



DIVISIÓN DE COORDINACIÓN,
EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO
CIENTÍFICO Y TÉCNICO
SUBDIVISIÓN DE PROGRAMAS
TEMÁTICOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

INFORME CIENTIFICO-TECNICO FINAL

Proyectos Coordinados de Generación de Conocimiento 2021

Modalidades: Investigación No Orientada e Investigación Orientada

A. Datos de coordinación	
<i>Relacione los subproyectos que participan en el proyecto coordinado</i>	
Proyecto coordinador (1)	Referencia de proyecto: PID2021-122140NB-C31
IP 1	Pol Forn-Díaz
IP 2*	
Entidad	Instituto de física de altas energías (IFAE)
Centro	IFAE
Subproyecto (2)	Referencia de proyecto: PID2021-122140NB-C32
IP 1	Gemma Rius Suñé
IP 2*	
Entidad	Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Centro	Instituto de microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM)
Subproyecto (2)	Referencia de proyecto: PID2021-122140NB-C33
IP 1	Joaquim Palacio Navarro
IP 2*	
Entidad	Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)
Centro	Unidad de Investigación

Cree tantas tablas como subproyectos formen parte de proyecto coordinado.

* Rellenar si procede.

B. Datos del subproyecto	
Relacione los datos actuales del subproyecto.	
<i>En caso de que haya alguna modificación, indíquelo en la casilla B2</i>	
B1. Datos del subproyecto	
Modalidad	Coordinado
Referencia proyecto	PID2021-122140NB-C33
Área/Subarea	Física de partículas y nuclear
Prioridad Temática*	Ciencias físicas
Título Proyecto	Estación para qubits superconductores bajo tierra
IP1	Joaquim Palacio Navarro
Código Orcid:	0000-0003-0374-100X
IP2**	
Código Orcid:	
Entidad Beneficiaria	LABORATORIO SUBTERRÁNEO DE CANFRANC
Centro	UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DEL LSC
Fecha de inicio	01/09/2022
Fecha final	28/2/2026
Duración	3 AÑOS y 6 meses
Total concedido (costes directos)	217.558€

* Para modalidad Investigación Orientada

** Rellenar si procede

B2. Descripción de modificaciones en los datos iniciales del subproyecto

(Cambio de IP, entidad, centro, modificación del periodo de ejecución...)

Cambio de IP: Desde el 27 de marzo de 2024, Joaquim Palacio ejerce como IP1 del proyecto en el nodo LSC, debido a la marcha del IP1 (Iulian Bandac) del centro del LSC, el 31 de diciembre del 2023.

Modificación del periodo de ejecución: El 4 de diciembre de 2024 se cursó la solicitud de prórroga de 6 meses del proyecto, que fue resuelta de manera favorable el 18 de marzo de 2025.

Contratación de personal: Motivado en gran parte por el primer punto de este apartado (i.e, cambio de IP), y teniendo en cuenta que dentro de la solicitud original estaban contemplados 134,670.00 euros para la contratación de personal, se procedió a la contratación de dos personas con el el perfil de licenciado.

C. Personal activo en el proyecto

Tiene que relacionar la situación de **todo** el personal de las entidades participantes que haya prestado servicio en el proyecto y cuyos costes (dietas, desplazamientos, etc.) se imputen al mismo.

C.1. Equipo de investigación

Incluido en la solicitud original

	Nombre	NIF/NIE	Función en el proyecto	Fecha de baja	Observaciones
1	Iulian Bandac	Y1003468S	Investigador Principal:	31/12/2023	Baja por abandono del centro.
2	Jose Maria Calvo	25191796B	Engineer: LSC management, safety maintenance		
3					

No incluido en la solicitud original

	Nombre	NIF/NIE	Función en el proyecto	Fecha de alta	Fecha de baja	Observaciones
1	Joaquim Palacio	53292109M	Investigador Principal: radiopureza	27/3/2024		Cambio de IP aprobado
2	Victor Pérez	77219147M	Doctorando: plataforma software, radiopureza	1/7/ 2025	10/10/2025	Contratado con fondos del proyecto desde 1/7/2025. Baja por abandono del centro.
3	Ariadna Gomez del Pulgar	47299319X	Doctorando: Desarrollo de QBits (colaboración IFAE)	6/11/ 2024	6/5/ 2025	Contratado con fondos del proyecto desde 6/11/2024. Baja por abandono del centro.

Total personal en el equipo de investigación: 5 (2 a la finalización)

C.2. Equipo de Trabajo

	Nombre	NIF/NIE	Función en el proyecto	Inicio	Fin	Observaciones
1	Alfredo Gimeno	17746156T	Technician: Machining		1/9/2025	Baja por abandono del centro.
2	Victor Gimenez	18164779T	Technician: Electricity			

Total personal en el equipo de trabajo: 2 (1 a la finalización)

La solicitud de “Altas” y “Bajas” de personal investigador en el **equipo de investigación** ha debido ser tramitada de acuerdo con **las instrucciones de ejecución y justificación** expuestas en la página web de la convocatoria. La incorporación de personal que haya participado en el proyecto en el **equipo de trabajo** no necesita autorización por parte de la AEI, pero su actividad debe incluirse y justificarse en este informe.

D. Resumen del proyecto coordinado para difusión pública (a rellenar por el proyecto coordinador) *

Resume los principales avances y logros obtenidos del proyecto con una **extensión máxima de 30 líneas**, teniendo en cuenta su posible difusión pública (páginas webs institucionales).

**Este apartado debe ser cumplimentado por el proyecto que coordina, pero debe incluirse también en los informes de los subproyectos que forman parte del proyecto coordinado*

El proyecto ICRQ (Impact of Cosmic Radiation on Qubits) es un proyecto coordinado de investigación científica orientado a evaluar y mitigar el impacto de la radiación ionizante y las partículas cósmicas sobre los cúbits superconductores, tecnología clave en el desarrollo de la computación cuántica.

El proyecto ICRQ reúne a investigadores del IFAE, el LSC y el IMB, sentando bases científicas y tecnológicas relevantes para el futuro de la computación cuántica en entornos reales.

El proyecto ha abordado el estudio de la viabilidad de laboratorios de medida de cúbits ubicados en superficie —entornos no protegidos por roca subterránea— frente a la radiación ionizante. En este ámbito, se ha diseñado y comenzado a implementar un sistema de apantallamiento realista formado por capas de plomo, cobre y polipropileno, compatible en tamaño y peso con instalaciones convencionales de laboratorios de cúbits en superficie. Además, se ha realizado un estudio sobre cómo la orientación angular del chip afecta a la cantidad y energía de los impactos cósmicos recibidos, permitiendo así la minimización del impacto de la radiación ionizante en superficie.

Además, tomando el aluminio como material de referencia en circuitos superconductores cuánticos, se han desarrollado materiales y arquitecturas de chip más resistentes a la radiación con la fabricación y caracterizado de múltiples generaciones de circuitos superconductores con materiales como tántalo, niobio y multicapas superconductor-metal normal, obteniendo resultados funcionales muy prometedores a través de estudios paramétricos en multiplexado, acoplamiento, y respuesta a la temperatura de operación. Se ha realizado también un trabajo sobre la longitud de penetración magnética del aluminio superconductor en función del espesor del material, logrando identificar el rango de espesores inferiores a 100nm donde el material puede proteger del impacto de la radiación altamente ionizante debido a la presencia de vórtices.

Finalmente, se ha realizado una primera campaña de medida en entornos subterráneos de bajo fondo radiactivo en el Laboratorio Subterráneo del Gran Sasso (Italia), junto a un análisis de radiopureza validando los materiales empleados en los circuitos superconductores utilizados en el proyecto, con el objetivo final de observar los mecanismos microscópicos del ruido inducido por radiación.

E. Informe de progreso y resultados del proyecto coordinado (a rellenar por el proyecto coordinador)*

Se debe reflejar el progreso de las actividades del proyecto coordinado y el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos

**Este apartado debe ser cumplimentado por el proyecto que coordina, pero debe incluirse también en los informes de los subproyectos que forman parte del proyecto coordinado*

E1. Desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto coordinado (a rellenar por el proyecto coordinador)

Describe los objetivos específicos del proyecto coordinado y el grado de cumplimiento de los mismos (porcentaje estimado respecto al objetivo planteado señalando la participación de los subproyectos en su desarrollo). Extensión máxima 3 páginas

Objetivo 1 Determinar la viabilidad de estaciones de medida de qubits en superficie para aplicaciones en computación cuántica en relación con el impacto de radiación altamente ionizante y partículas cósmicas.	Progreso y consecución del objetivo 1 -Grado de cumplimiento final: 75% (100%) Con respecto a este objetivo, el proyecto ICRQ ha determinado qué medidas de contención contra la radiación ionizante pueden tomarse para hacer viables las estaciones de medida de cúbits en superficie. A pesar de no haber logrado alcanzar todos los hitos asociados a este objetivo, se han sentado las bases para lograr dicha viabilidad. Mediante la simulación de trayectorias de radiación ionizante y la medida de radiopureza de materiales presentes en este tipo de experimentos, el LSC y el IF AE han logrado demostrar una geometría realista de apantallamiento contra la radioactividad ambiental externa al criostato, formada por una combinación de plomo, cobre y polipropileno, las dimensiones y el peso de la cual son compatibles con laboratorios de cúbits en superficie. Mediante un apantallamiento adicional de plomo y cobre en el interior del refrigerador y una orientación angular vertical para reducir el impacto de los rayos cósmicos, se completa la propuesta de apantallamiento en superficie. Esta propuesta de diseño cumple los mismos requisitos que el planteamiento inicial del proyecto, en el que se planeaba la adquisición de un refrigerador radiopuro móvil, algo que se descartó durante el proyecto debido a la falta de disponibilidad de componentes radiopuros en el mercado, y el elevado coste que conllevaría su construcción. La solución encontrada en ICRQ es, por lo tanto, también la más viable, coste económico incluido. La propuesta de apantallamiento ha sido parcialmente implementada en el proyecto con la instalación de las capas de plomo y cobre interiores en uno de los refrigeradores preexistentes en el laboratorio del IF AE. Un factor relevante de la viabilidad de estaciones de medida de cúbits en superficie es la resiliencia a impactos de radiación cósmica, ya que esta no permite atenuación. Sin embargo, a través del estudio realizado conjuntamente por el IF AE y el LSC de la dependencia angular en un chip se logró entender las limitaciones que la radiación cósmica impone y cómo minimizarla. Un chip orientado paralelo al suelo recibe un mayor número de impactos, ya que hay menos espesor de la atmósfera para atenuar la radiación que incide de forma normal al chip. Estos impactos son de	Subproyectos implicados: RaTeQ MiNaRe USQS
---	---	---

	menor energía comparado con el caso en el que el chip se orienta hacia el horizonte, recibiendo menos impactos, pero más energéticos, provenientes de eventos que cruzan el chip durante mayor tiempo, depositando así más energía. Estos resultados se publicaron en la revista 'New Journal of Physics'. Se considera que este objetivo no se ha alcanzado completamente dado que el apantallamiento está todavía en vías de ser validado por el IFAE mediante dos tipos de medidas: por un lado, usando un bolómetro como detector directo de radiación montado en un chip con un cúbit, y por el otro lado, a través de un cúbit coherente utilizando la sensibilidad a la radiación ionizante de sus estados excitados. Ambos métodos han sido comprobados independientemente, siendo la medida combinada de ambos la validación pendiente. Este dispositivo experimental será el primero en el mundo en identificar el impacto de la cantidad de energía depositada en el chip y el impacto que representa para el cúbit.	
Objetivo 2 Observar los mecanismos del ruido microscópico inducido en los qubits superconductores por parte de la radiación ionizante y las partículas cósmicas.	Progreso y consecución del objetivo 2 -Grado de cumplimiento final: 25% (100%) Dentro de este objetivo se esperaba poder realizar un estudio detallado de los fenómenos microscópicos que tienen lugar en los chips con cúbits cuando ocurre un impacto de alta energía, y así relacionar las fluctuaciones temporales de la coherencia de los cúbits debido a estos eventos. Un entorno ideal para este tipo de medidas es un laboratorio subterráneo, donde la roca por encima del laboratorio reduce el flujo de radiación cósmica, y el apantallamiento alrededor de los conjuntos de medida elimina mayoritariamente la radioactividad ambiental. Abordar este objetivo implicaba medir cúbits pre-caracterizados en superficie en un laboratorio subterráneo usando un equipo de baja emisividad, algo que no ha sido posible. Este objetivo ha sufrido el mayor impacto proveniente de los distintos retrasos acumulados a lo largo del proyecto. De entrada, ya era el objetivo con mayores riesgos dada su dependencia a financiación externa para llevar a cabo la adquisición e instalación de un refrigerador de dilución en el LSC, algo que finalmente no se produjo. La acción de contingencia prevista en la solicitud de prórroga de utilizar un refrigerador alternativo instalado en el LSC perteneciente a otro proyecto, el proyecto CROSS liderado por el Prof. Andrea Giuliani quien ha sido un colaborador activo en el proyecto ICRQ, tampoco se pudo ejecutar. El	Subproyectos implicados: RaTeQ MiNaRe USQS

	proyecto CROSS entró en fase de operación a principios de 2025, momento en el que aún se estaba ultimando la producción del primer cúbit, lo que imposibilitó la disponibilidad del criostato para el uso dentro del proyecto ICRQ. Por otro lado, tampoco fue posible realizar medidas de cúbits a poca profundidad. El plan propuesto inicialmente requería la adquisición de un refrigerador portátil con los fondos solicitados y los costes del mercado en 2021. Los fondos finalmente disponibles y el aumento inesperado de costes debido a la inflación mundial hicieron la adquisición inviable. La alternativa propuesta en la petición de prórroga a finales de 2024 requería establecer contacto con un laboratorio externo al proyecto para poder medir cúbits pre-caracterizados en superficie. El contacto se estableció de forma satisfactoria con el grupo de la Dra. Petricca en el Instituto Max Planck en Múnich, pero las medidas no se pudieron realizar debido al tiempo que conllevó la caracterización en superficie. Estas medidas están previstas más allá del proyecto ICRQ. Aun así, el LSC estableció un convenio con el Laboratorio Subterráneo del Gran Sasso en Italia, para usar su estación de medida de baja emisividad con sistema ya preparado para medir circuitos superconductores. Gracias a ello, se llevaron a cabo medidas de resonadores superconductores fabricados y previamente caracterizados en criogenia por el IMB, en un servicio externalizado, en superficie. Estos experimentos preliminares en profundidad no permitieron observar una mejora proveniente del entorno de bajo fondo en base al comportamiento y figuras de mérito de los resonadores superconductores estudiados.	
Objetivo 3: Implementar técnicas avanzadas en los chips para reducir el impacto de la radiación ionizante y las partículas cósmicas en el rendimiento de los dispositivos superconductores	Progreso y consecución del objetivo 3 -Grado de cumplimiento final: 60 % (100%) Este objetivo perseguía la reducción del impacto de la radiación cósmica en circuitos superconductores con métodos implementados en el propio chip, tales como el uso de materiales que permitan gestionar mejor la presencia de cuasipartículas o de fonones, o arquitecturas que reduzcan el impacto de la radiación ionizante. El objetivo ha sido logrado parcialmente. Por un lado, el IMB ha desarrollado capas delgadas superconductoras de varios materiales tanto puros como compuestos, así como multicapas que incluyen combinaciones con materiales normales (no superconductores). En base a estos desarrollos se han fabricado y caracterizado varias generaciones de circuitos	Subproyectos implicados: RaTeQ MiNaRe USQS

	superconductores formados por conjuntos de resonadores. El objetivo final de validar una mayor resiliencia a la radiación ionizante podría ser estudiada mediante incorporación de elementos no-lineales en los circuitos, para obtener cúbits en las distintas capas delgadas superconductoras desarrolladas. Entre los logros relativos la plataforma física, el IMB también ha estudiado la calidad intrínseca de distintos sustratos: silicio, zafiro y carburo de silicio, en base a las características operativas de dispositivos resonadores superconductores, principalmente basados en capas delgadas de aluminio, obteniendo buenas características para todos ellos y resultados coherentes con la literatura. En paralelo al estudio de los sustratos, el IFAE y el IMB han logrado conjuntamente caracterizar la dependencia de la longitud de penetración magnética del aluminio con el espesor de la capa fina superconductora. Los resultados obtenidos han permitido establecer el límite en el que el material se comporta como superconductor de tipo II, donde aparecen vórtices que pueden reducir la densidad de cuasipartículas, lo que podría usarse para reducir el impacto de la radiación cósmica. Los resultados fueron publicados en la revista 'Superconductor Science and Technology'. En la segunda fase del proyecto, el IMB ha producido resonadores con materiales alternativos al aluminio con mayor gap superconductor como son el tántalo o el niobio, con los que debería ser más difícil excitar cuasipartículas a partir del impacto de radiación ionizante. Con un propósito similar, las multicapas de material superconductor incorporando e.g. una capa fina de material normal responden a la idea de que esta actúe como trampa de cuasipartículas. Se han fabricado circuitos superconductores con una buena parte de las opciones disponibles y su operatividad ha sido validada en criogenia, todas exhibiendo buenas o muy buenas características funcionales. La investigación de métodos de mitigación de fonones generados por impactos de alta energía no pudo llevarse a cabo debido a la dificultad de implementar las simulaciones con GEANT4, al requerir una cantidad de tiempo y recursos mucho mayor de la disponible dentro del proyecto ICRQ.	
--	--	--

E2. Actividades realizadas relacionadas con la coordinación del proyecto (a rellenar por el proyecto coordinador)

Describe las **actividades de coordinación** realizadas para alcanzar los objetivos planteados en el proyecto. Indique para cada actividad los subproyectos implicados. **Extensión máxima 1 página.**

Actividad 1: Instalación de estación de medida de qubits superconductores subterránea.

Aunque el plan inicial contemplaba realizar medidas de cúbits en el LSC o en el refrigerador del proyecto CROSS, las dificultades encontradas llevaron a priorizar medidas en superficie. No obstante, se lograron realizar medidas de resonadores producidos por el IMB en el laboratorio subterráneo del Gran Sasso (Italia), en una actividad conjunta entre los subproyectos USQS y MiNaRe. Los resultados muestran que los niveles de radiopureza de los materiales utilizados (plataforma de Al en Si) descartarían efectos de activación significativos en condiciones normales de exposición. Asimismo, las medidas de resonadores en bajo fondo de radiación no evidencian mejoras sustanciales respecto a condiciones en superficie, lo que sugiere que la radiación de fondo no es el factor limitante principal para estos elementos de lectura.

Actividad 2: Definición de dispositivos de referencia sin protección contra la radiación ionizante.

El subproyecto RaTeQ intensificó las medidas en superficie, verificando la alta coherencia de un cúbit transmon en cavidad tridimensional e integrando un bolómetro NTD en el mismo chip. Se han observado impactos de radiación en el bolómetro y coherencia cuántica entre estados excitados del cúbit, cuya sensibilidad a la carga eléctrica lo hace especialmente susceptible a impactos de radiación cósmica. Quedó pendiente la medida simultánea de ambos, siendo la primera vez que se podrá identificar el impacto cuantitativo de la radiación en la coherencia de cúbits. Por su parte, el subproyecto MiNaRe estableció dispositivos de referencia incorporando Tántalo y Niobio como alternativas al aluminio. El estudio de sustratos —Silicio, Carburo de Silicio y Zafiro— no reveló diferencias significativas entre ellos, siendo un factor subdominante en el rendimiento global. Se establecieron normas de diseño de circuito y layout, aunque la resiliencia frente a la radiación ionizante queda pendiente de demostración.

Actividad 3: Construcción y caracterización de una estación de medida de cúbits en superficie con protección a la radiación ionizante.

En colaboración con la Prof. María Martínez (Universidad de Zaragoza), se desarrollaron simulaciones GEANT4 del diseño de un blindaje en superficie, definiendo una geometría óptima basada en plomo, cobre y polietileno, compatible con experimentos de cúbits. También se realizó un estudio de la distribución angular y energética de la radiación cósmica mediante bolómetros, en colaboración con el grupo del Prof. Giuliani. La verificación experimental del blindaje no se llevó a cabo en el marco del proyecto y se plantea como trabajo futuro.

Actividad 4: Definición de dispositivos de referencia con protección contra la radiación ionizante.

El subproyecto MiNaRe avanzó en el desarrollo de dispositivos con protección intrínseca, explorando estructuras superconductoras multi-capa y trampas de cuasipartículas mediante la estructuración del plano de masa eléctrica, técnicas orientadas a reducir la densidad de cuasipartículas excitadas. En un trabajo conjunto RaTeQ–MiNaRe, se estudiaron resonadores de aluminio de entre 25 y 200 nm de espesor para determinar la longitud de penetración magnética, parámetro que define el umbral a partir del cual el aluminio exhibe comportamiento de superconductor tipo II, con presencia de vórtices utilizables como pozos para cuasipartículas y mayor resiliencia ante la radiación ionizante. La verificación experimental de estas estructuras se prevé más allá del proyecto ICRQ.

F. Informe de progreso y resultados del subproyecto

Se debe reflejar el progreso de las actividades del subproyecto y el cumplimiento de los objetivos propuestos

F1. Desarrollo de los objetivos planteados en el subproyecto

Describe los objetivos específicos del subproyecto y el grado de cumplimiento de los mismos (porcentaje estimado respecto al objetivo planteado).

Objetivo 1: Develop a software platform based on G4CMP (GEANT4 for Condensed Matter Physics) to simulate the effect of ionizing radiation on the device substrate by the creation of substrate and bulk phonons. This software will be used by all partners to both design on-chip patterns to mitigate the phonon impact, as well as to characterize qubit response in a given experimental setting, above and below ground.

Progreso y consecución del objetivo 1: *(Describe el objetivo y el grado de cumplimiento del mismo)*

Se ha explotado el software desarrollado en la primera mitad del proyecto por V. Perez (LSC), en colaboración con el IFAE y colaboradores externos (A. Giuliani y M. Martínez) para caracterizar la respuesta de los qubits con la radiación ionizante. En particular, este trabajo ha sido usado para desarrollar y optimizar apantallamientos de estaciones QBits en superficie.
No se pudo abordar en la simulación el efecto de la radiación en la propagación de fonones, en parte debido a los retrasos acumulados dentro del proyecto coordinado y por no contar con el suficiente grado de experiencia dentro del equipo.

Porcentaje estimado: 85%.

Objetivo 2: Characterize materials identified by IFAE and IMB as potential sources of high energy radiation obtained from laboratory samples and fabrication materials. Characterization is to take place at the ULSB at LSC	Progreso y consecución del objetivo 2: <i>(Describe el objetivo y el grado de cumplimiento del mismo)</i> Se ha usado detectores de germanio ultra-puro propiedad del LSC, parte del servicio Ultra-Low Background Service (ULSB), para medir la radioactividad de varios componentes relacionados con la construcción de detectores de resonadores criogénicos desarrollados por parte del IMB. De los resultados, en los que obleas de silicio comercial tienen una radioactividad de $\text{Th232} < 2.68 \text{ mBq/wafer}$, $\text{U238} < 0.99 \text{ mBq/wafer}$, y $\text{K40} < 4.96 \text{ mBq/wafer}$, que sumado con los resultados de capas de aluminio utilizados para resonadores superconductores, se concluye que no suponen una contribución dominante en toda la parte del readout del detector QBit. No se han podido abordar las medidas la radiopureza de los componentes fabricados en IFAE, debido en parte a los retrasos sufridos en la cadena de fabricación de éstos durante la duración del proyecto. En periodos en los que el servicio ULSB no ha estado operativo, se han realizado medidas externas a partir de colaboradores externos al proyecto, en donde realizar las medidas (i.e., medidas de muestras de cobre de diferentes grados de pureza).
	Porcentaje estimado: 75%

Objetivo 3: Establish LSC as a unique underground station compatible with superconducting qubit measurements. Using the dilution refrigerator acquired by LSC, introduce coaxial cabling and DC wiring, with instrumentation to control single- and multi-qubit devices, all following IFAE's guidance.	Progreso y consecución del objetivo n: <i>(Describe el objetivo y el grado de cumplimiento del mismo)</i> El LSC, en 2024, se presentó a la Convocatoria Adquisición Equipamiento Científico-Técnico 2024 del Ministerio de Ciencia y Universidades (MICIU) para la adquisición de un refrigerador de dilución con campo magnético (ref EQC2024-008608-P), valorado en más de 500.000 euros, que sería instalado en la sede subterránea Lab2400 del LSC, que lamentablemente fue desestimada. En 2025, el LSC volvió a presentarse a una convocatoria de carácter similar, PROGRAMA FEDER PLURIRREGIONAL DE ESPAÑA 2021-2027 - CONVOCATORIA ICTS 2025, y que recientemente ha sido resuelta favorablemente (i.e., está prevista la adquisición e instalación, por parte del LSC, de un refrigerador de dilución estimado en ~800k€). Al no existir el refrigerador de dilución propiedad del LSC, no se ha procedido a realizar la inversión programada dentro del proyecto para instrumentalizar dicho refrigerador, y así establecer el LSC como una estación subterránea de medidas criogénicas. Como contingencia, dentro del proyecto, se han explorado dos alternativas: 1) Hacer uso de un refrigerador de dilución propiedad de un experimento operando en la actualidad en Lab2400; 2) Hacer uso, vía un acuerdo de colaboración bilateral, de las instalaciones subterráneas criogénicas de Laboratorio Nazionale del Gran Sasso (LNGS), Italia.
Objetivo 4: Accommodate LAB780 at LSC to install the radiopure portable cryostat built at IFAE. Cryostat will require basic supplies such as compressed air, chilled water, and nitrogen gas.	No se ha procedido a la adquisición del criostato portátil. <i>Porcentaje estimado: 0%</i>
F2. Actividades realizadas y resultados alcanzados por el subproyecto para la consecución de los objetivos del proyecto coordinado. <i>Describe las actividades científico-técnicas realizadas para alcanzar los objetivos planteados en el proyecto coordinado. Indique para cada actividad las personas del equipo del subproyecto que han participado. Extensión máxima 2 páginas</i> <i>*En caso de incluir figuras, cítelas en el texto e insértelas en la última página. Resalte en negrita las actividades realizadas por las personas que son IP.</i> Actividad 1: T2.1: Simulation platform for radiation propagation. Start/End: M1-M39** (**prórroga) Responsable: J. Palacio (LSC). Personas del equipo participantes: V. Pérez (LSC), E. Bertoldo (IFAE) 1.- Simulaciones de apantallamiento de muones bajo tierra Estudio de atenuación de muones cósmicos en sitios subterráneos de poca profundidad para	

experimentos con QBits superconductores. sitios subterráneos poco profundos y la orientación del dispositivo. La orientación de un chip con respecto al cielo afecta la cantidad y el tipo de energía depositada en el sustrato por la radiación ionizante, en donde el detector horizontal (vertical) registra más conteos a menor (mayor) energía (ver Figura 1 en Anexo).

2.- Simulaciones de apantallamiento de radiación ambiental en superficie

Optimización, mediante simulaciones desarrolladas en paquete Geant4, de blindajes de apantallamientos para estaciones de medidas de detectores QBits en superficie. El diseño de las estaciones está centrado en su funcionalidad teniendo en cuenta las limitaciones genéricas de un laboratorio “básico” en superficie (e.g., espacio disponible, peso máximo soportado por el suelo) además de la operatividad de un refrigerador criogénico convencional (e.g., diseño modular y fácil de manipular/transportar). Ver más detalles en Figura 2 en Anexo.

3.- Simulaciones de fonones en detectores de resonadores criogénicos

El 31 de julio de 2025 tuvo lugar una reunión entre los grupos del IMB-LSC para el desarrollo de simulaciones sobre el efecto de la radiación cósmica y ambiental en el funcionamiento de detectores por resonadores criogénicos. **J. Palacio** y G. Rius lideraron/coordinaron la reunión. A principios de Octubre de 2025, Victor P. notificó su voluntad de abandonar su centro de trabajo, por lo que no se pudo abordar este paquete de trabajo.

Actividad 2: T3.1: Material screening. Start/End: M1-M36** (**prórroga)

Responsable: J. Palacio (LSC).

Personas del equipo participantes: E. Bertoldo (IFAE), G.Rius (IMB) y J. Palacio (LSC)

1. - Resultados de radiopureza de Si Wafers comerciales proporcionados por el IMB analizados en un HPGe, propiedad del LSC, del servicio ULBS.

Detector: GeAnayet

Time of measurement: 2264100 s = 26.21 days

Figura: Figura 3 en Anexo

Radionuclide concentration (upper limits with $k=1.645$; uncertainties with $k=1$, approx. 68% CL):

Th-232

Ra-228: <2.68 mBq/wafer

Th-228: <2.09 mBq/wafer

U-238

Ra-226: <0.99 mBq/wafer

Pa-234m: <68.47 mBq/wafer

U-235: <0.87 mBq/wafer

K-40: < 4.96 mBq/wafer

Cs-137: < 0.30 mBq/wafer

Co-60: < 0.21 mBq/wafer

Mn-54: < 0.40 mBq/wafer

2. - Resultados de radiopureza de muestras de una PCB y muestras de cobre y proporcionados por el IMB analizados en una institución independiente (i.e., CIEMAT).

	Th (ng/g)	U(ng/g)
Tira 1	0,60	1,39
Normal 1	8,28	8,81
Roman 1	2,41	3,08

3. - Resultados de radiopureza de láminas de aluminio para resonadores desarrollados por el IMB analizados en un HPGe, propiedad del LSC, del servicio ULBS.

Detector: GeTobazo (HPGe del HallA - Quattro)

Time of measurement: 5224967 s = 60.47 days

Figura: Figura 4 en Anexo

Actividad 3: T4.1: Underground refrigerator for qubit measurement. Start/End: M1-M36** (**prórroga)
Responsable: J. Palacio (LSC).

Personas del equipo participantes: J. Palacio, P. Forn-Díaz, E. Bertoldo, V. Perez, A. Gómez, M. Martinez

Como se mencionaba en la memoria intermedia presentada para este proyecto, la falta de disponibilidad de una máquina evaporadora de metales en IFAE, el retraso en la adquisición de un refrigerador de dilución por parte del IFAE, y el retraso en la adquisición de un refrigerador de dilución por parte del LSC, han supuesto un retraso significativo en el avance general del proyecto. En particular, el primer elemento retrasó significativamente la obtención de un Qbit funcional por parte de IFAE. Como contrapartida, en un esfuerzo de colaboración entre IFAE-LSC, en noviembre de 2024 el LSC contrató a Ariadna Gómez para centrarse en el desarrollo de Qbits para futuras medidas en el LSC. El 5 de febrero de 2025 Pol Forn, IP del nodo coordinador IFAE, confirmó el desarrollo por parte de Ariadna del primer Qbit operativo (ver Figura 5 en ANEXO). En las fechas inmediatas posteriores a la obtención del Qbit, no fue posible la programación de medidas en el refrigerador de dilución propiedad del grupo de Orsay ubicado en el LSC inicialmente cedido al proyecto por la colaboración de CROSS. Debido a estos impedimentos, el proyecto coordinado decidió centrarse en la caracterización del Qbbit desarrollado en superficie.

LSC, en colaboración con el otro centro coordinado IMB, inició los trámites para programar medidas de resonadores bajo tierra, en una colaboración entre el laboratorio Italiano LNGS y el LSC. El acuerdo de colaboración, firmado por Calor Peña Garay (director LSC) y Ezzio Previtally (director LNGS) el 22 de Julio de 2025, permitió obtener en diciembre de 2025 las primeras medidas de resonancia de los dispositivos bolométrico desarrollados por el IMB (ver Figura 6 en ANEXO), para lo cual fue necesario la adquisición de material fungible para el sistema de lectura de resonadores criogénicos.

Actividad 4: T4.2: Shallow underground station preparation. Start/End: M12-M42** (**prórroga)
Responsable: J. Palacio (LSC).

Personas del equipo participantes: E. Bertoldo, P. Forn-Díaz, m. Martínez, A. Gómez, J. Palacio, V. Pérez

No se pudo abordar las medidas de detectores QBits en un laboratorio de baja profundidad. Dados los retrasos y problemas sufridos durante la ejecución del proyecto, y las evidencias obtenidas mediante las medidas de resonadores criogénicos desarrollados por el IMB medidos en el laboratorio LNGS dentro de las actividades desarrolladas por este proyecto, en donde la sensibilidad de las medidas está por debajo del efecto generado por la radiación cósmica en superficie, no se consideró una actividad prioritaria.

F3. Problemas y cambios en el plan de trabajo

Describe las dificultades y/o problemas que hayan podido surgir durante el desarrollo del subproyecto, Indique cualquier cambio que se haya producido respecto a los objetivos o el plan de trabajo inicialmente planteados, así como las soluciones propuestas para resolverlos. Extensión máxima 1 página

**Si es el subproyecto que coordina, rellene en este apartado también los problemas o cambios en el plan de trabajo relacionados con la coordinación del proyecto*

1.- El desarrollo del primer QBit, dentro del proyecto, se retrasó mucho más de lo inicialmente esperado. El LSC puso a disposición del proyecto a un técnico en desarrollo de circuitos superconductores en refrigeradores de dilución, que en colaboración con IFAE, el 5 de febrero de 2025, pudo desarrollar el primer QBit funcional del proyecto. Lamentablemente, para esas fechas, el uso del refrigerador de dilución del grupo de Orsay ubicado en el laboratorio Lab2400 del

laboratorio subterráneo de Canfranc no era viable, por conflicto con el calendario de toma de datos del experimento CROSS. En esos momentos, el proyecto coordinado decidió priorizar la caracterización de dicho QBit en superficie (i.e., IFAE). El LSC, en colaboración con el segundo grupo coordinado IMB, decidió explorar una colaboración con el LNGS para la medición de detectores de resonadores criogénicos desarrollados por el IMB en el subterráneo de LNGS.

2.- El IP inicial del proyecto, Iulian Bandac, era además, el responsable del servicio de HPGe de ULSB. A su marcha, el servicio quedó temporalmente inoperativo. En 2024, el LSC, a partir de fondos externos a este proyecto, restableció el servicio vía la contratación de un/a científico/a especializada. En los tiempos en los que ULSB no estuvo operativo, se realizó una colaboración con una institución externa como medida mitigadora.

3.- El LSC, por su parte, no consiguió la financiación para la adquisición del refrigerador de dilución de bajo fondo que iría ubicado en el laboratorio Lab2400 del LSC, a una profundidad de 800 de roca (i.e., equivalente a 2400 m.w.e.). Por ello, no se procedió a la adquisición de la instrumentación prevista dentro del proyecto.

F4. Colaboraciones con otros grupos de investigación directamente relacionadas con el subproyecto

*Señale la participación del subproyecto en su desarrollo. **Relacione** las colaboraciones con otros grupos de investigación y el valor añadido que aportan al subproyecto y al proyecto coordinado. **Describe**, si procede, el acceso a equipamientos o infraestructuras de otros grupos o instituciones.*

Colaboraciones internas:

- IFAE-LSC: Esfuerzo combinado de recursos humanos para la obtención del primer Qbit funcional desarrollado dentro del proyecto coordinado.
- IFAE-LSC: Desarrollo de una plataforma de software basada en GEANT4 para predecir y optimizar la radiación inducida por el laboratorio de medidas y el propio refrigerador de dilución. El software desarrollado estaba específicamente optimizado para las condiciones del laboratorio del nodo IFAE del proyecto.
- IMB-LSC: Caracterización de la radiactividad intrínseca de los materiales de fabricación “on-chip”.
- IMB-LSC: Primeras medidas de resonadores criogénicos desarrollados íntegramente dentro del proyecto en unas condiciones de ausencia de radiación cósmica.

Colaboraciones externas:

- CIEMAT, para medidas de radipureza (complementando al servicio ULSB-LSC).
- Grupo de Alicia Gomez, del CAB-INTA, como parte de la colaboración de CADEX de la cual participa el LSC.
- Grupo de CROSS de Prof. Andrea Giuliani
- María Martínez, Grupo CAPPa Universidad de Zaragoza.
- Grzegorz Zuzel, Jagiellonian University, como propietario de GeRysy (i.e., HPGe) como parte de ULSB.

F5. Colaboraciones con empresas o sectores socioeconómicos directamente relacionadas con el subproyecto.

***Relacione** las colaboraciones del subproyecto con empresas o sectores socioeconómicos y el valor añadido que aportan al subproyecto y al proyecto coordinado señalando la transferencia de conocimientos o resultados del mismo.*

F6. Actividades de formación y movilidad de personal directamente relacionadas con el subproyecto.

Indique las actividades de formación y movilidad de personal relacionadas con el desarrollo del subproyecto. Además, si procede, debe indicar las actividades realizadas en colaboración con otros grupos o con actividades de formación en medianas o grandes instalaciones.

	Nombre	Tipo de personal (becario/a, técnico/a, contratado/a con cargo al subproyecto, posdoctoral, otros)	Descripción de las actividades de formación o motivo de la movilidad
1	Ariadna Gomez del Pulgar	Tecnico	Estancia de 6 meses en IFAE, soporte/formación en desarrollo de QBits, criogenia y diseño de chips. Primer QBit obtenido en 5/2/2025, durante la estancia.
2			
n			

F7. Actividades de internacionalización y otras colaboraciones relacionadas con el subproyecto. *Indique si el subproyecto ha colaborado con otros grupos internacionales. Consigne si ha concurrido, y con qué resultado, a alguna convocatoria de ayudas (proyectos, formación, infraestructuras, otros) de programas europeos y/o otros programas internacionales, en temáticas relacionadas con la del proyecto coordinado. Indique el programa, socios, países y temática y, en su caso, financiación recibida.*

Colaboraciones internacionales:

- Colaboración entre el laboratorio Italiano LNGS y el LSC. El acuerdo de colaboración, firmado por Calor Peña Garay (director LSC) y Ezzio Previtally (director LNGS) el 22 de Julio de 2025, permitió realizar medidas de resonadores criogénicos en un entorno de ausencia de radiación cósmica.

G. Difusión de los resultados del subproyecto

*Relacione únicamente los resultados derivados del subproyecto, **resaltando** aquellas que son resultado de la colaboración entre los subproyectos del proyecto coordinado.*

G1. E1 Publicaciones en revistas revisadas por pares directamente relacionadas con los resultados del subproyecto.

Indique autores/as, título, referencia de la publicación, año....*

1.	Cosmic muon flux attenuation methods for superconducting qubit experiments, New J.Phys. 27 (2025) 2, 023014, (with V. Perez as corr. author)
2.	
n.	

*Resalte en negrita el personal investigador del proyecto

Total publicaciones: 1

G2. Otras publicaciones científico-técnicas relacionadas con los resultados del subproyecto.

Indique autores/as, título, referencia de la publicación, año...*

1.	
2.	
n.	

*Resalte en negrita el personal investigador del proyecto

Total publicaciones: 0

G3. Publicaciones en “open access” y o repositorios directamente relacionadas con los resultados del subproyecto. Indique autores/as*, título, referencia de la publicación, año...

1.	
2.	
n.	

* Resalte en negrita el personal investigador del proyecto

Total publicaciones:

G4. Publicaciones en libros/capítulos de libros

Indique autores/as, título, referencia de la publicación, año*

1.	
2.	
n.	

* Resalte en negrita el personal investigador del proyecto

Total libros:

Total capítulos de libros:

G5. Patentes directamente derivadas de los resultados del proyecto. Indicar si están licenciadas y/o en explotación. Indique autores/as*, título, referencia, año...

***Indicar** otras formas de protección de los resultados del proyecto, si las hubiera

1.	
2.	
n.	

* Resalte en negrita el personal investigador del proyecto

Total patentes:

Total patentes licenciadas:

Total patentes en explotación:

G6. Asistencia a congresos, conferencias o workshops relacionados con el subproyecto

Nombre del congreso/conferencia/ workshop: 4th RADES Collaboration General Meeting & Dark Quantum

Tipo de comunicación: -

Autores/as*: -

Año: 2025

Nombre del congreso/conferencia/workshop:

Tipo de comunicación:

Autores/as*:

Año:

Nombre del congreso/conferencia/workshop:

Tipo de comunicación:

Autores/as*:

Año:

*Resalte en negrita el personal investigador del proyecto

Total congresos nacionales: 1

Total congresos internacionales:

Total conferencia/ workshop:

G7. Tesis doctorales relacionadas con el proyecto.

<i>Indique si están (en marcha) o finalizadas</i>	
Nombre: Victor Perez Director/a: Andrea GIULIANI, Maria MARTINEZ Título: Millikelvin technologies for neutrino physics and quantum computing Organismo: Université Paris-Saclay, France	
Nombre: Director/a: Título: Organismo:	
	Total tesis en marcha: Total tesis finalizadas: 1

H. Impacto de los resultados del proyecto coordinado (a rellenar por el proyecto coordinador) <i>Indicar el impacto científico-técnico, económico y social de los resultados de la investigación identificando el principal impacto científico-técnico derivado del proyecto de acuerdo con lo indicado en la solicitud y posibles impactos no previstos, el sector o sectores sobre los que tendrán impacto los resultados y actividades realizadas en el proyecto que puedan dar lugar a transferencia de conocimiento.</i> <i>*Este apartado debe ser cumplimentado por el proyecto que coordina, pero debe incluirse también en los informes de los subproyectos que forman parte del proyecto coordinado</i>
H1. Descripción y justificación del avance del conocimiento dentro de la temática del proyecto que suponen los resultados del proyecto. El proyecto ICRQ ha generado avances significativos en un área de conocimiento emergente y de alta relevancia para el futuro de la computación cuántica: la interacción de la radiación ionizante con cúbits superconductores. En el momento del inicio del proyecto, este campo se encontraba en sus primeras etapas a nivel mundial, y prácticamente no existía actividad investigadora en España al respecto. Los principales avances de conocimiento son los siguientes. En primer lugar, se ha realizado el primer estudio sistemático de la dependencia angular del flujo de muones cósmicos sobre chips superconductores, demostrando que la orientación del chip respecto al suelo determina no solo el número sino también la energía de los impactos recibidos. Este resultado, publicado en el New Journal of Physics, establece una guía de diseño experimental para minimizar el impacto de la radiación cósmica en experimentos de cúbits en superficie. En segundo lugar, se ha caracterizado por primera vez la longitud de penetración magnética del aluminio superconductor en función del espesor de la capa fina, identificando el umbral por debajo del cual el material exhibe comportamiento de superconductor de tipo II, con presencia de vórtices que pueden actuar como pozos de cuasipartículas y proteger el dispositivo frente a impactos de radiación. Este resultado, publicado en Superconductor Science and Technology, abre una vía de diseño intrínseco de resiliencia a la radiación en chips cuánticos. En tercer lugar, se ha demostrado la viabilidad técnica de geometrías de blindaje realistas para laboratorios en superficie, basadas en combinaciones de plomo, cobre y polipropileno, y se han desarrollado y caracterizado nuevas plataformas de materiales superconductores —tántalo, niobio, aluminio nitridado y multicapas superconductor-metal normal— como alternativas al aluminio convencional, con resultados funcionales muy prometedores. En perspectiva, el proyecto ha sentado las bases experimentales para la detección cuantitativa del impacto de radiación en cúbits mediante la medida simultánea de un cúbit transmon y un bolómetro NTD integrados en el mismo chip, una capacidad sin precedentes a nivel mundial.

H2. Descripción y Justificación de la contribución de los resultados obtenidos al reto seleccionado *(Para la modalidad Orientada)*

H3. Impacto socio-económico de los resultados del proyecto

(descripción de las actuaciones de divulgación de los resultados a los colectivos más relevantes para la temática del proyecto y a la sociedad en general, justificación e identificación de los aspectos del proyecto que tienen o pueden tener impacto socio-económico por ejemplo incremento del bienestar, aumento de empleo y/o competitividad, aumento de seguridad, mejora del medioambiente, etc)

El proyecto ICRQ ha generado impacto socio-económico en distintos ámbitos.

En cuanto a la difusión y transferencia de resultados a la comunidad científica, el equipo ha presentado sus avances en los foros más relevantes del campo: el APS March Meeting (la conferencia de referencia mundial en cúbits), la conferencia EUCAS de superconductividad aplicada, el congreso CMD31, el workshop Quanteria y la conferencia Quantum Matter, entre otros. Los resultados han sido publicados en revistas científicas reconocidas y en acceso abierto, maximizando su visibilidad, lo que ya ha revertido un alto índice de citación. Adicionalmente, el proyecto ha contribuido a la formación de perfiles altamente cualificados, con tres tesis doctorales defendidas y dos en curso en el IFAE, una tesis en el LSC y una tesis en IMB directamente relacionadas con la temática del proyecto, además de la formación de estudiantes de Grado y Máster.

Desde el punto de vista del impacto económico y de competitividad, la computación cuántica representa uno de los sectores tecnológicos con mayor proyección de crecimiento a nivel mundial. La decoherencia inducida por la radiación ionizante es un factor limitante reconocido para la escalabilidad de los ordenadores cuánticos superconductores. Los resultados del proyecto ICRQ —estrategias de blindaje, nuevos materiales, técnicas de mitigación intrínseca— contribuyen directamente a abordar este cuello de botella tecnológico, posicionando a los grupos participantes como referentes europeos en el área y aumentando su competitividad para concurrir a financiación europea (programas QuantERA, propuestas QRADES o HyBound, EIC Pathfinder en preparación, entre otras). El establecimiento de colaboraciones internacionales con el Instituto Max Planck, el Instituto Néel del CNRS, la Universidad de Orsay, INRiM, Université Paris-Saclay o el Laboratorio del Gran Sasso, entre otros, refuerza asimismo el posicionamiento y visibilidad internacional de los grupos españoles en este ámbito.

H4. Impacto no previsto derivado del proyecto

Al inicio del proyecto no estaba prevista la colaboración con el grupo del Prof. Andrea Giuliani ni el uso de su tecnología de bolómetros NTD para el proyecto ICRQ. La colaboración con este grupo ha sido muy fructífera, con una publicación conjunta y posiblemente más publicaciones de los resultados de NTDs con cúbits. Esta interacción ha dado lugar a un potencial impacto de la tecnología estudiada en ICRQ hacia el ámbito de detección de radiación por parte de cúbits, en particular a zonas del espectro de bajas energías donde no existen buenos sensores.

H5. Sector de Impacto de los resultados del proyecto: industria, administración, política, aumento del conocimiento, salud, medioambiente....

El impacto principal de los resultados del proyecto ICRQ se distribuye en los siguientes sectores:
Aumento del conocimiento. Es el sector de impacto primario. El proyecto ha generado conocimiento fundamental sobre los mecanismos de interacción entre la radiación ionizante y los dispositivos cuánticos superconductores, con publicaciones en revistas de referencia internacional.

Industria y tecnología. Los resultados son directamente relevantes para la industria emergente de la computación cuántica, que enfrenta el reto de escalar sistemas de cúbits a centenares o

miles de unidades en entornos no protegidos. Las soluciones de blindaje, los nuevos materiales y las técnicas de mitigación intrínseca desarrolladas en el proyecto son de aplicación directa en el diseño de procesadores cuánticos más robustos y fiables.

Infraestructuras científicas. El proyecto ha demostrado la viabilidad de combinar laboratorios subterráneos con experimentos de cúbits superconductores, abriendo una nueva línea de uso de estas infraestructuras de física de partículas para la investigación cuántica.

Salud y seguridad. De forma indirecta, el avance en sensores cuánticos de radiación ionizante (detección mediante cúbits y bolómetros) tiene potencial de aplicación en detección de partículas, monitorización de radiación y física médica.

H6. ¿Cuenta con colaboraciones de entidades o empresas que puedan explotar los resultados? *(Describa dicha colaboración, y en el caso de existir el plan de explotación de los resultados)*

La empresa Qilimanjaro Quantum Tech SL es una spin-off del IFAE cuyo objetivo es la construcción y puesta en servicio de ordenadores cuánticos basados en la tecnología de chips superconductores como los que se ha estudiado en el proyecto ICRQ. De esta forma, todos los resultados del proyecto ICRQ son de alta relevancia para Qilimanjaro, y muchas de las conclusiones de los diferentes estudios del proyecto serán aplicables a la mejora de la calidad de los procesadores cuánticos desarrollados por la empresa.

H7. ¿Qué actividades del proyecto pueden generar valorización y transferencia del conocimiento?

Varias actividades y resultados del proyecto tienen potencial de valorización y transferencia: La metodología de diseño de blindaje para laboratorios de cúbits en superficie, validada mediante simulaciones GEANT4 y parcialmente implementada en el IFAE, constituye un conocimiento aplicado transferible directamente a empresas y grupos que operen refrigeradores de dilución para aplicaciones cuánticas. El know-how sobre fabricación y caracterización de capas delgadas superconductoras —incluyendo aluminio nitridado, desarrollado conjuntamente por el IFAE y el IMB-CNM— así como tántalo, niobio o estructuras multicapa del IMB representan un plataformas tecnológicas de alto valor para la industria de semiconductores y de dispositivos cuánticos. La técnica de implementación de trampas de cuasipartículas mediante el patterning del plano de masa, orientada a reducir el impacto de la radiación ionizante, es una solución de diseño de chip directamente incorporable en el proceso de fabricación de circuitos cuánticos. Finalmente, la plataforma experimental de detección simultánea de radiación mediante bolómetro y cúbit, actualmente en puesta en marcha, podría derivar en el futuro en un detector cuántico de nueva generación con aplicaciones tanto en física fundamental como en dosimetría y monitorización de radiación, abriendo la posibilidad de protección mediante patente o de colaboración con empresas del sector de instrumentación científica.

I. Dimensión de sexo y/o género en la investigación

I1. Análisis de género en la Investigación

Resuma brevemente cómo ha contemplado la Integración del análisis de género en la investigación (IAGI) en los distintos aspectos del subproyecto: objetivos, metodología, resultados, aplicaciones e impacto social y económico de los mismos.

El subproyecto no contempla una dimensión de género específica en los objetivos científicos, la metodología experimental o el análisis de resultados, dado que se trata de un proyecto de física experimental de partículas centrado en el desarrollo y operación de detectores de xenón gaseoso

para la búsqueda de desintegración doble beta sin neutrinos. Los resultados obtenidos, así como sus aplicaciones tecnológicas, no presentan un impacto diferenciado en función del sexo o género.

No obstante, el proyecto contribuye indirectamente al impacto social de la investigación mediante la formación de personal investigador en un entorno internacional, multidisciplinar e inclusivo, promoviendo buenas prácticas de igualdad y diversidad dentro de las instituciones participantes.

12. Igualdad de género en la ejecución del subproyecto

Resuma brevemente las actuaciones realizadas para promover la igualdad de género en la ejecución del proyecto: composición del equipo investigador y/o de trabajo, distribución de tareas, firma de las publicaciones y otros resultados, acciones para evitar posibles sesgos en la selección de personal con cargo al proyecto, o de personal contratado para la formación de doctores

Durante la ejecución del proyecto se han aplicado criterios de igualdad de oportunidades y ausencia de discriminación en la organización del trabajo, la selección de personal y la participación en actividades científicas y técnicas. La distribución de tareas dentro del proyecto se ha realizado en función de la experiencia y competencias de cada miembro, garantizando una participación equilibrada en las actividades.

En relación con las publicaciones y otros resultados científicos, se han seguido criterios de reconocimiento basados en la contribución científica y técnica efectiva de cada participante. Asimismo, los procesos de selección de personal contratado asociados al proyecto se han realizado mediante criterios abiertos, transparentes y basados exclusivamente en mérito científico y adecuación al perfil requerido, evitando posibles sesgos de género.

J. Gastos realizados durante la ejecución del subproyecto

*Debe cumplimentarse este apartado **independientemente** de la justificación económica anual enviada por la entidad. Se deben incluir los principales conceptos de gastos con su importe, no el desglose de las facturas del subproyecto, para valorar su adecuación a los objetivos y actividades realizadas en el subproyecto.*

Cree tantas filas como necesite

*Es **indispensable** especificar si el gasto estaba previsto en la solicitud original.*

J1. Gastos de personal

Indique número de personas, situación laboral y función desempeñada

	Nombre	Situación laboral	Función desempeñada	Importe	Previsto en la sol. original (S/N)
1	Victor Perez	Técnico	Desarrollo de software en GEANT4.	9.941,45	S
2	Ariadna Gomez del Pulgar	Técnico	Desarrollo de circuitos superconductores en	17.706,76	S

			refrigeradores de dilución.		
n					
Total gastos de personal:				27.648,21	

J2. Material inventariable (describa el material adquirido)				
	Equipo	Descripción del equipo	Importe	Previsto en la sol. original (S/N)
1				
2				
n				
Total gastos material inventariable			0	

J3. Material fungible <i>Describe el tipo de material por concepto o partida, p. ej., reactivos, material de laboratorio, consumibles informáticos, etc.</i>			
	Concepto	Importe	Previsto en la sol. original (S/N)
1	Material fungible para lectura simultánea de resonadores criogénicos	6.873,68	N
2			
n			
Total gastos material fungible		6.873,68	

J4. Viajes y dietas <i>Describe la actividad del gasto realizado y <u>las personas que han realizado la actividad</u>. Debe incluir aquí los gastos derivados de la asistencia a congresos, conferencias, colaboraciones, reuniones de preparación de propuestas relacionados con este proyecto, etc.</i>					
	Concepto	Relación con el proyecto	Importe	Nombre del participante	Previsto en la sol. original (S/N)
1	Reunión IFAE-IMB	Reunión de coordinación.	203,30	Joaquim Palacio	S
2	4th RADES Meeting	4th RADES Collaboration General Meeting & Dark Quantum	295,55	Ariadna Lopez del Pulgar	N
3	Reunión IFAE-IMB	Reunión de coordinación.	203,30	Joaquim Palacio	S
4	Visita CPAN-INTA	Colaboración con proyecto CADEX	436,65	Joaquim Palacio	N
5	Reunión IMB	Simulaciones GEANT4 para detectores bolométricos.	203,30	Joaquim Palacio	S
6	Reunión IMB	Simulaciones GEANT4 para detectores bolométricos.	430,16	Victor Perez	S

Total viajes y dietas	1772,26
------------------------------	---------

J5. Otros gastos

Describe la actividad del gasto por concepto, y si procede, las personas que han realizado la actividad.

	Concepto	Relación con el proyecto	Importe	Nombre del participante	Previsto en la sol. original (S/N)
1					
2					
n					
Total otros gastos			0		

K. Descripción de gastos no contemplados en la solicitud original

Si ha realizado algún gasto no contemplado en la solicitud original, **justifique** la necesidad de su ejecución en este apartado

Gasto	justificación
Material fungible para la lectura simultánea de resonadores criogénicos	Material auxiliar de lectura de resonadores criogénicos necesario para adaptar las instalaciones subterráneas del Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) a las mediciones realizadas con los equipos desarrollados por el IMB.

L. Resumen de gastos realizados durante la ejecución del proyecto

Desglose los gastos por conceptos (costes directos únicamente):	Importe:
Personal:	27.648,21
Inventariable:	0,00
Fungible:	6.873,68
Viajes y dietas:	1.772,26
Otros gastos:	0,00
Importe total ejecutado (costes directos únicamente):	36.294,15
Importe total concedido (costes directos únicamente):	217.558,00

ANEXO

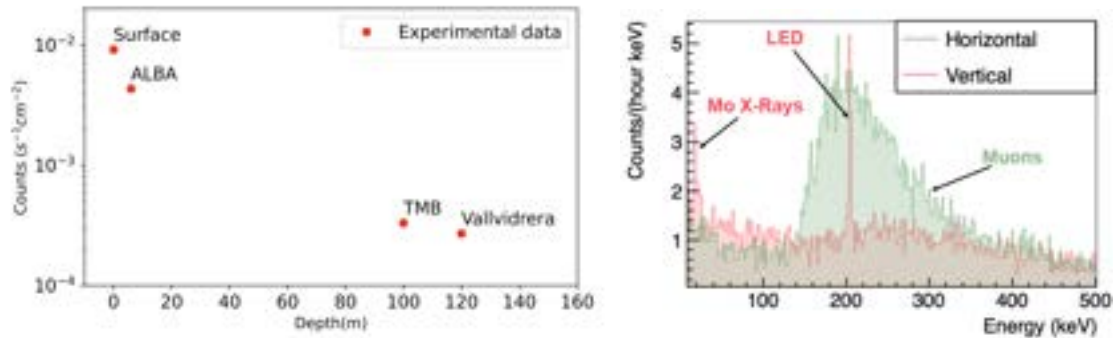


Figura 1: (derecha) Cuentas de muon medidas en función de la profundidad. La medida de superficie se toma como referencia respecto a otras medidas a cierta profundidad. (izquierda) Deposiciones de energía causados por partículas en los detectores horizontales (verdes) y verticales (rojos).. Credit: New J.Phys. 27 (2025) 2, 023014 (V. Pérez como co-autor).

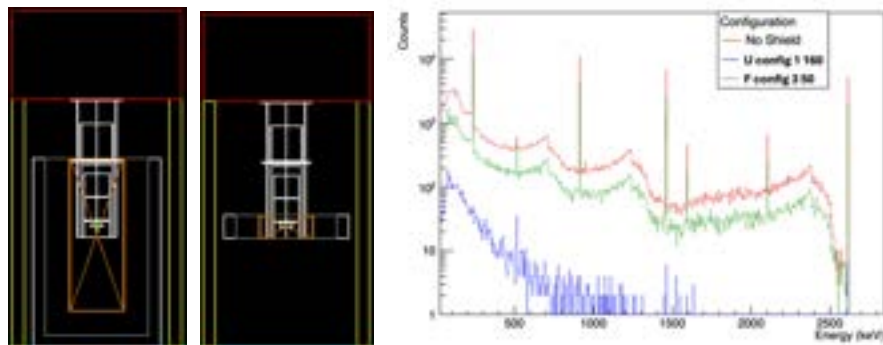


Figura 2: Izquierda y centro: Representaciones de apantallamientos para refrigeradores de dilución operados en superficie. Cada apantallamiento está formado por una capa exterior de polietileno, una intermedia de plomo, y una interior de cobre. Según su geometría, las configuraciones reciben el nombre de “U” o “Fly” (F). Para cada configuración, se consideran diferentes grosores de cada material. Derecha: Resultados de apantallamiento para configuraciones U-160 cm y F 50 cm. Credit: V. Pérez.



Figura 3: 3 Si Wafers for qubit substrate has been screened (CC9691, Lot No. RS0323, single side polished). The 3 wafers were placed inside a 4L Marinelli beaker parallel to Marinelli inner part, polished surface facing exterior.

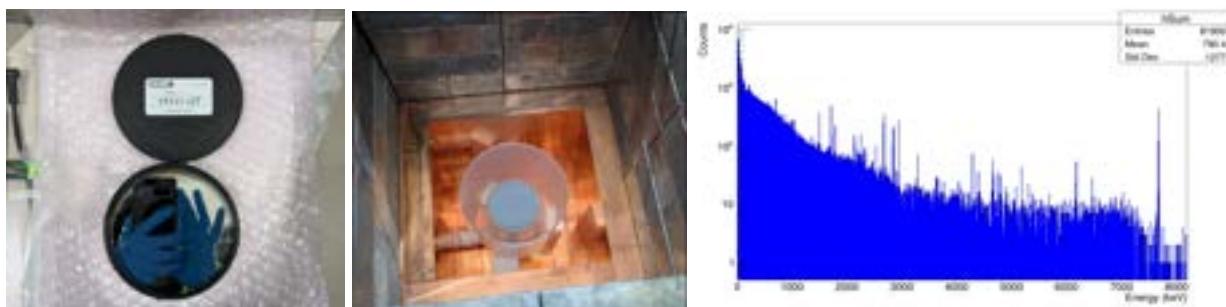


Figura 4: Láminas de aluminio para resonadores desarrollados por el IMB. (izquierda y centro) Fotografías en LSC. (derecha) Resultados de la medición después de 60.47 días.

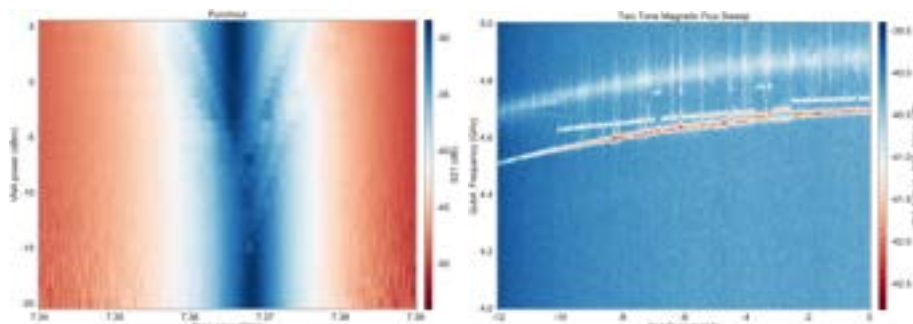


Figura 5: Primeros datos facilitados el 5 de febrero de 2025, del Qbit desarrollado por Ariadna Gómez del Pulgar, en una colaboración entre IFAE-LSC.

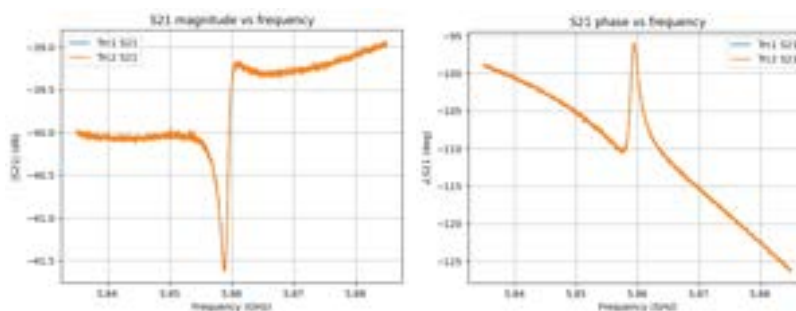


Figura 6: Datos obtenidos en diciembre 2025, compartidos por el Dr. Andrei Puiu, tomados en el refrigerador de dilución de LNGS de un resonador desarrollado por la Dr. Gemma Rius (IMB). Estos datos fueron tomados dentro del acuerdo de colaboración entre LSC y LNGS firmado el 22 de Julio del 2025.