



## **ACG171/10d: Reacreditación del Laboratorio singular TRAPSENSOR: Trampa de Iones y Láseres**

---

- Aprobado en la sesión ordinaria del Consejo de Gobierno de 23 de julio de 2021

**Laboratorio TRAPSENSOR: Trampas de Iones y Láseres**  
(reconocido como Laboratorio Singular en Tecnologías Avanzadas el 1 de marzo de 2017)

**Memoria que acompaña a la solicitud**

**Resumen**

- 1. Singularidad de la investigación llevada a cabo**
- 2. Nivel tecnológico en comparación con otras instalaciones similares a nivel andaluz o nacional**
- 3. Los hitos científicos más relevantes alcanzados y aquellos que pretendan alcanzarse con este reconocimiento**
- 4. Inversión realizada en su totalidad en proyectos de investigación y proyectos de infraestructuras científicas.**
- 5. Proyectos de investigación (e infraestructuras) que se desarrollen en la actualidad en las instalaciones**
- 6. Muestra gráfica de las instalaciones (fotografías)**
- 7. Un plan de actividades que recoja en su caso posibilidades de colaboración con el sector productivo de nuestro entorno y si fuera posible, un plan de acceso a las instalaciones del resto de la comunidad universitaria.**
- 8. Un informe del centro en que se encuentran las instalaciones.**



## Resumen

El **Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres** de la Universidad de Granada es el único laboratorio en España de esta naturaleza. Comenzó a construirse en marzo de 2012 en el marco del proyecto TRAPSENSOR del Consejo Europeo de Investigación, conseguido por Daniel Rodríguez, entonces investigador Ramón y Cajal, desde mayo de 2012 Profesor Titular de Universidad. Además de la financiación del ERC, Daniel Rodríguez ha conseguido financiación de 4 proyectos del plan nacional de I+D+i del MINECO/MICINN (uno de ellos en curso desde junio de 2020), 1 proyecto de excelencia de la Junta de Andalucía en curso desde enero de 2020 y 6 proyectos de infraestructuras, cofinanciados con fondos FEDER y por la UGR, 3 de ellos del MINECO/MICIU y tres de la Junta de Andalucía (dos en curso). La financiación total adquirida supera los 4,5 millones de euros. Actualmente se llevan a cabo tres experimentos: 1) *Quantum Mass Spectrometry* en una trampa Penning de 7 tesla, 2) detección resonante de iones atrapados con amplificadores de cuarzo (en la misma trampa Penning) y 3) enfriamiento de iones en una trampa Paul lineal para simulaciones cuánticas. Hay un cuarto experimento, que por razones técnicas se ha retrasado, y se está rediseñando en la actualidad. Éste tiene como objetivo la interacción de iones atrapados, en trampas físicamente separadas, a través de las corrientes que éstos inducen en un electrodo común. En esta memoria se desarrollarán estos puntos y se pondrá el laboratorio en el contexto nacional e internacional.

## 1. Singularidad de la investigación llevada a cabo

### 1.1. Actividades de Investigación

El Laboratorio de [Trampas de Iones y Láseres de la UGR](#) fue nombrado Laboratorio Singular en Tecnologías Avanzadas de la UGR en marzo de 2017, durante los últimos meses del proyecto del Consejo Europeo de Investigación TRAPSENSOR: *High-performance Mass Spectrometry Using a Quantum Sensor*. En ese momento la financiación total obtenida era ligeramente superior a tres millones de euros. Este laboratorio ha sido pionero en el desarrollo de técnicas de óptica cuántica aplicadas a medidas de masas en física nuclear [[Appl. Phys. B: Lasers O. 107 \(2012\) 1031-1042](#)], con una motivación original que era poder mejorar la precisión en medidas con trampas Penning de masas con aplicaciones en espectrometría de masas del alta precisión y de alta sensibilidad, particularmente en elementos súper-pesados producidos en reacciones de fusión-evaporación a los que es difícil acceder debido a las bajas tasas de producción [[Nature 463, \(2010\) 785-788](#), [Science 337, \(2012\) 1207-1210](#)]. El hecho de utilizar técnicas de óptica cuántica y de realizar experimentos de física nuclear, confiere al grupo un carácter multidisciplinar. El Laboratorio de Trampas de



Iones está dirigido por Daniel Rodríguez que es miembro del grupo FQM387 (Física Fundamental y Aplicaciones) que dirige Antonio M. Lallena.

El laboratorio, es el único de esta naturaleza en España. En la Fig. 1 se muestra un listado de los laboratorios en los que se realizan experimentos de óptica cuántica con iones atrapados en el mundo (104 grupos en total). Además de la singularidad por la investigación y dada la novedad, el laboratorio tiene un importante componente formativo. Actualmente hay dos plataformas en funcionamiento: Una **línea de trampas Penning** y una **trampa de Paul lineal**.

Con la **Línea de trampas Penning** se llevan a cabo dos tipos de experimentos:

i. **Quantum Mass Spectrometry**. Aquí se han conseguido avances significativos en el período 2020-2021, en el marco de la tesis doctoral de Joaquín Berrocal Sánchez (FPU17/02596)<sup>1</sup> que aún están sin publicar. El estado actual de la línea permite ver la disposición de un conjunto de iones enfriados por láser y hasta un ion individual a lo largo del eje axial de la trampa. Llegar al régimen cuántico permitirá conseguir la más alta sensibilidad y universalidad de la técnica, esto es, que sea aplicable a cualquier ion independientemente de su masa, algo que no es posible en trampas de radiofrecuencia ni en trampas Penning utilizando otras técnicas. Para ello, se genera un cristal de dos iones diferentes suspendido en vacío, formado por el ion cuya masa se desea medir y el ion llamado sensor, que es  $^{40}\text{Ca}^+$ . Toda la información sobre el otro ion se obtendrá a partir del bit cuántico (*qubit*), generado con la transición interna  $S_{1/2} \rightarrow D_{5/2}$  en  $^{40}\text{Ca}^+$ . El cristal de dos iones se enfriará hasta el límite cuántico en la trampa Penning de anillos, construida en el laboratorio y en funcionamiento en el campo magnético de 7 tesla [[New J. Phys. 21 \(2019\) 023023](#)]. La dinámica del cristal y la frecuencia de los modos del mismo (6 en total) se ha analizado y estudiado en el régimen clásico [[Phys. Rev. A 100 \(2019\) 063415](#)]. Las desviaciones en frecuencia, originadas por la interacción de Coulomb, se han cuantificado también en el régimen cuántico. Actualmente se está caracterizando el movimiento en el régimen cuántico. El modo de lectura tiene su base en la técnica conocida como espectroscopía de puertas lógicas (*Quantum Logic Spectroscopy*) que se ha aplicado en trampas de radiofrecuencia para medidas de precisión de frecuencias ópticas en transiciones atómicas y sus aplicaciones en relojes ópticos [[Science 309 \(2005\) 749](#), [Nat. Commun. 10 \(2019\) 2929](#)], pero también se ha extendido a moléculas. En Granada se emplearía por primera vez en una trampa Penning. Para su estudio, hay un sistema de adquisición ARTIQ (*Advanced Real-Time Infrastructure for Quantum physics*) que se está poniendo a punto y que permitirá cuantificar variaciones de un solo fonón en el pozo de potencial de la trampa, una vez

<sup>1</sup> Actualmente hay una publicación en preparación.



alcanzado el régimen cuántico, incluso se podría mejorar la incertidumbre a la que permite llegar en el llamado límite cuántico.

ii. **Detección no destructiva de iones atrapados utilizando resonadores de cuarzo.** Este desarrollo comenzó en la UGR en 2014, con la empresa *spin-off* de la UGR, SEVEN SOLUTIONS S.L. En el año 2018 y después de una estancia de investigación de Daniel Rodríguez como profesor invitado en la Universidad de Mainz y el instituto HIM (Alemania), y en colaboración con el ingeniero de la empresa Gabriel Ramírez, se rediseñó el circuito y se comenzó a utilizar con iones atrapados en la trampa de 7 tesla de la UGR. El fundamento de la técnica, conocida como *Fourier-Transform Ion-Cyclotron-Resonance Mass-Spectrometry* (FT-ICR MS), tiene su origen en química, donde no se requiere ultra-alta precisión. En estos casos se trata de determinar las masas de iones moleculares que aparecen al analizar muestras de interés, por ejemplo, en biofarmacia, o en la química del petróleo. Con FT-ICR MS, el rango de masas en unidades de masas atómicas puede ser muy amplio (1-100.000). Un ejemplo notorio de la capacidad de la técnica ha sido por ejemplo la identificación de una proteína con relación masa-carga de 66.000 uma (unidades de masa atómica) con un poder de resolución de  $2 \times 10^6$  en el laboratorio *National High Magnetic Field Laboratory in Tallahassee* (EEUU) [[J. Am. Soc. Mass Spectrom. 26 \(2015\) 1626](#)]. El campo magnético producido por el imán en ese experimento es de 21 tesla (algo que es impensable en un laboratorio universitario). Hay que decir que a mayor intensidad de campo magnético mejor poder de resolución. Si bien la base del método utilizado en los experimentos en física fundamental, para lo que se ha desarrollado el circuito (desde cero en la UGR), es el mismo que en los experimentos de química, la diferencia está en el ancho de banda. En los primeros, el circuito electrónico es resonante con la frecuencia que se desea medir y esto permite detectar un único ion, pero limita considerablemente el rango de masas que se pueden medir con la misma infraestructura. En el segundo tipo de experimentos, el circuito no es resonante, lo que permite detectar en banda ancha, con la desventaja de que son necesarias varias decenas de iones de la misma especie para obtener una señal por encima del nivel de ruido electrónico. En Granada, la detección en banda estrecha se lleva a cabo de forma pionera con resonadores de cuarzo en lugar de bobinas superconductoras. Después de dos publicaciones técnicas con resultados obtenidos en la UGR [[Rev. Sci. Instrum. 90 \(2019\) 063202](#)] y en la Universidad de Mainz [[Rev. Sci. Instrum. 91 \(2020\) 093202](#)], en mayo de 2021 se ha aceptado una publicación de carácter más científico: J. Berrocal *et al.*, “Non-equilibrium coupling of quartz resonators for Penning-Trap Fast Resonance detection”, [[accepted in Quantum Sci. Technol. \(2021\)](#)] donde también se modela el cristal desde un punto de vista cuántico.



De estas dos técnicas, la que parece más apropiada para su aplicación a elementos súper-pesados es la detección resonante de iones con resonadores de cuarzo, particularmente con la nueva funcionalidad encontrada de detección rápida. Los experimentos de espectrometría de masas en el régimen cuántico tienen un carácter más multidisciplinar que está en el marco de *Motional Quantum Metrology in a Penning Trap*. Actualmente hay una publicación en preparación por parte de J. Cerrillo y D. Rodríguez, donde se analiza las propiedades del cristal de dos iones en el régimen cuántico y las perspectivas de la plataforma y el tipo de experimentos: *Quantum Mass Spectrometry, Quantum Logic Spectroscopy* for metrología. La publicación responde a una invitación de la revista *Europhysics Letters (perspectives)* a Daniel Rodríguez. Hay que decir que las aplicaciones que puede tener la plataforma de trampa Penning van más allá de las expuestas en física atómica y nuclear.

Cuando el ion que se quiera estudiar sea un solo ion molecular, el mismo *qubit* servirá para obtener información estructural, por ejemplo, de isómeros o diastómeros al excitar transiciones internas de dicho ion molecular con campos de microondas o con radiación láser. En la misma disciplina científica, esta plataforma puede servir para estudiar la quiralidad, fenómeno asociado a ciertas moléculas, que aparece cuando dos moléculas con la misma composición estequiométrica presentan diferentes arquitecturas con propiedades muy diferentes [[Nature 497 \(2013\) 475](#)]. Ambas estructuras no son fáciles de distinguir, pero el uso de una arquitectura molecular o la otra (que corresponde a la imagen especular de ésta), en fármacos, por ejemplo, puede tener consecuencias dramáticas. En la trampa magnética se formará el cristal orientado a lo largo del eje z (dirección del campo magnético) y se podrá observar la interacción de un ion molecular con luz láser circularmente polarizada, en el régimen cuántico o estudiar transiciones en el régimen de microondas. Hasta ahora sólo se han llevado a cabo experimentos de este tipo con trampas lineales [[Phys. Rev. A 97 \(2018\) 033403](#)].

El cristal de dos iones diferentes en una trampa Penning constituye por sí mismo una plataforma única y es un sistema fundamental de naturaleza cuántica que permitirá realizar simulaciones de procesos puramente cuánticos en un régimen exento de campos eléctricos de radiofrecuencia, que pueden disminuir los tiempos de coherencia. La plataforma de trampas Penning no ha sido estudiada en tanta profundidad como las trampas de radiofrecuencia, por, entre otros aspectos, el coste y el mantenimiento del imán superconductor necesario. Un objetivo posible en el laboratorio es explorar la posibilidad de realizar una simulación cuántica del modelo de Dicke con un solo ion en el campo magnético de 7 tesla, tanto con los paradigmas de simulador cuántico analógico [[Phys. Rev. A 97 \(2018\) 042317](#)] como digital-analógico [[Sci. Rep. 7 \(2017\) 43768](#), [Sci. Rep. 4 \(2014\)](#)].



[7482](#)]. El modelo de Dicke es un modelo básico de interacción radiación-materia en que varios sistemas cuánticos de dos niveles se acoplan con un modo bosónico cuantizado. En la simulación cuántica a explorar, buscaríamos obtener todos los posibles regímenes de interacción, llegando también hasta el régimen de acoplo ultra-fuerte [[Rev. Mod. Phys. 91 \(2019\) 025005](#)].

En lo que respecta a esta línea de investigación, actualmente hay financiación de la Junta de Andalucía en un proyecto de infraestructuras, para el uso sostenible de la línea de trampas Penning. Esto garantizará los experimentos en las distintas disciplinas de interés para muchos de los garantes de proyectos de infraestructuras para esta línea de investigación (ver Sec. 7.2). Hay que remarcar que, en el mundo, son pocos los grupos experimentales que trabajan con trampas Penning y láseres (en el régimen cuántico), debido a los costes del imán superconductor y a su mantenimiento, que en el caso de los imanes que podríamos llamar convencionales, como el actual del laboratorio, depende de la disponibilidad de recursos naturales (helio concretamente). Técnicamente, el imán superconductor que está instalado en el laboratorio proporciona un campo magnético de 7 tesla a la trampa de anillos abierta (desarrollada por el grupo de la Universidad de Granada) con homogeneidad de 0,1 ppm. El imán tiene una orientación horizontal y necesita para su funcionamiento, que las bobinas estén a la temperatura del helio líquido (4 K), lo que conlleva cargas de 150 litros de esta sustancia cada cuatro meses (en el mejor de los casos) y de 100 litros de nitrógeno líquido (77 K) cada 10 - 12 días. El nitrógeno es el gas que está en mayor proporción en el aire que respiramos, por lo que su abundancia no es ningún problema, pero el helio no puede obtenerse del aire. Actualmente hay escasez de producto y el precio de mercado está variando, por lo que puede llegar a ser un problema.

**La Trampa de Paul lineal** se construyó inicialmente como banco de pruebas de la trampa Penning de 7 tesla en el marco de los trabajos de fin de máster de Joaquín Berrocal (2018) y Raquel Álvarez (2019). Desde septiembre de 2019, las mejoras realizadas y el progreso en el dispositivo forman parte de la tesis doctoral de Francisco Domínguez, contratado como Técnico de Apoyo del MICINN (PTA2018-016573-I) en el marco de dar servicio en la realización de experimentos a partir de propuestas de la comunidad española de físicos teóricos. Actualmente se puede visualizar cristales de iones enfriados hasta el límite Doppler y se está trabajando con el láser para acceder a la transición reloj del  $^{40}\text{Ca}^+$ , láser que se suministró en diciembre de 2020 estabilizado a una cavidad de alta fineza ( $F \sim 280000$ ) en el marco de un proyecto de infraestructuras del MICINN. Uno de los valores añadidos de esta plataforma, si bien más general a nivel mundial, pero aun así única en España, es su uso propuesto en el máser interuniversitario en Tecnologías Cuánticas, concretamente en la asignatura “Laboratorio en Tecnologías Cuánticas”. La práctica consiste en



la medida de la frecuencia de Rabi utilizando un ion atrapado. La frecuencia de Rabi es un parámetro fundamental para controlar un bit cuántico, que en el caso del  $^{40}\text{Ca}^+$ , se construye con los estados  $S_{1/2}$  y  $D_{5/2}$ . Este tipo de procedimiento también hay que llevarlo a cabo en la trampa Penning para lo que se está construyendo actualmente una cavidad de alta fineza que permita bloquear el láser de Ti:Sa existente en el laboratorio. Esta cavidad está financiada con un proyecto de infraestructuras de la Junta de Andalucía.

En lo que respecta al **Sistema de Microtrampas**, se construyó un primer prototipo en 2016, en el marco de la tesis doctoral de Juan Manuel Cornejo, cuyos resultados se publicaron en la revista [[Int. J. Mass Spectrom., 410 \(2016\) 22-30](#)]. En 2107, se construyó un sistema para pruebas en régimen de radiofrecuencias, que permitió observar fluorescencia de iones de  $^{40}\text{Ca}^+$  en una de las microtrampas [[Eur. Phys. J. Spec. Topics 227 \(2018\) 445-456](#)] hasta el fallo del sistema en octubre de 2017. Después de varios intentos, no fue posible volver a hacer funcionar el sistema. En la actualidad, con un proyecto excelencia de la Junta de Andalucía en curso, se está rediseñando el sistema y se espera que en breve se pueda comenzar la construcción del mismo en el instituto de metrología alemán Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Braunschweig. Este sistema se acoplará a una trampa criogénica construida recientemente (ver Sec. 7.1).

## 1.2. Contexto nacional e internacional de las actividades

### Nacional

En el contexto nacional, el IP ha sido miembro del comité de la red de excelencia Red de Información y Tecnologías Cuánticas en España (RITCE) en el período 2017-2018. Es miembro del mismo comité (equipo de investigación) en la nueva [RED ESTRATÉGICA de Información y Tecnologías Cuánticas en España \(RITCE\)](#), que está en marcha, que se coordina desde el CSIC (IP: Juan José García-Ripoll). [El laboratorio](#) está dentro de los centros externos adscritos a la [Plataforma en Tecnologías Cuánticas del CSIC](#) en la que participan como centros externos, además, la Universidad Autónoma de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid.

**Equipo de investigación de la red RITCE (hace las veces de comité de dirección):** Roberta Zambrini (CSIC), Antonio Acín (ICFO), Adán Cabello (Universidad de Sevilla), Geza Giedke (Universidad del País Vasco), David Zueco (Universidad de Zaragoza), David Pérez García (Universidad Complutense de Madrid). **Daniel Rodríguez** (Universidad de Granada), Enrique Solano (Universidad del País Vasco), Ana Sanpera Trigueros (Universidad Autónoma de Barcelona).





## Internacional

El Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada es el único laboratorio español donde se realizan experimentos con trampas de iones y láseres. La Fig. 1 muestra un mapa indicando los países y grupos que trabajan con trampas de iones en el mundo. La lista está tomada de la recopilación que realiza el grupo del profesor Rainer Blatt de la Universidad de Innsbruck <https://quantumoptics.at/en/links/ion-trapping-worldwide.html>. En el Apéndice 1 se presenta el listado de dichos grupos por países. Como se ha comentado anteriormente, en el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la UGR se realizan experimentos con una trampa Paul y una trampa Penning. Respecto a este segundo tipo de trampas hay muy pocas en el mundo. La trampa (Penning) de anillos abierta de la UGR se diseñó y construyó en el marco de un Proyecto del Consejo Europeo de Investigación, y funciona en un campo magnético de 7 tesla. Son pocos los laboratorios en el mundo, donde se lleva a cabo *laser cooling* en trampas Penning (NIST-Boulder, Leibniz Universität Hannover, Johannes Gutenberg Universität Mainz, Max Planck Institut für Kernphysik, Imperial College Londres, University of Sidney y GSI-Darmstadt).

Daniel Rodríguez es desde octubre de 2018, responsable del grupo de trabajo “*Tools and Infrastructure*” de la acción europea COST sobre trampas de iones *TIPICQA – COST Action CA17113 on Trapped Ions: Progress in Classical and Quantum Applications* <https://www.iontraps.eu/>. Es miembro del “*Core Group*” y del “*Management Committee*” (comité de dirección). En este último comité hay grupos de Alemania, Austria, Bulgaria, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Israel, Italia, Letonia, Macedonia, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Serbia, Suecia y Suiza. Un listado de los representantes de dicho comité se presenta en <https://www.iontraps.eu/tipicqa-participants/>. Daniel Rodríguez también ha sido el responsable (*chair*) del *Kick-off meeting* de dicha acción, celebrado en Granada en marzo de 2019 <https://indico.cern.ch/event/774881/> y organizador del “*ARTIQ day*”, evento virtual desde la Universidad de Granada que ha tenido lugar en abril de 2021, con una participación de más de 100 científicos de todo el mundo.

**Comité de dirección de la acción COST CA17113:** Markus Hennrich (*chair*) (Universidad de Estocolmo, Suecia), Martina Knoop (*vice-chair*) (Universidad de Marsella, Francia), **Daniel Rodríguez** (responsable del grupo de trabajo WG1: *Tools and Infrastructure*) (Universidad de Granada, España), Mathias Keller (responsable del grupo de trabajo WG2: *Sensors and Precision Measurements*) (Universidad de Sussex, Reino Unido), Nikolay Vitanov (responsable del grupo de trabajo WG3: Quantum Control) (Universidad de Sofía, Bulgaria), Johannes Hecker (responsable del grupo de trabajo WG4: *Hybrid Systems*) (Universidad de Ulm, Alemania), Łukasz



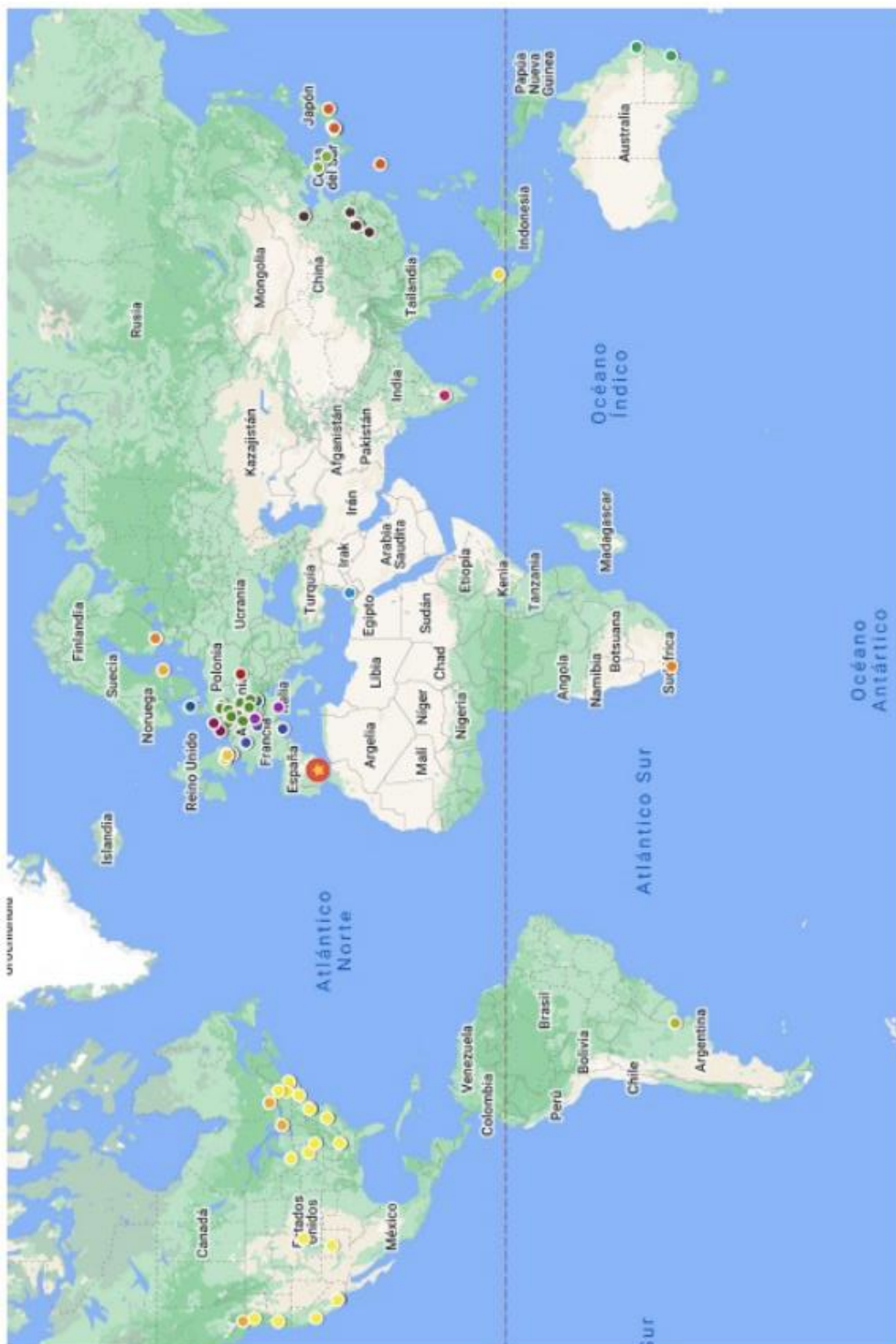
Kłosowski (responsable de acciones de movilidad) (Universidad Nicolás Copérnico, Polonia), Irene Marzoli (Universidad de Camerino, Italia) (responsable de comunicación).

Las actividades del laboratorio también son relevantes para la instalación de trampas Penning MATS (*Precision Measurements of very short-lived nuclei using an Advanced Trapping System for highly-charged ions*) dentro de la colaboración NUSTAR (*Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions*) de FAIR (*Facility for Antiprotons and Ion Research*) <https://fair-center.eu/users/experiments/nustar/experiments/mats.html>. FAIR es una instalación cuyo coste es superior a 1.200 millones de euros y se está construyendo como una ampliación del laboratorio alemán GSI-Darmstadt (*Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung*). Una publicación consecuencia del *Technical Design Report* de dicha instalación y de la instalación LaSpec (espectroscopia láser) coordinado por Daniel Rodríguez está en [\[D. Rodríguez et al., Eur. Phys. J. Spec. Top. 183 \(2010\) 1-123\]](#). En la instalación participan grupos de Alemania, España (sólo UGR), Finlandia, India, Suecia, y Rusia. Daniel Rodríguez ha sido portavoz de instalación MATS de NUSTAR (FAIR) en el período 2010-2015 y en la actualidad es viceportavoz de la colaboración y miembro del comité de la colaboración NUSTAR.

**Comité de dirección (hasta 2024) de MATS en FAIR:** Michael Block (portavoz-*Spokesperson*, Universidad de Mainz, GSI-Darmstadt, Helmholtz Institut Mainz, Alemania), **Daniel Rodríguez** (viceportavoz-*Deputy Spokesperson*, Universidad de Granada, España), Ari Jokinen (viceportavoz-*Deputy Spokesperson*, Universidad de Jyväskylä, Finlandia), Zoran Andelkovic (director técnico, GSI-Darmstadt), Frank Herfurth (Project manager, GSI-Darmstadt).

La importancia de las actividades que se realizan en el laboratorio también se ponen de manifiesto a nivel internacional con el hecho de que Daniel Rodríguez haya sido miembro del comité científico internacional *International Advisory Committee*, para el congreso PLATAN 2019 <https://indico.him.uni-mainz.de/event/24/page/23-history> que es el primero del tipo “*International Conference Merger of the Poznan Meeting on Lasers and Trapping Devices in Atomic Nuclei Research and the International Conference on Laser Probing*” (*chairs*: M. Block & K. Wendt). También forma parte del comité científico internacional del siguiente congreso de este tipo en 2022. Es también miembro del comité científico internacional del congreso “*8th International Conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2022)*” que se celebrará en Alemania en septiembre de 2022 (*chairs*: M. Block & K. Blaum).





**Paises (N° de grupos)**

- España (1)
- EEUU (28)
- Alemania (16)
- China (10)
- Japón (8)
- Reino Unido (7)
- Canadá (4)
- Francia (4)
- Holanda (4)
- Austria (3)
- Singapur (3)
- Corea del Sur (3)
- Australia (2)
- Israel (2)
- Suiza (2)
- Argentina (1)
- Chequia (1)
- Dinamarca (1)
- Finlandia (1)
- India (1)
- Sudáfrica (1)
- Suecia (1)

**Figura 1:** Grupos trabajando con trampas de iones en experimentos de óptica cuántica.



## 2. Nivel tecnológico en comparación con otras instalaciones similares a nivel andaluz o nacional

La actividad del Laboratorio de Trampas de Iones es única en España y por tanto en Andalucía. Los experimentos con iones y láseres en el régimen cuántico requieren altas prestaciones en los equipos láseres, en los sistemas de vacío, electrónica, control y adquisición de datos, además del diseño y construcción de los dispositivos con alta precisión. Un mayor porcentaje de grupos a nivel nacional, y todos los andaluces de este campo realizan actividades teóricas. En la Tab. 1 se enumeran los grupos que están considerados en la [RED ESTRATÉGICA de Información y Tecnologías Cuánticas en España \(RITCE\)](#). El comité de dirección ya se ha listado en el Apartado 1.2.

**Tabla 1:** Listado de grupos de la red de Información y tecnologías Cuánticas en España, por comunidades autónomas. Se muestra el enlace de los grupos que ha colaborado en publicaciones sobre actividades del laboratorio lideradas por UGR.

Región	Institución	Denominación del grupo/IP
Andalucía	Universidad de Sevilla	Adán Cabello (teórico)
Andalucía	Universidad de Granada	Daniel Manzano (teórico)
Andalucía	Universidad de Granada	Rosario González-Férez (teórica)
Andalucía	Universidad de Granada	<b>Daniel Rodríguez (experimental) Trampas de Iones y Láseres</b>
Aragón	Universidad de Zaragoza (CSIC) e Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA)	David Zueco (teórico) Fernando Luis (experimental)
Baleares	Instituto de Física Interdisciplinaria y Sistemas Complejos (IFISC) (CSIC)	Roberta Zambrini (teórica)
Cataluña	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	Antonio Acín (teórico) <i>Quantum information theory</i>
Cataluña	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	Darrick Chang (teórico) <i>Theoretical Quantum-Nano Photonics</i>
Cataluña	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	Maciej Lewenstein (teórico) <i>Quantum Optics Theory</i>
Cataluña	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	Morgan Mitchell (experimental) <i>Atomic Quantum Optics</i>
Cataluña	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	Leticia Tarruell (experimental) <i>Ultracold Quantum Gases</i>
Cataluña	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	Hugues de Riedmatten (experimental) <i>Quantum Photonics with Solids and Atoms</i>



Cataluña	Universidad Autónoma de Barcelona	Grupo de información cuántica (teórico)
Cataluña	Universidad Autónoma de Barcelona	Xavier Oriols (teórico) Nanocomp
Cataluña	Universidad de Barcelona	José Ignacio Latorre (teórico) Artur García Saez (teórico) Pol Forn Díaz (experimental)
Cataluña	Universidad de Barcelona	Grupo de magnetismo y moléculas funcionales
Cataluña	Universidad Politécnica de Cataluña	Jordi Boronat (teórico) <i>Barcelona Quantum Monte Carlo group</i>
Galicia	Universidad de Vigo	Marcos Curty
Comunidad de Madrid	Universidad Complutense	Miguel Ángel Martín Delgado (teórico) Grupo de Información y Computación Cuántica - GICC
Comunidad de Madrid	Universidad Complutense	David Pérez García (teórico) <i>Research Group in Mathematics and Quantum Information</i>
Comunidad de Madrid	Universidad Complutense	Fernando Sols (teórico) Grupo de Física Teórica de la Materia Condensada
Comunidad de Madrid	Universidad Carlos III	Antonio García (teórico) <i>Departamento de Matemáticas</i>
Comunidad de Madrid	Instituto de Física Fundamental (IFF) CSIC	<a href="#">Juan José García-Ripoll (teórico)</a> <a href="#">Quantum Information and Foundations Group</a>
Comunidad de Madrid	Universidad Politécnica	Vicente Martín Ayuso (teórico) <i>Research Group on Quantum Information and Computation</i>
Comunidad de Madrid	Universidad Autónoma de Madrid	Carlos Tejedor (teórico) <i>Condensed Matter Physics Institute (IFIMAC)</i>
Comunidad de Madrid	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC)	Gloria Platero (teórica) <i>Theoretical Group on Quantum Transport on the Nanoscale</i>
Comunidad de Madrid	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC)	Luis Brey (teórico) <i>Theory of Quantum Materials and Solid State Quantum Technologies</i>
Comunidad de Madrid	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC)	<i>Theoretical Group on Quantum Transport on the Nanoscale</i> (teórico)
Comunidad de Madrid	Instituto de Física Teórica (IFT-CSIC)	Germán Sierra (teórico) <i>Theoretical Condensed Matter and Quantum Information</i>
Comunidad de Madrid	Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI-CSIC)	<i>Group on Cryptography and Communication Security</i> (teórico)



Comunidad de Madrid	IMDEA Nanociencia	Daniel Granados (teórico) <i>Quantum NanoDevices</i>
Comunidad de Madrid		<i>Quitemad</i> (teórico y experimental)
Comunidad Valenciana	Universidad Politécnica de Valencia	Miguel Ángel García March (teórico)
Comunidad Valenciana	Instituto de Física Corpuscular (IFIC) CSIC	Armando Pérez (teórico)
Murcia	Universidad Politécnica de Cartagena	Javier Prior (teórico/experimental) <a href="#">Javier Cerrillo</a>
País Vasco	Universidad del País Vasco (UPV/EHU)	Geza Toth (teórico)
País Vasco	Universidad del País Vasco (UPV/EHU)	<a href="#">Enrique Solano (teórico)</a> <a href="#">QUTIS group</a>
País Vasco	Universidad del País Vasco (UPV/EHU)	Michele Modugno (teórico)
País Vasco	Universidad del País Vasco (UPV/EHU)	<i>Quinst group</i> (teórico)
País Vasco	Donostia International Physics Center (DIPC)	Géza Giedke (teórico)
País Vasco	Donostia International Physics Center (DIPC)	Román Orús (teórico)
País Vasco	Donostia International Physics Center (DIPC)	Adolfo del Campo (teórico)
País Vasco	Donostia International Physics Center (DIPC)	Aurelia Chenu (teórico)
País Vasco	Centro de Física de Materiales (CFM-CSIC)	Gabriel Molina Terriza (experimental) <i>Quantum Nanophotonics Laboratory</i>

De los grupos que se han listado en la tabla, aquellos del CSIC forman parte de la [Plataforma en Tecnologías Cuánticas \(CSIC\)](#) en la que participan como centros externos, La Universidad de Granada (a través del laboratorio), La Universidad Autónoma de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid. Los centros del CSIC que forman la plataforma, líneas de investigación e IPs se pueden consultar en <https://qst.csic.es/groups/>.

### 3. Los hitos científicos más relevantes alcanzados y aquellos que pretendan alcanzarse con este reconocimiento

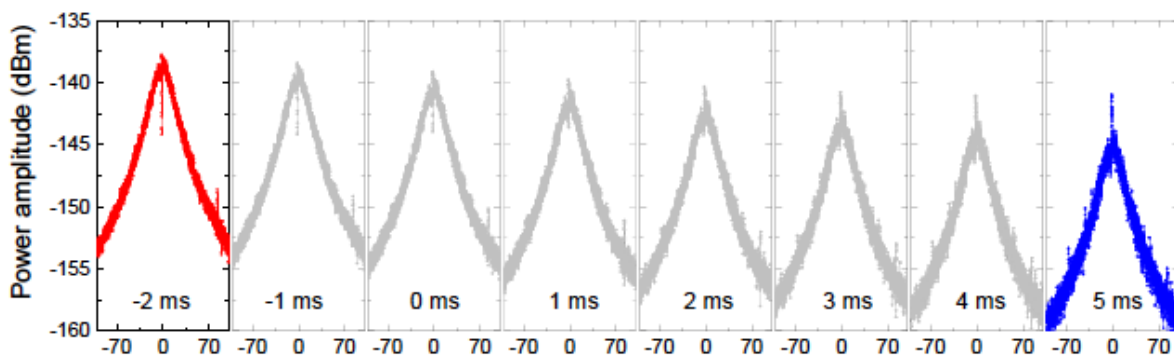
En el marco de la espectrometría de masas de ultra-alta precisión, el estado actual de la técnica empleada en los laboratorios líderes en este tipo de medidas (por ejemplo, Max Planck Institut für Kernphysik-División de Klaus Blaum), se basa en la detección de la corriente que un solo ion induce en los electrodos de la trampa, técnica desarrollada por primera vez por D. J. Wineland y H. G. Dehmelt [[J. Appl. Phys. 46 \(1975\) 919](#)]. A pesar de que esta técnica ha dado lugar a



resultados muy relevantes en el marco de la física fundamental con partículas y antipartículas [[Science 303 \(2004\) 334](#),[Nature 506 \(2014\) 467](#),[Nature 524 \(2015\) 196](#)], el número de especies iónicas que se pueden medir es limitado. La técnica no es por tanto universal y no es aplicable a muchos iones atómicos, por ejemplo, ese el caso de iones pesados y súper-pesados con carga electrónica +1, +2, donde las técnicas destructivas han permitido resultados muy relevantes [[Nature 463, \(2010\) 785-788](#), [Science 337, \(2012\) 1207-1210](#)]. También es importante para iones moleculares con relaciones masa-carga superiores a las de átomos. Por ello se han seguido dos caminos en el Laboratorio de trampas de Iones y Láseres, partir de la infraestructura construida (e incrementando las capacidades de la misma):

- a) implementar la detección electrónica, pero utilizando cristales de cuarzo en lugar de bobinas superconductoras y
- b) enfriar un cristal de dos iones hasta el régimen cuántico.

El avance científico técnico reciente más significativo y en el que se ha logrado avanzar más, ha sido en la utilización de los cristales de cuarzo como elementos resonantes en circuitos para la detección de corrientes inducidas. Esto se ha llevado a cabo por primera vez, y en el marco de este proyecto, se han realizado experimentos con dos tipos de cristales (distinto corte) para acceder a iones de distinta relación masa-carga, llegando a un cociente  $m/q=207$  [[Rev. Sci. Instrum. 91 \(2020\) 093202](#)]. Finalmente, se ha demostrado el acoplamiento de iones al cristal de cuarzo en condiciones de no equilibrio, encontrando una funcionalidad única, lo que abre la posibilidad de utilizar este tipo de resonador en experimentos con núcleos exóticos en trampas Penning. [[accepted in Quantum Sci. Technol. \(2021\)](#)].



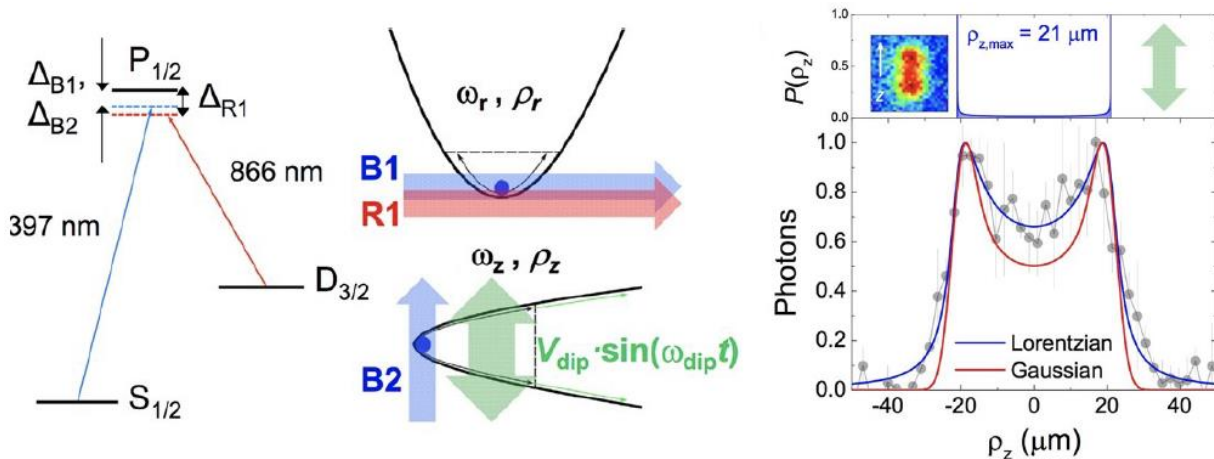
**Figura 2:** Figura extraída de la publicación en la revista Quantum Sci. Technol. 2021. La señal de iones evoluciona en varios milisegundos de un pico hacia abajo (acoplamiento entre el cristal y el ion) y un pico hacia arriba (termalización).

En diciembre de 2020, se ha conseguido generar un cristal de dos iones de  $^{40}\text{Ca}^+$  enfriados hasta el límite Doppler, lo que constituye el punto de partida para experimentos de espectrometría de



masas o espectroscopía láser con cristales híbridos, que en breve podrán llevarse a cabo en el laboratorio. Hasta llegar a la situación actual, en el período 2016-2018, se realizaron pruebas con una trampa Paul tridimensional (recientemente sustituida por la trampa de Paul lineal) estudiando

- a) la imagen de los fotones de fluorescencia de un ion  $^{40}\text{Ca}^+$  enfriado por láser hasta el límite Doppler en respuesta a señales eléctricas (Fig. 3 [Sci. Rep. 7 (2017) 8336]) y
- b) la extensión del método de detección óptica de señales eléctricas a dos iones  $^{40}\text{Ca}^+$  también enfriados por láser en una trampa de radiofrecuencia.



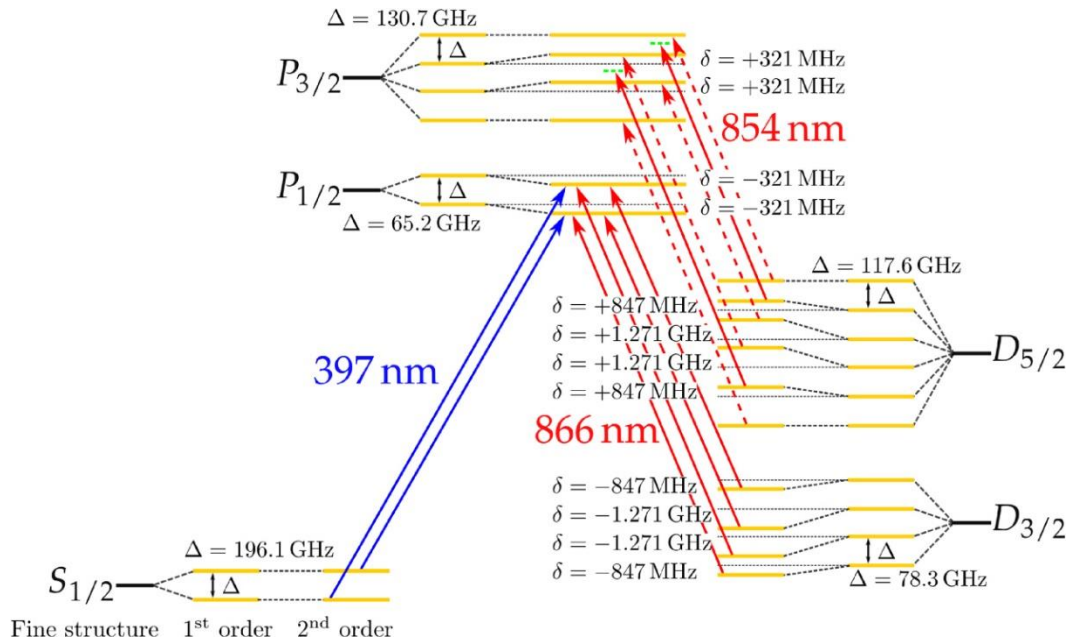
**Figura 3:** Figura extraída de la publicación en la revista Sci. Rep. 2017. En la parte izquierda se esquematiza la interacción de los haces de luz láser con el ion durante el proceso de enfriamiento en el pozo de potencial de la trampa de radiofrecuencia en las direcciones radial y axial. Dos láseres son necesarios. En la parte derecha se visualiza la imagen de un ion interactuando con el láser y oscilando cuando gana energía de un campo externo.

Uno de los puntos más críticos en la ejecución del proyecto ha sido la puesta a punto y caracterización de los elementos necesarios para la detección de fluorescencia de iones de calcio confinados en una trampa Penning de 7 tesla. Uno de los objetivos clave de la instalación es el desarrollo de *Quantum Mass Spectrometry*. El método consiste en la medida de las frecuencias propias de movimiento de un cristal de dos iones enfriados al estado cero de energía en una trampa Penning, uno de ellos siendo el ion de interés y otro siendo el ion sensor. La detección se realiza mediante la lectura del *qubit* generado con el ion sensor. Para ello se ha construido y caracterizado una trampa Penning con una geometría abierta que la diferencia del resto de trampas Penning que se utilizan en experimentos de precisión. Previo a la detección de la fluorescencia se han probado varias de las funcionalidades del sistema, como por ejemplo la determinación de las frecuencias propias de los iones  $^{40}\text{Ca}^+$  en la trampa mediante medidas de resonancia por tiempo de vuelo. La Fig. 4 muestra el esquema de niveles electrónicos del ion  $^{40}\text{Ca}^+$  que necesitamos para el enfriamiento por láser en la trampa Penning. Debido a la alta intensidad del campo magnético presente en el sistema se requieren un total de 12 haces de luz láser (a partir de 9 láseres) para llevar a cabo el





enfriamiento Doppler (en lugar de los dos de la Fig. 3). Este hecho ha conllevado al desarrollo de una infraestructura más compleja en comparación a los experimentos que se realizan en trampas de radiofrecuencia y ha implicado la adquisición, puesta a punto y control simultáneo de la frecuencia de los láseres.



**Figura 4:** Esquema de niveles del ion  $^{40}\text{Ca}^+$  en el seno de un campo magnético de 7 tesla, mostrado en la publicación en la revista *New J. Phys.* (2019). Se muestran los niveles relevantes para el enfriamiento Doppler, donde se incluyen las correcciones a segundo orden debidas a la alta intensidad de campo magnético.

Las publicaciones desde 2017 se listan en la Sec. 3.1. Los resultados relevantes a la formación de cristales con la trampa de Paul lineal y la Línea de trampas Penning, no están publicados aún y por ello no se muestran. No obstante, imágenes de uno, dos y tres iones  $^{40}\text{Ca}^+$  en la trampa lineal (tesis doctoral de Francisco Domínguez), e imágenes de uno, dos y 120 iones formado un cristal en la trampa Penning de 7 tesla (tesis doctoral de Joaquín Berrocal). están a disposición de la comisión. Para la obtención de estas últimas imágenes, han sido necesarias varias modificaciones, entre ellas la implementación de un nuevo objetivo para la trampa lineal y en lo que respecta a la trampa Penning se ha diseñado y construido un sistema óptico que recoge los fotones emitidos por los iones y enfoca la imagen correspondiente a una distancia de aproximadamente 2 metros respecto al centro de la trampa, donde se encuentra una cámara EMCCD que permite la adquisición y posterior análisis de las imágenes recogidas.

En la actualidad se trabaja para empezar a hacer enfriamiento hasta el estado cero de energía utilizando una láser emitiendo a 729 nm acoplado a una cavidad de alta fineza. Este mismo láser,



cuya entrega ha sufrido un retraso de aproximadamente un año debido a la pandemia, servirá para generar el bit cuántico. Medidas de las frecuencias de este láser acoplado a la cavidad, se han realizado con el peine de frecuencias existente en el laboratorio resultando en una deriva de 325 mHz/s en una medida de 30 horas. Esta desviación parece razonable, y adecuado para los experimentos a realizar.

Hay que mencionar que el grupo participa en los experimentos con iones súper-pesados que se llevan a cabo con la instalación SHIPTRAP en el GSI de Darmstadt (Alemania) y cuyo responsable es el Profesor Michael Block. Hay actualmente dos publicaciones en preparación a partir de los resultados obtenidos en 2018 con dicha instalación. Son los primeros resultados que se han conseguido con esta instalación desde 2012. Los resultados abarcan medias de masas de *low-lying isomers* de No y Lr, así como la primera media directa del radionúclido  $^{257}\text{Rf}$ . Entre abril y mayo de 2021 también se ha llevado a cabo un experimento muy exitoso con participación de un miembro del laboratorio.

### 3.1. Publicaciones relacionadas con la actividad en el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres desde 01/03/2017.

Daniel Rodríguez ha sido el responsable de escribir todas las publicaciones (*corresponding author*) de este listado a excepción de la numero 3. En el listado de publicaciones se muestran tres de acceso abierto (marcadas en negrita), que son publicaciones de Q1 en ciencia interdisciplinar (1) y en física interdisciplinar (4 y 8).

- 1) F. Domínguez, *et al.*, “**A Single-Ion Reservoir as a High-Sensitive Sensor of Electric Signals**” [Scientific Reports 7 \(2017\) 8336](#).
- 2) F. Domínguez *et al.*, “Motional studies of one and two laser-cooled trapped ions for electric-field sensing applications” [Journal of Modern Optics 65 \(2018\) 613-621](#). (Volumen especial en honor al profesor D. Segal).
- 3) R. A. Rica *et al.*, “A double Paul trap system for the electronic coupling of ions” [European Physical Journal Special Topics 227 \(2018\) 445-456](#).
- 4) M. J. Gutiérrez *et al.*, “**The TRAPSENSOR facility: an open-ring 7 tesla Penning trap for laser-based precision experiments**” [New Journal of Physics 21 \(2019\) 023023](#).
- 5) M. J. Gutiérrez *et al.*, “Dynamics of an unbalanced two-ion crystal in a Penning trap for application in optical mass spectrometry” [Physical Review A 100, \(2019\) 063415](#).
- 6) S. Lohse *et al.*, “A quartz amplifier for high-sensitivity Fourier-transform ion-cyclotron-resonance measurements with trapped ions” [Review of Scientific Instruments 90 \(2019\) 063202](#).



- 7) S. Lohse *et al.*, “Quartz resonators for penning traps toward mass spectrometry on the heaviest ions” [Review of Scientific Instruments 91 \(2020\) 093202](#).
- 8) J. Berrocal *et al.*, “Non-equilibrium coupling of quartz resonators for Penning-Trap Fast Resonance detection”, [accepted in Quantum Science and Technology \(2021\)](#).

### 3.2. Trabajos académicos finalizados

Por la naturaleza del laboratorio y de la investigación que se lleva a cabo, no existente anteriormente en la UGR, las actividades han tenido y tienen un marcado carácter formativo y ha dado lugar a numerosos trabajos académicos. Además de los que se listan a continuación, hay dos tesis doctorales (nombradas en el apartado anterior), dos trabajos de fin de máster y tres trabajos de fin de grado en curso.

#### Tesis de doctorado

- 1) “The Preparation Penning Trap and Recent Developments on High-Performance Ion Detection for the Project TRAPSENSOR”, Juan Manuel Cornejo (2016).
- 2) “Studying an unbalanced two-ion crystal in a Penning trap: towards the Quantum Regime in a High Magnetic Field”, Manuel Jesús Gutiérrez (2021). (La tesis se ha depositado el 28/05/2021).

#### Trabajos Fin de Máster

- 1) “Experimental study on the cooling of ions of  $^{40}\text{Ca}^+$  in a 7 Tesla Penning trap”, Ilse María Ermini (2020).
- 2) “Montaje del sistema óptico y cámara EMCCD para estudiar el enfriamiento Doppler de iones de  $^{40}\text{Ca}^+$  en una trampa lineal de radiofrecuencia; primeros experimentos”, Raquel Álvarez (2019).
- 3) “Implementación de una trampa lineal para simulaciones del modelo cuántico de Rabi”, Joaquín Berrocal (2018).
- 4) “Estudio de la fluorescencia de un ion de  $^{40}\text{Ca}^+$  en una trampa magnética de 7 T”, Manuel Jesús Gutiérrez (2016).
- 5) “Producción de iones de  $^{40}\text{Ca}^+$  por el método de fotoionización y estudio de su utilización en el proyecto TRAPSENSOR”, Jaime Doménech (2015).
- 6) “Implementación y puesta a punto de un modulador electro-óptico y mejora de las prestaciones del sistema de detección en el proyecto TRAPSENSOR, Martín Colombano (2015).
- 7) “Estudio de una fuente de iones de superficie en el marco del proyecto TRAPSENSOR y primeros resultados de enfriamiento por láser (laser cooling) de iones de  $^{40}\text{Ca}^+$ ”, Carlos Vivo (2014).



- 8) “Desarrollo de un sistema de control para láseres de diodo utilizando moduladores acústico-ópticos”, Pablo Escobedo (2014).
- 9) “Adaptación de una fuente de iones por desorción laser para su acoplamiento a un sistema de trampas magnéticas (Penning traps)”, Antonio Lorenzo (2012).
- 10) “Construcción y puesta a punto de un sistema de electroimanes para producir haces de electrones monoenergéticos de hasta varios MeV, Juan Manuel Cornejo (2011).”

### **Trabajos Fin de Grado**

1) Detección de fluorescencia de iones de  $^{40}\text{Ca}^+$  en una trampa de iones (2020), 2) Estudio de cavidades de alta fineza para la medida de precisión de láseres de distinta naturaleza: aplicaciones en metrología cuántica (2020), 3) Caracterización de una fuente de iones para uso en el estudio de corrientes inducidas por iones atrapados en una Penning trap de 7 Tesla (2018), 4) Estudio del enfriamiento hasta el estado cero de energía de un ion de  $^{40}\text{Ca}^+$  en una trampa electromagnética (2017), 5) Experimentos de precisión en trampas con iones de  $^{40}\text{Ca}^+$  (2016), 6) Experimentos de precisión con un ion de  $^{40}\text{Ca}^+$  confinado en una trampa electromagnética (2014), 7) Desarrollo de una microtrampa para experimentos de precisión con iones de  $^{40}\text{Ca}$  (2013).

#### **4. Inversión realizada en su totalidad en proyectos de investigación y proyectos de infraestructuras científicas.**

**La inversión total realizada ha sido de 4.515.671,88 € (cuatro millones, quinientos quince mil seiscientos setenta y un euros y ochenta y ocho céntimos), de los cuales 2.434.248,00 € corresponden a proyectos de investigación y 2.081.423,88 € a proyectos de infraestructuras. En todos los proyectos el IP es Daniel Rodríguez. En algunos de estos proyectos han participado otros investigadores de la Universidad de Granada y otros centros.**

#### **5. Proyectos de investigación (e infraestructuras) que se desarrollen en la actualidad en las instalaciones (IP: Daniel Rodríguez)**

Título del proyecto	Referencia e investigadores (equipo de investigación)	Entidad financiadora	Duración	Cuantía
Experimentos de precisión con iones (súper)pesados individuales confinados en trampas Penning utilizando detección	PID2019-104093GB-I00 Daniel Rodríguez (IP) Ana Carrasco Sanz (inv.)	Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyectos del Plan Nacional 2019)	01/07/2020-30/06/2023	175.087,00



óptica y amplificadores de cuarzo	Francisco J. Fernández (inv.)			
Quantum Mass Spectrometry Using a Two-Ion Crystal	P18-FR-3432 Daniel Rodríguez (IP) Joaquín Berrocal (inv.) Michael Block (inv.) Christian Ospelkaus (inv.) Enrique Solano (inv.)	Junta de Andalucía (Proyectos I+D+i Junta de Andalucía 2018)	01/01/2020-31/12/2022	139.625,00
Optimización de un sistema de micro-trampas de iones para experimentos de electrónica cuántica	A-FQM-425-UGR18 Daniel Rodríguez (IP)	Universidad de Granada Proyectos I+D+i del Programa Operativo FEDER 2018	01/01/2020-30/06/2022	6.400,00
Imán superconductor libre de helio líquido (7 tesla de campo magnético altamente homogéneo) para el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres	IE19_204 UGR	Junta de Andalucía (Infraestructuras científicas)	01/01/2021-29/12/2022	632.050,00
Cavidad de alta fineza y accesorios para generar y manipular un bit cuántico en el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres	IE2017-5513	Junta de Andalucía (Infraestructuras científicas)	01/01/2020-31/12/2021	256.694,99

### Proyectos de investigación (e infraestructuras) finalizados

Título del proyecto	Referencia	Entidad financiadora	Duración	Cuantía
Desarrollos para física nuclear fundamental y aplicaciones	FPA2015-67694-P Daniel Rodríguez (IP1) Marta Anguiano (IP2) Antonio Lallena (inv.) Miguel Ángel Carvajal (inv.)	Ministerio de Economía y Competitividad (Proyectos del Plan Nacional 2015)	01/01/2016-31/12/2020	213.444,00

Firma (1): DANIEL RODRÍGUEZ RUBIALES  
En calidad de: Solicitante



	Damián Guirado (inv.) José Manuel de la Vega (inv.)			
TRAPSENSOR - High-Performance Mass Spectrometry Using a Quantum Sensor	TRAPSENSOR Daniel Rodríguez (IP)	Unión Europea- Consejo Europeo de Investigación (ERC-2011-StG)	01/11/2011-31/07/2017	1.499.280,00
Desarrollos para experimentos de precisión utilizando trampas de iones: física fundamental y aplicaciones	FPA2012-32076 Daniel Rodríguez (IP) Antonio Lallena (inv.)	Ministerio de Economía y Competitividad (Proyectos del Plan Nacional 2012)	01/01/2013-31/12/2015	208.143,00
Desarrollos para experimentos de precisión utilizando trampas de iones: física fundamental y aplicaciones	FPA2010-14803 Daniel Rodríguez (IP) Antonio Lallena (inv.)	Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyectos del Plan Nacional 2010)	01/01/2011-31/03/2013	192.269,00
Equipamiento para mejorar las prestaciones del Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres	EQC2018-005130-P	Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades (Ayudas para infraestructuras y equipamiento Científico-Técnico del Plan Estatal de I+D 2018)	01/01/2018-31/03/2021	292.389,52
Equipamiento para Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres	UNGR13-1E-1830	Ministerio de Economía y Competitividad (Infraestructuras Científicas y Técnicas y Equipamiento 2013)	01/01/2013-31/03/2015	381.656,57
Láseres para ciencia de altas prestaciones	INF-2011-57131	Junta de Andalucía (Infraestructuras científicas)	25/01/2014-24/01/2016	164.032,30
Laboratorio de trampas de iones	UNGR10-1E-501	Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades (Ayudas para infraestructuras y	01/01/2010-30/06/2015	365.600,50

Firma (1): DANIEL RODRÍGUEZ RUBIALES  
En calidad de: Solicitante



		equipamiento Científico-Técnico del Plan Estatal de I+D 2018)		
--	--	---	--	--

**Listado de investigadores que han participado en alguno/s de los proyectos de infraestructuras citados más recientes desde nombramiento del Laboratorio Singular (2017-2021):** Daniel Rodríguez (IP), Marta Anguiano (UGR), Antonio M. Lallena (UGR), Ana Carrasco (UGR), Rosario González-Férez (UGR), Jesús Sánchez-Dehesa (UGR), Francisco Javier Fernández (UGR), Araceli González (UGR), Joaquín Berrocal (UGR), Francisco Domínguez (UGR), Juan Manuel Cuerva (UGR), Juan José García-Ripoll (IFF-CSIC), Adán Cabello (US), Lucas Lamata (US), Enrique Solano (UPV), Enrique E. Colacio (UGR), Ángel Orte (UGR), María J. Ruedas (UGR), Francisco J. Romero (UGR), Michael Block (JGU).

### 5.1. Redes de excelencia en curso (IP: Juan José García-Ripoll)

Título del proyecto	Referencia	Entidad financiadora	Duración	Cuantía
Red de Información y Tecnologías Cuánticas en España (estratégica)	RED2018-102707-E	Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades	2019-2021 (con petición de prórroga hasta 01/09/2022)	60.000,00

**Equipo de investigación:** Roberta Zambrini (CSIC), Antonio Acín (ICFO), Adán Cabello (Universidad de Sevilla), Geza Giedke (Universidad del País Vasco), David Zueco (Universidad de Zaragoza), David Pérez García (Universidad Complutense de Madrid). **Daniel Rodríguez** (Universidad de Granada), Enrique Solano (Universidad del País Vasco), Ana Sanpera Trigueros (Universidad Autónoma de Barcelona).

### 5.2. Acciones Europeas en curso (IP: Markus Hennrich)

Título del proyecto	Referencia	Entidad financiadora	Duración
Trapped Ions: Progress in Classical and Quantum Applications <a href="https://www.iontraps.eu/">https://www.iontraps.eu/</a>	COST action CA17113 TIPICQA	Unión Europea	Octubre 2018-septiembre 2022

**Comité de dirección:** Markus Hennrich (*chair*) (Universidad de Estocolmo, Suecia), Martina Knoop (*vice-chair*) (Universidad de Marsella, Francia), **Daniel Rodríguez** (responsable del grupo de trabajo WG1: *Tools and Infrastructure*) (Universidad de Granada, España), Mathias Keller



(responsable del grupo de trabajo WG2: Sensors and Precision Measurements) (Universidad de Sussex, Reino Unido), Nikolay Vitanov (responsable del grupo de trabajo WG3: Quantum Control) (Universidad de Sofía, Bulgaria), Johannes Hecker (responsable del grupo de trabajo WG4: *Hybrid Systems*) (Universidad de Ulm, Alemania), Łukasz Kłosowski (responsable de acciones de movilidad) (Universidad Nicolás Copérnico, Polonia), Irene Marzoli (responsable de comunicación) (Universidad de Camerino, Italia).

### 5.3. Redes de excelencia finalizadas (IP: Juan José García-Ripoll)

Título del proyecto	Referencia	Entidad financiadora	Duración	Cuántía
Red de Información y Tecnologías Cuánticas en España (temática)	FIS2016-81891-REDT	Ministerio de Economía y Competitividad	2018-2019	-

**Equipo de investigación:** Roberta Zambrini (CSIC), Leticia Tarruell (ICFO), Adán Cabello (Universidad de Sevilla), Geza Giedke (Universidad del País Vasco), Fernando Luis Vitalla (Universidad de Zaragoza), David Pérez García (Universidad Complutense de Madrid). **Daniel Rodríguez** (Universidad de Granada), Enrique Solano (Universidad del País Vasco), Ana Sanpera Trigueros (Universidad Autónoma de Barcelona).

### 5.4. Contratos competitivos de formación

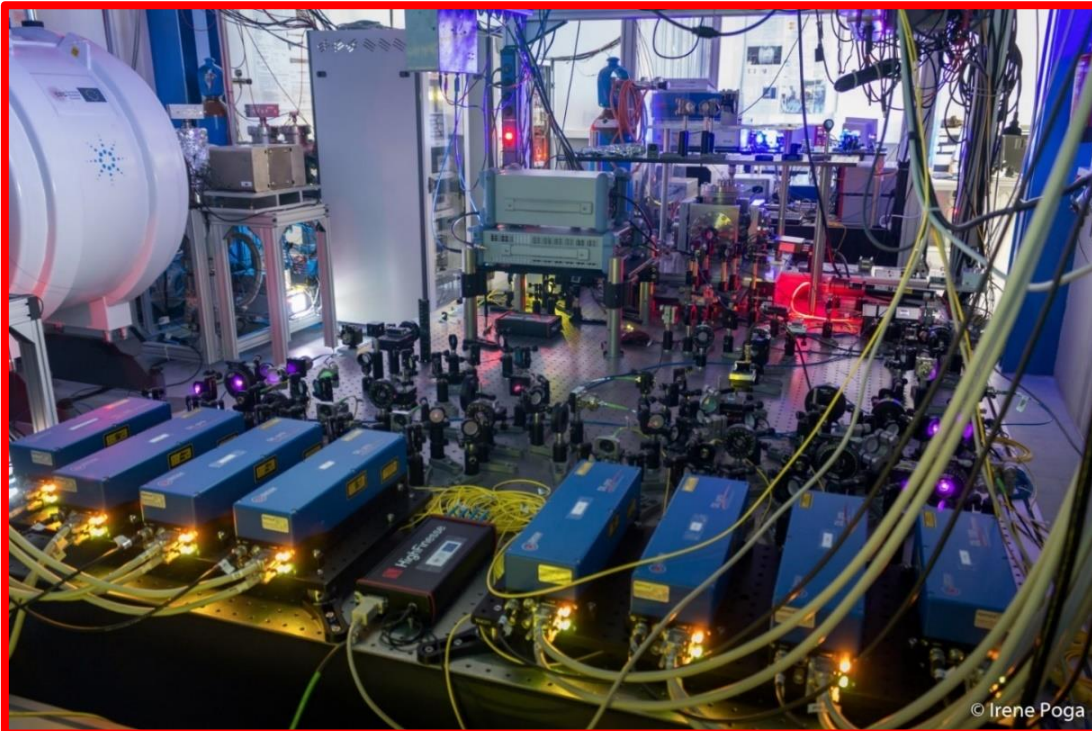
Desde el inicio del laboratorio se han conseguido:

- Dos contratos de Formación del Profesorado Universitario (FPU).
- Un contrato de Personal Técnico de Apoyo (PTA).
- Cuatro contratos de Garantía Juvenil, uno de ellos en curso. Dos de las personas que obtuvieron estos contratos son los dos doctorandos de laboratorio y el tercero está trabajando en el Sincrotrón ALBA.
- Dos becas de iniciación a la investigación en TFG (plan propio UGR).
- Una beca de iniciación a la investigación en TFM (plan propio UGR).
- Una beca de Colaboración del Ministerio de Educación.

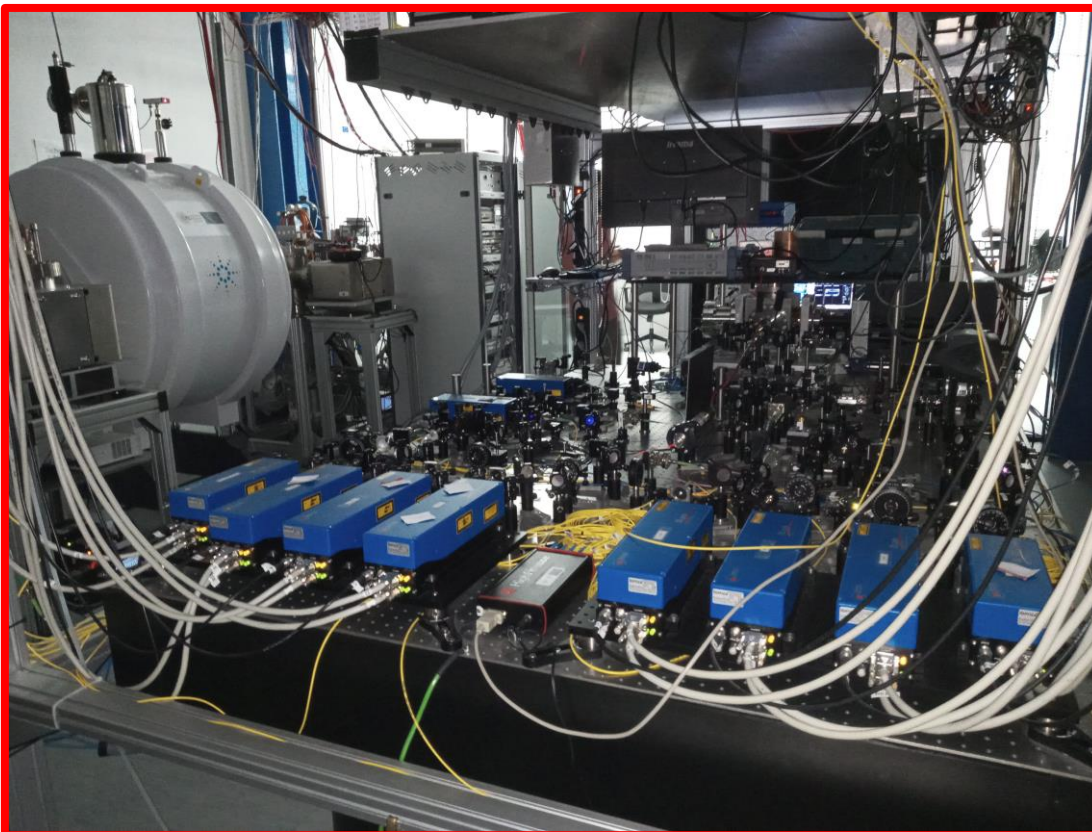




6. Muestra gráfica de las instalaciones (fotografías)

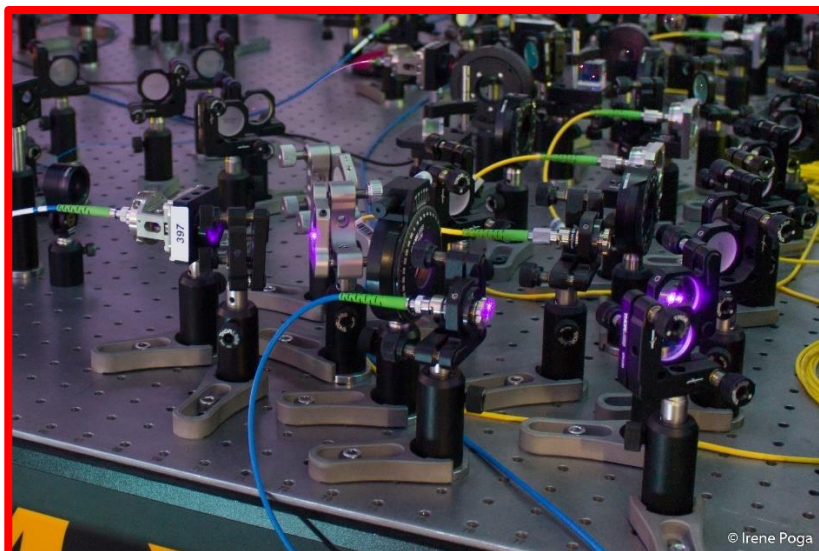


© Irene Poga

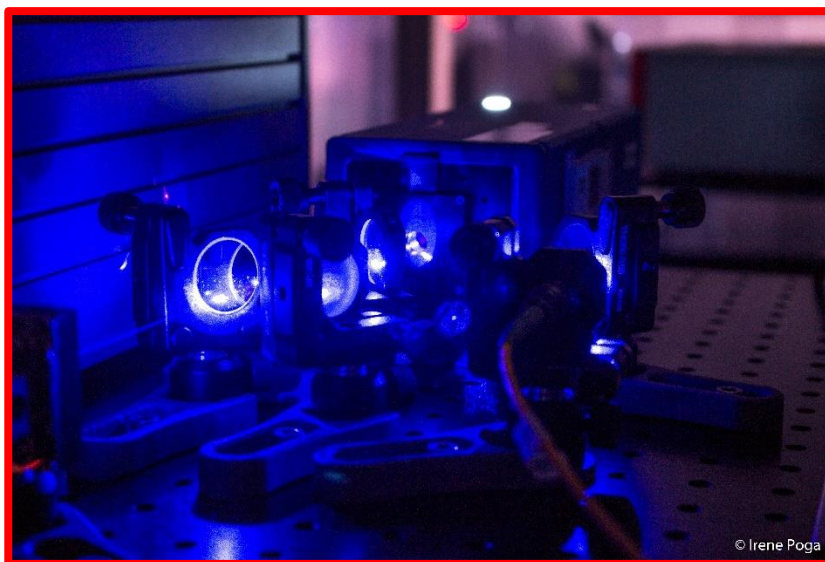


**Figura 7:** Fotografía de láseres de diodo en mesa óptica en 2018 (arriba) y en 2021 (abajo). Puede observarse que se han añadido dos láseres, además de más elementos ópticos.

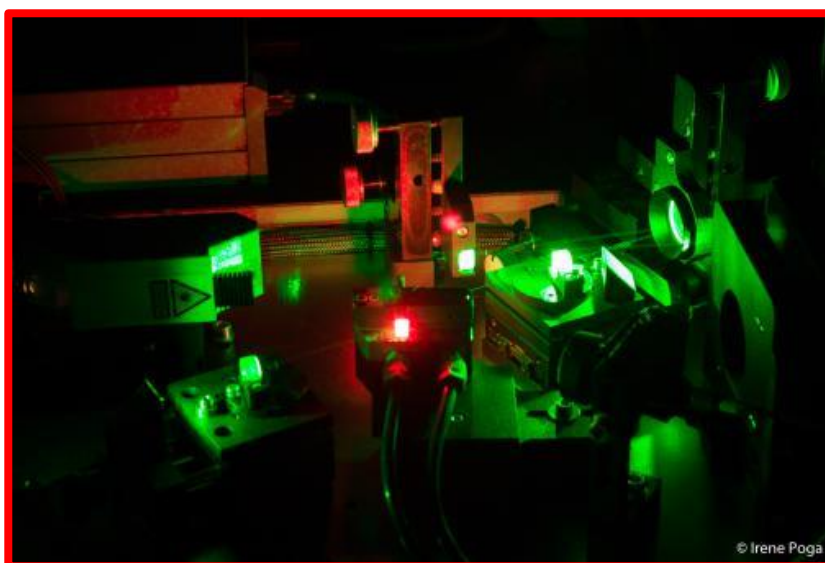




© Irene Poga



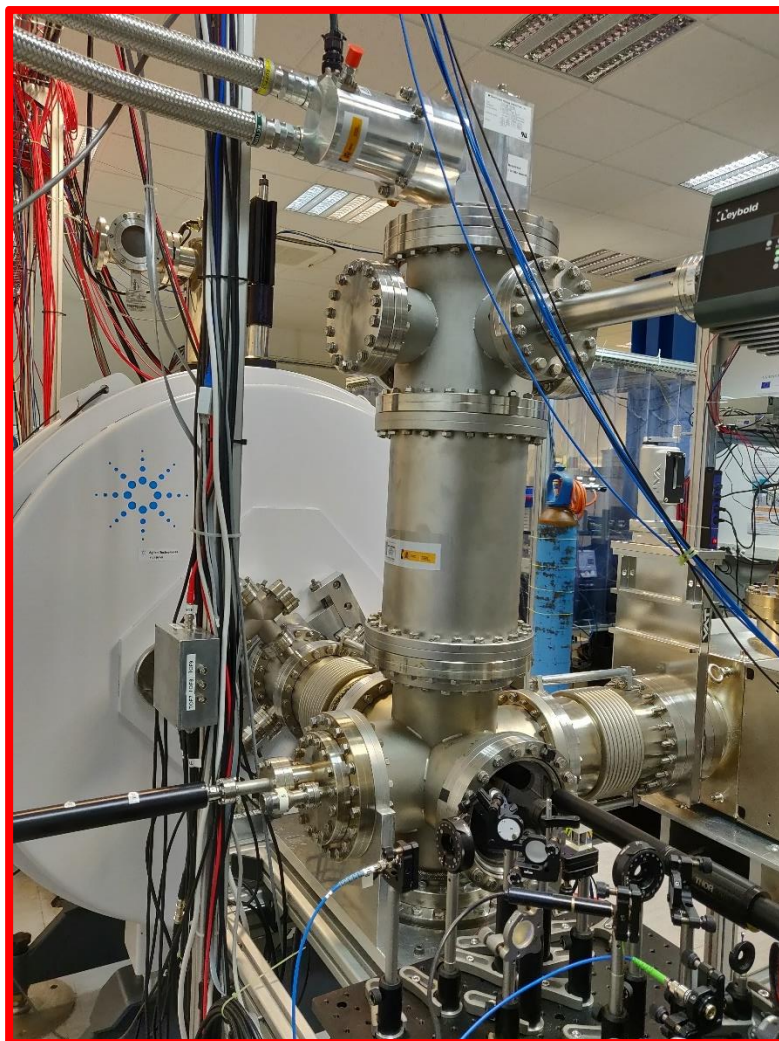
© Irene Poga



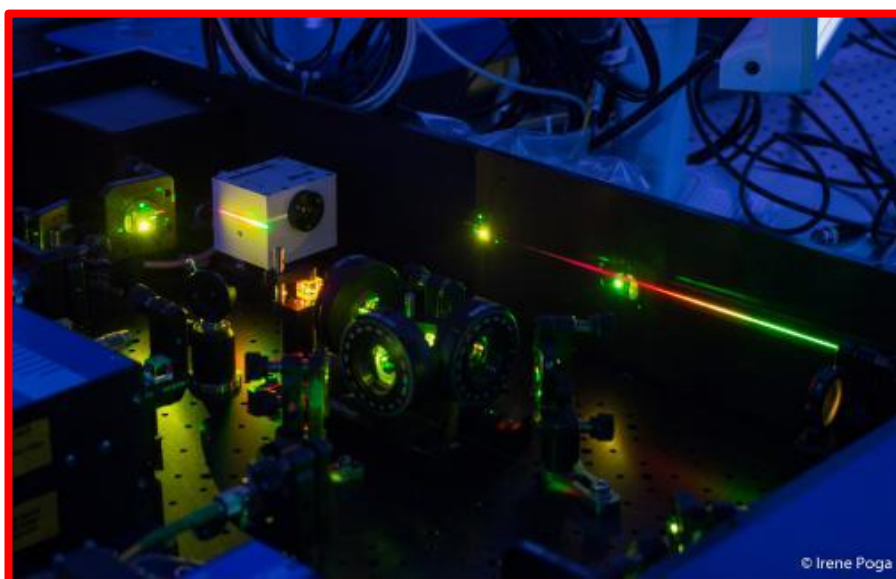
© Irene Poga

**Figura 8:** Detalles de algunos láseres de diodo (arriba y centro) y de láser de Ti:Sa (abajo).



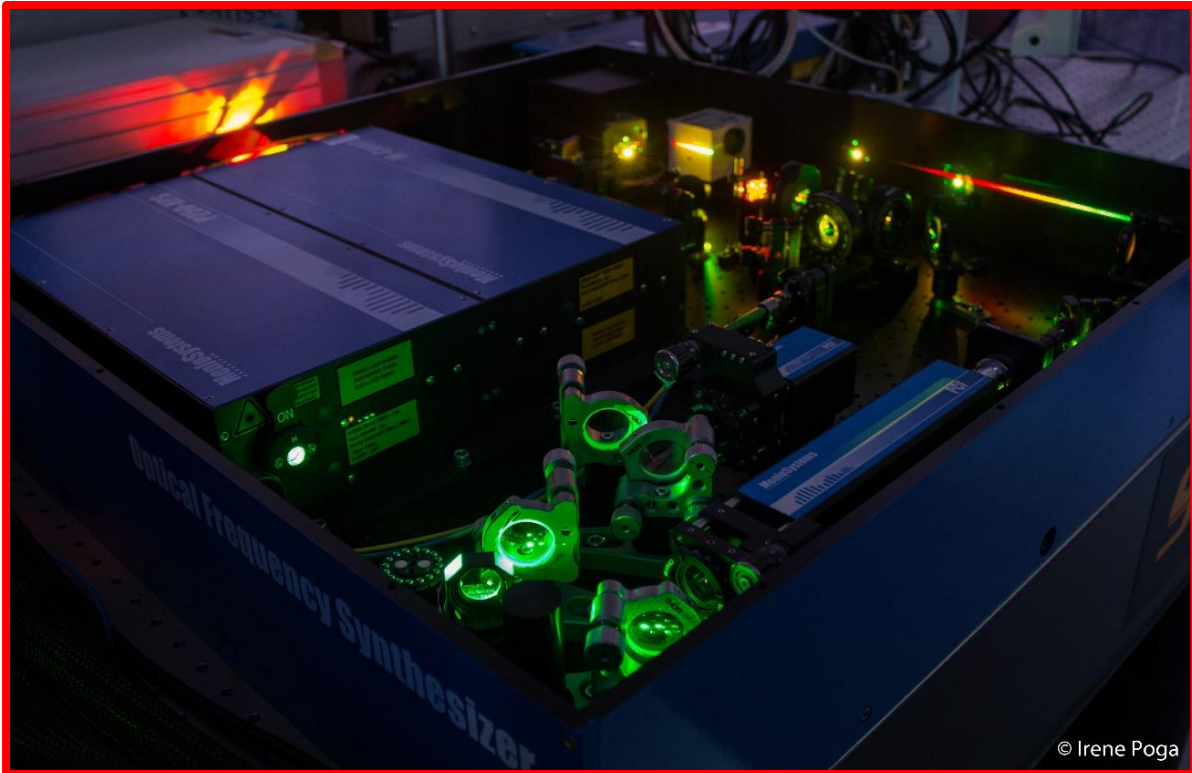


**Figura 9:** Parte posterior de la línea de trampa Penning (2019) donde puede visualizarse el sistema de cabezas frías de dos estados, y parte de la parte exterior del sistema óptico con los elementos para alinear los haces de luz láser.



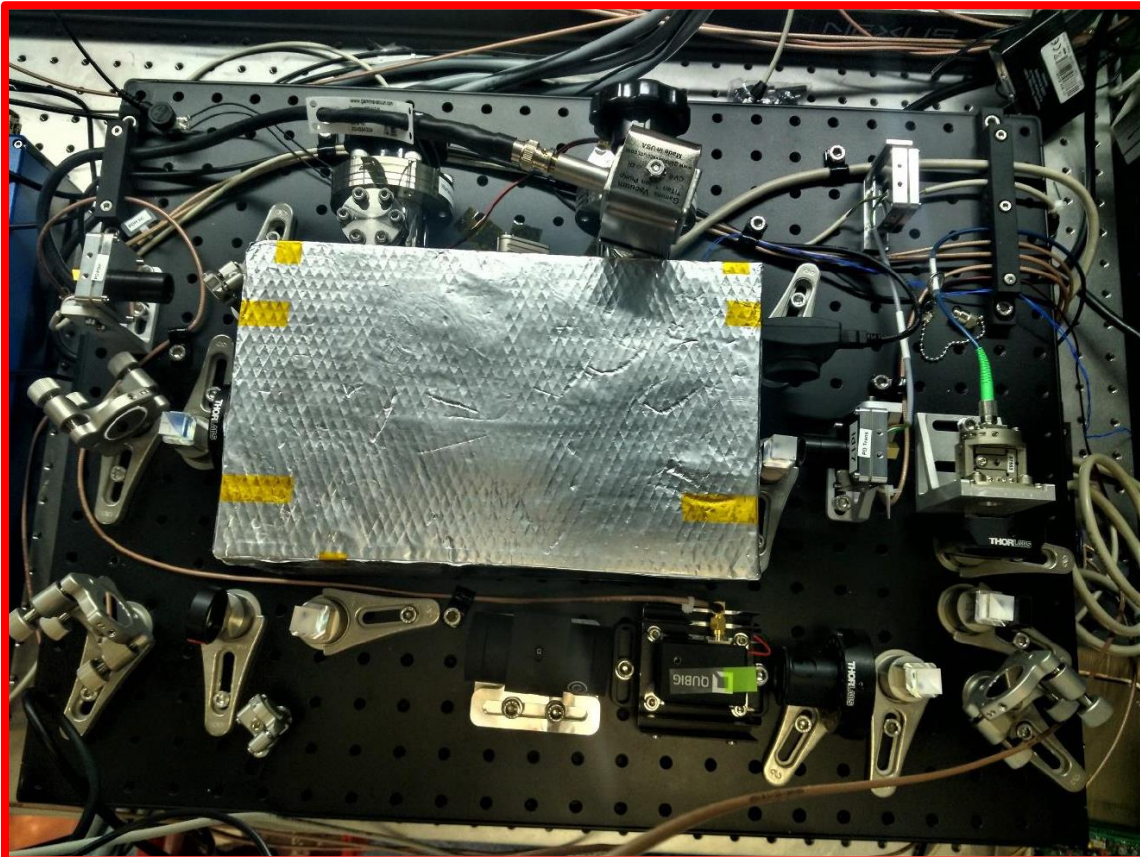
**Figura 10:** Detalle de peine de frecuencias. Se observe el fotodiodo para la señal de interferencia entre al peine y el láser cuya frecuencia se desea medir.





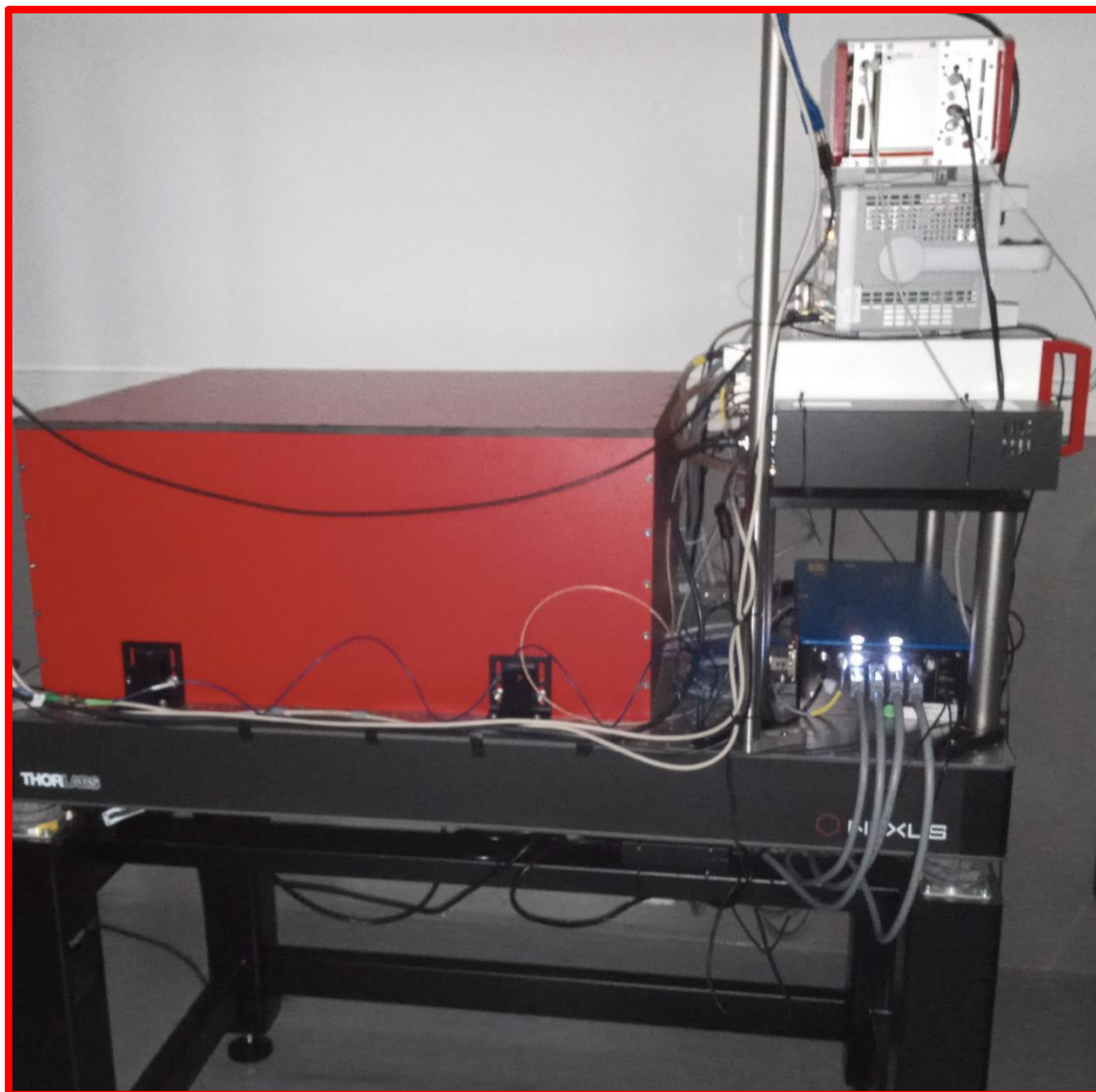
© Irene Poga

**Figura 11:** Peine de frecuencias (único peine de frecuencias en una Universidad Española).



**Figura 11:** Cavidad de alta fineza (la cavidad está en un cámara de vacío y cubierta por elementos que la aíslan térmicamente (material visible)).





**Figura 11:** Cavity de alta fineza de la Fig. 10 con láser de diodo sintonizable con amplificado y sistema de control. Todo está sobre una mesa óptica y la cavity está rodeada de la “caja roja” para aislamiento acústico. La radiación láser suministrada debe tener una anchura de 1 Hz para la generación del *qubit*.

**7. Un plan de actividades que recoja en su caso posibilidades de colaboración con el sector productivo de nuestro entorno y si fuera posible, un plan de acceso a las instalaciones del resto de la comunidad universitaria.**

**7.1. Colaboración con el sector productivo**

La actividad de Trampas de Iones es una actividad que dada la singularidad expuesta no está representada en el sector empresarial español en lo que respecta a grandes equipos: láseres de altas prestaciones (pulsados o continuos), peine de frecuencias, bombas para ultra-alto vacío de distinta naturaleza, imán superconductor, sistemas de cabezas frías de dos estados. Éstos, y la mayoría de los elementos asociados están fabricados por empresas extranjeras fundamentalmente de

Firma (1): DANIEL RODRÍGUEZ RUBIALES  
En calidad de: Solicitante



Alemania, Inglaterra, EEUU o Japón, que tienen representación en España a través de una empresa local (distribuidora). No obstante, la tecnología asociada a la construcción de las trampas de iones es importante en lo que respecta a

- mecanizado de precisión y/o técnicas de microfabricación,
- propiedades y tratamiento de distintos materiales (propiedades eléctricas, térmicas, desgasificación...),
- electrónica de altas prestaciones para detección de iones y
- funcionamiento a temperaturas criogénicas y el efecto en vacío.

Todos estos puntos se tratan en el laboratorio. El primer logro importante ha sido el desarrollo de circuitos realizados en colaboración con la empresa SEVEN SOLUTIONS S.L. (Spin-off de la UGR) en el período 2014-2015, desarrollo que empezó desde cero para construir un circuito detección en banda ancha y en banda estrecha, esto último con resonadores de cuarzo por primera vez. Una vez terminados y probados a temperatura ambiente y criogénica, los circuitos se enviaron a la Universidad de Mainz (Alemania), lo que permitió proyectar (este desarrollo hecho por primera vez en España) a otros grupos, particularmente al grupo del profesor Michael Block<sup>2</sup>.

En el período 2016-2021, se han llevado a cabo diseños importantes en lo que respecta a criogenia en el laboratorio. Se ha construido un sistema de apantallamiento para hacer operar la trampa Penning de medida a dicha temperatura ha participado (además de TRINOS VACUUM- que actualmente no existe):

- TECHNOLOGY APPLICATIONS (TAI) de Boulder (Estados Unidos), suministrando de trenzas de cobre para las conexiones entre los estados a 4 K y 40 K del sistema de cabezas frías con los electrodos de cobre de la trampa y del apantallamiento a través de trenzas de cobre
- el taller de mecanizado del Centro de Instrumentación Científica de la UGR y
- SUPRASYS S.L. (Bilbao), suministrando una nueva trampa Penning que funcione a temperatura criogénica Granada y que se empezará a probar en breve. En este caso el plan

---

<sup>2</sup>Hasta entonces, los circuitos de detección de corrientes inducidas por iones atrapados para llevar a cabo experimentos de precisión, se habían desarrollado sólo en laboratorios (o empresas cercanas a estos) en los que se trabaja en esa técnica desde hace décadas y siempre en experimentos orientados a la detección de la llamada frecuencia axial de partículas como protones (Universidad de Mainz y CERN), antiprotones (CERN), electrones (Mainz), iones con estado de carga alto (Mainz, Florida State University y MPIK), pero sin resultados aplicables a la detección de un solo ion cuando se trata de frecuencias ciclotrónicas de iones pesados o súper-pesados. Los desarrollos han permitido obtener resultados relevantes recientemente publicados.



de trabajo contempla la operación y verificación de la temperatura en la trampa y de la idoneidad de las conexiones eléctricas.

Un punto importante de los desarrollos que se espera tenga más proyección es la microfabricación, dada la necesidad de escalabilidad de las trampas para su uso en distintas aplicaciones. En este sentido se está colaborando con el grupo del Prof. Christian Ospelkaus de la Universidad de Hannover y de la PTB-Braunschweig en el marco de un proyecto de la Junta de Andalucía (*Quantum Mass Spectrometry Using a Two-Ion Crystal*). La microtrampa actualmente en diseño en la UGR se fabricaría en la PTB, permitiendo al grupo conocer el *know-how*, lo que requiere (es un proceso que se estima en al menos dos años):

- Diseño de nueva microtrampa (en curso).
- Diseño de placa electrónica.
- Diseño del acoplamiento de la microtrampa a la trampa criogénica construida por la empresa SUPRASYS S.L..
- Interacción con colaboradores de PTB → implementación de modificaciones → diseño final.
- Construcción utilizando las técnicas disponibles en las salas blancas del Instituto Alemán (PTB-Braunschweig).
- Mecanizado de piezas de acoplamiento.
- Prueba de prototipo en lo que respecta a criogenia y conexiones eléctricas, acoplado a la nueva trampa.
- Estudio con iones.

A todo esto, hay que añadir la instalación de un imán superconductor libre de helio y nitrógeno líquido para lo que ya se está interaccionado con empresas. Este tipo de imanes funcionan con sistemas de cabezas frías y están poco extendidos.

## 7.2. Colaboraciones (proyección del laboratorio)

Progresivamente el grupo, aunque pequeño, empieza a abrir más posibilidades de colaboración.

**Profesores e investigadores que participan en los proyectos de la Sec. 5 incluyendo los miembros que trabajan actualmente en el laboratorio.**

1. Daniel Rodríguez. Profesor Titular de Universidad. Investigador principal.
2. Emilio Altozano. Físico, garantía juvenil.



3. Amado Bautista-Salvador. Investigador posdoctoral en Universidad de Hannover (LUH) y PTB-Braunschweig.
4. Joaquín Berrocal. Físico, doctorando FPU.
5. Michael Block. *Full professor* en *Institute of Nuclear Chemistry* de la Universidad de Mainz (JGU), y director del departamento "*Superheavy Element Physics*" en el GSI-Darmstadt y en el instituto HIM de Mainz.
6. Ana Carrasco Sanz. Profesora Titular de Universidad. Departamento de Óptica. Miembro del Grupo FQM151 (Grupo de Óptica de Granada).
7. Francisco Domínguez. Físico, Personal Técnico de Apoyo (PTA) del MICINN en UGR.
8. Christoph Düllmann: *Full professor* en *Institute of Nuclear Chemistry* de la Universidad de Mainz (JGU), y director del departamento "*Superheavy Element Chemistry*" en el GSI-Darmstadt y en el instituto HIM de Mainz. Investigador principal de PRISMA+ *Cluster of Excellence within the German Excellence Initiative*.
9. Francisco Javier Fernández. Profesor Titular de Universidad. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Miembro del Grupo TIC117 (Circuitos y Sistemas Procesamiento de la Información).
10. David Freire Fernández. Físico, contratado con cargo a proyecto.
11. Francesca Giacoppo. *Tenure-track* en GSI y HIM, Responsable de los experimentos de medidas de masas con la instalación SHIPTRAP y SHIPTRAP2.
12. Christian Ospelkaus. Full professor en Universidad de Hannover (LUH) y PTB-Braunschweig. Responsable del grupo *Trapped-Ion Quantum Engineering* del *Institute of Quantum Optics*.
13. Gabriel Ramírez. Ingeniero electrónico de la empresa SEVEN SOLUTIONS S.L
14. Dennis Renisch: Científico permanente en *Institute of Nuclear Chemistry* de la Universidad de Mainz (JGU)

Uno de los objetivos es realizar experimentos a propuestas de **investigadores teóricos del campo de las tecnologías Cuánticas en España**<sup>3</sup>.

1. Adán Cabello. Catedrático de la Universidad de Sevilla. Miembro del comité de la Red Estratégica de Información y Tecnologías Cuánticas (RITCE-2). Investigador principal de grupo FQM-239 (Fundamentos de Mecánica Cuántica).
2. Juan José García Ripoll. Investigador Científico del Instituto de Física Fundamental del CSIC. Coordinador de la red estratégica de Información y Tecnologías Cuánticas en España

<sup>3</sup>Con algunos de estos investigadores ya hay publicaciones en común.





(RITCE-2). Investigador principal del grupo Quantum Information and Foundations Group (QUINFOG).

3. Lucas Lamata. Profesor Titular de Universidad de la Universidad de Sevilla. Miembro del Grupo FQM177 (Dinámica Estocástica Clásica y Cuántica Aplicada).
4. Enrique Solano. Profesor IKERBASQUE: director del grupo QUTIS.
5. Javier Cerrillo. Investigador Beatriz Galindo en Universidad Politécnica de Cartagena.

#### **Investigadores experimentales de otras disciplinas con los que se está empezando a colaborar<sup>4</sup>.**

1. Juan Manuel Cuerva. Catedrático de Universidad. Departamento de Química Orgánica. Director del Departamento. Miembro del Grupo FQM367 (Materiales Orgánicos Funcionales).
2. Araceli González Campaña. Profesora Titular de Universidad. Departamento de Química Orgánica. Miembro del Grupo FQM367.

#### **7.3. Otros aspectos de interés.**

El trabajo que se realiza tiene una proyección importante en el marco educativo, además de ofrecer prácticas en el curso “Física del Láser y Aplicaciones” del máster de física de la UGR. Se ha propuesto una práctica específica de generación de un bit cuántico con un ion atrapado en el máster interuniversitario en Tecnologías Cuánticas, que se está preparando, coordinado desde el CSIC. Esta práctica se oferta en el curso “Laboratorio de Tecnologías Cuánticas”.

El trabajo en lo que respecta al vacío de los sistemas del laboratorio y el conocimiento de los paquetes informáticos utilizados puede tener implicaciones positivas en aspectos técnicos del nuevo acelerador.

#### **8. Un informe del centro en que se encuentran las instalaciones.**

Dicho informe se realizó en 2017.

---

<sup>4</sup>Se ha comenzado recientemente en el marco de un TFG.



**1. Apéndice 1:** Listado de grupos que se muestran en la Fig. 1. Tomado de <https://quantumoptics.at/en/links/ion-trapping-worldwide.html>.

País	Ciudad	Institución	Grupo	Responsable
Argentina	Buenos Aires	University of Buenos Aires	<a href="#">Laboratory of Cold Ions and Atoms</a>	Christian Schmiegelow
Australia	Sydney	University of Sidney	<a href="#">Quantum Control Laboratory</a>	Mike Biercuk
Austria	Brisbane	Griffith University	<a href="#">Ion-trap Quantum Computing Laboratory</a>	Eric Streed, Mirko Lobino
Austria	Innsbruck	University of Innsbruck	<a href="#">Quantum Optics and Spectroscopy</a>	Rainer Blatt
Austria	Innsbruck	University of Innsbruck	<a href="#">Quantum Interfaces Group</a>	Tracy Northup
Austria	Innsbruck	[Company]	<a href="#">AQT</a>	Thomas Monz
Canada	Burnaby	Simon Fraser University	<a href="#">Haljan Group</a>	Paul Haljan
Canada	Ottawa	NRC	<a href="#">Measurement science and standards</a>	John Bernard, Alan Madej
Canada	Waterloo	IQC, University of Waterloo	<a href="#">Quantum Information with Trapped Ions</a>	K. Rajibul Islam
Canada	Waterloo	IQC, University of Waterloo	<a href="#">Crystal Senko Group</a>	Crystal Senko
China	Hefei	University of Science and Technology of China	<a href="#">Key Laboratory of Quantum Information</a>	Guang-Can Guo
China	Beijing	Tsinghua University	<a href="#">Center for Quantum Information</a>	Kihwan Kim
China	Beijing	Tsinghua University	<a href="#">Center for Quantum Information</a>	Luming Duan
China	Beijing	Tsinghua University	<a href="#">Joint institute for Measurement Science</a>	Li-Jun Wang
China	Wuhan	Huazhong University of Science and Technology	<a href="#">MOE Key Laboratory</a>	Ze-Huang Lu
China	Wuhan	Wuhan Institute of Physics and	<a href="#">Ion Optical Frequency Standard</a>	Xue-Ren Huang



		Mathematics		
China	Wuhan	Wuhan Institute of Physics and Mathematics	<a href="#">Mercury Ion Microwave Frequency Standard</a>	Jiaomei Li
China	Wuhan	Wuhan Institute of Physics and Mathematics	<a href="#">Quantum Information and Trapped Ion Physics</a>	Mang Feng
China	Wuhan	Wuhan Institute of Physics and Mathematics	<a href="#">Trapping of Cold Ions</a>	Ke-Lin Gao
China	Changsha	National University of Defense Technology	<a href="#">Department of Physics</a>	Pingxing Chen
Czech Republic	Olamouc	Palacký University & ISI	<a href="#">Quantum Optics Lab</a>	Radim Filip, Lukáš Slodička
Denmark	Aarhus	Aarhus University	<a href="#">Ion Trap Group</a>	Michael Drewsen
Finland	Helsinki	Aalto University	<a href="#">MIKES Time and Frequency Group</a>	Mikko Merimaa
France	Besançon	FEMTO-ST	<a href="#">Compact Optical Atomic Clock</a>	Clément Lacroûte
France	Marseille	Aix-Marseille University	<a href="#">Ion Trapping and Laser Manipulation Group</a>	Martina Knoop, Caroline Champenois
France	Paris	LKB	<a href="#">Trapped Ions Group</a>	Laurent Hilico
France	Paris	Université Paris Diderot	<a href="#">Trapped Ions and Quantum Information</a>	Luca Guidoni, Samuel Guibal
Germany	Bonn	University of Bonn	<a href="#">Experimental Quantum Physics</a>	Michael Köhl
Germany	Braunschweig	PTB	<a href="#">Quantum Logic Spectroscopy Group</a>	Michael Köhl
Germany	Braunschweig	PTB	<a href="#">Multi-Ion Clocks</a>	Tanja Mehlstäubler
Germany	Braunschweig	PTB	<a href="#">Trapped-Ion Quantum Engineering</a>	Christian Ospelkaus
Germany	Braunschweig	PTB	<a href="#">Optical Clocks with Trapped Ions</a>	Ekkehard Peik



Germany	Düsseldorf	University of Düsseldorf	<a href="#">Quantum Optics and Relativity</a>	Stephan Schiller
Germany	Erlangen	MPI for the Science of Light	<a href="#">Leuchs Division</a>	Gerd Leuchs
Germany	Freiburg	University of Freiburg	<a href="#">Schaetz Division</a>	Tobias Schaetz
Germany	Garching	MPQ	<a href="#">Trapped Ions Group</a>	Thomas Udem, Ted Hänsch
Germany	Hannover	Leibniz University	<a href="#">Trapped-Ion Quantum Engineering</a>	Christian Ospelkaus
Germany	Heidelberg	MPI für Kernphysik	<a href="#">Highly Charged Ion Dynamics</a>	José Ramon Crespo López-Urrutia
Germany	Kassel	University of Kassel	<a href="#">Light-matter interaction</a>	Kilian Singer
Germany	Mainz	University of Kassel	<a href="#">Cold Ions and Experimental Quantum Information</a>	Ferdinand Schmidt-Kaler
Germany	Saarbrücken	Saarland University	<a href="#">Quantum Photonics Group</a>	Jürgen Eschner
Germany	Siegen	University of Siegen	<a href="#">Quantum Optics Research Group</a>	Christof Wunderlich
Germany	Ulm	Ulm University	<a href="#">Institute of Quantum Matter</a>	Johannes Hecker Denschlag
India	Bangalore	Raman Research Institute	<a href="#">Quantum Interactions</a>	Sadiq Rangwala
Israel	Rehovot	Weizmann Institute	<a href="#">Trapped-Ions Lab</a>	Roe Ozeri
Israel	Rehovot	Weizmann Institute	<a href="#">Molecular Physics Group</a>	Daniel Zajfman
Japan	Kobe	NICT	<a href="#">Quantum ICT Laboratory</a>	Kazuhiro Hayasaka
Japan	Kyoto	Kyoto University	<a href="#">Quantum Optical Engineering</a>	Masao Kitano
Japan	Okinawa	Okinawa Institute of Science and Technology Graduate	<a href="#">Experimental Quantum Information Physics (EQUIP) unit</a>	Hiroki Takahashi
Japan	Osaka	Osaka University	<a href="#">Mukaiyama Laboratory</a>	Takashi Mukaiyama
Japan	Osaka	Osaka University	<a href="#">QIP using trapped ions (Toyoda Group)</a>	Kenji Toyoda
Japan	Osaka	Osaka University	<a href="#">Tanaka Group</a>	Utako Tanaka



Japan	Tokyo	The University of Tokyo	<a href="#">Noguchi Laboratory</a>	Atsushi Noguchi
Japan	Tokyo	The University of Tokyo	<a href="#">Hasegawa Laboratory</a>	Shuichi Hasegawa
Netherlands	Amsterdam	University of Amsterdam	<a href="#">Hybrid atom-ion Quantum Systems</a>	Rene Gerritsma
Netherlands	Amsterdam	VU Amsterdam	<a href="#">HD+ spectroscopy team</a>	Jeroen Koelemeij
Netherlands	Amsterdam	VU Amsterdam	<a href="#">Ultrafast Laser Physics and Precision Metrology Group</a>	Kjeld Eikema
Netherlands	Groningen	University of Groningen	<a href="#">Research Group Ions</a>	Klaus Jungmann
Singapore	Singapore	CQT	<a href="#">Microtraps Group</a>	Murray Barrett
Singapore	Singapore	CQT	<a href="#">Trapped molecular ions</a>	Dzmitry Matsukevich
Singapore	Singapore	CQT	<a href="#">Cold Ion Group</a>	Manas Mukherjee
South Africa	Stellenbosch	Stellenbosch University	<a href="#">Trapped Ion Quantum Control</a>	Hermann Uys
South Korea	Pohang	Pohang University of Science and Technology	<a href="#">Quantum Computing and Quantum Network</a>	Moonjoo Lee
South Korea	Seoul	Seoul National University	<a href="#">Nano/Micro system &amp; controls Lab</a>	Dan Cho
South Korea	Seoul	Seoul National University	<a href="#">Quantum Information and Quantum Computing Lab</a>	Taehyun Kim
Spain	Granada	Universidad de Granada	<a href="#">Molecules Atoms Ions Nuclei</a>	Daniel Rodríguez
Sweden	Stockholm	Stockholm University	<a href="#">Trapped Ion Quantum Technologies</a>	Markus Hennrich
Switzerland	Basel	University of Basel	<a href="#">Willitsch Group</a>	Stefan Willitsch
Switzerland	Zurich	ETH	<a href="#">Trapped Ion Quantum Information</a>	Jonathan Home
United Kingdom	Brighton	University of Sussex	<a href="#">Ion Quantum Technology Group</a>	Winni Hensinger
United Kingdom	Brighton	University of Sussex	<a href="#">ITCM Group</a>	Matthias Keller
United Kingdom	London	Imperial College	<a href="#">Ion Trapping Group</a>	Richard Thompson



United Kingdom	Oxford	University of Oxford	<a href="#">Ion Trap Quantum Computing Group</a>	David Lucas, Andrew Steane
United Kingdom	Oxford	University of Oxford	<a href="#">Softley Research Group</a>	Tim Softley
United Kingdom	Teddington	NPL	<a href="#">Strontium Ion Optical Frequency Standard</a>	Alastair Sinclair, Patrick Gill
United Kingdom	Teddington	NPL	<a href="#">Ytterbium Ion Optical Frequency Standard</a>	Rachel Godun
USA	Berkeley	UC Berkeley	<a href="#">Ion Trap Group</a>	Hartmut Häffner
USA	Los Angeles	UCLA	<a href="#">Hudson Lab</a>	Eric Hudson
USA	Los Angeles	UCLA	<a href="#">Campbell Lab</a>	Wes Campbell
USA	Boulder	NIST	<a href="#">Ion Storage Group</a>	John Bollinger
USA	Broomfield	[Company]	<a href="#">Honeywell Quantum Solutions</a>	Tony Uttley
USA	Storrs	University of Connecticut	<a href="#">Atomic and Molecular Spectroscopy Group</a>	Winthrop Smith
USA	Atlanta	Georgia Tech	<a href="#">Chapman Research Lab</a>	Michael Chapman
USA	Atlanta	GTRI	<a href="#">Quantum Systems group</a>	Alexa Harter
USA	Evanston	Northwestern University	<a href="#">Molecular Ion and Atom Trapping Group</a>	Brian Odom
USA	Bloomington	Indiana University	<a href="#">Richerme Lab</a>	Phil Richerme
USA	UMD College Park	JQI (UMD / NIST)	<a href="#">Trapped Ion Quantum Information</a>	Chris Monroe
USA	UMD College Park	JQI (UMD / NIST)	<a href="#">Linke Lab</a>	Norbert Linke
USA	UMD College Park	Army Research Lab, JQI	<a href="#">Quraishi Group</a>	Qudsia Quraishi
USA	UMD College Park	Army Research Lab, JQI	<a href="#">Trapped Ion Lab</a>	Joe Britton
USA	UMD College Park	[Company]	<a href="#">IonQ</a>	Peter Chapman, Jungsang Kim, Chris Monroe
USA	Amherst	Amherst College	<a href="#">Hanneke Ion Trap Lab</a>	David Hanneke
USA	Cambridge	MIT Center for Ultracold Atoms	<a href="#">Experimental Atomic Physics Group</a>	Vladan Vuletic



USA	Cambridge	MIT Center for Ultracold Atoms	<a href="#">Quanta Group</a>	Ike Chuang
USA	Lexington	MIT Lincoln Laboratory	<a href="#">Lincoln Laboratory</a>	John Chiaverini
USA	Williamstown	Williams College	<a href="#">Doret Group</a>	Charlie Doret
USA	Albuquerque	Sandia National Labs	<a href="#">Microsystems Engineering, Science and Applications (MESA)</a>	Dan Stick, Peter Maunz, Matt Blain
USA	New York	New York University	<a href="#">Precisely Quantum</a>	Jiehang Zhang
USA	Durham	Duke University	<a href="#">Brown Lab</a>	Kenneth Brown
USA	Durham	Duke University	<a href="#">MIST Group</a>	Jungsang Kim
USA	Granville	Denison University	<a href="#">Ion Quantum Optics</a>	Steven Olmschenk
USA	Eugene	University of Oregon	<a href="#">Oregon Ions</a>	David Allcock, Dave Wineland
USA	Middlebury	Middlebury College	<a href="#">Ion Trapping Lab</a>	Paul Hess
USA	Seattle	University of Washington	<a href="#">Trapped Ion Quantum Computing</a>	Boris Blinov

