

La física nuclear en Cuba: apuntes para una historia

Fidel Castro Díaz-Balart

Vicepresidente de la Academia de Ciencias de Cuba

Resumen

En el presente artículo se resume una perspectiva histórica de la experiencia nacional en el desarrollo de la Física Nuclear, con énfasis especial en su vínculo con el Programa Nuclear Cubano y los resultados científicos tecnológicos y de impacto socioeconómico obtenidos. Para sustentar el desarrollo de la nucleenergética e instalaciones nucleares, se recoge la creación de instituciones especializadas, la formación de profesionales y de colectivos interdisciplinarios de físicos nucleares, teóricos, experimentadores, ingenieros y de otras especialidades. También se abordan las múltiples aplicaciones pacíficas introducidas en el país y en particular las asociadas al programa científico nuclear.

Palabras clave: Cuba; física nuclear; energía nuclear; usos; aspectos históricos; educación; instalaciones nucleares

Nuclear physics in Cuba: a historical outline

Abstract

The present article summarizes an historical perspective of the national experience in Nuclear Physics development, with particular emphasis on its relationship with the Cuban Nuclear Program, its scientific and technological achievements, and its social and economic impact. Multiple peaceful applications introduced in the country and specifically those related to the Nuclear Power Program are also included. In order to support nuclear energy as well as nuclear power plants, specialized institutions were created, in addition to the training of professionals and interdisciplinary research groups in theoretical and experimental nuclear physics, engineering and in other different specialties.

Key words: Cuba; nuclear physics; nuclear energy; uses; historical aspects; education; nuclear facilities

Introducción

Presentar una panorámica de los orígenes y desenvolvimiento en Cuba de la Física Nuclear y las tecnologías vinculadas, en el contexto del XX Aniversario de la Agencia de Energía Nuclear y Técnicas de Avanzada (AENTA), es una labor compleja.

Hoy día es común encontrar colectivos multidisciplinarios de jóvenes científicos, con destacada presencia de físicos nucleares en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) de Ginebra, en el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares (IUIIN) de Dubna, en el Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) de Trieste, en el Centro de Iones Pesados (GSI) de Darmstadt y en el Instituto de Estudios Avanzados de Frankfurt (FIAS), así como vinculados a diferentes laboratorios especializados del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). También, realizando investigaciones e innovaciones de punta en prestigiosas universidades, institutos de investigación y empresas de alta tecnología de

América, Europa y Asia. Con satisfacción se constatan sus resultados en numerosos artículos científicos y patentes; en la participación en prestigiosas conferencias científicas y en los premios obtenidos, tanto nacional como internacionalmente. Es notable, por último, constatar el número de graduados en esta especialidad; de maestrías y doctorados en ciencias relacionados con la Física Nuclear, quienes realizan su actividad en los más diversos campos nacionales de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (CTI) y más allá de sus fronteras.

¿Pero cómo se gestó y desarrolló esta laboriosa y compleja senda nuclear cubana?

En apretada síntesis, el epígrafe 1 presenta una panorámica histórica del desarrollo de la Física Nuclear en el país, en particular, el papel catalizador del Programa Nuclear Cubano (PNC). También los pasos iniciales dados durante los años 40 y 50, así como las instituciones creadas y las actividades que más despuntaron en este

campo, realizadas en la etapa desde 1959 hasta finales de la década del 70 del pasado siglo. Como parte de los hitos se presenta el contexto y los hechos relevantes que potenciaron los trabajos en Física y demás investigaciones nucleares a partir de 1980. En el epígrafe 2 se tratan las aplicaciones de técnicas nucleares de mayor impacto económico y social, y se describe el vínculo raigal que existe entre estas y las investigaciones básicas y aplicadas de la Física Nuclear. También recoge el marco institucional de la rama nuclear existente en cada etapa y se detallan las principales actividades llevadas a cabo por sectores nacionales, áreas de aplicaciones e instituciones de investigación y docentes vinculadas.

El epígrafe 3 resume la progresiva introducción de múltiples investigaciones nucleares modernas y otros estudios de incuestionable interés práctico realizados en Física Nuclear, tanto teórica como experimental, como apoyo a la CEN-Juraguá y la asimilación de otras instalaciones de igual naturaleza. A partir de la creación de la AENTA, cuando surge la segunda etapa, se analizan hasta el presente las aplicaciones de mayor interés y los estudios fundamentales ya establecidos para apoyar el desarrollo socioeconómico del país. También se presentan determinadas reflexiones y enseñanzas derivadas del desarrollo de los usos pacíficos de la energía nuclear en Cuba, en particular su programa científico, que pudieran servir de experiencia a otros países con similares condiciones y niveles de desarrollo que inician un programa nucleoeenergético.

En el artículo se destaca el papel fundamental para el desarrollo de esta esfera, de la colaboración recibida de la antigua URSS, otros países de Europa del Este y de los principales organismos internacionales.

1. El surgimiento y despliegue del Programa Nuclear Cubano

El desarrollo de la Física Nuclear en Cuba, como parte consustancial e indivisible de la Física en general se imbrica, al igual que otras ramas nacionales del saber, con los orígenes de la ciencia cubana entre los siglos XVIII y XIX [1], cuando hombres de la talla de Félix Varela, Felipe Poey, Álvaro Reinoso, Carlos J. Finlay y Juan Tomás Roig, eran excepciones en medio del panorama desolador y de abandono de la ciencia en Cuba. De ahí el modesto comienzo en los años 40 y 50 del empleo, principalmente en la medicina, de las fuentes radiactivas, equipos de radioterapia y de las técnicas nucleares en otras esferas, en lo fundamental, gracias a la iniciativa y tenacidad de unos pocos pioneros conscientes y comprometidos. Aunque relevante, no es posible presentar en el apretado marco de esta publicación, la historia de esas incipientes actividades nucleares ni en detalle las de las décadas del 60 y del 70; todo lo cual aparece recogido en [2] y en publicaciones relacionadas en [3]. Sin embargo, en este trabajo resulta ineludible abordar de forma sintética, el contexto y determinadas realidades que marcaron los 15 años decisivos que antecedieron la creación de la AENTA.

Consecuente con la idea de su líder histórico de hacer de Cuba un país de hombres de ciencia y de pensamiento, durante la primera década la obra revolucionaria en la educación y la ciencia fue impresionante. Entre las primeras instituciones fundadas en los años 60 estuvo la Academia de Ciencias de Cuba (ACC), que sirvió de catalizador en la creación de diferentes instituciones científicas como el Instituto Nacional de Oncología y Radiobiología (INOR), el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC) y el Instituto de Ciencia Animal (ICA), que fueron pioneros en el empleo de las radiaciones ionizantes en Biomedicina y otras técnicas aplicadas. No obstante, fue la inauguración por Fidel y Raúl del Instituto de Física Nuclear (IFN), el 8 de enero de 1969, la expresión más sobresaliente de lo que a la postre sería el firme compromiso nacional con esta rama.

En la década del 70 [4] el IFN, devenido posteriormente en Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ) completó, con la colaboración del OIEA y del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), gran parte del equipamiento básico que había suministrado la URSS (reactor subcrítico, instalaciones radioquímicas, fuentes de radiaciones gamma y analizadores de espectrometría de neutrones, etc.), que entre otros, propició la realización de análisis de minerales, aplicaciones en la agricultura, el empleo de la espectroscopía Mossbauer, la electrónica nuclear y la dosimetría. En el CNIC [5] se desplegaron determinadas técnicas nucleares e instrumentación básica para la prospección petrolera y la caracterización de las propiedades de las radiaciones ionizantes. En esos años se crearon además, la Comisión Nacional para el Uso Pacífico de la Energía Atómica (CNUPEA); los departamentos de especialidades nucleares en la Universidad de La Habana (UH); en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE) y en la escuela de Física de la Universidad de Oriente [6] se ejecutó un proyecto PNUD relacionado con el empleo de las técnicas nucleares en la economía.

Lo anterior estimuló la formación de profesionales y la obtención de maestrías en especialidades nucleares, lo cual contribuyó a la concepción inicial de un futuro desarrollo en este campo.

En 1976, como parte del convenio intergubernamental con la URSS, se incluyó la construcción de la CEN Juraguá, que por su magnitud, recursos involucrados y trascendencia, sería considerada La obra del siglo. Para afrontar el gran reto, surgió la perentoria necesidad de integrar todos los esfuerzos en una estrategia nacional coherente, con objetivos y prioridades bien definidos y concebir un Programa Nuclear Cubano (PNC), capaz de crear una sólida infraestructura en aras del desarrollo de la nucleoeenergética. A fines de 1979, auxiliado por la labor anterior del Grupo Nuclear de la Secretaría del Consejo de Ministros (CECM), se arribó a importantes decisiones políticas y organizativas, y se promulgó el Decreto 52 del CECM.

Los 15 años decisivos del PNC. En enero de 2015 se cumplirán 35 años de la restructuración de la activi-

dad nuclear, cuando quedaron constituidas la Comisión de Energía Atómica de Cuba y la Secretaría Ejecutiva para Asuntos Nucleares (SEAN) [7]. La primera, destinada a hacer cumplir la política trazada, coordinar y controlar los esfuerzos de los organismos nacionales involucrados en la actividad nuclear y la segunda, institución encargada de implementar la política aprobada y de desarrollar la infraestructura científico-técnica, regulatoria y el capital humano requeridos en la nueva etapa. El Programa Nuclear, que surgió de esta reorganización, fue calificado por H. Blix, entonces Director General del OIEA, de “impresionante, fuerte y muy bien estructurado” [8]. Contemplaba cinco direcciones principales: la nucleoeenergética; la creación del sistema de protección radiológica y seguridad nuclear; la amplia introducción de técnicas nucleares en diversos sectores; el impulso a las investigaciones básicas y aplicadas; y la formación integral de los especialistas, técnicos medios y obreros, requeridos.

Lo logrado en esa década y media está descrito con amplitud en [9], pero es oportuno exponer brevemente el contexto y la etapa cuando se erigieron; desde los cimientos, los pilares de la compleja infraestructura que el PNC demandaba, sustentaron la realización de investigaciones en Física Nuclear y especialidades conexas. Fue en esos años cuando se crearon los Centros de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), Seguridad Nuclear (CSN), Estudios Aplicados al Desarrollo de la Energía Nuclear (CEADEN), Centro de Información de la Energía Nuclear (CIEN) y el Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Nucleares (ISCTN). También se proyectó e inició la construcción del Centro de Isótopos (CENTIS), inaugurado en 1995. Uno de los proyectos de envergadura previstos desarrollar fue el Centro de Investigaciones Nucleares (CIN). A mediados de 1979 se instruyó al Grupo Nuclear de la Secretaría del CECM concretar las ideas conceptuales existentes y lograr con el Gobierno de la URSS el crédito externo requerido para desarrollar su primera etapa. Este objetivo se analizó y contrató; durante la siguiente década su unidad inversionista ejecutó la tarea técnica y todas las etapas de proyección y realizó su construcción hasta 1992 cuando el Proyecto, al igual que la CEN Juraguá, se interrumpió.

Antes de concluir este epígrafe, cabe tratar someramente dos aspectos cruciales de ese período: La política y colaboración internacional y la formación-capacitación del capital humano. Vinculado a la primera, hay que resaltar el activo papel desempeñado por Cuba en el OIEA que, durante 1981 y 1982, suscribió los tres acuerdos de salvaguardias parciales que estaban pendientes y se requerían para poder importar los reactores que entrarían en operación en la siguiente década. En 1983, Cuba fue electa miembro de la Junta de Gobernadores de ese organismo por vez primera desde su constitución en 1957, condición que repitió en cuatro ocasiones más en esos años y mantuvo hasta muy recientemente. Fue fértil la labor de nuestro país en el Grupo Nuclear de los Países No Alineados que presidió

entre 1983 y 1987, y reconocida su participación en la Comisión respectiva del CAME durante la década del 80 [10]. También fue notable su contribución a la Conferencia Mundial de las Naciones Unidas para la promoción de la energía nuclear PIC-PUNE, efectuada en Ginebra en 1987 [11]. Respecto a la Colaboración Internacional es preciso señalar que fue sustancial. El valor total supera la cifra de 60 millones de USD, al incluir la adquisición de equipos e instalaciones suministrados por naciones del CAME, la colaboración del OIEA y del PNUD —87 % de toda la ayuda brindada hasta entonces en más de 30 años— y el aporte de los convenios bilaterales con la URSS y otros países de Europa del Este. Por otra parte, la contribución de los prestigiosos centros científicos internacionales antes mencionados, permitió adiestrar a más de 550 especialistas de diferentes instituciones nacionales y recibir en el país a 120 expertos internacionales.

El impacto de la selección y formación de los recursos humanos para el PNC se evidencia en las siguientes realidades: en el nivel de la enseñanza media: Por iniciativa de la SEAN y la Resolución correspondiente del Ministro del MINED se crearon en 1980 los Institutos Preuniversitarios Especializados en Ciencias Exactas (IPECE). El primero de ellos —el Humboldt 7— y otros dos establecidos en Santiago de Cuba y Villa Clara durante el quinquenio, devinieron en una cantera de excelentes graduados para el estudio de ciencias e ingeniería en la enseñanza superior y en especial una valiosa cantera para la esfera nuclear. Baste recordar que hasta su integración con las antiguas vocacionales en 1985, sus egresados constituyeron el 28 % del total de los estudiantes universitarios de perfil nuclear. En esos años se prepararon, además, cientos de técnicos medios y obreros cualificados en el Politécnico Electronuclear de Juraguá, en Cienfuegos, surgido en 1981.

Respecto a la enseñanza superior, hasta 1980 un total de 48 profesionales se habían graduado en especialidades de perfil nuclear. Solo entre ese año y 1988 se formaron más de 650 especialistas de este nivel [12]. En general, hasta mediados de 1992, la cifra total de egresados en la URSS, países de Europa del Este y Cuba en cerca de 50 especialidades, fue alrededor de 1100 (comenzando el año 90 no se enviaron más estudiantes al exterior). En 1987—a partir de la Facultad de Ciencia y Tecnologías Nucleares (FCTN) de la Universidad de La Habana surgida en 1987— se creó el Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Nucleares (ISCTN). Esta bien equipada pequeña universidad nuclear, basaba sus programas curriculares en estándares de calidad y niveles de formación internacionalmente reconocidos y preparaba profesionales de alta calificación en Física Nuclear, Radioquímica e Ingeniería Energética Nuclear; posteriormente se incorporó la Ingeniería Física, que tenía la misión de formación en estas especialidades para trabajar en la CEN, la infraestructura científico-técnica y regulatoria que le daba soporte, y para el desarrollo de las aplicaciones nucleares. En 2003, el ISCTN se convierte en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias

Aplicadas (InSTEC) e incorpora la especialidad de Meteorología, en la que ha graduado hasta el presente 178 profesionales.

En la Tabla 1 se muestra la cantidad total de graduados nucleares desde 1981, su desglose por años, especialidades y la denominación de los centros de enseñanza superior respectivos. De sus aulas han egresado 340 físicos nucleares y 45 ingenieros físicos del mismo perfil. Si se consideran los 120 graduados aproximadamente en el exterior, la cifra de esa especialidad supera los 500 profesionales. No es de extrañar entonces que, junto a físicos de medios condensados, cuyas graduaciones se remontan a la década del 70 [13], la mayoría de los profesionales, másteres y doctores en Física del país, sean físicos nucleares.

Tabla 1. Cantidad total de graduados nucleares y su desglose por años, especialidades y denominación de centros de enseñanza superior

Especialidades nucleares	FCTN 1981 –1987	ISCTN 1988/2003 (¹ de ellos 1988–1992)	InSTEC 2003– 2014	Total de graduados
Ingeniería en Tecnología Nucleares y Energéticas	178 ¹	203 ¹ 2101	126	507
Física Nuclear	32	181 ¹ 276	127	340
Ingeniería Física Nuclear	0	45 ¹ 32	0	45
Radioquímica	0	121 ¹ 29	105	226
Total	210	550 ¹ 238	358	1118

Fuente: Registro Oficial de graduados del InSTEC

Sobre la superación posgraduada y de investigación cabe resaltar que durante la década del 80 tuvo gran importancia la realización de seminarios científicos y talleres nacionales e internacionales, destacándose por el rigor y alto nivel, y la celebración de las I, II y III Escuelas para los Problemas Actuales de las Ciencias Nucleares, realizadas en 1980, 1985 y 1990 [14]. Estos contaron con representantes nacionales de las instituciones homólogas y la participación de reconocidos conferencistas extranjeros de alto nivel. A partir de 2003 se han formado, en ocho ediciones, 90 másteres en Física Nuclear; de estos 42 en Teoría, 48 en temas experimentales y 20 doctores.

Debido a los cambios ocurridos en la geopolítica internacional y la subsiguiente crisis, a inicios de los años 90 se paralizan las principales inversiones nucleares y desacelera el PNC. No obstante, ya se había estructurado y desplegado la mayor parte de un sistema completo de instituciones en esta rama y existía una significativa fuerza cualificada, que permitió preservar la integralidad del sistema científico-tecnológico de la SEAN y en particular, salvaguardar el potencial humano preparado con tanto esfuerzo. En 1994 se reorganizan los Organismos de la Administración Central del Estado (OACE); se crea en lo fundamental, a partir de la fusión

de la existente Academia de Ciencias y la SEAN, el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CIT-MA), y surge la AENTA, a la que se transfiere el sistema de la SEAN, sin su infraestructura logística y las delegaciones territoriales.

2. Aplicaciones de las técnicas nucleares en el escenario cubano

La actividad científica e innovadora en el campo de la Física Nuclear se resume en tres direcciones fundamentales: las investigaciones teóricas, experimentales y aplicadas. Los conocimientos y la experiencia acumulada en la Física Nuclear experimental y teórica, que se describen en el epígrafe 3, han permitido abordar un gran número de problemas aplicados y prácticos con resultados en lo económico y social.

Actualmente existen alrededor de 160 instituciones y sectores de diferentes ministerios que emplean técnicas nucleares y fuentes radiactivas; sus resultados han estado estrechamente relacionados con el Programa de Cooperación Técnica del OIEA. Es una realidad la presencia y desarrollo de una infraestructura que abarca campos disímiles como la salud humana (radioterapia, medicina nuclear, producción de radiofármacos e investigaciones preclínicas y clínicas de fármacos, incluyendo tecnología de servicios a la industria biotecnológica y farmacéutica); las aplicaciones en las esferas de la agricultura y el azúcar; la alimentación; la minería y la industria, así como en estudios de los recursos hídricos y la protección de los medios marinos y terrestres. Existe además, una red técnica para el control y la detección de fuentes radiactivas y nucleares no autorizadas.

Diferentes aplicaciones tienen un vínculo más directo con las investigaciones teóricas y experimentales en Física Nuclear, las que se realizan principalmente en el CEADEN y el InSTEC. En la Tabla 2 se presentan por áreas de aplicación y sectores socioeconómicos solo las que ejecutan los centros de la AENTA.

Las principales aplicaciones que se describen más adelante están relacionadas con los métodos analíticos y nucleónicos empleados en la Física Nuclear aplicada; entre estos: el análisis por activación neutrónica (AAN), la espectrometría gamma (EG), la fluorescencia de rayos (FRX), la reflexión y moderación de neutrones, la retrodispersión de partículas beta, la transmisión y absorción gamma y la técnica de *treck etched*. Para la simulación matemática de la interacción con la radiación se utilizaron los métodos de Monte Carlo, de deconvolución de espectros y múltiples herramientas de la Física Nuclear Teórica. En los marcos del PNC, para las investigaciones de interés económico y el estudio de la composición elemental de muestras variadas se analizaron: el desarrollo e implementación de métodos para medir las secciones de remoción de hormigones cubanos y su caracterización como blindaje contra las radiaciones [16]; el desarrollo de métodos nucleares combinando el AAN y la EG con la FRX; para la evaluación del grado de contaminación por metales pesados en sedimentos ma-

¹La especialidad se denominaba: Energética nuclear

rinios de áreas de interés pesquero; y el estudio de suelos urbanos de importantes ciudades del país [17,18]. El AAN también se empleó con neutrones de 14 MeV para el análisis de zeolitas naturales, granos, metales y superconductores [19], así como en reactores [20] para determinar su dependencia al flujo neutrónico. El denominado método K_0 se usa para desarrollar monitores neutrónicos [21] que se han utilizado para caracterizar yacimientos zeolíticos [22] y en estudios medioambientales para la agroindustria azucarera.

Tabla 2. Centros de la AENTA por sectores y áreas de aplicaciones

Sector	Institución	Área de aplicación
Salud	CENTIS	Producción de radiofármacos y estudios farmacocinéticos
	CEADEN	Radioesterilización (tejidos, productos de uso médico)
Agricultura e Industria	CEADEN	Tecnologías de irradiación (radiomutagénesis de plantas)
	InSTEC ²	Perfilaje gamma y neutrónico (optimización de procesos industriales)
Medio Ambiente	CEADEN	Sistema de fluorescencia rayos X (determinación analítica de muestras ambientales)
	InSTEC	Análisis por activación neutrónica y técnicas analíticas conexas (determinación analítica de muestras ambientales)
Hidrología	CPHR	Trazadores radiactivos naturales (datación muestras)
	InSTEC	Tecnología de trazadores/radiotrazadores y trazadores no radiactivos (caracterización hidrográfica e hidroquímica de acuíferos)
Seguridad Radiológica	CENTIS	Metrología de radiaciones (medición actividad)
	CNSN CPHR	Control de hermeticidad de fuentes radiactivas selladas Órgano Regulador Nuclear Gestión de desechos radiactivos; descontaminación radiactiva de materiales; metrología de radiaciones (dosis); vigilancia radiológica ambiental y radiológica de alimentos y chatarra

Fuente: Elaborada por el autor a partir de [15]

También se han diseñado y construido equipos que se basan en la interacción con la sustancia de distintos tipos de radiaciones ionizantes (neutrones, radiación gamma y beta), para aplicaciones industriales en la industria niquelífera [23]; la industria azucarera [24] y para la detección de fallas en uniones soldadas en la industria sideromecánica [25]. Es conveniente recordar dentro del Programa de prospección geológica nacional, la prospección de uranio y torio, tanto en yacimientos como asociados a la extracción de otros minerales [26, 27]. Otra de las aplicaciones que se basa en los efectos de las radiaciones ionizantes, en este caso sobre

los materiales biológicos, es la obtención de variedades mejoradas de diversos cultivos de interés económico. El método de mutagénesis radioinducida, conjuntamente con los procedimientos biotecnológicos, ha permitido obtener resultados efectivos en diferentes centros del país. Entre ellos se destacan [28-30] variedades mejoradas de arroz, obtención de cinco radiomutantes de la caña de azúcar, con alta resistencia al virus del mosaico y la aplicación beneficiosa de esta técnica al ajo y al trigo.

Las aplicaciones de la Física Nuclear a la solución de necesidades de la Salud Pública han sido diversas y notables. En efecto, el trabajo mancomunado de físicos nucleares, radioquímicos, físicos médicos, radiobiólogos y el personal médico de las instituciones de la salud vinculadas, ha propiciado alcanzar importantes logros en la producción y utilización de radiofármacos en la medicina nuclear en general y la terapia con fuentes abiertas, así como en la aplicación de la radioterapia con fuentes selladas, para efectuar tratamientos terapéuticos seguros y eficientes contra el cáncer. En el acelerador lineal del hospital Hermanos Ameijeiras se han desarrollado métodos para el cálculo de la dosis absorbida en capas de agua y tejidos para campos de electrones de energía entre 1 MeV y 21 MeV. También, a través de la simulación matemática, se mejoró la calidad de los tratamientos radioterapéuticos con agujas de yodo y alambre de iridio. En el Centro de Investigaciones Médico Quirúrgicas (CIMEQ), a fin de maximizar el beneficio y reducir los efectos colaterales, se estudiaron por simulación Monte Carlo, las fuentes radiactivas ¹⁹²Ir, ¹²⁵I, ¹⁰³Pd e ¹⁶⁹Yb empleadas en braquiterapia en el cerebro.

Para el aseguramiento metrológico de las mediciones de actividad se creó y desarrolló en el CENTIS el Laboratorio de Metrología de Radionúclidos (CENTIS-DMR) y en el CPHR el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD). Los resultados satisfactorios obtenidos por el CENTIS-DMR y el LSCD, junto a la calibración (CMC) del laboratorio para emisores gamma y beta puros, propiciaron su inclusión en el Anexo C de la Base de Datos del Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) [31]. Ello determinó que los certificados de calibración emitidos por ambos centros tengan el reconocimiento de los Laboratorios Metrológicos Nacionales de otros países. Por otra parte, el Laboratorio de Contaminación Ambiental del CPHR presta servicios sistemáticos de análisis de muestras ambientales, incluyendo alimentos. La vigilancia radiológica ambiental para detectar y notificar cualquier anomalía radiológica, ya sea de origen nacional o externa [32], se garantiza por medio de una red nacional equipada para realizar las mediciones de radionúclidos [33] en tiempo real y ofrecer de manera expedita los resultados requeridos. Otro servicio de indudable valor científico y social, realizado por un colectivo multidisciplinario del propio centro, es el estudio de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Los estudios realizados por [34-35], empleando métodos eficaces para estimar las dosis

² El InSTEC, desde el 27 de septiembre del 2011, por Acuerdo No. 7115 del Consejo de Ministros pertenece al Ministerio de Educación Superior (MES)

radiológicas recibidas durante situaciones accidentales, permitieron obtener resultados positivos con los niños y otras personas afectadas por el accidente de Chernobil. Entre 1990 y 2012, el Programa nacional de afectación a los niños de Chernobil atendió, con resultados internacionalmente reconocidos, a casi 25 mil personas de Ucrania, Bielorrusia y Rusia.

3. Desarrollo de la Física Nuclear Teórica y Experimental

El Programa Nuclear Cubano (PNC) contempló múltiples tareas de carácter investigativo y de formación profesional, que propiciaron el despegue de las investigaciones en Física Nuclear con objetivos bien definidos y permitió afrontar el reto científico tecnológico y materializar los resultados esperados. Ello fue posible gracias al sostenido esfuerzo desarrollado en la capacitación y calificación de técnicos, especialistas y científicos necesarios.

La actividad científica en el campo de la Física Nuclear desde el enfoque organizacional, se puede considerar en dos etapas: la primera etapa, entre 1980–1995 y la segunda etapa, de 1996–2014. En la primera se definen los objetivos priorizados de los programas científicos; se crean las condiciones e infraestructuras requeridas y se consolidan las instituciones cabeceras y los colectivos líderes. La segunda etapa comienza a partir del surgimiento de la AENTA a mediados de los años 90, cuando las limitaciones económicas y el recrudescimiento del bloqueo, obligan al abandono definitivo del Proyecto CEN Juraguá en el año 2000. No obstante, basadas en la infraestructura y potencial ya creados, el Programa Científico y de Innovación Tecnológica se pudo reorientar —según lo expuesto en el epígrafe 2— a potenciar las aplicaciones nucleares no energéticas, otras conexas y a perfeccionar los estudios fundamentales de mayor impacto antes establecidos. Estas actividades se sustentaron en el Programa Ramal Nuclear (1996–2005) y su continuación, así como en las decenas de instituciones nacionales involucradas en las aplicaciones nucleares y la amplia colaboración internacional existente.

Desenvolvimiento de la primera etapa. Las investigaciones en Física Nuclear se desarrollaron en dos direcciones: teóricas y experimentales. Las variadas investigaciones teóricas realizadas se centraron en la obtención de datos nucleares; el estudio de la fisión nuclear y la física de reactores, lo que propició el dominio progresivo de las teorías nucleares básicas, junto al empleo de los modelos modernos para el cálculo de reacciones nucleares inducidas por neutrones en un amplio intervalo de núcleos y energías. También fue necesario asimilar los cálculos físico-neutrónicos y dinámicos de reactores, adentrarse en la termohidráulica y crear en la SEAN una potente base nacional de cómputo basada en sistemas EC-1066. Con respecto a las investigaciones experimentales, una parte se realizó en el extranjero debido a la ausencia de instalaciones nacionales

apropiadas. No obstante, se pudo asimilar en el país la activación neutrónica, la reflexión de neutrones térmicos y otras técnicas analíticas nucleares que hasta el presente se emplean fundamentalmente en la medicina, la agricultura y la industria minero-metalúrgica. El dominio de la Física Nuclear aplicada demandó también otras competencias y dispositivos de tecnologías asociadas en: ciencia de los materiales, electrónica e instrumentación nuclear, informática y automatización de experimentos y procesos, así como en la fabricación de series limitadas de equipos, partes y componentes de alto valor agregado.

Para el logro de lo anterior, el PNC realizó un esfuerzo sostenido en la formación y la calificación de los especialistas necesarios para las diferentes etapas. Entre las múltiples tareas acometidas en el período 1980–1985, por su importancia, se destaca la creación de grupos de jóvenes físicos y especialistas nucleares de diversos perfiles a los que se les brindaron todas las facilidades y una preparación sólida en Cuba y en el extranjero. El CEADEN y el ISCTN fueron, en la Física Nuclear, las instituciones cabeceras de estas actividades en la SEAN a las que, de manera diferenciada, se incorporaron paulatinamente otros centros. En la Tabla 3 se presentan esas instituciones y sus campos respectivos de investigación. Se introdujeron además, planes de formación posgraduada, que combinaban los cursos individuales con la participación en escuelas, talleres y eventos científicos. Así, los proyectos de investigación pasaron a ser una parte sustantiva de los programas de la licenciatura, las maestrías y el doctorado tutelar en Física Nuclear.

Tabla 3. Principales instituciones, vinculadas a la Física Nuclear y sus campos respectivos de investigación

Institución	Campos de investigación
CEADEN	Técnicas del estado sólido (DRX, MR, MBE) Física nuclear experimental Física nuclear teórica Electrónica nuclear
ISCTN	Física y tecnología de reactores nucleares Física nuclear teórica

Como aspecto relevante no solo para la nucleoenergética y otras especialidades relacionadas, sino también para las investigaciones básicas, todas en correspondencia con la experiencia internacional y los requerimientos para el programa científico nacional, se determinaron como líneas principales de investigación la predicción, obtención y evaluación de datos nucleares neutrónicos de la estructura del núcleo, las reacciones nucleares y el proceso de fisión nuclear [36].

Un hito para el desarrollo de esta especialidad fue la creación de un colectivo de jóvenes científicos de excelencia, cuyos resultados en las investigaciones teóricas fueron clave durante la etapa. A modo de antecedente cabe resaltar que entre 1977 y 1980, en el Instituto de Energía Atómica, I. V Kurchatov (IEA) de Moscú, se habían realizado trabajos teóricos empleando un enfoque

microscópico del modelo de las capas e investigado la influencia de los estados de entrada sobre el carácter de las fluctuaciones, tanto en las secciones eficaces neutrónicas como en la dispersión inelástica en núcleos fuertemente deformados [37-40]. El autor, ejecutor principal de esas y otras investigaciones aquí referenciadas (Castro Díaz-Balart, F.)³, siguiendo el método empleado en el IEA —basado en la escuela del Académico L. D. Landau— encabezó en Cuba la creación de un grupo de investigadores cualificados con teóricos jóvenes formados en diversas universidades del extranjero, con trayectoria destacada. Estos, a la vez que fueron madurando en sus especialidades respectivas, realizaban actividades investigativas de punta en las áreas del conocimiento vinculados. El colectivo que se nucleó entonces entorno a estas investigaciones, a la postre, fue individualmente reconocido y la mayoría obtuvo el doctorado y/o devino en investigadores principales y profesores titulares.

Como se aprecia en el ciclo de los trabajos [41-53], la mayoría en prestigiosas publicaciones internacionales, para alcanzar un conocimiento profundo de los procesos físicos que ocurren en las instalaciones nucleares, las investigaciones teóricas se focalizaron en el estudio de la interacción de los neutrones de bajas energías en materiales estructurales empleados en la tecnología nuclear, en el desarrollo de métodos teóricos para el cálculo de secciones eficaces, en las cercanías del umbral de reacción y en particular, para determinar la influencia del anarmonismo en el cálculo de secciones eficaces y las distribuciones angulares neutrónicas hasta 5 MeV de energía. También se enfatizó en el estudio del estado de una partícula en núcleos esféricos (A-60) y altamente deformados de peso medio (A-100), así como en la dispersión de partículas de baja energía y sus aplicaciones en la física nuclear y médica. Vinculado al programa científico de entonces, se investigó también la fisión nuclear asociada al mecanismo de interacción a bajas energías para la reacción de la excitación de los neutrones con los núcleos de la región de los actínidos [54-56]. El método desarrollado, considerando la deformación del núcleo atómico, se utilizó para el cálculo de la sección eficaz de fisión de varios e importantes componentes del ciclo del combustible nuclear, en función de la variación de sus características físicas.

Paralelamente a estas investigaciones teóricas se inician los trabajos dirigidos a la obtención experimental de datos nucleares en el mismo campo de la fisión nuclear [57-63]. Utilizando las posibilidades del reactor IBR-30 del IJIN de Dubna, se efectuaron investigaciones experimentales de carácter básico como el estudio de la función de fuerza de radiación de varios núcleos de transición y deformados por medio de la reacción (n,γ) en las resonancias aisladas. También se investigó la reacción (n,p) por medio de neutrones resonantes, lo que permitió completar la información acerca de la estructura de la función de onda de los estados del núcleo compuesto para núcleos ligeros en la región $22 < A < 41$.

Con la cooperación del OIEA, también se efectuaron en el InSTEC trabajos dirigidos a medir secciones eficaces y distribuciones angulares de reacciones inducidas por neutrones con energía de 14 MeV, se desarrolló un método efectivo [64] para determinar el contenido de agua en zeolitas naturales por reflexión de neutrones [65-66], se asimilaron en el país variadas técnicas experimentales, que incluyeron las de activación, las técnicas de *track etched*, técnicas de coincidencia, electrónica de nanosegundos y los centelleantes líquidos para la discriminación por forma de pulso, entre otras.

Desenvolvimiento de la segunda etapa. Esta comienza a partir de 1996 focalizándose entonces las investigaciones nucleares teóricas, en la descripción de los núcleos atómicos como sistemas complejos, en particular en el estudio y la descripción generalizada de los núcleos excitados y sus mecanismos de relajación nuclear [67-72]. Estas se esbozan como decaimiento exótico mediante un mecanismo que hace énfasis en las propiedades geométricas y de simetría del espacio, lo que propició la investigación de las cadenas radiactivas y sus precursores [73-82]. Se estudió además, el impacto de la estructura nuclear en las reacciones con iones pesados cerca de la barrera Coulombiana, desde los modos más simétricos (fisión like) hasta los extremadamente asimétricos (emisión de protones); todos en los marcos del mismo formalismo teórico y desde un enfoque unificado, lo que permitió crear códigos de cálculos que se publicaron de manera independiente. Finalmente, se exploró la región de los núcleos deformados, desde la perspectiva de la complejidad de la superficie de energía potencial nuclear, desarrollando herramientas de cálculos capaces de abordar problemas actuales como la violación de la paridad en reacciones nucleares. Los resultados obtenidos se publicaron en revistas internacionales de impacto [82-93].

En Física Nuclear experimental y aplicada se continuaron realizando proyectos asociados al desarrollo de los métodos nucleares de análisis que se utilizan en aplicaciones de la física médica, la prospección geológica, la agricultura, la industria, la protección radiológica y dosimetría, y el medio ambiente. También en la modelación y la simulación de procesos nucleares y radiactivos, y en la obtención de datos nucleares para las técnicas nucleares, entre otras. Estas investigaciones se han realizado en las instalaciones del InSTEC y del CEADEN, así como en laboratorios de universidades y centros de investigación de diferentes países que cuentan con el equipamiento adecuado.

Entre los resultados más importantes obtenidos en esta etapa están las líneas de continuación descritas en el epígrafe 2, como las relacionadas con las modificaciones y complementaciones realizadas al método k_0 de análisis por activación neutrónica para el desarrollo de monitores neutrónicos. Esta técnica se empleó en la caracterización de yacimientos zeolíticos y petroleros; en la agroindustria azucarera [94-100]; en estudios medioambientales y en los estudios de optimización de dosis a administrar [101-106]. También se desarrolla-

³ Los trabajos publicados bajo el nombre de J. R. Fernández Díaz son de su autoría

ron métodos de cuantificación [107-108] en diferentes ensayos de Medicina Nuclear, estudios radiológicos y en la modelación y simulación de instalaciones experimentales [109-115]. Se ha estudiado asimismo, el grado de contaminación por metales pesados en sedimentos marinos y en suelos urbanos de importantes ciudades del país [116-118].

En la última década se trabajó también en el campo de las reacciones nucleares de fusión, en particular, el estudio de la fusión de núcleos estables y exóticos ligeros débilmente enlazados, así como en el estudio comparativo de las secciones eficaces de fusión y de reacción total, empleando núcleos débilmente enlazados y el estudio de la influencia del proceso de quiebra del proyecto de fusión. Se investigó también el impacto de la estructura nuclear de las reacciones con iones pesados y la influencia del *break-up* en la fusión de los núcleos débilmente enlazados; explorándose además la espectrometría de rayos X como un novedoso método para el estudio de la supresión de la fusión en la reacción ${}^9\text{Be} + {}^{144}\text{Sm}$, donde se aplicó el análisis consistente de las secciones eficaces elásticas, inelásticas y de fusión en los sistemas ${}^{16}\text{O} + {}^{144-152}\text{Sm}$ a energías por debajo de la barrera Coulombiana, entre otros. Además, se han obtenido resultados significativos en el desarrollo de una fuente de neutrones en espectro de tipo Maxwell-Boltzman [119-124].

En los últimos años, un grupo de jóvenes físicos nucleares han comenzado a trabajar en la línea de Física de Altas Energías vinculada al experimento ALICE del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Los principales resultados en esta línea se han obtenido en el realineamiento del detector SDD (*Silicon Drift Detector*), aplicando el tiempo de deriva máximo, la velocidad de deriva y los datos obtenidos por los detectores SPD y SSD [125]. Se ha caracterizado el sistema ITS (*Inner Tracking System*) del experimento ALICE, mediante la reconstrucción de trazas producidas por haces de radiación [126-129] y se han estudiado las distribuciones de carga y momento en los detectores para identificar partículas cargadas originadas en colisiones protón-protón [130-133] y Pb-Pb en el LHC.

Conclusiones

La más valiosa experiencia del Programa Nuclear Cubano corrobora que, un pequeño país con recursos limitados, además de la adecuada transferencia de equipos y conocimientos provenientes de las naciones industrializadas, solo se puede plantear la posibilidad de un programa de asimilación de la energía nuclear con fines pacíficos, si junto al sostenido esfuerzo necesario es capaz de crear la indispensable infraestructura institucional, formar el personal necesario y desarrollar un proyecto coherente de investigación y desarrollo de las ciencias y tecnologías nucleares. Para afrontar este reto y materializar los resultados esperados fue decisi-

vo formar y capacitar constantemente a los especialistas, científicos, técnicos y trabajadores, involucrados en este Programa. El esfuerzo realizado por el PNC en la formación de especialistas nucleares en el país e internacionalmente, ha sido relevante. Al considerar la colaboración de la antigua URSS, los países del Este europeo y los graduados en Cuba a partir 1980, son más de 2220 los egresados en especialidades nucleares, de los cuales, alrededor de 500 son físicos nucleares. Si se incluyen además, los maestros en ciencia y doctores existentes, los nucleares constituyen la mayoría, junto a los físicos de materia condensada, cuyas primeras graduaciones se remontan a la década del 70.

Un emprendimiento de la magnitud de la CEN Juraguá, aun sin haberse concluido, presenta además un saldo cultural que se manifiesta en muchos terrenos, en especial, en el grado de preparación, experiencia y madurez tecnológica alcanzados; y son cientos los profesionales, técnicos y directivos de múltiples especialidades que se prepararon para encarar el programa nucleoenergético, quienes desempeñan hasta el presente un papel meritorio en los distintos sectores de la ciencia y la economía nacional.

Para el desarrollo de la Física Nuclear y la determinación clara de sus objetivos y prioridades, fue importante desde los inicios la formación de colectivos multidisciplinarios de especialistas en este campo, quienes coadyuvaron a la materialización del programa científico concebido. También ha tenido relevancia para la calificación permanente de estos colectivos, la realización con rigor de seminarios científicos, talleres y escuelas, así como la participación en conferencias internacionales y otros foros de este tipo. Un factor fundamental ha sido el establecimiento de vínculos estrechos entre los investigadores teóricos y los experimentadores, quienes han contado con una valiosa colaboración de los especialistas del país, los centros internacionales de investigaciones nucleares y el OIEA. La Física Nuclear, además de sus múltiples investigaciones y las innovaciones aplicadas recogidas en el artículo, ha brindado gran visibilidad a la ciencia cubana a nivel internacional mediante cientos de publicaciones en revistas de impacto, las patentes obtenidas y los numerosos premios otorgados por la AENTA y la ACC.

Las técnicas nucleares y fuentes radiactivas se aplican actualmente en numerosas instituciones de diferentes sectores. Existe una infraestructura que comprende las aplicaciones en las esferas de la agricultura y la alimentación, la agroindustria azucarera, la minería y la industria en general. También para los estudios de los recursos hídricos, la protección de los medios marinos, terrestres y una red técnica para el uso eficiente y seguro de fuentes radiactivas, y para la detección de fuentes radiactivas y nucleares no autorizadas. Hay que destacar entre los logros de las aplicaciones, las del sistema de la salud pública. El trabajo coligado de físicos nucleares, radioquímicos, físicos médicos, radiobiólogos y el personal de las instituciones de la salud

afines, propició importantes logros en la producción y utilización de radiofármacos y en la medicina nuclear, la terapia con fuentes abiertas, la radioterapia con fuentes selladas y el aseguramiento metrológico de las mediciones de actividad que incluyen los servicios a la industria biotecnológica y a las investigaciones preclínicas y clínicas de fármacos.

Hace veinte años el sistema de la SEAN, producto de la reorganización estatal ocurrida, se fusionó con la anterior ACC y con determinadas entidades para crear el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en el seno del cual surge la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada. De la SEAN, sin la infraestructura logística y las delegaciones territoriales, se le transfiere su sistema de instituciones científico-técnico-docentes y las funciones de ejecutar, de modo sistemático y profesional, las nuevas políticas que le fueron encomendadas al Programa Nuclear, así como servir de soporte a diferentes ramas de la economía que se benefician con su uso. En este relativamente breve lapso, la AENTA logró preservar la integralidad del anterior sistema científico-tecnológico-productivo y salvaguardar a sus competentes recursos humanos, logrados ambos con tanto esfuerzo y tenacidad. En el presente trabajo se pone de manifiesto que la Agencia en la actualidad, ha alcanzado un elevado grado de madurez, cuenta con un personal de alta calificación y experiencia, dispuesto a enfrentar los nuevos retos de esta tecnología con la máxima seguridad en beneficio del país.

A dónde nos conducirán los nuevos avances en los campos del saber moderno, nadie puede conocerlo, pero siempre serán necesarios inteligencia, pasión y entereza para el asalto y la conquista de lo desconocido. Los nuevos destacamentos, mayoritariamente jóvenes, de científicos, ingenieros, obreros y demás participantes futuros de esta hermosa e inacabada obra, deberán prepararse con dedicación y profundidad, más actualizados de los últimos adelantos de la ciencia y la tecnología, manteniéndose imbricados con el desarrollo de la Energía Nuclear a escala global.

Agradecimientos

El balance de actividades, resultados de investigaciones e innovaciones que comprenden un período de 35 años, no puede obviamente incluir ni ponderar todos los trabajos realizados en cada momento, por lo que contando con la valoración de diferentes especialistas, se incluyen solo los principales y de mayor impacto. No es posible relacionar a otros profesionales de los centros de la AENTA que brindaron informaciones y vivencias, pero resulta ineludible mencionar a quienes aportaron a la elaboración del presente trabajo: las ingenieras Luisa Aniuska Betancourt Hernández y Alba Guillén Campos; los Másteres en Ciencia Marta Alicia Contreras Izquierdo y Gladys María López Bejerano; así como a los colegas físicos nucleares Doctores en Ciencia Oscar Rodríguez Hayes, Iván Padrón Díaz, Oscar Díaz Rizo, Luis Felipe

Desdín García, el Radioquímico Jorge Cruz Arencibia y al Profesor Hugo Pérez Rojas.

Referencias bibliográficas

- [1] PRUNA GOODGALL PM. Ciencia y científicos en Cuba colonial. La Habana: Editorial Academia de Ciencias de Cuba, 2011.
- [2] CASTRO DÍAZ-BALART F. Energía nuclear y desarrollo. La Habana: Editorial Ciencias Sociales, 1991. 2^{da} edición.
- [3] PÉREZ ROJAS H, STOLIK D, FUENTES J, et. al. Estado actual de las ciencias físicas en Cuba. En: Las Ciencias Básicas: examen preliminar de su situación actual en Cuba y a nivel mundial. 1976. p. 45-46.
- [4] Academia de Ciencias de Cuba. Memoria 1969-1979. La Habana: Instituto de Investigaciones Nucleares, 1979.
- [5] CARDERO E, MARRERO M, MEITÍN J. Aplicaciones de los equipos radioisotópicos en instrumentación y control y algunos resultados logrados en este campo en nuestro país. Control, Cibernética y Automación. 1973; 1(2): 8-14.
- [6] CABAL C. Physics at the University of Oriente. In: The history of Physics in Cuba. Editorial Springer, 2014. p. 247-260.
- [7] CASTRO DÍAZ-BALART F. Intervención en el panel por el 30 Aniversario de la creación de la Comisión de Energía Atómica de Cuba y la SEAN, en los marcos de los 50 años del Día de la Ciencia. Salón Baire, Capitolio Nacional. La Habana, 2010.
- [8] BLIX H. Entrevista a Hans Blix: Cuba posee un programa nuclear bien estructurado. Nucleus. 1987; (3): 36-37.
- [9] CASTRO DÍAZ-BALART F. Nuclear Energy: Environmental danger or solution for the 21st Century. Monterrey: Ed. Lagos S. A., 2011.
- [10] CASTRO DÍAZ-BALART F. Nuclear energy in Cuba in collaboration with Comecon Countries. Moscow: Ed. Comecon, 1985.
- [11] Organización de Naciones Unidas (ONU). Contribución de Cuba a la Conferencia de las Naciones Unidas para el Fomento de la Cooperación Internacional en la utilización de la Energía Nuclear con fines pacíficos. A/CONF.108/NP.2/Add.1. Ginebra: Marzo, 1987.
- [12] ALONSO MEDEROS D. La formación del personal calificado: un factor imprescindible. Nucleus. 1989; (7): 59-62.
- [13] BARACCA A, FAJER V, RODRÍGUEZ C. A Look at physics in Cuba. Physics today. 2006; 59(9): 42-48.
- [14] Memorias de la I, II y III Escuelas para los problemas actuales de las ciencias nucleares. Editorial CIEN, 1980, 1985 y 1988.
- [15] DÍAZ GARCÍA A. Influencia de las aplicaciones nucleares en la sociedad contemporánea. Nucleus. 2006; (40): 6-14.
- [16] PÉREZ G, et. al. Determination of naturally radioactive elements in construction materials by means of gamma-spectroscopy, track registration techniques and neutron activation analysis. J. Radioanal Nucl Chemistry. 1993; 176(4): 315-323.
- [17] ALONSO C, et. al. Tendencia histórica de la contaminación por metales pesados en sedimentos de la bahía de Cienfuegos, definida con la geocronología del Pb-210 y Cs-137. Nucleus. 2006; (39): 20-26.
- [18] DÍAZ O, et. al. Análisis ambiental por activación neutrónica de sedimentos de la bahía de La Habana. Nucleus. 2008; (44): 15-23.
- [19] HERNÁNDEZ A. Utilización del microtrón para el análisis por activación de rocas y sustancia meteorítica. Tesis en opción al grado de Dr. Ciencias Físico-Matemáticas. Dubna: IUIIN, 1985.
- [20] DÍAZ RIZO O, et. al. A reactor power dependence for the k0 neutron flux parameters. J Radioanal Nucl Chem. 1997; 22(1/2): 241-244.
- [21] DÍAZ RIZO O, ÁLVAREZ PELLÓN I, HERRERA PERAZA EF, et. al. HAV-1: A multipurpose monitor for reactor epithermal neutron flux characterization. J Radioanal Nucl Chem. 1997; 220(1): 99-102.
- [22] DÍAZ RIZO O, HERRERA PERAZA EF. Multi-elemental characterization of Cuban natural zeolites. J Radioanal Nucl Chem. 1997; 221(1/2): 255-258.
- [23] HERRERA V, et. al. Spinel-type iron and chromium oxides in residuals of Nickel industry. Memorias de VII Taller de Tecnologías y materiales para la industria del sector. Metánica. 2003. CD-Rom. ISSN-1607-6281.

- [24] GRIFFITH J. Actual status and perspectives of radiotracer applications in the Cuban. Techniques in Agriculture, Industry, Health and Environment. Section Industry. La Habana, 1997
- [25] DOMÍNGUEZ A, et. al. Relación entre la sensibilización del acero 08X18M10T. Informe final del Proyecto Nacional "Equipos nucleónicos de medición de parámetros industriales para el control de calidad y la eficiencia en la Industria Azucarera". 1992.
- [26] GÓNGORA LE, et. al. Pronóstico de áreas favorables para la prospección de uranio en el macizo metamórfico de la Isla de la Juventud. Nucleus. 1995; (19): 19-21.
- [27] PADILLA R, CAPOTE G. Estudio del efecto matriz para determinar uranio en muestras minerales mediante el método gamma espectrométrico. Nucleus. 1995; (19): 10-12.
- [28] GONZÁLEZ LM, RAMÍREZ R. La radioinducción de mutaciones en las plantas y sus beneficios para la agricultura. Nucleus. 2002; (31): 3-7.
- [29] GONZÁLEZ L, IGLESIAS L. Análisis de la variabilidad isoenzimática en mutantes de arroz obtenidos por radioinducción de mutaciones. Nucleus. 1998; (25): 18-23.
- [30] PÉREZ S, et. al. Obtención de nuevas variedades de trigo por mutaciones inducidas. Proceedings of International Symposium on Nuclear and Related Techniques in agriculture, Industry, Health and Environment. La Habana, 1997. p. 31-33.
- [31] Buró Internacional de Pesos y Medidas (BIPM). Base de datos Comparaciones clave [base de datos en línea] <http://kcdb.bipm.org/> [consulta: de 2011].
- [32] OROPESA P, et. al. Patrones cubanos de la medición de los radionúclidos. 8 Simposio Internacional Metrología 2011. La Habana, 2011.
- [33] DOMÍNGUEZ O, et. al. Automatización del monitoreo en tiempo real de la tasa de dosis absorbida en aire debido a la radiación gamma ambiental en Cuba. Nucleus. 2005; (37): 20-24.
- [34] GARCÍA O, et. al. Introducción y desarrollo de la dosimetría biológica en Cuba. Nucleus. 2005; (37): 49-53.
- [35] GARCÍA O, MEDINA J. Quince años del programa cubano con niños de territorios afectados por el accidente de Chernobil. Nucleus. 2005; (37): 39-43.
- [36] CASTRO DÍAZ-BALART F. La física nuclear y la evaluación de datos nucleares en Cuba. Nucleus. 1989; (7): 15-23.
- [37] FERNÁNDEZ DÍAZ JR. The fluctuations of the neutronic dispersion's section and the doorway states (In Russian). Report IAE - 2974. Moscow, 1978. p.32.
- [38] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, SIROTKIN VK. Microscopic approach to neutron total cross-section fluctuation. Nucl. Phys. 1978; A312: 17.
- [39] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, SIROTKIN VK. On the energy dependence of the inelastic cross-section in the presence of doorway states. Il Nuovo Cimento. 1980; 56: 21
- [40] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, SIROTKIN VK. A dynamical approach of the statistical theory of the nuclear reactions. Scientific-technique Report No. 126. Academy of Sciences of Cuba, 1980. p. 25.
- [41] FERNÁNDEZ DÍAZ JR. Revista Ciencias Químicas. 1982; 13: 145.
- [42] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, CABEZAS SOLÓRZANO R. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Antwerp, 1982. p.582.
- [43] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, CABEZAS SOLÓRZANO R. Study for the low-energy neutron inelastic scattering in deformed transitional nuclei: 186W, Journal of. Phys. G. 1983; 9: 1115-1123.
- [44] CABEZAS SOLÓRZANO R, LÓPEZ TUERO JL. Deformación hexadecapolar en núcleos no axiales y su influencia en las ecuaciones de canales enlazados. Nucleus. 1987; (3): 8-14.
- [45] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, CABEZAS SOLÓRZANO R. Proc. Int. Conf. on Nuclear Physics VI. Harrogate, 1986. p. 421.
- [46] IVANOVA SP, CABEZAS SOLÓRZANO R, KORZH JA, et. al. Yad Fiz. 1987; 46: 479.
- [47] IVANOVA SP, CABEZAS SOLÓRZANO R, PEDROSA MARTÍNEZ R, PONOMARIOV V. Yu. Yad Fiz. 1988; 48: 703.
- [48] JOLOS RV, IVANOVA SP, PEDROSA MARTÍNEZ R. Preprint IJIN P4-88-174. Dubna, 1988.
- [49] FERNÁNDEZ DÍAZ JR. La Matriz S y el Análisis de las Secciones de Dispersión en la Aproximación DWBA. Revista Cubana de Física. 1983; 3(1): 7-38.
- [50] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, CABEZAS SOLÓRZANO R, LÓPEZ MÉNDEZ R. Acerca de la Dispersión Inelástica de Neutrones a Bajas Energías en el ^{152}Sm . Revista Cubana de Física. 1984; 4(2): 49-58.
- [51] FERNÁNDEZ DÍAZ JR, CABEZAS SOLÓRZANO R, LÓPEZ MÉNDEZ R. Yad Fyz. 1985; 41: 1508.
- [52] CAPOTE NOY R, LÓPEZ MÉNDEZ R, OSORIO FERNÁNDEZ V, HERRERA PERAZA E. Proc. Int. Symp. on Nucl. Reactions. GDR ZfK-646 (1988)48. Gaussig, 1987.
- [53] CAPOTE NOY R, BAGUER N., PEDROSA MARTÍNEZ R. Preprint IJIN Dubna E4-89-310. Phys.A.
- [54] GARCÍA VELAZCO F, GUZMÁN MARTÍNEZ F, MORA ALFONSO M, RODRÍGUEZ HOYOS O. Int. Symp. On Nucl. Assion. Gaussig. GDR. 1988.
- [55] EGOROV S, RUBCHENYA VA, GARCÍA F, RODRIGUEZ O. Combined method of deformed nuclei level density calculations. INDC -006/E. IAEA., 1992.
- [56] GARCÍA F, RODRÍGUEZ O, GARROTE., LÓPEZ E. A combined method in fission cross section calculations. J Physics G. 1993; 19(12): 2157-2166.
- [57] DESDÍN L., SZEGEDI S, CSIKAI J. Measurement of the fission cross-section ratio for $^{237}\text{Np}/^{235}\text{U}$ around 14 MeV neutron energies. Acta Physica Hungarica. 1989; 65(2-3).
- [58] GONZÁLEZ MATEU D. Preparación de blancos nucleares de uranio y torio. Nucleus. 1989; (6): 10-12.
- [59] BECHBARZH F, MONTERO CABRERA ME, RIGOL PÉREZ JM, et. al. Yad Fiz. 1987; 45: 3.
- [60] BECHBARZH F, MONTERO CABRERA ME, POSPISHIL S, TELEZHNIKOV SA. Yad Fiz. 1986; 44: 3.
- [61] GLEDENOV YU M, KVITEK J, MARINOVA S, POPOV YU, P, RIGOL PÉREZ JM, SALASTKI VL Z. Phys. A. 1982; 308: 10. Z. Phys. A. 322: 685.
- [62] ANTONOV A, VIESNA VA, GLEDANOV YU M, et. al. Yad Fiz. 1988; 48: 305.
- [63] ORTLEPP HG, FROMM WD, ROMAGUERA FERNÁNDEZ A, et. al. Symp. on Heavy Ions. Dresden, 1988.
- [64] Proyecto de Asistencia Técnica del OIEA CUB/1/005.
- [65] GANDARIAS CRUZ D, MEDINA ACOSTA MA. INDC (CUBA)-001-/G, pág.13.
- [66] GARCÍA VF, RODRIGUEZ HO, GARROTE PE, RUBCHENYA VA. DENCOM: Code for level density calculation of deformed nuclei using a combined method. Computer Physics Communication. 1995; 86(1-2): 129-146.
- [67] ARRUDA-NETO J, YONOEMA M, DÍAZ J, et. al. Electroffission of Pu 239 in the energy range 7-12 MeV. Phys. Rev C. 1997; 55(5): 2471.
- [68] GONÇALVES M, DUARTE S, GARCÍA F, RODRÍGUEZ O. PRESCOLD code: Calculation of the half life for alpha decay, cluster radioactivity and cold fission process. Comp. Phys. Comm. 1997; 107(1): 246-252.
- [69] SOTOLONGO O, GUZMÁN F, RODRÍGUEZ O, GARCÍA F. Scaling laws in mass distribution in the Universe. Nucleus. 1997; (22): 14.
- [70] DUARTE S, RODRÍGUEZ O, TAVARES O, GONÇALVES M, GARCÍA F, GUZMÁN F. Cold fission yield calculation for varying and constant mass asymmetries. Phys. Rev. C. 1998; 57(5): 2516.
- [71] GARCÍA F, GARROTE E, GUZMÁN F, RODRÍGUEZ O. Análisis sistemático de las secciones eficaces de fisión de los isótopos del uranio y del plutonio. Rev. Cub. Física. 1998; 15(1): 51.
- [72] ARRUDA-NETO J, SIMIONATTO S, LIKHACHEV V, GARCIA F, MESA J. DEPPMAN A, RODRIGUEZ O, GUZMAN F. Photoneutron multiplicities of preactinides nuclei at energies above the Pion threshold. Nuclear Physics A. 1998; 638(3-4): 701-713.
- [73] TAVARES O, DUARTE S, RODRÍGUEZ O, et. al. Effective liquid drop description for alpha decay of atomic nuclei. J Physics G: Nuclei and Particle. 1998; 24(9): 1757.
- [74] RODRÍGUEZ O, GUZMÁN F, TAVARES O, et. al. New valley of cold fission and clouster radioactivity processes for nuclei far from the β -stability line. Phys. Rev. C. 1999; 59: 253.
- [75] GARCÍA F, RODRÍGUEZ O, MESA J. et. al. BARRIER Code: Calculations of fission barriers. Comp. Phys. Comm. 1999; 120(1): 57-70.
- [76] DÍAZ A, GUZMÁN F, RODRÍGUEZ O. Cold events in thermal-neutron-induced fission of heavy nuclei. European Phys. J. A. 1999; 4: 51-59.

- [77] RODRÍGUEZ O, GARCÍA F, DIAS H, et. al. LINDEN: Code for level densities calculations using the Lipkin-Nogami method. *Comp. Phys. Comm.* 2001; 137(3): 405-414.
- [78] ARRUDA J, YONOEMA M, DÍAZ J, et. al. Photofission and multiple nucleon photoemission of ^{232}Th at intermediate energies. *J. of Modern Phys.* 2001
- [79] GARCÍA F, RODRÍGUEZ O, GONÇALVES M, et. al. Alpha decay and nuclear deformation: The case for favoured alpha transitions of even-even emitters. *J. Phys. G: Nuclei and Particle Physics.* 2000; 26(6): 755.
- [80] GARCÍA F, RODRÍGUEZ O, GUZMÁN F, et. al. Particle-hole level densities in deformed nuclei. *Phys. Rev. C.* 1999; 60: 064311.
- [81] GUZMÁN F, GONÇALVES M, TAVARES O, et. al. Proton radioactivity from proton-rich nuclei. *Phys. Rev. C.* 1999; 59(5): 2339.
- [82] Geraldo L., Semmler R, González O, et. al. Photofission Cross Sections for ^{237}Np in the energy interval from 5.27 to 10.83 MeV. *Nucl.Sci and Eng.* 2000; 136: 357.
- [83] Dimarco A.,Duarte S, Tavares O, et. al. Effect of nuclear deformation on the alpha-decay half-life of even-even alpha emitters. *CBPF-NF-018/2000, Int. J Mod Phys. Rev E* 2000; 9(3): 205.
- [84] DUARTE SB, TAVARES O, GUZMÁN F, et. al. From proton emission to cold fission: a unified theory of spontaneous nuclear decay processes. *Atom. Data and Nucl. Data Table.* 2002; 80.
- [85] LIKHACHEV V, ARRUDA J, RODRÍGUEZ O, et. al. Contribution of quasielastic scattering to the inclusive electrofission cross section of uranium at $E_0=100\text{-}250\text{ MeV}$. *Bras. J. of Phys.* 2001; 31: 2.
- [86] LIKHACHEV V, MESA J, CARLSON B, et. al. Quasifree electrofission of uranium 238. *Phys. Rev. C.* 2001; 65: 44611
- [87] DEPPMAN A, TAVARES O, DUARTE S, et. al. Photofissility of actinide nuclei at intermediate energies. *Phys. Rev. Letters.* 2001; 87: 18.
- [88] ARRUDA J, MESA J, RODRIGUEZ O, et. al. The role of ^{237}Np transitional levels in its (γ, f) cross section structures near the threshold. *Physical Review Letters.* 2001
- [89] DUARTE S, TAVARES O, GUZMÁN F, et. al. Superheavy elements formation in cold fusion reactions. *Phys. Rev. C.* 2001.
- [90] CASTRO SMIRNOV F; RODRÍGUEZ HOYOS O, GUZMÁN FERNANDO, COMAS LIJASHEV V. Fusion cross sections in the superheavy elements formation process. *Nucleus.* 2005; (Especial): 42-48.
- [91] COMAS LIKHASHEV V, RODRÍGUEZ HOYOS O, GUZMÁN F, CASTRO SMIRNOV, F. Two proton emission in the efective liquid drop model(ELDM). *Nucleus.* 2005; (Especial): 5-12.
- [92] DUARTE S, TAVARES O, GONÇALVES M, et. al. Half-life predictions for decay modes of superheavy nuclei. *CBPF-NF-022/04* (2004). *J Phys G-Nucl Part Phys.* 2004; 30(10): 1487-1494.
- [93] ARRUDA NETO JDT, MESA J, GARCÍA F, et. al. The role of transitional levels in ^{237}Np (γ, f) – perspectives to study highly deformed systems. *Phys. Rev C.* 2006; 74: 034324.
- [94] DÍAZ RIZO O, MANSO GUEVARA MV, HERRERA PERAZA EF, et. al. A reactor power dependence for the k_0 neutron flux parameters. *J Radioanal Nucl Chem.*1997; 221(2): 241-244.
- [95] Herrera E, Díaz Rizo O, Manso MV, et. al. Development and implementation of the k_0 -standardization method. Part I. *J Radioanal Nucl Chem.* 1999; 240(2): 437-443.
- [96] DÍAZ RIZO O, HERRERA O, MANSO MV, et, al. Development and implementation of the k_0 -standardization method. Part II. *J Radioanal Nucl Chem.* 1999; 240(2): 445-450.
- [97] DÍAZ RIZO O, ÁLVAREZ PELLÓN I, HERRERA PERAZA EF, et. al. HAV-1: A Multipurpose Monitor for Reactor Epithermal Neutron Flux Characterization. *J Radioanal Nucl Chem.* 1997; 220(1): 99-102.
- [98] DÍAZ RIZO O, GRACIANO AM, et. al. Epithermal neutron flux characterization of the IEA-R1 research reactor, Sao Paulo, Brazil, for use in INAA. *JJ Radioanal Nucl Chem.* 2005; 266(1): 153-157.
- [99] Montero ME, Herrera E, Cabrera O, et. al. Elementos trazas de las rocas reservorios de petróleo en los yacimientos de Habana Matanzas. *Nucleus.* 1997; (23): 8-13.
- [100] DÍAZ RIZO O, GRIFFITH J. Soil-plant relation in sugar cane by INAA. *J Radioanal Nucl Chem.* 1996; 213(5): 377-384.
- [101] GELEN A, LÓPEZ N, DÍAZ RIZO O, et. al. Gamma Activation Analysis of sediments at Havana bay (Cuba). *J Radioanal Nucl Chem.* 2005; 266(3): 485-490.
- [102] DÍAZ RIZO O, GELEN A, FIGUEREIDO AMG, et. al. REE enrichment in Havana bay surface sediments using INAA. *J Radioanal Nucl Chem.* 2012; 292: 81-84.
- [103] PÉREZ DÍAZ M, DÍAZ RIZO O, DOPICO R, et. al. Administered Activity Optimization in patients studied by Equilibrium Gated Radionuclide Ventriculography using Pyrophosphate and Tc-99m. *Nucl Med Commun.* 2002; 23: 347-353.
- [104] PÉREZ M, APARICIO E, DÍAZ RIZO O, et. al. Administered Activity Optimization in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAG3 Renography for Adults. *J Nucl. Med Technol.* 2003; 31: 216-221.
- [105] PÉREZ DÍAZ M, DÍAZ RIZO O. Métodos de optimización de la actividad a administrar al paciente en estudios de Medicina Nuclear. *Rev Esp Fis Médica.* 2006; 6(1): 32-36.
- [106] PÉREZ DÍAZ M, DÍAZ RIZO O, APARICIO E, et. al. Activity Optimization in HMPAO - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Brain SPECT. *Health Phys.* 2007; 93(1): S23.
- [107] SÁNCHEZ C, DÍAZ O, RODRÍGUEZ M, et. al. Mejoramiento de la cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral con la tecnología médico-nuclear disponible en el país. *Nucleus.* 2002; (31): 8-17.
- [108] SÁNCHEZ C, PUCHAL R, DÍAZ RIZO O, ÁGUILA A. Problemas que afectan la cuantificación en SPECT. *Rev Esp Fis Médica.* 2003; 4(1): 31-41.
- [109] Sánchez Catases CA, Díaz Rizo O, et. al. Métodos para el mejoramiento de la cuantificación relativa del flujo sanguíneo cerebral mediante SPECT. *Alasbimn Journal.* 2003; 6(22).
- [110] REYES H, LÓPEZ PINO N, DÍAZ RIZO O, et. al. Environmental Radioactivity Study in Surface Sediments of Guacanayabo Gulf (Cuba). *AIP Conf. Proc.* 2009; 1139: 156-157.
- [111] DÍAZ RIZO O, GELEN RUDNIKAS A, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Radioactivity levels and radiation hazard of healing mud from San Diego River, Cuba. *J Radioanal Nucl Chem.* 2013; 295: 1293-1297.
- [112] GELEN A, DÍAZ O, SIMÓN MJ, et. al. ^{210}Pb of sediments from Havana Bay. *J Radioanal Nucl Chem.* 2003; 256(3): 561-564.
- [113] ZERQUERA JT, PRENDES M, FERNANDEZ IM, et. al. Studies on Internal Exposure Doses Received by the Cuban Population due to the Intake of Radionuclides from the Environmental Sources. *Radiat Prot Dosim.* 2006; 121(2): 168-174.
- [114] ZERQUERA JT, PRENDES M, DÍAZ RIZO O. Distribution of doses received by Cuban population due to environmental sources of radioactivity. *Radiat Prot Dosim.* 2007; 123(1): 118-121.
- [115] CASANOVA O, LÓPEZ N, GELEN A, et. al. Shielding analysis of the Microtron MT- 25 bunker using the MCNP-4C Code and NCRP Report 51. *Radiat Prot Dosim.* 2004; 109(3): 189-195.
- [116] HEREDIA CARMONA J, DÍAZ RIZO O. Experimental and Monte Carlo determination of mass absorption coefficients for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ beta particles in organic compounds. *Nucleus* 2009; (45): 26-31.
- [117] DÍAZ RIZO O, OLIVARES REUMONT S, VIGURI FUENTE J, et. al. Copper, Zinc and Lead Enrichments in Sediments from Guacanayabo Gulf, Cuba, and its Bioaccumulation in Oysters, *Crassostrea rhizophorae*. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2010; 84(1): 136-140.
- [118] DÍAZ RIZO O, FONTICIELLA MORELL D, ARADO LÓPEZ JO, et. al. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban topsoils from Las Tunas city, Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2013; 91: 29-35.
- [119] SILVEIRA GOMES P, PADRÓN I, et. al. Effect of the breakup on the fusion end elastic scattering of weakly bound projectiles on ^{64}Z . *Physical Review C: Nuclear Physics.* 2005; 71: 034608.
- [120] MARTÍ GV, GOMES PRS, RODRÍGUEZ MD, et. al. Fusion, reaction and break-up cross sections of ^9Be on a light mass target. *Physical Review C: Nuclear Physics.* 2005; 71(2): 027602.
- [121] SILVEIRA GOMES P, PADRÓN I, et. al. Uncertainties in the comparison of fusion and reaction cross section of different system involving weakly bound nuclei. *Phys Rev C: Nucl Phys.* 2005; 71: 017602.
- [122] SILVEIRA GOMES P, PADRÓN I, LUBIAN J. Fusion of weakly bound nucleo. *J Radioanal Nucl Chem.* 2007; 272(2): 215.218.
- [123] GARCÍA VF, PADRÓN I, et. al. Threshold anomaly in the elastic scattering of ^6He on ^{209}Bi . *Physical Review C: Nuclear Physics.* 2007; 76: 067603.
- [124] GARCÍA A, PADRÓN I, SILVEIRA GOMES P, et. al. Limitation of double holding potentials to simulate the polarization in reactions

- involving halo nuclei. Nucl Phys A. Nuclear and Hadronic Physics. 2008; 806: 146-155.
- [125] ALESSANDRO B, et. al. Operation and calibration of the Silicon Drift Detectors of the ALICE experiment during the 2008 cosmic ray data taking period The ALICE-SDD Group. J Instrument. 2010; 5: P04004.
- [126] Allen J, et al. Performance of prototypes for the ALICE electromagnetic calorimeter. Nuc Instrum Meth Phys ResA. 2010; 615: 6-13.
- [127] AAMODT K, et al. Alignment of the ALICE Inner Tracking System with cosmic-ray tracks. J Instrument 2010; 5: P03003.
- [128] AAMODT K, et al. Midrapidity Antiproton-to-Proton Ratio in pp Collisions at 0.9 and 7 TeV Measured by the ALICE Experiment. Phys Rev Lett. 2010; 105: 072002.
- [129] AAMODT K, et. al. Production of pions, kaons and protons in pp collisions $\sqrt{s} = 900$ GeV with ALICE at the LHC. Eur Phys J. C. 2011; 71(6): 1655.
- [130] CASANOVA DÍAZ A, CONESA BALBASTRE G, GARCÍA TRÁPAGA C. High p_T γ and jets predictions with PYTHIA and HERWIG in p-p collisions at $\sqrt{s} = 14$ TeV at LHC. Nucleus. 2011; (50): 12-17.
- [131] AAMODT K, et al. Neutral pion and η meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV and 7 TeV. Phys Lett B. 2012; 717: 162-172.
- [132] AAMODT K, et. al. Particle-yield modification in jet-like azimuthal di-hadron correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys Rev Lett. 2012; 108: 092301.
- [133] AAMODT K, et. al. Suppression of high transverse momentum prompt D mesons in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. J High Ener Phys. 2012; 9: 112.

Recibido: 12 de diciembre de 2014

Aceptado: 17 de diciembre de 2014