Titulado Superior para Investigación, Proyecto Europeo

-Dr. Mauricio Rodríguez Ramos, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA -Dª. Lucía Sanchís Sánchez, Becaria de Investigación, Proyecto Nacional

# **2.4.3 Unidad de Irradiación Fotónica y de Partículas / Photonic and Particle Irradiation Unit**

-Dra. Yolanda Morilla García, Titulada Superior para Investigación, Universidad de Sevilla

-D. Pedro Martin Holgado, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA -Dr. Francisco Javier García López, Profesor Titular, Universidad de Sevilla

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

2. Estructura y Personal / Structure and Staff

-Dra. María del Carmen Jiménez Ramos, Titulada Superior para Investigación, Contrato CNA

-Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Catedrático, Universidad de Sevilla

# 2.4.4 Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica / Basic Nuclear Physic Research Unit

-Dr. Joaquín Gómez Camacho, Catedrático, Universidad de Sevilla
-Dr. José Manuel Espino Navas, Profesor Titular, Universidad de Sevilla
-Dra. Begoña Fernández Martínez, Titulada Superior para Investigación, Proyecto Europeo

-Dr. Javier Praena Rodríguez, Investigador, Universidad de Granada
-Dr. Carlos Guerrero Sánchez, Investigador, Programa Ramón y Cajal
-Dr. Juan Pablo Fernández García, Investigador, Programa Juan de la Cierva
-D. Miguel Macías Martínez, Investigador Predoctoral, Proyecto Nacional
-Dª. Ana Lucila Baratto Roldán, Investigadora Predoctoral, Proyecto Europeo
-Dª. Teresa Rodríguez González, Investigadora Predoctoral, Proyecto Nacional (FPI)
-Dª. M. Ángeles Millán Callado, Investigadora Predoctoral, Proyecto Nacional

# **2.4.5 Unidad de Investigación Radiofarmacia e Imagen Medica/ Radiopharmacy and medical Image**

-Dr. Ramón Risco Delgado, Profesor Titular, Universidad de Sevilla
-Dr. Marcin Balcerzyk, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA
-Dra. Laura Fernández Maza, Titulada Superior para Investigación, Contrato CNA
-Dra. María del Carmen Jiménez Ramos, Responsable de la Línea Externa del Ciclotrón
-D. Ángel Luis Parrado Gallego, Técnico de Laboratorio, Contrato CNA
-Dra. Ariadna Corral Sousa, Contrato CNA

# 2.4.6 Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) / Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Unit

-Dr. Manuel García León, Catedrático, Universidad de Sevilla

-Dr. Rafael García-Tenorio García-Balmaseda, Catedrático, Universidad de Sevilla

-Dr. José María López Gutiérrez, Profesor Titular, Universidad de Sevilla

-Dr. Guillermo Manjón Collado, Profesor Titular, Universidad de Sevilla

-Dr. José Luis Mas Balbuena, Profesor Titular, Universidad de Sevilla

-Dr. Francisco Javier Santos Arévalo, Titulado Superior para Investigación, CSIC

-Dra. Elena Chamizo Calvo, Titulado Superior para Investigación, Universidad de Sevilla -Dª. Isabel Gómez Martínez, Titulado de Grado Medio para Investigación, Universidad de Sevilla

-D<sup>a</sup>. Lidia Agulló García, Titulado Superior para Investigación, Personal Técnico de Apoyo Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

-D. Juan Ignacio Peruchena Fernández, Titulado Superior para Investigación, Contrato CNA

-D. Juan Alcalde García, Titulado Superior para Aceleradores, Contrato CNA

-Dª. Mercedes López Lora, Investigadora Predoctoral, Fundación Cámara

-Dª. Victoria Lérida Toro, Técnico de Laboratorio, Proyecto Nacional

2. Estructura y Personal / Structure and Staff

-Dra. Maria Villa Alfageme, Profesora Titular, Universidad de Sevilla

#### **2.4.7 Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCC+i) / Outreach Unit (UCC+i)** -Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Coordinador de la Unidad de Divulgación Científica

-D. Sergio David León Dueñas, Titulado Superior para Divulgación Científica y Comunicación, Contrato CNA

-D. José Antonio Galván Moreno, Titulado Superior para Divulgación Científica, Contrato CNA

-Dª. Celia Falcón Carrero, Titulada Superior para Divulgación Científica, Contrato CNA -Dª. María Negrete González, Titulada Superior para Divulgación Científica, Contrato CNA

-Dª. Mª Ángeles Millán Callado, Titulada Superior para Divulgación Científica, Contrato CNA

Nombre / Name	Centro Nacional de Aceleradores (CNA)
Dirección / Address	Av. Thomas Alva Edison, nº 7
Ubicación / Location	Parque Científico y Tecnológico Cartuja / Cartuja Science and Technology Park
Ciudad / <i>City</i>	Sevilla / Seville
País / Country	España / <i>Spain</i>
Código Postal / Postal Code	E-41092
Teléfono / <i>Phone</i>	(+34) 954.460.553
Fax	(+34) 954.460.145
E-mail	<u>cna@us.es</u>
Web	<u>www.cna.us.es</u>
Tarifas por prestaciones de Servicios / Prices of the Services offered by CNA	http://bit.do/tarifascna http://bit.do/cnarates

#### **2.5 Datos del Centro / Centre information**

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

2. Estructura y Personal / Structure and Staff

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities



# 3. Infraestructuras / Facilities

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

3. Infraestructuras / Facilities

# **3. Infraestructuras / Facilities**

El CNA es un Centro pionero de España en la instalación y puesta a disposición de la comunidad científica de aceleradores de partículas para investigación. El primer acelerador instalado data de 1998. Reafirmando su actividad pionera, desde ese momento y hasta ahora se han instalado tres nuevos aceleradores junto con las técnicas asociadas a los mismos, así como otras dos nuevas instalaciones. Actualmente, el CNA dispone de cuatro aceleradores para cumplir sus objetivos: un Acelerador de tipo Tándem van de Graaff de 3 MV, un Ciclotrón que proporciona protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV, un Acelerador de tipo Tándem Cockcroft-Walton de 1 MV (llamado AMS), que realmente es un espectrómetro de masas, y un Acelerador ultracompacto MiCaDaS (Mini Radiocarbon Dating System). Las otras infraestructuras incorporadas al CNA recientemente han sido un escáner PET/TAC para humanos y un irradiador de <sup>60</sup>Co.

Con estos aceleradores se ponen a disposición de la comunidad investigadora herramientas de investigación únicas: técnicas IBA (Ion Beam Analysis) para la caracterización de materiales, técnicas de modificación e irradiación de materiales, irradiación con fotones, producción de radionucleidos PET (<sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>18</sup>F) y Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) de la que deriva un servicio de datación por <sup>14</sup>C mediante AMS. El desarrollo de las técnicas que ponemos a disposición de la comunidad investigadora se facilita por la existencia de laboratorios de investigación asociados para la preparación de muestras dotadas con material suficiente para llevar a cabo la mayoría de las preparaciones necesarias.

The CNA is a pioneering centre in Spain in the field of particle accelerators for research purposes. The first accelerator was installed at CNA in 1998 and nowadays three other accelerators and techniques associated to them are available and also two other facilities. Therefore, the CNA has 4 particle accelerators: a 3 MV van de Graaff Tandem Accelerator, a Cyclotron which supplies 18 MeV protons and 9 MeV deuterons, a 1 MV Cockcroft-Walton Tandem Accelerator used to mass spectrometry (called AMS) and a MiCaDaS (a small accelerator used to radiocarbon dating). The last facilities which have arrived at CNA are a Human Scanner PET/CT and a <sup>60</sup>Co Irradiator.

These accelerators provide a series of unique research tools to the scientific community: Ion Beam Analysis (IBA) for material characterization, modification and irradiation of materials, irradiation with photons, production of radionuclides (<sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>18</sup>F) for Positron Emission Tomography (PET) and the Accelerator Mass Spectrometer (AMS) that includes a <sup>14</sup>C dating service using AMS. At CNA, there are also research laboratories for sample preparation that facilitate the application of the presented techniques.

3. Infraestructuras / Facilities

#### 3.1 Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator

El primer acelerador que llegó al CNA fue un Tándem tipo Pelletron (Figura 3.1), modelo 9SDH-2, de National Electrostatics Corporation (NEC). Este acelerador está principalmente dedicado a la caracterización y modificación de materiales mediante el uso de técnicas IBA e implantación iónica, así como al estudio y desarrollo de instrumentación nuclear, fundamentalmente detectores de radiación.

Los iones se obtienen de tres fuentes de iones. Una está basada en el uso de radiofrecuencias (Alphatross) y genera iones negativos a partir de gases (H, He, N, ...). Otra es una fuente de bombardeo con cesio (SNICS) que genera iones negativos a partir de una muestra sólida. Y la más reciente de las tres es una fuente tipo Duoplasmatron, que es muy estable y proporciona un haz de alto brillo. Las fuentes están conectadas mediante distintos puertos a un deflector magnético que selecciona la masa deseada.

En un tanque de aceleración, mediante transporte mecánico de carga con pellets, se aceleran los iones seleccionados previamente, siendo el voltaje máximo en el terminal de 3 MV. Con el conjunto de herramientas necesarias, el haz de iones se dirige, focaliza y se monitoriza tras su paso por el acelerador. Al final de la línea experimental, el haz puede pasar directamente a la línea de 0° o puede ser desviado por un deflector magnético hacia una de las seis líneas de trabajo disponibles.

Para la detección de partículas y fotones se cuenta con detectores SiLi y LEGe de Canberra, un HPGe de Ortec, un detector de Nal(Tl) y detectores de Si de implantación iónica.

The first accelerator at CNA was a Pelletron 3 MV Tandem (Figure 3.1), model 9SDH-2, made by National Electrostatics Corporation (NEC). It is primarily focused on material characterization and modification by means of IBA techniques and ion implantation, as well as to the study and development of nuclear instrumentation, especially radiation detectors.

lons are produced by three ion sources. The first one is based on radiofrequency techniques (Alphatross) and generates negative ions from gases (H, He, N, ...). There is also a caesium sputtering source (SNICS) which produces negative ions from solid samples. The most recent one is a Duoplasmatron source, which is very reliable and provides a high-brightness beam. The sources are connected by ports to an injection magnet that selects the desired ion mass.

In the two-pellet chain tandem accelerator, the selected ions are accelerated with a maximum terminal voltage of 3 MV. The beam line, which is situated after the accelerator, includes several instruments for focusing, steering and monitoring the

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

beam. At the line end, the beam can pass directly to the 0° line or it can be deflected by the switcher magnet towards one of the five beam lines.

Photons and particles are detected using standard detectors: SiLi and LEGe from Canberra, an Ortec HPGe, a NaI(TI) detector and ion-implanted silicon detectors.



Figura 3.1: Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator

#### 3.1.1 Líneas de haz / Beam Lines

Actualmente, el acelerador Tándem dispone de seis líneas de haz disponibles para caracterizar y modificar materiales, así como para realizar investigaciones en Física Nuclear Básica.

A continuación, se da una breve descripción de las diferentes líneas (Figura 3.2):

<u>Línea de -30°: Línea de Física Nuclear Básica</u>. En esta línea se desarrollan y se prueban elementos de instrumentación nuclear (detectores, electrónica, etc.) que posteriormente se utilizarán en instalaciones internacionales de Física Nuclear.

<u>Línea de -15°: Microsonda Nuclear</u>. El sistema de focalización está fabricado por Oxford Microbeam Ltd. Con este sistema es posible incidir sobre la muestra con un haz de pocas micras. El modo de barrido permite obtener mapas elementales que dan a conocer la distribución espacial de concentraciones en la muestra. Las bobinas del sistema de barrido permiten un área máxima de barrido de 2.5x2.5 mm<sup>2</sup> para protones de 3 MeV.

3. Infraestructuras / Facilities

<u>Línea de 0°: Cámara multipropósito</u>. Esta cámara ha sido diseñada para realizar simultáneamente experimentos mediante RBS, PIXE, NRA y PIGE. Un conjunto de detectores de fotones y de partículas se usan para combinar todas estas técnicas IBA.

<u>Línea de 0°: Cámara de ionoluminsicencia</u>. Conectada a la cámara multipropósito, esta cámara de vacío está equipada con paredes revestidas de negro, un sistema calefactor, un monitor de control de temperaturas y un sistema de diagnóstico fotónico que permite realizar principalmente estudios de ionoluminiscencia. Además, varios puertos de acceso permiten la ubicación de detectores para realizar experimentos IBA con temperaturas hasta 500 °C.

<u>Línea de +15°: Cámara de irradiación</u>. Esta cámara diseñada en el CNA tiene como objetivo la irradiación de grandes superficies (16x20 cm<sup>2</sup>) barridas por el haz mediante un deflector magnético.

<u>Línea de +30°: Cámara de canalización</u>. Esta línea está principalmente dedicada al estudio mediante canalización iónica de muestras cristalinas. Mediante un sistema telescópico formado por un sistema de dos rendijas se consigue un haz paralelo muy bien definido. Cada una de las rendijas tiene cuatro componentes de tántalo.

Esta línea también incluye una Beam Profile Monitor (BPM) y una cámara de Faraday. La cámara está equipada con dos detectores de partículas y un detector de Rayos-X. El portamuestras está montado con un goniómetro de precisión que permite movimientos en los cuatro ejes, direcciones X e Y y dos ángulos de giro.

<u>Línea de +45°: Haz externo</u>. Los estudios de Arte y Arqueometría son el objetivo principal de esta línea. Debido a la heterogeneidad natural de este tipo de objetos, es obvio que el uso de un haz externo combinado con una buena resolución presenta grandes ventajas en el análisis.

Para obtener una buena resolución espacial (~ 60  $\mu$ m), se han adquirido un conjunto de elementos fabricados por Oxford Microbeams, incluida una abertura que se define con cuatro slits de precisión y una nariz de salida con un ajuste micrométrico.

At the present time, Tandem accelerator has six available beam lines to characterize and to modify materials, as well as for Nuclear Physics research.

A brief description of the different lines is given below (Figure 3.2):

<u>-30° Beam Line: Nuclear Physics Beam Line</u>. In this beamline different nuclear instrumentation (detectors, electronics, etc) is developed and tested. This instrumentation will be used in international Nuclear Physics facilities.

<u>-15° Beam Line: Microbeam Chamber</u>. The microprobe focusing system was manufactured by Oxford Microbeam Ltd. It is possible to form a spot of a few microns

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

on the specimen with this system. Elemental maps that provide the spatial distribution concentration in the samples are obtained with the scanning mode. The scanning coils allow a maximum scanning area of 2.5x2.5 mm<sup>2</sup> for 3 MeV protons.

<u>O° Beam Line: Multipurpose IBA Chamber</u>. This target chamber has been designed to carry out RBS, PIXE, NRA and PIGE experiments simultaneously. A set of gamma-particle and X-Ray detectors is used to combine all these IBA techniques.

<u> $0^{\circ}$  Beam Line: Ionoluminescence Chamber</u>. Linked to the multipurpose chamber, this vacuum chamber is equipped with black coating walls, a sample temperature heater, a control monitor and a photonic diagnostic system that allows mainly ionoluminescence studies. Furthermore, several access ports allow locating detectors to perform IBA experiments at temperatures up to 500 °C.



Figura 3.2: Líneas de haz / Beam lines

<u>+15° Beam Line: Irradiation Chamber</u>. This home-made scattering chamber has been designed to allow the irradiation of large areas (16x20 cm<sup>2</sup>) by raster scanning of the beam through magnetic deflection.

<u>+30° Beam Line: Channeling Chamber</u>. This line is primarily devoted to channeling analysis of crystalline samples. A well-defined parallel beam is obtained with a telescopic system formed by two slit assemblies, each one incorporating four independent tantalum slit elements.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

The beam line also includes a BPM and a Faraday cup. The chamber is equipped with two particle detectors and an X-Ray detector. The sample holder is mounted in a 4-axis klinger/microcontrol goniometer with X-tilt and Y-tilt angular positioning.

<u>+45° Beam Line: External Beam</u>. This line is mainly used in Art and Archaeometry studies. Due to the frequent inhomogeneous nature of this kind of objects, the use of external ion beam analysis (combined with a good resolution) exhibits numerous advantages.

With the idea of achieving good spatial resolutions (~ 60  $\mu$ m), a series of elements have been purchased from Oxford Microbeams, including a precision four-jaw object slit and an exit nozzle set with micrometer adjustment.

#### **3.1.2 Otras líneas / Other lines**

<u>Línea de baja energía</u>. La línea de baja energía o cámara de baja energía es una nueva cámara de vacío que se ha instalado en CNA.

Se encuentra ubicada a la salida de las fuentes de iones, justo después del imán inyector, y antes del tanque de aceleración. La línea está equipada con un manipulador lineal de transferencia para controlar la posición y la orientación de las muestras. Un conjunto de dos colimadores situados a la entrada de la cámara permiten obtener un tamaño de haz de 1 y 10 mm de diámetro, respectivamente.



Figura 3.3: Línea de baja energía / Low energy beamline

Esta línea empleará iones de energía mucho menor de la que se puede obtener con el acelerador Tándem, aprovechando directamente la energía de inyección de las fuentes de iones, típicamente entre 30 y 80 keV, y se utilizará en experimentos de

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

**3. Infraestructuras / Facilities** 

implantación iónica o en el análisis de materiales centelleadores mediante la técnica de ionoluminiscencia.

<u>Low energy beamline</u>. The low energy line or low energy chamber is a new vacuum chamber that has been installed at CNA.

It is located at the output of the ion sources, just after the injection magnet and before the acceleration tank. The line is equipped with a linear transfer manipulator to control the position and orientation of the samples. A set of two collimators allows obtaining an ion beam size of 1 and 10 mm of diameter, respectively.

This beamline will employ ions with energies between 30 and 80 keV, used for ion implantation experiments and for the analysis of scintillators materials by the ionoluminescence technique at low energies.

HISPANOS: la primera instalación de neutrones generados por acelerador en España. En los últimos años se ha instalado en la línea experimental de Física Nuclear Básica (FNB) la primera fuente de neutrones basada en haces de iones en España: HISPANOS (HISPAlis Neutron Source).



Figura 3.4: HISPANOS (HISPAlis Neutron Source)

En HISPANOS se emplean haces de protones o deuterio de baja energía para producir neutrones mediante reacciones nucleares. Es un método muy bien conocido, y de este modo, en HISPANOS, se producen neutrones epitérmicos (decenas de keV) a través de

la reacción <sup>7</sup>Li(p,n), rápidos (3-8 MeV) utilizando la reacción de fusión D(d,n), y térmicos (termalizando/moderando cualquiera de los anteriores).

Los neutrones epitérmicos tienen un gran interés en astrofísica para la medida de secciones eficaces de las reacciones implicadas en los procesos de la nucleosíntesis estelar y para la validación de datos nucleares para diferentes aplicaciones.

En cuanto a la fuente de neutrones rápidos, presenta un interés tanto en tecnología nuclear, como para caracterización de detectores e irradiación de componentes para tecnología aeroespacial.

Debido al potencial mostrado y al interés de la comunidad científico y tecnológica por el uso de HISPANOS, el CNA propuso y consiguió fondos para el proyecto "Línea de neutrones en el CNA" (ref. UNSE12-1E-2013) en la Convocatoria de Infraestructura Científico-Tecnológica del Ministerio de Economía y Competitividad. El proyecto consistió en la actualización del acelerador tándem para poder tener el primer y único haz pulsado de neutrones en España. Esto implica la instalación de un sistema de pulsado (chopper) y compresión (buncher) del haz de iones, además de la instalación de una nueva línea experimental dedicada a la investigación con haces pulsados de neutrones mediante la técnica de tiempo-de-vuelo, la nueva Línea de Neutrones (LN).

Los haces pulsados cubren una amplia variedad de campos dentro de la física nuclear. La pulsación añade información temporal a otras como son la precisión en la energía, en la dirección o en la posición. En particular, en el caso de la física de neutrones, la información del tiempo (time-of flight: TOF) transcurrido entre la producción de los neutrones y el momento en que uno de ellos induce una determinada reacción (sea sobre un blanco o sobre un detector) da información sobre la velocidad del neutrón y por tanto permite determinar su energía cinética.

La actualización del acelerador por parte de la empresa NEC (National Electrostatics Corp) ha finalizado durante 2018 con la completa instalación de la nueva línea experimental de neutrones situada a 0° respecto al tanque de aceleración del acelerador y el sistema de pulsado y compresión del haz. Las principales características de los haces de neutrones pulsados de HISPANOS se pueden resumir en:

- -Anchura temporal del pulso de protones, 1-3 ns.
- -Frecuencia del pulso variable: 2 MHz, 1 MHz, 750 kHz, 500 kHz, 250 kHz, y otros.
- -Distancia de tiempo de vuelo de los neutrones: desde 30 a 200 cm.
- -Rangos energéticos, sin termalizar, desde 100 eV a varios MeV.

<u>HISPANOS: the first accelerator-based neutron facility in Spain</u>. Few years ago the Spanish National Accelerator Lab (CNA) developed the first accelerator-based neutron facility in Spain, HiSPANOS (Hispalis Neutron Source).
Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

Low energy proton or deuterium ion beams are used at HISPANoS to produce neutrons by nuclear reactions. It is a very well-known method, and thus, is possible to deliver epithermal neutrons (tens of keV) by means of the <sup>7</sup>Li(p,n) reaction, fast neutrons with energy less than 9 MeV produced by D(d,n) fusion reaction, and thermal neutrons (thermalizing any of the above).

*Epithermal neutrons have a great interest in astrophysics for the cross section measurements of the reactions involved in the stellar nucleosynthesis processes and for the validation of nuclear data for different applications.* 

On the other hand, fast neutrons have interest in nuclear technology, as well as characterization of detectors and irradiation of components for aerospace technology.

Due to the interest of the international scientific and technological community to use HISPANOS, CNA got research funds for the project "Neutron Line at CNA" (ref. UNSE12-1E-2013). The project consisted of the tandem accelerator update to have the first pulsed neutron beam in Spain. This update includes the installation of the buncher and chopper system and a new experimental line (LN) dedicated to the pulsed neutron beams research through the time-of-flight technique.

The pulse adds temporal information to others such as the precision in the energy, in the direction or in the position. In particular, in the case of neutron physics, the information of the time (time-of-flight: TOF) between the production of the neutrons and the moment in which one of them induces an adequate reaction (in a target or in a detector) gives information about the speed of the neutron and therefore allows to determine its kinetic energy.

The accelerator update by the NEC (National Electrostatics Corp) company has been finished during 2018 with the installation of the new experimental neutron line located at 0<sup>o</sup> respect to the acceleration tank and the buncher and chopper system. The main characteristics of the pulsed neutron beams of HISPANOS can be summarized as follows:

-Protons pulse width, 1-3 ns.
-Variable pulse frequency: 2 MHz, 1 MHz, 500 kHz, 250 kHz and others.
-Neutron time of flight distance: from 30 cm to 200 cm.
-Energy range (without thermalizing) from 100 eV to several MeV.

# **3.1.3** Técnicas disponibles en el Acelerador Tándem 3 MV / Available techniques at 3 MV Tandem Accelerator

IBA es un término genérico que engloba un conjunto de técnicas específicas, de las cuales las principales son:

-Espectrometría de Retrodispersión Rutherford (RBS). -Análisis por Detección de Retrocesos Elásticos (ERDA).

**3. Infraestructuras / Facilities** 

-Análisis por Reacciones Nucleares (NRA). -Emisión de Rayos-y Inducidos por Partículas (PIGE). -Emisión de Rayos-X Inducidos por Partículas (PIXE).

Cuando una muestra se expone a un haz de iones, se inducen diferentes procesos atómicos y nucleares. Como fruto de estos procesos se generan varios productos, y cada producto aporta información sobre las propiedades del material (composición, estructura, etc.)

Las aplicaciones fundamentales de las técnicas IBA son:

<u>Espectrometría de Retrodispersión Rutherford (RBS).</u> La técnica de análisis RBS es multielemental y no-destructiva. Mediante RBS es posible conocer la composición elemental (estequiometría) sin estándar y obtener los perfiles elementales de concentración en profundidad. También pueden conocerse las impurezas superficiales y la distribución de impurezas en profundidad. Se pueden medir espesores de láminas delgadas y de interfases. Mediante el uso de Canalización-RBS se pueden determinar la localización de impurezas en la red de un monocristal, así como la distribución de defectos en profundidad en el mismo.

<u>Análisis por detección de retrocesos elásticos (ERDA).</u> Esta técnica se basa en los fundamentos físicos de la dispersión elástica. En ella se utilizan haces de iones pesados para recoger los núcleos ligeros en retroceso que salen de la muestra. ERDA es una técnica eficiente para obtener perfiles en profundidad con alta resolución.

Análisis por Reacciones Nucleares (NRA)/Emisión de Rayos-y Inducidos por Partículas (PIGE). Con el análisis mediante reacciones nucleares (NRA) se obtienen los perfiles en profundidad de elementos ligeros de forma no destructiva, y elementos como el H, D, Li, B, C, O y el F pueden ser analizados. Es una técnica complementaria al RBS, pero el análisis por reacciones nucleares es isotópicamente sensible. Entre los productos de una reacción nuclear puede aparecer radiación gamma, y entonces es posible realizar PIGE. PIGE se usa normalmente para medir Na, Mg, Al, Si y P.

<u>Emisión de Rayos-X Inducidos por Partículas (PIXE).</u> La técnica PIXE es no destructiva y se emplea para obtener información multielemental tanto de elementos mayoritarios como de elementos traza. Se combina con RBS para obtener de forma más precisa la caracterización de elementos con una Z intermedia hasta elementos pesados, y se combina con NRA y PIGE para estudiar elementos de Z < 12.

En estos últimos años hemos desarrollado dos nuevas técnicas de análisis no disponibles hasta ahora en el CNA, la Ionoluminiscencia (IL) y la Carga Inducida mediante Haz de Iones (IBIC). La IL consiste en el análisis de la luz emitida por un material bombardeado con un haz de iones y la IBIC permite estudiar propiedades de transporte en detectores semiconductores.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

**3. Infraestructuras / Facilities** 

Además de estas técnicas de análisis, se dispone de capacidad para la modificación de materiales. Esto ofrece posibilidades de trabajo muy atractivas. Hay que resaltar que la implantación iónica ha supuesto una revolución en campos como la microelectrónica, la metalurgia o la fabricación de implantes biológicos. La mayoría del trabajo llevado a cabo en este dominio ha sido realizado con pequeños aceleradores electrostáticos que aceleran los iones desde algunas decenas hasta algunas centenas de keV. Hoy en día, va tomando cada vez más interés la implantación a más altas energías (algunos MeV), permitiendo obtener perfiles de implantación más profundos. La línea de implantación del CNA permite realizar trabajos de irradiación de materiales para el posterior análisis de los efectos producidos por irradiación.

*IBA is a broad term that covers several specific techniques, mainly:* 

-Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS). -Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA). -Nuclear Reaction Analysis (NRA). -Particle Induced γ-Ray Emission (PIGE). -Particle Induced X-Ray Emission (PIXE) Analysis.

Different atomic and nuclear processes are induced when the samples are exposed to the ion beam. In these processes, several products are induced and each product provides information about material properties (composition, structure, etc.)

*The fundamental applications of the IBA techniques are:* 

<u>Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)</u>. RBS is a non-destructive and multielemental analysis technique. With RBS, it is possible to obtain elemental depth profiles and to determine elemental compositions (stoichiometry) without using standards. Furthermore, surface impurities and in-depth impurity distribution can be established. The thickness of thin films and interfaces can also be measured with RBS. On the other hand, the lattice location of impurities and the defect distribution depth profile in single crystalline samples are determined by Channelling-RBS.

<u>Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA).</u> This technique is based on the physical principles of elastic scattering. It requires heavier ions in the beam in order to recoil light nuclei from the sample. ERDA is an efficient technique for high resolution depth profiling.

<u>Nuclear Reaction Analysis (NRA)/ Particle Induced  $\chi$ -Ray Emission (PIGE).</u> Light-element depth profiles are obtained non-destructively with NRA and elements such as H, D, Li, B, C, O and F can be analyzed. This technique is complementary to RBS, but NRA is isotopically sensitive. It is possible to carry out PIGE if gamma radiation is one of the NRA products. PIGE is usually employed in Na, Mg, Al, Si and P measurements.

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

<u>Particle Induced X-Ray Emission (PIXE) Analysis.</u> PIXE is a non-destructive technique which is used to obtain multielemental information of trace elements and major elements. It is used jointly with RBS for accurate mass identification of medium to heavy elements with similar masses and with NRA and PIGE for the study of elements with Z < 12.

In the last years we have developed two new techniques not available at the CNA. The Ionoluminescence (IL), which analyses the light emitted by a sample bombarded with an ion beam and the Ion Beam Induced Charge (IBIC), which allows the study of transport properties in semiconductor detectors.

Besides these analysis techniques, the centre has capability for modification of materials. It should be highlighted that ion implantation has supposed a revolution in microelectronics, metallurgy or the manufacturing of biological implants. Most of the work in this field has been carried out with small electrostatic accelerators that accelerate ions from some tens to some hundreds of keV. Nowadays, the implantation at higher energies (some MeV) is becoming more and more important because it affords deeper implantation profiles. The CNA implantation line allows material irradiation work and the analysis of the effects produced by the bombardments.

**3.1.4** Laboratorios asociados al Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator Laboratories

El Centro Nacional de Aceleradores dispone de distintos laboratorios de investigación, así como de preparación de muestras asociados al Acelerador Tándem de 3 MV. A continuación, se describen los distintos laboratorios:

Laboratorio de Fluorescencia y Transmisión Gamma / X-Ray Fluorescence and Gamma-Ray Transmission Laboratory. Este laboratorio cuenta con una serie de fuentes radioactivas y de tubos de Rayos-X asociados a distintos proyectos del grupo de investigación de Física Nuclear Aplicada.

Este equipamiento está dedicado al estudio de diferentes objetos y materiales, especialmente en el campo del Arte y de la Arqueometría. Esto permite realizar análisis independiente o complementario a los análisis llevados a cabo en el acelerador Tándem.

Las dos técnicas de las que se dispone son Fluorescencia por Rayos-X (XRF) y Transmisión de Rayos-Gamma (GRT).

La técnica de Fluorescencia de Rayos-X, XRF, es una técnica no destructiva similar a PIXE pero de menor coste y con equipos portátiles. Permite conocer la composición elemental superficial de las muestras.

La técnica de Transmisión de Rayos-Gamma, GRT, es una técnica no destructiva complementaria tanto para XRF como, incluso, para PIXE. Basada en la atenuación que

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

sufren los rayos gamma al atravesar la muestra, proporciona información complementaria sobre la composición elemental volumétrica de dicha muestra.



Figura 3.5: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X y Transmisión de Rayos-Gamma / X-Ray Fluorescente and Gamma-Ray Transmission Laboratory

This laboratory utilizes radioactive sources and X-Ray tubes that are associated to several research projects of the Nuclear Applied Physics group.

This laboratory is devoted to the study of objects and materials, especially in the fields of Art and Archaeometry. The use of such equipment makes possible the analysis of materials independently or complementarily to the use of the Tandem accelerator.

*In this laboratory, two techniques are applied: XRF and GRT.* 

*X-Ray Fluorescence, XRF, is a non-destructive technique similar to PIXE but with portable equipment and low cost. It allows to know the superficial elementary composition of the sample.* 

Transmission Gamma-Ray Technique, GRT, is a non-destructive technique, such as XRF, and complementary to XRF and PIXE. It is based on attenuation which gamma rays suffer when they cross the sample and it give us complementary information about volumetric elemental composition of this sample.

<u>Laboratorio de Detectores / Detectors Laboratory</u>. El laboratorio de detectores (Figura 3.6) cuenta con una cabina de pesada para muestreo de la empresa TELSTAR.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities



Figura 3.6: Laboratorio de Detectores / Detectors Laboratory

Esta cabina es capaz de generar un ambiente de trabajo considerado limpio a través de un flujo de aire laminado que permite trabajar con detectores abiertos y manipular con más seguridad sus distintas piezas componentes, en un ambiente aislado, minimizando los riesgos de ruptura o contaminación de dichas piezas por distintos tipos de accidentes o por la presencia de impurezas en el ambiente. El laboratorio también cuenta con distintas equipos y herramientas para operar o montar partes de ciertos prototipos de detectores de partículas, principalmente los mini prototipos de detectores de electrones secundarios (SED) de gas a baja presión.

El objetivo es seguir equipando dichos laboratorios, en los próximos años, siguiendo las prioridades y necesidades del mismo, dentro de los presupuestos del CNA.

Detectors laboratory (Figure 3.6) has a weighing and protection cabinet by TELSTAR, capable of generating a considered working environment clean. A laminated airflow allows working with open detectors and manipulating with more security different parts inside an isolated environment. In that way, it can be minimized the risks of rupture or contamination of such parts by different types of accidents or by the presence of impurities in the environment. The laboratory also has different equipments and tools to operate or ride parts of certain prototypes of particle detectors, primarily mini prototypes of secondary electron detectors at low pressure (SED).

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

**3. Infraestructuras / Facilities** 

The aim is further equipping these laboratories in the coming years, according to priorities and needs, within the budgets of the CNA.

Laboratorio de Electrónica Multipropósito / Multipurpose Electronics Laboratory. Actualmente, el laboratorio dispone de un sistema básico de simulación de circuitos por ordenador, diseño e incluso montaje y reparación de placas de circuitos impresos (printed circuit boards-PCB), principalmente aquéllas referentes a electrónica que pueden ser probadas como parte de la instrumentación nuclear asociada a los detectores de partículas.

El laboratorio cuenta con un osciloscopio de última generación, con alta velocidad, frecuencia de muestreo y memoria, de la empresa Le Croy. También se ha adquirido una estación de soldadura versátil con extracción de humo acoplada. El laboratorio dispone de fuentes de alimentación y corriente, un generador de pulsos, además de la obtención de licencias para operar con distintos tipos de "software" en un ordenador instalado en el propio laboratorio.

Presently, the laboratory has got different systems for electrical simulations and design software, development of printed circuit boards (PCB), soldering, improvement and testing. In fact, it will be possible to implement all the steps for developing electronics front-ends for particle tracking detectors.

Nowadays, different electrical instrumentation, such as high speed and sampling oscilloscope, power supply, arbitrary function generator, millimetre, is available, in the multipurpose electronics laboratory at CNA. There is a digital soldering/desoldering station with fume extraction, too. Different cables and connectors may be used as well as a personal computer where electrical licensed software is installed.

Laboratorio de preparación de muestras del Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator Laboratory for sampling preparation. A pesar de que generalmente las muestras que se analizan por técnicas IBA no necesitan de una exhaustiva preparación, el laboratorio asociado al acelerador Tándem de 3 MV (Figura 3.7) dispone del equipamiento necesario para realizar diversos tratamientos a las muestras, previos a su estudio.

Entre el equipamiento propio del laboratorio cabe destacar: el molino de bolas, morteros de ágata y prensa para la molienda, homogeneización y prensado; una pulidora con diferentes paños para el pulido de muestras; y un horno para el calcinado de las mismas y una liofilizadora. Por otro lado, dispone de diversos productos químicos propios de laboratorio y patrones de referencia de diversa naturaleza, tales como material biológico, cenizas o suelos, entre otros.

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities



Figura 3.7: Laboratorio de preparación de muestras del Acelerador Tándem de 3 MV / 3 MV Tandem Accelerator Laboratory

Generally the samples which are measured by IBA techniques do not need exhaustive preparation. Nevertheless, the 3 MV Tandem Accelerator Laboratory (Figure 3.5) has the necessary equipment to carry out different treatments to the samples before they are studied.

The laboratory has own equipment such: a ball grinder, an agate mortars and a press for grinding, homogenization and pressing; a polisher with different laminas for the sample polishing; an oven for the sample calcining and a freeze drier. Also, the laboratory has various chemical products and reference standards, such as blood, ashes, soil...

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

#### **3.2 Ciclotrón / Cyclotron**

El Ciclotrón (Figura 3.8) fue el segundo acelerador de partículas que se instaló en el Centro Nacional de Aceleradores (año 2004). Este tipo de acelerador consigue acelerar iones en órbitas de radio y energía crecientes mediante la aplicación combinada de un campo eléctrico oscilante y de un campo magnético. Se trata de un ciclotrón Cyclone 18/9 fabricado por Ion Beam Applications (IBA, Bélgica), capaz de acelerar protones y deuterones a 18 y 9 MeV, respectivamente. Las intensidades de corriente máximas que pueden ser extraídas en el blanco son de 80  $\mu$ A ± 10% para protones y de 35  $\mu$ A ± 10% para deuterones.

Este acelerador permite la irradiación sobre un único blanco o simultáneamente con la misma partícula sobre dos blancos diametralmente opuestos (Dual Beam Mode). Este acelerador cuenta con ocho puertos de irradiación, de los cuales siete están dedicados a la producción de radionúclidos emisores de positrones. De esta forma, el CNA ofrece la posibilidad de producir los radioisótopos más empleados en la modalidad de imagen médica PET (Tomografía por Emisión de Positrones).



Figura 3.8: Ciclotrón 18/9 MeV del CNA / Cyclone 18/9 MeV at CNA

La descripción de los blancos dispuestos en los ocho puertos disponibles es la siguiente:

3. Infraestructuras / Facilities

1.- Blanco de gran volumen (2 ml) con agua enriquecida en <sup>18</sup>O en su interior ([<sup>18</sup>O]- $H_2O$ , pureza > 95% en <sup>18</sup>O), para producir <sup>18</sup>F en forma de [<sup>18</sup>F]-Fluoruro mediante la reacción <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F.

2-3.- Dos blancos de volumen grande (2 ml), con las cavidades fabricadas en niobio y rellenos de agua enriquecida en <sup>18</sup>O ([<sup>18</sup>O]-H<sub>2</sub>O, pureza > 95% en <sup>18</sup>O). Están destinados también a la producción de <sup>18</sup>F en forma de [<sup>18</sup>F]-Fluoruro mediante la reacción nuclear <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F.

4.- Blanco de 1,7 ml relleno de una mezcla agua-etanol para la obtención dentro del blanco de <sup>13</sup>N en forma de [<sup>13</sup>N]-Amoniaco mediante la reacción <sup>16</sup>O(p, $\alpha$ )<sup>13</sup>N.

5.- Blanco de 30 ml que contiene  ${}^{18}O_2$  y utilizado en la obtención de  ${}^{18}F$  en forma de  $[{}^{18}F]$ - $F_2$  mediante bombardeo con protones.

6.- Blanco gaseoso de 60 ml, en el que se bombardea una mezcla nitrógeno-oxígeno con protones para obtener <sup>11</sup>C en forma de [<sup>11</sup>C]-CO<sub>2</sub> mediante la reacción <sup>14</sup>N( $p,\alpha$ )<sup>11</sup>C.

7.- Blanco de 60 ml relleno de una mezcla nitrógeno-oxígeno para la obtención de  ${}^{15}$ O en forma de [ ${}^{15}$ O]-O<sub>2</sub> mediante la reacción  ${}^{14}$ N(d,n) ${}^{15}$ O.

8.- En el último puerto existe una ventana de salida de haz en la que se ha instalado una línea que transporta el haz de partículas a una segunda sala blindada donde se ubica una cámara de reacción para la irradiación de materiales de interés tecnológico.

The Cyclotron (Figure 3.8) was the second particle accelerator installed at CNA (year 2004). In this accelerator, ions are accelerated through the combined application of an electric and a magnetic field. It was manufactured by IBA (Belgium) and it accelerates protons and deuterons to 18 and 9 MeV, respectively. The extracted maximum beam intensities in the internal target ports are 80  $\mu$ A ± 10% for protons and 35  $\mu$ A ± 10% for deuterons.

The Cyclone 18/9 allows the simultaneous bombardment with the same particle of one or two targets that are located in opposite positions (Dual Beam Mode). Seven out of the eight targets are devoted to the production of positron emitters. Thus, CNA offers the possibility to produce the most frequent radioisotopes employed in the imaging modality Positron Emission Tomography (PET).

This is the description of the available targets at the CNA Cyclotron:

1.- Large-volume target (2 ml) filled with <sup>18</sup>O-enriched water ([<sup>18</sup>O]-H<sub>2</sub>O, purity > 95% in <sup>18</sup>O). It is used for the production of <sup>18</sup>F as [<sup>18</sup>F]-Fluoride through the <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F nuclear reaction.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

2-3.- Two large-volume targets (2 ml) with the cavities made of niobium and filled with <sup>18</sup>O-enriched water ([<sup>18</sup>O]-H<sub>2</sub>O, purity > 95% in <sup>18</sup>O). They are utilized for the production of <sup>18</sup>F as [<sup>18</sup>F]-Fluoride through the <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F nuclear reaction.

4.- 1.7 ml target filled with an ethanol-water mixture for the in-target production of  ${}^{13}N$  in the form of  $[{}^{13}N]$ -Ammonia using the  ${}^{16}O(p,\alpha){}^{13}N$  nuclear reaction.

5.- 60 ml target containing  ${}^{18}O_2$  gas used to produce  ${}^{18}F$  as  $[{}^{18}F]$ - $F_2$  by protons bombardment.

6.- 60 ml target, where a nitrogen-oxygen mixture is bombarded with protons, obtaining <sup>11</sup>C as [<sup>11</sup>C]-CO<sub>2</sub> through the <sup>14</sup>N( $p,\alpha$ )<sup>11</sup>C nuclear reaction.

7.- 60 ml target filled with a nitrogen-oxygen mixture and used to produce  ${}^{15}O$  as  $[{}^{15}O]$ -  $O_2$  by means of the  ${}^{14}N(d,n){}^{15}O$  nuclear reaction.

8.- Finally, there is an exit line (Experimental Beam Line) in the last target port which transports the beam line to a second vault. A reaction chamber devoted to the irradiation of technological materials is located in this second room.

#### **3.2.1** Línea de Haz de Experimentación / Experimental Beam Line

Los trabajos que requieren el uso de protones y deuterones, con energía superior a 6 MeV, han de llevarse a cabo en la línea de transporte de haz del Ciclotrón (Figura 3.9). Hasta el año 2010, se había trabajado en vacío ensamblando la línea móvil de irradiación e implantación que puede ser acoplada tanto al Acelerador Tándem de 3 MV como al Ciclotrón.



Figura 3.9: Línea de haz externo del Ciclotrón / Cyclotron external ion beam line

En 2010 se realizaron una serie de modificaciones en dicha línea conducentes a ampliar la versatilidad de este acelerador. En cuanto a la energía de las partículas, el Ciclotrón compacto está limitado a suministrar protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV. Se ha instalado una línea de haz externo propiamente dicho, ya que el haz de

3. Infraestructuras / Facilities

partículas sale al aire antes de incidir sobre el blanco, como puede apreciarse en la Figura 3.10.



Figura 3.10: Línea de haz externo / External beam line

Desde el punto de vista analítico, esto presenta algunas ventajas respecto al uso de una cámara de vacío, como la disminución del fondo en los espectros de Rayos-X adquiridos mediante la técnica PIXE. Por otro lado, el montaje de algunos experimentos de irradiación se simplifica, la temperatura que se alcanza en el blanco es inferior que trabajando en vacío y el tamaño de las muestras a irradiar no está limitado por el de la cámara. Sin embargo, se dificulta la monitorización de la densidad de corriente del haz y en muchos casos hay que realizar medidas indirectas a través de calibración. En caso de trabajar con flujos de partículas en torno a microamperios, se hace una lectura directa de la corriente en diferentes colimadores de grafito y/o en el propio blanco. Para la medida de flujos muy bajos se utilizan detectores de partículas o de centelleo.

La línea es sencilla y versátil, pudiendo ser modificada con los elementos necesarios para cada ensayo sin mucha dificultad. Se encuentra acoplada a la línea fija del ciclotrón y en la terminación se pueden intercambiar varios colimadores con ventanas de distintos materiales adaptables a cada trabajo. Esto resulta muy interesante, ya que las muchas aplicaciones que tiene conllevan muy diferentes necesidades experimentales (energía, flujo, tamaño de haz...) implicando el uso de diversos

3. Infraestructuras / Facilities

dispositivos de degradación del haz y/o de diagnóstico. Aunque no existe posibilidad de barrido, permite tener un rango variado de áreas de irradiación, ya que se puede ajustar jugando con el material de la ventana de salida y la distancia del blanco.

The research which requires the use of protons and deuterons, with energies above 6 MeV, must be carried out in the Cyclotron beam transport line (Figure 3.9). Until 2010, it had worked in vacuum coupling the portable irradiation and implantation line. This line can be fixed to both, the 3 MV Tandem Accelerator and the Cyclotron. At 2010, it had been a number of changes in the line leading to expand the versatility of this accelerator. Regarding the energy of the particles, the compact Cyclotron is limited to supply 18 MeV protons and deuterons of 9 MeV. In 2010, a "true" external beam line has been installed, as the particle beam goes to the air before impacting on the target, as shown in Figure 3.10.

From the analytical standpoint, this presents some advantages over the use of a vacuum chamber, such as the low background X-Ray spectra obtained by PIXE technique. On the other hand, the assembly of some irradiation experiments is simplified, the temperature reached in the target is lower than working in vacuum, and the size of the samples to be irradiated is not limited by the chamber dimensions. However, it is difficult to monitor the beam current density and in many cases is necessary to do indirect measurements through calibration. When working with particles fluxes around microamps, a direct reading of current in different graphite collimators and/or the target itself is done. To measure very low fluxes, particle or scintillation detectors are used.

The line is elementary and versatile; it can be modified with the necessary elements for each investigation without much complexity. This is now coupled to the fixed line of the Cyclotron and there are various sizes collimators available, where can be adapted different materials windows according to the study concerned. This is very interesting, since the many applications imply very different experimental needs (energy, flux, beam size ...) involving the use of various devices for the beam degradation and/or diagnosis. Although there is not possibility of scanning, it allows for a diverse range of irradiation areas by playing with the material of the exit window and the target distance.

En lo referente a la obtención de haces con distintos valores de energía, se ha diseñado y fabricado un sistema de degradadores variables. Se trata de un carrusel, acoplado a la línea de vacío, donde se pueden introducir hasta cuatro láminas simultáneamente y son fácilmente intercambiables (Figura 3.11). La naturaleza y espesor de las láminas que se coloquen permite abrir el abanico de valores de LET (Linear Energy Transfer) que pueden obtenerse con la irradiación de protones y deuterones. Por tanto es posible llevar a cabo experimentos, tanto en vacío como en aire, por debajo de los 18 MeV. Como puede apreciarse, no existe una configuración permanente de esta línea ya que no hay muchos componentes fijos. En este sentido, ésta es una línea "viva".

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

Recientemente se ha diseñado e instalado un portamuestras motorizado que permite cambiar de punto de análisis y/o de muestra desde la sala de control, sin necesidad de acceder al búnker de la línea. Esto último es una gran ventaja ya que evita los tiempos de espera relacionados con el enfriamiento de las partes de la línea que pueden quedar activas tras cada irradiación. La precisión del movimiento en las dos direcciones perpendiculares al haz es de  $\pm$  80 µm.

Concerning the possibility to obtain beams with different energy values, it has been designed and manufactured a variable degraders system. It is a carousel, assembled to the vacuum line, where it is possible to introduce up to four films simultaneously which are easily interchangeable (Figure 3.11). The variability in the nature and thickness of the sited foil open the range of LET (Linear Energy Transfer) that can be obtained with protons and deuterons irradiation. It is therefore feasible to carry out experiments, both in vacuum and air, below 18 MeV. As can be seen, there is not a permanent configuration for this line, not many fixed components. In this sense it is an "alive" line.

Recently, has been designed and installed a sample motorized sample-holder. This system avoids going into the beamline vault to change the point under analysis because it is possible to do that from the control room. With this new sample-holder the experiments are less time consuming because it is no necessary to wait for the decay of the activate pieces after irradiations. The movement accuracy is of  $\pm$  80  $\mu$ m in the both beam perpendicular directions.



Figura 3.11: Carrusel de láminas para variar la energía del haz / Carousel of sheets to vary beam energy

**3. Infraestructuras / Facilities** 

#### **3.2.2** Laboratorios asociados al Ciclotrón / Cyclotron Laboratories

Laboratorios de Radiofarmacia / Radiopharmacy Laboratories. Fueron diseñados para trabajar bajo las normas de buenas prácticas de fabricación farmacéutica (normas GMP). En la actualidad, se dispone de un laboratorio denominado "de producción de <sup>18</sup>F-FDG" y de otro "de investigación" donde se preparan radiofármacos PET para ensayos clínicos y preclínicos. Estos dos laboratorios son complementados por el laboratorio de control de calidad, donde se analiza la calidad de los radiofármacos sintetizados siguiendo los requerimientos de la Farmacopea. Tras haber obtenido las correspondientes autorizaciones de los Ministerios de Industria (como instalación radioactiva) y de Sanidad (como laboratorio farmacéutico), y dentro del marco de acuerdo con la empresa farmacéutica Curium, se comenzó la fabricación y distribución de [<sup>18</sup>F]-(2-fluoro-2-desoxi-D-glucosa) (FDG) al propio CNA y a centros externos (Andalucía, Castilla-La Mancha, Portugal) a partir de mayo de 2005.

El Laboratorio de Producción de FDG (Figura 3.12) dispone de dos celdas blindadas fabricadas por Comecer (Castel Bolognese, Italia) que albergan sendos módulos dobles de síntesis GE Tracerlab FX-FDG. Existe también una celda de fraccionamiento y dispensación aséptica de monodosis de FDG, donde se fabrica la especialidad farmacéutica "Flucis" bajo el registro de CisBio.

El Laboratorio de Investigación dispone de cinco celdas blindadas Comecer en las que se sintetizan otros radiofármacos de interés para el estudio de procesos metabólicos o funcionales ([<sup>18</sup>F]-FDOPA, [<sup>18</sup>F]-Fluorotimidina ([<sup>18</sup>F]-FLT), [<sup>18</sup>F]-Fluoromisonidazol ([<sup>18</sup>F]-FMISO), [<sup>18</sup>F]-Fluoruro sódico ([<sup>18</sup>F]-NaF), [<sup>11</sup>C]-Colina, [<sup>11</sup>C]-Metionina, [<sup>13</sup>N]-Amonio, [<sup>15</sup>O]-Agua, etc... La configuración de este laboratorio es la siguiente:

1.- Celda de síntesis de compuestos marcados con carbono-11, en la que se encuentra un módulo GE Tracerlab FX-C. La metilación de distintos grupos funcionales (aminas, alcoholes, tioles, ácidos carboxílicos) con ioduro de metilo radiactivo ([<sup>11</sup>C]-MeI) es el modo más común de producir radiofármacos marcados con carbono-11. El módulo permite la metilación de gran número de moléculas orgánicas.

2.- Celda de síntesis de compuestos marcados con flúor-18 que alberga el módulo GE Tracerlab FX-FE. Este módulo de síntesis emplea [<sup>18</sup>F]-F<sub>2</sub> o [<sup>18</sup>F]-Hipofluorito de acetilo ([<sup>18</sup>F]-CH<sub>3</sub>COOF) para marcar alquenos y compuestos aromáticos ricos en electrones por sustitución electrofílica.

3.- Celda de síntesis de [<sup>15</sup>O]-H<sub>2</sub>O y de recogida de [<sup>13</sup>N]-NH<sub>3</sub>. El [<sup>15</sup>O]-H<sub>2</sub>O es un radiotrazador empleado para la determinación y cuantificación del flujo sanguíneo. El oxígeno radiactivo procedente del ciclotrón está en forma molecular ([<sup>15</sup>O]-O<sub>2</sub>), reacciona en la celda de síntesis con hidrógeno y paladio a 150 °C para obtener [<sup>15</sup>O]-H<sub>2</sub>O. Por otro lado, el [<sup>13</sup>N]-Amonio se utiliza en PET para estudios de perfusión miocárdica.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

Este radiofármaco se obtiene directamente en el blanco del ciclotrón mediante la irradiación con protones de una mezcla de agua y etanol. Posteriormente, el [<sup>13</sup>N]-Amonio es atrapado en la celda mediante una unidad de recogida.

4.- Celda de síntesis de compuestos marcados con flúor-18 mediante el módulo GE Tracerlab FX-FN. En este caso, el flúor-18 se utiliza en forma de [<sup>18</sup>F]-Fluoruro ([<sup>18</sup>F<sup>-</sup>]), en el marcaje de moléculas por sustitución nucleofílica.

Existe también una celda en la que se llevan a cabo labores de dispensación y fraccionamiento de muestras, además de posibilitar la ejecución de radiosíntesis manuales.

En la misma sala limpia se ubica una campana de flujo laminar vertical, para la preparación aséptica de reactivos.



Figura 3.12: Laboratorio de Producción de FDG / FDG Production Laboratory

The laboratories were designed to comply with Good Manufacturing Practices (GMP) regulations. At the present time, the unit is composed of an "<sup>18</sup>F-FDG Production Lab" and a "Research Lab" where PET radiopharmaceuticals are prepared for clinical and preclinical studies. These two laboratories are complemented by a quality control laboratory, where the quality of the synthesized radiopharmaceuticals is analyzed according to Pharmacopeia protocols.

3. Infraestructuras / Facilities

The production of 2-deoxy-2-[<sup>18</sup>F]-Fluoro-D-glucose ([<sup>18</sup>F]-FDG) at CNA began in 2005 as part of a contract agreement with IBA Molecular and after receiving the authorizations by the Ministry of Industry (as radioactive facility) and the Ministry of Health (as a pharmaceutical laboratory). [<sup>18</sup>F]-FDG is currently distributed to CNA and to hospitals in Andalucía, Castilla-La Mancha and Portugal.

The FDG Production Lab (Figure 3.12) has two hot cells made by Comecer (Castel Bolognese, Italy) that hold two double GE Tracerlab FX-FDG synthesis modules. There is also a fractioning and dispensation cell, where single-dose FDG is made under the "Flucis" CisBio registry. The Research Lab has five Comecer hot cells where radiopharmaceuticals that trace metabolic or functional processes ([<sup>18</sup>F]-FDOPA, [<sup>18</sup>F]-FLT, [<sup>18</sup>F]-Fluoromisonidazol ([<sup>18</sup>F]-FMISO), sodium-[<sup>18</sup>F]-fluoride, [<sup>11</sup>C]-Choline, [<sup>11</sup>C]-Methionine, [<sup>13</sup>N]-Ammonia, [<sup>15</sup>O]-Water, etc.) are synthesized. The configuration of this laboratory is:

1.- Synthesis cell with a GE Tracerlab FX-C module for carbon-11 labeled compounds. The methylation of different functional groups (amines, alcohols, thiols, carboxylic acids) with radioactive methyl iodide ([<sup>11</sup>C]-MeI) is the most common method to label molecules with carbon-11. The synthesizer allows the methylation of numerous organic molecules.

2.- Synthesis cell with a GE Tracerlab FX-FE module for fluorine-18 labeled compounds. This module uses  $[{}^{18}F]$ - $F_2$  or  $[{}^{18}F]$ -Acetyl hypofluorite ( $[{}^{18}F]$ -CH<sub>3</sub>COOF) to label electronrich alkenes and aromatic compounds by electrophilic substitutions.

3.- Cell for  $[^{15}O]$ -H<sub>2</sub>O synthesis and  $[^{13}N]$ -NH<sub>3</sub> collection.  $[^{15}O]$ -Water is a radiotracer utilized in the determination and quantification of blood flow. The radioactive oxygen coming from the cyclotron is in the form of  $[^{15}O]$ -O<sub>2</sub>, which is mixed in the hot cell with hydrogen and palladium at 150 °C to obtain  $[^{15}O]$ -H<sub>2</sub>O. On the other hand,  $[^{13}N]$ -Ammonia is used in PET for perfusion studies.

This radiopharmaceutical is directly produced in the cyclotron target by irradiating a water-ethanol mixture with protons. Finally, [<sup>13</sup>N]-Ammonia is trapped in the cell using a collection unit.

4.- Synthesis cell with a GE Tracerlab FX-FN module for fluorine-18 labeled compounds. In this case, fluorine-18 is used as [<sup>18</sup>F]-Fluoride [<sup>18</sup>F], which participates in nucleophilic substitution reactions.

There is also a hot cell for sample fractioning and dispensation that can also be used for manual radiosyntheses.

In the same clean room there is a vertical laminar flow cabinet to prepare reagents aseptically.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

Laboratorio de Control de Calidad / Quality Control Laboratory. La pureza química y radioquímica de los compuestos marcados se evalúa mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y cromatografía en capa fina (TLC).

La pureza radionucleídica es comprobada con un espectrómetro gamma y la presencia de disolventes residuales en los radiofármacos se realiza mediante cromatografía de gases (Figura 3.13).

It contains all the necessary equipment to certify the satisfactory quality of the synthesized products (Figure 3.13).

The chemical and radiochemical purity of compounds is assessed with High Performance Liquid Chromatography (HPLC) and Thin Layer Chromatography (TLC). The radionucleidic purity is evaluated with a gamma spectrometer and the presence of residual solvents in the radiopharmaceuticals is analyzed with gas chromatography.



Figura 3.13: Laboratorio de Control de Calidad / Quality Control Laboratory

Laboratorio para desarrollo de investigación básica y experimentación de nuevos trazadores PET / Basic research and synthesis new PET tracers Laboratory. El laboratorio cuenta con una central de gases de Argón así como la preinstalación de 4 módulos con dispensador de gases de alta pureza de N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> dirigidos a una campana extractora.

**3. Infraestructuras / Facilities** 

La pureza química de los compuestos marcados se evalúa mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). La cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) consta de bomba analítica de gradiente cuaternario, totalmente programable y con sistema de inyección automático. Consta de tres detectores, UV, con un amplio rango de trabajo y alta resolución que permite la obtención precisa de espectros UV en determinación de compuestos principales e impurezas. Posee además detector amperomético y detector de conductividad para cromatografía iónica de alta sensibilidad y extrema estabilidad. El equipo es programable con control desde el teclado o mediante software, con gran versatilidad, permitiendo la monitorización en tiempo real de espectros y la dispensación de fase líquida. El HPLC dispone de un detector de conductividad para cromatografía iónica software ۷ de adquisición/tratamiento de datos.

El laboratorio contiene el equipamiento necesario para permitir el desarrollo de nuevas líneas de síntesis de radiofármacos PET y que la calidad de los productos sintetizados sea satisfactoria.



Figura 3.14: Laboratorio para desarrollo de investigación básica y experimentación de nuevos trazadores PET / Basic research and synthesis new PET tracers Laboratory

The laboratory a has central argon gas system and the pre-installation of 4 modules with high purity gases  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  and  $O_2$ .

The chemical purity of labeled compounds is evaluated by high performance liquid chromatography (HPLC). The high performance liquid chromatography (HPLC) analytical comprises a quaternary gradient pump which is fully programmable, an

3. Infraestructuras / Facilities

automatic injection system, injection reproducibility and a detector with a wide working range and high resolution which allows obtaining accurate determination of UV spectra of major compounds and impurities. HPLC is highly sensitive and extremely stable. HPLC is programmable to be controlled from the keyboard or by software, with great versatility and allows real time monitoring of the spectra and dispenser of liquid phase. HPLC contains conductivity detector for ion chromatography and software acquisition / data processing.

The quality control laboratory contains the equipment necessary to enable the development of new lines of synthesis of PET radiopharmaceuticals and the quality of the synthetic products is satisfactory.

#### 3.2.3 Radiofarmacia e Imagen Molecular / Radiopharmacy and Molecular Imaging

En la Unidad de Radiofarmacia sintetizamos radiofármacos para investigación preclínica en pequeños animales de experimentación. Actualmente se está implantando la normativa GMP y la validación de los procesos de síntesis para pasar de la investigación preclínica a la clínica. Entre los radiofármacos para investigación en pequeños animales, en el CNA producimos [<sup>18</sup>F]-Fluorotimidina ([<sup>18</sup>F]-FLT), que es un marcador de proliferación celular, [<sup>18</sup>F]-Fluoromisonidazol ([<sup>18</sup>F]-MISO) trazador de hipoxia, útil en estudios de hipoxia tumoral e hipoxia inducida por traumatismos, [<sup>11</sup>C]-Metionina para diagnóstico y seguimiento de tumores cerebrales, [<sup>11</sup>C]-Colina para cáncer de próstata y [<sup>18</sup>F]-Tetrafluoroborato sódico ([<sup>18</sup>F]-TFB) para el estudio de patologías tiroideas.

También disponemos en el CNA de radiofármacos autorizados, disponibles para investigación clínica en el tomógrafo PET/TAC de humanos, como la [<sup>18</sup>F]-Fludesoxiglucosa ([<sup>18</sup>F]-FDG), marcador de metabolismo glicídico, la [<sup>18</sup>F]-Fluorometilcolina para estudio de cáncer de próstata y la [<sup>18</sup>F]-DOPA, radiofármaco PET para el estudio de la Enfermedad de Parkinson y tumores neuroendocrinos.

Además de estos radiofármacos PET ya conocidos, desarrollamos métodos de marcaje de moléculas nuevas. Mediante sustitución nucleofílica con [<sup>18</sup>F<sup>-</sup>] podemos marcar moléculas de interés para la industria farmacéutica u otros grupos de investigación que deseen hacer estudios de biodistribución de su compuesto por imagen molecular. Con este mismo fin podemos marcar sustancias por otra ruta sintética; la metilación con ioduro de metilo radiactivo [<sup>11</sup>C]-MeI y metiltriflato radiactivo [<sup>11</sup>C]-MeTF.

La Unidad de Radiofarmacia del CNA es la primera Unidad de Radiofarmacia autorizada de Andalucía. La autorización por parte de la Consejería de Salud es requisito imprescindible para cumplir la legislación que regula el uso clínico de los radiofármacos PET de investigación, es decir, aquellos radiofármacos PET no producidos industrialmente y exentos de autorización de la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS). Actualmente están validados para uso clínico la [<sup>18</sup>F]Fluorotimidina, marcador PET de proliferación celular, y el [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazol, marcador de hipoxia. El uso clínico de los radiofármacos PET de investigación

3. Infraestructuras / Facilities

potenciará enormemente el diagnóstico y teragnosis por imagen molecular, fundamentalmente en oncología y neurología.



The Radiopharmacy Unit produces radiopharmaceuticals for preclinical investigation in little animals. Nowadays we are implementing the GMP rules y validating synthesis processes to go to the clinical practice. Among the radiotracers for little animals, we produce [<sup>18</sup>F]-Fluorothymidine ([<sup>18</sup>F]-FLT), cellular proliferation PET tracer, [<sup>18</sup>F]-Fluoromisonidazol ([<sup>18</sup>F]-FMISO) for hypoxia, tumoral and trauma-induced hypoxia, [<sup>11</sup>C]-Methionine for brain tumors, [<sup>11</sup>C]-Choline to study prostate cancer, and sodium [<sup>18</sup>F]-Tetrafluoroborate ([<sup>18</sup>F]-TFB) for thyroid pathologies.

We also have authorized radiopharmaceuticals for clinical research at the human PET/CT scanner, like the [<sup>18</sup>F]-Fludeoxyglucose ([<sup>18</sup>F]-FDG) for glicidic metabolism, [<sup>18</sup>F]-Fluoromethylcholine, to study prostate cancer and [<sup>18</sup>F]-FDOPA for Parkinson Disease and neuroendocrine tumors.

We apply also custom-made PET tracers for drug biodistribution studies. We develope synthesis methods to label new molecules for pharmaceutical industries or investigation groups, which are interested in molecular imaging of their compounds. The most common methods we use are nucleofilic substitution with  $[^{18}F]$  and radioactive methylation with methyl iodide  $([^{11}C]-MeI)$  and methyl-triflate  $([^{11}C]-MeTF)$ .

3. Infraestructuras / Facilities

The unit of radiopharmacy of the CNA is the first unit of radiopharmacy authorized of Andalusia. Authorization from the Ministry of health is required to comply with the legislation regulating the clinical application of PET radiopharmaceuticals of research, *i.e.*, those not produced industrially PET radiopharmaceuticals and exempt from authorization of the Spanish Agency of Medicines and Health Products (AEMPS). The [<sup>18</sup>F]Fluorothymidine, PET marker of cell proliferation, and the [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazole marker of hypoxia are currently validated for clinical use. The clinical application of PET radiopharmaceuticals of research will greatly boost diagnosis and teragnosis by molecular imaging, primarily in Oncology and Neurology.

#### 3.2.4 Tomógrafo PET y TAC para pequeños animales / Small animal PET and CT

El CNA dispone de un tomógrafo PET para pequeños animales modelo Mosaic y fabricado por Philips (Figura 3.15). El sistema de detección del aparato está basado en 14456 cristales de GSO (ortosilicato de gadolinio activado con cerio, Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>:Ce) de dimensiones 2x2x10 mm<sup>3</sup> y distribuidos en 52 anillos con 278 cristales cada uno. Los cristales de GSO están pegados a una guía de luz continua de 1,2 mm de grosor y con ranuras de una profundidad de 0,5 mm. Dichos cristales están conectados a un conjunto hexagonal de 288 tubos fotomultiplicadores que tienen un diámetro de 19 mm. El escáner trabaja exclusivamente en modo 3D y su resolución espacial en el centro es de 2,7 mm.



Figura 3.15 Sala del tomógrafo microPET y microTAC para pequeños animales / Small animal microPET and microCT

En octubre de 2008 quedó instalado un equipo de microTAC preclínico marca Bioscan, modelo NanoCT (instalado por Philips Sistemas Médicos). El sistema NanoCT es un tomógrafo TAC helicoidal, que opera a una tensión máxima de 65 kV, y ofrece

3. Infraestructuras / Facilities

imágenes con una resolución espacial mejor que 200 µm, con un campo de visión axial de 270 mm y transaxial de 76 mm. Este equipo se utiliza para la obtención de imágenes de pequeños animales o de objetos de interés tecnológico o arqueológico mediante tomografía axial computerizada (TAC) con Rayos-X.

El equipo dispone de camillas de exploración compatibles con las del tomógrafo PET Mosaic, de forma que permite la adquisición secuencial de imágenes PET/TAC de animales de experimentación. De esta forma, y tras la fusión de las imágenes obtenidas por ambas técnicas, permite obtener una imagen única multimodalidad, que engloba la información metabólica ofrecida por la tomografía PET con la información morfológica de la tomografía axial con Rayos-X.

The CNA small-animal PET scanner was made by Philips (model Mosaic, Figure 3.15). The detection system is based on 14,456 GSO crystals (Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>:Ce, gadolinium orthosilicate activated with cerium) with dimensions of 2x2x10 mm<sup>3</sup> and is arranged in 52 rings of 278 crystals each. The GSO crystals are glued to a continuous light guide with a thickness of 1.2 mm and 0.5 mm deep slots. The crystals are read out by a hexagonal array of 288 photo multiplier tubes (PMTs) with a diameter of 19 mm each. The scanner operates exclusively in 3D mode and the spatial resolution is 2.7 mm at the centre. The unit also has capability for housing up to thirty animals in environmentally controlled rooms.

In October 2008, a new preclinical microCT system (made by Bioscan, model NanoCT) was installed by Philips Medical Systems. The NanoCT system is a helical CT scanner which operates at 65 kV maximum voltage, obtaining images with a spatial resolution higher than 200  $\mu$ m. The scanner has an axial field of view (FOV) of 270 mm and a transaxial FOV of 76 mm. This unit will be used to obtain computed tomography (CT) images with X-Rays from small animals and objects of technological or archaeological interest.

The system is equipped with exploration beds that are fully compatible with the Mosaic PET scanner. Sequential image acquisition with both techniques (PET/CT) in experimental animals is thus possible and a unique multimodality PET/CT image is finally obtained. This single set of images combines PET metabolic and CT morphologic information.

# **3.2.5** Procesamiento de imágenes médicas clínicas y preclínicas / Clinical and preclinical medical image processing

El laboratorio dispone de programas de evaluación y análisis de imágenes TAC, PET y otras modalidades como RMI: Imalytics, Invivoquant 1.43 y PMOD 3.6. Dispone de contratos de mantenimiento que garantizan siempre la última versión del programa. Especialmente cuenta con PMOD, que desde 2014 consiste de los siguientes módulos: VIEW (operación básica con imágenes, procesamiento de los imágenes en serie, "batch"), KINETIC (modelización cinética de radiofármacos), PXMOD (mapas paramétricas pixel a pixel de modelos cinéticos), FUSION y FUSEIT (para fusión de

3. Infraestructuras / Facilities

imágenes de distintos modalidades y estandarización a las plantillas de los cerebros humano, rata, ratón y mono), SEGMENT (para segmentación de las imágenes según valores de los pixeles), 3D (para representación tridimensional de las imágenes), ALZHEIMER (evaluación de estado de paciente con signos clínicos de la enfermedad de Alzheimer en base de estudio de FDG-PET; la herramienta es para uso preclínico) y NEURO (delineación semiautomática de las regiones de interés según anatomía de los núcleos en imagen PET o RMI).

La aplicación de ese software permite el modelado avanzado de captación de radiosonda cinética, y el procesamiento avanzado de imágenes médicas. Un ejemplo de ello es un método pendiente de patente para predecir o pronosticar el riesgo de muerte o vasoespasmo de un paciente con hemorragia subaracnoidea descrita en la sección 4.3.2. Un diagrama de flujo típico para dicho proceso se muestra en la Figura 3.16.



Figura 3.16: Riesgo de muerte por vasoespasmo / Risk of death or vasospasm

The laboratory has several programs for the evaluation and analysis of CT, PET images and other modalities as MRI: imalytics, Invivoquant 1.43 and PMOD 3.6 for which has the maintenance contracts which allow to update always to the newest version of the program. The most used one, PMOD, has from 2014 the following modules: VIEW (basic operation with the images, batch image processing), KINETIC (kinetic modelling of the radiotracers), PXMOD (pixel by pixel parametric mapping of kinetic models), FUSION and FUSEIT (for fusion/overlay of the images of different modalities, normalization to brain templates of human, rat, mouse or macaque [cynomologus monkey]), SEGMENT (for image segmentation according to the pixel values), ALZHEIMER (evaluation of the patient with clinical signs of Alzheimer's disease based on FDG-PET scan; this is not a clinical tool), NEURO (semiautomatic delineation of the regions of interest of the brain according to nuclear anatomy in PET or MRI images).

The application of that software allows advanced kinetic radiotracer uptake modelling, and advanced medical image processing. An example of it is a patent-pending method

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

for predicting or predicting the risk of death or vasospasm of a patient with subarachnoid hemorrhage described in section 4.3.2. A typical workflow for such processing is shown in the Figure 3.16.

3. Infraestructuras / Facilities

#### **3.3 Tomógrafo PET/TAC para humanos / PET/CT human scanner**

Desde finales de 2011, el Centro Nacional de Aceleradores dispone de un escáner PET/TAC para humanos (Figura 3.17), lo que permite recibir pacientes en las instalaciones del CNA, concretamente en el Centro de Diagnóstico por Imagen del CNA (CDI). Se trata de un equipo Siemens Biograph mCT con detectores PET con un campo de vista axial de 162 mm, y detectores para TAC que permiten obtener imágenes de hasta 64 cortes.



Figura 3.17: Tomógrafo PET/TAC / PET/CT scanner

Este equipo permite la preparación de estudios muy flexibles desde (i) examen estándar PET/TAC de cuerpo completo hasta (ii) exámenes dinámicos PET con campo de visión mayor que un anillo detector por debajo de 3 s por cama, (iii) exámenes dinámicos TAC con campo de visión superior a 67 mm y por debajo de 1 s de resolución temporal, (iv) PET o TAC con gating respiratorio, (v) PET o TAC con gating cardiaco y (vi) adquisición PET en modo lista.

El escáner de humanos se encuentra instalado a pocos metros de los laboratorios de Radiofarmacia, lo que permite estudios con radiofármacos marcados con radioisótopos PET de semivida corta, como el <sup>11</sup>C.

3. Infraestructuras / Facilities

Se ha firmado un convenio con el Hospital Universitario Virgen del Rocío para el uso y soporte de Unidad del Diagnóstico Molecular de CNA.

Actualmente se hacen exámenes de los pacientes hospitalarios de interés científico durante tres días a la semana, quedando los dos días restantes disponibles con el servicio que proporciona personal cualificado (facultativos especialistas en Medicina Nuclear, personal de Enfermería y técnicos en imagen) para estudios en humanos propuestos por personal científico no hospitalario. Además de los estudios con pacientes, el escáner TAC se usa para exámenes de objetos de gran tamaño de patrimonio cultural (esculturas, etc.).

Since late 2011, the National Accelerator Centre has a PET/CT for humans (Figure 3.17), which allows receiving patients at CNA facilities, particularly in the Diagnostic Imaging Center of CNA (CDI). It is Siemens Biograph mCT with 162 mm axial field of view PET detectors combined with a 64-slices CT.

It allows very flexible study preparation from (i) standard whole body PET and CT scans to (ii) dynamic PET scans with field of view longer than one detector ring down to 3 s per bed, (iii) dynamic CT scans of up to 67 mm field of view and down to 1 s resolution, (iv) respiratory gated PET or CT scans, (v) cardiac gated PET or CT scans and (vi) flexible list mode acquisition in PET.

The human scanner shares its control room with that of a small animal PET and CT scanner. It is installed a few meters away from the radiopharmacy laboratory, which allows studies with short half-life PET radioisotopes, such as <sup>11</sup>C based radiopharmaceuticals.

There is an agreement with the University Hospital Virgen del Rocio to use and support the research facility in CNA.

Presently, Hospital patients of research interest are scanned at CNA three days per week, and for the remaining two days the Service provides the qualified staff (Nuclear Medicine specialists, nursery and technicians staff) for the human studies proposed by non-Hospital scientific personnel. Moreover, the CT scanner is used for examination of art large objects (sculptures, etc.)

3. Infraestructuras / Facilities

# 3.4 Acelerador Tandetrón de 1 MV con Espectrómetro de Masas (AMS) / 1 MV Tandetron Accelerator with Mass Spectrometer (AMS)

La Unidad de AMS del Centro Nacional de Aceleradores se origina en septiembre de 2005 con la llegada del sistema de Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) adquirido a la empresa holandesa High Voltage Engineering Europe. De este modo, se convierte en la única instalación de AMS en funcionamiento en España.

La espectrometría de masas con aceleradores es una técnica nuclear destinada a la detección de radionúclidos muy poco abundantes en la naturaleza. En concreto, se aplica a aquellos isótopos que son muy difíciles de detectar mediante técnicas radiométricas debido a que tienen una semivida muy grande. En AMS no se detecta la radiación que emiten estos isótopos sino la señal que ellos mismos producen en un detector nuclear después de haber sido seleccionados mediante campos eléctricos y magnéticos.



Figura 3.18: Carrusel de almacenamiento de muestras / Sample carousel

La presencia de un acelerador de partículas tipo tándem permite aumentar sensiblemente la energía de los iones hasta valores en el orden del MeV/uma. De este modo es posible utilizar propiedades nucleares para discriminar unos isótopos de otros. Además, en el stripper del acelerador se produce la rotura de las moléculas de la misma masa que el isótopo de interés, lo cual permite reducir aún más las interferencias. Estas cuestiones hacen que AMS posea una mayor sensibilidad que

**3.** Infraestructuras / Facilities

cualquier otra técnica de detección de radionúclidos, lo cual la hace eficaz en multitud de problemas científicos imposibles de abordar de otro modo.

Los núcleos que se pueden detectar mediante AMS son variados. En el caso de la instalación del CNA, el sistema, basado en un Acelerador Tándem de 1 MV, se diseñó originalmente para la medida de <sup>10</sup>Be, <sup>14</sup>C, <sup>26</sup>Al, <sup>129</sup>I e isótopos de Pu. En los últimos años el abanico de isótopos que se pueden detectar en la instalación de AMS del CNA ha aumentado sensiblemente. A los anteriormente mencionados se unen el <sup>41</sup>Ca, isótopos de Uranio (235, 236, 237 y 238), <sup>243</sup>Am y <sup>241</sup>Am y <sup>237</sup>Np. Asimismo, se han comenzado las pruebas para estudiar la capacidad del equipo para la detección de nuevos radioisótopos como el <sup>36</sup>Cl.

The AMS Unit of the Centro Nacional de Aceleradores was created in September 2005 right before the arrival of the Accelerator Mass Spectrometry (AMS) system acquired the Dutch company High Voltage Engineering Europe. Thus becomes the only facility of AMS in Spain.

Accelerator Mass Spectrometry is a nuclear technique for the detection of radionuclides which are in very small amounts in nature. In particular, it is applied to those isotopes which are very difficult to detect using radiometric techniques because they have a very long half-life. AMS does not detect radiation emitted by these isotopes, but the signal they produced in a nuclear detector after being selected by electric and magnetic fields.

The presence of a tandem particle accelerator can significantly increase the energy of the ions to values in the order of MeV/uma. This can be used to discriminate them from other isotopes by their nuclear properties. In addition, the accelerator stripper breaks the molecules of the same mass as the isotope of interest, which further reduces interference. These issues make AMS more sensitive than any other radionuclide detection technique, which makes it effective in many scientific problems cannot be met otherwise.

Nuclei detected by AMS are varied. The facility at CNA, based on a 1 MV Tandem Accelerator, was originally designed for the measurement of <sup>10</sup>Be, <sup>14</sup>C, <sup>26</sup>Al, <sup>129</sup>I and isotopes of Pu. In the last years, the set of radionuclides that can be detected in good conditions at CNA has increased sensitively. Radioisotopes as <sup>41</sup>Ca, Uranium (235, 236, 237 and 238), <sup>243</sup>Am, <sup>241</sup>Am and <sup>237</sup>Np have been added to the list above.

La técnica de Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS, del inglés *Accelerator Mass Spectrometry*) es una técnica ultrasensible que combina las técnicas de espectrometría de masas convencionales con un acelerador de partículas que permite dotar a las partículas de energías muy superiores a las habituales. Su aplicación fundamental es la detección de isótopos radiactivos de semivida muy larga y con muy escasa presencia en la naturaleza.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

En las técnicas de espectrometría de masas se analizan los componentes de un haz en virtud de su masa, energía y estado de carga, con la idea de cuantificar un tipo de partícula determinada, caracterizada por una masa específica. Para ello se utilizan diferentes filtros cinemáticos, basados en la aplicación de campos eléctricos y magnéticos y el comportamiento de las partículas cargadas en el seno de los mismos.

La sensibilidad está sin embargo limitada por la presencia de partículas con las mismas características cinemáticas que la partícula de interés, como por ejemplo moléculas de igual masa o isóbaros.

En AMS, se obtienen resultados mucho más sensibles debido a sus características más definitorias:

-Formación inicial de iones negativos. Esto elimina en ocasiones la presencia de interferentes que no son estables como ion negativo.

-Eliminación de moléculas. En el propio acelerador se produce un proceso de cambio de carga tras el que las partículas son positivas, y en el que las moléculas se disocian, de modo que los interferentes moleculares se reducen drásticamente.

-Uso de detectores nucleares. La mayor energía alcanzada por las partículas permite el uso de detectores nucleares con los que determinar la energía total de la partícula, o su poder de frenado. Con estos detectores se consigue una efectiva distinción isotópica.



Figura 3.19: Acelerador Tandetrón de 1 MV / 1 MV Tandetron Accelerator

**3. Infraestructuras / Facilities** 

Gracias a estos factores, con AMS se consiguen medidas extremadamente sensibles, varios órdenes de magnitud por encima de las técnicas espectrométricas de masas convencionales. Típicamente, las relaciones isotópicas determinadas mediante AMS (isótopo radiactivo/isótopo estable) están entre 10<sup>-12</sup>-10<sup>-15</sup>, es decir, la técnica es capaz de identificar una partícula entre mil billones. Los isótopos que habitualmente se determinan mediante AMS son, entre otros, <sup>10</sup>Be, <sup>14</sup>C, <sup>26</sup>Al, <sup>36</sup>Cl, <sup>41</sup>Ca, <sup>129</sup>I e isótopos de Pu.

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) is a highly sensitive technique that combines mass spectrometry with particle accelerators. The use of high energies makes possible the detection of radioactive isotopes with long half-lives. Mass spectrometry (MS) uses the fact that a charged particle follows a trajectory that depends on its mass and its charge. The use of kinematic filters based on magnetic and electrostatic fields makes possible the selection of the desired particles. However, its sensitivity is limited due to the existence of interferences such as molecules or isobars.

In AMS, the discrimination of the radioisotope under study and the interferences is possible thanks to the use of high energies. For example, elements that do not form negative ions are eliminated in the ion source. Molecules are broken in the tandem accelerator and isobars can be discriminated from its different stopping power in the ionization chamber.

Thanks to this, it is possible to reach very high sensitivities, several orders of magnitude over the traditional MS techniques. Typically, AMS determines isotopic ratios in the order of  $10^{-12}$ - $10^{-15}$  (radioactive isotope to stable isotope).

Durante los dos últimos años se ha sacado partido a las últimas mejoras realizadas en el año 2014 y puestas a punto durante 2015 y 2016. En concreto, dichas mejoras consistieron, en primer lugar, en el cambio de la estructura interior del acelerador para sustituir el stripper de Ar por He. Por otro lado, se instaló una nueva cámara de ionización diseñada en el ETH de Zúrich. Estas mejoras han permitido incrementar sensiblemente las prestaciones del sistema aumentando la sensibilidad (especialmente en la detección de isótopos como el <sup>10</sup>Be o el <sup>236</sup>U) y la eficiencia de detección, aspecto clave por ejemplo en la reducción del tiempo de medida y en la capacidad de medir en muestras con muy bajo contenido de los radioisótopos de interés.

During the last two years it has been possible to take advantage of the two important upgrades that were carried out in 2014 and optimized during 2015 and 2016. These consisted first on the modification of the inside structure of the accelerator to change the stripper gas from Ar to He. Secondly, the ionization chamber was changed for a new one designed and constructed at the ETH Zurich. These upgrades have allowed increasing both the sensitivity and the efficiency of the system, having an immediate positive impact in the capacity of the facility to detect the different isotopes, especially some of them as <sup>10</sup>Be and <sup>236</sup>U.

3. Infraestructuras / Facilities

# **3.4.1 Laboratorio asociado al Acelerador Tandetrón de 1 MV con Espectrómetro de Masas / AMS Laboratory**

En el laboratorio se trabaja con muestras para posteriormente poder medir los siguientes isótopos: <sup>129</sup>I, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>41</sup>Ca, <sup>36</sup>Cl, <sup>26</sup>Al, <sup>10</sup>Be y <sup>236</sup>U, entre otros. Para ello, y en función de la matriz en la que se encuentren los radioisótopos de trabajo, se utilizan diferentes métodos de preparación de las muestras, cuyo objetivo principal es aislar al máximo el isótopo de interés del resto de posibles interferentes para su futura medida por AMS.

Estos métodos pueden incluir entre otros procesos:

-Digestión.

- -Digestión ácida.
- -Digestión ácida con flujo de gas inerte.
- -Digestión por microondas.
- Separación mediante Resinas de intercambio iónico o extracción cromatográfica.

Finalmente, y después de la mayor purificación posible, las muestras se prensan en un cátodo de cobre o aluminio (en función del isótopo de interés).

En el laboratorio de preparación de muestras de AMS se lleva a cabo un esfuerzo continuo de actualización de los equipos para mejorar la metodología de modo que se aumente la eficiencia de preparación de las muestras y se reduzca al máximo la posibilidad de contaminación. Por esa razón en los últimos años se han adquirido nuevos equipos entre los que podemos destacar, en primer lugar, una prensa automática fabricada por lonplus para homogeneizar y acelerar el proceso de prensado. Además, se han adquirido sistemas de purificación de ácidos para aumentar su pureza y sistemas de purificación de agua para obtener agua destilada y agua Milli-Q a partir de la red.

We measure isotopes such as <sup>129</sup>I, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>41</sup>Ca, <sup>36</sup>Cl, <sup>26</sup>Al, <sup>10</sup>Be and <sup>236</sup>U, among others. According to the matrix in which radioisotopes are located, different sample preparation methods are used. Their main objective is to isolate the isotope of interest from other possible interfering particles during the AMS measurement.

These methods include, among others:

- -Digestion.
- -Acid digestion.
- -Acid digestion with an inert gas flow.
- -Microwave digestion.
- -lonic exchange resins.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

Finally, and after further possible purification, samples are pressed into a copper or aluminum cathode (depending on the isotope) in a parallel system to the radiocarbon laboratory.

A continuous effort is made at the AMS sample preparation laboratory in order to keep it updated to increase the efficiency and reduce the contamination probability to the optimum level. For this reason, different equipment has been acquired to fulfill these objectives. For example, a new automatic pressing system manufactured by lonplus is now used to homogenize the pressing step for all the samples. Also, the laboratory has acquired purification systems for acids, in order to improve their purity and also for water, to obtain distilled and Milli-Q water directly from the network.



Figura 3.20: Laboratorio de preparación de muestras para AMS / AMS sample preparation Laboratory

3. Infraestructuras / Facilities

## 3.5 Acelerador MiCaDaS / MiCaDaS Accelerator

El sistema MiCaDaS (Figura 3.21) es un instrumento para realizar Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS, del inglés Accelerator Mass Spectrometry), específico para el análisis de muestras de <sup>14</sup>C.

Su diseño y funcionamiento siguen el patrón básico de otras instalaciones de AMS como el propio sistema SARA en el CNA. Las muestras pueden ser sólidas o gaseosas, y en la fuente de iones el material es bombardeado con iones de Cs<sup>+</sup> para producir un haz de iones negativos. Este haz es analizado por un campo magnético antes de entrar en la zona de aceleración de 200 kV. Dentro de la zona de aceleración, los iones interactúan con el gas de stripper, de modo que los iones cambian su estado de carga de negativo a neutral o positivo. Los iones positivos son acelerados nuevamente y son analizados en función de su masa y carga.



Figura 3.21: MiCaDaS (Mini Radiocarbon Dating System)

El sistema de AMS determina de forma precisa el cociente  ${}^{14}C/{}^{12}C$  de las muestras, para lo que mide los diferentes isótopos en distintas zonas del sistema. En la zona de baja energía mide la intensidad del haz de  ${}^{12}C$ . En la zona de alta energía mide la intensidad de los haces de  ${}^{12}C$  y  ${}^{13}C$ , así como  ${}^{13}C$  procedente de la rotura de las moléculas de  ${}^{13}CH$ . Además, mide el número de iones de  ${}^{14}C$ .

Las corrientes se miden en cámaras de Faraday, mientras que el <sup>14</sup>C se detecta en un detector de ionización. Los cocientes se corrigen tanto por los niveles de fondo como

3. Infraestructuras / Facilities

por el fraccionamiento utilizando todos los valores medidos en las diferentes cámaras de Faraday.

El sistema MiCaDaS está diseñado para medir muestras con un cociente en el rango de 0,002 hasta 10 fMC con alta precisión, lo que incluye todo el rango de posibles muestras arqueológicas y de estudios ambientales. El sistema de intercambio de muestras está equipado con cámaras independientes que permiten un proceso de medida continuo, sin interrupciones.

En comparación a otros sistemas de AMS, MiCaDaS permite una alta precisión en las medidas de radiocarbono con un sistema muy compacto y menos complejo, de modo que puede ser instalado en laboratorios en combinación con otros sistemas complementarios. Se trata de un sistema muy robusto y relativamente fácil en su operación.

MiCaDaS system (Figure 3.21) is an instrument to perform AMS analysis specifically designed for <sup>14</sup>C measurements. Its design and functioning follow the basic scheme of other AMS facilities, like the SARA system at CNA. Samples can be either solid or gaseous, and in any case they are sputtered by  $Cs^+$  ions in the ion source, producing a negative ion beam. This beam is analyzed by a magnetic field before entering the accelerating part, with 200 kV. In the accelerating stage ions interact with the stripper gas, changing from negative to neutral or positive charge, so that positive ions are accelerated a second time until ground potential, and finally analyzed with magnetic and electric field depending on the charge and mass.

AMS systems determine in a precise way the  ${}^{14}C/{}^{12}C$  ratio in the samples, measuring different isotopes in different parts of the system. At the low energy side the  ${}^{12}C$  beam intensity is measured. At the high energy side beam intensity for  ${}^{12}C$  and  ${}^{13}C$ , as well as  ${}^{13}C$  coming from the breakup of  ${}^{13}CH$  molecules is measured.  ${}^{14}C$  counts are also measured.

Currents are measured in Faraday cups, meanwhile <sup>14</sup>C counts are detected in an ionization chamber. Ratios are fractionation and background corrected using the currents measured.

The MiCaDaS system is designed to measure samples with a ratio in the range of 0.002 to 10 fMC with high precision, which includes all the range of the possible archaeological and environmental applications. The sample changing system is equipped with two independent locks allowing a continuous measurement sequence.

Compared to other AMS systems, MiCaDaS allows a high precision radiocarbon dating with a very compact and less complex instrument. Therefore it can be housed in laboratories in combination with other complementary equipment. It is a robust and friendly user system.

**3. Infraestructuras / Facilities** 

#### 3.5.1 Servicio de Datación por Radiocarbono / Radiocarbon Dating Service

Como se sabe, es posible estudiar la edad de muestras de interés arqueológico, artístico, histórico, etc., mediante la medida de su contenido en <sup>14</sup>C, radioisótopo que se produce en la naturaleza y que es un isótopo del carbono, por lo que tiene su mismo comportamiento químico.

Asociado al Acelerador MiCaDaS existe un Servicio de Datación por Radiocarbono (<sup>14</sup>C). En este servicio se incluye un completo laboratorio de preparación de muestras, siendo el primero de su naturaleza en España. Existen en España laboratorios de datación por <sup>14</sup>C, pero que usan el método tradicional radiométrico, es decir, con detectores de radiación. Por razones científicas la técnica tradicional de datación por <sup>14</sup>C es altamente destructiva (necesita gramos de carbón para datar), consume mucho tiempo de trabajo (al menos se necesitan varias horas por muestra) y es poco productiva (por las razones anteriores).

El uso de un Espectrómetro de Masas con Acelerador (AMS) permite:

-Reducir la cantidad de muestra necesaria para producir una fecha hasta fracciones de miligramo (casi no destructiva, muy importante para objetos de interés especial).

-Realizar la medición en fracciones de hora por muestra y, consecuentemente, es capaz de producir una mayor cantidad de fechas por unidad de tiempo que el método tradicional. La razón para todo ello reside en que mientras que con el método tradicional se mide la radiación emitida por <sup>14</sup>C, con AMS se mide el número de átomos de <sup>14</sup>C presente en la muestra.

Samples (archaeological, artistic, historical, etc.) can be dated by measuring their <sup>14</sup>C content. This radioisotope is produced naturally and has the same chemical behavior as other carbon isotopes.

At CNA, there is a Radiocarbon Dating Service (<sup>14</sup>C) associated to MiCaDaS Accelerator. This service includes a fully-equipped laboratory for sample preparation, the first of its kind in Spain. There are other <sup>14</sup>C-dating laboratories in Spain, but they use traditional radiometric methods (radiation detectors). These methods are highly destructive (grams of carbon are required for the analysis), time-consuming (hours per sample) and less productive.

The use of Accelerator Mass Spectrometry allows:

-The reduction to the sub-milligram scale of the sample amount that is required for dating (almost non-destructive, which is really important in the analysis of valuable material).

-Sample measurements in less than one hour, producing a higher number of dating analyses per day than conventional methods (higher productivity). All these advantages are due to the fact that in the traditional procedures, the radiation emitted by  $^{14}$ C is
Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

measured, but with AMS, we measure the total number of <sup>14</sup>C atoms that are contained in the sample.

En el bienio 2017-2018 se ha incrementado la dotación del laboratorio, incorporando un nuevo sistema de grafitización análogo al anterior. De este modo, la preparación de muestras de origen orgánico y la preparación de muestras a partir de carbonatos quedan desacopladas y es factible prepararlas de forma casi simultánea.

De este modo, el servicio de radiocarbono cuenta con una importante infraestructura: el sistema de medida de C-14 Micadas (Mini CArbon DAting System), dos líneas de grafitización para reducir  $CO_2$  a grafito, un Analizador Elemental para generar  $CO_2$  a partir de muestras orgánicas y el sistema para generar  $CO_2$  a partir de muestras de carbonato. En estos momentos se está desarrollando la posibilidad de preparar incluso muestras de carbonatos disueltos en agua en esta línea.

Además, en caso de necesidad por mantenimientos prolongados o averías, las medidas pueden realizarse en el sistema de AMS SARA, en el que se trabajó de forma rutinaria antes de la instalación del Micadas.

En cuanto a los procedimientos de laboratorio, es importante destacar como novedad la implantación de procesos específicos para la datación de morteros, material sobre el que se está estudiando muy intensamente para sus posibles aplicaciones en datación por radiocarbono.

En los años 2017 y 2018 se han preparado 453 y 240 muestras desconocidas respectivamente, para un total de más de 4000 muestras desde la puesta en marcha del servicio, para el beneficio de todo tipo de instituciones nacionales e internacionales.

In the 2017-2018 biennium the laboratory endowment has increased, incorporating a new graphitization system similar to the previous one. In this way, the preparation of samples of organic origin and the preparation of samples from carbonates are uncoupled and it is feasible to prepare them almost simultaneously.

At this moment, the radiocarbon dating service counts with an important infrastructure: the Micadas (MIni CArbon DAting System) C-14 detection system, two graphitization lines to reduce  $CO_2$  to graphite, an Elemental Analyzer to generate  $CO_2$  from organic samples, and the carbonate handling system to generate  $CO_2$  from carbonate samples. At this moment we are developing the possibility of preparing dissolved inorganic carbon samples from liquids in this line.

Besides, in the case of long term maintenance or failure of the Micadas system, the samples can be measured in the SARA AMS facility at CNA, which was routinely used for this task until the installation of Micadas.

3. Infraestructuras / Facilities

Regarding the laboratory procedures, it is important to highlight as a novelty the implementation of specific processes for the dating of mortars, material on which is being studied very intensely for its possible applications in radiocarbon dating.

In the years 2017 and 2018 453 and 240 unknown samples have been prepared respectively, for a total of more than 4000 samples since the start-up of the service, for the benefit of all kinds of national and international institutions.

## **3.5.2** Laboratorio de grafitización del Centro Nacional de Aceleradores (AGE) / Automated Graphitisation Equipment (AGE)

Para la medida de muestras de radiocarbono mediante AMS en el CNA se necesitan muestras sólidas de grafito. Las muestras en el laboratorio se limpian, y es necesario extraer el carbono intrínseco a ellas para transformarlo en este material. De forma general, este carbono se extrae en forma de  $CO_2$  y es reducido a grafito mediante un sistema de grafitización.

El sistema automático AGE (Automatic Graphitization Equipment) está directamente conectado a un analizador elemental (EA), y se ha diseñado para preparar muestras de forma eficiente y rápida para su posterior medida por AMS.

Tradicionalmente se ha usado el transporte criogénico del CO<sub>2</sub> generado en la combustión de la muestra hasta los reactores mediante el uso de nitrógeno líquido. En AGE se utiliza una columna rellena de zeolita para atrapar el CO<sub>2</sub> proveniente de la combustión de la muestra en el EA. Después, el CO<sub>2</sub> se libera fácilmente por calentamiento de la trampa de zeolita y se transfiere al reactor por expansión gaseosa. Al evitar el uso del nitrógeno líquido el sistema es muy compacto y permite un funcionamiento completamente automatizado de los procesos de combustión y grafitización.

El nuevo sistema para la obtención de  $CO_2$  a partir de los carbonatos funciona también acoplado al sistema AGE, pero genera el  $CO_2$  mediante disolución en ácido en lugar de por combustión. Utiliza un automuestreador que purga los tubos septum en los que se encuentran las muestras, añade el ácido y transporta el  $CO_2$  generado hasta los reactores.

El sistema completo con válvulas, hornos, sensores de presión y temperatura, está controlado por un ordenador. Un programa en LabView recorre todos los pasos necesarios del proceso de preparación de la muestra: acondicionamiento del catalizador, combustión de la muestra, atrapamiento del CO<sub>2</sub> y su posterior liberación de la trampa, y finalmente el proceso de grafitización en sí mismo.

For radiocarbon measurements with accelerator mass spectrometry (AMS) at CNA solid graphite targets are required. Samples in the laboratory are therefore cleaned, and intrinsic carbon is extracted to be transformed in such material. In a general way, carbon is extracted as  $CO_2$  and is reduced to graphite with a graphitization system.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

The Automated Graphitization Equipment (AGE) features a graphitization that is directly coupled to the sample combustion in an elemental analyzer (EA). AGE has been developed for fast and efficient sample preparations for radiocarbon measurement by means of accelerator mass spectrometry.

Traditionally, the cryogenic transport of  $CO_2$  into the graphitization reactors with liquid nitrogen is used after sample combustion. AGE uses instead a column filled with zeolite to trap the  $CO_2$  coming from the combustion in the EA. The  $CO_2$  can then be easily released by heating the zeolite trap and transferred to the reactor by gas expansion. The consequence of the AGE avoiding the use of liquid nitrogen is, that it is very compact and allows running fully automated for sample combustion and graphitization.

The new Carbonate Handling System (CHS) to obtain  $CO_2$  from carbonate samples is also coupled to AGE, but generates  $CO_2$  by acid dissolution instead of combustion. It uses an autosampler that purges the septum tubes in which the samples are stored, adds the acid, and transports the generated CO2 to the reactors.

The entire system with valves, ovens, temperature and pressure sensors is computer controlled. A LabVIEW program runs through all consecutive steps when processing a sample: catalyst preconditioning, sample combustion in the EA and  $CO_2$  trapping, thermal  $CO_2$  release from the trap into the reactor, and finally the graphitization reaction itself.



Figura 3.22: Laboratorio de grafitización / Graphitization laboratory

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

3. Infraestructuras / Facilities

Como resultado, se obtiene grafito en polvo que se prensa en un cátodo de aluminio con forma cilíndrica listo para ser introducido en el carrusel de muestras de la fuente de iones del acelerador (Figura 3.23).

*The final graphite powder is pressed into an aluminum cylindrical target, which is ready for AMS measurement (Figure 3.23).* 



Figura 3.23: Cátodo de aluminio donde se sitúa la muestra grafitizada / Aluminum target with graphitized sample

3. Infraestructuras / Facilities

## 3.6 Laboratorio de Radiación Gamma / Gamma Radiation Laboratory

Gracias a su condición de ICTS, el Centro Nacional de Aceleradores amplió sus infraestructuras con un laboratorio basado en un sistema de irradiación con fotones gamma (RadLab). Complementando así la línea de investigación en irradiación con partículas desarrollada en los Aceleradores Tándem de 3 MV y Ciclotrón.

El laboratorio se encuentra situado en la planta sub sótano del edificio. El irradiador y los sistemas auxiliares se alojan en una sala de 5,8x4,8x3 m<sup>3</sup>, construida con un blindaje a base de muros y techo de hormigón armado especialmente diseñados para cumplir con la normativa vigente sobre Protección Radiológica. Un pasillo en forma de laberinto da acceso a la sala de control, igualmente blindada, donde se encuentra la consola de control del irradiador, el sistema de seguimiento dosimétrico, así como los equipos asociados a vigilancia y seguridad radiológica.

Se cuenta con uno de los equipos de radiación gamma para investigación más versátiles, el modelo Gammabeam<sup>®</sup> X200 (GBX200) (Figura 3.21) de la empresa Best Theratronics. Consiste en un cabezal rotatorio (360°) de acero, relleno de plomo y tungsteno, donde se aloja una fuente radiactiva de cobalto (<sup>60</sup>Co). Mediante un pistón neumático, la fuente se desplaza horizontalmente entre las posiciones de reposo y exposición. En esta posición, el blindaje tiene una apertura cónica donde se encuentra un colimador ajustable, que permite obtener diferentes campos de irradiación cuadrados. Además, se le puede añadir un sistema auxiliar de plomo para reducir la penumbra, donde cabe la posibilidad de adaptar máscaras de diferentes tamaños y formas para seleccionar áreas de irradiación específicas.

El GBX200 contiene una fuente isotópica de cobalto-60 fabricada por MDS-Nordion. Mediante el bombardeo neutrónico de <sup>59</sup>Co en un reactor se produce el isótopo <sup>60</sup>Co. Éste, con una vida media de 5.26 años, decae a <sup>60</sup>Ni mediante desintegración beta emitiendo rayos gamma de 1.17 y 1.33 MeV. La fuente instalada en el irradiador del CNA cuenta con una actividad de 181 TBq (4887 Ci) a fecha de febrero de 2019. Variando la distancia de la muestra a la fuente (mínimo 50 cm) y con el uso de un atenuador, es posible obtener un amplio rango de tasa de dosis entre 0.05 y 200 Gy/h. El tamaño de campo de irradiación es variable, siendo el mayor de 140x140 cm<sup>2</sup> a la máxima distancia posible del blanco a la fuente.

En RadLab, los procedimientos de calibración y dosimetría, tanto en agua como en aire, se han establecidos conforme a los protocolos TRS-398 y TRS-469 de la IAEA respectivamente. Asimismo, los procedimientos dosimétricos se han sometido satisfactoriamente a un ejercicio de intercomparación junto a otros destacados laboratorios europeos (ESTEC-ESA y CRC-UCL).

Esta instalación está disponible para la utilización por parte de toda la comunidad científica y empresas interesadas en diferentes campos de aplicación. La puesta a

3. Infraestructuras / Facilities

punto del laboratorio se ha realizado junto a la empresa ALTER Technology (TÜV NORD). El uso principal es llevar a cabo ensayos de irradiación sobre materiales y componentes de uso aeroespacial, sector donde se exceden los requerimientos demandados por la normativa actual aplicable (ESCC, MIL-STD o ASTM). Además del campo aeroespacial, se hace uso de la instalación para aplicaciones en Física de Altas Energías, Ciencia de Materiales, Medicina y Agricultura.



Figura 3.24: Plano general del Laboratorio de Radiación Gamma del CNA (RadLab). Detalle del irradiador GBX200 / General layout of the CNA Gamma Radiation Laboratory (RadLab). Detail of the GBX200 irradiator

Thanks to its status as ICTS, the National Centre for Accelerators expanded their infrastructure with a laboratory based on a gamma photon irradiation system (RadLab). Therefore, complementing the research in ion irradiation developed in the 3 MV Tandem and Cyclotron Accelerators.

The laboratory is sited in the basement of the building. The irradiator and auxiliary systems are housed in a room  $(5.8\times4.8\times3 \text{ m}^3)$  built with walls and ceiling shielded made of reinforced concrete, especially designed based on current regulations of radiation protection. A labyrinth shaped passage gives access to the control room, also shielded, where are placed the irradiator control console, the dosimetric monitoring system and the radiation safety monitoring equipment.

The CNA has one of the gamma radiation equipment for research most versatile, the model Gammabeam <sup>®</sup> X200 (GBX200) (Figure 3.21) of Best Theratronics company. It comprises a steel rotary head (360°) filled with lead and tungsten, where is placed a radioactive source of cobalt (<sup>60</sup>Co). By using an air cylinder, the double-encapsulated source is slid horizontally between the fully shielded position and the fully exposed position. In this location, the shield has a conical opening which contains a variable collimator system, providing different square irradiation fields. Moreover, detachable trimmers, which provide an improved penumbra, are available and it is also possible to adapt on them masks of different sizes and shapes to select specific areas of irradiation.

The GBX200 contains an isotopic source of cobalt-60 manufactured by MDS-Nordion. The <sup>60</sup>Co isotope is produced in a reactor by neutron bombardment of the <sup>59</sup>Co stable isotope. With a half- life of 5.26 years, the <sup>60</sup>Co nucleus decays to become <sup>60</sup>Ni by beta

3. Infraestructuras / Facilities

emission and two associated gamma rays with energy of 1.17 and 1.33 MeV. The source installed in the irradiator of this Centre has an activity of 181 TBq (4887 Ci), in February 2019. By adjusting the distance of the sample to the source (minimum 50 cm) and by means of an attenuator, it is possible to obtain a wide range of dose rate from 0.05 to 200 Gy/h. The irradiation field size is also variable; the largest field is 140x140 cm<sup>2</sup> at the maximum distance from the source.

In RadLab, the calibration and dosimetry procedures are performed in full compliance, either in water or in air, with TRS-398 and TRS-469 IAEA protocols. Also dosimetry procedures were successfully undergone intercomparison exercise with other headlining European laboratories (ESTEC-ESA y CRC-UCL).

This facility is available for use by the whole scientific community and companies interested in different fields of application. The laboratory set-up has been done together with the company ALTER Technology (Member of TÜV NORD). The primary objective is to perform irradiation tests on materials and devices for aerospace application. Our facility will exceed the requirements currently demanded by the industrial sector and applicable standards such as ESCC, MIL-STD or ASTM. Besides aerospace, the facility is used for applications in High Energy Physics, Materials Science, Biomedical and Agriculture.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

3. Infraestructuras / Facilities

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research



## 4. Investigación / Research

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

## 4. Investigación / Research

El Centro Nacional de Aceleradores dispone de 4 Unidades de Investigación:

-La Unidad de Investigación en Técnicas de Análisis, Modificación de Materiales con Haces de Iones e Irradiación (IBA).

-La Unidad de Investigación de Física Nuclear Experimental Básica (FNB).

-La Unidad de Investigación de Radiofarmacia e Imagen Médica.

-La Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS).

Además de los experimentos realizados mediante colaboraciones o servicios externos, existen líneas de investigación sostenidas por las diferentes Unidades de Investigación del Centro.

En este apartado se recogen de manera global las líneas de investigación de cada una de las unidades.

CNA, Centro Nacional de Aceleradores, has 4 Research Units:

-Analysis Techniques Materials Modification with Ion Beams Research and Irradiation Unit (IBA).

-Basic Nuclear Physics Research Unit (FNB).

-Radiopharmacy and Medical Image Research Unit.

-Accelerator Mass Spectrometry Research Unit (AMS).

In addition to the experiments conducted through partnerships or outsourcing, there are areas of research supported by the different Research Units of the Centre.

This section includes in a comprehensive manner the research of each of the units. This section shows each unit research.

4. Investigación / Research

# 4.1 Unidad de Investigación de Técnicas de Análisis y Modificación de Materiales con Haces de Iones / Ion Beam Analysis and Modification of Materials Research Unit

Los campos de aplicación de las líneas de investigación desarrolladas por esta Unidad, tanto en el Acelerador Tándem como en el Ciclotrón, en estos dos últimos años son principalmente: Ciencia de Materiales, Ciencia del Plasma y Tecnología de Fusión, Irradiación y Patrimonio Cultural. A la actividad en los aceleradores en materia de irradiación, hay que añadir la realizada en el nuevo Laboratorio de Radiación Gamma-RADLAB.

The fields of application of the research carried out by this unit, both in the Tandem Accelerator as in the Cyclotron, in the last two years are mainly: Materials Science, Plasma Science and Fusion Technology, Irradiation and Cultural Heritage. To our irradiation activities using particles accelerators we have to add the work carried out using the new Gamma Radiation Laboratory-RADLAB.

## 4.1.1 Ciencia de Materiales / Materials Science

El uso del Acelerador Tándem de 3 MV ha sido de especial relevancia para investigar numerosos problemas relacionados con la Ciencia de Materiales. Un gran número de los trabajos realizados han tenido como meta el estudio de la composición de las muestras analizadas y su correlación con las propiedades físicas de las mismas, recurriendo para ello a las diversas técnicas analíticas de las que dispone el CNA, tales como RBS, PIXE, NRA, PIGE, ERD, IBIC, IL y canalización iónica.

A continuación, se describen brevemente las principales líneas de investigación en estos años.

The use of 3 MV Tandem Accelerator has been especially important to investigate many problems related to materials science. A large number of studies have been aimed at studying the composition of the samples and their correlation with the physical properties using various analytical techniques available to the CNA, such as RBS, PIXE, NRA, PIGE, ERD, IBIC, IL and channeling.

Below, we briefly describe the main research lines in these years.

<u>Caracterización de la composición elemental en muestras de TiNx.</u> Los compuestos de nitruro de titanio (TiNx) son materiales únicos que presentan características de enlaces tanto metálicos (Ti-Ti) como covalentes (Ti-N). Las propiedades metálicas son la conductividad eléctrica y la reflectancia metálica; y las propiedades debidas a enlaces covalentes son un alto punto de fusión, extrema dureza y fragilidad, y excelente estabilidad térmica y química. Estas propiedades de Ti y TiN se han explotado con frecuencia para aplicaciones en dispositivos microelectrónicos, células solares y como recubrimientos protectores y decorativos.

4. Investigación / Research

Se han empleado varios métodos para la deposición de TiN. Entre ellas, las técnicas de pulverización son consideradas como los métodos más adecuados para aplicaciones industriales. La importancia de los métodos de sputtering es que involucran una serie de parámetros como la presión de nitrógeno, la presión base, la presión de sputtering, la potencia del cátodo y la separación entre el blanco y el sustrato, además del potencial eléctrico del sustrato y la temperatura, por lo que se pueden usar varias combinaciones de estos parámetros para obtener películas de alta calidad con las propiedades requeridas. Sin embargo, se ha encontrado que existe una relación no lineal entre la presión del gas reactivo y otros parámetros de procesamiento que muestran efectos de histéresis, lo que restringe las propiedades finales de las películas. En condiciones de baja concentración de N<sub>2</sub>, se han obtenido películas de TiN estequiométricas de color dorado. Sin embargo, es difícil controlar la concentración baja de N<sub>2</sub>. A concentraciones más altas de N<sub>2</sub>, se produce una sobresaturación de nitrógeno en las películas, lo que a veces provoca efectos inusuales como la precipitación de nitrógeno en los límites de los granos o como burbujas de gas, formación de superestructuras y cristalización parcial.

Para tener un conocimiento preciso sobre la composición en nitrógeno (en función de los diferentes parámetros de deposición), las mediciones non-RBS se han realizado utilizando un haz a la energía de resonancia del nitrógeno (3.7 MeV).

<u>Characterization of the elemental composition in TiNx samples.</u> The nitride compounds of titanium (TiNx) are the unique materials exhibiting both metallic (Ti–Ti) and covalent (Ti–N) bonding characteristics. The metallic properties are electrical conductivity and metallic reflectance; and the covalent bonding properties are high melting point, extreme hardness and brittleness, and excellent thermal and chemical stability. These properties of Ti and TiN have been frequently exploited for applications in microelectronic devices, solar cells and as protective and decorative coatings.

Various methods have been employed for TiN deposition. Among them sputtering techniques are considered as most suitable methods for industrial applications. The importance of sputtering methods is that they involve a number of parameters such as nitrogen pressure, base pressure, sputtering pressure, cathode power and substrate-target separation in addition to substrate bias and temperature whereby a number of combinations of these parameters may be used to obtain high quality films with required properties. However, a non-linear relationship was found to exist between the reactive gas pressure and other processing parameters exhibiting hysteresis effects thereby restraining the final properties of the films. Under low N<sub>2</sub> concentrations golden coloured stoichiometric TiN films were obtained, however, controlling low N<sub>2</sub> concentration was found to be difficult. At higher N<sub>2</sub> concentrations, nitrogen oversaturation occurred in the films sometimes leading to unusual effects such as nitrogen precipitation at grain boundaries or as gas bubbles, superstructure formation and partial crystallization were observed.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

In order to have an accurate knowledge about the nitrogen composition (depending on the different deposition parameters), non-RBS measurements have been carried out by using a He beam at the resonance energy of nitrogen (3.7 MeV).

<u>Caracterización de la composición elemental en muestras de TaNx.</u> El nitruro de tántalo es químicamente inerte, resistente a la corrosión y duro. Debido a estas propiedades, las películas delgadas de TaNx son atractivas para resistencias de película delgada y barreras de difusión en la industria de la microelectrónica. También muestran una gran estabilidad a la temperatura y resisten la oxidación a altas temperaturas. Además, el nitruro de tántalo también se ha vuelto tecnológicamente importante por su utilización en recubrimientos resistentes al desgaste y recubrimientos ópticos funcionalizados.

La producción de TaNx por deposición reactiva por pulverización catódica es un método bien establecido. Se han reportado las siguientes estructuras de nitruro de tantalio según las condiciones de deposición y el porcentaje atómico de nitrógeno incorporado en la muestra: Ta<sub>4</sub>Nph ororhombic,  $\beta$ -Ta tetragonal (330), TaN estequiométrica hexagonal, TaN ortorrómbica y Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub> ortorrómbica. También cambia la estructura de  $\alpha$ - o  $\beta$ -Ta a Ta<sub>2</sub>N, y finalmente a TaN al aumentar la relación N/Ar.

Como en muchos otros nitruros, las propiedades físicas de TaNx dependen en gran medida del porcentaje atómico de nitrógeno incorporado en la muestra. En particular, las propiedades mecánicas de estos recubrimientos pueden variar de 61 a 20 GPa dependiendo de la estequiometría.

Para tener un conocimiento preciso sobre la composición del nitrógeno (en función de los diferentes parámetros de deposición), las mediciones non-RBS se han realizado utilizando un haz a la energía de resonancia del nitrógeno (3.7 MeV).

<u>Characterization of the elemental composition in TiNx samples.</u> Tantalum Nitride is chemically inert, corrosion resistant and hard. Because of these properties TaNx thin films are attractive for thin film resistors and diffusion barriers in the microelectronics industry. They also show large temperature stability and resist oxidation at high temperatures. Moreover, tantalum nitride have also become technologically important as wear resistant coatings, and functionalized optical coatings.

The production of TaNx by reactive sputter deposition is a well-established method. The following tantalum nitride structures have been reported depending on the deposition conditions and the atomic percentage of nitrogen incorporated into the sample: orthorhombic Ta<sub>4</sub>Nphase, tetragonal  $\beta$ -Ta (330), hexagonal stoichiometric TaN, orthorhombic TaN and orthorhombic Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub>. Also changes the structure from  $\alpha$ - or  $\beta$ -Ta to Ta<sub>2</sub>N, and finally to TaN with increasing the N/Ar ratio.

As in many other nitride the physical properties of TaNx strongly depends on the atomic percentage of nitrogen incorporated into the sample. In particular, the mechanical

4. Investigación / Research

properties of these coatings can vary from 61 to 20 GPa depending on the stoichiometry.

In order to have an accurate knowledge about the nitrogen composition (depending on the different deposition parameters), non-RBS measurements have been carried out by using a He beam at the resonance energy of nitrogen (3.7 MeV).

<u>Caracterización de la densidad en muestras de DLC.</u> DLC es un término genérico que se usa comúnmente para describir una gama de diferentes tipos de películas de carbono amorfo. Estas películas incluyen carbono tipo diamante libre de hidrógeno, aC, DLC hidrogenado, a-: H, carbono amorfo tetraédrico, ta-C, carbono amorfo tetraédrico hidrogenado, ta-C: H, y aquéllas que contienen dopantes de silicio o metal tales como como Si-DLC y Me-DLC respectivamente. Los recubrimientos DLC se utilizan cada vez más para mejorar el rendimiento tribológico de los componentes de ingeniería. Los recubrimientos pueden poseer una alta dureza, bajos coeficientes de fricción contra materiales como el acero, y generalmente son químicamente inertes. Estas propiedades tribológicas deseables surgen a medida que las propiedades de la película pueden manipularse para proporcionar propiedades similares al diamante o al grafito mediante el control del proceso de deposición. Además, la incorporación de nitrógeno, hidrógeno, silicio o dopaje de metales ofrece otras posibilidades de la triboquímica de las películas.

Hemos utilizado la técnica de RBS con haces de partículas alfa de 4.25 keV para determinar la composición de diferentes muestras DLC y Cr-DLC depositadas mediante un nuevo método de pulverización catódica por magnetrón pulsado.

Por un lado, hemos evaluado la dependencia de la densidad de DLC y los recubrimientos de DLC hidrogenados en función de las condiciones de deposición. Por otro lado, hemos determinado la concentración de Cr, así como la densidad de los recubrimientos de Cr-DLC. La densidad de las muestras y su contenido de Cr han sido evaluados por RBS utilizando un haz de He a una energía de 4250 KeV.

<u>Characterization of density in DLC samples.</u> DLC is a generic term that is commonly used to describe a range of different types of amorphous carbon films. These films include hydrogen-free diamond-like carbon, a-C, hydrogenated DLC, a-:H, tetrahedral amorphous carbon, ta-C, hydrogenated tetrahedral amorphous carbon, ta-C:H, and those containing dopants of either silicon or metal such as Si-DLC and Me-DLC respectively. DLC coatings are increasingly being used to improve the tribological performance of engineering components. The coatings can possess high hardness, low coefficients of friction against materials such as steel, and they are generally chemically inert. These desirable tribological properties arise as the properties of the film can be manipulated to give either diamond-like or graphite-like properties by controlling the deposition process. Additionally, the incorporation of nitrogen, hydrogen, silicon or metal-doping gives further possibilities of the tribochemistry of the films.

#### 4. Investigación / Research

The aim of this proposal is twofold: (i) On one hand, we want to evaluate the dependence of the density of DLC and hydrogenated DLC coatings on deposition conditions; (ii) on the other hand we aim to determine the Cr concentration as well as the density of Cr-DLC coatings. For this purpose, two different set of samples were deposited by a new pulsed magnetron sputtering method. The first set of samples consists on DLC and hydrogenated DLC samples. These samples were sputtered from a graphite target in the presence of an Ar+H atmosphere on commercial Si (100) substrates in a vacuum chamber (Pbase of 5 x  $10^{-6}$  mbar) at room temperature. The total gas pressure (PAr+PH2) and the target-substrate distance were kept constant at  $6.7 \times 10^{-3}$  mbar and 13 cm, respectively, whereas the hydrogen partial pressure was varied from 0 % to 5%. The second set of samples consists on hydrogenated Cr-DLC thin films. For the deposition of these samples we simultaneously use two targets one of Cr and the previous one of graphite. As in the earlier case, samples were deposited on commercial Si (100) in the presence of an Ar+H atmosphere at room temperature. The total gas pressure (PAr+PH<sub>2</sub>) was 6.7 x  $10^{-3}$  mbar whereas the hydrogen partial pressure was varied from 0% to 5%. The distance of the graphite and Cr target was 13 cm.

The density of the samples as well as their Cr content have been evaluated by RBS using a He beam at energy of 4250 KeV.

<u>Caracterización y composición elemental de recubrimientos de AgPt, TiAlN, Me-DLC.</u> La resonancia del plasmón superficial (SPR), definida como la oscilación colectiva de los electrones de conducción, domina el espectro óptico de las nanopartículas de metales nobles (NP). Este interesante fenómeno hace que las NP sean atractivas para muchas aplicaciones como la optoelectrónica, la medicina, la detección, la catálisis y la conversión de energía solar. Sin embargo, se requiere un control preciso de la intensidad y posición del SPR para optimizar las NP para cada aplicación particular. El SPR puede controlarse mediante cambios en factores geométricos como el tamaño y la forma, o modificando su composición.

Las propiedades ópticas de los metales se han medido desde principios del siglo XX, cuando se hizo evidente que las constantes ópticas reales se desviaban del modelo de Drude. Hoy en día, el aumento de la plasmónica ha generado un renovado interés en las propiedades ópticas de los metales nobles y sus aleaciones. Desafortunadamente, los buenos conjuntos de datos experimentales de propiedades ópticas no son tan fáciles de encontrar para las aleaciones como para los metales puros. Ésta es una gran limitación ya que la composición es una variable muy importante para controlar la respuesta óptica de los nanocompuestos. Por ejemplo, la plata tiene un SPR muy intenso, pero carece de estabilidad química, mientras que para el oro es todo lo contrario. Por lo tanto, aliando ambos metales es posible obtener estructuras con un compromiso justo entre la estabilidad química y la buena respuesta óptica.

En este experimento se ha determinado mediante RBS la composición elemental de las aleaciones de Ag / Pt depositadas por pulverización en diferentes condiciones. El

4. Investigación / Research

objetivo final es correlacionar la composición elemental de los recubrimientos con sus propiedades ópticas.

<u>Caracterización y composición elemental de recubrimientos de AqPt, TiAIN, Me-DLC.</u> The surface plasmon resonance (SPR), defined as the collective oscillation of conduction electrons, dominates the optical spectrum of noble metal nanoparticles (NP). This interesting phenomenon makes NPs attractive for many applications such as optoelectronics, medicine, detection, catalysis and solar energy conversion. However, precise control of the intensity and position of the SPR is required to optimize NPs for each particular application. The SPR can be controlled by changes in geometric factors such as size and shape, or by modifying its composition.

The optical properties of metals have been measured since the early twentieth century, when it became evident that the actual optical constants deviated from the Drude model. Nowadays, the increase in plasmonics has generated a renewed interest in the optical properties of noble metals and their alloys. Unfortunately, good experimental data sets of optical properties are not as easy to find for alloys as for pure metals. This is a great limitation since the composition is a very important variable to control the optical response of the nanocomposites. For example, silver has a very intense SPR but lacks chemical stability, while gold is the opposite. Therefore, by combining both metals it is possible to obtain structures with a fair compromise between chemical stability and good optical response.

In this experiment, the elemental composition of the Ag/Pt alloys deposited by sputtering under different conditions was determined by RBS. The final objective is to correlate the elemental composition of the coatings with their optical properties.

<u>Caracterización de la composición elemental de recubrimientos de TaSiN.</u> Uno de los desafíos centrales en la ciencia de la ingeniería moderna es proteger un material en su superficie de las reacciones químicas y la degradación mecánica. La aplicación de un revestimiento duro, que se adhiere fuertemente a la superficie del material, evita la abrasión excesiva y proporciona la protección necesaria contra el impacto mecánico. El desarrollo de recubrimientos superduros está motivado tanto por la curiosidad científica de los investigadores para explorar las posibilidades de sintetizar un material cuya dureza podría acercarse o superar la del diamante (H  $\geq$  70-100 GPa) como la importancia técnica de estos recubrimientos.

La estabilidad térmica de las películas es otra consideración importante, ya que los recubrimientos deben soportar altas temperaturas de operación (por ejemplo, recubrimientos en herramientas de corte) sin deteriorar su rendimiento mecánico. Sin embargo, a altas temperaturas en un entorno oxidativo, muchos recubrimientos duros se deterioran rápidamente debido a la inestabilidad térmica y la degradación química. De hecho, la estabilidad térmica de la mayoría de los recubrimientos duros producidos hasta ahora es relativamente baja, solo hasta la temperatura T  $\leq$  1000 °C. Las temperaturas T  $\leq$  900-1000 °C son insuficientes para la utilización de dichos

4. Investigación / Research

recubrimientos en muchas aplicaciones. Por otro lado, los recubrimientos que son estables a altas temperaturas (> 1000 °C) son en su mayoría amorfos y carecen de la dureza muy necesaria (> 30 GPa). Por lo tanto, es de vital importancia desarrollar nuevos recubrimientos protectores duros ( $\geq$  30 GPa) que sean térmicamente estables a temperaturas, T  $\geq$  900 °C y al mismo tiempo garanticen una buena protección del sustrato contra la oxidación de una atmósfera externa.

En este contexto, las películas de metal refractario ternario Me-Si-N (Me = Ti, Ta, W, Zr, V, Nb, Cr) han atraído recientemente mucha atención. Para obtener una comprensión profunda del mecanismo de fortalecimiento de los recubrimientos superduros de Ta-Si-N y, por lo tanto, mejorar el diseño de su estructura y el proceso de fabricación, los detalles de la estructura de los recubrimientos compuestos de Ta-Si-N son uno de los puntos muy importantes que deben ser muy estudiado De hecho, desde hace una década se ha realizado una gran cantidad de trabajo sobre la microestructura y su correlación con la dureza de estas películas. Sin embargo, como en muchos otros nitruros, las propiedades físicas y, en particular, la dureza del material, también se verían influenciadas por su contenido de N.

En el presente experimento, el objetivo ha sido determinar la composición, mediante RBS, elemental de diferentes recubrimientos de Ta-Si-N depositados en Si (100) mediante pulverización reactiva. En particular, el interés se centra en analizar la concentración de nitrógeno en los recubrimientos en función de la presión parcial de nitrógeno introducida en la cámara durante la deposición. Para tener un conocimiento preciso sobre la composición del nitrógeno, se han realizado mediciones sin RBS utilizando un haz de He en la energía de resonancia del nitrógeno (3.7 MeV).

<u>Characterization of the elemental composition of TaSiN coatings.</u> One of the central challenges in modern engineering science is to protect a material at its surface from chemical reactions and mechanical degradation. Applying a hard coating, which bonds strongly to the surface of the material, prevents excessive abrasion and provides the needed shield towards mechanical impact.

The development of superhard coatings is motivated both by the scientific curiosity of researchers to explore possibilities of synthesizing a material whose hardness could approach or exceed that of diamond ( $H \ge 70-100$  GPa) and the technical importance of these coatings.

Thermal stability of the films is another important consideration since the coatings have to sustain high operating temperatures (e.g. coatings on cutting tools) without deteriorating its mechanical performance. However, at high temperatures in an oxidative environment many hard coatings quickly deteriorate due to thermal instability and chemical degradation. Indeed, the thermal stability of majority of hard coatings produced so far is relatively low, up to the temperature  $T \le 1000$  °C only. Temperatures  $T \le 900-1000$  °C are insufficient for the utilization of such coatings in many applications. On the other hand, coatings which are stable at high temperatures

4. Investigación / Research

(> 1000 °C) are mostly amorphous and lack the much needed high hardness (> 30 GPa). Therefore, it is vitally important to develop new hard ( $\geq$  30 GPa) protective coatings which will be thermally stable at temperatures,  $T \geq$  900 °C and simultaneously will ensure a good protection of the substrate against oxidation from an external atmosphere.

On this context, ternary refractory metal Me-Si-N films (Me = Ti, Ta, W, Zr, V, Nb, Cr) have recently attracted much attention. In order to get thorough understanding of the strengthening mechanism of Ta-Si-N superhard coatings and hence improve the design of its structure and fabrication process, the structure details of Ta-Si-N composite coatings are one of very important points which should be deeply studied. Indeed, large amount of work has been carried out since a decade ago on the microstructure and its correlation with hardness in these films. However, as in many other nitrides the physical properties and, in particular the hardness of the material, would be also influenced by its N content.

In the present experiment we aim to determine the elemental composition of different Ta-Si-N coatings deposited on Si (100) by reactive sputtering under diverse conditions. In particular, we are interesting in analyzing the nitrogen concentration in the coatings as a function of the partial pressure of nitrogen introduced in the chamber during the deposition. In order to have an accurate knowledge about the nitrogen composition, Non-RBS measurements have been carried out by using a He beam at the resonance energy of nitrogen (3.7 MeV).

Deposición en ángulo oblicuo de películas delgadas mediante pulverización catódica para evitar efectos de envenenamiento del cátodo. La técnica de pulverización catódica por plasma ("magnetron sputtering" en inglés) es de las más conocidas y empleadas, tanto en centros de investigación como en la industria tecnológica, para crecer láminas delgadas de diferente composición. En ella, un bloque sólido de material se introduce en un reactor de vacío, y se pone en contacto con un plasma químicamente inerte (normalmente de argón), pulverizando átomos individuales del bloque que pueden ser dirigidos hacia una superficie donde crece la lámina. En muchos casos, se introduce una pequeña cantidad de gas reactivo en el plasma para así alterar la composición de la lámina delgada, en la llamada pulverización reactiva por plasma ("reactive magnetron sputtering").

La posibilidad de añadir un gas reactivo al plasma ha abierto muchísimas posibilidades, ya que ha permitido sintetizar óxidos o nitruros a partir de materiales puros, tales como silicio, titanio, etc. aunque también introduce un número importante de efectos indeseados. Dentro de ellos, el llamado "envenenamiento del catodo" ("cathode poisoning") es el más destacable, asociado a un cambio de composición del bloque de material a pulverizar, y la aparición de fenómenos de histéresis en el reactor de plasma. Sin lugar a dudas, uno de los problemas más acuciantes desde un punto de vista tecnológico y científico dentro de la ciencia de materiales y la síntesis de películas delgadas es la implementación de estrategias destinada a la supresión de estos

4. Investigación / Research

fenómenos dentro del reactor de vacío, ya que hacen caer las tasas de crecimiento de las películas un orden de magnitud.

En el reactor de pulverización catódica reactiva del grupo de Nanotecnología en superficies del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla se tiene una línea de investigación destinada al estudio de posibles estrategias para eliminar los efectos de envenenamiento del cátodo. Para ello se depositan películas de diferentes metales e introduciendo diferentes cantidades de oxígeno en el reactor para hacer crecer películas de distinta composición. Dentro de las estrategias implementadas está la de trabajar en configuraciones de ángulo rasante, que permitan diferentes tasas de llegada de átomos metálicos a la película.

Para un estudio pormenorizado de este fenómeno sería necesario explorar diferentes configuraciones libres de envenenamiento catódico, y analizar la densidad y composición química de las películas. Para ellos se ha hecho uso de la técnica RBS midiendo diferentes capas de Ti, TiO<sub>2</sub>, Cu, Al, Pt y Au, C, SiOx y Si.

Además de RBS las muestras se han caracterizado mediante microscopía electrónica en el Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (CSIC-US). Así, se pueden obtener con precisión dividiendo la densidad por unidad de área (obtenida por RBS) y el espesor (obtenido mediante imágenes de microscopía electrónica).

<u>Oblique angle deposition of thin films by sputtering to avoid effects of cathode</u> <u>poisoning.</u> The technique of magnetron sputtering is one of the best known and used, both in research centers and in the technological industry, to grow thin sheets of different composition. In it, a solid block of material is introduced into a vacuum reactor, and contacted with a chemically inert plasma (usually argon), by sputtering individual atoms of the block that can be directed towards a surface where the sheet grows. In many cases, a small amount of reactive gas is introduced into the plasma to alter the composition of the thin sheet, in the so-called reactive magnetron sputtering.

The possibility of adding a reactive gas to the plasma has opened many possibilities, since it has allowed to synthesize oxides or nitrides from pure materials, such as silicon, titanium, etc. although it also introduces a significant number of undesired effects. Among them, the so-called "cathode poisoning" is the most remarkable, associated with a change in composition of the block of material to be sputtered, and the appearance of hysteresis phenomena in the plasma reactor. Undoubtedly, one of the most pressing problems from a technological and scientific point of view within the materials science and the synthesis of thin films is the implementation of strategies aimed at the suppression of these phenomena inside the vacuum reactor, and that make the growth rates of the films drop by an order of magnitude.

In the reactive magnetron sputtering reactor of the Nanotechnology on Surfaces group of the Institute of Materials Science of Seville, there is a line of research aimed at the study of possible strategies to eliminate the effects of cathode poisoning, for which

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

films are deposited of different metals and introducing different amounts of oxygen in the reactor to grow films of different composition. Among the strategies implemented, one is working in glancing angle configurations, which allow different arrival rates of metal atoms to the film.

For a detailed study of this phenomenon it would be necessary to explore different configurations free of cathodic poisoning, and to analyze the density and chemical composition of the films. For them, the RBS technique has been used, measuring different layers of Ti,  $TiO_2$ , Cu, Al, Pt and Au, C, SiOx and Si.

In addition to RBS, the samples have been characterized by electronic microscopy at the Institute of Materials Science of Seville (CSIC-US). Thus, they can be obtained with precision by dividing the density per unit area (obtained by RBS) and the thickness (obtained by means of electron microscopy images).

Estudio de perfiles de concentración de polímero fluorescentes. La cuantificación de elementos ligeros (C, N, O) mediante la técnica de RBS estándar en láminas delgadas de materiales orgánicos depositados sobres sustratos estándar (Si, vidrio o sílice fundida) resulta extraordinariamente dificultosa. Esto es debido a la baja sección eficaz de dispersión y el factor cinemático de los elementos ligeros. Así, el espectro resultante consta de una intensa señal de sustrato sobre la que se superponen las pequeñas señales de los elementos ligeros, por lo que se disminuyen enormemente los límites de detección de estos últimos. Para evitar esta superposición de señales, se recurre a depositar los polímeros sobre sustratos especiales de C (grafito, carbono vítreo) depositando, además, una capa intermedia de un elemento más pesado (por ejemplo Si) para separar las señales correspondientes al C de la lámina de polímero y el correspondiente al sustrato. De este modo, las señales correspondientes a los elementos de la lámina aparecen sobre un fondo cero separadas de la señal del sustrato.

Se han estudiado los perfiles de concentración de los elementos ligeros en películas delgadas orgánicas (polímeros luminiscentes) con contenido variable de C, N, O (C: 40-60% at, N: 0-10%, O: 0-10%) depositadas mediante polimerización de moléculas de colorante por interacción con un plasma remoto preparadas por el grupo el grupo de Nanotecnología en superficies del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla. Para ello se ha utilizado la técnica EBS (elastic backscattering spectroscopy) con partículas alfa de energía mayor a 2.5 MeV.

En el análisis se ha tenido en cuenta que la sección eficaz de retrodispersión con estos iones y energías sufre desviaciones de la sección eficaz Rutherford.

<u>Study of fluorescent polymer concentration profiles.</u> The quantification of light elements (C, N, O) using the standard RBS technique in thin sheets of organic materials deposited on standard substrates (Si, glass or fused silica) is extremely difficult. This is due to the low dispersion cross section and the kinematic factor of the light elements.

4. Investigación / Research

Thus, the resulting spectrum consists of an intense signal of substrate on which the small signals of the light elements are overlapped, so that the limits of detection of the latter are greatly reduced. To avoid this overlapping of signals, it is resorted to deposit the polymers on special substrates of C (graphite, vitreous carbon), depositing, in addition, an intermediate layer of a heavier element (eg, Si) to separate the signals corresponding to the C of the polymer sheet and the one corresponding to the substrate. In this way, the signals corresponding to the elements of the sheet appear on a zero background separated from the signal of the substrate.

The concentration profiles of the light elements in thin organic films deposited by polymerization of dye molecules by interaction with a remote plasma (luminescent polymers) with variable contents of C, N, O (C: 40-60% at, N: 0-10%, O: 0-10%) have been studied. The samples were prepared by the Nanotechnology on Surfaces group of the Institute of Materials Science of Seville. For this, EBS (elastic backscattering spectroscopy) techniques with alpha particles of energy greater than 2.5 MeV have been used.

In the analysis, it has been taken into account that the backscattering effective section with these ions and energies suffers deviations from the Rutherford cross-section.

<u>Análisis RBS de películas metálicas depositadas sobre un polímero.</u> Con el objetivo de desentrañar los parámetros que guían la nanoestructuración de películas delgadas y la influencia de las capas de semillas en su nanoestructuración posterior, se han medido muestras corresponden a una prueba de concepto de una deposición bimetálica de Zn y Al por deposición física de vapor, preparadas por el grupo el grupo de Nanotecnología en superficies del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla. Las muestras corresponden a las etapas iniciales de deposición y el propósito del ensayo es determinar el grado de compactación en función de las características de la capa de semilla o agrupaciones (AI) en el segundo metal depositado. Esta información se utilizará para modelar el régimen de crecimiento de películas delgadas mediante pulverización catódica, un tema en el que dicho grupo está trabajando activamente. Tras determinar la relación Al/Zn y el contenido de O, se compararán con los resultados de XPS disponibles para estas muestras.

Esta investigación tiene como objetivo desentrañar la dependencia de la compactación de películas delgadas cuando Las etapas iniciales de deposición son núcleos hechos de dos metales. En este sentido, un objetivo particular de este estudio ha sido la determinación del número de átomos de Al y Zn depositados sobre el sustrato en diferentes condiciones de deposición que definen las muestras propuestas para el análisis.

<u>RBS analysis of metallic films deposited on a polymer.</u> In order to unravel the parameters that guide the nanostructuring of thin films and the influence of the seed layers in their subsequent nanostructuring, samples have been measured corresponding to a proof of concept of a bimetallic deposition of Zn and Al by physical

4. Investigación / Research

vapor deposition, prepared by the the Nanotechnology on Surfaces group of the Institute of Materials Science of Seville. The samples correspond to the initial stages of deposition and the purpose of the test is to determine the degree of compaction according to the characteristics of the seed layer or groupings (AI) in the second deposited metal. This information will be used to model the growth rate of thin films by sputtering, a subject in which the group is actively working. After determining the AI/Zn ratio and the content of O, they will be compared with the available XPS results for these samples.

The purpose of this research is to unravel the dependence of compaction of thin films when the initial stages of deposition are nuclei made of two metals. In this sense, a particular objective of this study has been the determination of the number of AI and Zn atoms deposited on the substrate under different deposition conditions that define the samples proposed for the analysis.

<u>Medidas RBS de catalizadores para electrolizadores a base de CoCuO.</u> El hidrógeno atrae un interés creciente mundial como vector energético tanto para su uso doméstico como industrial. Se puede producir a partir de recursos renovables y sostenibles mediante métodos químicos, electroquímicos, biológicos o térmicos. Hoy en día, el 95% del hidrógeno se produce a partir del reformado de metano. Sin embargo, este método conlleva el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases CO<sub>2</sub>. La electrolisis del agua es una tecnología madura para producir hidrógeno a partir de fuentes sostenibles. A partir de la electrolisis del agua se puede producir hidrógeno de gran pureza para su aplicación en celdas de combustible. Las principales tecnologías para electrolisis son la electrolisis alcalina del agua y la electrolisis basada en el uso de membranas de intercambio de protones. De éstas, la electrolisis alcalina es la más comercializada. Una de sus mayores ventajas es el uso de materiales no preciosos como catalizadores, lo cual reduce significativamente el coste de producción de hidrógeno con esta tecnología.

En este contexto, el grupo de Nanotecnología en superficies del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla y el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Castilla la Mancha mantienen una colaboración científica ligada al desarrollo de catalizadores para electrolizadores alcalinos fabricados mediante tecnología de deposición de capas finas mediante pulverización catódica que eventualmente puedan sustituir a los utilizados tradicionalmente preparados por vías húmedas. En este sentido cabe resaltar que la técnica de preparación de catalizadores utilizada en este trabajo permite ahorrar entre un 90 y un 99% la carga de catalizador a emplear en la fabricación de estos dispositivos. Dentro de esta colaboración ya se han realizado los primeros ensamblajes de celdas de electrolisis con los nuevos catalizadores, encontrando resultados prometedores de eficiencia de los dispositivos obtenidos. Una de las tareas pendientes del estudio es la cuantificación detallada de la carga de catalizador utilizada en los dispositivos experimentales, con el fin de poder comparar de forma precisa con el resto de la literatura científica al respecto.

4. Investigación / Research

En este sentido se ha caracterizado por RBS con partículas alfa la carga de catalizador en electrodos electrolizadores alcalinos de formulación química CuCoO preparados en el ICMS por pulverización catódica.

<u>RBS measurements of catalysts for CoCuO based electrolysers.</u> Hydrogen attracts a growing worldwide interest as an energy vector for both domestic and industrial use. It can be produced from renewable and sustainable resources through chemical, electrochemical, biological or thermal methods. Today, 95% of hydrogen is produced from methane reforming. However, this method involves the use of fissile fuels and the emission of  $CO_2$  gases. Water electrolysis is a mature technology to produce hydrogen from sustainable sources. Hydrogen of high purity can be produced from the electrolysis of water for application in fuel cells. The main technologies for electrolysis are the alkaline electrolysis of water and electrolysis based on the use of proton exchange membranes. Of these, alkaline electrolysis is the most commercialized. One of its greatest advantages is the use of non-precious materials such as catalysts, which significantly reduces the cost of hydrogen production with this technology.

In this context, the Nanotechnology on surfaces group of the Institute of Materials Science of Seville and the Department of Chemical Engineering of the University of Castilla la Mancha maintain a scientific collaboration linked to the development of catalysts for alkaline electrolysers manufactured by means of thin films deposition technology by means of magnetron sputtering which can eventually replace those traditionally used by wet methods. In this sense it is worth noting that the technique of preparation of catalysts used in this work allows saving between 90 and 99% the catalyst load to be used in the manufacture of these devices. Within this collaboration, the first assemblies of electrolysis cells have been made with the new catalysts, finding promising results in the efficiency of the devices obtained. One of the pending tasks of the study is the detailed quantification of the catalyst load used in the experimental devices, in order to be able to compare accurately with the rest of the scientific literature in this regard.

In this sense, the load of catalyst in alkaline electrolysis electrodes of CuCoO chemical formulation prepared in the ICMS has been characterized by RBS with alpha particles.

Análisis elemental de muestras de capas finas conteniendo poros con gases atrapados. Investigaciones previas del grupo Materiales Nanoestructurados y Microestructura, del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla han demostrado que es posible fabricar capas finas conteniendo gases nobles como el He atrapados en grandes cantidades en estado condensado en el interior de nanoporos de una matriz sólida de manera muy estable. Se ha propuesto un método bottom-up novedoso trabajando con gases no convencionales como el He en la tecnología de crecimiento de capas MS (magnetron sputtering).

Todo este trabajo previo se ha desarrollado con distintos materiales de base como silicio, cobalto, titanio y wolframio. Los estudios anteriores de caracterización por

4. Investigación / Research

técnicas IBA en el CNA, junto con trabajos de microscopía electrónica SEM-EDX y TEM/EELS en el laboratorio LANE del ICMS, han permitido cuantificar la cantidad de gases atrapados (He) e impurezas (O, C, N), así como su distribución en profundidad y a nivel de nanoporos.

Recientemente el grupo NanoMatMicro ha empezado un nuevo estudio basado en el uso del Neon como gas de proceso. El objetivo de este trabajo es aplicar técnicas como la espectroscopía de pérdida de energía de electrones (EELS), o la espectroscopia de absorción de rayos X (XAS), para la comprensión del estado del gas atrapado. Se ha realizado en el CNA el análisis elemental por técnicas IBA (p-EBS) para las nuevas muestras conteniendo Ne. Se trata de unas medidas valiosas y necesarias para este estudio y completan el análisis preliminar de los materiales junto con los primeros análisis ya disponibles por microscopia electrónica (i.e. SEM-EDX y TEM).

<u>Elemental analysis of samples of thin layers containing pores with trapped qases.</u> Previous research of the group Nanostructured Materials and Microstructure, of the Institute of Materials Science of Seville, has shown that it is possible to manufacture thin layers containing noble gases such as He trapped in large quantities in a condensed state inside nanopores of a solid matrix in a very stable. A novel bottom-up method has been proposed working with unconventional gases such as He in the technology of growth of layers MS (magnetron sputtering).

All this previous work has been developed with different base materials such as silicon, cobalt, titanium and tungsten. The previous studies of characterization by IBA techniques in the CNA, together with SEM-EDX and TEM/EELS electronic microscopy works in the LANE laboratory of the ICMS, have allowed to quantify the amount of trapped gases (He) and impurities (O, C, N), as well as its distribution in depth and at the level of nanopores.

Recently, the NanoMatMicro group has started a new study based on the use of Neon as a process gas. The objective of this work is to apply techniques such as electron energy loss spectroscopy (EELS), or X-ray absorption spectroscopy (XAS), to understand the state of trapped gas. The elemental analysis was carried out in the CNA by IBA techniques (p-EBS) for the new samples containing Ne. These are valuable and necessary measures for this study and complete the preliminary analysis of the materials together with the first analyzes already available by electronic microscopy (i.e. SEM-EDX and TEM).

<u>Caracterización del contenido de Au y Ag en substratos SERS producidos mediante PLD.</u> Las nanoestructuras formadas por capas de nanopartículas (NPs) de metales nobles como el Au o Ag (NP) presentan propiedades ópticas únicas que están relacionadas con la excitación de la resonancia de plasmón de superficie (SPR) a determinadas longitudes de onda. Entre dichos fenómenos encontramos el de la intensificación del campo cercano, que juega un papel esencial en la intensificación de la señal Raman, lo

4. Investigación / Research

que constituye el fundamento de las espectroscopías SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy).

Debido a dicha intensificación de la señal es posible detectar concentraciones muy pequeñas de moléculas orgánicas, en algunos casos tan pequeñas como nanomoles, por lo que el SERS tiene un enorme potencial en diversas áreas de química analítica como es la caracterización molecular o la detección de contaminantes, entre otras. En el pasado, el Grupo de Procesado por Láser del Instituto de Óptica ha demostrado que nanoestructuras formadas por capas de NPs de Au y Ag producidas por depósito por láser pulsado (PLD) presentan una señal SERS intensa, lo que permite la detección de diferentes tipos de moléculas. Sin embargo, la utilización de dichas nanoestructuras como sensores que puedan ser validados para su utilización práctica requiere desarrollar métodos de síntesis que permitan producir capas de NPs con una morfología y repuesta SERS reproducibles.

En la actualidad el Grupo de Procesado por Láser está trabajando en colaboración con el Grupo de Espectroscopias de Superficie y Fotónica de Plasmones Superficiales del Instituto de Estructura de la Materia del CSIC y la empresa Saftra Photonics en el desarrollo de superficies funcionalizadas que permitan la detección de contaminantes orgánicos.

Con el fin de producir nanoestructuras homogéneas y reproducibles ha sido necesario rediseñar el sistema de PLD del grupo. En la actualidad ya se han fabricado estructuras homogéneas, que presentan una señal SERS reproducible. Ahora bien, la caracterización completa de dichas nanoestructuras con vistas a un posible escalado de su producción en un sistema de mayor capacidad requiere correlacionar el contenido del metal (Au, Ag) de las nanoestructuras con la morfología de las NPs, determinada mediante microscopía TEM, las propiedades ópticas y la respuesta SERS de las mismas.

Por este motivo, se han determinado mediante RBS con partículas alfa el espesor de las capas y el contenido de Au y Ag en muestras tipo crecidas en las diferentes condiciones experimentales consideradas (NPs de Au, NPs de Ag, NPs mixtas y muestras funcionalizadas).

<u>Characterization of Au and Aq content in SERS substrates produced by PLD.</u> The nanostructures formed by layers of nanoparticles (NPs) of noble metals such as Au or Ag (NP) present unique optical properties that are related to the excitation of surface plasmon resonance (SPR) at certain wavelengths. Among these phenomena we find the intensification of the near field, which plays an essential role in the intensification of the Raman signal, which is the basis of the SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy) spectroscopy.

Due to this intensification of the signal it is possible to detect very small concentrations of organic molecules, in some cases as small as nanomoles, for which the SERS has a

4. Investigación / Research

huge potential in various areas of analytical chemistry such as molecular characterization or detection of pollutants, among other. In the past, the Laser Processing Group of the Institute of Optics has shown that nanostructures formed by layers of Au and Ag NPs produced by pulsed laser deposition (PLD) have an intense SERS signal, which allows the detection of different types of molecules. However, the use of such nanostructures as sensors that can be validated for practical use requires the development of synthesis methods that allow producing NPs with a reproducible SERS morphology and response.

Currently, the Laser Processing Group is working in collaboration with the Group of Surface Spectroscopy and Photonics of Surface Plasmons of the Institute of Structure of Matter of the CSIC and the company Saftra Photonics in the development of functionalized surfaces that allow the detection of organic pollutants.

For this reason, the thickness of the layers and the Au and Ag content in type samples grown in the different experimental conditions considered (Au NPs, Ag NPs, Mixed NPs and functionalized samples) were determined by RBS with alpha particles.

<u>Cálculo de la estequiometría de las películas delgadas  $Li_7La_3Zr_2O_{12}$  (LLZO) para baterías de litio.</u> Las baterías de iones de litio en estado sólido son una alternativa prometedora a las de electrolitos líquidos, ya que ofrecen una operación intrínsecamente más segura y un voltaje de salida más alto debido a la ausencia de restricciones impuestas por los electrolitos líquidos.

Entre los elementos principales de una batería de iones de litio, el centro de nuestra investigación en esta etapa es el enfoque en el cátodo (LMNO) y el electrolito sólido (LLZO). El proyecto SLIB liderado por el Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology se centra en materiales de estado sólido nuevos y seguros en y conceptos de diseño de dispositivos para la próxima generación de baterías recargables de iones de litio estado sólido, que ofrecen una alternativa a las baterías de iones de litio actuales basadas en líquido/polímero. Se han sintetizado, para su estudio en profundidad, nuevos electrolitos de granate y perovskita dopados, además de aleaciones de litio. En particular, se han centrado en una investigación de los fundamentos del transporte y almacenamiento de iones Li y electrones en relación con los defectos estructurales. Los resultados de las pruebas en semiceldas de "estado sólido" se compararán con las celdas de batería estándar basadas en electrolito líquido/polímero. La computación y los experimentos in situ innovadores para dilucidar la interacción entre la estructura y el transporte de iones de Li validarán y fortalecerán los hallazgos experimentales. Los componentes individuales de la batería de estado sólido para celdas grandes se fabricarán mediante polvos de sinterización. La miniaturización de la batería de estado sólido utilizando técnicas de película delgada para formar una microbatería se sugiere como una alternativa a las estructuras similares a los capacitores. Todas las aplicaciones de las baterías recargables de iones de Li, incluido el almacenamiento estacionario de energía, las fuentes de alimentación eléctrica para vehículos y la electrónica portátil, se beneficiarán de las nuevas

4. Investigación / Research

perspectivas sobre los materiales de electrolito en estado sólido presentados en el proyecto SLIB.

Estos materiales, en forma de capas finas, se depositaron por pulverización con magnetrón. Se recocieron posteriormente a altas temperaturas y se caracterizaron por difracción de rayos-X. A pesar de obtener las fases deseadas en cada caso, sería crucial determinar con precisión la composición de litio en cada caso debido al hecho de que este elemento se pierde durante el proceso de deposición Esta tarea se ha realizado en el CNA utilizando la técnica p-EBS con protones de 3,0 MeV.

<u>Calculation of the stoichiometry of thin films  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (LLZO) for lithium batteries.</u> All-solid state lithium ion batteries are a promising alternative to liquid electrolyte ones, offering an intrinsically safer operation and higher output voltage due to the absence of restrictions imposed by liquid electrolytes.

Among the primary elements of a lithium-ion battery, the centre of our research at this stage is focus on the cathode (LMNO) and solid electrolyte (LLZO) under the "All Solid State Li-Ion Batteries based on New Ceramic Li-ion Electrolytes (SLIB)" project. The SLIB project focuses on new and safe solid state materials and device design concepts for next generation, all solid state, Li+-ion rechargeable batteries, offering an alternative to current liquid/polymer based Li+-ion batteries. New doped garnet and perovskite electrolytes, and lithium-alloys will be synthesised and studied in depth. In particular, an investigation of the fundamentals of transport and storage of Li+-ions and electrons in relation to structural defects will be focused on. Results for tests in "solid state" halfcells will be compared with standard liquid/polymer electrolyte based battery cells. Computation and innovative in-situ experiments to elucidate the interaction between structure and Li+-ion transport will validate and strengthen experimental findings. Individual solid state battery components for large cells will be fabricated by sintering powders. Miniaturization of the all-solid-state battery using thin film techniques to form a microbattery is suggested as an alternative to capacitor-like structures. All applications of Li+-ion rechargeable batteries including stationary energy storage, electric vehicle power supplies, and portable electronics would benefit from the new insights into solid state electrolyte materials presented in the SLIB project. We promise ways to drastically increase safety while pushing up energy density and long term durability.

These materials, in the form of thin layers, were deposited by magnetron sputtering. They were subsequently annealed at high temperatures and characterized by X-ray diffraction. Despite obtaining the desired phases in each case, it is crucial to accurately determine the lithium composition in each case due to the fact that the lithium loss occurs during the deposition process. This task has been carried out in the CNA using the p-EBS technique with 3.0 MeV protons.

Medida de blancos de <sup>119</sup>Sn depositados sobre formvar para física nuclear básica. En los últimos años, miembros del departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear

4. Investigación / Research

de la Universidad de Sevilla han desarrollado un nuevo modelo de ruptura inclusiva en reacciones nucleares. Dicho modelo ha sido comprobado con éxito para los casos de deuterio y <sup>6</sup>Li, en el cual el estado fundamental dominante del proyectil es onda s (I=O). Sin embargo, hasta ahora no se ha probado con éxito para casos en los que el estado fundamental del proyectil sea distinto de cero, como es el caso de <sup>7</sup>Li. Para comprobar la validez de este modelo en este caso, se ha conformado una colaboración internacional entre miembros de la Universidad de Sevilla, la Universidad de Edimburgo (Escocia), el Instituto Ruder Boskovic de Zagreb (Croacia), el Centro Nacional de Aceleradores (CNA-Sevilla) y el laboratorio LNS-INFN de Catania (Italia).

Con este propósito se ha logrado medir en el laboratorio LNS-INFN, la dispersión elástica y los fragmentos de ruptura inclusiva (alfas y tritones) de la reacción <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn a energías en torno a la barrera de Coulomb. La elección de esta reacción se debe a que miembros de la misma colaboración habían obtenido anteriormente secciones eficaces de fusión completa del sistema <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn para un rango de energía comprendido entre 17,5 y 28 MeV.

La medida de la dispersión elástica y de los fragmentos de ruptura inclusiva (alfas y tritones) de la reacción <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn a energías se ha llevado a cabo utilizando un blanco de <sup>119</sup>Sn de 279  $\mu$ g/cm<sup>2</sup> depositado sobre un substrato (Formvar) de 4  $\mu$ m. En dicho experimento se ha observado que los núcleos de <sup>12</sup>C presentes en el substrato contribuyen notablemente a la producción de partículas alfas y tritones, lo cual enmascara los resultados finales de interés. Por tanto, para poder sustraer los fragmentos de ruptura de la reacción <sup>7</sup>Li+<sup>12</sup>C del total, es necesario conocer el espesor de <sup>12</sup>C del substrato.

Se ha medido la cantidad total de <sup>12</sup>C contenida en el substrato haciendo uso de la técnica de dispersión elástica de protones (p-EBS) ampliamente utilizada en el CNA, utilizando el programa de simulación, SIMNRA 6.0 y las secciones eficaces obtenidas con IBANDL, para dichos blancos. Los resultados obtenidos de estas medidas serán complementarios a medidas de la reacción de <sup>7</sup>Li+<sup>12</sup>C (blanco de <sup>12</sup>C de 92 µg/cm<sup>2</sup>) que se realizaron durante el experimento en el laboratorio LNS-INFN. Todo este conjunto de datos contribuirá de manera considerable al entendimiento de las distribuciones angulares y de energía de los fragmento de ruptura de <sup>7</sup>Li provenientes de la reacción <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn.

<u>Measurement of <sup>119</sup>Sn targets deposited on formvar for basic nuclear physics.</u> In recent years, members of the Department of Atomic, Molecular and Nuclear Physics of the University of Seville have developed a new model of inclusive rupture in nuclear reactions. This model has been successfully tested for deuterium and <sup>6</sup>Li cases, in which the dominant fundamental state of the projectile is wave s (I = 0). However, until now it has not been successfully tested for cases in which the fundamental state of the projectile is nonzero, as is the case of <sup>7</sup>Li. To verify the validity of this model in this case, an international collaboration has been formed between members of the University of Seville, the University of Edinburgh (Scotland), the Ruder Boskovic Institute in Zagreb

4. Investigación / Research

(Croatia), the National Center of Accelerators (CNA) -Sevilla) and the LNS-INFN laboratory in Catania (Italy).

With this purpose, it has been possible to measure in the LNS-INFN laboratory, the elastic dispersion and the fragments of inclusive rupture (alphas and tritons) of the <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn reaction at energies around the Coulomb barrier. The choice of this reaction is due to the fact that members of the same collaboration had previously obtained effective sections of complete fusion of the <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn system for an energy range between 17.5 and 28 MeV.

The measurement of the elastic dispersion and the inclusive breaking fragments (alphas and tritons) of the <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn reaction at energies was carried out using a <sup>119</sup>Sn target of 279  $\mu$ g / cm<sup>2</sup> deposited on a substrate (Formvar) of 4  $\mu$ m. In this experiment it has been observed that the nuclei of <sup>12</sup>C present in the substrate contribute remarkably to the production of alphas and tritons particles, which masks the final results of interest. Therefore, to be able to subtract the breaking fragments of the <sup>7</sup>Li+<sup>12</sup>C reaction from the total, it is necessary to know the thickness of <sup>12</sup>C of the substrate.

The total amount of <sup>12</sup>C contained in the substrate has been measured using the proton elastic dispersion technique (p-EBS) widely used in the CNA, using the simulation program, SIMNRA 6.0 and the sections obtained with IBANDL, for these targets elements. The results obtained from these measurements will be complementary to measures of the <sup>7</sup>Li+<sup>12</sup>C reaction (<sup>12</sup>C target of 92 µg / cm<sup>2</sup>) that were made during the experiment in the LNS-INFN laboratory. This whole set of data will contribute considerably to the understanding of the angular and energy distributions of the <sup>7</sup>Li breaking fragments from the <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn reaction.

Caracterización de muestras B para el grupo de colaboración n TOF-CERN en <u>Edimburgo</u>. La primera observación de rayos y del radioisótopo <sup>26</sup>Al ( $T_{1/2} \sim 1$  My) mostró que la nucleosíntesis está en curso en nuestra galaxia. Las observaciones detalladas del telescopio satelital indican que el <sup>26</sup>Al galáctico se produce predominantemente en diferentes etapas de combustión de las estrellas masivas de Wolf-Rayet. Cálculos recientes de redes de reacción han demostrado que las tasas de reacciones de destrucción inducidas por neutrones <sup>26</sup>Al(n,p) y <sup>26</sup>Al(n, $\alpha$ ) son la principal fuente de incertidumbre para predecir la cantidad de material de <sup>26</sup>Al expulsado al medio interestelar por las estrellas Wolf-Rayet. Los conjuntos limitados de datos experimentales sobre las reacciones  ${}^{26}AI(n,p)$  y  ${}^{26}AI(n,\alpha)$  exhiben discrepancias importantes, y no cubren todo el rango relevante de energía de combustión estelar. En consecuencia, los modeladores estelares han identificado nuevas mediciones en estas reacciones como la máxima prioridad para predecir las abundancias de <sup>26</sup>Al. El grupo de School of Physics and Astronomy, University of Edinburgh, ha medido en las instalaciones de n TOF CERN las secciones eficaces  ${}^{26}AI(n,p)$  y  ${}^{26}AI(n,\alpha)$  desde energías térmicas hasta 1 MeV que cubren todo el rango de energía de interés astrofísico. El experimento utilizó una muestra de <sup>26</sup>Al altamente enriquecida, y las partículas cargadas se detectarán utilizando un nuevo sistema detector de tiras de silicona de

4. Investigación / Research

doble cara. Las secciones transversales que se obtendrán se relacionan con el estándar  ${}^{10}B(n,\alpha)$  y  ${}^{6}Li(n,p)$ . Para la normalización se ha utilizado  ${}^{10}B$  y  ${}^{6}LiF$  enriquecido sobre un sustrato Mylar. Se ha medido en el CNA la concentración de  ${}^{10}B$  en diferentes muestras utilizando la técnica de RBS.

Characterization of samples B for the n TOF-CERN collaboration group in Edinburgh. The first observation of y-rays from the radioisotope  $^{26}$ Al (T<sub>1/2</sub> ~ 1 My) showed nucleosynthesis is on-going in our galaxy. Detailed satellite telescope observations indicate that galactic <sup>26</sup>Al is predominantly produced in different burning stages of massive Wolf-Rayet stars. Recent reaction network calculations have shown the rates of the neutron induced destruction reactions  ${}^{26}Al(n,p)$  and  ${}^{26}Al(n,\alpha)$  are the major source of uncertainty in predicting the amount of <sup>26</sup>Al material ejected into the interstellar medium by Wolf-Rayet stars. The limited experimental data sets on the  $^{26}$ Al(n,p) and  $^{26}$ Al(n, $\alpha$ ) reactions exhibit major discrepancies, and do not cover all the relevant stellar burning energy range. Consequently stellar modellers have identified new measurements on these reactions as the highest priority for predicting <sup>26</sup>Al abundances. At n TOF CERN facility it has been measure the  ${}^{26}AI(n,p)$  and 1  ${}^{26}AI(n,\alpha)$ cross-sections from thermal energies up to 1 MeV covering the entire energy range of astrophysical interest. The experiment used a highly enriched <sup>26</sup>Al sample, and the charged particles will be detected using a new double-sided silicon strip detector system. The cross-sections will be obtained relate to the  ${}^{10}B(n,\alpha)$  and  ${}^{6}Li(n,p)$  standard. <sup>10</sup>B and enriched <sup>6</sup>LiF on a Mylar backing were used for the normalisation. The concentration of <sup>10</sup>B in different samples has been measured in the CNA using the RBS technique.

<u>Cuantificación de <sup>14</sup>N en un blanco de adenina depositado sobre Al por evaporación.</u> En el marco de la Letter of Intent CERN-INTC-2014-007 / INTC-I-156, se ha propuesto el estudio de los sistemas de detectores Silicon Monitor (SiMon) y Micromegas para medir reacciones (n,p) n\_TOF (CERN). El objetivo final es la medida de la sección eficaz de la reacción <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C en un amplio rango de energías. Esta reacción es de interés en astrofísica nuclear y física médica.

Mientras los elementos más pesados que el Fe son creados por sucesivas capturas de neutrones y desintegraciones beta, ya sea durante el quemado de He en estrellas rojas gigantes (proceso s) o Supernovas (proceso r), el estudio de la sección eficaz (n,p) resulta de gran importancia para comprender la nucleosíntesis de los elementos ligeros. Las reacciones inducidas por neutrones en núcleos ligeros pueden ser de importancia clave para explicar la abundancia de los elementos producidos en el proceso s, ya que pueden actuar como "veneno de neutrones", es decir, absorbiendo neutrones y, por lo tanto, reduciendo los neutrones disponibles para la captura en los isótopos pesados. La reacción <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C representa una reacción de veneno de neutrones importante, ya que el <sup>14</sup>N disponible en los nichos de procesos s puede consumir una gran fracción de neutrones. Además, La reacción <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C está involucrada en la creación de <sup>19</sup>F, cuyo origen astrofísico sigue siendo un tema de debate, ya que proporciona protones para la producción de <sup>19</sup>F a través de la cadena

4. Investigación / Research

de reacciones <sup>18</sup>O(p, $\alpha$ )<sup>15</sup>N( $\alpha$ , $\gamma$ )<sup>19</sup>F. El <sup>19</sup>F es un trazador útil de las condiciones físicas en los interiores estelares ya que puede ser fácilmente destruido por las reacciones de protones y alfa, por lo tanto, cualquier mecanismo de producción también tiene que permitir al <sup>19</sup>F escapar de los interiores estelares calientes después de su producción como demuestra la gran abundancia de este isótopo observada en atmósferas AGB. Además de esto, se han encontrado recientemente importantes discrepancias, tan altas como 100%, entre las secciones eficaces promedio de Maxwell experimentales (MACS) y las evaluaciones de <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C.

Por otro lado, la reacción <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C es de interés en terapia de captura de neutrones por Boro (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) debido a la alta presencia de nitrógeno en el cuerpo humano y su alta sección eficaz especialmente para neutrones térmicos. La determinación de la dosis en BNCT se realiza mediante códigos de simulación Monte Carlo, en concreto mediante factores kerma-fluencia que se obtienen del conjunto de datos nucleares evaluados. Hay una buena cantidad de datos experimentales de la sección eficaz de la reacción <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C, abarcando varios rangos de energía diferentes. Sin embargo, las discrepancias existentes son importantes y relevantes para la dosimetría. De 61 MeV a 35 keV, solo hay una medida diferencial, Koehler y O'Brien, por lo que las evaluaciones se basan en ella, pero su extrapolación a la energía térmica no coincide con los resultados más recientes de Wagemans. La posible desviación de un factor ~ 2 en la temperatura tiene consecuencias importantes en la BNCT debido a la importancia crucial de la reacción <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C en la dosis administrada al tejido sano.

En el seno del grupo de trabajo n\_TOF se han obtenido blancos de adenina ( $C_5H_5N_5$ ) mediante evaporación sobre una lámina de Al de 16 µm de espesor. El espesor aproximado de Adenina en las mismas es 300 µg/cm<sup>2</sup>. Para el estudio de la sección eficaz es fundamental conocer la concentración total de at/cm<sup>2</sup> de <sup>14</sup>N que contiene la muestra. Para ello se ha realizado un barrido de medidas de p-EBS sobre el diámetro de la muestra con partículas alfa de 0,8 MeV de energía.

<u>Quantification of <sup>14</sup>N in an adenine target deposited on AI by evaporation.</u> Within the framework of the Letter of Intent CERN-INTC-2014-007/INTC-I-156, the study of the Silicon Monitor (SiMon) and Micromegas detector systems to measure reactions (n,p)  $n_{\rm T}OF$  (CERN). The final objective is the measurement of the effective cross section of the <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C reaction over a wide range of energies. This reaction is of interest in nuclear astrophysics and medical physics.

While elements heavier than Fe are created by successive captures of neutrons and beta decays, either during the burning of He in giant red stars (process s) or Supernovas (process r), the study of the cross section (n,p) is of great importance to understand the nucleosynthesis of light elements. Neutron-induced reactions in light nuclei may be of key importance in explaining the abundance of the elements produced in the s process, since they can act as "neutron poison", that is, by absorbing neutrons and, therefore, reducing the neutrons available for capture in heavy isotopes. The <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C reaction

### 4. Investigación / Research

represents an important neutron poison reaction, since the <sup>14</sup>N available in the process niches can consume a large fraction of neutrons. In addition, the <sup>14</sup>N (n p)<sup>14</sup>C reaction is involved in the creation of <sup>19</sup>F, whose astrophysical origin is still a subject of debate, since it provides protons for the production of <sup>19</sup>F, through the chain of reactions <sup>18</sup>O(p, $\alpha$ ) <sup>15</sup>N( $\alpha$ , $\gamma$ )<sup>19</sup>F. The <sup>19</sup>F is a useful tracer of physical conditions in stellar interiors since it can be easily destroyed by the reactions of protons and alpha, therefore, any production mechanism also has to allow the <sup>19</sup>F to escape from the hot stellar interiors after its production as evidenced by the great abundance of this isotope observed in AGB atmospheres. In addition to this, important discrepancies, as high as 100%, have recently been found between the average Maxwell experimental sections (MACS) and the <sup>14</sup>N(n, p)<sup>14</sup>C evaluations.

On the other hand, the <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C reaction is of interest in Boron neutron capture therapy (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) due to the high presence of nitrogen in the human body and its high cross section especially for thermal neutrons. The determination of the dose in BNCT is carried out by Monte Carlo simulation codes, in particular by kerma-fluence factors obtained from the nuclear data set evaluated. There is a good amount of experimental data for the cross section of the <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C reaction, spanning several different energy ranges. However, the existing discrepancies are important and relevant for dosimetry. From 61 meV to 35 keV, there is only one differential measure, Koehler and O'Brien, so the evaluations are based on it, but its extrapolation to thermal energy does not coincide with the more recent results of Wagemans. The possible deviation of a factor ~ 2 in temperature has important consequences in the BNCT due to the crucial importance of the <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C reaction in the dose administered to healthy tissue.

Within the n\_TOF working group, adenine targets (C5H5N5) were obtained by evaporation on an AI sheet of 16  $\mu$ m thickness. The approximate thickness of adenine in them is 300  $\mu$ g/cm<sup>2</sup>. For the study of the cross section it is essential to know the total concentration of at/cm2 of <sup>14</sup>N that the sample contains. For this purpose, a sweep of p-EBS measurements on the diameter of the sample with alpha particles of 0.8 MeV of energy was carried out.

<u>Cuantificación de <sup>35</sup>Cl en un blanco de KCl depositado sobre Al por evaporación.</u> En el marco de la Letter of Intent CERN-INTC-2014-007 / INTC-I-156, se ha propuesto el estudio de los sistemas de detectores Silicon Monitor (SiMon) y Micromegas para medir reacciones (n,p) n\_TOF (CERN). El objetivo final es la medida de la sección eficaz de la reacción <sup>35</sup>Cl(n,p)<sup>35</sup>S en un amplio rango de energías. Esta reacción es de interés en física médica y astrofísica nuclear. La motivación principal es abrir la posibilidad de estudios (n,p) en n\_TOF y la optimización de los detectores Silicon Monitor (SiMon) y Micromegas para adecuarlos a las medidas de la secciones eficaces (n,p).

Mientras los elementos más pesados que el Fe son creados por sucesivas capturas de neutrones y desintegraciones beta, ya sea durante el quemado de He en estrellas rojas gigantes (proceso s) o Supernovas (proceso r), el estudio de la sección eficaz (n,p)

4. Investigación / Research

resulta de gran importancia para comprender la nucleosíntesis de los elementos ligeros. En nuestro caso, resulta de interés el estudio de la sección eficaz de la reacción  $^{35}$ Cl(n,p) $^{35}$ S que juega su papel en la nucleosíntesis del isótopo estable  $^{36}$ S en el llamado proceso s. De hecho, tanto la teoría como datos experimentales indican que puede haber una ramificación del proceso-s de elementos ligeros en el isótopo  $^{35}$ Cl. Debido a que la medida de Koehler se extiende sólo hasta 100 keV se observó la región en la que se producen las resonancias, y no se pudieron estudiar varios niveles del  $^{36}$ Cl. La medida en un rango mayor de energía, junto con los datos obtenidos por nuestro grupo de la reacción  $^{33}$ S(n, $\alpha$ ) $^{30}$ Si, también involucrada en la Nucleosíntesis del 36S, pueden ayudar a aclarar la situación.

Por otro lado, la reacción <sup>35</sup>Cl(n,p)<sup>35</sup>S es de interés en terapia de captura de neutrones por Boro (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) debido a la presencia de cloro en el cuerpo humano y en mayor proporción en el líquido cefalorraquídeo. La determinación de la dosis en BNCT se realiza mediante códigos de simulación Monte Carlo, en concreto mediante factores kerma-fluencia que se obtienen del conjunto de datos nucleares evaluados. Algunos de estos datos no muestran comportamientos resonantes o bien no se extienden en los rangos de energía de la BNCT, más aún cuando el presente de la BNCT se basa en haces de neutrones producidos por acelerador en lugar de columnas térmicas o epitérmicas procedentes de reactores nucleares de experimentación. La mejora en los datos nucleares permitirá una mejora en las evaluaciones y por tanto una optimización en la determinación de la dosis en BNCT.

Resumiendo, sólo una medida diferencial cubre el rango de interés para NCT y cubre parcialmente el rango de energía de astrofísica nuclear.

Para obtener blancos de <sup>35</sup>Cl se ha depositado, en el seno del grupo n\_TOF, KCl mediante evaporación en vacío de KCl sobre una lámina de Al de 16 µm de espesor. El espesor aproximado de KCl en las mismas es 250 µg/cm<sup>2</sup>. Para el estudio de la sección eficaz es fundamental conocer la concentración total de at/cm<sup>2</sup> de <sup>35</sup>Cl que contiene la muestra. Para ello se ha realizado un barrido de medidas de RBS sobre el diámetro de la muestra con partículas alfa de 4,0 MeV de energía.

Quantification of <sup>35</sup>Cl in a KCl target deposited on Al by evaporation. Within the framework of the Letter of Intent CERN-INTC-2014-007/INTC-I-156, the study of the Silicon Monitor (SiMon) and Micromegas detector systems to measure reactions (n,p) n\_TOF (CERN). The ultimate goal is the measurement of the cross section of the <sup>35</sup>Cl(n,p)<sup>35</sup>S reaction over a wide range of energies. This reaction is of interest in medical physics and nuclear astrophysics. The main motivation is to open the possibility of studies (n,p) in n\_TOF and the optimization of the Silicon Monitor (SiMon) and Micromegas detectors to adapt them to the measurements of the effective sections (n, p).

4. Investigación / Research

While elements heavier than Fe are created by successive captures of neutrons and beta decays, either during the burning of He in giant red stars (process s) or Supernovas (process r), the study of the cross section (n,p) is of great importance to understand the nucleosynthesis of light elements. In our case, the study of the effective section of the <sup>35</sup>Cl(n,p)<sup>35</sup>S reaction that plays its role in the nucleosynthesis of the stable <sup>36</sup>S isotope in the so-called s process is of interest. In fact, both the theory and experimental data indicate that there may be a branching of the process-s of light elements in the <sup>35</sup>Cl isotope. Because the Koehler measurement extends only up to 100 keV, the region in which the resonances are produced was observed, and several levels of <sup>36</sup>Cl could not be studied. The measurement in a greater range of energy, together with the data obtained by our group of the reaction <sup>33</sup>S( $n,\alpha$ )<sup>30</sup>Si, also involved in the Nucleosynthesis of <sup>36</sup>S, can help to clarify the situation.

On the other hand, the <sup>35</sup>Cl(n,p)<sup>35</sup>S reaction is of interest in neutron capture therapy by Boron (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) due to the presence of chlorine in the human body and in greater proportion in the cerebrospinal fluid. The determination of the dose in BNCT is carried out by Monte Carlo simulation codes, in particular by kerma-fluence factors obtained from the nuclear data set evaluated. Some of these data do not show resonant behavior or do not extend into the energy ranges of the BNCT, especially when the present BNCT is based on neutron beams produced by accelerator instead of thermal or epithermal columns from nuclear reactors of experimentation. The improvement in the nuclear data will allow an improvement in the evaluations and therefore an optimization in the determination of the dose in BNCT.

In summary, only one differential measure covers the range of interest for NCT and partially covers the energy range of nuclear astrophysics.

To obtain <sup>35</sup>Cl blanks, KCl was deposited in the n\_TOF group by evaporation under vacuum of KCl on an Al sheet of 16  $\mu$ m thickness. The approximate thickness of KCl in them is 250  $\mu$ g/cm<sup>2</sup>. For the study of the cross-section it is essential to know the total concentration of at/cm<sup>2</sup> of <sup>35</sup>Cl that the sample contains. For this purpose, a RBS measurement sweep was performed on the diameter of the sample with alpha particles of 4.0 MeV of energy.

<u>Formación de defectos en semiconductores: aspectos fundamentales.</u> Actualmente el CNA forma parte del Proyecto Coordinado de la IAEA "Ion beam induced spatiotemporal structural evolution of materials: Accelerators for a new technology era", en el cual, en colaboración con el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) y la Universidad de Turín, estamos estudiando la formación de defectos estructurales en detectores de semiconductor tras irradiación iónica. Aunque es posible calcular mediante simulación Monte Carlo la concentración defectos primarios (vacantes e intersticiales) que se crean en un cristal en función del tipo de ión y energía empleados durante la irradiación, la evolución de estos defectos (mediante difusión, aniquilación, etc.) representa un problema muy complejo, con escalas temporales que varían desde

#### 4. Investigación / Research

el ps hasta días. La evolución del daño primario para formar otros defectos secundarios más estables es lo que se conoce como "Annealing Dinámico" y depende de factores tales como el flujo de iones durante la irradiación, la temperatura del substrato, defectos pre-existentes en el cristal, etc. En los primeros estudios, estamos comparando la degradación en CCE en una serie de fotodiodos comerciales de Hammamatsu irradiados con iones de He de 1 MeV en condiciones de tasa de dosis muy distinta: por un lado, utilizando el acelerador LINAC NDCX-II del LBNL la dosis total se suministra durante un único pulso ultracorto (~ 10 ns), lo cual corresponde a flujos iónicos muy altos, del orden de ~  $10^{19}$  ions/cm<sup>2</sup>s; por otro lado, utilizando el sistema de barrido de la microsonda del CNA, se obtienen flujos medios  $\sim 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>s, es decir, unos 11 órdenes de magnitud de diferencia. Los datos de estos experimentos han sido analizados en el marco del modelo teórico desarrollado durante un proyecto CRP IAEA anterior, e indican distintos coeficientes de daño para electrones y huecos para los detectores irradiados con alto y bajo flujo, lo cual significa que no sólo la densidad de trampas eléctricamente activas se ven modificadas por flujo el iónico, sino que el tipo de defectos secundarios estables también es distinto. Estos resultados son de enorme interés para los investigadores del LBNL, ya que abre la puerta a nuevos caminos en la ingeniería de defectos mediante la interacción ión-sólido con pulsos ultracortos.

Formation of structural defects in semiconductors: fundamental aspects. Presently, the CNA is a member of the IAEA Coordinated Project "Ion beam induced spatio-temporal structural evolution of materials: Accelerators for a new technology era", in which, in collaboration with the Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and the University of Torino we are studying the formation of structural defects in semiconductor detectors after ion irradiation. Although it is possible to calculate by Monte Carlo simulation the formation of primary defects (vacancies and interstitials) created in a crystal as a function of the ion and energy employed during the irradiation, the evolution of these represents a complex multi-scale problem, with characteristics times ranging from ps to days. The evolution of the primary damage to form stable secondary defects is known as "Dynamic Annealing" and depends of several factors as the ion flux during irradiation, the substrate temperature, pre-existent defects into the crystal, etc. In these first studies, we are comparing the CCE degradation in a series of Hammamatasu photodiodes irradiated with 1 MeV He ions at very different rates: in one hand, at LBNL using the LINAC NDCX-II where the total fluence is delivered in a single, ultrashort (~ 10 ns) pulse, which corresponds to very high ion fluxes, in the order of ~10<sup>19</sup> ions/cm<sup>2</sup>s; in the other hand, using the scan system of our microprobe, with average fluxes ~10<sup>8</sup> ions/cm<sup>2</sup>s, i.e. about 11 orders of magnitude lower. The data of these experiments has been analyzed in the frame of a theoretical model developed in a previous IAEA CRP and shows different damage coefficients for electrons and holes for detectors irradiated at high and low flux. These results open new possibilities for defect engineering through ion-solid interaction using ultrashort pulses.

<u>Estudio de detectores de avalancha para uso en Física de altas Energías.</u> Desde el año 2017, el CNA forma parte de la colaboración internacional RD50 del CERN que empezó su andadura en 2001 y cuyo objetivo es el desarrollo de detectores de silicio con alta
4. Investigación / Research

resistencia a la radiación para el HL-HLC y otros futuros experimentos en colisionadores. Actualmente, RD50 está formado por 345 miembros de 60 instituciones diferentes repartidas a lo largo de todo el mundo. Dentro del apartado dedicado a la caracterización de detectores, RD50 tiene un documento de recomendaciones donde describe cómo deben hacerse las medidas de CCE y qué técnicas deben usarse. Hasta ahora, en esta comunidad, las medidas de CCE incluían el uso de una fuente de emisores beta, particularmente de <sup>90</sup>Sr, o el uso de un láser, para simular el paso de un MIP (de sus siglas en inglés: Minimun Ionizing Particle) a través de un detector, ya que los MIPs son las partículas relevantes en los experimentos de Física de Altas Energías. Nuestro grupo ha aportado a esta colaboración las primeras caracterizaciones mediante IBIC de detectores de avalancha de baja ganancia (LGADs) (del inglés Low Gain Avalanche Detector), desarrollados por el IMB-CNM-CSIC junto con el Instituto de Física de Cantabria, poniendo en valor la alta resolución lateral que tiene el uso de iones altamente focalizados respecto a las demás técnicas recomendadas por RD50 y extendiendo así el uso de las medidas IBIC a la comunidad dedicada a la Física de Altas Energías. Los detectores LGADs (Figura 4.1) presentan una ganancia intrínseca debido a que una capa de multiplicación (tipo p) que se implanta debajo del cátodo (tipo n+) en la que se produce un aumento significativo del campo eléctrico, esta ganancia puede llegar a ser hasta de un factor 20 en sensores sin irradiar. Hasta ahora hemos estudiado prototipos de LGAD sin irradiar, en donde medido experimentalmente parámetros fundamentales como hemos la homogeneidad lateral de la ganancia en el volumen activo, la CCE en las zonas de aislamiento o la curva de variación de la ganancia con el voltaje aplicado.

Study of avalanche detectors for use in High Energy Physics. Since 2017 the CNA is a member of the international CERN RD 50 collaboration that started in 2001 to develop radiation hard silicon detectors for the HI-HLC and other future experiments in colliders. Presently, RD50 is formed by 345 members from 60 different institutions worldwide. Within the section devoted to detector characterization, RD50 present several recommendations to describe how the CCE measurements should be carried out and what techniques to use. So far, in this community, the CCE measurements included the use of a 90Sr radioactive beta source, or the use of a laser to simulate the passage of a MIP (Minimum Ionizing Particle) through the detector. Our group has contributed to this collaboration with the first characterization by IBIC of low gain avalanche detectors (LGAD), developed by the IMB-CNM-CICS and the IFCA, giving value to the high lateral resolution of the IBIC in comparison to the RD50 recommended techniques and spreading the use of IBIC to the High Energy Physics community. The LGAD detectors (Figure 4.1) present intrinsic gain due to the multiplication layer (type p) implanted below the cathode (type n+) in which the electric field is enhanced significantly, this gain can reach a factor of 20 in pristine detectors. So far, our group has studied nonirradiated LGAD prototypes, where we have experimentally determined fundamental parameters as the lateral homogeneity of the gain in the active volume, the CCE in the isolation areas and the curve gain vs applied voltage.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

4. Investigación / Research



Figura 4.1: Esquema de la sección transversal de un detector de avalancha. Su señal de campo eléctrico se representa a la izquierda / Cross section diagram of an avalanche detector. The electric field signal is plotted on the left side

## 4.1.2 Centro para Ensayos de Irradiación / Irradiation Testing Facilities

El área de Irradiación del CNA se encarga de coordinar toda la investigación relacionada con los ensayos de fiabilidad en dispositivos y materiales susceptibles de ser utilizados en ambientes críticos de radiación, como es el entorno espacial o los experimentos de física nuclear de altas energías. Así como la irradiación de materiales que conlleve una modificación para aplicaciones específicas en agricultura o medicina.

Este tipo de ensayos, ya sea en modo estático o dinámico, se realizan en RadLab empleando fotones gamma y en los laboratorios de los aceleradores de partículas Tándem y Ciclotrón; siendo las líneas de trabajo habitual con partículas la línea de irradiación e implantación y la de haz externo del Ciclotrón.

En la tecnología para el espacio es fundamental asegurar la resistencia de los materiales y la robustez de circuitos frente a la radiación. La técnica para validar su correcto comportamiento es el ensayo de irradiación acelerado, cuyo fin último es reproducir las condiciones de funcionamiento de un dispositivo y su entorno espacial, de modo que el circuito pueda recibir en un corto espacio de tiempo una exposición similar a la que podría recibir en su vida útil. La fiabilidad de un dispositivo puede ser

4. Investigación / Research

estudiada, entre otros, en base al impacto eventual de una partícula ionizante (Single Event Effects, SEE; Displacement Damage Dose, DDD) o en función de una determinada dosis de radiación acumulada (Total Ionization Dose, TID). En estos dos años, el CNA ha continuado con su labor científico-técnica en el irradiador gamma, e implementando algunas de las líneas de trabajo de los aceleradores para el estudio de producción de fallos en tecnologías altamente integrada además del daño en materiales.

The irradiation area of the CNA coordinates all the research related to reliability testing on devices and materials that could be used in critical environments of radiation, such as the space environment or high energy Physics experiments. As well as the irradiation of materials that implies their internal modification for particular applications in agriculture and medicine.

This type of test, in static and/or dynamic mode, is performed in RadLab using gamma photons and in the laboratories of Tandem and Cyclotron particle accelerators; using the irradiation and implantation line and the external beamline of the Cyclotron.

When the technology is used in Space, the materials resistance and the robustness of circuits against radiation must be ensured. The technique to check the devices behavior is the called irradiation accelerated test, where the operation conditions and the environment are reproduced, so that the circuit can receive in a short time a similar radiation than during their full lifetime. The reliability of a device under radiation can be studied, among others, based on the eventual impact of an ionizing particle (Single Event Effects, SEE; Displacement Damage Dose, DDD) or according to a given dose of radiation accumulated (Total Ionization Dose TID). During these years, the CNA has followed his scientific-technical work in the gamma irradiator, and implementing some of the lines of work in the accelerators, aimed at the research of failure in highly integrated technologies and damage into materials.

Ensayos de irradiación gamma en dispositivos electrónicos y materiales para uso espacial. En estos dos años, en el laboratorio de radiación gamma (RadLab) se han realizado campañas de irradiación TID de muy diversa naturaleza y aplicación. Se han llevado a cabo ensayos en modo estático en materiales y dispositivos. Sin embargo, en la mayoría de estos estudios los dispositivos sometidos a radiación (DUT, device under test) están en funcionamiento durante el ensayo, y en muchos casos su comportamiento es monitorizado "on line". Existe además la posibilidad de conexión remota por parte del usuario externo con su experimento. En la Figura 4.2 se pueden ver algunos ejemplos de montaje experimental.

Dentro del marco del proyecto RENASER3, uno de cuyos subproyectos lidera también el CNA, se han realizado varias campañas de irradiación sobre generadores de números aleatorios en colaboración con un grupo del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid. La motivación de este trabajo era conocer cómo la radiación ionizante puede afectar a la calidad de la aleatoriedad de un TRNGs (true-random number generators) o generador de números aleatorios; así

4. Investigación / Research

como conocer cuáles son los efectos de TID en la lógica no determinista, en particular en dos TRNGs basados en el principio de muestreo de Jitter. Los TRNG son un componente importante en los sistemas criptográficos actuales. En ellos recae típicamente la generación de claves seguras para su uso en satélites de comunicación, lo que supone un gran reto. Estos TRNGs están sujetos a exhaustivos análisis de la calidad de la aleatoriedad en tierra para comprobar su conveniencia para espacio. Los TRNGs pueden ser embebidos en componentes comerciales evitando así costes mayores, haciéndolos especialmente interesantes para pico-satélites, por ejemplo. En este caso se ha implementado en una FPGA modelo Igloo AGLN250 fabricada por Microsemi (130 nm flash technology). Este experimento se ha realizado de acuerdo con el método estándar de la Agencia Espacial Europea para TID (ESCC 22900), acumulando 45 krad(Si) con una tasa de dosis de 217 rad(Si)/h. El DUT y la placa fueron colocadas en una 'filter box' de aluminio, plomo y PMMA para garantizar el equilibrio electrónico. La alimentación de la FPGA fue monitorizada continuamente durante el experimento. Las propiedades estadísticas de la salida se evaluaron para diferentes TID acumulados con el fin de ver cómo la radiación afecta la calidad de aleatoriedad de la salida. Se registraron además los errores de comunicación y fallos funcionales. Durante el experimento, se observó una degradación de las propiedades estadísticas de ambos TRNGs. Es muy notable que el deterioro ocurra antes del primer fallo en los bloques deterministas. Por lo tanto, el componente no determinista (TRNG en nuestro caso particular) es el que establece el nivel máximo de radiación permitido en el circuito integrado. Todo esto subraya la importancia de considerar los componentes no deterministas cuando la radiación está presente.

En la misma línea, se ha estudiado el efecto de la radiación en otro tipo de dispositivos denominados "Physical Unclonable Functions-PUFs", de potencial uso en sistemas criptográficos implementados en FPGAs comerciales para espacio. Las PUF proporcionan al circuito una característica específica a modo de huella digital. En concreto durante estas campañas se ha evaluado la denominada "Ring Oscillator PUF" utilizando dos FPGAs de Xilinx fabricadas en 90 nm. El DUT y la placa fueron colocadas en una "filter box" de aluminio y plomo de acuerdo con el método estándar para TID (ESCC 22900). Sin embargo, después de la primera campaña, se decidió añadir en la tapa un blindaje extra para atenuar la tasa de dosis de radiación gamma en las áreas más sensibles de la placa que impedían ejecutar los ensayos hasta tener resultados visibles. Finalmente se acumuló una dosis de 500 krad(Si) con una tasa de dosis del orden de 5 krad(Si)/h. Este experimento fue continuamente monitorizado, in-situ y además mediante un acceso remoto. Los resultados de los ensayos TID muestran estabilidad en las frecuencias y que la aleatoriedad de la respuesta no se ve afectada. Sin embargo se aprecia cierta degradación en la fiabilidad y singularidad de la respuesta que puede ser corregida por métodos conocidos y ser utilizados para aplicaciones espaciales.

En el último año se ha iniciado una colaboración con el Departamento de Ingeniería electrónica de la Universidad de Valencia, para estudiar el efecto de la radiación en dispositivos de nitruro de galio con potencial uso aeroespacial. Los semiconductores

4. Investigación / Research

de nitruro de Galio (GaN) ofrecen un comportamiento electro-térmico de elevadas prestaciones, siendo muy atractivos para aplicaciones industriales. Las propiedades inherentes al material, tales como la alta movilidad de los electrones y el mayor campo eléctrico de ruptura, hacen del GaN un material ideal para desarrollar estructuras de heterounión para obtener transistores FET de alta frecuencia y alta potencia. En el campo de las aplicaciones aeroespaciales, los transistores de GaN representan una posibilidad de aumentar la densidad de potencia de los convertidores DC/DC utilizados dentro del bus de potencia, dado que son dispositivos para trabajar eficientemente a elevadas frecuencias (rango de megahercios) con altas densidades de corriente. Este aumento de frecuencia representará una disminución importante del tamaño y peso de los componentes pasivos (condensadores, inductores y transformadores de potencia). Hasta el momento, hemos realizado dos campañas de irradiación sobre diferentes transistores de alta movilidad de electrones (HEMT = High Electron Mobility Transistor) Los dispositivos, funcionando en diferentes condiciones de operación, se han irradiado con una tasa de dosis del orden de 23.7 krad(Si)/h llegando hasta una dosis total acumulada del orden del Mrad. Se han obtenido resultados de gran interés en este campo que actualmente se encuentran en proceso de publicación.

La empresa española Solar MEMS, dedicada fundamentalmente al desarrollo de sensores solares para el sector espacial, ha desarrollado un sensor de horizonte (HSNS) para nanosatélites junto al Dpto. de Ingeniería Electrónica de la ETSI-US. Este sensor, que permite el apuntamiento continuo al centro de la Tierra, formará parte de una misión espacial con fines experimentales. En el laboratorio RadLab se ha realizado la campaña de ensayos TID conducentes a la calificación de su amplificador diferencial, en niveles de radiación de la órbita LEO. Para ello se utilizó una tasa de dosis de 339 rad(Si)/h, acumulando hasta un máximo de 53 Krad(Si), cumpliendo las condiciones del estándar europeo ESCC22900.

También en el laboratorio RadLab, es habitual colaborar con el Departamento de Optoelectrónica y Nuevas Tecnologías de la empresa Alter Technology. Se llevan a cabo ensayos de TID en diferentes dispositivos optoelectrónicos (interruptores ópticos, emisores IR, fotodiodos, sensores de imagen, LEDs y fibras ópticas) para su cualificación para uso espacial. En este periodo se ha realizada una campaña además sobre sistemas ASICs y ADCs desarrollados por el Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE-CSIC). La naturaleza de los dispositivos es variable y por tanto su caracterización, sin embargo para los ensayos de irradiación se suele trabajar en dos ventanas de tasa de dosis. En nuestro laboratorio es usual emplear muy baja (< 36 rad(Si)/h) y baja tasa (  $\approx$  220 rad(Si)/h) variando la dosis acumulada según el caso, en el orden de 10,50, 100 ó 500 Krad(Si) en general. Se suelen emplear unos contenedores de acuerdo a la normativa para espacio (ESCC, MIL), y en caso de dispositivos ópticos se coloca una tapa opaca para evitar la luz directa sobre el dispositivo a irradiar.

Cabe destacar la posibilidad de simultanear en nuestro laboratorio varios ensayos a diferentes tasas de dosis. Se ha realizado una campaña para la cualificación de una serie de sensores de vibración inalámbricos, WVS – Wireless Vibration Sensor, para uso

4. Investigación / Research

en satélites de la empresa SmartAcc Technology. En este caso se ha podido completar una campaña de ensayos en modo estático, con dosis acumulada de 6 Mrad(Si) en unos diez días. Las muestras se pudieron colocar en el propio cabezal del irradiador bajo una tasa de dosis de 24 krad(Si)/h, sin interferir al resto de ensayos que corrían a baja tasa de dosis.



Figura 4.2: Ejemplos de set-up experimental para ensayos de irradiación TID en RadLab / Examples of experimental set-up for TID irradiation testing in RadLab

Gamma irradiation testing on electronic devices and materials for space applications. In the last two years, different TID irradiation test campaigns were performed in the gamma radiation laboratory (RadLab) for a wide range of applications. Static mode testing on materials and devices has been carried out. However, the most usual it is to work with the device under test (DUT) running during the irradiation, also monitoring their behavior "on line". Moreover, in the laboratory there is the possibility to work with remote control by the external user. In the Figure 4.2 some experimental set-ups are shown.

Within the framework of the RENASER3 project, one of whose subprojects is led by the CNA, several irradiation campaigns on random number generators have been carried out in collaboration with a group from the Electronic Technology Department of the Carlos III University of Madrid. The motivation of this work was to know how the radiation can affect the quality of the randomness of a TRNG (true-random number generators); as well as to know the effects of TID on non-deterministic logic, particularly in two TRNGs based on the Jitter sampling principle. TRNGs are an

#### 4. Investigación / Research

important component in current cryptographic systems. Typically, they are used in the generation of secure keys in communication satellites applications, which is nowadays a great challenge. These TRNGs are subject to exhaustive analyzes of the quality of randomness on land to check their suitability for space. The TRNGs can be embedded in commercial components thus avoiding higher costs, making them especially interesting for pico-satellites, for example. In this case, it has been implemented in an FPGA model Igloo AGLN250 manufactured by Microsemi (130 nm flash technology). This test campaign was carried out according to the standard method of the European Space Agency for TID (ESCC 22900), accumulating 45 krad(Si) with a dose rate of 217 rad(Si)/h. The DUT and the board were placed in an aluminum, lead and PMMA filter box to quarantee the electronic balance. The FPGA power supply was continuously monitored during the experiments. The statistical properties of the output were evaluated for different cumulative TIDs in order to see how the radiation affects the quality of randomness of the output. Communication errors and functional failures were also recorded. During the experiment, a degradation of the statistical properties of both TRNGs was observed. It is very remarkable that the deterioration occurs before the first failure in the deterministic blocks. Therefore, the non-deterministic component (TRNG in our particular case) is the one that establishes the maximum level of radiation allowed in the integrated circuit. All this highlights the importance of considering nondeterministic components when radiation is present.

In the same line, it has been studied the effect of radiation on other types of devices, the called "Physical Unclonable Functions-PUFs", which have potential use in cryptographic systems implemented in commercial FPGAs for space. The PUFs provide the circuit with a specific characteristic as a fingerprint. During these campaigns, in particular the so-called "Ring Oscillator PUF" has been evaluated using two Xilinx FPGAs, manufactured in 90 nm technologies. The DUT and the board were placed in an aluminum and lead filter box according to the standard method for TID (ESCC 22900). However, after the first test campaign, we added an extra shielding to attenuate the gamma dose rate on the most sensitive areas of the PCB which prevented visible results in the starting tests. Finally, a total dose of 500 krad(Si) was accumulated using a dose rate in the order of 5 krad(Si)/h. This experiment was continuously monitored in both ways, in-situ, and through a remote access. The results of the TID tests show stability in the frequencies and that the randomness of the response is not affected. However, there is some degradation in the reliability and uniqueness of the response that can be corrected by known methods and be used for space applications.

In the last year we have started collaboration, with the Department of Electronic Engineering of the University of Valencia, to study the effect of radiation on gallium nitride devices with potential aerospace use. Galium nitride semiconductors (GaN) offer a high performance electro-thermal behavior, being very attractive for industrial applications. The inherent properties of the material, such as the high mobility of the electrons and the greater electric field of rupture, make GaN an ideal material to develop heterojunction structures to obtain FET transistors of high frequency and high power. In the field of aerospace applications, GaN transistors represent a possibility to

4. Investigación / Research

increase the power density of DC/DC converters used within the power bus, since they are devices to work efficiently at high frequencies (megahertz range) with high current densities. This increase in frequency will represent a significant decrease in the size and weight of the passive components (capacitors, inductors and power transformers). So far, we have carried out two irradiation test campaigns on different high mobility electron transistors (HEMT = High Electron Mobility Transistor). The devices, operating in different bias conditions, have been irradiated with a dose rate in the order of 23.7 krad(Si)/h up to obtain a cumulative total dose in the order of Mrad(Si). We have obtained interesting results that are currently in publishing process.

The Spanish company Solar MEMS, mainly devoted to sun sensors development for space application, has developed a horizon sensor (HSNS) for nanosatellites in collaboration with Dpto. Ingeniería Electrónica at ETSI-US. This sensor, which allows continuous pointing to the center of the Earth, will be part of a space mission for experimental purposes. In the RadLab laboratory, the TID tests have been performed on the differential amplifier for its qualification at the expected radiation levels in LEO orbit. Campaigns were carried out at 339 rad(Si)/h, accumulating up to a maximum of 53 Krad(Si), fulfilling the conditions of the European standard ESCC22900.

Moreover in the RadLab laboratory, it is common to collaborate with the Department of Optoelectronics and New Technologies of the company Alter Technology. TID tests are carried out on different optoelectronic devices (optical switches, IR emitters, photodiodes, image sensors, LEDs and optical fibers) for their qualification for space use. In this period, a campaign was also carried out on ASICs and ADCs systems developed by the Institute of Microelectronics of Seville (IMSE-CSIC). Although the nature of the devices is variable and therefore their characterization, from the point of view of irradiation set-up is usual to work in two dose rate windows. In our laboratory it is usual to use very low (<b36 rad(Si)/h) and low rate ( $\approx$ b220 rad(Si)/h) varying the cumulative dose according to the case, in the order of 10, 50, 100 or 500 Krad(Si) in general. Usually, containers are used according to the standards for space use (ESCC, MIL), and in case of optical devices an opaque cover is placed to avoid direct light on the device to be irradiated.

Must be highlight the RadLab possibility cover simultaneous different dose rate testing. One campaign has been carried out for the qualification of a series of wireless vibration sensors (WVS) for use in satellites, from the company SmartAcc Technology. In this case it was possible to complete the tests campaign in static mode, with a cumulative dose of 6Mrad (Si) in about ten days. The samples were placed in the irradiator head itself under a dose rate of 24 krad(Si)/h, without interfering with the rest of the tests running at low dose rate.

<u>Ensayos de irradiación gamma en dispositivos electrónicos para uso terrestre.</u> La creciente instalación de laboratorios de altas energías, hace que aumente también el interés por conocer la robustez de los dispositivos electrónicos que han de funcionar en estos entornos hostiles de radiación. La necesidad de ensayar los dispositivos que

4. Investigación / Research

se usen en estas instalaciones llega a todos los niveles. Dentro del proyecto de la obra civil para construir los edificios de ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) que albergará al complejo Tokamak, la empresa sevillana MP (MAC PUAR S.A.) consiguió el contrato de instalación de sus ascensores. En concreto en aquellos que van instalados en el edificio 14, clasificado como zona controlada por protección radiológica, ha de asegurarse la funcionalidad durante 25 años de operación. Se estima que en esta zona los equipos podrán recibir un máximo de tasa de radiación de 25  $\mu$ Gy/h que a lo largo de 25 años supondría una dosis acumulada de 5,5 Gy. Se prevé que la radiación en este edificio provenga de fotones gamma. Por tanto, el personal del laboratorio RadLab ha diseñado la propuesta y ejecutado el plan de ensayos de los módulos electrónicos de control y el motor que forman parte del modelo de los cuatro ascensores instalados en dicho edificio. En total se ha realizado el ensayo de 15 piezas divididas en cuatro lotes, acoplándolas según su geometría, ya que 13 de ellas estaban montadas en tarjetas electrónicas pero además se irradiaron piezas de mayor volumen como el variador de frecuencias y el motor eléctrico (Figura 4.2). Se decidió acumular una dosis total de 11 Gy(Si) para ampliar el margen de confianza, y se trabajó con un rango de tasa de dosis de 10 a 14 Gy(Si)/h según los lotes. Las muestras se fueron trasladando después de irradiar a las instalaciones de la empresa para realizar las medidas de funcionalidad en menos de 2 horas. En ninguna de ellas se observó degradación alguna por lo que se consideran aptas para su instalación.

Gamma irradiation testing on electronic devices for terrestrial use. The emergent installation of high-energy laboratories increases the interest in knowing the robustness of the electronic devices, which must also work in hostile environments of radiation. The need to test the devices to be used in these facilities reaches all levels. Within the project of the civil work to build the buildings of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) that will house the Tokamak complex, the Sevillian Company MP (MAC PUAR S.A.) obtained the installation contract for its lifts. Specifically in those belonging to the building 14, classified as a controlled zone by radiological protection, their functionality must be ensured during 25 years of operation. It is estimated that the equipment installed in this area could receive a maximum radiation rate of 25  $\mu$ Gy / h, which means an accumulated dose of 5,5 Gy over a period of 25 years. The radiation is expected to be gamma photons in this building. Therefore, the RadLab laboratory staff has designed the proposal and executed the test plan for the electronic control modules and the motor, which are part of the model of the four lifts to be installed in that building. In full, the test of 15 pieces divided into four packages has been carried out, coupling them according to their geometry, since 13 of them were mounted on electronic cards but also pieces of larger volume were irradiated, such as the frequency inverter and the electric motor (Figure 4.2). We decided to accumulate a total dose of 11 Gy (Si) to expand the confidence margin, working with a dose rate range of 10 to 14 Gy (Si) / h according to the lots. The samples were transported after irradiation to the company's facilities to perform the functionality measurements into 2 hours. In none of them was observed any degradation, so they are considered suitable for installation.

#### 4. Investigación / Research

<u>Ensayos de irradiación gamma en modificación de materiales.</u> Se ha colaborado con el Dpto. De Tecnología de la Alimentación y Nutrición de la Universidad Católica San Antonio de Murcia. En el marco de un proyecto basado en el desarrollo de sistemas de riego subterráneo, se ha comenzado a estudiar la modificación de funcionalidad de polietileno mediante irradiación gamma para inclusión de ciclodextrinas en el plástico, bien de la tubería o del gotero. Este material es capaz de contener materia activa inhibidora del crecimiento radicular y realizar la liberación lenta y controlada en el medio. Se ha realizado una primera campaña de irradiación acumulando tres dosis 50, 100 y 200 kGy (PE) con una tasa de dosis de 385 Gy(PE)/h. Muestras de tuberías y en forma granulada se distribuyeron en un porta muestras de metacrilato y se colocaron en el cabezal del irradiador. Los análisis de las muestras después de irradiar con estas dosis no mostraron diferencia en la captación de ciclodextrinas, por lo que continua en fase de estudio.

En el mismo sentido, se han realizado dos campañas de irradiación sobre muestras de suelos del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC-IRNAS). Estos trabajos se enmarcan dentro del estudio de la actividad respiratoria de microorganismos termófilos en suelos. Hasta el momento se ha acumulado una dosis de 50 kGy(Si) con una tasa de dosis del orden de 300 Gy(Si)/h. Los primeros resultados al analizar las muestras irradiadas muestran una reducción de la actividad respiratoria de 55-65% en diferentes tipos de suelos. Queda abierta la posibilidad a ampliar el estudio al resto de muestras que se estudien dentro del proyecto.

<u>Gamma irradiation testing on materials modification.</u> We have collaborated with the Dept. of Technology of Food and Nutrition of the Catholic University of San Antonio de Murcia. Within the framework of a project based on the development of underground irrigation systems, it is studied the modification of polyethylene functionality by means of gamma irradiation for the inclusion of cyclodextrins in the plastic, either from the pipeline or from the dropper. This material is able to contain an active component inhibitory of root growth and perform slow and controlled release in the medium. A first irradiation campaign was carried out, accumulating three doses of 50, 100 and 200 kGy(PE) with a dose rate of 385 Gy (PE)/h. Samples of pipes and in granular form were distributed in a sample holder of methacrylate, which was placed in the head of the irradiator. The analysis of the samples after irradiation with these doses showed no difference in the cyclodextrins grafting, so it is still under study.

In the same way, two irradiation campaigns have been carried out on soil samples from the Institute of Natural Resources and Agrobiology of Seville (CSIC-IRNAS). These works are within a larger study on the breathing activity of thermophilic microorganisms in soils. So far, a dose of 50 kGy(Si) has been accumulated with a dose rate in the order of 300 Gy (Si)//h. The first results, when analyzing a series of irradiated samples, show a reduction of respiratory activity of 55-65% in different soil types. The possibility to expand this study to the rest of the samples within the full project remains open.

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

4. Investigación / Research

<u>Combinación de diferentes ensayos de irradiación en dispositivos electrónicos para uso</u> <u>espacial.</u> Hemos conseguido que las capacidades actuales nos permitan realizar diferentes tipos de ensayos, sobre un mismo dispositivo, dentro del Centro Nacional de Aceleradores.

Se han realizado campañas de irradiación sobre sensores y fuentes de radiación infrarroja dentro de un proyecto del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid. Un grupo de este departamento está desarrollando un sensor de polvo en suspensión, que utiliza este tipo de dispositivos, para estudiar la atmósfera de Marte. Este sistema irá instalado en la estación meteorológica METEO de IKI, que está incluido en el proyecto EXOMARS20 de la ESA. Para llevar a cabo la caracterización de estos dispositivos se ha trabajado tanto en el laboratorio de fotones gamma como en el del ciclotrón, con el fin de determinar la resistencia al daño por dosis acumulada (TID) y por desplazamiento (DD) respectivamente. Los dispositivos se montaron en una placa especialmente diseñada para ser utilizada en ambos laboratorios (Figura 4.3).



Figura 4.3: Ejemplos de adaptación de set-up experimental para ensayos con fotones y protones / Examples of adaptation of the experimental set-up for photons and protons irradiation testing

Se preparó una segunda placa con emisores de IR para, realizar las medidas de los parámetros establecidos para su caracterización (tensión e impedancia con y sin iluminación). Los ensayos de TID se iniciaron con una tasa de dosis de 36 rad(Si)/h hasta acumular 4.7 Krad(Si), al no observar variación en su comportamiento se continuó a una tasa de 212 rad(Si)/h hasta acumular un máximo en torno a 500 krad(Si). Se hicieron hasta veinte pasos de medidas después de irradiar a diferentes dosis acumuladas. Los ensayos DD se realizaron en la línea externa del ciclotrón incidiendo con protones tal que alcanzaran 10 MeV en la zona activa. Las dispositivos se irradiaron con un flujos del orden de  $6x10^8$ - $3x10^9$  p/cm<sup>2</sup>s hasta alcanzar en cinco pasos una fluencia acumulada en torno a  $10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>, equivalente a una dosis

absorbida del orden de 1 Mrad(Si). En general las fuentes no se han visto afectadas y en los detectores sí se aprecia una ligera degradación siendo más sensibles los del tipo PbSe que los PbS. Los resultados, con respecto a los parámetros de estudio, están siendo aún evaluados en detalle pero parecen indicar que los dispositivos estudiados se podrían cualificar dentro de los que soportan el más alto nivel de radiación según clasificaciones de la ESA y el DLA.

Dentro también del marco del proyecto RENASER3, se trabaja desde hace años con un grupo del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid. En el último año se han realizado también campañas de irradiación con otro de los grupos coordinados que pertenece al Dpto. de Tecnología Informática y Computación de la Universidad de Alicante. En modo global se estudia la efectividad de las técnicas de robustecimiento desarrolladas para sistemas electrónicos comerciales sometidos a entornos hostiles de radiación. Uno de los objetivos es validar las técnicas de tolerancia a fallos en sistemas distribuidos, mediante endurecimiento colaborativo. Por otro lado, establecer estrategias de mitigación de fallos mediante evaluación temprana de efectos de radiación en microprocesadores avanzados. En los últimos trabajos se está analizando la robustez de diversos programas basados en multiplicación de matrices, así como las mejoras introducidas en la fiabilidad de las aplicaciones integradas mediante diferentes metodologías. En este caso, las modificaciones son implementadas por software usando generalmente el microprocesador ARM Cortex-A9 de la FPGA comercial que se ha seleccionado. Aunque se han realizado ensayos utilizando tarjetas con tecnología de 130 nm, para usar en nuestras instalaciones se ha determinado que las más adecuadas son las tarjetas de Zybo que usan una tecnología de fabricación de 28 nm. Esto ha contribuido a que podamos optimizar los ensayos de SEE empleando la línea de haz externo del ciclotrón en este tipo de dispositivos sin necesidad de desencapsular. Las campañas de irradiación se realizan siempre en modo dinámico hasta obtener una estadística de al menos 100 eventos en cada paso. Los dispositivos han sido irradiados con protones de 15 MeV, trabajando con flujos del orden de 10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> p/cm<sup>2</sup>s y parando en pasos de fluencia en el rango de  $10^{11}$ - $10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>, en función de la tasa de errores registrada. La sección eficaz es suficientemente alta para hacer viable este tipo de ensayos en nuestro laboratorio con campañas de dos a tres días de duración. A lo largo de los últimos años, nuestros grupos han llevado a cabo este tipo de campañas también utilizando neutrones en las instalaciones del LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center). Aprovechando esta experiencia, hemos querido evaluar la capacidad de nuestras instalaciones para realizar este tipo de ensayos SEE con protones pero también con neutrones (Figura 4.4). Por el momento se ha trabajado en el acelerador tándem de 3 MV, con un haz primario de deuterio se obtiene un haz de neutrones mediante reacción nuclear D(d,n) con un blanco deuterado. En el último año se han llevado a cabo campañas de irradiación usando los mismos bancos de prueba con neutrones de energía media en torno a 7 MeV y flujos del orden de 10<sup>6</sup> n/cm<sup>2</sup>s. Los resultados son muy prometedores, ya que a pesar de la diferencia en los espectros energéticos de los haces de neutrones de ambos laboratorios, los resultados globales en cuanto a la categorías y porcentajes de errores encontrados son similares,

4. Investigación / Research

coincidiendo además con valores obtenidos en los ensayos con protones. La comparativa de los estudios realizados en LANSCE con los llevados a cabo en el CNA demuestra que nuestras instalaciones son viables para trabajar con tecnologías altamente integradas.



Figura 4.4: Set-up experimental para ensayos SEE en microprocesadores con protones y neutrones en el CNA / Experimental set-up for protons and neutrons SEE testing on microprocessors at the CNA

<u>Combination of different irradiation tests in electronic devices for space use.</u> The current capabilities of the National Center for Accelerators allow us to perform different types of tests on the same device.

Irradiation campaigns have been carried out on infrared (IR) detectors and sources within the framework of a project by the Department of Electronic Technology of the University Carlos III of Madrid. A group of this department is developing a sensor of dust in suspension, which uses this type of devices, to study the atmosphere of Mars. This system will be installed in the meteorological station METEO of IKI, which is included in the ESA project EXOMARS20. In order to carry out the characterization of these devices, we have worked in the gamma photon laboratory and in the cyclotron, in order to determine the robustness against damage produced by accumulated dose (TID) and by displacement (DD) respectively. The devices were mounted on a specially designed board to be used in both laboratories (Figure 4.3). A second board was prepared with IR devices to perform the measurements of the parameters established for its characterization (voltage and impedance with and without illumination). The TID tests were performed with a dose rate of 36 rad (Si) / h up to 4.7 Krad (Si); as no variation in their behavior was observed, the campaign was completed up to 500 krad (Si) working at a rate of 212 rad(Si)/h. Twenty steps were made in order to measure after irradiation at different accumulated doses. The DD tests were carried out on the external beamline of the cyclotron, using protons with energy of 10 MeV in the active area. The devices were irradiated in five steps with fluxes in the order of  $6x10^8$ - $3x10^9$  $p/cm^2$ s up to achieve an accumulated fluence around  $10^{12} p/cm^2$ , equivalent to an absorbed dose in the order of 1 Mrad(Si). In general, the IR sources have not been affected and the detectors only show a slight degradation, being more sensitive the PbSe type than the PbS. The results, with respect to the study parameters, are still being evaluated in detail but they seem to indicate that the studied devices could be qualified within those that support the highest level of radiation, according to classifications of the ESA and the DLA.

4. Investigación / Research

Within the framework of the RENASER3 project, we are working for years with a group of the Department of Electronic Technology of the University Carlos III of Madrid. In the last year, irradiation campaigns have also been carried out with another of the coordinated groups belonging to the Department of Information Technology and Computing of the University of Alicante. In general, it is studied the effectiveness of hardening techniques developed for commercial electronic systems to be used in hostile radiation environments. One of the objectives is to validate the fault tolerance techniques in distributed systems, through collaborative hardening. Moreover to establish the fault mitigation strategies through the early evaluation of radiation effects in advanced microprocessors. In recent works the robustness of various programs based on matrix multiplication is being analyzed, as well as the improvements introduced in the reliability of integrated applications through different methodologies. In this case, the modifications are implemented by software generally using the ARM Cortex-A9 microprocessor of the commercial FPGA that has been selected. Although tests have been carried out on cards using 130 nm technologies, it has been determined that the most suitable to be used in our facilities are the Zybo cards, manufactured in 28 nm technology. This fact has contributed to optimize SEE tests performing in the external beam line of the cyclotron for this type of devices, without having to de-encapsulate. Irradiation campaigns are always carried out in dynamic mode up to achieve at least a statistic of 100 events during each run. The devices have been irradiated with protons of 15 MeV, working with fluxes in the order of  $10^8 \cdot 10^9$  p / cm<sup>2</sup>s and stopping in the range of fluences  $10^{11} \cdot 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>, depending on the recorded faults rate. The cross section is high enough to perform this type of tests in our laboratory with campaigns into two or three days. Over the last few years, our groups have carried out this type of campaign also using neutrons in the facilities of the LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center). Taking advantage of this experience, we wanted to evaluate the capacity of our facilities to perform this type of SEE tests with protons but also with neutrons (Figure 4.4). At the moment we have worked on the tandem accelerator of 3MV, with a primary beam of deuterium a neutron beam is obtained by nuclear reaction D (d,n) using a deuterated target. In the last year, irradiation campaigns have been carried out using the same benchmark with neutrons of average energy around 7 MeV and fluxes in the order of 10<sup>6</sup> n/cm<sup>2</sup>s. The results are very promising, despite the difference in the energy spectra of the neutron beams from both laboratories, we have found similar results related to the categories and percentages of faults, coinciding also with values obtained in the protons testing. The comparison of the studies carried out in LANSCE with those carried out in the CNA shows that it is feasible to work in our facilities using highly integrated technologies.

Ensayos de irradiación con protones de baja energía para uso espacial. La empresa francesa TRAD (Test & Radiations), líder en el sector espacial, ha realizado estudios dirigidos a evaluar los riesgos de daño en componentes y materiales que puedan usarse en el entorno espacial de la misión JUICE de la ESA (European Space Agency). Parte de este trabajo es la determinación de secciones eficaces de eventos singulares (SEE) de diferentes memorias SRAM en tecnología CMOS de 28 y 45 nm. Los ensayos de ionización directa con protones de baja energía (0.6-6 MeV) se han llevado a cabo

4. Investigación / Research

empleando la línea de Irradiación e Implantación iónica, instalada en el acelerador Tándem 3 MV del CNA. Complementando así los datos obtenidos en otras instalaciones mediante ensayos con protones de alta energía (PSI), iones pesados (RADEF/UCL) y electrones (CERN). En la línea superior de la Figura 4.5, puede verse la adaptación específica realizada en la línea para llevar a cabo este tipo de ensayos dinámicos, así como diferentes tipos de muestras colocadas en los portamuestras de la correspondiente cámara de vacío.

Las celdas solares, al igual que otros dispositivos semiconductores, se degradan eléctricamente cuando son expuestos a irradiación con partículas. Los requerimientos para la cualificación de estos dispositivos quedan recogidos en la norma ISO 23038-"Space systems-Space solar cells-electron and proton irradiation test methods". En el siglo XXI la tecnología basada en Arseniuro de Galio ha permitido la fabricación de células solares multiunión para aplicaciones espaciales de alta eficiencia y gran resistencia al entorno espacial. Sin embargo, se continúan desarrollando nuevas generaciones con el fin de aumentar sus prestaciones para adaptarse a las nuevas misiones espaciales. En los ensayos para evaluar la sensibilidad de las celdas, habitualmente al descubierto, así como de las coberturas ópticas se utilizan haces de protones, habitualmente con energías entre 1 y 10 MeV. Por lo tanto, los de más baja energía se realizan en vacío en la línea de Irradiación e Implantación iónica instalada en el tándem de 3MV, y los de más alta energía en la línea de Haz Externo del Ciclotrón. Es muy habitual trabajar con flujos en torno a 10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> p/cm<sup>2</sup>s y llegar a fluencias del orden de 10<sup>11</sup>-10<sup>13</sup> p/cm<sup>2</sup> aunque misiones como JUICE están haciendo que la fluencia demanda alcance incluso el orden de 10<sup>16</sup> p/cm<sup>2</sup>. Por motivos de confidencialidad, no se pueden aportar más datos procedentes de los análisis posteriores de las muestras realizados por las empresas. En este campo, se ha trabajado durante este periodo con la empresa española SPASOLAB-INTA, las italianas CESI SpA y ARTE, la británica QIOPTIQ Space Technology, así como una división austriaca de AIRBUS. Estos estudios están incluidos en diferentes proyectos financiados por la Agencia Espacial Europea. La empresa Alter Technology (Departamento de Optoelectrónica y Nuevas Tecnologías), ha realizado sendas campañas de irradiación con fotones gamma y con protones de 10 MeV sobre lentes ópticas. Las muestras son de la empresa Solaris Optics S.L. y se están estudiando en el marco del proyecto ExoMars de la ESA. Por otro lado, también con la empresa TRAD se han realizado otros ensayos de irradiación con protones de baja energía en modo estático, no sólo sobre celdas solares u otras muestras ópticas, sino sobre polímeros, cables y conectores de potencial uso espacial que son objeto de estudio en proyectos financiados por la ESA y el CNES (Centre national d'études spatiales) en el campo de los nano satélites.

The French company TRAD (Test & Radiations), leader in the space sector, has performed different studies in order to assess the risks of damage on components and materials that can be used in the space environment of the JUICE mission of ESA (European Space Agency). Part of this work is the determination of cross sections for singular events (SEE) on different SRAM memories, made in 28 and 45 nm CMOS

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

technology. Direct ionization tests with low energy protons (0.6-6 MeV) have been carried out using the Irradiation and Ion Implantation line, installed in the Tandem 3 MV accelerator of the CNA. These complete the data obtained in other facilities by testing with high energy protons (PSI), heavy ions (RADEF / UCL) and electrons (CERN). In the upper line of the Figure 4.5, can be seen the specific adaptation made in the line to carry out this type of dynamic tests, as well as different types of samples placed in the sample holders for the corresponding vacuum chamber.



Figura 4.5: Vista general de la Línea de Irradiación e Implantación durante un ensayo de irradiación en dispositivos electrónicos. Diferentes tipos de muestras montadas en el portamuestras / General view of the irradiation and implantation beam line during electronic devices testing. Different type of samples on the sample holder

Solar cells, as other semiconductor devices, are degraded electrically when exposed to particle radiation. The requirements for the qualification of these devices are included in the standard ISO 23038-"Space systems-Space solar cells-electron and proton irradiation test methods". In the 21<sup>st</sup> century, the technology based on Gallium Arsenide has allowed the manufacture of multi-junction solar cells for space applications of high efficiency and great resistance to the space environment. However, new generations are under development in order to increase their performance for new space missions' adaptation. Proton beams, with energies between 1 and 10 MeV, are used in the tests to evaluate the sensitivity of the cells, usually bared, as well as the optical coverages. Therefore, the lowest energy is performed in vacuum in the Irradiation and Ion Implantation line installed in the 3MV tandem, and the highest energy in the External Beam Line of the Cyclotron. It is very common to work with fluxes around  $10^8 - 10^9$  p / cm<sup>2</sup>s to achieve fluences in the order of  $10^{11} - 10^{13}$  p/cm<sup>2</sup> although due to missions like JUICE there is an increasing demand to reach even the order of  $10^{16}$  p/cm<sup>2</sup>. For reasons of confidentiality, no more data can be provided from the subsequent analyzes of the samples made by the companies. In this field, we have worked during this period with the Spanish company SPASOLAB-INTA, the Italian CESI SpA and ARTE, the British QIOPTIQ Space Technology, as well as an Austrian AIRBUS division. These studies are included in different projects funded by the European Space

4. Investigación / Research

Agency. The company Alter Technology (Department of Optoelectronics and New Technologies), has carried out campaigns of irradiation with gamma photons and protons of 10 MeV on optical lenses. The samples are from the company Solaris Optics S.L. and they are being studied within the framework of ESA's ExoMars project. On the other hand, other tests of irradiation with low energy protons in static mode have also been carried out with the company TRAD. Not only on solar cells or other optical samples, but polymers, cables and connectors of potential spatial use that are the object of study in projects financed by the ESA and the CNES (Center national d'études spatiales) in the field of nano satellites.

#### 4.1.3 Patrimonio Cultural / Cultural Heritage

En Patrimonio Cultural es muy interesante poder analizar muestras con estructuras de capas de forma no destructiva y sin necesidad de hacer secciones. Algunas de las técnicas IBA utilizadas en el CNA pueden aportar estimaciones del espesor y composición de capas superficiales, por lo que son adecuadas para aplicarlas al estudio de dorados, enriquecimientos, etc.

In the field of Cultural Heritage the possibility to analyze layered samples in a nondestructive way and without making cross sections on the samples is very interesting. Some of the IBA techniques used at the CNA can estimate the thickness and composition of surface layers, so they can be adequate for the study of layer enrichments, gildings, etc.

Los estudios no destructivos mediante técnicas nucleares continúan siendo una prioridad en el grupo de arqueometría del CNA. Los trabajos más recientes se han centrado en el estudio de una amplia colección de monedas de oro y joyería. En este último caso, el objetivo fue la evaluación del número de joyas de oro del periodo Púnico (siglo IV a.C.) de la necrópolis de Cádiz con paladio como elemento traza. Para ello se llevó a cabo una campaña de medida en el Museo de Cádiz con la que se analizó de forma no destructiva, mediante Fluorescencia de Rayos X, la colección completa de joyas de oro conservadas en dicho museo. Los resultados muestran la existencia de un gran número de piezas con paladio, en distintas cantidades, en relación con el contenido de oro. El oro utilizado para la fabricación de parte de la colección de joyas de Cádiz indica el acceso temporal a una fuente de materia prima de oro diferente.

Recientemente se ha diseñado y fabricado un sistema de medida de transmisión gamma con la que realizar la corrección de la composición en superficie de objetos afectados por capas de corrosión, como por ejemplo colecciones numismáticas de bronce y objetos de plata antiguos. Con el nuevo sistema, dotado de una fuente de <sup>133</sup>Ba, es posible utilizar varias líneas de emisión gamma para obtener varios coeficientes de atenuación, los cuales dependerán de la composición interior del objeto, permitiendo su determinación de forma no destructiva.

En el ámbito de la Numismática se han analizado mediante Fluorescencia de Rayos-X un numeroso conjunto de monedas cartaginesas de plata de la II Guerra Púnica

4. Investigación / Research

depositadas en el Museo Arqueológico Nacional de Nápoles. En este conjunto se observa el empleo de diferentes aleaciones que serán comparadas con otras monedas cartaginesas procedentes de otras cecas coetáneas. También se ha iniciado el estudio del denominado tesoro de Tomares formado por piezas monetales elaboradas con una aleación cuaternaria de bronce, Cu-Sn-Pb-Ag; la composición química del metal permitirá conocer tanto las técnicas de fabricación como el proceso de enriquecimiento en plata de la superficie; y las diferencias composicionales entre las piezas emitidas por cada ceca ayudará a comprender la circulación monetaria en el Imperio Romano en la segunda década del siglo IV d.C.

Non-destructive studies using nuclear techniques continue to be a priority for the Archaeometry group of the CNA. The most recent works are focused on the study of a wide collection of gold coins and jewelry. In the latter case, the objective was the evaluation of the number of gold jewels from the Punic period (4<sup>th</sup> century BCE) of the necropolis of Cádiz containing traces of palladium. For this purpose, a measurement campaign was carried out at the Cadiz Museum, in which the entire collection of gold jewels was analyzed non-destructively using X-Ray Fluorescence. The results show the existence of many items with palladium, in different quantities, in relation to the gold content. The gold used to manufacture part of the Cádiz jewelry collection indicates temporary access to a different source of gold raw material.

Recently, a new gamma transmission set-up has been designed and manufactured to perform the correction of the surface composition of objects affected by corrosion layers, such as bronze numismatic collections and ancient silver objects. With this new system, equipped with a 133-Ba source, it is possible to use different gamma emission lines to obtain various attenuation coefficients that depend on the bulk composition of the object, allowing the non-destructive determination of the composition.

In the field of Numismatics, a large set of Carthaginian silver coins from the Second Punic War deposited in the National Archaeological Museum of Naples has been analyzed by X-ray Fluorescence. This set is characterized by different alloys that will be compared with other Carthaginian coins from other contemporary mints. The study of the so-called "Tomares hoard" has also been initiated. This hoard is composed of monetary pieces elaborated with a bronze quaternary alloy, Cu-Sn-Pb-Ag, and the chemical composition of the metal will enable knowing both the manufacturing techniques and the surface silver enrichment process. The compositional differences between the pieces issued by each mint will help to understand the monetary circulation in the Roman Empire in the second decade of the 4<sup>th</sup> century CE.

<u>Estudio de dos cuadros de Murillo de gran tamaño con la técnica de Macro</u> <u>Fluorescencia de Rayos X (MA-XRF), XRF puntual y estratigrafías.</u> Durante la reciente restauración de dos cuadros de grandes dimensiones de Bartolomé Esteban Murillo titulados Milagro de los panes y de los peces y Moisés y el agua de la roca de Horeb (1667-1670), se realizaron varios estudios sobre materiales empleados gracias a la colaboración entre el CNA, el IAPH y el CNR-INFN de Catania, Italia. Así mismo, (Figura

4. Investigación / Research

4.6) se aprovechó la oportunidad única de analizar un supuesto boceto del segundo cuadro, perteneciente a un coleccionista alemán privado, para poder comparar los materiales y las técnicas pictóricas con aquellas de ambos cuadros grandes (3.20 x 5.20 m). En las tres obras se llevaron a cabo las técnicas de barrido de macro fluorescencia de rayos-X (MA-XRF), XRF puntual y el análisis estratigráfico, con el objetivo de caracterizar elementos compositivos de las pinturas (preparación, imprimación, pigmentos y aglutinantes). El equipo móvil de MA-XRF, traído por el grupo italiano, proporciona la imagen elemental en tiempo real, revelando así la distribución de los elementos químicos y, en consecuencia, de los pigmentos inorgánicos aplicados por el maestro; este análisis amplió el realizado por XRF puntual, llevado a cabo previamente. El estudio de las estratigrafías de pequeñas muestras extraídas reveló en detalle la composición y secuencia de las capas pictóricas, su grosor y técnica de aplicación, así como el análisis de sustancias orgánicas - los aglutinantes y los colorantes.

Los resultados muestran que la preparación está hecha de la forma usual del artista, en dos capas gruesas, mezclando tierras, carbonato cálcico, pigmentos de óxido de hierro y blanco de plomo. Los pigmentos en la paleta de Murillo son comunes para su época: albayalde, ocres rojos y amarillos, amarillo de plomo-estaño, azurita, esmalte, negro de humo y laca roja. No se encontró pigmento verde, pues en su lugar el pintor consiguió el color verde mezclando azul azurita, amarillo de Pb-Sn y otros pigmentos en menor medida. También se encontraron pigmentos pertenecientes a restauraciones posteriores (blanco de zinc, azul de Prusia...). El mapeo por MA-XRF hizo posible determinar la distribución espacial y la combinación de estos pigmentos a lo largo de la superficie de las tres obras. La comparación de los resultados confirmó la originalidad del boceto, teniendo en cuenta los materiales y las técnicas pictóricas utilizadas. Durante este estudio fue posible obtener también la imagen gráfica de todas las intervenciones realizadas durante el último proceso de restauración, principalmente gracias a los estucos empleados en la integración de lagunas.

Study of two large dimension Murillo's paintings by means of Macro X-ray fluorescence (MA-XRF) imaging, point XRF analysis and stratigraphic studies. During the recent restoration of two large dimension paintings by Bartolomé Esteban Murillo, entitled Miracle of the loaves and fishes and Moses and the water from the rock of Horeb (Figure 4.5), several studies about the materials employed were carried out in collaboration between CNA and IAPH from Seville and CNR-INFN from Catania, Italy. Besides, we had a unique opportunity to analyze an alleged bozzetto of the second painting, belonging to a private German collector; the objective was to compare materials and painting technique with those of both large-dimension paintings (3.20 x 5.20 m). Macro X-ray fluorescence (MA-XRF) scanning technique was performed on all three works complemented by point XRF and stratigraphic analyses, in order to characterize the compositional elements of the paintings (ground layer, priming, pigments and binders). The mobile MA-XRF device, made available by the Italian group, provides real-time elemental imaging of the paintings, revealing the distribution of chemical elements and therefore inorganic pigments applied by the master, which enriched the information obtained with the point XRF analyses previously performed.

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

Study of cross-sections of extracted small samples revealed in detail the composition and sequence of painting layers, their thickness and technique of application, as well as it allowed the identification of organic substances like binders and colorants.



Figura 4.6: Bartolomé Esteban Murillo: Moisés y el agua de la roca de Horeb (1667-1670) y su boceto, durante el análisis por MA-XR / Bartolomé Esteban Murillo: Miracle of the loaves and fishes and Moses and the water from the rock of Horeb (1667-1670) and his sketch, during the analysis by MA-XR

The results show that the ground layers were prepared in the usual fashion of the artist, in two thick layers, mixing earths, calcium carbonate, iron oxide pigments and white lead. The pigments on Murillo's palette are common for his time: lead white, red and yellow ochres, lead-tin yellow, vermilion, azurite, smalt, carbon black and red lake. There was no green pigment found, however, the green colour was obtained mixing blue azurite and lead-tin yellow with other pigments in lower quantity. Other pigments from previous restorations were also found (zinc white, Prussian blue, etc.). MA-XRF mapping allowed to determine spatial distribution and combination of these pigments along the surface of all three works. The comparison of the results confirmed the originality of the bozzetto, according to materials and painting technique used. During this work, it was also possible to obtain a graphic record of all the interventions made

4. Investigación / Research

during the restoration process, principally due to the use of stucco for the reintegration of paint losses.

## 4.1.4 Aplicaciones médicas / Medical applications

En el año 2018 se ha iniciado una nueva colaboración en el campo de la medicina con el Departamento de Regeneración y Terapia Celular del Centro Andaluz de Biología Molecular y Medicina Regenerativa (CABIMER) para avanzar en el conocimiento sobre la Degeneración Macular Asociada a la Edad (DMAE) mediante el estudio de la acumulación de metales traza. La DMAE seca es una enfermedad degenerativa sin tratamiento que causa pérdida severa de visión. Comienza afectando al epitelio pigmentario de la retina, que sustenta y protege a los fotorreceptores.

En esta colaboración se utilizan modelos animales y celulares de DMAE para establecer los niveles de hierro, cobre y zinc, cuya desregulación se ha mostrado relacionada con la enfermedad, mediante técnicas nucleares con aceleradores de partículas que se llevan a cabo en el Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla.

In 2018, a new collaboration in the field of medicine was initiated with the Department of Regeneration and Cell Therapy of the Andalusian Center for Molecular Biology and Regenerative Medicine (CABIMER) to expand the knowledge about Age related Macular Degeneration (AMD) by studying trace metal accumulation. Dry AMD is a degenerative disease without treatment that causes severe vision loss. It begins by affecting the pigment epithelium of the retina, which supports and protects the photoreceptors.

In this collaboration, animal and cellular models of AMD are used to establish the levels of iron, copper and zinc, whose deregulation has been shown to be related to the disease, by means of nuclear techniques with particle accelerators that are carried out in the National Center of Accelerators of Sevilla.

# 4.1.5 Ciencia del Plasma y Tecnología de Fusión / Plasma Science and Fusion Technology

<u>Flujo absoluto de perdidas de iones rapidos en ASDEX Upgrade.</u> En los dispositivos de plasmas de fusión, las pérdidas de iones rápidos producidas por diferentes mecanismos representan un doble problema para el rendimiento del reactor. Por una parte, no contribuyen al calentamiento del plasma, lo cual conduce a una disminución de la potencia del plasma y, por otro lado, la primera pared del reactor puede ser dañada por las partículas que chocan

El principal diagnóstico (instalado en la mayoría de los grandes dispositivos de fusión (ASDEX Upgrade (AUG), Joint European Torus (JET)...) para obtener información acerca de la interacción onda-partícula en un reactor de fusión magnético es el detector de pérdida de iones rápidos basado en materiales centelladores (FILD).

4. Investigación / Research

La innovación de este diagnóstico es la respuesta rápida de su material centellador (SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup> llamado TG-Green). Esto lo hace adecuado para seguir las frecuencias de las fluctuaciones magnetohidrodinámica (elms, TAES, etc), pero las medidas absolutas de los iones que escapan no están, sin embargo, disponibles debido a la compleja dependencia de la eficiencia de centelleo a altas temperaturas. La calibración absoluta del rendimiento de los centelleadores (Centro Nacional de Aceleradores), del sistema de detección óptico (Instituto de física del plasma de Múnich) y de la influencia de la geometría del colimador han permitido desarrollar una función instrumental que se ha aplicado para proporcionar, por primera vez, las medidas absolutas del número de iones rápidos que se pierden en los reactores de plasma de fusión a partir de la señal proporcionada por los detectores FILD



Figura 4.7: (a) Tasa de iones rápidos que están incidiendo sobre el material centelleador (b) Evolución temporal de las perdidas absolutas de iones rápidos medidas con FILD1 (señal negra) y carga térmica medida con la cámara infrarroja (señal azul) / Rate of fast ions that are affecting the scintillating material (b) Temporal evolution of the absolute losses of fast ions measured with FILD1 (black signal) and thermal load measured with the infrared camera (blue signal)

Estos resultados se han utilizado para cuantificar las pérdidas de iones rápidos en plasmas con distintos sistemas de calentamiento externo, en particular, se ha estudiado las pérdidas de iones rápidos asociadas a los inyectores de haces neutros y a los iones rápidos debidos al calentamiento mediante radiofrecuencias. En el caso de los iones rápidos debido al inyector de haces neutros se ha encontrado unos niveles de perdidas entre 450-500 kWm<sup>2</sup> mientras que las pérdidas asociadas a ICRH son un orden de magnitud mayor

Se ha realizado un estudio comparativo entre la señal obtenida con FILD y la carga térmica que se nos ha proporcionado por el diagnostico de cámaras infrarrojas instalado en AUG. Se ha determinado que existe una clara correlación entre la señal de la cámara infrarroja y la señal de FILD, estando la primera por encima debido que la cámara IR mide la carga térmica total procedentes tanto de la radiación del volumen del plasma así como del flujo de partículas térmicas y supratérmicas, por lo que la

carga térmica puede usarse solamente como un límite superior para las pérdidas de iones rápidos.

Se ha reportado un acuerdo excelente entre las medidas experimentales obtenidas con FILD y los datos que se nos han proporcionado de las perdidas en la cabeza del detector mediante simulación con el código ASCOT para las perdidas asociadas a la inyección de haces neutros.

<u>Absolute flux of fast-ion losses in ASDEX Upgrade.</u> In plasma fusion devices, fast ion losses produced due to different mechanisms represent a twofold problem for the reactor performance. Indeed, on the one hand, they do not contribute to the plasma heating leading to a decrease of the plasma power and, on the other hand, the first wall of the reactor can be damaged by the impinging particles.

The principal diagnostic (installed in in most of the large fusion devices (ASDEX Upgrade (AUG), Joint European Torus (JET) ...) to obtain information about the waveparticle interaction in a magnetic fusion reactor is the scintillator based fast-ion loss detector (FILD).

The innovation of this diagnostic is its fast response scintillator material (e.g.  $SrGa_2S_4:Eu^{2+}$  named TG-Green). This makes it suitable to follow the frequency of the magnetohydrodynamics fluctuations (ELMs, TAEs, etc) but absolute measurements of the escaping ions are, however, not available due to the complex dependence of the detector response on the scintillator efficiency at high temperature. From the absolute calibration of the scintillator yield (National Accelerator Centre), the optical detection system (Max Planck Institute of Plasma Physics in Munich) and the influence of the geometry of the collimator, we have developed an instrumental function that has been applied to provide, for the first time, absolute measurements of the number of fast ions lost in fusion plasma reactors from the signal obtained with the FILD detectors.

These results have been used to quantify the fast ion losses in plasmas with diferent external heating systems, in particular, the fast ion losses associated with the neutral beam injectors and radiofrequency heating have been studied. In the case of fast ions due to the neutral beam injector, loss levels have been found between 450-500 kW/m<sup>2</sup> meanwhile the losses associated with ICRH are an order of magnitude higher.

A comparative study was carried out between the signal obtained with FILD and the thermal load measured by infrared cameras installed in AUG. It has been determined that there is a clear temporal correlation between both signals, although the IR camera presents a higher intensity in comparison to FILD. This is expected, as the IR diagnostic measures the total thermal load from both plasma volume radiation and particles, so the thermal load determined by this method can only be used as an upper limit for rapid ion losses.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

An excellent agreement has been found between our experimental measurements obtained with FILD and the simulations with the ASCOT code for the losses associated with the injection of neutral beams.

Deposición de materiales centelleadores mediante el proceso de sedimentación. Estudios previos realizados en el CNA han determinado que el centellador idóneo para el detector de pérdidas de iones rapidos (FILD) es el TG-Green dada su eficiencia de ionoluminiscencia y su respuesta rápida. Aunque actualmente no existe compañia que suministre placas metálicas revestidas con este material, sí que se puede obtener en forma de polvo. En base a ello se ha analizado algún procedimiento para revestir varias placas con el propósito de encontrar un método que proporcione resultados satisfactorios. Se ha elegido el método de sedimentación para depositar varias placas con dos tipos de centelleadores en polvo diferentes: P-47 y TG-Green. Se establecieron distintas cantidades de fósforo y adhesivos y se realizaron deposiciones con la misma proporcionalidad entre estas cantidades (50% de adhesivo respecto a fósforo) y con distinta proporcionalidad (una se ha mantenido al 50% y en la otra hemos disminuido esta proporción al 13%). Se han estudiado las características de ionoluminiscencia (linealidad, eficiencia y degradación) de las placas depositadas y se han comparado sus propiedades con un TG-Green comercial usado en estudios previos. Se ha encontrado que las placas de TG-Green depositadas con la proporción del 50% muestran un comportamiento de degradación y eficiencia similares a la de la placa comercial, con lo cual se concluye que el método de deposición es adecuado para la deposición de centelladores con el objetivo de ser utilizados en detectores FILD.



Figura 4.8: (a) Espectros normalizados de ionoluminiscencia de los distintos materiales centelladores. (b) Tasa de fotones emitidos frente a tasa de iones incidents / Normalized spectra of ionoluminescence of the different scintillation materials. (b) Rate of photons emitted versus rate of incident ions

<u>Scintillator powder coating using the sedimentation process.</u> Previous studies carried out in the CNA have determined that the ideal scintillator for the fast ion losss detector (FILD) is the TG-Green given its ionoluminescen efficiency and its fast temporal response. Although currently there is no company that supplies metal plates coated with this material, it can be obtained in the form of powder. Based on this, a procedure

#### 4. Investigación / Research

has been analyzed to coat several plates in order to find a method that provides satisfactory results. The sedimentation method has been chosen to deposit several plates with two different types of powder: P-47 and TG-Green scintillator. Different amounts of phosphor and binder were established and depositions were made with the same proportionality between these quantities (50% of adhesive with respect to phosphor) and with different proportionality (one has remained at 50% and in the other we have decreased this proportion to 13%). The ionoluminescence properties (linearity, efficiency and degradation) of the coated plates have been studied and their properties compared with a commercial TG-Green used in previous studies. It has been found that the TG-Green plates deposited with the 50% proportion show a behavior of degradation and efficiency similar to that of the commercial plate, which leads us to conclude that this method of deposition is suitable for the deposition of scintillators with the objective of being used in FILD detectors.

4. Investigación / Research

# **4.2 Unidad de Investigación en Física Nuclear Básica / Basic Nuclear Physic Research Unit**

La investigación del grupo de Física Nuclear Básica (FNB) está orientada al desarrollo de las capacidades del Centro Nacional de Aceleradores en Física y Tecnología Nuclear, en colaboración con instalaciones internacionales. Las principales líneas de investigación son las siguientes:

The research of the group is focused on developing the capabilities of the Centro Nacional de Aceleradores in nuclear physics and nuclear technologies, in close collaboration with international large scale facilities. The main research lines are the following:

#### **4.2.1** Física experimental de neutrones / Experimental neutron physics

La física experimental de neutrones tiene un papel fundamental en numerosos campos tales como la física de materiales, tecnología nuclear, imagen y física médica. La unidad de investigación de Física Nuclear Básica del CNA ha desarrollado la primera fuente de neutrones en España basada en un acelerador, llamada HiSPANoS (HISPAlis NeutrOn Source). El haz de neutrones generado de HiSPANoS era inicialmente, como el resto de haces producidos en el CNA, continuo; pero recientemente se ha completado la instalación de un sistema de pulsado y compresión de pulsos que ha permito generar haces pulsados de neutrones que permitirán realizar experimentos de tiempo-devuelo.

Las actividades realizadas en HiSPANoS en el periodo 2017/18 en física experimental de neutrones cubren varios ámbitos:

<u>Irradiación:</u> En colaboración con la Universidad de Islas Baleares se ha llevado a cabo la irradiación de circuitos con neutrones de altas energías, similares a aquellos cósmicos, que pueden crear daños o errores de lectura en satélites. Se ha producido fallos en los circuitos debido a dicha irradiación y se ha comparado los daños inducidos por protones a partir de medidas también realizadas en el CNA. Por otro lado, con la idea de evaluar la capacidad de HiSPANoS para tests basados en SEE empleando circuitos integrados con tecnología mayor a 130 nm, se realizaron dos nuevas campañas de irradiación con neutrones rápidos en colaboración con la Universidad Carlos III de Madrid y la Universidad de Alicante. Los resultados obtenidos muestran distribuciones de errores análogas a las conseguidas en otras campañas de irradiación realizadas en LANSCE (USA).

<u>Caracterización de detectores:</u> Por otro lado y dentro del contexto de irradiación con haces de neutrones, como parte del proyecto europeo CHANDA se ha caracterizado la respuesta a neutrones rápidos de detectores de diamante desarrollados por la empresa CIVIDEC. Dicha respuesta se midió para neutrones de 2.8 MeV para espesores de diamante entre 70 um y 500 um, demostrando que, tal y como indican las

4. Investigación / Research

simulaciones, la respuesta a dichos neutrones es independiente del espesor de los detectores. También se comprobó que la discriminación de señales según la partícula incidente que funcionó en medidas anteriores para neutrones de alta energía (>10 MeV) no es viable a bajas energías (~3 MeV).

<u>Imagen:</u> Con la intención de completar el catálogo de servicios que ofrece el CNA a investigadores y empresa, se ha comenzado la puesta punto de un sistema de radiografía con haces de neutrones. Las primeras pruebas con neutrones térmicos, epitérmicos y rápidos indican que HiPANoS está más indicado para radiografías con neutrones rápidos, completando así la información que se puede obtener a partir de neutrones térmicos convencionales. Tras las primeras pruebas se ha adquirido un nueva cámara de neutrones con una superficie de 100x60 mm que se pondrá apunto en 2019 y se pondrá a disposición de los usuarios interesados.

<u>BNCT:</u> Se ha realizado la primera irradiación de células con neutrones en el CNA. Este trabajo se engloba dentro de la investigación en terapia por captura de neutrones que llevan a cabo investigadores de la Universidad de Granada. En concreto se irradiaron cultivos celulares de una línea celular de melanoma A375 para estudiar la supervivencia celular a distintas dosis.

<u>Pulsado:</u> Como se ha mencionado, el nuevo sistama de pulsado y compresión de pulsos permitirá realizar medidas de tiempo-de-vuelo, complementando así a instalaciones internacionales como n\_TOF en el CERN. Durante este periodo se ha trabajo en la puesta a punto y caracterización el haz de protones pulsado, habiendo conseguido en ocasiones producir el tipo de pulsos (anchura de 1-2 ns, frecuencia de 1 MHz e intensidad de ~10<sup>12</sup> protones por pulso). Se han realizado pruebas de producción e neutrones pulsados que se esperan completar a lo largo de 2019 de modo que se pueda ofrecer a lo largo de año este tipo de haz a usuarios locales y externos, ya que HiSPANoS forma parte proyectos europeos de "Transnational Access" como CHANDA o ARIEL.

Las actividades mencionadas anteriormente se llevan a cabo en un contexto de colaboración con grupos de investigación e instalaciones extranjeros. En particular, parte de los miembros de la unidad de Física Nuclear Básica del CNA son miembros de la Colaboración n\_TOF del CERN donde proponen y realizan medidas de secciones eficaces de reacciones inducidas por neutrones. Además, a lo largo de 2017 y 2018 se han realizado experimentos utilizando los haces de neutrones térmicos de los reactores de fisión ILL (Grenoble, Francia) y BRR (Budapest, Hungría). Por último, cabe mencionar que la instalación HiSPANoS del CNA será clave para la comunidad de usuarios de haces de neutrones de n\_TOF durante la parada del complejo de aceleradores del CERN (LS2) en 2019 y 2020.

Experiments with neutron physics play a fundamental role in numerous fields such as materials physics, nuclear technology, imaging and medical physics. The Basic Nuclear Physics unit at CNA has developed the first neutron source in Spain based on a particle

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

accelerator, called HiSPANoS (HISPAlis NeutrOn Source). The neutron beam generated from HiSPANoS was initially, like the rest of the beams produced in the CNA, continuous; but recently, the accelerator upgrade with pulse chopping and compression system has been completed, allowing the generation of pulsed neutron beams that can be used for time-of-flight experiments.

The experiments carried out at HiSPANoS in the period 2017/18 cover several fields of research:

<u>Irradiation:</u> In collaboration with the University of the Balearic Islands, circuits have been irradiated with high-energy neutron, similar to cosmic neutrons, which can produce damage or reading errors in satellites. Faults in the circuits have occurred due to this irradiation with fast neutrons and the damages have been compared to those induced by protons, also characterized at CNA. On the other hand, with the idea of evaluating the capacity of HiSPANoS to induce and test SEE-based in integrated circuits with technology greater than 130 nm, two fast neutron irradiation campaigns were carried out in collaboration with the Carlos III University of Madrid and the University of Alicante. The results obtained show error distributions similar to those obtained in other irradiation campaigns carried out in LANSCE (USA).

<u>Characterization of detectors:</u> On the other hand and within the context of irradiations with neutron beams, as part of the European project CHANDA the response to fast neutrons of diamond detectors developed by the company CIVIDEC has been characterized. This response was measured for neutrons of 2.8 MeV for diamond thicknesses between 70 um and 500 um, demonstrating that, as the simulations indicate, the response to these neutrons is independent of the thickness of the detectors. It was also found that the discrimination of signals according to the incident particle that worked in previous measurements for high energy neutrons (>10 MeV) is not feasible at low energies (~3 MeV).

<u>Image:</u> With the intention of extending the catalog of services offered by CNA to researchers and companies, a neutron radiography system is being developed. The first tests with thermal, epithermal and fast neutrons indicate that HiPANoS is better suited for radiographs with fast neutrons, thus completing the information that can be obtained from conventional thermal neutrons. After the first tests, a new neutron camera with a surface of 100x60 mm has been purchased with the aim of making the systems available to interested users by the end of 2019.

<u>BNCT:</u> A first irradiation of cells with neutrons has been performed at CNA. This work is part of research program on Neutron Capture Therapy (NCT) carried out by researchers from the University of Granada. In particular, cell cultures of an A375 melanoma cell line were irradiated to study cell survival at different doses.

<u>Pulsing system:</u> As mentioned, the new beam pulsing and compression system will allow time-of-flight measurements, thus complementing other international facilities

4. Investigación / Research

such as n\_TOF at CERN. During this period we have worked on the tuning and characterization of the pulsed proton beam, having succeeded already a few times in producing the type of pulses required (width of 1-2 ns, frequency of 1 MHz and intensity of ~ 1012 protons per pulse). Pulsed neutron production tests have been carried out and are expected to be completed throughout 2019 so that this type of beam can be offered to local and external users throughout the year, since HiSPANoS is part of European projects of "Transnational Access" Like CHANDA and ARIEL.

The activities mentioned above are carried out in a context of collaboration with research groups and other facilities. In particular, part of the members of the Basic Nuclear Physics Unit of CNA are members of the n\_TOF Collaboration at CERN where they propose and perform measurements of cross sections of neutron-induced reactions. In addition, throughout 2017 and 2018 experiments were carried out using thermal neutron beams from the ILL (Grenoble, France) and BRR (Budapest, Hungary) fission reactors. Finally, it is worth mentioning that the HiSPANoS facility at CNA will be key for the community of users of n\_TOF during the stop of the CERN accelerator complex (LS2) in 2019 and 2020.

# **4.2.2** Blancos sólidos con alta cantidad de He para estudio de reacciones nucleares / Solid targets with high amount of He for the study of nuclear reactions

El estudio de las propiedades de los núcleos alejados de la línea de estabilidad (núcleos halo de neutrones, excitaciones colectivas a baja energía, y la desaparición de los números mágicos) es, actualmente, un área de alto interés en física nuclear.

Una de las herramientas experimentales más potentes para la investigación de estos núcleos exóticos es la medida de reacciones nucleares con distintos blancos, inducidas por haces de iones exóticos. Nótese que los núcleos exóticos no pueden usarse como blanco, debido a su vida corta. Por ello, estos experimentos, en los que el objeto de estudio es el proyectil, y no el blanco, se denominan de "cinemática inversa".

El estudio de reacciones nucleares de núcleos exóticos con blancos de He, resultaría muy útil para obtener información de los núcleos exóticos complementaria a la obtenida con blancos de hidrógeno. En particular, podría estudiarse la dispersión elástica (<sup>4</sup>He,<sup>4</sup>He), la transferencia de dos neutrones (<sup>4</sup>He,<sup>6</sup>He) e incluso la transferencia de cuatro neutrones (<sup>4</sup>He,<sup>8</sup>He).

El uso de blancos de He es difícil ya que el He es gas, y no forma moléculas sólidas como en el caso del H. A pesar de ello, se han hecho experimentos con blancos gaseosos. Los blancos gaseosos estáticos, que consisten la introducción de gas en una cámara de vacío, tienen un alcance de rango angular limitado debido a su geometría. Además, la ventana que separa la cámara del blanco de la línea de haz produce pérdidas de energía en el haz y puede introducir reacciones de fondo, mientras que los blancos gaseosos sin ventanas no presentan estos problemas. Además, existe una fuerte limitación en el espesor de helio (es decir, en la cantidad de at/cm<sup>2</sup>), y se requieren estaciones de bombeo costosas para mantener la presión necesaria.

4. Investigación / Research

El desarrollo de blancos sólidos con alta cantidad de helio, resulta muy útil, ya que permitiría realizar experimentos de dispersión nuclear, utilizando los mismos sistemas de detección que se utilizan para los blancos de hidrógeno (polietileno).

El grupo de Materiales Nanoestructurados y Microestructura (Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla) ha desarrollado capas delgadas Si amorfo con He acumulado en poros cerrados en las que la relación He/Si puede alcanzar valores entorno al 50%. En el CNA se han llevado a cabo experimentos de dispersión elástica con diferentes iones y energías, así como con diferentes tipos de detectores de semiconductor.

The study of the properties of nuclei far from stability line (neutron halos, collective excitations at low energy, and the disappearance of magic numbers) is currently one of the areas of the most interest in nuclear physics.

One of the most powerful experimental tools for the investigation of these exotic nuclei is the measurement of nuclear reactions with different targets, induced by exotic ion beams. Note that exotic nuclei cannot be used as a target due to their short life. Therefore, these experiments, in which the object of study is the projectile, and not the target, are called "inverse kinematics".

The study of nuclear reactions of exotic nuclei with He targets would be very useful to obtain information of exotic nuclei complementary to that obtained with targets of hydrogen. In particular, elastic scattering (<sup>4</sup>He,<sup>4</sup>He), the transfer of two neutrons (<sup>4</sup>He,<sup>6</sup>He) and even the transfer of four neutrons (<sup>4</sup>He,<sup>8</sup>He) could be studied.

The use of He targets is difficult since He is gas, and does not form solid molecules as in the case of H. In spite of this, experiments have been made with gaseous targets. Static gas targets, consisting of gas chambers, limit the accessible angular range due to their geometry, and the windows of the gas cell interfere with the beam losing energy and therefore introducing background reactions. Windowless gas targets do not present the above-mentioned problems; however, there is a strong limitation in helium thickness (i.e., atoms/cm2), and expensive pumping stations are required to maintain the necessary pressure.

The development of solid targets with high amount of He would be very useful, since it would allow conducting nuclear scattering experiments using the same detection systems that are used for hydrogen targets (polyethylene).

The group of Nanostructured Materials and Microstructure (Institute of Materials Science of Seville) has developed thin layers Si amorphous with I accumulated in closed pores in which the He / Si ratio can reach values around 50%. Experiments of elastic dispersion with different ions and energies, as well as different types of semiconductor detectors have been carried out in the CNA.

4. Investigación / Research

# **4.2.3** Medidas de tasas de producción de <sup>11</sup>C y <sup>13</sup>N para verificación de rango en protonterapia / Measurements of production rates of <sup>11</sup>C and <sup>13</sup>N for range verification in proton therapy

Uno de los métodos empleados para la verificación in-vivo del rango del haz durante un tratamiento de protonterapia es la tomografía por emisión de positrones (PET) de los emisores  $\beta^+$  inducidos en el paciente durante la irradiación. Dicha técnica se basa en la comparación de las distribuciones de actividades medidas y simuladas de emisores de positrones inducidas por los protones en C, N, O, Ca y P. Como la precisión de la actividad esperada (calculada con un código Monte Carlo) depende de las subyacentes secciones eficaces de interés, se ha realizado una revisión de los datos experimentales disponibles en la literatura, llegando a la conclusión de que no hay medidas experimentales en todo el rango de energía (hasta 250 MeV) y que existen considerables diferencias entre las medidas en algunos casos.

Por ello, como parte de un proyecto cuyo objetivo es determinar estas secciones eficaces de interés hasta 250 MeV, se ha realizado en el CNA una primera medida de la producción de los isótopos <sup>11</sup>C y <sup>13</sup>N en C, N y O por debajo de 18 MeV. Para ello, se han irradiado láminas ricas en C, N y O con protones utilizando la línea externa del ciclotrón. La energía es degradada utilizando una configuración multiláminas, de tal forma que podemos obtener la producción de estos isótopos a diferentes energías. Se han irradiado tres conjuntos de láminas: polietileno, PMMA y Nylon-6, siendo la primera lámina de cada conjunto una lámina de PMMA que sirve de verificación de la medida de la corriente y de las correcciones aplicadas en el análisis. Se ha diseñado un portamuestra s que, unido a la mesa monitorizada, permite el posicionamiento de las láminas de forma remota, reduciendo el tiempo de decaimiento entre irradiaciones y minimizando la exposición de radiación del personal.

La producción de <sup>11</sup>C y <sup>13</sup>N es determinada midiendo la actividad inducida en cada lámina en el escáner PET/CT Siemens Biograph. Para ello, las láminas irradiadas se han colocado en una matriz de polietileno, el cual sirve como conversor de los positrones emitidos en dos fotones de 511 keV. Previamente, se ha realizado una calibración de la eficiencia espacial del PET con fuentes de <sup>2</sup>2Na calibradas.

Este trabajo aporta las técnicas experimentales y de análisis necesarias para realizar la medida de estas secciones eficaces de interés en todo el rango de energía, hasta 250 MeV, haciendo uso de un haz clínico en instalaciones internaciones.

Among the techniques available, in-vivo PET (positron emission tomography) range verification in proton therapy relies on the comparison of the measured and estimated activity distributions of positron emitters induced on mainly C, N, O, Ca and P by the proton beam. As the accuracy of the estimated distribution depends on the underlying cross sections data, a revision of the experimental data available has been done, showing that they are not always available in the full energy range of interest (up to 250 MeV) and that there are sizeable differences in some cases.

4. Investigación / Research

The aim of this study is to develop a method for measuring the production cross sections of the  $6^+$  emitters up to 250 MeV. For this, as starting point, the production cross sections of <sup>11</sup>C and <sup>13</sup>N in C, N and O have been measured below 18 MeV. Using the external line of the cyclotron, three targets of polyethylene (PE), PMMA and nylon-6 have been irradiated. The energy beam is degraded using a multi-stack target configuration in order to obtain the cross section at different proton energies. The first film in each stack is a PMMA film, used to monitor the current beam and to validate the decay corrections applied in the analysis. A specific target holder has been designed and, attached to a motorized table, allows positioning the targets remotely, so that the decay of the induced activity between consecutive irradiations is minimized.

The production of <sup>11</sup>C and <sup>13</sup>N has been determined measuring the activity induced in each film using the PET/CT scanner. The irradiated films were placed between thick layers of PE, acting as converters of the b+ into 511 keV photons. Previously, a calibration of the PET scanner efficiency as function of the position has been done with a <sup>22</sup>Na source.

Given the success of the measurement with this new method, a similar experiment at higher energies (up to 250 MeV) using clinical beams is being planned.

4. Investigación / Research

# 4.3 Unidad de Investigación Ciclotrón / Cyclotron Research Unit

## 4.3.1 Radiofarmacia / Radiopharmacy

<u>Síntesis rápida y simplificada de [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazol y su uso en imagen de PET en un modelo experimental de hemorragia subaracnoidea.</u> El daño cerebral secundario al vasoespasmo por hemorragia subaracnoidea (HSA) es una causa importante de morbimortalidad. Desde el punto de vista clínico, el uso de modelos experimentales de HSA e imagen PET puede mejorar el manejo de estos pacientes ya que permite valorar las zonas de "penumbra", es decir, regiones en las que, a pesar de haber sufrido hemorragia, puede haber tejido recuperable.

Los ensayos clínicos en los pacientes con HSA son difíciles de llevar a cabo, dado el carácter crítico de estos enfermos, por tanto, el uso de modelos experimentales asociados a imagen PET de hipoxia puede dar lugar a ensayos con fármacos de tratamiento, mediante la monitorización de la hipoxia con [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazol.

Proponemos el uso del radiofármaco PET [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazol ([<sup>18</sup>F]FMISO) para estudiar la hipoxia debida al vasoespasmo. Por otro lado, se optimizó el proceso de síntesis, evitando la purificación con HPLC usando cartuchos de SPE en su lugar y la reducción de algunos pasos de síntesis. Se estudió la estabilidad in vitro del [<sup>18</sup>F]FMISO durante diez horas.

Las imágenes de PET/CT in vivo demostraron mayor captación cerebral del radiofármaco en animales hemorrágicos que en las ratas control.

Este estudio fue realizado en colaboración con el grupo de investigación de Neurotrauma del Hospital Universitario Virgen del Rocío e Instituto de Biomedicina de Sevilla (IBIS).

<u>Rapid and simplified synthesis of [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazole and its use in PET imaging in</u> <u>an experimental model of subarachnoid hemorrhage.</u> Cerebral damage secondary to the vasospasm due to subarachnoid hemorrhage (SAH) is an important cause of morbid-mortality. From a clinical point of view, the use of experimental HSA models and PET imaging can improve the management of SAH patients as it allows the assessment of areas of "penumbra"; regions in which, despite having suffered bleeding, there may be recoverable tissue.

Clinical trials in patients with HSA are difficult to carry out, given the critical nature of these patients. Therefore, the use of experimental models associated with PET imaging of hypoxia can lead to trials with treatment drugs, by monitoring hypoxia with [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazole ([<sup>18</sup>F]FMISO).

We propose the use of the PET tracer [<sup>18</sup>F]FMISO to visualize the hypoxia due to the vasospasm. On the other hand [<sup>18</sup>F]FMISO synthesis process was optimized, avoiding

4. Investigación / Research

HPLC purification using SPE cartridges instead, and reducing some synthesis steps. [<sup>18</sup>F]FMISO in vitro stability was tested for ten hours, and in vivo PET/CT images showed higher cerebral uptake in hemorrhagic animals than in control rats.

Study was done in collaboration with Instituto de Biomedicina in Seville (IBIS) and Neurotrauma Department of Hospital Universitario Virgen del Rocío.

Marcaje de nanopartículas de lantánidos para imagen multimodal. Las nanopartículas de lantánidos constituyen un prometedor grupo de agentes para imagen multimodal. Por sus propiedades fisicoquímicas podrían ser útiles en diferentes técnicas diagnósticas; bioluminiscencia, resonancia magnética (MRI), tomografía computarizada (CT) y tomografía por emisión de positrones (PET). En colaboración con el Instituto de Ciencias Materiales de Sevilla (CSIC, Universidad de Sevilla) se marcaron nanopartículas de trifluoruro de lantano con Flúor-18 para estudios de imagen por PET/CT.

Se obtuvo el [<sup>18</sup>F]Fluoruro por bombardeo de un target líquido <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F en el ciclotrón del CNA. La actividad se transfirió a un módulo de síntesis dentro una celda blindada de la Unidad de Radiofarmacia. La reacción de marcaje tuvo lugar a temperatura ambiente. Antes de inyectarlas al animal, se analizaron las nanopartículas por radiocromatografía en capa fina, para asegurar la pureza radioquímica. Los controles de pH y la estabilidad in vitro en plasma humano se llevaron a cabo en estudios anteriores. Se inyectaron 4 MBq de nanopartículas radiactivas por la vena lateral de la cola de un ratón sano BALB/c y se realizó el estudio PET estático de 15 minutos seguido del estudio CT. El animal permaneció anestesiado durante ambos estudios, por lo que las imágenes funcionales PET pudieron superponerse a las imágenes anatómicas del CT.

Se aprecia en las imágenes una captación mayoritaria en hígado y bazo, al no estar las nanopartículas funcionalizadas. En las imágenes tardías se observó un aumento de captación en vejiga y ausencia de captación en intestino, lo que sugiere eliminación principalmente por vía renal. El animal permaneció en observación sin signos aparentes de toxicidad durante los siguientes 6 meses. La posterior bioconjugación con péptidos o funcionalización de las nanopartículas, permitirá dirigirlas a órganos de interés, tumores, etc.

Labeling of Lantanide nanoparticles for multimodal imaging. Lantanide nanoparticles are a promising multimodal imaging agent. Due to their physico-chemical properties they could be useful in different diagnostic techniques; bioluminescence, magnetic resonance (MRI), computed tomography (CT) and positron emission tomography (PET). In a collaboration with Instituto de Ciencias Materiales de Sevilla (CSIC, Universidad de Sevilla) lantane trifluoride (LaF<sub>3</sub>) nanoparticles were labelled with <sup>18</sup>F for PET and CT images in a Balb C female mouse.

[<sup>18</sup>F]Fluoride was obtained by bombardment of a liquid target <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F. Labelling reaction took place at room temperature. Before injection to the animal, quality control

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

was evaluated by TLC radiochromatography to ensure radiochemical purity. pH and in vitro plasma stability were tested in a previous test. 4 MBq of radioactive nanoparticles were injected in the lateral tail vein of a healthy control mouse, and dynamic PET images were adquired for 15 minutes. CT adquisition followed PET scan.



Figura 4.9: Imagen PET/CT de biodistribución de nanopartículas [<sup>18</sup>F]LaF<sub>3</sub> en ratón BALB/c control / PET/CT image of nanoparticle biodistribution [<sup>18</sup>F] LaF<sub>3</sub> in BALB/c mouse control

The images show a major uptake in liver and spleen, as the nanoparticles are not functionalized. Later images showed an increase in bladder uptake and absence of intestinal uptake, suggesting elimination mainly by renal route. The animal remained under observation with no apparent signs of toxicity for the next 6 months. The

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

# subsequent bioconjugation with peptides or functionalization of the nanoparticles will allow them to target organs of interest, tumors, etc.

<u>Reactores microfluídicos.</u> Siguiendo la línea de investigación con el grupo de Microsistemas del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla se están desarrollando microchips para síntesis de radiofármacos, dentro del proyecto de excelencia TIC 2296 de la Junta de Andalucía "Microlab-on-chip para producción de radiofármacos de diagnóstico PET".

La producción microfluídica de radiofármacos presenta ventajas de la "dosis a demanda", entre ellas la síntesis de radiofármacos PET en centros que carecen de ciclotrón, no requiere la infraestructura de la clásica producción industrial de radiofármacos PET, requiere menores blindajes, además de un aumento en la eficiencia de los procesos.

Tras optimizar la primera etapa de la preconcentración del [<sup>18</sup>F]Fluoruro en el lab-onchip, se desarrollaron los microrreactores para el marcaje de los radiofármacos.

En nuestra experiencia, el [<sup>18</sup>F]Fluoruro practicamente no se adsorbió en las paredes del reactor, tras someterlo a calentamiento y vacío en las condiciones normalmente empleadas en la preconcentración del [<sup>18</sup>F]Fluoruro y la sustitución nucleofílica. Por el contrario, el [<sup>18</sup>F]Fluoruro se retuvo y después fue eluido casi completamente con agua para inyección.

Se está realizanzo la automatización de todos los pasos de la síntesis, con resultados prometedores para la síntesis microfluídica del [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazol.

<u>Microfluidic reactors.</u> Continuing the research collaboration with the group of Microsystems of the Department of Electronic Engineering of the University of Seville, we are developing microchips for synthesis of radiopharmaceuticals, within the excellence project TIC 2296 of the Junta de Andalucía "Microlab-on-chip for production of radiopharmaceuticals PET diagnosis".

Microfluidic production of radiopharmaceuticals presents advantages of the "dose on demand", among them, the synthesis of PET radiopharmaceuticals in centers with no cyclotron, it does not require the big infrastructure of the classic industrial production of PET radiopharmaceuticals, requires less shielding, in addition to an increase in the efficiency of the processes.

After optimizing the first stage of pre-concentration of [<sup>18</sup>F]Fluoride in lab-on-chip, micro-reactors for labelling radiopharmaceuticals were developed.

A cheap and easily available material was used to manufacture the microfluidic devices for radiopharmaceutical synthesis.
4. Investigación / Research

In our experience,  $[{}^{18}F]$ Fluoride was practically not adsorbed to the reactors under heating and vacuum conditions commonly used in  $[{}^{18}F]$ Fluoride preconcentration and nucleophilic substitution. On the contrary,  $[{}^{18}F]$ Fluoride was retained and almost completely eluted with water for injection.

*Further automation of the complete process is being developed, with promising results at [*<sup>18</sup>*F*]*Fluoromisonidazole microfluidic production.* 

#### 4.3.2 Imagen Molecular / Molecular Imaging

Estudio FDG-PET/CT de hámster epiléptico espontáneo SAL y animal de control en las condiciones epilépticas y controles. Hámster estaba teniendo la espontánea mutación dominante. El fenotipo es tal que, al exponer al ruido blanco, el animal tiene un ataque epiléptico. Animales de control eran hamster golden proporcionado por IBIS Sevilla. Ambos tenían 9 meses de edad. Todo manejo de animales y procedimiento PET/CT fue aprobado por el Comité Ético de la Universidad de Salamanca. Los resultados presentados demuestran que animales epilépticos tenían menor absorción de FDG (metabolismo más lento de la glucosa) en condiciones de epilepsia, aproximadamente la mitad en todo el cerebro (véase Figura 4.10). LLas regiones que consumen más glucosa en estado epiléptico son el cerebelo y colículo Inferior (véase Figura 4.11) y en menor medida Corteza somatosensorial y tálamo.



Figura 4.10: Estudio FDG-PET/CT en hámsteres el control y epilépticos. Exposición a sonido y condiciones de control en todo el cerebro para el nuevo atlas del cerebro de hámster / FDG-PET/CT study in control and epileptic hamsters. Sound and control exposure in the whole brain for the new atlas of hamster's brain

<u>FDG-PET/CT study of spontaneous epileptic Hamster SAL and control animal in epileptic</u> <u>and control conditions.</u> Hamster was bearing the spontaneous dominant mutation. The phenotype is such that upon exposing to loud white noise the animal has an epileptic seizure. Control animals were golden hamster provided by IBIS-Sevilla. Both were 9 months of age. All animal handling and PET/CT procedure was approved by Ethical Committee of University of Salamanca. The presented results show that epileptic animal had lower FDG uptake (slower glucose metabolism) in epileptic conditions, by about half in the whole brain (see Figure 4.10). The most glucose consuming regions in

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

epileptic state are Cerebellum and Inferior Colliculus (see Figure 4.11) and to lesser extent Somatosensory Cortex and Thalamus.



Figura 4.11 Estudio FDG-PET/CT en hámsteres el control y epilépticos. Exposición a sonido y condiciones de control en el colículo inferior (izquierda y derecha) para el nuevo atlas del cerebro de hámster / FDG-PET/CT study in control and epileptic hamsters. Sound and control exposure in the inferior colliculus (right and left) for the new atlas of hamster's brain

Método para predecir o pronosticar el riesgo de muerte o vasoespasmo de un paciente con hemorragia subaracnoidea. La presente invención pertenece en general al campo de la medicina, y más particularmente a la atención médica en urgencias de pacientes que presentan hemorragia subaracnoidea. El objeto de la presente invención es un nuevo método que permite predecir la probabilidad de muerte o vasoespasmo en pacientes aquejados de hemorragia subaracnoidea.

El método de la presente invención resuelve los problemas anteriores mediante la obtención de un conjunto de parámetros objetivos a partir de una imagen de tomografía computarizada (TAC) del cráneo del paciente, y a partir de dichos parámetros es posible predecir la probabilidad de muerte del paciente o de que éste sufra vasoespasmo. Este método puede ser llevado a cabo total o parcialmente de manera automática mediante procesado, disminuyendo así los errores debidos a falta de atención o impericia del profesional médico.

Se utilizaron los datos de 85 pacientes con hemorragia subaracnoidea detectada obtenidos de diferentes hospitales. Para el desarrollo del modelo de predicción se seleccionó la regresión logística binaria. En la prueba hacia atrás condicional se seleccionaron inicialmente un gran número de variables de imagen, clínicas y demográficas (once variables: grados de clasificación WFNS, Hunt-Hess y Fisher, edad, sexo, relación superficie/volumen, esfericidad, dimensión fractal, volumen, superficie, diámetro). Todos estas variables han sido definidas previamente en este documento a

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

excepción de la esfericidad y el diámetro, que se describen a continuación. Un ejemplo de tal proceso se muestra en Figura 4.12.



Figura 4.12: Ejemplo de un paciente con una evolución clínica de la supervivencia y vasoespasmo. (Izquierda) Paciente con hemorragia volumen de 95.05 mL (amarillo), que murió en el hospital y no tenía un vasoespasmo. Alto número de voxeles amarillo cerca de la calavera es una HSA confirmada. Exploración por TAC (derecha) original de la sala de emergencias / Example of a patient with a clinical outcome of survival and vasospasm. (Left) Patient with hemorrhage volume of 95.05 mL (yellow), who died in the hospital and did not have a vasospasm. High number of yellow voxels close to the skull is a confirmed SAH. (Right) original CT scan from the emergency room

El método permite calcular las probabilidades de ocurrencia de vasoespasmo y de la muerte en base de TAC de urgencias y parámetros clínicos mencionados. Se ha realizado una aplicación de la red https://sahcna.us.es para procesar imágenes TAC de pacientes con SAH y calcular dichas probabilidades. Se ha presentado solicitud de patente española número P201730998 con fecha de prioridad de 2017-07-31 y PCT/ES2018/070539.

<u>A method for predicting or prognosticate the risk of death or vasospasm of a patient</u> <u>with subarachnoid hemorrhage.</u> The present invention belongs in general to the field of the medicine, and more particularly to the medical care in emergencies of patients who have subarachnoid hemorrhage. The object of this invention is a new method that predicts the probability of death or vasospasm in patients suffering from subarachnoid hemorrhage.

The method of this invention solves the previous problems by obtaining a set of objective parameters from a computed tomography (CT) image of the patient's skull, and from these parameters it is possible to predict the probability of death of the patient or that he or she suffers vasospasm. This method can be carried out totally or partially automatically by a means of processing, thus reducing the errors due to lack of attention or incompetence of the medical professional.

4. Investigación / Research

Data from 85 patients with detected subarachnoid hemorrhage obtained from different hospitals were used. For the development of the prediction model was selected binary logistic regression. In the backward conditional test were initially selected a large number of image variables, clinics and demographics (eleven variables: grades of classification WFNS, Hunt-Hess and Fisher, age, sex, surface/volume ratio, sphericity, fractal Dimension, volume, surface, diameter). All of these variables have been previously defined in this document with the exception of the sphericity and the diameter, described below. The example of such processing is shown in Figure 4.12.

The method allows calculating probability of occurrence of vasospasm and death on the basis of emergency TAC and clinical parameters mentioned. A web application has been made https://sahcna.us.es To process CT images of patients with SAH and calculate those probabilities. Spanish patent application number has been filed P201730998 with a priority date of 2017-07-31 and PCT/2018/070539.

Un optimizado y tasacontrolado protocolo de enfriamiento lento para la criopreservación de tejido ovárico bovino por medio de la tomografía axial computada. La criopreservación y posterior trasplante de tejido ovárico es la única opción para preservar la fertilidad en ciertos pacientes frente a tratamiento gonadotóxico. Hasta ahora, la criopreservación de tejido ovárico se ha realizado principalmente por un proceso de enfriamiento lento con velocidad controlada, normalmente conocido como congelamiento lento. Aunque todavía hay algunas preocupaciones sobre el daño iatrogénico en la población de folículos, esta técnica se ha utilizado en los casos registrados hasta la fecha. Es bien sabido que el control de carga del crioprotector en el tejido es crucial en un procedimiento de criopreservación. Hemos utilizado la tecnología de la tomografía axial computarizada de rayos x para evaluar la concentración y distribución de dimetilsulfóxido (uno de los crioprotectores más utilizados en la preservación de la fertilidad) dentro de trozos de tejido ovárico bovino después de la criopreservación. La baja tensión utilizada en nuestro dispositivo (75 kV) y la alta densidad electrónica de este crioprotector hace que la atenuación de rayos X sea proporcional a su concentración. Al evaluar y comparar la permeabilidad y homogeneidad del crioprotector dentro de fragmentos de tejido ovárico, sometidos a un lento proceso de enfriamiento de velocidad controlada, hemos caracterizado el efecto de las variaciones en los parámetros principales que intervienen en el proceso, con el objetivo de lograr un protocolo optimizado con mayor penetración del crioprotector en el tejido. Los resultados más prometedores se obtuvieron mediante el aumento de la concentración inicial de dimetilsulfóxido en la solución del vehículo de 10 al 20% v/v.

La capacidad de la tomografía computarizada de rayos X de mapear en 3D de la concentración de dimetilsulfóxido, crioprotector generalizado, abre muchas y nuevas posibilidades en el campo de la crioconservación. El proceso de mapear 3D se puede hacer en una amplia gama de temperaturas (del ambiente a criogenia), como consecuencia directa, el cristal de hielo y las fracturas también pueden ser detectadas por la misma estrategia. Estas características constituyen una herramienta esencial

4. Investigación / Research

para el diseño y optimización de cualquier proceso de criopreservación, que representa un paso adelante para el desafío de la criopreservación de órganos y tejidos. Esta tecnología se utilizó en este trabajo para comprender la influencia de diferentes parámetros del protocolo de la lenta velocidad controlada de enfriamiento para criopreservación de tejido ovárico bovino, dando como resultado un optimizado protocolo y una mejor comprensión del protocolo de la criopreservación convencional utilizado para el tejido ovárico. Los parámetros que demostraron tener más influencia en la concentración final de Me<sub>2</sub>SO realizado en tejidos fueron la inicial concentración de la solución Me<sub>2</sub>SO, y la temperatura y tiempo la incubación de tejido, ambos mostrando diferencias significativas con los grupos de control. Para el caso concreto de aumentar la Me<sub>2</sub>SO concentración hasta al 20% v/v, aparte de lograr un mayor promedio Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos, el valor mínimo de la Me<sub>2</sub>SO concentración dentro de los tejidos de los tejidos frente a la posibilidad de formación de hielo.

El estudio fue realizado en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, España y el grupo del Dr. ch. Amorim de Université Catholique de Louvain, Bruselas, Bélgica.

An optimized controlled rate slow cooling protocol for bovine ovarian tissue cryopreservation by means of X-ray computed tomography. Cryopreservation and subsequent transplantation of ovarian tissue is the only option to preserve fertility in certain patients facing gonadotoxic treatment. So far, cryopreservation of ovarian tissue has been carried out mostly by a controlled rate slow cooling process, typically known as slow freezing. Even though there are still some concerns about the iatrogenic damage on the follicle population, this technique has been used in the more than 100 live births reported to date. It is well known that the control of the cryoprotectant loading in the tissue is crucial to in a cryopreservation procedure. We have used the technology of X-ray computed tomography to assess the concentration and distribution of dimethyl sulfoxide (one of the cryoprotectants most used in fertility preservation) inside pieces of bovine ovarian tissue after its cryopreservation. The low voltage used in our device (75kV) and the high electronic density of this cryoprotectant makes the X-ray attenuation proportional to its concentration. By assessing and comparing the permeation and homogeneity of the cryoprotectant inside ovarian tissue fragments subjected to a controlled rate slow cooling process, we have characterized the effect of variations in the main parameters involved in the process, with the goal of achieving an optimized protocol with higher permeation of the cryoprotectant in the tissue. The most promissory results were obtained by increasing the initial concentration of dimethyl sulfoxide in the vehicle solution from 10 to 20% v/v.

The capability of X-ray Computed Tomography to 3D map the concentration of Me<sub>2</sub>SO, a widespread cryoprotectant, opens unforeseen possibilities in the field of cryopreservation. 3D mapping process can be done in a wide range of temperatures (from room to cryogenics), as a straightforward consequence, ice crystal and fractures

#### 4. Investigación / Research

can also be detected by the same strategy. These characteristics constitute an essential tool for the design and optimization of any cryopreservation process, representing a step forward to the challenge of tissue and organ cryopreservation. This technology was used in this work to understand the influence of different parameters of the controlled rate slow cooling protocol for bovine ovarian tissue cryopreservation, giving as result an optimized protocol and a better understanding of the conventional cryopreservation protocol used for ovarian tissue. The two parameters that showed to have more influence on the final Me<sub>2</sub>SO concentration achieved on tissues were the initial concentration of the Me<sub>2</sub>SO solution and the temperature and time of the tissue incubation, both showing significant differences with the control groups. For the concrete case of increasing the Me<sub>2</sub>SO concentration up to 20 % v/v, apart from achieving a higher average Me<sub>2</sub>SO concentration within the tissues, the minimum value of the Me<sub>2</sub>SO concentration of the other groups, which might provide a better protection of tissues against the possibility of ice formation.

The study was done in collaboration with The Higher Technical School of Engineering of University of Seville, Spain and group of Dr. Ch. Amorim from Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium

Criopreservación de tejido ovárico vitrificación escalonada y monitoreado por tomografía axial computarizada. La criopreservación de tejido ovárico es, en la mayoría de los casos, la opción de preservación de fertilidad sólo disponible para pacientes femeninos pronto a someterse a un tratamiento gonadotóxico. Hasta la fecha, la criopreservación de tejido ovárico se ha realizado mediante el tradicional método de congelación lenta y la vitrificación, pero incluso con las mejores técnicas, todavía hay una considerable pérdida de viabilidad del folículo. Hemos investigado un procedimiento de criopreservación escalonada que combina características de enfriamiento lento y la vitrificación (en adelante llamado vitrificación escalonada). Tejido ovárico bovino fue utilizado como un modelo de tejido. Incrementos de la concentración de Me<sub>2</sub>SO juntada conjuntamente con una disminución escalonada de la temperatura en un dispositivo diseñado específicamente para este propósito y la tomografía axial computarizada se combinaron para investigar los tiempos de carga en cada paso, mediante el control de la atenuación de la radiación proporcional a permeación de Me<sub>2</sub>SO. Los análisis de viabilidad se realizaron en los tejidos calentados por inmunohistoquímica. Aunque otras pruebas de viabilidad deben realizarse después del trasplante, los resultados preliminares son muy prometedores. Se analizaron cuatro protocolos. Dos de ellos mostraron una pobre penetración de la solución de vitrificación (P1 y P2). Los otros dos (P3 y P4), con mayor penetración, fueron estudiados en más detalle. Entre estos dos últimos protocolos, P4, con un tiempo de permeación a -40 °C, demostró la misma integridad histológica después de calentarlo que los controles frescos.

En conclusión, este es el primer estudio que muestra la aplicación de protocolo de vitrificación escalonada para criopreservar tejido ovárico bovino. Más experimentos

4. Investigación / Research

con muestras de tejido de mejor calidad son necesarios para determinar el verdadero potencial de esta técnica de criopreservación. Por otra parte, es importante destacar que hemos analizado los folículos inmediatamente después de calentamiento, y que esa evaluación no da suficiente tiempo para que las células experimenten cambios en sus organelos resultantes del procedimiento de criopreservación. Sin embargo, fue posible observar una diferencia entre los cuatro protocolos de vitrificación diferentes. Nuestro próximo paso será confirmar nuestros hallazgos repitiendo el procedimiento de vitrificación todavía está en una etapa preliminar, nuestro trabajo ha revelado un nuevo prometedor método de criopreservación de tejido ovárico. Además, la ventaja de tener acceso a la tecnología de la TAC para evaluar la concentración de criopreservación. Esto mejorará la calidad de las poblaciones del folículo, que a su vez tienen un impacto positivo en la restauración de la función ovárica en las sobrevivientes de cáncer femenino después del trasplante de su tejido ovárico.

El estudio fue realizado en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, España, Grupo de Dr. ch. Amorim de la Université Catholique de Louvain, Bruselas, Bélgica, Cliniques Universitaires Saint-Luc, Bruselas, Bélgica, Asíntota Limited, GE Healthcare, Cabridge, Reino Unido.

Ovarian tissue cryopreservation by stepped vitrification and monitored by X-ray computed tomography. Ovarian tissue cryopreservation is, in most cases, the only fertility preservation option available for female patients soon to undergo gonadotoxic treatment. To date, cryopreservation of ovarian tissue has been carried out by both traditional slow freezing method and vitrification, but even with the best techniques, there is still a considerable loss of follicle viability. We investigated a stepped cryopreservation procedure which combines features of slow cooling and vitrification (hereafter called stepped vitrification). Bovine ovarian tissue was used as a tissue model. Stepwise increments of the Me<sub>2</sub>SO concentration coupled with stepwise dropsin temperature in a device specifically designed for this purpose and X-ray computed tomography were combined to investigate loading times at each step, by monitoring the attenuation of the radiation proportional to Me<sub>2</sub>SO permeation. Viability analysis was performed in warmed tissues by immunohistochemistry. Although further viability tests should be conducted after transplantation, preliminary results are very promising. Four protocols were explored. Two of them showed a poor permeation of the vitrification solution (P1 and P2). The other two (P3 and P4), with higher permeation, were studied in deeper detail. Out of these two protocols, P4, with a longer permeation time at -40 °C, showed the same histological integrity after warming as fresh controls. In conclusion, this is the first study to show application of a stepwise vitrification protocol to cryopreserve bovine ovarian tissue. Further experiments with better-quality tissue samples are now needed to determine the true potential of this cryopreservation technique. Moreover, it is important to stress that we analyzed follicles soon after warming, and that such an evaluation does not allow enough time for cells to express changes in their organelles resulting from the cryopreservation procedure.

#### 4. Investigación / Research

Nevertheless, it was possible to observe a difference between the four different vitrification protocols. Our next step will be to confirm our findings by repeating the vitrification procedure and assessing follicle survival and development after a few days of in vitro culture or xenografting. Even if this research is still at a preliminary stage, our work has revealed a promising new method of ovarian tissue cryopreservation. Furthermore, the advantage of having access to CT technology to evaluate cryoprotectant concentrations makes development of a new cryopreservation protocol totally feasible. This will improve the quality of follicle populations, which will in turn have a positive impact on ovarian function restoration in female cancer survivors after transplantation of their ovarian tissue.

The study was done in collaboration with The Higher Technical School of Engineering of University of Seville, Spain, group of Dr. Ch. Amorim from Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, Cliniques Universitaires Saint-Luc, Brussels, Belgium, Asymptote Limited, GE Healthcare, Cabridge, United Kingdom.

Uso de tomografía axial computarizada para la detección de hielo aplicada a la criopreservación de órganos. Uno de los principales problemas en la criopreservación de muestras biológicas es la formación de hielo y el consecuente daño mecánico a las células y los tejidos, debido a la estructura cristalina del hielo y su asociado daño mecánico. Es necesario detectar esta nociva formación de hielo, especialmente en tejidos y órganos, debido a su gran volumen y la complejidad de su sistema vascular en el caso de órganos voluminosos. En este trabajo, proponemos el uso de la tomografía axial computarizada (TAC) para detectar esta formación de hielo dentro de los tejidos y órganos. Para lograr este objetivo, riñones de conejo fueron cargados con soluciones de crioprotector que contengan Me<sub>2</sub>SO a baja temperatura (≈ -140 °C). Gotas de agua con un volumen entre 2 y 8 µL entonces fueron introducidos dentro de los órganos. Por último, los riñones de conejo se enfriaron a 196 °C. Volúmenes de hielo de hasta 1 μL se detectaron en nuestro dispositivo de TAC, con una resolución de hasta 50 μm, validando la tecnología propuesta. Por el contrario, se analizaron tejidos ováricos bovinos congelados con un protocolo de refrigeración lenta de tasa controlada. Imágenes de TAC demostraron la estructura diferente en la formación de hielo extracelular según el usado. Estos resultados tienen una aplicación directa en el control de la formación de hielo, de gran importancia para la creación de biobancos.

Con estos experimentos se demuestra que hielo y pequeños volúmenes de agua pueden ser distinguidos en soluciones de Me<sub>2</sub>SO usando TAC, debido principalmente a la baja energía en nuestro dispositivo de TAC y su alta resolución espacial. Somos capaces de detectar cristales de hielo de un volumen de hasta 1 µL en el interior vitrificado de riñones, previamente cargados con soluciones de Me<sub>2</sub>SO, y evaluar los tejidos ováricos después de la criopreservación con diferentes protocolos de congelación. Además, la representación 3D de las muestras también permite obtener una distribución precisa del hielo formado dentro de los tejidos u órganos y por lo tanto, evaluar los posibles daños causados durante el procedimiento de la criopreservación. Adicionalmente los estudios de imagen de TAC también se aplican

4. Investigación / Research

durante los procesos de enfriamiento y calentamiento en los protocolos de criopreservación bajo estudio, para la evaluación de la concentración de Me<sub>2</sub>SO en muestras, como hemos demostrado en nuestros trabajos anteriores. Este enfoque tiene una aplicación directa en el órgano criopreservado.

El estudio fue realizado en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla y el Instituto de Microelectrónica de Sevilla.

<u>Use of X-Ray Computed Tomography for Ice Detection Applied to Organ</u> Cryopreservation. One of the main problems in the cryopreservation of biological samples is the formation of ice and the consequent mechanical damage to cells and tissues, due to the crystalline structure of ice and its associated mechanical damage. It is necessary to detect this deleterious formation of ice, especially in tissues and organs, because of their large volume and the complexity of their vascular system in the case of bulky organs. In this work, we propose the use of X-ray Computed Tomography (CT) to detect this ice formation inside tissues and organs. To achieve this aim, rabbit kidneys were loaded with cryoprotectant solutions containing Me<sub>2</sub>SO at low temperatures (below -140 °C). Drops of water with a volume between 2 and 8 μL were then introduced inside the organs. Finally, the rabbit kidneys were cooled to -196 °C. Volumes of ice of up to 1  $\mu$ L were detected in our CT device, with a resolution of up to 50 µm, validating the proposed technology. On the contrary, we analyzed bovine ovarian tissues cryopreserved with a controlled-rate slow-cooling protocol. CT images showed the different structure on the extracellular ice formation according to the procedure, and even the intracellular ice that can be formed in the tissues. These positive results have a straightforward application in the control of the formation of ice, of significant importance for the creation of biobanks.

With these experiments, we prove that ice and small volumes of water can be differentiated from Me<sub>2</sub>SO solutions using X-ray CT, due mainly to the low energy used in our CT device and its high spatial resolution. We are able to detect ice crystals of volumes of up to 1 µL inside vitrified kidneys, previously loaded with Me<sub>2</sub>SO solutions, and evaluate ovarian tissues after cryopreservation with different freezing protocols. Furthermore, the 3D rendering of the samples also allows obtaining a precise distribution of the ice formed inside the tissues or organs, and therefore assessing the possible damage caused during the cryopreservation procedure. On the contrary, the CT imaging can be also applied during the cooling and warming processes of the cryopreservation protocols under study, for assessment of the Me<sub>2</sub>SO concentration in samples, as we have shown in our previous work. This approach has a straightforward application in organ cryopreservation. This CT technology provides online information of the cryoprotector concentration and ice formation inside biological samples, including its distribution.

This information is of utmost importance to adjust the necessary parameters in the control process of new cryopreservation protocols to achieve a successful protocol that

4. Investigación / Research

avoids the ice formation and the toxicity effects on tissues and organs at any time of the cryopreservation procedure.

# The study was done in collaboration with The Higher Technical School of Engineering of University of Seville and Instituto de Microelectrónica de Sevilla.

Introducción de hidroxipropil celulosa en soluciones de vitrificación: un estudio prospectivo con ovocitos de donante. Propósito: Hidroxipropil celulosa (HPC), un polisacárido que forma un gel viscoso en temperaturas bajas es un prometedor sustituto de las macromoléculas derivadas de sangre tradicionalmente utilizados en las soluciones de criopreservación. El uso de un conjunto completamente sintético, libre de proteínas de soluciones para vitrificación y el calentamiento se evaluó con ovocitos de donante. En particular se realizó un estudio prospectivo incluyendo 219 ovocitos MII de donantes, comparando los resultados de laboratorio de los ovocitos vitrificados con soluciones HPC y sus contrapartes frescas. La meta de rendimiento primario era la tasa de fertilización. Parámetros secundarios evaluados fueron la calidad del embrión durante los días 2 y 3. Los resultados indican que 70/73 (95,9%) ovocitos vitrificados MII exhibieron supervivencia morfológica 2 h después del calentamiento, y 49 (70.0%) presentan fertilización normal, en comparación con el 105 de 146 (71,9%) de ovocitos frescos MII. La similar calidad de embrión se observó en ambos grupos. Un total de 18 embriones implantados, de 38 embriones transferidos (47.3%), resultaron en 13 recién nacidos.

Este estudio se realizó en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla y la Clínica Ginemed, Sevilla.

Hydroxypropyl cellulose supplementation in vitrification solutions: a prospective study with donor oocytes. Purpose: Hydroxypropyl cellulose (HPC), a polysaccharide that forms a viscous gel under low temperatures, is a promising substitute of the bloodderived macromolecules traditionally used in cryopreservation solutions. The performance of a protein-free, fully synthetic set of vitrification and warming solutions was assessed in a matched pair analysis with donor oocytes. Methods: A prospective study including 219 donor MII oocytes was carried out, comparing the laboratory outcomes of oocytes vitrified with HPC-based solutions and their fresh counterparts. The primary performance endpoint was the fertilization rate. Secondary parameters assessed were embryo quality on days 2 and 3. Results: 70/73 (95.9%) vitrified MII oocytes exhibited morphologic survival 2 h post-warming, with 49 (70.0%) presented normal fertilization, compared to 105 of 146 (71.9%) MII fresh oocytes. Similar embryo quality was observed in both groups. A total of 18 embryos implanted, out of 38 embryos transferred (47.3%), resulting in 13 newborns.

Study was done in collaboration with The Higher Technical School of Engineering of University of Seville and Clínica Ginemed, Sevilla.

4. Investigación / Research

Evaluación de un nuevo protocolo de congelación que contenga 20% concentración de sulfóxido de dimetilo para criopreservar tejido ovárico humano. ¿ odría una modificación en el protocolo de congelación del tejido ovárico mejorar la supervivencia del folículo después de la criopreservación y xenotrasplante? Para responder a esta pregunta tejido ovárico de 13 pacientes adultos fue utilizado y congelado con nuestro protocolo original o una versión modificada que implica una mayor concentración de dimetilsulfóxido (DMSO), mayor volumen de la solución de criopreservación y más baja temperatura de siembra. Después de descongelar, los fragmentos ováricos fueron xenotransplantadas a seis ratones con inmunodeficiencia combinada severa (SCID) durante 3 semanas. Los resultados indican que se disminuyó la proporción de folículos primordiales mientras que la proporción de folículos en crecimiento aumentó significativamente después de la criopreservación y xenografting en comparación con controles frescos para ambos protocolos. El desarrollo, la ultraestructura, la función y la densidad de folículos fueron similares entre tratamientos.

En conclusión, nuestro estudio reveló que un nuevo protocolo de congelación utilizando un volumen mayor de solución de criopreservación, una mayor concentración de DMSO y una temperatura más baja de siembra no mejora supervivencia de folículos preantrales después del xenotransplantation. Como nuestras modificaciones no afectaron los resultados, tenemos que probar un enfoque diferente si queremos mejorar nuestro protocolo de congelación.

También es importante destacar que, aunque la mayor concentración de DMSO no aumentó la supervivencia de los folículos preantrales, no indujo daños mayores a la población de folículos ováricos humanos en etapas tempranas del desarrollo. Estos resultados son importantes para la vitrificación de tejido ovárico humano, pues ese 20% DMSO, una concentración utilizada en soluciones de vitrificación no parece ser tóxico para la población de folículos.

El estudio fue realizado en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, España, Grupo de Dr. ch. Amorim de la Université Catholique de Louvain, Bruselas, Bélgica, Cliniques Universitaires Saint-Luc, Bruselas, Bélgica, Universidad de Brasilia, Brasil y Clínicas Ginemed, Sevilla.

Evaluation of a new freezing protocol containing 20% dimethyl sulphoxide concentration to cryopreserve human ovarian tissue. Research question: Could a modification in the ovarian tissue freezing protocol improve follicle survival after cryopreservation and xenotransplantation? Design: Ovarian tissue was used from 13 adult patients, frozen either with our original protocol, or a modified version involving a higher concentration of dimethyl sulphoxide (DMSO), larger volume of cryopreservation solution and lower seeding temperature. After thawing, the ovarian fragments were xenotransplanted to six mice with severe combined immunodeficiency (SCID) for 3 weeks. Results The proportion of primordial follicles decreased, and the proportion of growing follicles increased significantly (all P < 0.01) after cryopreservation and xenografting compared with fresh controls for both protocols. Follicle density,

4. Investigación / Research

development, ultrastructure and function were similar between treatments. Conclusions: This study showed that, although the higher DMSO concentration did not improve survival of preantral follicles, it did not seem to induce any major toxicity in the follicle population either.

In conclusion, our study revealed that a new freezing protocol using a higher volume of cryopreservation solution, an increased DMSO concentration and a lower seeding temperature does not enhance survival of preantral follicles after xenotransplantation. As our modifications did not affect the results, we need to test a different approach if we hope to improve our freezing protocol. It is also important to stress that, although the higher DMSO concentration did not increase survival of preantral follicles, it did not induce any major damage to the population of human ovarian follicles at early stages of development. These findings are important for vitrification of human ovarian tissue, as they indicate that 20% DMSO, a concentration widely used in vitrification solutions does not seem to be toxic to the follicle population. On the other hand, it would be of great interest to assess whether increased DMSO concentrations could affect the further development of these follicles.

The study was done in collaboration with The Higher Technical School of Engineering of University of Seville, Spain, group of Dr. Ch. Amorim from Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, Cliniques Universitaires Saint-Luc, Brussels, Belgium, University of Brasília, Brazil and Clínicas Ginemed, Sevilla.

Síntesis en temperatura ambiente de nanoparticulas dispersables en agua Ln<sup>3+</sup>: CeF<sub>3</sub> (Ln=Nd,Tb) con morfología diferente como sondas bimodales para fluorescencia e imagen TAC. Las propiedades singulares de las nanopartículas inorgánicas basadas en la serie de los lantánidos (NPs) ha suscitado la atención de la comunidad científica en aplicaciones biotecnológicas. En particular, aquellos sistemas con dos o más funciones son especialmente interesantes. En este trabajo se ha desarrollado un procedimiento eficaz y comercialmente atractivo que hace NPs uniformes, dispersables en agua Ln<sup>3+</sup>: CeF<sub>3</sub> (Ln=Tb,Nd) con diferentes formas y tamaño. El método consiste en la precipitación homogénea, en una mezcla de poliol y agua, cationes y aniones mediante precursores que permiten la liberación controlada de este último. Las ventajas del método reportado están relacionadas con la ausencia de surfactantes, agentes o corrosivos precursores, así como a la temperatura del proceso de dispersión. Los NPs obtenidos de Tb:CeF<sub>3</sub> producen una emisión intensa después de la excitación a través de la banda de transferencia de energía Ce-Tb que se encuentra en la región espectral UV, siendo así potencialmente útil como fósforos para los propósitos de imagen in vitro. Por otro lado, los NPs Nd:CeF<sub>3</sub> sintetizados son buenos candidatos para imagen in vivo porque sus longitudes de onda de excitación y de emisión se encuentran en las ventanas biológicas. Por último, se muestra la excelente eficacia de atenuación de rayos X de NPs Nd:CeF<sub>3</sub> que confiere doble funcionalidad a este material tanto como biosonda luminiscente como agente de contraste para tomografía axial computarizada. El proceso se resume en Figura 4.13.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research



Figura 4.13: El Resumen de la síntesis de uniforme, dispersable en agua CeF<sub>3</sub> nanopartículas con tres diferentes formas y tamaño a través de un método fácil de precipitación a temperatura ambiente. Dibujo utilizado con permiso de <u>http://DX.doi.org/10.1016/j.JCIS.2018.03.007</u> / The summary of the synthesis of uniform, water-dispersible CeF<sub>3</sub> nanoparticles with three different shapes and size via a facile precipitation method at room temperature. Drawing used by permission from <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2018.03.007</u>

El estudio fue realizado en colaboración con Grupo de Dr M Ocaña y Dr. Becerro de Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, (CSIC-Universidad de Sevilla) y con la Universidad Autónoma de Madrid, España.

Room Temperature Synthesis of Water-dispersible  $Ln^{3+}$ :CeF<sub>3</sub> (Ln=Nd,Tb) Nanoparticles with different Morphology as Bimodal Probes for Fluorescence and CT Imaging. The singular properties of lanthanide-based inorganic nanoparticles (NPs) has raised the attention of the scientific community in biotechnological applications. In particular, those systems with two or more functionalities are especially interesting. In this work, an effective and commercially attractive procedure has been developed that renders uniform, water-dispersible  $Ln^{3+}$ :CeF<sub>3</sub> (Ln=Tb,Nd) NPs with different shapes and size. The method consists of the homogeneous precipitation, in a mixture of polyol and water, of cations and anions using precursors that allow the controlled release of the latter. The advantages of the reported method are related to the absence of surfactants, dispersing agents or corrosive precursors as well as to the room temperature of the process. The obtained Tb:CeF<sub>3</sub> NPs produce an intense emission after excitation through the Ce-Tb energy transfer band located in the UV spectral region, thus being potentially useful as phosphors for in-vitro imaging purposes. On the other hand, the synthesized Nd:CeF<sub>3</sub> NPs are good candidates for in-vivo imaging because their excitation and emission wavelengths lie in the biological windows. Finally, the excellent X-ray attenuation efficacy of the Nd:CeF<sub>3</sub> NPs is shown, which confers double functionality to this material as both luminescence bioprobe and contrast agent for Xray computed-tomography. The process is summarized in Figure 4.13.

4. Investigación / Research

The study was done in collaboration with group of Dr M Ocaña and Dr A I Becerro from Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, (CSIC-Universidad de Sevilla) and with Universidad Autónoma de Madrid, Spain.

Propiedades estructurales, ópticas y de atenuación de rayos x de nanoesferas Tb<sup>3+</sup>: BaxCe1-xF3-x (x=0.18-0.48) sintetizadas en medio poliol. Nanoesferas uniformes Ba0 18 Ce0 82 F2 82 se han obtenido mediante envejecimiento de una solución de nitratos de bario y cerio y tetrafluoroborato de sodio en una mezcla de etilenglicol y agua a 120 °C durante 20 horas. El diámetro de las esferas puede ser adaptado entre 65 nm y 80 nm mediante la variación de la concentración de NaBF4 manteniendo su estabilidad coloidal en suspensión acuosa. El aumento de la temperatura de envejecimiento condujo a una transformación de la fase de simetría hexagonal a cúbica ya un aumento concomitante de la relación Ba/Ce, que alcanzó un valor cercano al nominal (50/50) a 240 °C. El mismo método era apropiado para la obtención de nanoesferas copadas con Tb<sup>3+</sup> con una homogénea distribución de catión y las mismas características morfológicasque el material no dopado. Se observó una emisión verde intensa después de la excitación de las muestras dopadas con Tb<sup>3+</sup> a través de la banda de transferencia (ET) de energía de Ce<sup>3+</sup>-Tb<sup>3+</sup>. La eficacia de la ET aumenta con el aumento de contenido de Tb, la emisión máxima se observa para las nanoesferas de dopado Tb de 10%. Una suspensión acuosa de la muestras dopadas demostró excelentes valores de atenuación de rayos x que eran superiores a las de un agente de contraste clínicamente aprobado a base de yodo. Sus propiedades de atenuación de rayos x y fluorescencia hacen este material una potencial biosonda dual para bioimagen luminiscente y tomografía axial computarizada (véase Figura 4.14). El estudio fue realizado en colaboración con el grupo del Dr M Ocaña y Dr A I Becerro de Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, (CSIC-Universidad de Sevilla) y con CNRS, CEMHTI UPR3079, Universidad de Orléans, Francia.

Structural, optical and X-ray attenuation properties of  $Tb^{3+}$ :  $Ba_xCe_{1-x}F_{3-x}$  (x=0.18-0.48) nanospheres synthesized in polyol medium. Uniform Ba018Ce082F282 nanospheres have been obtained after aging a solution of barium and cerium nitrates and sodium tetrafluoroborate in a mixture of ethylene glycol and water at 120 °C for 20 hours. The diameter of the spheres could be tailored from 65 nm to 80 nm by varying the NaBF4 concentration while maintaining their colloidal stability in aqueous suspension. Increasing the aging temperature led to a phase transformation from hexagonal to cubic symmetry and to a concomitant increase of the Ba/Ce ratio, which reached a value close to the nominal one (50/50) at 240 °C. The same method was successful in obtaining Tb<sup>3+</sup>-doped nanospheres with homogeneous cation distribution and the same morphological features as the undoped material. An intense green emission was observed after the excitation of the  $Tb^{3+}$ -doped samples through the  $Ce^{3+}$ - $Tb^{3+}$  energy transfer (ET) band. The ET efficiency increased with increasing Tb content, the maximum emission being observed for the 10% Tb-doped nanospheres. Aqueous suspensions of the latter sample showed excellent X-ray attenuation values that were superior to those of an iodine-based clinically approved contrast agent. Their fluorescence and X-ray attenuation properties make this material a potential dual

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

#### 4. Investigación / Research

bioprobe for luminescence bioimaging and X-ray computed tomography (see Figure 4.14). The study was done in collaboration with group of Dr M Ocaña and Dr A I Becerro from Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, (CSIC-Universidad de Sevilla) and with CNRS, CEMHTI UPR3079, Universite Orléans, France.



Figura 4.14: (a) Imágenes in vitro de tomografía axial computada de suspensiones de NPs 10% Tb<sup>3+</sup>-dopado y iohexol en diferentes concentraciones. (b) Valores de atenuación (en HU) de suspensiones acuosas de NPs de un 10%

Tb dopado y iohexol frente a su concentración. Barras de error son desviaciones estándar del valor de atenuación dentro del VOI. Permiso reutilizar no es necesario para cada figura. / (a) In vitro X-ray computed tomography images of suspensions of 10% Tb3+-doped NPs and iohexol at different concentrations. (b) X-ray attenuation values (in HU) of aqueous suspensions of 10% Tb doped NPs and iohexol versus their concentration. Error bars are standard deviations of the attenuation value within the VOI. Permission to reuse not necessary for individual

Síntesis mediada por la microemulsión y propiedades de nanofósforos uniformes Ln:CaWO<sub>4</sub> (Ln=UE,Dy) con luminiscencia Multicolor para la imagen óptica y TAC. Se ha desarrollado un método novedoso a temperatura ambiente que produce, por primera vez en la literatura, uniformes y bien dispersos nanohusos de CaWO<sub>4</sub>. Este método se basa en el uso de microemulsiones que consisten en soluciones acuosas de precursores de Ca<sup>2+</sup> y WO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ciclohexano como medio orgánico, triton X-100 como surfactante y n-octanol como cosurfactante. Demostramos que la formación de nanohusos uniforme requiere un conjunto restrictivo de las condiciones experimentales. Estas partículas se cristalizaron en la fase tetragonal de CaWO<sub>4</sub> y emitieron luminiscencia verde azulado mediante excitación con radiación UV. El método desarrollado también es útil para el dopaje con cationes Eu<sup>3+</sup> o Dy<sup>3+</sup> de los husos CaWO<sub>4</sub> dando por resultado emisiones multicolores (rojas para Eu<sup>3+</sup> y el blanco de Dy<sup>3+</sup>). Curiosamente, a causa de la luminiscencia blanca asociada al nanofósfor de Dy:CaWO<sub>4</sub>, podría ser útil para las tecnologías de LEDs. Finalmente, los nanohusos de Eu-dopado CaWO<sub>4</sub> también mostraron una excelente eficacia de atenuación de rayos X, lo que le confiere a este material una doble funcionalidad como, biosonda

4. Investigación / Research

luminiscente y como agente del contraste para imagen de tomografía axial computarizada.

El estudio fue realizado en colaboración con el grupo del Dr M Ocaña y Dr A I Becerro de Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, (CSIC-Universidad de Sevilla).

Microemulsion-Mediated Synthesis and Properties of Uniform  $Ln:CaWO_4$  (Ln = Eu, Dy) Nanophosphors with Multicolor Luminescence for Optical and CT Imaging. A novel room temperature method has been developed which yields, for the first time in literature, uniform and well dispersed CaWO<sub>4</sub> nanospindles. This method is based on the use of microemulsions consisting of aqueous solutions of  $Ca^{2+}$  and  $WO_4^{2-}$ precursors, cyclohexane as organic medium, triton X-100 as surfactant and n-octanol as cosurfactant. We show that the formation of uniform nanospindles requires a restrictive set of experimental conditions. These particles crystallized into the tetragonal CaWO<sub>4</sub> phase and emitted blue-green luminescence when excited by UV radiation. The reported method is also useful for doping the CaWO<sub>4</sub> spindles with  $Eu^{3+}$ or Dy<sup>3+</sup> cations resulting in multicolor emissions (red for Eu<sup>3+</sup> and white for Dy<sup>3+</sup>). The luminescence is much stronger when excited through a  $WO_4^{2^-}-Ln^{3^+}$  (Ln=Eu or Dy) energy transfer band than through the f-f transitions bands of the Ln3+ cations. Interestingly, because of the white luminescence associated to the Dy:CaWO<sub>4</sub> nanophosphor, it might be useful for LEDs technologies. Luminescence dynamics and energy transfer efficiency have been analyzed in order to determine the optimum phosphors. Finally, the Eu-doped CaWO<sub>4</sub> nanospindles also showed an excellent X-ray attenuation efficacy, which confers to this material a double functionality as both, luminescent bioprobe and as contrast agent for X-ray computed tomography imaging.

The Eu-doped CaWO<sub>4</sub> nanospindles also show excellent X-ray attenuation efficacy, which confers to this material double functionality as both a luminescence bioprobe and a high-dynamic-range contrasting agent for X-ray computed-tomography imaging.

The study was done in collaboration with group of Dr M Ocaña and Dr A I Becerro from Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, (CSIC–Universidad de Sevilla).

4. Investigación / Research

#### 4.4 Unidad de Investigación en Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS) / Accelerator Mass Spectrometry (AMS) Research Unit

#### 4.4.1 Medidas de actinidos / Actinides measurements

Medida de <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np y <sup>239,240</sup>Pu en muestras ambientales mediante AMS de baja energía usando He como gas de stripping. Durante los años 2017 y 2018 se ha demostrado que es posible determinar <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np e isótopos de Pu, <sup>239,240</sup>Pu, a niveles ambientales con el sistema de AMS de baja energía del CNA. Esta instalación de AMS, en operación desde el año 2006, pertenece a una primera generación de sistemas compactos de AMS, existiendo a la salida del acelerador un único imán y un deflector electrostático para el filtrado final de interferentes. Además, usa He como gas de stripping desde el 2015, mejora que ha permitido alcanzar eficiencias de stripping muy superiores a las de Ar, gas usado en la mayoría de las instalaciones de AMS, para el caso de elementos pesados. A pesar de sus limitaciones de diseño, se ha demostrado que tal sistema es viable para estudios ambientales de esa familia de radionúclidos gracias a dos logros importantes: i) a la puesta a punto de un método radioquímico para la extracción secuencial de U, Pu y Np de una misma muestra; y ii) a la optimización del sistema de AMS para cada radionúclido en particular. Para ello, ha sido clave la experiencia acumulada en el campo de la medida de actínidos por AMS desde el año 2008.

El procedimiento radioquímico desarrollado es una extensión del anteriormente publicado por nuestro grupo e incluye a la fracción de Np además de las de U y Pu. Se caracteriza porque se emplea <sup>242</sup>Pu como trazador conjunto de las fracciones de Pu y Np. Este hecho nos ha permitido superar el inconveniente de la no disponibilidad de disoluciones estándar de <sup>236</sup>Np de pureza suficiente para medir <sup>237</sup>Np a niveles traza lo que, por otra parte, nos hubiera imposibilitado la medida adicional de <sup>236</sup>U de una misma muestra (el <sup>236</sup>Np y el <sup>236</sup>U son isóbaros).

El procedimiento de medida por AMS se ha optimizado orientado a las muestras derivadas de la aplicación de tal procedimiento. Para cada muestra problema (un cátodo con la fracción de U, otro con las fracciones conjuntas de Pu y Np) pueden conseguirse fondos de <sup>238</sup>U y sensibilidades óptimas tras un cuidadoso ajuste de las condiciones de medida. El problema de la normalización no isotópica del <sup>237</sup>Np durante la medida por AMS, se ha abordado por primera vez en dicha técnica.

La conclusión general es que, en un caso real de la medida de <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np y <sup>239,240</sup>Pu por AMS en una matriz de agua de mar, por ejemplo, pueden conseguirse sensibilidades del orden del fg por muestra ( $10^6$  átomos) suponiendo una cantidad residual de <sup>238</sup>U en los cátodos de Np+Pu del orden del µg. Para ello, es clave el control de la contaminación introducida por los reactivos usados en el laboratorio, que puede ser crítica en el caso del <sup>236</sup>U. Mediante el estudio de materiales de referencia

suministrados por la IAEA, se ha demostrado la viabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

El CNA demuestra así su capacidad para medir <sup>237</sup>Np, además de <sup>236</sup>U e isótopos de Pu, <sup>239,240</sup>Pu, en muestras del medio ambiente en general. Por lo que sabemos, sería la primera instalación de AMS de baja energía en el mundo que, por el momento, habría abordado el problema de la determinación de <sup>237</sup>Np.

<u>Measurement of <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu in environmental samples by low-energy AMS</u> <u>based on He stripping.</u> During 2017 and 2018, the 1 MV CNA AMS system has demonstrated its potential to measure <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu in environmental samples. This system, in operation since 2006, is singular because of its compact design (only one sector magnet is available at the exit of the electrostatic accelerator) and the use of He as stripping gas, available since 2015. This achievement has been possible thanks to: i) a development of a radiochemical procedure aimed at the sequential isolation of U, Pu and Np from the same sample, and ii) a thorough study of the figures of merit of the AMS technique based on a broad experience in the field.

The radiochemical procedure is an extension to Np of a previous one developed at the CNA. Using <sup>242</sup>Pu as a yield tracer of both Np and Pu fractions and following a careful adjustment of the corresponding oxidation states, it is possible to get the same recovery yields for both Pu and Np. This feature has allowed us: i) to skip the problem of the lack of a commercially available <sup>236</sup>Np standard solution pure enough to be used as a yield tracer for <sup>237</sup>Np; ii) to separate sequentially U and Np+Pu fractions to measure <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu by AMS.

The so-processed samples produce two different fractions that must be analyzed by AMS (i.e. U and Np+Pu ones). Optima measuring conditions can be achieved for every radionuclide if the slits settings and the stripper gas pressure are carefully optimized. The U fraction is analyzed independently. <sup>237</sup>Np is reference to <sup>242</sup>Pu during the AMS analysis (i.e. non-isotopic normalization). It is measured together with <sup>239</sup>Pu following a specific strategy as a compromise between the <sup>238</sup>U background on both masses and overall counting yield. Finally, <sup>240</sup>Pu is measured in a different sequence, but with the settings aimed at optimizing the overall counting yield, given the scarcity of this radionuclide in the general environment.

With an appropriate selection of the reagents used throughout the chemical procedure, and a thorough adjustment of the AMS measurement conditions, it has been demonstrated that it can be achieved detection limits at the fg level (i.e. 10<sup>6</sup> atoms) for every nuclide for natural matrixes with a high <sup>238</sup>U content (i.e. seawater or soil samples). Besides, the method has demonstrated to produce reliable results both in seawater and sediment samples based on the analysis of different IAEA reference materials.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

To the best of our knowledge, the 1 MV CNA AMS system is the first compact facility that has demonstrated so far its capability to measure <sup>237</sup>Np in environmental matrixes, besides <sup>236</sup>U and <sup>239,240</sup>Pu.

Medida de <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np y <sup>239,240</sup>Pu por AMS en una columna de agua y un testigo de sedimento muestreados en la estación DYFAMED (Mediterráneo occidental), en el marco de la colaboración CNA-IAEA. En un trabajo previo, se determinaron las concentraciones de <sup>237</sup>Np, las relaciones isotópicas <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu, y el <sup>236</sup>U en una columna de agua de la estación DYFAMED muestreada en el año 2013. Para ello se emplearon alícuotas de 150 L, y un procedimiento químico puesto a punto en la IAEA para la determinación de <sup>239+240</sup>Pu por espectrometría alfa y para la medida de <sup>237</sup>Np por ICPMS. En este nuevo trabajo, se ha aplicado el nuevo procedimiento radioquímico anteriormente mencionado para medir los mismos radionúclidos, pero en una columna de agua muestreada en el 2001 y en un testigo se sedimento de la misma zona tomado en el 2007, usando cantidades muy inferiores de muestra, 5 L de agua de mar y 5 g de sedimento, respectivamente.

Se perseguían varios objetivos: i) el estudio de la evolución del <sup>236</sup>U en la columna de agua de DYFAMED en el período 2001-2013; ii) la determinación, por primera vez, del <sup>236</sup>U y del <sup>237</sup>Np en sedimentos del Mediterráneo occidental; iii) obtener información sobre el comportamiento geoquímico del <sup>236</sup>U y del <sup>237</sup>Np en la columna de agua; iv) el establecimiento de inventarios en los dos compartimentos estudiados, y su comparación con los esperados suponiendo al fallout global como única fuente de radiactividad artificial en la zona de estudio.

Los resultados obtenidos en este nuevo trabajo se resumen en la Figura 4.15. Las conclusiones más importantes son las siguientes. i) Los inventarios de <sup>236</sup>U en la columna de agua en el 2001 superan en un factor 2 a los esperados para el fallout global, al igual que ocurría en el 2013. Sin embargo, no se observa un exceso de <sup>236</sup>U en el sedimento debido, quizás, a que este <sup>236</sup>U adicional no se ha incorporado aún a dicho depósito. ii) Sin embargo, los inventarios de <sup>237</sup>Np y de <sup>239,240</sup>Pu tanto en la columna de agua como en el testigo de sedimentos coinciden con los niveles esperados para el fallout global. Estos resultados confirmarían una vez más la presencia en el Mediterráneo de una fuente de contaminación extra fundamentalmente de <sup>236</sup>U.

<u>Measurement of <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and Pu isotopes, <sup>239</sup>Pu and <sup>240</sup>Pu, by AMS in a seawater</u> <u>column and a sediment core from DYFAMED station (western Mediterranean Sea).</u> In a previous study, we reported on the <sup>237</sup>Np, <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu and the <sup>236</sup>U/<sup>238</sup>U atom ratios in a seawater column collected at the DYFAMED site in 2013. 150 L samples aliquots processed at the IAEA premises in Monaco with a former procedure, were recovered for those AMS analysis as explained in. Following the setup of a new chemical procedure aimed at AMS and allowing the use of small samples, a seawater column collected in 2001 and a sediment core collected in 2007 from the same site have been recently

4. Investigación / Research

reevaluated to study <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu by AMS at the CNA. To this aim, 5 L seawater aliquots and 5 g sediment samples were chemically processed.

With this new study, we pursued different goals: i) to study the temporal evolution of <sup>236</sup>U in the period 2001-2013 at the DYFAMED site; ii) to assess the presence of <sup>237</sup>Np, <sup>236</sup>U and Pu isotopes in sediments from the western Mediterranean Sea; iii) to obtain information on the transport of those anthropogenic radionuclides throughout the water column into the sediments; and iii) to get the corresponding inventories and compare them with the expected one for the global fallout source.

Figure 4.15 shows a summary of the obtained results, combining seawater column results (samples collected in 2001) and sediment core ones (collected in 2007). Most important conclusions of this study are the followings. i) <sup>236</sup>U inventory exceeds by a factor of 2 the expected one for general fallout in the water column both in 2001 and 2013, but it is consistent with that global source in the case of the sediment profile. This might indicate that that excess of <sup>236</sup>U in seawater, already documented in, had not entered the sediment core at the time of its collection. ii) On the other hand, <sup>239,240</sup>Pu and <sup>237</sup>Np inventories are consistent with the global fallout source, both in the water column in the two studied years and in the sediment profile. These results confirm the existence of an additional source of mostly <sup>236</sup>U in the western Mediterranean.



Figura 4.15: Resumen de los resultados obtenidos en la estación DYFAMED en un nuevo estudio. Los resultados de la columna de agua se corresponden con las muestras tomadas en el 2001; los de sedimento en el 2007 / Summary of the actinides results obtained by AMS at the DYFAMED site, in the western Mediterranean Sea. Seawater column results correspond to samples collected in 2001. The studied sediment samples were collected in 2007

4. Investigación / Research

<u>Medida de <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np y <sup>239,240</sup>Pu por AMS en muestras de agua de mar de la costa de</u> <u>Namibia (África occidental), en el marco del convenio de colaboración CNA-IAEA.</u> La medida de <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np y <sup>239,240</sup>Pu por AMS en una serie de muestras de la costa de Namibia (30 en total) se ha llevado a cabo en las instalaciones del CNA a lo largo del 2018. La parte experimental ha sido un reto porque se disponía sólo de alícuotas de 2-5 L para la determinación de concentraciones muy bajas de dichos radionúclidos, por tratarse de muestras del hemisferio sur sólo influenciadas por el fallout global.

Los resultados obtenidos para las relaciones isotópicas  $^{236}U/^{238}U$  y para las concentraciones de  $^{237}Np$  en agua superficial se presentan en la Figura 4.16. Los primeros son del orden de  $10^{-10}$ , alrededor de un orden de magnitud inferiores a los medidos en el Atlántico Norte.

Las concentraciones de <sup>237</sup>Np son del orden de 10<sup>6</sup> átomos/kg. Ambos están de acuerdo con los valores esperados para el fallout global en esas latitudes. El mismo resultado se desprende del estudio del cociente <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu, del orden de 0.20. Estos valores representan los primeros resultados de su clase publicados en el Atlántico Sur y en la costa de un país africano.



Figura 4.16: Distribuciones de los cocientes isotópicos <sup>236U/238</sup>U y de las concentraciones de <sup>237</sup>Np en la costa de Namibia / Plots with the <sup>236U/238</sup>U atom ratios and the <sup>237</sup>Np concentrations in surface seawater off Namibian coast

<u>AMS study of <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu in seawater samples from the Namibian coast, in</u> <u>the frame of the CNA-IAEA collaboration</u>. In 2018, the AMS determination of <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu in seawater samples from the Namibian coast has been completed. The study of those actinides was a challenge from the experimental point of view for different reasons: i) only 2-5 L aliquots were available for AMS analysis; and ii) very low actinides concentrations were expected in a region from the Southern Hemisphere most likely solely influenced by global fallout. The radiochemical procedure recently developed for the sequential separation of U, Pu and Np, was successfully applied to

4. Investigación / Research

these samples and, after a thorough optimization of the AMS technique, it was possible to produce a good set of results.

The distribution of <sup>236U/238</sup>U atom ratios and <sup>237</sup>Np concentrations in surface seawater off Namibian coast are displayed in Figure 4.16. <sup>236U/238</sup>U atom ratios are at the 10-10 level in all the samples and <sup>237</sup>Np concentrations at the 10<sup>6</sup> atoms/kg level.

These values are about an order of magnitude below the reported ones in open ocean in the Northern Hemisphere and agree with the expected levels for global fallout. On the other hand, the obtained  $^{240}$ Pu/ $^{239}$ Pu atomic ratios are in every case at the 0.20 level, also in agreement with the global fallout source. These values give for the firsttime baseline information on the presence of  $^{236}$ U and  $^{237}$ Np in the Southern Atlantic Ocean, and are the first ones reported off the coast of an African country.

#### 4.4.2 Medidas de <sup>41</sup>Ca / <sup>41</sup>Ca measurements.

A lo largo del año 2017 se han realizado importantes avances en la detección del <sup>41</sup>Ca mediante AMS en el CNA.

Por un lado, se ha finalizado la puesta a punto de la metodología para su detección y por otro se han llevado a cabo aplicaciones concretas. Una de las más interesantes ha consistido en la medida de este radionúclido en el blindaje del reactor de la central nuclear de José Cabrera, actualmente en proceso de desmantelamiento. Gracias a la empresa ENRESA ha sido posible conseguir muestras de distintas zonas del blindaje del reactor. La importancia de estas medidas radica en que el cociente isotópico <sup>41</sup>Ca/Ca es directamente proporcional al flujo neutrónico térmico emitido por el reactor. La figura presenta la dependencia de este cociente isotópico con la profundidad en testigos tomados en diferentes partes del blindaje.

Como se puede ver en la figura 4.17, en muchos de ellos se aprecia un decaimiento exponencial que es esperado por los modelos si se supone una simetría cilíndrica. Sin embargo, esto no se cumple en todos, indicando que los modelos que predicen la dispersión neutrónica no pueden partir de esta suposición.

Important advances have been achieved during 2017 at CNA in relation with the detection of <sup>41</sup>Ca.

First, we have optimized the technique for a better detection of this isotope, including the background correction calculation. Secondly, we have applied this to different problems. One of the most interesting is the analysis of the <sup>41</sup>Ca/Ca ratio in the reactor shielding of the nuclear power plant José Cabrera, currently in decommissioning process. Thanks to the collaboration with the ENRESA company, we have been able to get these samples. This ratio is a direct measurement of the termal neutron flux from the reactor.

4. Investigación / Research

As it can be seen on the figure 4.17, several cores show an exponential decay with depth, which is what is expected from a cylinder symmetry. However, some others do not show this behavior. This means that it is not straightforward to suppose a symmetric dispersion of the neutron when modelling this effect.



Figura 4.17. Evolución del cociente <sup>41</sup>Ca/<sup>40</sup>Ca en distintos perfiles de la central nuclear José Cabrera, actualmente en proceso de desmantelamiento. / Evolution of the <sup>41</sup>Ca/<sup>40</sup>Ca ratio in different profiles from the José Cabrera nuclear power plant (currently on decommissioning process).

#### 4.4.3 Medida de <sup>14</sup>C / <sup>14</sup>C measurements.

En el año 2017 el Servicio de Datación por Radiocarbono del CNA ha cumplido diez años desde su puesta en marcha.

A finales de 2018 el número de dataciones realizadas desde su inauguración es de casi 4000, por lo que se trata de un servicio consolidado y que supone un gran beneficio para muchos usuarios externos, base de la instalación.

Prueba de ello son las continuas colaboraciones que se mantienen en el tiempo con instituciones como el Instituto Milá i Fontanals (CSIC) o la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo fruto han sido cuatro publicaciones en revistas y dos capítulos de un libro.

Durante estos dos años, 2017-2018, el servicio de datación ha incrementado su oferta en cuanto al tipo de muestras aceptadas, incorporando los morteros de construcción.

4. Investigación / Research

Este tipo de material, inorgánico, puede resultar muy útil en situaciones en las que no se encuentran restos orgánicos en las excavaciones. Sin embargo, hay que dejar constancia de que se trata de un material complejo, y cuya datación ofrece unos resultados complicados de interpretar, por lo que deben ser normalmente complementados con otros estudios. En el CNA se aplica un protocolo conocido como Cryo2Sonic para seleccionar la fracción del mortero más adecuada para ser datado, la cual es tratada posteriormente como un carbonato.

En otro rango de aplicaciones, el CNA ha colaborado con el SEPRONA (Servicio de Protección de la Naturaleza), cuerpo especial de la Guardia Civil, datando piezas de marfil con el objetivo de determinar la legalidad de su comercialización. En los estudios realizados se necesitaba determinar si las muestras eran previas a 1950, lo que con la técnica de radiocarbono es relativamente sencillo de conseguir debido a la gran inyección de <sup>14</sup>C a la atmósfera durante el periodo de pruebas nucleares en los años 1950-1963. Esta colaboración tiene gran importancia en la lucha contra el tráfico ilegal de marfil.

Por último, podemos destacar una colaboración muy interesante con el Museo Arqueológico Nacional en la que se ha datado una momia guanche (Figura. 4.18), antiguos pobladores de Tenerife, antes de la colonización castellana a finales del siglo XV.

In 2017 the Radiocarbon Dating Service at CNA has reached the age of ten since it started operation.

By the end of 2018 the number of datings performed is almost 4000, therefore it is a consolidated service which benefits many external users, which are the basis of the facility.

A proof of this are the sustained collaborations in the long term with institutions as the Instituto Milá i Fontanals (CSIC) or the Universidad Nacional Autónma de México, resulting in four papers in journals and two chapters from a book.

During these two years, 2017-2018, the dating service has increased its offer regarding the materials accepted for dating, now including building mortars. This kind of inorganic material can be very useful in situations in which no organic remainings can be found during excavation. However, it is important to note that mortars are a complex material, and its dating offers results which may be difficult to interpret, so that they should be complemented with other studies. At CNA the Cryo2Sonic protocol is applied in order to select the most adequate mortar fraction for the dating, which is afterwards treated as a carbonate.

In a different field of application, CNA has collaborated with the SEPRONA (Service for Nature Protection), a special department of the Guardia Civil, dating ivory carvings in order to determine its commercialization legality. It had to be determined whether the

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

4. Investigación / Research

carvings were prior to 1950, which is a relatively easy task with the radiocarbon dating system, due to the big amount of <sup>14</sup>C injected in the atmosphere during the nuclear tests that took place during the 1950-1963 period. This collaboration is of great importance in the struggle against ilegal ivory trade.

Finally, we can highlight a very interesting collaboration with the National Archaeological Museum in which some remains of a guanche mummy (Figure 4.18) have been dated. Guanche is the name of the original settlers of Tenerife (Canary Islands), before the castillian colonization by the end of the 15th century.



Figura 4.18: Momia Guanche. Museo Arqueológico Nacional. N.I. 2014/30/233. Fotografía: Fernando Velasco Mora

#### 4.4.4 Medidas de <sup>129</sup>I / <sup>129</sup>I measurements.

Medida de <sup>129</sup>I en algas marinas. Como se ha comentado en ocasiones anteriores, el  $^{129}$ I es un isótopo radiactivo de vida larga (T<sub>1/2</sub>=15,7·10<sup>6</sup> años), de origen principalmente antropogénico, que se encuentra en todos los compartimentos ambientales. Desde mediados del siglo XX sus niveles han aumentado a raíz de las pruebas nucleares de los años 50 y 60, y siguen aumentando cada día a causa de los vertidos líquidos y gaseosos de las centrales de reprocesamiento de combustible nuclear. El hecho de que sea liberado continuamente desde estas plantas y su carácter conservativo en aguas lo convierten en un trazador muy útil en oceanografía. En el medio marino, el <sup>129</sup>I se encuentra, como norma general, en concentraciones bajas, lo que implica que sea necesaria una cantidad de muestra de al menos 1L para su determinación. Las algas marinas, y especialmente, las algas pardas, acumulan niveles elevados de yodo, esta característica hace que sean excelentes bioidincadores de la concentración de <sup>129</sup>I, facilitando enormemente las tareas de muestreo y procesamiento de las muestras. En este estudio se ha evaluado la concentración de <sup>129</sup>I en un conjunto de algas de distinta procedencia con el objetivo de determinar su distribución oceánica. Ha sido observada una distribución muy heterogénea. Entre la zona de menor actividad registrada (Namibia) y la de mayor actividad (Mar del Norte), se han obtenido valores de concentración que difieren en hasta cuatro órdenes de magnitud. Existen, por tanto, claras diferencias entre el hemisferio norte y el sur,

4. Investigación / Research

siendo los niveles de <sup>129</sup>I en este último significativamente más bajos. Estos resultados manifiestan que las plantas de reprocesamiento de combustible nuclear constituyen unos generadores de <sup>129</sup>I considerables.Concretamente, Sellafield y La Hague suponen la principal fuente de este radionúclido en el Atlántico Norte y el Océano Ártico. Los resultados referentes al estudio de las muestras de Namibia constituyen los primeros datos existentes de la concentración de <sup>129</sup>I en el Atlántico Sur, complementando estudios anteriores y contribuyendo a la constitución de un mapa de distribución oceánica de <sup>129</sup>I que permita estudiar las corrientes marinas.



Figura 4.19. Zonas de muestreo de algas para lamedida de <sup>129</sup>I. / Samplig points of seaweed samples for <sup>129</sup>I measurements.

Measurement of <sup>129</sup>I in marine algae. As commented in previous occasions, <sup>129</sup>I is a long-lived ( $T_{1/2}$ =15.7·10<sup>6</sup> years) artificial radionuclide whose presence in nature has increased strongly since the starting of the nuclear tests in the 50's and 60's of the 20<sup>th</sup> century. Nowadays, its levels in the environment have increased strongly due to the emissions of the nuclear fuel reprocessing plants. Thanks to its conservative character in water, it is considered an excellent tracer in oceanic processes. In this work, the concentration of <sup>129</sup>I in algae from different sites in the whole world has been measured by accelerator mass spectrometry with the objective of finding the differences between the impact of <sup>129</sup>I at various zones in the Earth surface. The observed results have shown a strong heterogeneity. Differences of four orders of magnitude have been found between the highest (North Sea) and lowest (Namibia) impact zones. The <sup>129</sup>I concentrations at the Southern Hemisphere have been found to be especially low. As it can be seen in the Figure 4.19, there is a correlation between <sup>129</sup>I concentrations and latitude, except for the fact that levels at the North Sea are higher than in the Arctic, as a result of the influence of the nuclear fuel reprocessing plants of Sellafield and La Haque. These are the main sources of this radionuclide in the Northern Hemisphere. It is relevant to highlight that these are the first results of the <sup>129</sup>I concentrations in algae in the Southern Hemisphere.

<u>Medida de <sup>129</sup>I en el Hemisferio Norte.</u> En colaboración con el Laboratory of Marine Isotopic Technology & Environmental Risk Assessment (SOA, Xiamen, China), se han Ilevado a cabo medidas de <sup>129</sup>I en numerosas muestras tomadas en una amplia zona

4. Investigación / Research

que comprende el Océano Ártico, el Mar de Bering y el Océano Pacífico Norte a lo largo de un transecto que llega hasta las costas de Japón. Una de las características más importantes del estudio es precisamente el hecho de que la zona muestreada sea tan amplia que permite describir las importantes diferencias en cuanto a la distribución del <sup>129</sup>I y el gradiente de la misma en la zona muestreada. La figura 4.20 muestra, como ejemplo, la distribución del <sup>129</sup>I en la zona del Océano Ártico, desde el Mar de Groenlandia hasta el Estrecho de Bering. Como se observa en el código de colores, existen diferencias de hasta dos órdenes de magnitud entre las muestras más activas (que corresponden al Ártico, en las zonas más septentrionales) y las menos activas, tomadas alrededor del Estrecho de Bering. Esto se explica porque el origen del <sup>129</sup>I se encuentra en las plantas de reprocesamiento de Sellafield y La Hague, en Reino Unido y Francia respectivamente. De ahí, el <sup>129</sup>I liberado al medio ambiente circula hacia el Mar del Norte y hacia el Ártico llevado a lo largo de la costa norte de Noruega. Por tanto, las zonas con longitud más cercana al origen presentan mayores concentraciones.



Figura 4.20. Valores de la concentración de <sup>129</sup>I en muestras de agua marina superficiales en el Océano Ártico. / <sup>129</sup>I concentration in surface marine samples from the Arctic Ocean.

<u>Measurement of <sup>129</sup>I in the Northern Hemisphere.</u> In collaboration with the Laboratory of Marine Isotopic Technology & Environmental Risk Assessment (SOA, Xiamen, China), CNA has carried out an extensive study on the presence of <sup>129</sup>I in marine waters from the Arctic Ocean to the North Pacific through the Bering Sea. The especial relevance of this study is the high number of samples and the large are that the sampling comprises.

4. Investigación / Research

This will allow getting information on the origin, distribution and gradient of the <sup>129</sup>I concentration over this area. This is important as the dispersal of <sup>129</sup>I is regulated by the input function and the marine currents. The figure shows, for example, he different levels of <sup>129</sup>I in surface samples from the Greenland Sea to the Bering Sea along the whole Arctic. It can be clearly seen that the highest concentrations are found in the middle of the Arctic Ocean. This is due to the way that <sup>129</sup>I discharged from the nuclear fuel reprocessing plants of Sellafield and La Hague (United Kingdom and France respectively) follows after being released. Currents take this radionuclide through the North Sea and along the Norwegian coast to the Arctic. For this reason, the zones closer to the input sources show higher concentrations.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

5. CNA y Sociedad / CNA and Society



## 5. CNA y Sociedad / CNA and Society

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

5. CNA y Sociedad / CNA and Society

5. CNA y Sociedad / CNA and Society

## 5. CNA y Sociedad / CNA and Society

#### 5.1 El CNA y la Salud / CNA and Health

En el acelerador ciclotrón del CNA se producen radiofármacos necesarios para la técnica de imagen PET (tomografía por emisión de positrones). Estos radiofármacos se producen y se distribuyen en colaboración con la empresa Curium. Por otro lado, el CNA dispone de un tomógrafo PET, del que se benefician pacientes del Servicio Andaluz de Salud, para el diagnóstico precoz del cáncer y otras patologías.

En el CNA se desarrollan por otra parte experimentos de radiobiología, en los que se estudia el efecto de la irradiación con haces de protones sobre cultivos celulares. El fin último de estos estudios es poder optimizar el tratamiento del cáncer mediante protonterapia. La protonterapia trata los tumores mediante haces de protones, depositando su energía de forma mucho más localizada que la radioterapia convencional, y produciendo menores efectos secundarios.

Finalmente indicaremos que en el centro se desarrolla una línea de investigación muy consolidada dedicada al estudio de la criopreservación de órganos utilizando equipos de imagen médica.

The cyclotron at CNA produces radiopharmaceuticals required for PET imaging technique (Positron Emission Tomography). These radiopharmaceuticals are produced and distributed in collaboration with the Curium Company. CNA has also a PET-CT scanner, used to diagnose cancer and other pathologies to patients of the Andalusian Health Service.

Radiobiology experiments are also carried out at CNA to study the effect of proton beam irradiation on cellular cultures. The ultimate goal of this research is to optimize the treatment of cancer through proton therapy. Proton therapy treats tumors by proton beams, which deposit their energy much more localized than conventional radiotherapy, producing less secondary effects.

Finally, it is interesting to indicate that in the center there is a consolidated research line devoted to the cryopreservation of organs using medical image equipment.

5. CNA y Sociedad / CNA and Society

#### **5.2 El CNA y el Medio Ambiente / CNA and Environment**

En el CNA se vienen realizando variadas investigaciones enfocadas en la caracterización de residuos radiactivos en colaboración con la empresa ENRESA (Empresa Nacional de Residuos S.A.) para mejorar su clasificación en los procesos de desmantelamiento de centrales nucleares. Para esta caracterización es necesario proceder a la evaluación del nivel de presencia de determinados elementos radiactivos mediante la técnica de Espectrometría de Masas con Aceleradores (AMS), técnica que se puede aplicar únicamente en el CNA dentro del territorio español. No hay técnica alternativa que proporcione la sensibilidad y cobertura que da la técnica AMS en la caracterización de esos residuos.

Mediante la utilización de la espectrometría de masas con acelerador, el CNA ha desarrollado también numerosos proyectos de investigación medioambientales centrados en la determinación de cantidades trazas de radionucleidos artificiales bien para evaluar la contaminación existente en algunos compartimentos ambientales o bien usando a los radionucleidos como trazadores de procesos ambientales. En particular, el CNA posee una muy elevada reputación a nivel internacional en la aplicación de estudios de AMS en Oceanografía, siendo reconocido desde 2013 oficialmente como Centro colaborador de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA) en la aplicación de la técnica AMS a estudios marinos.

CNA carries out research on radioactive residues in collaboration with the Company ENRESA to improve its classification in the dismantling process of nuclear power stations. For this characterization it is necessary the evaluation of the levels of several long-lived radionuclides through accelerator mass spectrometry (AMS), technique that can be applied in our country only in CNA. There is no alternative technique with the coverage and sensitivity of the AMS technique for the characterization of radionuclide residues.

Through the use of AMS, the CNA has carried out also several environmental research projects centered in the determination of minute amounts of artificial radionuclides. These determinations are carried out either to evaluate the contamination present in some environmental compartments or with the objective of using the radionuclides as tracers of environmental processes. In particular, CAN has a very high international reputation in AMS studies in Oceanography, being recognized since 2013 as an official collaborating center of the IAEA in the application of the AMS technique in marine studies.

5. CNA y Sociedad / CNA and Society

#### 5.3 El CNA y el Patrimonio Cultural / CNA and Cultural Heritage

El CNA tiene los dos únicos aceleradores en España en los que se aplica la técnica de espectrometría de masas por aceleradores para realizar el fechado por Carbono-14. Se pueden datar muestras geológicas, arqueológicas, artísticas y del patrimonio histórico en general, utilizando una fracción mínima (miligramos) de la muestra en cuestión. Esto ha permitido por ejemplo fechar manuscritos incunables, esculturas, huesos de yacimientos arqueológicos y otras muestras de interés histórico y arqueológico. Esta técnica de datación se está adicionalmente usando con objetivos forenses, entre los que podemos indicar la evaluación de posibles fraudes en biodiesel o la fecha de extracción de marfiles de elefantes.

Usando por otra parte los aceleradores de partículas, se pueden determinar, de forma no destructiva y con alta precisión, los elementos que componen objetos de orfebrería, cerámicas, pinturas y otros objetos de interés histórico y artístico. El conocimiento de la composición elemental, sin alterar ni dañar la muestra de interés, permite a los arqueólogos obtener información que permita determinar la procedencia de los distintos objetos arqueológicos.

CNA has the only two accelerators in Spain applying AMS (accelerator mass spectrometry) to perform carbón-14 dating. It allows dating geologic, archeologic, artistic and cultural heritage samples, using a minute fraction (milligrams) of the sample. This has been applied to date old books, mummies, bones, sculptures, ice from the Artic and other samples. This dating technique is now being quite frequently used with forensic purposes, such as the evaluation of fraud in biodiesel and in the calculation of the extraction date of elephant ivories.

Using accelerators, one can determine, non-destructively and accurately, the elementary composition of paintings, pottery, and other objects of historic and artistic interest. The knowledge of the composition gives the archeologists and historians additional information to determine the origin of the objects.

5. CNA y Sociedad / CNA and Society

#### 5.4 El CNA y la Empresa / CNA and Business

El CNA mantiene colaboraciones estables con diversas empresas. Así, la empresa Curium opera el ciclotrón del CNA para la producción de radiofármacos, y los comercializa. La empresa ALTER Technology utiliza el irradiador de <sup>60</sup>Co para la realización de ensayos de componentes aeroespaciales. La empresa ENRESA recurre a servicios de caracterización de residuos radiactivos y las empresas AVS y ATI, colaboran con el CNA para el desarrollo de instrumentación científica. Instituciones como el Consejo de Seguridad Nuclear y la Dirección General de la Guardia Civil también recurren al CNA para la realización de medidas ultrasensibles de radionucleidos en el medio ambiente (CSN) y para medidas y dataciones de C-14 con fines forenses (GC).

El CNA está localizado en el Parque Científico y Tecnológico Cartuja, y participa en las iniciativas del parque y del círculo de empresarios para incrementar la colaboración con las empresas. El CNA participa regularmente en el foro TRANSFIERE, localizado en Málaga, y colabora con la asociación INEUSTAR de industria de la ciencia. El CNA, como instalación Científico-Técnica Singular, está abierto a la colaboración con las empresas, tanto como cliente de la industria de la ciencia, como proveedor de servicios con certificaciones de calidad, o como colaborador estratégico de cara a la participación en grandes proyectos nacionales e internacionales.

CNA maintains stable collaborations with different companies. Curium operates the CNA cyclotron to produce and commercialize radiopharmaceuticals. ALTER uses the Co-60 irradiator to tests aerospace components. ENRESA obtains radioactive element measurements and AVS and ATI collaborate with CNA for the development of scientific instrumentation. Institutions such as Nuclear Security Council (CSN) and the Directorate General of Guardia Civil use CNA for the performance of ultra-sensible measurements of radionuclides in the environment (CSN) and for C-14 dating with forensics objectives (Guardia Civil).

CNA is placed in Cartuja Scientific and Technological Park, and participates in the initiatives of the park and its entrepreneur circle, to enhance the collaboration with companies. CNA participate actively in the TRANSFIERE forum, and collaborates with the association INEUSTAR of the industry of science.

CNA, as a singular scientific and technical infrastructure, is open to collaboration with companies, as a client of the industry of science, as a provider of quality certified services, and as a strategic partner for large national and international projects.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA) 6. Cultura Científica / Outreach



## 6. Cultura Científica / Outreach

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

6. Cultura Científica / Outreach
6. Cultura Científica / Outreach

### 6. Cultura Científica / Outreach

### 6.1 Presentación / Presentation

El año 2000 fue en el punto de partida para el programa de Divulgación Científica del Centro Nacional de Aceleradores.

Desde entonces, el CNA tiene diseñado como una de sus líneas estratégicas, un programa de Cultura Científica que comprende diversas acciones divulgativas y de comunicación científica en el ámbito de la Física y sus aplicaciones a los Aceleradores de Partículas y la Física Atómica y Nuclear.

Nuestro público objetivo de las acciones son estudiantes de Secundaria, Bachiller, Formación Profesional dentro de la línea Sanitaria así como estudiantes universitarios y público general.

Los objetivos estratégicos de la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación del CNA, UCC+i, son:

-Diseminar la contribución que los Aceleradores de Partículas han aportado a la Ciencia Básica y Aplicada a lo largo de su historia.

-Demostrar la utilidad de los Aceleradores en la resolución de problemas de distinto ámbito científico útiles incluso para la vida cotidiana.

-Contribuir en el ámbito específico de los Aceleradores de Partículas a diseminar en la Sociedad la idea de que la apuesta por la ciencia tiene carácter estratégico para el ser humano.

-Contribuir en el ámbito específico de los Aceleradores de Partículas a la formación científica de la comunidad, necesaria en una Sociedad en la que, cada vez más, la Ciencia, incluso la más lejana a nuestra experiencia diaria, está presente en la vida cotidiana.

The Outreach Programme of the National Centre of Accelerators is working since 2000.

This Scientific Culture Programme is a strategic line for CNA. The different actions carried out are educational activities and scientific communication in the field of Physics and its applications to Particle Accelerators and Atomic and Nuclear Physics.

*Our visitors are mainly Secondary and High School, job training of the Sanitary Line students and Universities.* 

The main objectives of the Scientific and Innovation Culture Unit:

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

6. Cultura Científica / Outreach

-To illustrate the historical contribution of Particle Accelerators to basic and applied Science.

-To show how Particle Accelerators have helped in the resolution of scientific problems and their applications to daily life.

-To explain the strategic importance of Particle Accelerators.

-To promote scientific knowledge, within the Particle Accelerators field. This is essential in our modern society, where science is particularly involved in daily life.

6. Cultura Científica / Outreach

### 6.2 Acciones / Activities

Las acciones divulgativas que se llevan a cabo en el CNA son las siguientes:

<u>Programa anual de visitas guiadas al CNA "Visítanos y Conciénciate"</u>. Con carácter semanal y durante todo el año académico, los miembros de la Unidad de Cultura Científica y de Innovación del CNA muestran los distintos aceleradores de que disponemos en el CNA: Acelerador Tándem Van de Graaff de 3 MV, Ciclotrón, un sistema AMS de baja energía (1 MV), sistema ultracompacto para datación por <sup>14</sup>C llamado MiCaDaS, así como la sala PET/TAC de humanos y la sala del microPET y microCT de investigación preclínica. La actividad consta de la visita a los distintos aceleradores, laboratorios y otras instalaciones del CNA, la charla "Investigación en el CNA" y por último, se desarrolla el Taller de Estructura de la Materia, Óptica y Electromagnetismo "Experimenta con nosotros".

Jornadas de puertas abiertas de la Semana de la Ciencia "Acelera y Conócenos". Con motivo de la Semana de la Ciencia, el CNA celebra en el mes de noviembre la actividad "Acelera y Conócenos", desde sus inicios en el año 2001, consistente en unas jornadas de puertas abiertas donde todo el público puede, mediante reserva previa, visitar nuestro Centro y conocer un poco más de cerca el mundo de los Aceleradores de Partículas.

Exposición "Aceleradores para la Vida, la Ciencia y la Tecnología" (CNA). Con el fin de dar continuidad a la exposición inaugurada en el Parque de las Ciencias de Granada en 2011, se montó dicha exposición en el CNA, con motivo de la Semana de la Ciencia de noviembre del 2012.

Dado el gran éxito de la exposición entre el público asistente a la misma, la muestra ha quedado instalada con carácter fijo en las instalaciones del Centro Nacional de Aceleradores.

Los elementos fundamentales de esta muestra son la Tecnología con la presentación de elementos tan característicos de los aceleradores como son detectores de partículas, bombas de vacío, medidores de vacío o la Sala de Control del Acelerador Tándem de 3 MV.

Asimismo, también cobra especial importancia en esta exposición la presentación de la investigación desarrollada en el CNA y la interacción con el público a través de simples experimentos y simulaciones donde el asistente podrá conocer el funcionamiento de determinadas partes de los aceleradores del CNA.

<u>Feria de la Ciencia de Sevilla "Acelerando la Ciencia"</u>. El CNA participa, desde la primera feria de la Ciencia en el año 2003, con un stand en la Feria de la Ciencia. Ésta se lleva a cabo todos los años en el mes de mayo en Sevilla.

6. Cultura Científica / Outreach

Nuestro centro participa en la feria con la exposición "Acelerando la Ciencia" consistente en videos, presentaciones y experimentos. En definitiva, muestra la Ciencia e Investigación desarrollada en el CNA al público en general.

<u>Página Web de Divulgación Científica</u>. También se incluye en nuestro proyecto de divulgación la realización de una página web dirigida a niños y jóvenes, cuyo objetivo es presentar de forma amena y didáctica los fundamentos y aplicaciones de la investigación con Aceleradores de Partículas y la Física Atómica y Nuclear, <u>http://institucional.us.es/uccicna/</u>

<u>Social Media "Redescna"</u>. Uno de los objetivos del CNA, a nivel divulgativo, es el de acercar la investigación que se desarrolla en el centro a través de distintas redes sociales, tales como G+, Prenser, Facebook, Twitter, Flicker o CANALCNA en YouTube.

<u>Newsletter "Boletín Informativo del CNA"</u>. Con carácter trimestral, se publica un resumen de las noticias más interesantes relacionadas con el CNA, tanto de índole científica, institucional como divulgativa.

<u>Comunicación de la investigación</u>. En los últimos años, se ha dado desde el Centro Nacional de Aceleradores un impulso a la comunicación de la investigación desarrollada en el Centro y por sus investigadores mediante notas de prensa con difusión en medios locales, autonómicos y nacionales.

The outreach activities carried out in the center are:

<u>Programme of annual visits "Visítanos y Conciénciate"</u>. Weekly, the Outreach group shows the different CNA accelerators: 3 MV Tandem Accelerator, Cyclotron with 18 MeV protons and 9 MeV deuterons, an AMS low energy system (1 MV), MiCaDaS (Mini radioCarbon Dating System), scanner PET/CT and microPET and microCT laboratory. In this activity, the visitants go to the differents facilities of CNA. Also it is given the conference "Research at CNA" and the experimental workshop "Experiment with us".

<u>Open doors during Science Week "Acelera y Conócenos"</u>. Since 2001, CNA carries out the activity "Acelera y Conócenos". During Science Week, which is held annually in November, our center carries out open conferences where anyone, who wants to learn a little more about the world of particle accelerators, can visit us.

<u>Sevilla Science Fair "Acelerando la Ciencia"</u>. CNA participates with a stand at the Science Fair which takes place every year in May since 2003. Our center participates in the fair exposing videos, presentations, doing experiments, in order to approach science to young people.

<u>Exhibition "Aceleradores para la Vida, la Ciencia y la Tecnología" (CNA)</u>. CNA set up the exhibition in its hall with the aim to continue the exhibition of Granada "Partículas para la Vida, la Ciencia y la Tecnología" in 2011.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

6. Cultura Científica / Outreach

This exhibition started in November with the Science Week. Due to the success of the exhibition, CNA has installed the exhibition with immovable character for the visits from all persons who are interested.

The elements of this show are the technology with the introduction of characteristic elements such as accelerators, particle detectors, vacuum pumps, vacuum gauges or Control Room of 3 MV Tandem Accelerator. Also it is particularly important in this exhibition the research developed in the CNA. The visitors interact through simple experiments and simulations where the public can learn how certain parts of the accelerators of CNA work.

<u>CNA Outreach website</u>. The outreach program has a website devoted to children and young people, to show research with Particle Accelerators and Atomic and Nuclear Physics, <u>http://institucional.us.es/uccicna/</u>

<u>Social networks</u>. The different activities of CNA are shown in the social networks such as Xing, Linkedin, G+, Prenser, Facebook, Twitter, Tuenti, Flicker or CANALCNA in YouTube.

<u>Newsletter</u>. Every three months, a newsletter is elaborated with all the information on research, or activities at CNA.

<u>Research Communication</u>. In recent years, there has been from the Centro Nacional de Aceleradores boost the communication of research carried out at the Centre and for its researchers through press notes to local, regional and national media diffusion.

6. Cultura Científica / Outreach

### 6.3 Impacto de actividades / Activities impact



#### 6.3.1 Visitantes de las instalaciones por año / Annual visitants

#### 6.3.2 Procedencia de los centros visitantes / Origin of visitant centers



6. Cultura Científica / Outreach



#### 6.3.3 Visitantes a exposiciones y ferias / Visitants of exhibitions

#### 6.3.4 Comunicación Científica / Scientific press releases



6. Cultura Científica / Outreach

Centro Nacional de Aceleradores (CNA) 7. Producción Científica / Scientific Production



### 7. Producción Científica / Scientific Production

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

7. Producción Científica / Scientific Production

### 7. Producción Científica / Scientific Production

En este apartado se muestran los resultados de la producción científica que se ha llevado a cabo por cada una de las Unidades de Investigación del CNA:

In this section, the research carried out by the different CNA Research Units is shown:

# 7.1 Participación en Proyectos, Convenios y Contratos / Research Projects, Agreements and Contracts

#### 7.1.1 Proyectos Internacionales / International Projects

**COordination and iMplementation of a pan-European instrumenT for radioecology** COMET-604974 7<sup>th</sup> Framework Programme Rafael García-Tenorio García-Balmaseda 01/06/2013 al 31/05/2017

#### **Optimization of Medical Accelerators**

H2020-MSCA-ITN-2015 Comisión Europea J. Gomez Camacho 01/02/2016 al 31/01/2020

#### Validation of European high capacity rad-hard FPGA and software tools

SI-1513/27/2016 Comisión Europea M.A. Aguirre Echanove 01/01/2016 al 31/12/2018

#### Scientific Coordinator in JET H Campaign

H16-02: Confinement with different isotope ratio EUROfusion Consorium Eleonora Viezzer 01/06/2016 al 31/03/2017

#### Scientific Coordinator in MST1 Campaign

Topic 5 "Characterization of "natural" no-ELM regimes" EUROfusion Consorium Eleonora Viezzer 01/10/2016 al 30/09/2018

**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

7. Producción Científica / Scientific Production

# Ion Beam Induced Spatio-temporal Structural Evolution of Materials: Accelerators for a New Technology Era

Agencia Internacional de la Energía Atómica J. Garcia Lopez 13/12/2016 al 06/12/2020

#### Development of advanced fast-ion loss detectors for fusion devices

EEG-2017/01 EUROfusion Consortium M. Garcia Muñoz 01/06/2017 al 31/05/2020

# Mastering the energetic particle distribution in a magnetohydrodynamic active plasma

H2020-708257: FIREFELM Comisión Europea E. Viezzer 01/09/2017 al 31/08/2019

#### WPSA: Preparation and exploitation of JT-60SA

CfP-IPH-AWP19-SA-05-CIEMAT-01 EUROfusion Consortium M. Garcia Muñoz 31/12/2020

#### 7.1.2 Proyectos Nacionales y Autonómicos / National and Autonomic Projects

Use of Low-Energy Particle Accelerators at CNA to Develop and Calibrate Detectors of Energetic Particle Losses for Magnetically Confined Fusion Devices RYC-2011-09152 MINECO (Dotación adicional Ramón y Cajal) Manuel García Muñoz 01/09/2012 al 31/08/2017

#### Microlab-on-chip para producción de radiofármacos para diagnóstico PET

TIC-2296 Junta de Andalucía (Proyectos de Excelencia de la Junta de Andalucía) José Manuel Quero Reboul 30/01/2014 al 29/01/2018

#### Red Temática de Física Nuclear

FPA2015-69714-REDT MINECO (Plan Estatal 2013-2016 Excelencia-Redes) Joaquín José Gómez Camacho 01/12/2015 al 30/11/2018

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Mejora del ciclotrón del CNA

UNSE15-CE-2821 MINECO (Subprograma Estatal de Infraestructuras Científicas y Técnicas y Equipamiento (Plan Estatal i+D+I 2013-2016)) Joaquín José Gómez Camacho 01/01/2016 al 31/12/2017

#### Mejora del acelerador Tándem del CNA

UNSE15-CE-3334 MINECO (Subprograma Estatal de Infraestructuras Científicas y Técnicas y Equipamiento (Plan Estatal i+D+I 2013-2016)) Joaquín José Gómez Camacho 01/01/2016 al 31/12/2017

Mejoras en la Unidad de Espectrometría de Masas con Acelerador (AMS) del CNA UNSE15-CE-3325 MINECO (Subprograma Estatal de Infraestructuras Científicas y Técnicas y Equipamiento (Plan Estatal i+D+I 2013-2016)) Rafael García-Tenorio García-Balmaseda 01/01/2016 al 31/12/2017

Dinámica del espacio de fases de iones energéticos en presencia de modos Alfvénicos, modos de borde y perturbaciones resonantes aplicadas exteriormente FIS2015-69362-P

MINECO (Plan Estatal 2013-2016 Excelencia - Proyectos I+D) Manuel García Muñoz y Javier García López 01/01/2016 al 31/12/2019

#### Centro de ensayos combinados de irradiación

ESP2015-68245-C4-4-P MINECO (Plan Estatal 2013-2016 Excelencia - Proyectos I+D) Yolanda Morilla García 01/01/2016 al 31/12/2019

Resolución de Problemas Ambientales Marinos y Terrestres Clave Mediante Nuevos Desarrollos en Espectrometría de Masas con Acelerador de Baja Energía (Leams) en el CNA FIS2015-69673-P MINECO (Plan Estatal 2013-2016 Excelencia - Proyectos I+D) R. García-Tenorio

01/01/2016 al 31/12/2018

El uso y "abuso" del metal en la Antigüedad: de la economía de prestigio a la de mercado (Iberia en el Mediterráneo Occidental, s. VI-I a.C.) HAR2015-67113-P

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

MINECO (Plan Estatal 2013-2016 Excelencia - Proyectos I+D) M.A. Respaldiza 01/01/2016 al 31/12/2018

#### Física Nuclear y Aplicaciones Médicas en el CNA e Instalaciones Internacionales

FPA2016-77689-C2-1-R MINECO (Plan Estatal 2013-2016 Retos - Proyectos I+D+i) J.M. Quesada; J. Gomez Camacho 30/12/2016 al 29/12/2018

#### Actualización y mejora del laboratorio Tándem de 3 MV del CNA

EQC2018-004193-P Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (Subprograma estatal de infraestructuras de investigación y equipamiento científico-técnico (Plan Estatal I+D+i 2017-2020)) J. García López 01/01/2018 al 31/12/2020

# Mejora de las capacidades del sistema de Espectrometría de Masas con Aceleradores del Centro Nacional de Aceleradores

EQC2018-004095-P

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (Subprograma estatal de infraestructuras de investigación y equipamiento científico-técnico (Plan Estatal I+D+i 2017-2020)) J.M López Gutiérrez

01/01/2018 al 31/12/2020

#### Implementación de cámara ambiental para ensayos de irradiación combinados en el Centro Nacional de Aceleradores-CNA

EQC2018-004166-P

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (Subprograma estatal de infraestructuras de investigación y equipamiento científico-técnico (Plan Estatal I+D+i 2017-2020))

R. García-Tenorio 01/01/2018 al 31/12/2020

#### 7.1.3 Convenios y Contratos / Agreements and Contracts

Contrato de Explotación temporal del laboratorio de radiofarmacia asociado al acelerador denominado CICLOTRON del CNA e investigación CURIUM Pharma Spain, SA R. García-Tenorio 09/12/2003 hasta la actualidad

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Convenio específico de colaboración entre el CNA y el HUVR para la potenciación de la investigación y el desarrollo de las aplicaciones humanas de la tomografía por emisión de positrones

Junta de Andalucía (Servicio Andaluz de Salud) R. García-Tenorio 17/11/2011 hasta la actualidad

#### Convenio de irradiación con la empresa ALTER

Alter Technology R. García-Tenorio 01/01/2013 hasta la actualidad

### Agreement on a colaboration in the field on Advanced PET/CT imaging with biograph mCT

Siemens R. García-Tenorio 15/01/2016 al 14/01/2019

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

### 7.2 Artículos publicados / Published Articles

#### 7.2.1 Artículos ISI / ISI Articles

<sup>41</sup>Ca measurements on the 1 MV AMS facility at the Centro Nacional de Aceleradores (CNA, Spain)

C. Vivo Vilches; J.M. Lopez Gutierrez; M. Garcia Leon; C. Vockenhuber; T. Walczyk Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (413) (13-18) (2017)

# Isolation of <sup>236</sup>U and <sup>239,240</sup>Pu from seawater samples and its determination by Accelerator Mass Spectrometry

M. Lopez Lora; E. Chamizo; M. Villa Alfageme; S. Hurtado Bermudez; N. Casacuberta; M. Garcia Leon Talanta (178) (202-210) (2017)

### Natural and artificial radionuclides in a marine core. First results of <sup>236</sup>U in North Atlantic Ocean sediments

M. Villa Alfageme; E. Chamizo; F.J. Santos Arevalo; J.M. Lopez Gutierrez; I. Gomez Martinez; S. Hurtado Bermudez Journal of Environmental Radioactivity (on-line) (2017)

**On the presence of plutonium in Madagascar following the SNAP-9A satellite failure** C. Raaf; E. Holm; N. Rabesiranana; R. Garcia Tenorio; E. Chamizo Journal of Environmental Radioactivity (177) (91-99)

# Temporal evolution of <sup>137Cs, 237</sup>Np, and <sup>239+240</sup>Pu and estimated vertical <sup>239+240</sup>Pu export in the northwestern Mediterranean Sea

M. Bressac; I. Levy; E. Chamizo; J.J. La Rosa; P.P. Povinec; G. Gastaud; B. Oregioni Science of the Total Environment (595) (178-190) (2017)

### Energy sensitive ion- and cathode-luminescent radiation beam monitors based on a multilayer thin film designs

J. Gil Rostra; F.J. Ferrer; J.P. Espinos; A.R. Gonzalez Elipe; F. Yubero ACS Applied Materials and Interfaces (9) (16313-16320) (2017)

#### Plasma Assisted Oblique Angle Deposition of Transparent and Conductive in-Plane Anisotropic ITO Thin Films

J. Parra Barranco; J.R. Sanchez Valencia; F.J. Aparicio; F. Garcia Garcia; F.J. Ferrer; V. Rico; C. Lopez Santos; A. Borras; A.R. Gonzalez Elipe; A. Barranco ECS Transactions (77) (009-015) (2017)

### Multicolored Emission and Lasing in DCM-Adamantane Plasma Nanocomposite Optical Films

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

M. Alcaire; L. Cerdan; F. Lahoz Zamarro; F. Aparicio; J.C. Gonzalez; F.J. Ferrer; A. Borras; J.P. Espinos; A. Barranco

ACS Applied Materials and Interfaces (9) (8948-8959) (2017)

#### Dynamic and thermal simulations of a fast-ion loss detector for ITER

J. Ayllon Guerola; M. Garcia Munoz; M. Kocan, J. Gonzalez Martin; J.F. Rivero Rodriguez; L. Bertalot; Y. Bonnet, J.P. Catalan; J Galdon-Quiroga; J. Garcia Lopez; T. Giacomin; J.P. Gunn; M Rodriguez Ramos; R. Reichle; L Sanchis Sanchez; G. Vayakis; E. Veshchev; Ch. Vorpahl; M. Walsh; R. Walton

Fusion Engineering and Design (123) (807-810) (2017)

#### First absolute measurements of fast-ion losses in the ASDEX Upgrade tokamak

M. Rodriguez Ramos; M Garcia Munoz; M.C. Jimenez Ramos; J Garcia Lopez; J Galdon Quiroga; L. Sanchis Sanchez; J. Ayllon Guerola; M. Faitsch; J. Gonzalez Martin; A. Hermann; P. de Marne; J.F. Rivero Rodriguez; B. Sieglin; A. Snicker; ASDEX Upgrade Team

Plasma Physics and Controlled Fusion (59) (105009) (2017)

## Conceptual design of a scintillator based Imaging Heavy Ion Beam Probe for the ASDEX Upgrade tokamak

J. Galdon Quiroga; J.F. Rivero Rodriguez; M. Garcia Munoz; G. Birkenmeier; E. Viezzer; J. Ayllon Guerola; M. Dunne; J. Garcia Lopez; J. Gonzalez Martin; M.C. Jimenez Ramos; M. Rodriguez Ramos; L. Sanchis Sanchez; E. Wolfrumd; ASDEX Upgrade Team Journal of Instrumentation (12) (C08023) (2017)

### Soft error rate comparison of 6T and 8T SRAM ICs using mono-energetic proton and neutron irradiation sources

D. Malagon; S.A. Bota; G. Torrens; X. Gili; J. Praena; B. Fernandez; M. Macias; J.M. Quesada; C. Guerrero Sanchez; M.C. Jimenez Ramos; J. Garcia Lopez; J.L. Merino; J. Segura

Microelectonics Reliability (78) (38-45) (2017)

### Charge collection uniformity and irradiation effects of synthetic diamond detectors studied with a proton micro-beam

C. Cazzaniga; M. Rebai; J. Garcia Lopez; M.C. Jimenez Ramos; M. Girolami; D.M. Trucchi; A. Bellucci; C.D. Frost; M. Garcia Munoz; M. Nocente; M. Tardocchi; G. Gorini Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (405) (1-10) (2017)

#### Temperature response of several scintillator materials to light ions

M. Rodriguez Ramos; M.C. Jimenez Ramos; M. Garcia Muñoz; J. Garcia Lopez Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (403) (7-12) (2017)

7. Producción Científica / Scientific Production

## The effects of electron cyclotron heating and current drive on toroidal Alfvén eigenmodes in tokamak plasmas

S.E. Sharapov; M Garcia Munoz; M.A. Van Zeeland; B. Bobkov; I.G.J. Classen; J. Ferreira; A. Figueiredo; M. Fitzgerald; J. Galdon Quiroga; D. Gallart; B. Geiger; J. Gonzalez Martin; T. Johnson; P. Lauber; M. Mantsinen; F. Nabais; V. Nikolaeva; M. Rodriguez Ramos; L. Sanchis Sanchez; P.A. Schneider; A. Snicker; P. Vallejos; AUG Team; the EUROfusion MST1 Team

Plasma Physics and Controlled Fusion (60) (14026) (2017)

## LabVIEW-based control and acquisition system for the dosimetric characterization of a silicon strip detector

M.C. Ovejero; A. Perez Vega Leal; M.I. Gallardo; J.M. Espino; A. Selva; M.A. Cortes Giraldo; R. Arrans

Review of Scientific Instruments (88) (25104) (2017)

# Rapid and simplified synthesis of [<sup>18</sup>F]Fluoromisonidazole and its use in PET imaging in an experimental model of subarachnoid hemorrhage

L. Fernandez Maza; J.J. Egea Guerrero; M. Balcerzyk; G. Civantos Jubera; E. Gordillo Escobar; A. Vilches Arenas; I. Fernandez Gomez; A. Parrado Gallego; F. Murillo Cabezas Applied Radiation and Isotopes (132) (79-84) (2017)

## Disposable PDMS Chip With Integrated [<sup>18</sup>F]Fluoride Pre-Concentration Cartridge for Radiopharmaceuticals

B. Salvador; A. Luque; L. Fernandez Maza; A. Corral; D. Orta; I. Fernandez; J.M. Quero Journal of Electromechanical Systems (26) (1442-1448) (2017)

# Estimating the impact from Fukushima in Southern Spain by <sup>131</sup>I and Accelerator Mass Spectrometry detection of <sup>129</sup>I

J.M. Gomez Guzman; J.M. Lopez Gutierrez; R. Garcia Tenorio; L. Agullo; J.I. Peruchena; G. Manjon; M. Garcia Leon

Journal of Environmental Radioactivity (166) (36-44) (2017)

# Investigation of inter-ELM ion heat transport in the H-mode pedestal of ASDEX Upgrade plasmas

E. Viezzer; M. Cavedon; E. Fable; C. Angioni; R. Dux; F.M. Laggner; M. Bernert; A. Burckhart; R.M. McDermott; T. Pütterich; F. Ryter; M. Willensdorfer; E. Wolfrum; ASDEX Upgrade Team; EUROfusion MST1 Team Nuclear Fusion (57) (22020) (2017)

# Microemulsion mediated synthesis and properties of uniform Ln:CaWO<sub>4</sub> (Ln = Eu, Dy) nanophosphors with multicolor luminescence for optical and CT imaging

M. Laguna; N. Nuñez; F. García; A. Corral; A. Parrado Gallego; M. Balcerzyk; A. Nieto; M. Ocaña

European Journal of Inorganic Chemistry (2017) (5158-5168) (2017)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Application of EARL (ResEARch 4 Life<sup>®</sup>) protocols for [<sup>18</sup>F]FDG-PET/CT clinical and research studies. A roadmap towards exact recovery coefficient

M. Balcerzyk; R. Fernandez Lopez; A. Parrado Gallego; V.M. Pachon Garrudo; J. Chavero Royan; J. Hevilla; E. Jimenez Ortega; A. Leal

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (873) (39-42) (2017)

#### A robust Monte Carlo treatment planning optimization algorithm for dose painting clinical implementation

E. Jimenez Ortega; A. Ureba; A. Rita Barbeiro; M. Balcerzyk; A. Parrado Gallego; A. Wals Zurita; F.J. Garcia Gomez; A. Leal Physica Medica (42) (37-38) (2017)

#### Non-destructive micro-analytical system for the study of the manufacturing processes of a group of gold jewels from "El Carambolo" treasure

S. Scrivano; I. Ortega Feliu; B. Gomez Tubio; F.J. Ager; M.L. de la Bandera; M.A. Respaldiza; M.A. Ontalba Salamanca

Radiation Physics and Chemistry (130) (133-141) (2017)

#### Compositional and microstructural study of joining methods in archaeological gold objects

S. Scrivano; B. Gomez Tubio; I. Ortega Feliu; F.J. Ager; A. Paul; M.A. Respaldiza X-Ray Spectrometry (46) (123-130) (2017)

#### In-situ non-destructive analysis of Etruscan gold jewels with the micro-XRF transportable spectrometer from CNA

S. Scrivano; C. Ruberto; B. Gomez Tubio; A. Mazzinghi; I. Ortega Feliu; F.J. Ager; K. Laclavetine; L. Giuntini; M.A. Respaldiza

Journal of Archaeological Science: Reports (16) (185-193) (2017)

#### Multi-technique characterization of gold electroplating on silver substrates for cultural heritage applications

I. Ortega Feliu; F.J. Ager; C. Roldan; M. Ferretti; D. Juanes; S. Scrivano; M.A. Respaldiza; L. Ferrazza; I. Traver; M.L. Grilli

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (406) (318-323) (2017)

#### Reconsidering the accuracy of X-ray fluorescence and ion beam based methods when used to measure the thickness of ancient gildings

F.J. Ager; M. Ferretti; M.L. Grilli; D. Juanes; I. Ortega Feliu; M.A. Respaldiza; C. Roldan; S. Scrivano

Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy (135) (42-47) (2017)

#### Breakup and n-transfer effects on the fusion reactions <sup>6,7</sup>Li+<sup>120,119</sup>Sn around the **Coulomb barrier**

7. Producción Científica / Scientific Production

M. Fisichella; A.C. Shotter; P. Figuera; J. Lubian; A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; J.L. Ferreira; M. Lattuada; P. Lotti; A. Musumarra; M.G. Pellegriti; C. Ruiz; V. Scuderi; E. Strano; D. Torresi; M. Zadro Physical Review C (95) (34617) (2017)

#### Scattering of the Halo Nucleus <sup>11</sup>Be on <sup>197</sup>Au at Energies around the Coulomb Barrier

V. Pesudo; M.J. Borge; A.M. Moro; J.A. Lay; E. Nacher; J. Gomez Camacho; O. Tengblad; L. Acosta; M. Alcorta; M.A. Alvarez; C. Andreoiu; P.C. Bender; R. Braid; M. Cubero; A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; P. Figuera; M. Fisichella; B.R. Fulton; A.B. Garnsworthy; G. Hackman; U. Hager; O.S. Kirsebom; K. Kuhn; M. Lattuada; G. Marquinez Duran; I. Martel; D. Miller; M. Moukaddam; P.D. O Malley; A. Perea; M.M. Rajabali; A.M. Sanchez Benitez; F. Sarazin; V. Scuderi; C.E. Svensson; C. Unsworth; Z.M. Wang Physical Review Letters (118) (152502) (2017)

#### Breakup of <sup>6</sup>Li+p at near-barrier energies and the effect on elastic scattering

V. Soukeras; A. Pakou; F. Cappuzzello; L. Acosta; C. Agodi; N. Alamanos; S. Calabrese; D. Carbone; M. Cavallaro; A. Cunsolo; A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; P. Figuera; M. Fisichella; A. Foti; N. Keeley; G. Marquinez Duran; I. Martel; M. Mazzocco; D. Pierroutsakou; K. Rusek; G. Santagati; O. Sgouros; E. Stiliaris; E. Strano; D. Torresi; K. Zerva

Physical Review C (95) (54614) (2017)

#### Evidence for ${}^{15}O+\alpha$ resonance structures in ${}^{19}Ne$ via direct measurement

D. Torresi; C. Wheldon; T. Kokalova; S. Bailey; A. Boiano; C. Boiano; M. Fisichella; M. Mazzocco; C. Parascandolo; D. Pierroutsakou; E. Strano; M. Zadro; M. Cavallaro; S. Cherubini; N. Curtis; A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; P. Figuera; T. Glodariu; J. Grebosz; M. La Cognata; M. La Commara; M. Lattuada; D. Mengoni; R.G. Pizzone; C. Signorini; C. Stefanini; L. Stroe; C. Spitaleri Physical Review C (96) (44317) (2017)

### Natural radionuclides in lichens, mosses and ferns in a thermal power plant and in an adjacent coal mine area in southern Brazil

J.A. Galhardi; R. Garcia Tenorio; I. Diaz Frances; D. Bonotto; M.P.Marcelli Journal of Environmental Radioactivity (167) (43-53) (2017)

# New method for carbon dioxide mineralization based on phosphogypsum and aluminium-rich industrial wastes resulting in valuable carbonated by-products

I. Romero Hermida; A. Santos; R. Perez Lopez; R. Garcia Tenorio; L. Esquivias; V. Morales Florez

Journal of CO<sub>2</sub> Utilization (18) (15-22) (2017)

#### <sup>210</sup>Po activity concentrations in cooked marine food

I. Diaz Frances; J. Diaz Ruiz; G. Manjon; R. Garcia Tenorio Journal of Fisheriesciences (11) (51-55) (2017)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### <sup>226</sup>Ra dynamic lixiviation from phosphogypsum samples by an automatic flowthrough system with integrated renewable solid-phase extraction

M. Rodas; A. Borras; R. Garcia Tenorio; R. Rodriguez; J.M. Estela; V. Cerda; L. Ferrer Talanta (167) (398-403) (2017)

# Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil

J.A. Galhardi; R. Garcia Tenorio; D.M. Bonotto; I. Diaz Frances; J.G. Motta Journal of Environmental Radioactivity (177) (37-47) (2017)

An integrated automatic system to evaluate U and Th dynamic lixiviation from solid matrices and to extract/pre-concentrate leached analytes previous ICP-MS detection M. Rodas; R. Garcia Tenorio; J.M. Estela; V. Cerda; L. Ferrer Talanta (175) (507-513) (2017)

## Low-level Determination of Th-isotopes by alpha spectrometry. Part 1: Evaluation of radiochemical separation methods

M. Herranz; J.C. Lozano; F. Mosqueda; J. Galvan; A. Parraga; J.P. Bolivar; R. Garcia Tenorio

Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (314) (2507-2517) (2017)

## Low-level Determination of Th-isotopes by alpha spectrometry. Part 2: Evaluation of methods for dissolution of samples and for test sample preparation

J.C. Lozano; M. Herranz; F. Mosqueda; G. Manjon; R. Idoeta; B. Quintana; R. Garcia Tenorio; J.P. Bolivar

Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (314) (2519-2529) (2017)

### A rotary and reciprocating scintillator based fast-ion loss detector for the MAST-U tokamak

J. F. Rivero-Rodriguez; M. Garcia-Munoz; R. Martin; J. Galdon-Quiroga; J. Ayllon-Guerola; R. J. Akers; J. Buchanan; D. Croft; D. Garcia-Vallejo; J. Gonzalez-Martin; D. Harvey; K. G. McClements; M. Rodriguez Ramos; L. Sanchis Review of Scientific Instruments (89) (101112) (2018)

#### Spectroscopy of excited states of unbound nuclei <sup>30</sup>Ar and <sup>29</sup>Cl

X.-D. Xu; I. Mukha; L.V. Grigorenko; C. Scheidenberger; L. Acosta; E. Casarejos; V. Chudoba; A.A. Ciemny; W. Dominik; J. Duenas-Diaz; V. Dunin; J.M. Espino; A. Estrade; F. Farinon; A. Fomichev; H. Geissel; T.A. Golubkova; A. Gorshkov; Z. Janas; G. Kaminski; O. Kiselev; R. Knobel; S. Krupko; M. Kuich; Yu.A. Litvinov; G. Marquinez-Duran; I. Martel; C. Mazzocchi; C. Nociforo; A.K. Orduz; M. Pfutzner; S. Pietri; M. Pomorski; A. Prochazka; S. Rymzhanova; A.M. Sanchez-Benítez; P. Sharov; H. Simon; B. Sitar; R. Slepnev; M. Stanoiu; P. Strmen; I. Szarka; M. Takechi; Y.K. Tanaka; H. Weick; M. Winkler y J.S. Winfield

Physical Review C-Nuclear Physics (97) (34305) (2018)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

## Colorimetric energy sensitive scintillator detectors based on luminescent multilayer designs

F.J. Ferrer; J. Gil-Rostra; A.R. Gonzalez-Elipe; F. Yubero Sensors and Actuators A: Physical (272) (217-222) (2018)

# Preparation and characterisation of <sup>33</sup>S samples for <sup>33</sup>S( $n,\alpha$ )<sup>33</sup>Si cross-section measurements at the n\_TOF facility at CERN

J. Praena; F.J. Ferrer et al.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (890) (142-147) (2018)

## Velocity-space sensitivity and tomography of scintillator-based fast-ion loss detectors

J. Galdon-Quiroga; M. Garcia-Munoz; M. Salewski; AS Jacobsen; L. Sanchis-Sanchez; M. Rodriguez-Ramos; J. Ayllon-Guerola; J. Garcia-Lopez; J. Gonzalez-Martin; M.C. Jimenez-Ramos

Plasma Physics and Controlled Fusion (60) (105005) (2018)

# Spectral characterization of laser-accelerated protons with CR-39 nuclear track detector

M. Seimetz; P. Bellido; P. Garcia; P. Mur; A. Iborra; T. Hulber; J Garcia Lopez; M.C. Jimenez Ramos; R. Lera; A. Ruiz de la Cruz; I. Sanchez; R. Zaffino; L. Roso; J.M. Benlloch Review of Scientific Instruments (89) (23302) (2018)

#### The GEOTRACES Intermediate Data Product 2017

R. Schlitzer et al. Chemical Geology (493) (210-223) (2018)

# Accelerator mass spectrometry of <sup>236</sup>U with He stripping at the Centro Nacional de Aceleradores

E. Chamizo; M. Lopez-Lora

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (On-line) (2018)

# Isolation of <sup>236</sup>U and <sup>239,240</sup>Pu from seawater samples and its determination by Accelerator Mass Spectrometry

M. Lopez-Lora; E. Chamizo; M. Villa-Alfageme; S. Hurtado-Bermudez; N. Casacuberta; M. Garcia-Leon

Talanta (178) (202-210) (2018)

# Evaluation of a new freezing protocol containing 20% DMSO concentration to cryopreserve human ovarian tissue

M. Gallardo; F. Paulini; A. Corral; M. Balcerzyk; C. Lucci; J. Ambroise; M. Merola; L. Fernandez-Maza; R. Risco; M. Dolman

Reproductive BioMedicine (37(6)) (653-665) (2018)

7. Producción Científica / Scientific Production

### Preclinical [<sup>18</sup>F]tetrafluoroborate-PET/CT imaging of pituitary gland hyperplasia

M. Balcerzyk; L. Fernandez-Maza; J.J. Minguez; M. De-Miguel Japanese Journal of Clinical Oncology (48(2)) (200-201) (2018)

# Deciphering neolithic activities from a cardial burial site (Cova Bonica) on the Western Mediterranean Coast

J. Daura; M. Sanz; F.X Oms; M. Pedro; P. Martinez; S. Mendiela; M. Oliva Poveda; J.F. Gibaja; M. Mozota; M. Alonso-Eguiluz; R.M. Albert; E. Allue; S. Bañuls-Cardona; J.M. Lopez-Garcia; F.J. Santos Arevalo; J.M. Fullola Journal of Archaeological Science: Reports (23) (324-347) (2018)

Molecular fingerprinting of C-14 dated soil organic matter fractions from archaeological settings in NW Spain

C. Ferro Vazquez; J. Kaal; F.J. Santos Arevalo; F. Criado Boado Radiocarbon (on-line)

# Changes in CO<sub>2</sub> emission sources in Mexico City metropolitan area deduced from radiocarbon concentrations in tree rings

L. Beramendi Orosco; G. Gonzalez Hernandez; A. Martinez Reyes; O. Morton Bermea; F.J. Santos Arevalo; I. Gomez Martinez; J. Villanueva Díaz Radiocarbon (60) (21-34) (2018)

#### Ion heat transport dynamics during edge localized mode cycles at ASDEX Upgrade

E. Viezzer; M. Cavedon; E. Fable; F.M. Laggner; R.M. McDermott; J. Galdon-Quiroga; M.G. Dunne; A. Kappatou; C. Angioni; P. Cano-Megias; D.J. Cruz-Zabala; R. Dux; T. Pütterich; F. Ryter; E. Wolfrum; The ASDEX Upgrade Team; The EUROfusion MST1 Team

Nuclear Fusion (58) (26031) (2018)

# Effects of density gradients and fluctuations at the plasma edge on ECEI measurements at ASDEX Upgrade

B. Vanovac; E. Wolfrum; S S Denk; F. Mink; F.M. Laggner; G. Birkenmeier; M. Willensdorfer; E. Viezzer; M. Hoelzl; S.J. Freethy; M.G. Dunne; A. Lessig; N.C. Luhmann; the ASDEX Upgrade Team; the EUROfusion MST1 Team Plasma Physics Controlled Fusion (60) (45002) (2018)

# A forward model for the helium plume effect and the interpretation of helium charge exchange measurements at ASDEX Upgrade

A. Kappatou; R. M. McDermott; T Putterich; R Dux; B Geiger; R J E Jaspers; A J H Donne; E Viezzer; M Cavedon; the ASDEX Upgrade Team Plasma Physics Controlled Fusion (60) (55006) (2018)

Insights into type-I edge localized modes and edge localized mode control from JOREK non-linear magneto-hydrodynamic simulations

#### Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

M. Hoelzl; G.T.A. Huijsmans; F. Orain; F.J. Artola; S. Pamela; M. Becoulet; D. van Vugt; F. Liu; S. Futatani; A. Lessig; E. Wolfrum; F. Mink; E. Trier; M. Dunne; E. Viezzer; T. Eich; B. Vanovac; L. Frassinetti; S. Guenter; K. Lackner; I. Krebs; ASDEX Upgrade Team; EUROfusion MST1 Team

Contributions to Plasma Physics (58) (518) (2018)

**Observation of enhanced ion particle transport in mixed H/D isotope plasmas on JET** M. Maslov; D. B. King; E. Viezzer; D.L. Keeling; C. Giroud; T. Tala; A. Salmi; M. Marin; J. Citrin; C. Bourdelle; E.R. Solano; JET contributors Nuclear Fusion (60) (76022) (2018)

## Density control by pellets in plasmas with ELM mitigation by RMPs in the ASDEX Upgrade tokamak

M. Valovic; P.T. Lang; A. Kirk; W. Suttrop; M. Cavedon; M. Dunne; R. Fischer; L. Garzotti; L. Guimarais; N. Leuthold; P.J. Mc Carthy; H. Meyer; A. Mlynek; B. Ploeckl; E. Poli; G. Tardini; E. Viezzer; E. Wolfrum; the ASDEX Upgrade team; the EUROfusion MST1 team

Plasma Physics Controlled Fusion (60) (85013) (2018)

#### Beam-Ion Acceleration during Edge Localized Modes in the ASDEX Upgrade Tokamak

J. Galdon-Quiroga; M. Garcia-Munoz; K.G. McClements; M. Nocente; M. Hoelzl; A.S. Jacobsen; F. Orain; J.F. Rivero-Rodriguez; M. Salewski; L. Sanchis-Sanchez; W. Suttrop; E. Viezzer; the ASDEX Upgrade Team; the Eurofusion MST1 Team Physical Review Letters (121) (25002) (2018)

### Experimental conditions to suppress edge localised modes by magnetic perturbations in the ASDEX Upgrade tokamak

W. Suttrop; A. Kirk; V. Bobkov; M. Cavedon; M. Dunne; R.M. McDermott; H. Meyer; R. Nazikian; C. Paz-Soldan; D.A. Ryan; E. Viezzer; M. Willensdorfer; The ASDEX Upgrade; MST1 Teams

Nuclear Fusion (58) (96031) (2018)

# Evaluation of impurity densities from charge exchange recombination spectroscopy measurements at ASDEX Upgrade

R.M. McDermott; R. Dux; T. Putterich; B. Geiger; A. Kappatou; A. Lebschy; C. Bruhn; M. Cavedon; A. Frank; N. den Harder; E. Viezzer; the ASDEX Upgrade Team Plasma Physics Controlled Fusion (60) (95007) (2018)

#### Access and sustainment of naturally ELM-free and small-ELM regimes

E. Viezzer Nuclear Fusion (58) (115002) (2018)

### Total ionizing dose effects on a delay-based Physical Unclonable Function implemented in FPGAs

H. Martin; P. Martin-Holgado; Y. Morilla; L. Entrena; E. San-Millan.

7. Producción Científica / Scientific Production

Radiation Tolerant Electronics (7) (163-174) (2018)

## Evaluation of the suitability of SIMD microprocessor extensions in radiation environments

H. Martin; P. Martin-Holgado; P. Peris-Lopez; Y. Morilla; L. Entrena Entropy (20(7)) (513-524) (2018)

### Evaluation of the suitability of NEON SIMD microprocessor extensions under proton irradiation

A. Lindoso; M. Garcia-Valderas; L. Entrena; Y. Morilla; P. Martin-Holgado IEEE Transactions on Nuclear Science (65 (8)) (1835-1842)

#### PTM-based hybrid error-detection architecture for ARM microprocessors

M. Peña-Fernandez; A. Lindoso; L. Entrena; M. Garcia-Valderas; S. Philippe; Y. Morilla; P. Martin-Holgado

Microelectronics Reliability (88-90) (925-930) (2018)

# Use of X-Ray Computed Tomography for ice detection applied to organ cryopreservation

A. Corral; R. Lopez; M. Balcerzyk; A. Parrado-Gallego; I. Fernandez-Gomez; A. Olmo; R. Risco

Biopreservation and Biobanking (Online) (2018)

# An optimized controlled rate slow cooling protocol for bovine ovarian tissue cryopreservation by means of X-ray computed tomography

A. Corral; M. Balcerzyk; M. Gallardo; Ch.A. Amorim; A. Parrado-Gallego; R. Risco Theriogenology (119) (183-188)

# Structural, optical and X-ray attenuation properties of $Tb^{3+}:Ba_xCe_{(1-x)}F_{(3-x)}$ (x=0.18-0.48) nanospheres synthesized in polyol medium

D. Gonzalez-Mancebo; A.I. Becerro; C. Genevois; M. Allix; A. Corral; A. Parrado; M. Ocaña Dalton

Transactions (47) (8382-8391)

# Room temperature synthesis of water-dispersible Ln<sup>3+</sup>:CeF<sub>3</sub> (Ln=Nd,Tb) nanoparticles with different morphology as bimodal probes for fluorescence and CT imaging

D. Gonzalez Mancebo; A.I. Becerro; T.C. Rojas; A. Olivencia; A. Corral; M. Balcerzyk; E. Cantelar; F. Cusso; M. Ocaña

Journal of Colloid and Interface Science (520) (134-144)

# Ovarian tissue cryopreservation by stepped vitrification and monitored by X-ray computed tomography

A. Corral; M. Clavero; M. Gallardo Molina; M. Balcerzyk; Ch. Amorim; A. Parrado-Gallego; M. Dolmas; F. Paulini; J. Morris; R. Risco Cryobiology (81) (17-26)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

# Technical characterization of the necklace of El Carambolo hoard (Camas; Seville; Spain)

I. Ortega-Feliu; S. Scrivano; B. Gomez-Tubio; F.J. Ager; M.L. de la Bandera; M.A. Respaldiza; A.D. Navarro; C. San Martin Microchemical Journal (139) (401-409) (2018)

# Characterization of glaze ceramics from the archaeological site of La Alcazaba; Almería (Spain)

I. Ortega-Feliu; B. Gomez-Tubio; Y. Caceres; M.A. Respaldiza Microchemical Journal (138) (72-81)

#### Presence of <sup>236</sup>U and <sup>239,240</sup>Pu in soils from Southern Hemisphere

S. Salmani-Ghabeshi; E.C hamizo; M. Christl; C. Miro; E. Pinilla-Gil; F. Cereceda-Balic Journal of Environmental Radioactivity (192) (478-484)

# Characterisation of the Fast-Ion Edge Resonant Transport Layer Induced by 3D Perturbative Fields in the ASDEX Upgrade Tokamak through Full Orbit Simulations

L. Sanchis; M. Garcia-Munoz; A. Snicker; D.A. Ryan; D Zarzoso; L. Chen; J. Galdon-Quiroga; M. Nocente; J.F. Rivero-Rodriguez; M. Rodriguez-Ramos; W. Suttrop; M.A. Van Zeeland; E. Viezzer; M. Willensdorfer; F. Zonca

Plasma Physics and Controlled Fusion (61) (14038) (2018)

# Rapid and Simplified Synthesis of [<sup>(18)</sup>F]Fluoromisonidazole and Its Use in Pet Imaging in an Experimental Model of Subarachnoid Hemorrhage

L. Fernandez-Maza; J.J. Egea-Guerrero; M. Balcerzyk; G. Civantos-Jubera; E. Gordillo-Escobar; A. Vilches-Arenas; I. Fernandez-Gomez; A. Parrado-Gallego; F. Murillo-Cabezas

Applied radiation and isotopes (132) (79-84) (2018)

#### Recent evolution of <sup>129</sup>I levels in the Nordic Seas and the North Atlantic Ocean

C. Vivo-Vilches; J.M Lopez-Gutierrez; R. Periañez; C. Marcinko; F. Le Moigne; P. McGinnity; J.I. Peruchena; M. Villa-Alfageme Science of the Total Environment (621) (376-386) (2018)

#### Challenges associated with radioactive particles in the environment

B. Salbu; V. Kaspharov; O.C.Lind; R.Garcia-Tenorio; M.P.Johanssen; D. Child; P. Roos; C. Sancho

Journal of Environmental Radioactivity (186) (101-115) (2018)

### <sup>210</sup>Po in foodstuffss consumed by the population of the South-West of Spain

I. Diaz-Frances; R.Garcia-Tenorio

Journal of Radiation and Nuclear Applications (3) (39-45) (2018)

# <sup>240</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu atom ratio as a fingerprint of local and tropospheric fallout due to events involving nuclear weapons: A review

7. Producción Científica / Scientific Production

R. Garcia-Tenorio Journal of Radiation and Nuclear Applications (3) (65-77) (2018)

#### Grey monazite (rare earths) mining in centre of Spain: Characterization and Preoperational radiological Evaluation

R. Garcia-Tenorio; G. Manjon; I. Vioque; M.C. Jimenez-Ramos; J. Mantero; I. Diaz Chemosphere (208) (691-697) (2018)

#### Radioactive content of gas mantles used in night food stalls and camping

C.D. Mandujano-Garcia; M. Sosa; M.A. Vallejo; J. Mantero; I. Vioque; G. Manjon; R. Garcia-Tenorio Journal of Radiation and Nuclear Applications (3) (127-134) (2018)

# <sup>7</sup>Be(n,p)<sup>7</sup>Li Reaction and the Cosmological Lithium Problem: Measurement of the Cross Section in a Wide Energy Range at n\_TOF at CERN

L. Damone; C. Guerrero; et al Physical Review Letters (121) (42701) (2018)

# Measurement and resonance analysis of the cross section at the CERN n\_TOF facility in the energy region from 10 to 300 keV

J. Praena; C. Guerrero; et al Physical Review C (97) (64603) (2018)

# Measurement and analysis of the neutron capture cross section at the n\_TOF facility at CERN

E. Mendoza; C. Guerrero; et al Physical Review C (97) (54616) (2018)

# Experimental setup and procedure for the measurement of the <sup>7</sup>Be(n,p)<sup>7</sup>Li reaction at n\_TOF

M. Barbagallo; C. Guerrero; et al Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators; Spectrometers; Detectors and Associated Equipment (887) (27-33) (2018)

# Radiative neutron capture on in the resonance region at the CERN n\_TOF-EAR1 facility

J. Lerendegui-Marco; C. Guerrero; et al Physical Review C (97) (24605) (2018)

# Characterization of the epithermal neutron field produced by P+<sup>7</sup>Li reaction in a tandem accelerator using a bonner sphere spectrometer

M. Romero-Exposito; S. Vinales; O. Ortega-Gelabert; B. Fernandez; P. Jimenez-Bonilla; J. Praena; C. Domingo

Radiation Protection Dosimetry (180) (80-84) (2018)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Interaction of <sup>8</sup>He with <sup>208</sup>Pb at near-barrier energies: <sup>4</sup>He and <sup>6</sup>He production

G. Marquinez-Duran; I. Martel; A. M. Sanchez-Benitez; L. Acosta; J. L. Aguado; R. Berjillos; A. R. Pinto; T. Garcia; J. A. Duenas; K. Rusek; N. Keeley; K. W. Kemper; M. A. G. Alvarez; M. J. G. Borge; A. Chbihi; C. Cruz; M. Cubero; J. P. Fernandez-Garcia; B. Fernandez-Martinez; J. L. Flores; J. Gomez-Camacho; J. A. Labrador; F. M. Marques; A. M. Moro; M. Mazzocco; A. Pakou V. V. Parkar; N. Patronis; V. Pesudo; D. Pierroutsakou; R. Raabe; R. Silvestri; N. Soic; L. Standylo; I. Strojek; O. Tengblad; R. Wolski; Z. Abou-Haidar

Physical Review C (98) (34615) (2018)

### An approach to establish a connection between algebraic and configuration spaces: su (v+1) algebraic model for vibrational excitations

M.M. Estevez-Fregoso; J.M. Arias; J. Gomez-Camacho; R. Lemus Molecular Physics (116) (2254-2269) (2018)

#### **Observations of core ion cyclotron emission on ASDEX Upgrade tokamak**

R. Ochoukov; V. Bobkov; B. Chapman ; R. Dendy; M. Dunne ; H. Faugel; M. Garcia-Muñoz ; B. Geiger; P. Hennequin ; K. G. McClements ; D. Moseev; S. Nielsen; J. Rasmussen ; P. Schneider; M. Weiland; J.-M. Noterdaeme ; ASDEX Upgrade Team; EUROfusion MST1 Team

Review of Scientific Instruments (89) (10J101) (2018)

### JET diagnostic enhancements testing and commissioning in preparation for DT scientific campaigns

J. Figueiredo ; A. Murari; C. Perez Von Thun; D. Marocco; M. Tardocchi; F. Belli; M. García Muñoz ; A. Silva ; T. Craciunescu ; P. Blanchard; I. Balboa; N. Hawkes; I. S. Carvalho; B. Tal; J. Bernardo; I. Zychor ; JET Contributors Review of Scientific Instruments (89) (10K119) (2018)

# 14 MeV calibration of JET neutron detectors-phase 1: calibration and characterization of the neutron source

P. Batistoni; S. Popovichev; A. Cufar; Z. Ghani; L. Giacomelli; S. Jednorog; A. Klix;
S. Lilley; E. Laszynska; S. Loreti; L. Packer; A. Peacock; M. Pillon; R. Price; M. Rebai;
D. Rigamonti; N. Roberts; M. Tardocchi; D. Thomas; JET Contributors
Nuclear Fusion (58) (26012) (2018)

# The effects of electron cyclotron heating and current drive on toroidal Alfvén eigenmodes in tokamak plasmas

S.E. Sharapov; M. Garcia-Munoz; M.A. Van Zeeland; B. Bobkov; I.G. J Classen; J. Ferreira; A. Figueiredo.; M. Fitzgerald; J. Galdon-Quiroga; D. Gallart; B. Geiger; J. Gonzalez-Martin; T. Johnson; P. Lauber; M. Mantsinen; F. Nabais; V. Nikolaeva; M. Rodriguez-Ramos; L. Sanchis-Sanchez; P.A. Schneider; A. Snicker; P Vallejos; the AUG Team; the EUROfusion MST1 Team11

Plasma Physics and Controlled Fusion (60) (14026) (2018)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Fusion product losses due to fishbone instabilities in deuterium JET plasmas

V.G. Kiptily; M. Fitzgerald; V. Goloborodko; S.E. Sharapov; C.D. Challis; D. Frigione; J. Graves; M.J. Mantsinen; P. Beaumont; M. Garcia Munoz; C. Perez von Thun; J.F.R. Rodriguez; D. Darrow; D. Keeling; D. King; K.G. McClements; E.R. Solano; S. Schmuck; G. Sips; G. Szepesi; JET Contributors Nuclear Fusion (58) (14003) (2018)

#### 7.2.2 Artículos NON ISI / NON ISI Articles

**Investigation of cluster states in** <sup>13</sup>B using the <sup>9</sup>Li-α resonant elastic scattering A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; M. Fisichella; M. Alcorta; M.J. Borge; T. Davinson; F. Ferrera; P. Figuera; A.M. Laird; M. Lattuada; A.C. Shotter; N. Soic; O. Tengblad; D. Torresi; M. Zadro Acta Physica Polonica B (48) (455-460) (2017)

#### Oxygen-15+ $\alpha$ resonant elastic scattering to study cluster states in <sup>19</sup>Ne

D. Torresi; C. Wheldon; T. Kokalova; S. Bailey; A. Boiano; C. Boiano; M. Cavallaro; S. Cherubini; A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; M. Fisichella; T.R. Glodariu; J. Grebosz; M. La Cognata; M. La Commara; M. Lattuada; M. Mazzocco; D. Mengoni; C. Parascandolo; D. Pierroutsakou; G. Pizzone; C. Signorini; C. Stefanini; L. Stroe; C. Spitaleri; E. Strano; M. Zadro

Journal of Physics: Conference Series (876) (12021) (2017)

## A new analysis procedure to extract fusion excitation function with large beam energy dispersions: application to the <sup>6</sup>Li+<sup>120</sup>Sn and <sup>7</sup>Li+<sup>119</sup>Sn

A. Di Pietro; P. Figuera; M. Fisichella; A. Shotter; J.P. Fernandez Garcia; J. Ferreira; M. Lattuada; P. Lotti; J. Lubian; Ch. Ruiz; D. Torresi; M. Zadro EPJ Web of Conferences (163) (14) (2017)

#### Reaction dynamics studies for the system <sup>7</sup>Be+<sup>208</sup>Pb at Coulomb barrier energies

M. Mazzocco; A. Boiano; C. Boiano; M. La Commara; C. Manea; C. Parascandolo; D. Pierroutsakou; E. Strano; D. Torresi; L. Acosta; P. Meo; J.P. Fernandez Garcia; T. Glodariu; J. Grebosz; A. Guglielmetti; G. Marquinez Duran; I. Martel; M. Nicoletto; A. Pakou; A.M. Sanchez Benitez; T. Sava; O. Sgouros; C. Signorini; F. Soramel; V. Soukeras; L. Stroe

EPJ Web of Conferences (163) (35) (2017)

## Scattering of halo nuclei on heavy targets at energies around the Coulomb barrier: The case of <sup>11</sup>Be on <sup>197</sup>Au

V. Pesudo; M.J. Borge; A.M. Moro; J.A. Lay; E. Nacher; J. Gomez Camacho; O. Tengblad; L. Acosta; M. Alcorta; M.A. Alvarez; C. Andreoiu; P.C. Bender; R. Braid; M. Cubero; A. Di Pietro; J.P. Fernandez Garcia; P. Figuera; M. Fisichella; B.R. Fulton; A.B. Garnsworthy; G. Hackman; U. Hager; O.S. Kirsebom; K. Kuhn; M. Lattuada; G. Marquinez Duran; I. Martel; D. Miller; M. Moukaddam; P.D. O Malley; A. Perea; M.M. Rajabali; A.M. Sanchez Benitez; F. Sarazin; V. Scuderi; C.E. Svensson; C. Unsworth; Z.M. Wang EPJ Web of Conferences (163) (45) (2017)

7. Producción Científica / Scientific Production

# Feasibility Study of a Proton Irradiation Facility for Radiobiological Measurements at an 18 MeV Cyclotron

A. Baratto-Roldan; M.C. Jimenez-Ramos; M.C. Battaglia; J. Garcia-Lopez; M.I. Gallardo; M.A. Cortes-Giraldo; J.M. Espino Instruments (2) (26) (2018)

#### Microstructural and magnetic characterization of Fe- and Ir-based multilayers

E. Arias-Egido; M.A. Laguna-Marco; C. Piquer; J. Chaboy; M. Avila; J. Garcia Lopez Physical Review Materials (2) (14402) (2018)

#### <sup>7</sup>Be and <sup>8</sup>B reaction dynamics at Coulomb barrier energies

E. Strano; M. Mazzocco; A. Boiano; C. Boiano; M. La Commara; C. Manea; C. Parascandolo; D. Pierroutsakou; C. Signorini; D. Torresi; H. Yamaguchi; D. Kahl; L. Acosta; P. Di Meo; J.P. Fernandez-Garcia; T. Glodariu; J. Grebosz; A. Guglielmetti; N. Imai; Y. Hirayama; H. Ishiyama; N. Iwasa; S.C. Jeong; H.M. Jia; N. Keeley; Y.H. Kim; S. Kimura; S. Kubono; J.A. Lay; C.J. Lin; G. Marquinez-Duran; I. Marte; H. Miyatake; M. Mukai; T. Nakao; M. Nicoletto; A. Pakou; K. Rusek; Y. Sakaguchi; A.M. Sanchez-Benitez; T. Sava; O. Sgouros; C. Stefanini; F. Soramel; V. Soukeras; E. Stiliaris; L. Stroe; T. Teranishi; N. Toniolo; Y. Wakabayashi; Y.X. Watanabe; L. Yang; Y.Y. Yang EPJ Web of Conferences (184) (2015) (2018)

# Experimental investigation of exotic clustering in <sup>13</sup>B and <sup>14</sup>C using the resonance scattering method

A. Di Pietro; J.P. Fernandez-Garcia; F. Ferrera; P. Figuera; M. Fisichella; M. Lattuada; S. Marletta; C. Marchetta; D. Torresi; M. Alcorta; M.J.G. Borge; T. Davinson; S. Heinitz;
A.M. Laird; A.C. Shotter; D. Schumann; N. Soic; O. Tengblad; M. Zadro
Journal of Physics: Conference Series (966) (12040) (2018)

### Reaction Dynamics for the Systems <sup>7</sup>Be, <sup>8</sup>B+<sup>208</sup>Pb at Coulomb Barrier Energies

M. Mazzocco; A. Boiano; C. Boiano; M. La Commara; C. Manea; C. Parascandolo; D. Pierroutsakou; C. Signorini; E. Strano; D. Torresi; H. Yamaguchi; D. Kahl; L. Acosta; P. Di Meo; J.P. Fernandez-Garcia; T. Glodariu; J. Grebosz; A. Guglielmetti; N. Imai; Y. Hirayama; H. Ishiyama; N. Iwasa; S.C. Jeong; H.M. Jia; N. Keeley; Y.H. Kim; S. Kimura; S. Kubono; J.A. Lay; C.J. Lin; G. Marquinez-Duran; I. Martel; H. Miyatake; M. Mukai; T. Nakao; M. Nicoletto; A. Pakou; K. Rusek; Y. Sakaguchi; A.M. Sanchez-Benitez; T. Sava; O. Sgouros; F. Soramel; V. Soukeras; E. Stiliaris; L. Stroe; T. Teranishi; N. Toniolo; Y. Wakabayashi; Y.X. Watanabe; L. Yang; Y.Y. Yang

Journal of Physics: Conference Series (1078) (12013) (2018)

# First measurements of a scintillator based fast-ion loss detector near the ASDEX Upgrade divertor

J. Gonzalez-Martin; J. Ayllon-Guerola; M. Garcia-Munoz; A. Herrmann; P. Leitenstern; P. De Marne; S. Zoletnik; A. Kovacsik; J. Galdon-Quiroga; J. Rivero-Rodriguez; M. Rodriguez-Ramos; L. Sanchis-Sanchez; J. Dominguez Review of Scientific Instruments (89) (10I106) (2018)

210

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### 7.2.3 Capítulos en libros / Chapters in books

Occupational, public and environmental radiological impact caused by the Phosphoric Acid industry; the case of Huelva (Spain)

Capítulo en el libro "Phosphoric acid: problems and solutions" (101-119) (2017)

J.L. Guerrero Marquez; F. Mosqueda Peña; J. Mantero; G. Manjon; R. Garcia Tenorio; J.P. Bolivar

978-953-51-3354-4

#### La Fusión Nuclear: Replicar la energía de las estrellas

Libro completo (2018) M. Garcia Munoz; M. Rodriguez-Ramos ISBN: 978-84-473-9263-6

7. Producción Científica / Scientific Production

### 7.3 Participación en Congresos / Meeting Participations

#### 7.3.1 Congresos Internacionales / International Meetings

**Conceptual design of a scintillator based Imaging Heavy Ion Beam** J. Galdon Quiroga et al 2<sup>nd</sup> European Conference on Plasma Diagnostics Burdeos (Francia) 18/04/2017 al 21/04/2017

# Impact of the fast ion flux and thermal plasma loads on the design of the ITER fast ion loss detector

M. Kocan; M. Garcia Munoz; J. Ayllon Guerola; L. Bertalot; Y. Bonnet; N. Casal; J. Galdon; J. Garcia Lopez; T. Giacomin; J. Gonzalez Martin; J.P. Gunn; M. Rodriguez Ramos; R. Reichle; J.F. Rivero Rodriguez; L. Sanchis Sanchez; G. Vayakis; E. Veshchev; C. Vorpahl; M. Walsh; R. Walton

2<sup>nd</sup> European Conference on Plasma Diagnostics Burdeos (Francia) 18/04/2017 al 21/04/2017

# Bioaccumulation of metals in animmal's bones in the SW of Spain. First results using PIXE technique in Copper Age samples

E. Garcia Viñas Encontro de Zooarqueologia Ibérica Faro (Portugal) 26/04/2017 al 28/04/2017

#### Marine environmental radioactivity off Namibia's coast

M. Rozmaric; D.C. Louw; I. Osvath; O. Blinova; I. Levy; M.K. Pham; P. McGinnity; M. Fujak; J. Bartocci; S.B. Mudumbi; T.K.S. Kahunda; K. Grobler; E. Chamizo; M. Lopez Lora; J.M. Lopez Gutierrez; R. Garcia Tenorio; Lj. Benedik

4<sup>th</sup> International Conference on Environmental Radioactivity: Radionuclides as Tracers of Environmental Processes Vilnius (Lituania)

29/05/2017 al 02/06/2017

# Radiological evaluation associated to the mining and concentration of monazite in Central Spain

R. Garcia Tenorio; G. Manjon; I. Diaz; I. Vioque; J. Galvan; J. Mantero 4<sup>th</sup> International Conference on Environmental Radioactivity: Radionuclides as Tracers of Environmental Processes Vilnius (Lituania) 29/05/2017 al 02/06/2017

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

# Uranium concentrations in NORM efflorescences formed in a phosphogypsum legacy site determined by PIXE

M.C. Jimenez Ramos; I. Ortega Feliu; J.P. Bolivar; R. Garcia Tenorio

4<sup>th</sup> International Conference on Environmental Radioactivity: Radionuclides as Tracers of Environmental Processes Vilnius (Lituania) 29/05/2017 al 02/06/2017

#### <sup>210</sup>Po determination in sandy soils by alpha particle spectrometry

C. Brañobre; I. Diaz Frances; A. Noguera; H. Bentos; L. Formaro; G. Manjon; R.Garcia Tenorio

4<sup>th</sup> International Conference on Environmental Radioactivity: Radionuclides as Tracers of Environmental Processes Vilnius (Lituania)

29/05/2017 al 02/06/2017

#### On the radionuclide distribution in selected sediment cores from the Baltic Sea

M. Eriksson; G. Olszewski; P. Lindahl; P. Andersson; E. Chamizo; R. Garcia Tenorio 4th International Conference on Environmental Radioactivity: Radionuclides as Tracers of Environmental Processes Vilnius (Lituania) 29/05/2017 al 02/06/2017

### Radiochemical treatment of concrete samples from a nuclear reactor bioshield for <sup>41</sup>Ca AMS measurement at CNA Seville (Spain)

C. Vivo Vilches; J.M. Lopez Gutierrez; M. Garcia-Leon; C. Vockenhuber; J.L. Leganes 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

# Factors related to <sup>41</sup>K interference on <sup>41</sup>Ca AMS measurements and potassium minimization techniques

C. Vivo Vilches; J.M. Lopez Gutierrez; M. Garcia-Leon; C. Vockenhuber 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

#### Actinides measurement with He stripping at the Centro Nacional de Aceleradores

E. Chamizo; M. Lopez Lora 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

### A first transect of <sup>236</sup>U at the Equatorial Pacific

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

E. Chamizo; M. Villa Alfageme; M. Lopez Lora; N. Casacuberta; T. Kenna P. Masque; M. Christl 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

# Isolation of <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and <sup>239,240</sup>Pu from seawater samples for AMS analysis at the Centro Nacional de Aceleradores

M. Lopez Lora; I. Levy; E. Chamizo 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

# Temporal evolution of <sup>236</sup>U, <sup>237</sup>Np and Pu isotopes in the Northwest Mediterranean Sea (2001-2013)

M. Lopez Lora; E. Chamizo; I. Levy; M. Bressac; J.J. La Rosa; P.P. Povinec; J. Gastaud; B. Oregioni; M. Garcia Leon 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

#### <sup>10</sup>Be AMS with passive absorbers at SARA and VERA at 2.4 MeV beam energy

G. Scognamiglio; J. Lachner; E. Chamizo; J.M. Lopez Gutierrez; A. Priller 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

# Recycling of subducted sediments at the Southern Andes studied by AMS measurements of <sup>10</sup>Be concentrations

D. Rodrigues; A. Arazi; E. Chamizo; D. Fracchia; J.M. Lopez Gutierrez; S. Padilla 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

# Determination of <sup>241,243</sup>Am and <sup>239,240</sup>Pu in nuclear residues at the Centro Nacional de Aceleradores

J.M. Lopez Gutierrez; E. Chamizo; J.M. Torres 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

#### <sup>129</sup>I concentrations in a transect from the Labrador Sea to the North-eastern Atlantic

J.M. Lopez Gutierrez; E. Ceballos Romero; M. Stinchcombe; M. Villa Alfageme 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### 14/08/2017 al 18/08/2017

#### <sup>129</sup>I concentrations in the Southern Hemisphere

J.M. Lopez Gutierrez; M. Villa Alfageme; E. Ceballos; T. Kenna 14<sup>th</sup> International conference on Accelerator Mass Spectrometry Ottawa (Canada) 14/08/2017 al 18/08/2017

# Transuranic signals in snails collected at the contaminated terrestrial site of Palomares (Spain)

I. Vioque; R. Garcia Tenorio; B. Salbu; O.C. Lind
 4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental radioactivity (ICRER)
 Berlin (Alemania)
 03/09/2017 al 08/09/2017

## Distribution of NORM radionuclides in a water column profile from a pit lake in Sweden

J. Mantero; R. Thomas; M. Isaksson; C. Raaf; S. Perez Moreno; E. Forsell Aronsson; E. Holm; R. Garcia Tenorio

4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental radioactivity (ICRER) Berlin (Alemania)

03/09/2017 al 08/09/2017

### Micro and nanoanalytical techniques to analyze retention of radioactive particles in environmental matrices

O.C. Lind; J. Brede; K. Janssens; O. Jaroszewic; R. Garcia Tenorio; I. Vioque; S. Cagno; B. Salbu 4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental radioactivity (ICRER) Berlin (Alemania)

03/09/2017 al 08/09/2017

#### Radioactive particle abiotic transformation processes

J. Galvan; O.C. Lind; P. Kozin; R. Garcia Tenorio; B. Salbu 4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental radioactivity (ICRER) Berlin (Alemania) 03/09/2017 al 08/09/2017

# Mesurement of NORM pollution in a coastal-marine ecosystem from southern Gulf of Mexico

C.D. Mandujano; J. Maldonado; M.T. Herrera; A.R. Nava; E.A. Garcia Cordovca; I. Diaz Frances; J. Mantero; P. Ardisson; R. Garcia Tenorio

4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental radioactivity (ICRER) Berlin (Alemania)

03/09/2017 al 08/09/2017

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Reconnection & fast particle production in tokamak & solar plasmas

K.G. McClements et al 15<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting Budapest (Hungria) 04/09/2017 al 08/09/2017

### Experimental evidence of beam ion acceleration during ELMs in the ASDEX Upgrade tokamak

J. Galdon Quiroga et al 15<sup>th</sup> IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems Princeton (EE.UU) 05/09/2017 al 08/09/2017

#### Access and sustainment of naturally ELM-free and small-ELM regimes

E. Viezzer 16<sup>th</sup> International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers San Petersburgo (Rusia) 13/09/2017 al 15/09/2017

## Selective Targeting of ice by magnetic ice binding particles to prevent recrystalization in vitrified tissues and organs

R. Risco; A. Olmo; A. Corral; M. Balcercyk; P. Barroso Society for Low Temperature Biology Cambridge (Reino Unido) 19/09/2017 al 20/09/2017

### Utilization of a new freezing protocol containing a higher DMSO concentration to cryopreserve human ovarian tissue

M. Gallard; F. Paulini; A. Corral; M. Balcerzyk; C.M. Lucci; M. Merola; A. Gallego; M. Dolmans; R. Risco; C.A Amorim Society for Low Temperature Biology Cambridge (Reino Unido) 19/09/2017 al 20/09/2017

#### Tissue and organ cryopreservation by means of X-ray computed tomography

A. Corral; M. Balcerzyk; A. Olmo; P. Acosta; C.A. Amorim; A. Parrado Gallego; R. Risco Society for Low Temperature Biology Cambridge (Reino Unido) 19/09/2017 al 20/09/2017

### Radioecological implications of the presence of radioactive particles in NORM raw materials and NORM wastes

R. Garcia Tenorio EU-NORM 2017 Londres (Reino Unido)
7. Producción Científica / Scientific Production

#### 02/10/2017 al 05/10/2017

### Environmental NORM Impact due to Acid Mining Drainagein the Iberian Pyrite Belt (South of Spain): A Comparison between Controlled and not Controlled Situations

G. Manjon; I. Diaz Frances; I. Vioque; J. Galvan; J. Mantero; R. Garcia Tenorio EU-NORM 2017 Londres (Reino Unido) 02/10/2017 al 05/10/2017

# Assessment of naturally occurring radionuclides in marine biota affected by NORM discharges in the southern Gulf of Mexico

C.D. Mandujano Garcia; R. Garcia Tenorio; G. Manjon; M.T. Herrera Dorantes; J. Maldonado Sanchez; A.R. Nava Huerta; P.L. Ardisson EU-NORM 2017 Londres (Reino Unido) 02/10/2017 al 05/10/2017

#### Depth profiling of C and <sup>3</sup>He implanted in nanostructured W film

F.J. Ferrer; M.C. Jimenez Ramos; J. Garcia Lopez; N. Gordillo; R. Gonzalez Arrabal; M. Panizo Laiz; J.M. Perlado
23<sup>rd</sup> International Conference on Ion Beam Analysis
Shanghai (China)
08/10/2017 al 13/10/2017

#### Charge collection efficiency of Silicon Lithium detectors for charged particles

M.C. Jimenez Ramos; R.H. Figuera; F.J. Ferrer; J. Garcia Lopez 23<sup>rd</sup> International Conference on Ion Beam Analysis Shanghai (China) 08/10/2017 al 13/10/2017

# [<sup>18</sup>F] Fluoride retention and elution in a sax microcrtridge included in a lab-on-chip for radiopharmaceuticals

L. Fernandez Maza; B. Salvador; A. Corral; D. Orta Castello; I. Fernandez Gomez; A. Luque; J.M. Quero Reboul 30<sup>th</sup> Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine- EANM´17 Viena (Austria) 21/10/2017 al 25/10/2017

# Evaluation of the suitability of SIMD microprocessor extensions in radiation environments

A. Lindoso; M. Garcia Valderas; L. Entrena; Y. Morilla; P. Martin Radiation and its Effects on Components and Systems (2017 RADECS) Ginebra (Suiza) 02/11/2017 al 11/11/2017

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Farmer chamber response to different filter box and surrounding configurations

P. Martin Holgado; Y. Morilla; M. Dominguez; G. Fernandez Radiation and its Effects on Components and Systems (2017 RADECS) Ginebra (Suiza) 02/11/2017 al 11/11/2017

#### Microfluidic reactor in a PDMS chip for [<sup>18</sup>F]F-radiopharmaceuticals

L. Fernandez-Maza; B. Salvador; D. Orta-Castello; A. Corral; I. Fernandez-Gomez; A. Luque; J.M. Quero-Reboul 19<sup>th</sup> European Symposium on Radiopharmacy and Radiopharmaceuticals (ESRR´18) Groninga (Países Bajos) 05/04/2018 al 08/04/2018

### A rotary and reciprocating scintillator based fast-ion loss detector for the MAST-U tokamak

J.F. Rivero-Rodriguez; M. Garcia-Munoz; R. Martin; J. Galdon-Quiroga; J. Ayllon-Guerola; R.J. Akers; J. Buchanan; D. Croft; D. Garcia-Vallejo; J. Gonzalez-Martin; D. Harvey; K.G. McClements; M. Rodriguez Ramos; L. Sanchis 22<sup>nd</sup> Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics San Diego (EEUU) 16/04/2018 al 19/04/2018

# First measurements of a scintillator based fast-ion loss detector near the ASDEX Upgrade divertor

J. Gonzalez-Martin; J. Ayllon-Guerola; M. Garcia-Munoz; A. Herrmann; P. Leitenstern; P. De Marne; S. Zoletnik; A. Kovacsik; J. Galdon-Quiroga; J. Rivero-Rodriguez; M. Rodriguez-Ramos; L. Sanchis-Sanchez; J. Dominguez

22<sup>nd</sup> Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics San Diego (EEUU) 16/04/2018 al 19/04/2018

#### Contribution of Small Facilities to the study of Nuclear Reactions

F.J. Ferrer; J. Gomez-Camacho ENSAR2 Town Meeting Groningen (Holanda) 17/04/2018 al 19/04/2018

# Characterization of radioactive particles generated in low-yield atmospheric weapon tests

I. Vioque; R. Garcia-Tenorio; E. Chamizo; J. Galvan; M.C. Jimenez-Ramos 18<sup>th</sup> Radiochemical Conference Marianske Lazne (Republica Checa) 13/05/2018 al 18/05/2018

7. Producción Científica / Scientific Production

#### La Inmaculada (Tota Pulchra) under examination by XRF and other Techniques

A. Kriznar 7<sup>th</sup> Meeting 'X-ray and other techniques in investigations of the objects of cultural heritage' Cracovia (Polonia) 17/05/2018 al 19/05/2018

# Study of breakup channles for the <sup>6</sup>He+<sup>64</sup>Zn reaction at energies around the Coulomb barrier

J.P. Fernandez-Garcia Direct Reaction with Exotic Beams (DREB) Matsue (Japon) 25/05/2018 al 03/06/2018

# Development of a radiobiology beam line at the 18 MeV proton cyclotron facility at CNA

Anna Baratto-Roldán 2<sup>nd</sup> OMA Topical Workshop on Diagnostics for Beam and Patient Monitoring Ginebra (Suiza) 04/06/2018 al 05/06/2018

#### Key ion transport mechanisms in the pedestal of ASDEX Upgrade

E. Viezzer International Congress on Plasma Physics Vancouver (Canada) 04/06/2018 al 08/06/2018

# Development and installation of a scintillator based detector for fast-ion losses in the MAST-U tokamak

J.F. Rivero-Rodriguez; M. Garcia-Munoz; L. Sanchis; R. Martin; K.G. McClements; R.J. Akers; A. Snicker; J. Ayllon-Guerola; J. Buchanan; P. Cano-Megias; J. Galdon-Quiroga; D. Garcia-Vallejo and J. Gonzalez-Martin 45<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics Praga (Republica Checa) 02/07/2018 al 06/07/2018

Acceleration of beam ions during edge localized modes in the ASDEX Upgrade tokamak J. Galdon Quiroga 45<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics Praga (Republica Checa) 02/07/2018 al 06/07/2018

# Fast-Ion Edge Resonant Transport Layer Induced by Externally Applied 3D Fields in the ASDEX Upgrade Tokamak

L. Sanchis Sanchez

7. Producción Científica / Scientific Production

45<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics Praga (Republica Checa) 02/07/2018 al 06/07/2018

# Non-Linear 3D Hybrid Kinetic-MHD Simulations of Alfven Eigenmodes in the ASDEX Upgrade Tokamak

J. Gonzalez-Martin; M. Garcia-Munoz; Y. Todo; S. E. Sharapov; M. Dunne; V. Igochine; R. Fischer; P. Oyola; L. Sanchis-Sanchez; A. Jacobsen; E. Viezzer; J. Ayllon-Guerola; J. Galdon-Quiroga; J. Rivero-Rodriguez; J. Dominguez-Palacios; M. Rodriguez-Ramos; J. Dominguez-Abascal 45<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics Praga (Republica Checa)

02/07/2018 al 06/07/2018

#### Requirements for an imaging heavy ion beam probe at ASDEX upgrade

G. Birkenmeier; J. Galdon-Quiroga; V. Olevskaia; M. Dunne; J.F. Rivero-Rodriguez; M. Garcia-Munoz; M. Griener; G.F. Harrer; N. Leuthold; E. Wolfrum
45<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics
Praga (Republica Checa)
02/07/2018 al 06/07/2018

#### Impact of ECCD on Alfven eigenmodes in the TJ-II stellarator

A. Cappa; D. Lopez-Bruna; J.L. Velasco; A. Gonzalez-Jerez; J.M. Garcia Regaña; M. Ochando; S. Yamamoto; M. Liniers; E. Ascasibar; F. Castejon; J.M. Fontdecaba; F. Medina; M. Garcia Muñoz; N. Marushchenko
45<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics
Praga (Republica Checa)
02/07/2018 al 06/07/2018

# Progress of CNA to become the Spanish facility for combined irradiation testing in aerospace

Y. Morilla; P. Martin-Holgado; A. Romero; J.A. Labrador; B. Fernandez; J. Praena; A. Lindoso; Mario García-Valderas; M. Peña-Fernandez; L. Entrena
RADECS2018
Gothenburg (Suecia)
16/09/2018 al 21/09/2018

#### Error detection through trace infrastructure in ARM microprocessors

M. Peña-Fernandez; A. Lindoso; L. Entrena; M. Garcia-Valderas; Y. Morilla; P. Martin-Holgado RADECS2018 Gothenburg (Suecia) 16/09/2018 al 21/09/2018

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

# Non-intrusive automatic compiler-guided reliability improvement of embedded applications under proton irradiation

A. Serrano-Cases; Y. Morilla; P. Martin-Holgado; S. Cuenca-Asensi; A. Martinez-Alvarez RADECS2018 Gothenburg (Suecia) 16/09/2018 al 21/09/2018

#### PTM-based hybrid error-detection architecture for ARM microprocessors

M. Peña-Fernandez; A. Lindoso; L. Entrena; M. Garcia-Valderas; Y. Morilla; P. Martin-Holgado ESREF2018 Aalborg (Dinamarca) 01/10/2018 al 05/10/2018

#### Research highlights in the CNA 3 MV tandem accelerator

J. Garcia Lopez 2<sup>nd</sup> ENSAF Workshop Atenas (Grecia) 03/10/2018 al 04/10/2018

### Stepped vitrification procedure to cryopreserve human ovarian tissue: we are not there yet

E.C.R. Leonel; M. Dolmans; A. Corral; R. Risco; P. Kilbridge; M. Vazquez; J. Morris; Ch.A. Amorim 54<sup>th</sup> SLTB Scientific Conference (2018) Praga (Republica Checa) 06/10/2018 al 08/10/2018

### New perspectives of ovarian tissue cryopreservation by means of X-ray computed tomography

A. Corral; N. Martinez; E.C.R. Leonel; A. Parrado-Parrado; M. Balcerzyk; Ch.A. Amorim;
R. Risco
54<sup>th</sup> SLTB Scientific Conference (2018)
Praga (Republica Checa)
06/10/2018 al 08/10/2018

Palladium presence in gold earrings from Punic jewellery (Cádiz; Spain): Advances in the gold trading routes M.A. Respaldiza 14<sup>th</sup> International Symposium on Radiation Physics Cordoba (Argentina) 07/10/2018 al 11/10/2018

#### Study and comparison of two gold hoards of the Bronze Age in the Iberian Peninsula: The treasure of Villena and Cabezo Redondo

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

M.A. Respaldiza 14<sup>th</sup> International Symposium on Radiation Physics Cordoba (Argentina) 07/10/2018 al 11/10/2018

# Cultural Heritage Science at CNA (Seville; Spain): applications of XRF and IBA techniques to art and archaeological objects

M.A. Respaldiza 14<sup>th</sup> International Symposium on Radiation Physics Cordoba (Argentina) 07/10/2018 al 11/10/2018

# Study of two large dimension Murillo's paintings by means of Macro X-ray fluorescence (MA-XRF) imaging; point XRF analysis and stratigraphic studies

A. Kriznar European Conference on X-Ray Spectrometry; EXRS-2018 Ljubljana (Eslovenia) 07/10/2018 al 11/10/2018

#### Analysis of Pu isotopes and Np-237 in seawater by AMS

I. Levy; E. Chamizo; M. Lopez-Lora; M. Bressac NKS-B RadWorkshop 2018: Workshop on Radioanalytical Chemistry for Nuclear Decommissioning and Waste Management Roskilde (Dinamarca) 08/10/2018 al 12/10/2018

### Scientific study of the bozzetto of Murillo's painting "Moses and the water from the rock of Horeb"

M.A. Respaldiza Non Destructive Techniques for Cultural Heritage Buenos Aires (Argentina) 12/10/2018

#### Energy and momentum transport in the pedestal of ASDEX Upgrade

E. Viezzer et al Atomic Energy Agency Fusion Energy Conference Ahmedabad (India) 22/10/2018 al 27/10/2018

# Impact of an Edge Resonant Transport Layer on fast-ion confinement in the ASDEX Upgrade tokamak

J. Galdon Quiroga International Atomic Energy Agency Fusion Energy Conference Ahmedabad (India) 22/10/2018 al 27/10/2018

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

# High intensity emitting Eu<sup>3+</sup>;Bi<sup>3+</sup>:LaF<sub>3</sub> nanoparticles for luminescence bioimaging and X-ray computed tomography

A.I. Becerro; D. Gonzalez Mancebo; A. Corral; M. Balzercyk; M. Ocaña NanoMedicine International Conference and Exhibition 2018 Venecia (Italia) 23/10/2018 al 25/10/2018

# Microdosimetry-based dose-averaged linear energy transfer calculation for clinical proton beams: a Monte Carlo study with Geant4-DNA

Anna Baratto-Roldan 3rd Geant4 International User Conference Bordeaux (Francia) 29/10/2018 al 31/10/2018

#### Plutonium isotopic composition and concentrations in east Atlantic surface waters

M. Eriksson; I. Levy; E. Chamizo; J. Gastaud; K. Ammala; J. Scholten SPERA conference 2018 Perth (Australia) 06/11/2018 al 09/11/2018

#### Recent studies at the three irradiation facilities from CNA and the coming upgrade

P. Martin-Holgado; Y. Morilla
SERESSA2018
Noordwijk (Holanda)
12/11/2018 al 16/11/2018
Geant4 simulation and validation of the CNA cyclotron beam parameters
Anna Baratto-Roldan
3rd OMA Topical Workshop on Accelerator Design and Diagnostics
Darmstadt (Alemania)
11/12/2018 al 12/12/2018

#### 7.3.2 Congresos Nacionales / National Meetings

# Integrated anion-exchange cartridge for [<sup>18</sup>F]F<sup>-</sup> preconcentration in a PDMS radiopharmacy chip

B. Salvador; A. Luque; A. Corral; D. Orta; I. Fernandez; L. Fernandez; J.M. Queros 11<sup>th</sup> Spanish Conference on Electron Devices, 2017 Barcelona (España) 08/02/2017 al 10/02/2017

#### **CNA facility for testing electronics**

Y. Morilla RADFAC2017 Sevilla (España) 30/03/2017

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### The FILD instrument function: signal estimates for ITER

J. Galdon Quiroga et al 18<sup>th</sup> Meeting of ITPA Topical Group on Energetic Particles Sevilla (España) 26/04/2017 al 28/04/2017

#### Technical characterization of the necklace of El Carambolo treasure

I. Ortega Feliu
 Non-destructive and microanalytical techniques in Art and Cultural Heritage
 Bilbao (España)
 02/05/2017 al 06/05/2017

### Characterization of glaze ceramics from the archaeological site of "La Alcazaba", Almería (Spain)

I. Ortega Feliu
 Non-destructive and microanalytical techniques in Art and Cultural Heritage
 Bilbao (España)
 02/05/2017 al 06/05/2017

#### X-ray Computed Tomography applied to tissue and organ cryopreservation

 A. Corral; M. Balcerzyk; A. Olmo; P. Acosta; Ch. Amorim; A. Parrado Gallego; R. Risco International Longevity and Cryopreservation Summit Madrid (España)
 26/05/2017 al 30/05/2017

#### X-Ray Computed Tomography and Inductive Nano-Warming of Magnetic Ice Binding Proteins as Key Tools for Organ Cryopreservation

A. Olmo; A. Corral; P. Barroso; R. Risco International Longevity and Cryopreservation Summit Madrid (España) 26/05/2017 al 30/05/2017

# Estudio de la estructura de clúster <sup>9</sup>Li-<sup>4</sup>He del núcleo <sup>13</sup>B usando el método de dispersión resonante

J.P. Fernandez XXXVI Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física Santiago de Compostela (España) 17/07/2017 al 21/07/2017

#### Medidas de <sup>41</sup>Ca en el blindaje primario de la central José Cabrera en el Centro Nacional de Aceleradores (Sevilla)

C. Vivo Vilches; J.M. Lopez Gutierrez; C. Vockenhuber 43ª Reunión Anual SNE Málaga (España) 04/10/2017 al 06/10/2017

7. Producción Científica / Scientific Production

#### <sup>41</sup>Ca measurements on the primary shield of José Cabrera Nuclear Power Plant

C. Vivo Vilches; J.M. Lopez Gutierrez; M. Garcia-Leon; J.L. Leganes IX Jornadas CPAN - Encuentros de Física Nuclear Santander (España) 23/10/2017 al 25/10/2017

#### Monitor de energía de haz de partículas ionizantes basado en emisión de color

F.J. Ferrer; J. Gil Rostra; J.P. Espinos; A.R. Gonzalez Elipe; F. Yubero IX Jornadas CPAN - Encuentros de Física Nuclear Santander (España) 23/10/2017 al 25/10/2017

#### Transferencia de Tecnología en el CNA: RadLab, Ensayos de Irradiación

P. Martin Holgado; Y. Morilla IX Jornadas CPAN - Encuentros de Física Nuclear Santander (España) 23/10/2017 al 25/10/2017

### Análisis mediante EDXRF y GRT de las aleaciones de denarios romanos de plata del

**"Tesoro de Lliria" (s. II d.C.)** B. Gomez Tubio XII Congreso Ibérico de Arqueometría Burgos (España) 25/10/2017 al 28/10/2017

# Análisis PIXE en muestras óseas subfósiles. Bioacumulación de metales pesados en la paleodesembocadura del Guadalquivir durante la Prehistoria reciente

E. Garcia Viñas XII Congreso Ibérico de Arqueometría Burgos (España) 25/10/2017 al 28/10/2017

# Aceleradores de Partículas en España: Centro Nacional de Aceleradores. Cultura Científica para y con la Sociedad

S.D. Leon Dueñas; I. Diaz Frances; C. Falcon Carrero; J.A. Galvan Moreno; J. Castilla Guerra III Foro Iberoamericano de divulgación y cultura científica Cordoba (España) 25/11/2017

# Determinación del Impacto social frente al Impacto científico: Definición del Parámetro de Impacto del Paper Científico (PIPC) y su aplicación al caso de estudio del Centro Nacional de Aceleradores

S.D. Leon Dueñas; C. Barrio Alonso III Foro Iberoamericano de divulgación y cultura científica

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

Cordoba (España) 25/11/2017

#### Radiofármacos PET de Investigación en Centro Nacional Aceleradores

L. Fernandez Maza XXV Jornadas SAMN Cadiz (España) 09/03/2018 al 10/03/2018

### Preparation and characterization of a radiobiology beam-line at the 18 MeV proton cyclotron facility at CNA

A. Baratto-Roldan Segundo Workshop Español de Protonterapia Sevilla (España) 15/03/2018 al 16/03/2018

#### Production yields of $\beta^+$ emitters for range verification in proton therapy

M.T. Rodriguez Gonzalez II Jornadas de Física Médica, RSEF-IFIMED Madrid (España) 14/06/2018 al 15/06/2018

# Proton RBE at low energies: preparation of a new radiobiology beam line at the 18 MeV proton cyclotron facility at CNA

A. Baratto-Roldan II Jornadas de Física Médica, RSEF-IFIMED Madrid (España) 14/06/2018 al 15/06/2018

# Measurement of the production cross sections of beta+ emitters for range verification in proton therapy

M.T. Rodriguez Gonzalez Rábida 18: International Scientific Meeting on Nuclear Physics Huelva (España) 18/06/2018 al 22/06/2018

# Development of a new radiobiology beam line for the study of proton RBE at the 18 MeV proton cyclotron facility at CNA

A. Baratto-Roldan Rábida 18: International Scientific Meeting on Nuclear Physics Huelva (España) 18/06/2018 al 22/06/2018

#### Neutron radiography at CNA

M.A. Millan Callado

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

Rábida 18: International Scientific Meeting on Nuclear Physics Huelva (España) 18/06/2018 al 22/06/2018

# Uniform Ln3+:CeF3 (Ln= Nd; Tb) nanoparticles synthesized in polyol media as bimodal bioprobes for fluorescence and CT bio-imaging

A.I. Becerro; D. Gonzalez-Mancebo; T.C. Rojas; A. Corral; M. Balcerzyk; E. Cantelar; F. Cusso; M. Ocaña
3<sup>rd</sup> International Conference on Polyol Mediated Synthesis (PMS)
Madrid (España)
25/06/2018 al 28/06/2018

# Micro emulsion mediated synthesis and properties of uniform Eu:CaWO4 Nano phosphors for optical and CT imaging

M. Ocaña; M. Laguna; N.O. Nuñez; A. Corral; A. Parrado-Gallego; M. Balcerzyk; D. Gonzalez-Mancebo; A.I. Becerro
 2<sup>nd</sup> World Chemistry Conference and Exhibition (WCCE)
 Valencia (España)
 09/07/2018 al 11/07/2018

# Micro emulsion mediated synthesis and properties of uniform Eu:CaWO4 Nano phosphors for optical and CT imaging

M. Ocaña; M. Laguna; N.O. Nuñez; A. Corral; A; Parrado-Gallego; M. Balcerzyk 2<sup>nd</sup> World Chemistry Conference and Exhibition Valencia (España) 10/07/2018

#### Towards new protocols of ovarian tissue cryopreservation assisted by X-ray Computed Tomography

A. Corral; N. Ramírez; Ch.A. Amorim; A. Parrado; M. Balcerzyk; R. Risco The 55<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Society for Cryobiology; CRYO 2018 Madrid (España) 10/07/2018 al 13/07/2018

#### The equilibrium vitrification technique for human ovarian tissue cryopreservation

E.C.R. Leonel; A. Corral; R. Risco; S.R. Taboga; M. Dolmans; Ch.A. Amorim The 55<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Society for Cryobiology; CRYO 2018 Madrid (España) 10/07/2018 al 13/07/2018

# Rewarming of cryopreserved C. elegans by induction heating with alternating magnetic fields

S. Rodrigo; P. Nuñez; M. Caño; M. Lobo; D. Barranco; A. Corral; R. Risco The 55nd Annual Meeting of the Society for Cryobiology; CRYO 2018 Madrid (España)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

10/07/2018 al 13/07/2018

#### Main Parametric Dependencies of the Fast-Ion Edge Resonant Transport Layer Induced by 3D Perturbative Fields in the ASDEX Upgrade Tokamak

L. Sanchis Sanchez 23<sup>rd</sup> Joint EU-US Transport Task Force Meeting Sevilla (España) 11/09/2018 al 14/09/2018

#### Estudio de dos pinturas de grandes dimensiones de Murillo mediante imágenes de Macrofluorescencia de rayos X (MA-XRF); análisis puntales por XRF y estudios estratigráficos y multiespectrales

M.A. Respaldiza Congreso "La Ciencia y el Arte VII: Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del Patrimonio" Madrid (España) 24/10/2018 al 26/10/2018

#### Aplicaciones en Patrimonio Cultural en el CNA

M.A. Respaldiza X Jornadas CPAN Salamanca (España) 29/10/2018 al 31/10/2018

#### Caracterización por técnicas IBA de blancos de reacciones nucleares

F.J. Ferrer; B. Fernandez-Martinez; J. Praena; J.P. Fernandez-Garcia; V. Godinho; P. Torres; A. Fernandez-Camacho; J. Gomez-Camacho
X Jornadas CPAN
Salamanca (España)
29/10/2018 al 31/10/2018

#### Nanopartículas de lantánidos para imagen multimodal. Biodistribución en ratón por MicroPET y NanoCT

L. Fernandez Maza; A. Corral; A.I. Becerro; D. Gonzalez Mancebo; A. Parrado; M. Balcerzyk; M. Ocaña X Jornadas CPAN Salamanca (España) 29/10/2018 al 31/10/2018

#### The new pulsed neutron beam facility at CNA (Spain)

M. Macias Martinez X Jornadas CPAN Salamanca (España) 29/10/2018 al 31/10/2018

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

#### Laser-driven neutrons for time-of-flight experiments

M.A. Millan Callado X Jornadas CPAN Salamanca (España) 29/10/2018 al 31/10/2018

#### Recent studies at the three CNA irradiation facilities and coming upgrade

P. Martin-Holgado; Y. Morilla; R. Garcia-Tenorio X Jornadas CPAN
Salamanca (España)
29/10/2018 al 31/10/2018

#### Actinides measurements by Accelerator Mass Spectrometry at the CNA

M. Lopez-Lora; E. Chamizo I Meeting of Tordesillas Doctoral School in Physics Granada (España) 11/11/2018 al 13/11/2018

#### Silicon photomultipliers for determining position of microfluidic radioactive simples

B. Salvador; D. Escalante; L. Fernandez; A. Corral; S. Camacho; J.M. Quero; A. Luque
12th Spanish Conference on Electron Devices (CED 2018)
Salamanca (España)
14/11/2018 al 18/11/2018

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

# 7.4 Tesis Doctorales y Trabajos Fin de Máster / Theses and Final Master Projects

#### 7.4.1 Tesis Doctorales / Theses

Optimization of <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al detection with low-energy accelerator mass spectrometry

G. Scognamiglio Directores: J.M. Lopez Gutierrez; E. Chamizo viernes, 07 de julio de 2017

#### Dosimetry studies for radiation therapy with photons and radiobiology using lowenergy protons

M. Cristina Battaglia Directores: J.M. Espino Navas; M.I. Gallardo Fuentes; D. Schardt viernes, 15 de septiembre de 2017

# Calibración absoluta y aplicación de los detectores de pérdidas de iones rápidos basados en materiales centelleadores para dispositivos de fusión nuclear

M. Rodriguez Ramos Directores: M. Garcia Muñoz; M.C. Jimenez Ramos; J. Garcia Lopez viernes, 22 de septiembre de 2017

#### <sup>41</sup>Ca measurement with low energy Accelerator Mass Spectrometry (LEAMS) at the Centro Nacional de Aceleradores

C. Vivo Vilches Director: J.M. Lopez Gutierrez viernes, 28 de septiembre de 2018

# Velocity-space resolved measurements of fast-ion losses due to magnetohydrodynamic instabilities in the ASDEX Upgrade tokamak

J. Galdon Quiroga Directores: M. Garcia Muñoz; E. Viezzer lunes, 17 de diciembre de 2018

#### 7.4.2 Proyecto de Fin de Máster / Final Master Project

Vision and impact of Science from the social and scientific point of view applied to the scientific press news of National Center of Accelerators S.D. Leon Dueñas

Director: C. Barrio Alonso jueves, 13 de julio de 2017

#### Characterization of the ion pedestal in low and high collisionality plasmas

D.J. Cruz Zabala Director: E. Viezzer

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

jueves, 21 de septiembre de 2017

# Impact of externally applied 3D fields on plasma rotation and correlation to particle losses

P. Cano Megias Director: E. Viezzer jueves, 21 de diciembre de 2017

7. Producción Científica / Scientific Production

### 7.5 Cursos, Coloquios y Eventos / Courses, Seminars and Meetings

#### 7.5.1 Cursos / Courses

Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico Datación por radiocarbono Profesor: F.J. Santos Arevalo 2017

### El empleo de morteros y cales en la arquitectura romana. De sus antiguas propiedades a las nuevas técnicas de análisis para su caracterización

C-14 de morteros para la obtención de dataciones absolutas. Protocolos de actuación y posibilidades analíticas Profesor: F.J. Santos Arevalo 2017

#### **Radiofarmacia PET**

Profesor: L. Fernandez Maza 23/03/2017

#### Retrodispersión Rutheford: Perfiles de Composición

Métodos Físicos de Análisis de Capas Finas y Superficies de Sólidos F.J. Ferrer 25/06/2018 al 29/06/2018

#### Datación por radiocarbono

Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico F.J. Santos Arevalo 2018

#### Datación por radiocarbono

Introducción a la geocronología: descubriendo la edad de nuestro pasado F.J. Santos Arevalo 25/07/2018

### National Training Course on Validation of Analytical Methods, Processes, Software and Quality Assurance

L. Fernandez Maza 28/11/2018 al 30/11/2018

#### 7.5.2 Coloquios / Seminars

<sup>14</sup>C and mortars Dña. Serena Barone Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) de Florencia Sevilla (España)

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

22/06/2017

#### 10 años de radiocarbono en el CNA

Dr. Javier Santos Arévalo CNA Sevilla (España) 27/10/2017

#### Detection of $\alpha$ -particles using Superconducting Series Array Tunnel Junctions

Dr. José Manuel Gómez CNA Sevilla (España) 07/05/2018

#### 7.5.3 Eventos / Meetings

RADFAC2017 Workshop Sevilla (España) 30/03/2017

### 23<sup>rd</sup> EU-US Transport Taskforce Meeting

Congreso Sevilla (España) 11/09/2018 al 14/09/2018

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

7. Producción Científica / Scientific Production

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators Analytics and users



8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators Analytics and users

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators Analytics and users

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users

### 8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users

# 8.1 Estadísticas de uso de las instalaciones del CNA / CNA Facilities use analytics

El Centro Nacional de Aceleradores, CNA, es un centro mixto de la Universidad de Sevilla, Junta de Andalucía y CSIC. Se trata de una Instalación Científico-Técnica Singular, ICTS, dedicada a la investigación interdisciplinar y por tanto abierta a usuarios externos. Para ello se emplean 6 distintas instalaciones: un acelerador Tándem Van de Graaff de 3 MV, un Ciclotrón que proporciona protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV, un acelerador tipo Tándem Cockcroft-Walton de 1 MV, utilizado como espectrómetro de masas, un escáner PET/CT para personas, un nuevo sistema de datación por radiocarbono llamado MiCaDaS, y un Irradiador de <sup>60</sup>Co.

La aplicación de estas 6 infraestructuras cubre campos tan variados como ciencias de materiales, impacto medioambiental, física nuclear y de partículas, instrumentación nuclear, tratamiento de imágenes médicas, investigación biomédica e imagen molecular preclínica o datación, diagnóstico por imagen médica en pacientes, datación por <sup>14</sup>C e irradiación en muestras de interés tecnológico y biológico, entre otras.

En este apartado se muestran estadísticamente los distintos usuarios de las instalaciones del CNA atendiendo a su origen institucional y geográfico en el bienio 2017/2018.

National Center of Accelerators, CNA, is a joint center of the University of Seville, Junta de Andalucía and CSIC. It is a Unique Scientific-Technical Facility, ICTS, dedicated to interdisciplinary research and therefore opens to external users. To do this, 6 different installations are used: a Van de Graaff 3 MV Tandem accelerator, a 18/9 MeV Cyclotron accelerator, an Accelerator 1MV Mass Spectrometer, a PET / CT scanner, a new radiocarbon dating system called MiCaDaS, and a <sup>60</sup>Co Irradiator.

The application of these 6 infrastructures covers fields as diverse as material sciences, environmental impact, nuclear and particle physics, nuclear instrumentation, medical imaging, biomedical research and preclinical molecular imaging or dating, medical imaging in patients, <sup>14</sup>C and irradiation in samples of technological and biological interest, among others.

In this section, the different users of the CNA facilities are shown statistically according to their institutional and geographical origin in the 2017/2018 biennium.

#### **Centro Nacional de Aceleradores (CNA)**

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users



#### **Centro Nacional de Aceleradores (CNA)**

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users



**Centro Nacional de Aceleradores (CNA)** 

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users



8.1.4 Evolución histórica del número de solicitudes de uso / Evolution of the number of beam time requests



8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users

### 8.2 Usuarios de las Instalaciones del CNA / CNA Facilities users

A continuación, se detallan los usuarios de las instalaciones del CNA en los años 2017 y 2018.

The CNA Facilities users, in 2017 and 2018, are shown in the following section.

#### 8.2.1 Universidades / Universities

Universidad Autónoma de Barcelona Universidad Carlos III Universidad de Alcalá Universidad de Alicante Universidad de Almería Universidad de Barcelona Universidad de Cádiz Universidad de Castilla la Mancha Universidad de Córdoba Universidad de Edimburgo Universidad de Granada Universidad de Huelva Universidad de la Coruña Universidad de Lund Universidad de Salamanca Universidad de Santiago de Compostela Universidad de Sevilla Universidad de Turbingen Universidad de Valencia Universidad del País Vasco Universidad Nacional Autónoma de México Universidad Pablo de Olavide University Paris 1 Universidad Pompeu Fabra Universidad Politécnica de Madrid Universita di Napoli Federico II

#### 8.2.2 Centros de Investigación / Research Centres

#### Ciemat

Cividec Instrumentation GmbH Escuela de Estudios Árabes (CSIC) Estación Biológica de Doñana (CSIC) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC) Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (CSIC) Instituto de Física Corpuscular (CSIC) Instituto de Fúsica Nuclear

8. Estadísticas de uso de aceleradores y usuarios / Accelerators analytics and users

Instituto de Historia (CSIC) Instituto de Lenguas y Cultura del Mediterráneo y Próximo Oriente (CSIC) Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC) Instituto Milá y Fontanals (CSIC) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) Organización Internacional de la Energía Atómica Third Institute of Oceanography Laboratorio de Instrumentacao e Fisica Experimental de Particulas Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

#### 8.2.3 Otras entidades / Other entities

Asociación de Industria Navarra Ayuntamiento de Almedinilla Ayuntamiento de Cardona Ayuntamiento de Casas Bajas Ayuntamiento de Priego de Córdoba Ayuntamiento de Tarragona Ayuntamiento de Turégano Consell de Mallorca Dirección General de Patrimonio Cultural de la Comunidad de Madrid Gestión Cultural Larrate Gobierno de Andorra Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC) Venerable Hermandad de Nuestro Padre Jesus Nazareno

#### 8.2.4 Empresas / Companies

Airbus Defense and Space GmbH Alter Technology CESI SpA Enresa ERASM Geotecnia y Cimientos S.A Gestión Cultural Larrate Particulares Proyectos y Rehabilitaciones Kalam S.A. Qioptiq Space Technology SmartAcc Technology Solar MEMS Technologies Regirarocs Sl TRAD Tragsa

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

9. Calidad / Quality



### 9. Calidad / Quality

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

9. Calidad / Quality

9. Calidad / Quality

### 9. Calidad / Quality

El Centro Nacional de Aceleradores tiene definida una clara y bien conocida política de calidad. Uno de los objetivos del CNA es la continua mejora con el fin de lograr altos niveles de calidad y excelencia en la gestión y ejecución de los proyectos tecnológicos y de investigación así como en la provisión de servicios.

Con el propósito de diseminar e implementar una Cultura de la Calidad en el CNA, ha sido creada la Unidad de Calidad, de acuerdo a la política de calidad y directrices establecidas por la Universidad de Sevilla, la Junta de Andalucía y el CSIC. Este compromiso con la Calidad nos ha permitido ser reconocido como un centro de referencia que responde a las necesidades actuales de la comunidad científica y la Sociedad en general.

El trabajo de esta unidad se centra en la implementación de los sistemas y herramientas de una gestión de calidad en los servicios generales y laboratorios del CNA. Otro de sus objetivos es el de garantizar la máxima fiabilidad de los procedimientos y los resultados de los análisis. Con el fin de asegurar la reproducibilidad de todos sus servicios, el CNA tiene establecidos y publicados los procedimientos en detalle.

El CNA ha obtenido y tiene implementadas las certificaciones estándar ISO 9001 e ISO 27001, además de la certificación en materia de Prevención de Riesgos según la OSHAS 18001.

Las normas ISO han sido desarrolladas por la organización internacional ISO para gestionar la calidad de las empresas e instituciones como el CNA para mejorar sus prácticas, rendimiento, y finalmente para alcanza el éxito.

La ISO 9001:2008 es una norma de gestión de calidad global, utilizada para establecer y actualizar el sistema de gestión de calidad de la organización (QMS). Esto permite a las organizaciones tanto de productos y servicios lograr los estándares de calidad que son reconocidos y respetados en todo el mundo.

La norma se basa en una serie de principios de gestión de calidad, incluyendo un fuerte enfoque en el cliente, la motivación y la implicación de la dirección, la aproximación al proceso y la mejora continua. Esto ayuda a asegurar que los clientes reciben, productos consistentes, de buena calidad y servicios, que a su vez trae muchos beneficios para el negocio.

El alcance de la norma ISO 9001 es: El Centro Nacional de Aceleradores dispone de un sistema de gestión de calidad conforme a la norma UNE-EN ISO 9001:2005 para la prestación del servicio de análisis de materiales con aceleradores de partículas

9. Calidad / Quality

mediante técnicas AMS (Accelerator Mass Spectrometry) y técnicas IBA (Ion Beam Analysis).

La norma ISO / IEC 27001:2005 es una norma de gestión de información de seguridad global, que se utiliza para establecer y certificar el sistema de gestión de seguridad de la información (SGSI). Se especifican claramente los procesos para permitir a una organización establecer, implementar, revisar y supervisar, gestionar y mantener un SGSI eficaz. Su aplicación da confianza a los clientes y proveedores de que la seguridad de información se toma en serio dentro de las organizaciones que la cumple, porque tiene instaurados los procesos para hacer frente a las amenazas de seguridad de la información.

El alcance de la norma ISO 27001 es: Los sistemas de información que dan soporte a las actividades del Centro Nacional de Aceleradores relativas a las investigaciones y la tecnología aplicada para el diseño de instrumentación y las pruebas con aceleradores, tanto propias como externas según la declaración de aplicabilidad de edición 1.

Ambas normas ISO implican la comprobación de que el sistema funciona de tal modo que el CNA debe realizar auditorías internas para comprobar cómo funciona su sistema de gestión de la calidad. Dos organizaciones independientes diferentes (AENOR y BUREAU VERITAS) verifican y certifican anualmente que se cumple ambas normas.

CNA has defined a clear and well known quality policy. One of the objectives of CNA is the continuous improvement in order to achieve high levels of quality and excellence in the management and implementation of research and technological projects and the provision of services.

With the purpose of disseminating and implementing a quality culture at the CNA a Quality management Unit has been set up, according to the quality policy and the guidelines established by the University of Seville, Junta de Andalucía and CSIC. This commitment to quality has helped us to be recognized as a reference center that meets the current needs of the scientific community and society in general.

The effort of this Unit focuses on the implementation of systems and tools of quality management on general services and laboratories of the CNA, so as to ensure maximum reliability of the procedures and results of the analysis. In order to ensure the reproducibility of all services CNA has established and published detailed.

CNA has also implemented and obtained standard ISO certifications as ISO 9001 and ISO 27001, in addition to the certification in matters of Risk Prevention according to OSHAS 18001.

The ISO standards have been developed by ISO International organization to manage the quality of companies and institutions such as CNA to improve their practices, to enhance their performance, and finally to achieve success.

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

9. Calidad / Quality

The ISO 9001:2008 is a global quality management standard, used to establish and to update the organization's quality management system (QMS). It helps both product and service organizations to achieve standards of quality that are recognized and respected throughout the world.

The standard is based on a number of quality management principles including a strong customer focus, the motivation and implication of top management, the process approach and continual improvement. It helps ensure that customers get consistent, good quality products and services, which in turn brings many business benefits.

ISO 9001 scope: Centro Nacional de Aceleradores for the following field of activities: Materials analysis services with particle accelerators using IBA (Ion Beam Analysis) and AMS (Accelerator Mass Spectrometry) techniques, has implemented and maintains a quality management system which fulfills the requirements of the standard ISO 9001:2008.

The ISO/IEC 27001:2005 is a global information security management standard, used to establish and certify the information security management system (ISMS). It clearly specifies the processes for enabling an organization to establish, implement, review and monitor, manage and maintain an effective ISMS. Its implementation will reassure customers and suppliers that information security is taken seriously within the organizations they deal with because the latter have in place state-of-the-art processes to deal with information security threats and issues.

*ISO* 27001 scope: Information systems that give support to Centro Nacional de Aceleradores activities involving investigations and the applied technology for hardware development and internal as well as external test with accelerators according to the statement of applicability ED.1.

Both ISO standards imply checking that the system works so that CNA must perform internal audits to check how its quality management system is working. Two different independent organizations (AENOR and BUREAU VERITAS) verify and certify annually that it is in conformity to the standards.

### 9.1 Componentes de la Unidad de Calidad / Quality Unit Members

- -Dr. Jerónimo Castilla Guerra, Coordinador de la Unidad de Calidad
- -Dr. Celestino Ignacio Sánchez Angulo, Miembro

-D. Miguel Calderón Reyes, Miembro

- -D. Francisco Calle Blanco, Miembro
- -Dª. Isabel Gómez Martínez, Miembro

-Dra. Yolanda Morilla García, Miembro

-D. Juan Ignacio Peruchena Fernández, Miembro

-Dra. Elena Chamizo Calvo, Miembro

Centro Nacional de Aceleradores (CNA)

9. Calidad / Quality

-Dra. Inés Ortega Feliu, Miembro -D. Sergio David León Dueñas, Miembro