

LABORATORIO DE IONES Y ATOMOS FRIOS EN EL DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA FCEyN UBA (LIAF-UBA)

J. P. Paz, M. A. Larotonda, A. J. Roncaglia y C. T. Schmiegelow

En este documento se describe un proyecto para crear un nuevo Laboratorio en el ámbito del Departamento de Física de la FCEyN UBA y del Instituto de Física de Buenos Aires (DF & IFIBA). El Laboratorio aspira a ser pionero en un área de vacancia en Argentina: La manipulación coherente de iones y átomos fríos y su utilización tanto para estudios de interés fundamental como para diversas aplicaciones de interés tecnológico en temas vinculados al procesamiento de la información y a la metrología.

ÍNDICE

1	Introducción	2
1.1	Antecedentes: La nueva revolución cuántica.	2
1.2	Física de materia fría: un área de vacancia en la Argentina	4
2	Propuesta Científica y Descripción del Grupo de Trabajo	5
2.1	Investigadores involucrados - Grupo Fundador	5
2.2	Historia y proyección del grupo de trabajo	6
2.3	Objetivos de desarrollo a corto, mediano y largo plazo	6
2.4	Objetivos científicos del Laboratorio de Iones y Átomos Fríos @ DF/IFIBA	7
3	Descripción Técnica de la Propuesta	10
3.1	Plan de desarrollo y lugar de emplazamiento propuesto	10
3.2	Características generales del equipamiento	11
3.3	Descripción de los equipos requeridos para el LIAF@UBA.	12
4	Consideraciones Finales	12

1. INTRODUCCIÓN

La creación de un nuevo laboratorio en nuestro ámbito no es una tarea sencilla y requiere del esfuerzo coordinado de un grupo que tenga coherencia y disponga de los recursos necesarios (tanto humanos como materiales). Presentamos aquí una propuesta viable, a nuestro juicio, para crear un nuevo laboratorio cuyo foco temático es, a la vez, de gran actualidad científica en la física internacional y una vacancia reconocida en nuestro país: La manipulación coherente de iones y de átomos fríos. El documento está organizado de la siguiente manera. En la introducción describiremos la relevancia y el interés intrínseco del tema así como también el casi nulo desarrollo que ha alcanzado en nuestro país. En la segunda sección describiremos las características del grupo responsable de esta propuesta, su experiencia previa y los objetivos científicos de la propuesta. Finalmente en tercera sección describiremos las necesidades de espacio, las obras de infraestructura requeridas y el equipamiento que deberíamos incorporar. Enfatizamos la conveniencia de considerar esta propuesta en el contexto de la convocatoria PME que está abierta en la actualidad.

1.1. ANTECEDENTES: LA NUEVA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

La mecánica cuántica surgió hace más de un siglo ante la necesidad de explicar experimentos vinculados a la física del átomo y de su interacción con la luz. Desde su formulación, muchas generaciones de científicos compartieron un sentimiento dual hacia ella: la fascinación y la admiración que producen la enorme precisión de las predicciones de la física cuántica siempre se combinó con el estupor y la insatisfacción intelectual generados por sus consecuencias fundamentales sobre la naturaleza del mundo y sobre nuestras posibilidades de conocer sus propiedades. En la actualidad, a principios del siglo XXI, muchos físicos perciben que estamos viviendo una nueva revolución cuántica. En efecto, muchos de los experimentos imaginados que sirvieron para formular, ilustrar y discutir las propiedades más curiosas de la física cuántica, hoy en día han sido realizados en laboratorios reales.

Estos experimentos no solamente ponen de manifiesto las propiedades más curiosas de la física cuántica, desafiando sus predicciones en regímenes nunca antes explorados. En efecto, estos avances han contribuido al surgimiento de una nueva familia de tecnologías cuánticas con aplicaciones en el procesamiento de la información, en el desarrollo de dispositivos ultra sensibles y en la definición de nuevos patrones metrológicos. En las últimas dos décadas se ha logrado la manipulación y el control de sistemas cuánticos individuales [1, 2], se ha podido preparar estados de la materia con coherencia cuántica macroscópica [3], se han logrado preparar también sistemas cuánticos en estados entrelazados de sistemas multipartitos en escalas macroscópicas [4, 5, 6] y se ha controlado eficazmente su evolución [7, 8], etc. El correlato tecnológico de estos experimentos fundamentales es cada vez mas evidente. Mas abajo lo describiremos con mas detalle, pero antes de hacerlo cabe mencionar que algunos de estos avances han sido reconocidos por el Comité Nobel que ha otorgado el afamado premio a varios de los protagonistas de esta nueva revolución cuántica. En efecto, en 2012 Serge Haroche y David Wineland recibieron el

Premio Nobel de Física por “sus contribuciones al desarrollo de técnicas que permiten la manipulación de sistemas cuánticos individuales”. Pocos años antes, en 2005, el comité Nobel había otorgado el premio a Theodor Hansch y a John Hall “por su contribución a la espectroscopia coherente de alta resolución, que ha permitido enormes avances en el campo del enfriamiento y atrapamiento de átomos” y a Roy Glauber “por el desarrollo de la óptica cuántica” que también es fundamental en el campo del atrapamiento y la manipulación de materia fría. Por otra parte en 2001, año del centenario Nobel, Eric Cornell, Carl Wieman y Wolfgang Ketterle [9, 10] fueron premiados “por haber alcanzado la condensación de Bose-Einstein de átomos alcalinos y por los primeros estudios fundamentales de las propiedades de estos condensados” [11, 12]. Para alcanzar sus resultados, estos investigadores usaron métodos desarrollados por Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William D. Phillips [13, 14, 15], a quienes la Academia Sueca otorgó el Nobel en 1998 “por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con luz láser”. En resumen, en las últimas dos décadas, uno de cada cuatro premios Nobel en física ha sido otorgado en campos que tienen directa relación con el atrapamiento, la manipulación y el enfriamiento de materia coherente (átomos o iones) y al estudio de sus propiedades cuánticas. Esto es una clara manifestación del alto grado de desarrollo y de la relevancia que ha alcanzado este campo en el mundo. Teniendo en cuenta los trabajos en marcha, es razonable imaginar que la tendencia mencionada continuará en la próxima década, en la que probablemente serán premiadas investigaciones sobre propiedades fundamentales de la naturaleza tales como la no localidad, el entrelazamiento y las correlaciones cuánticas así como también otras sobre campos tales como la información cuántica, la metrología cuántica y los simuladores cuánticos.

Los temas en los que la utilización de iones atrapados y enfriados tiene potenciales aplicaciones son amplios y variados [16, 8], no es nuestra intención hacer aquí una reseña exhaustiva de estas aplicaciones pero conviene resaltar algunas de las mas relevantes. Quizás la más evidente de todas, y que dio lugar al surgimiento de las versiones modernas de trampas iónicas (que le valieron el premio Nobel a Wolfgang Paul en 1989), es la espectroscopía coherente de ultra alta resolución. No en vano algunos de los principales grupos de trampas pertenecen a instituciones “metrológicas” (como el NIST, que en su división de “Tiempos y frecuencias” alberga nada menos que a David Wineland). En este campo se investiga actualmente el desarrollo de nuevos relojes atómicos construidos con iones atrapados [17, 18]. Pese a que el reloj cuántico operado por el grupo de Wineland es el mas preciso del mundo (atrás o adelanta menos de un segundo en mil millones de años), no queda claro que esta será la tecnología que se utilizará en los relojes del futuro. Pero es, sin duda, una de las tecnologías que actualmente están en competencia con ese fin. Relojes tan precisos han puesto en evidencia la dilatación del tiempo con la altura, tal como predice la teoría de la relatividad general, para variaciones de altura de algunas decenas de centímetros. De este modo, han abierto la puerta al surgimiento de una nueva generación de sensores gravimétricos que podrían usarse para investigaciones de interés geológico. También es de destacar el rol que juegan estos dispositivos como espectrógrafos de masa de alta precisión [19]. Por otra parte, las trampas han servido además para llevar adelante algunos de los experimentos más notables en la manipulación de sistemas cuánticos individuales que permitieron poner de manifiesto propiedades notables de la mecánica cuántica [20, 21, 22, 23, 24]. Propor-

cionan un sistema cuántico limpio y estable, ya que los iones pueden ser confinados por tiempos prolongados y sólo experimentan pequeñas perturbaciones del ambiente, lo que permite su manipulación coherente. En la actualidad, son el sistema más versátil para construir “simuladores cuánticos” [25, 26, 27, 28, 29, 30], campo en el cual se esperan resultados importantes durante la próxima década en la que probablemente se desarrollen sistemas capaces de simular redes de espines cuya dinámica no podría ser resuelta por las computadoras clásicas mas poderosas. Por otra parte, desde los trabajos pioneros de Ignacio Cirac y Peter Zoller son una de las tecnologías en estudio para la construcción de procesadores cuánticos de la información [31]. En la actualidad, las trampas de iones ostentan el récord mundial de qubits manipulados de manera universal y en ese contexto se han realizado numerosas demostraciones notables. Por último, cabe mencionar que entre las diversas aplicaciones posibles de las trampas de iones se encuentran: el desarrollo de sistemas ultra precisos de implantación iónica [32], el diseño y la implementación de nuevas máquinas térmicas (motores y refrigeradores) que funcionen en un régimen cuántico [33], entre otras.

1.2. FÍSICA DE MATERIA FRÍA: UN ÁREA DE VACANCIA EN LA ARGENTINA

Como mencionamos más arriba, el atrapamiento y la manipulación coherente de materia fría (iones o átomos neutros) es un área de enorme actualidad internacional. Sin embargo, la misma está totalmente subdesarrollada en la Argentina. La importancia de esta área de vacancia en el país y en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA ya ha sido expresada por el Consejo Departamental (CODEP) del Departamento de Física. Desde hace ya casi 10 años se vienen tomando algunas medidas para promover el desarrollo de esta área en el ámbito del DF (como por ejemplo la organización de las ediciones 2007 y 2009 de la escuela de invierno J. J. Giambiagi de Física). Por otra parte, el Sistema Nacional de Láseres declaró a la manipulación de átomos fríos como una de las áreas de vacancia en nuestro país, cuyo desarrollo debería ser priorizado en futuros concursos de proyectos (tales como el PME).

Es destacable que si bien en la Argentina hay un importante desarrollo de la óptica y la física de láseres, ninguno de los grupos activos existentes ha encarado proyectos con objetivos vinculados al atrapamiento de átomos o iones ni a la manipulación de materia coherente fría o a la espectroscopia coherente de alta resolución. Esta vacancia representa una debilidad de nuestro país que debería ser corregida ya que, como mencionamos más arriba, las tecnologías que se desarrollan en esta área tienen un enorme impacto en la definición de nuevos patrones de medición de tiempos y frecuencias así como también en el desarrollo de diversos tipos de sensores, o en el avance hacia objetivos más distantes como la computación cuántica. Es destacable que si bien hay varios grupos activos en física atómica en Argentina, estos han enfocado tradicionalmente sus intereses al estudio de procesos de colisiones atómicas. Es decir, han enfocado su trabajo en otra escala de fenómenos, lejos del régimen coherente, poniendo el énfasis en la obtención de información sobre secciones eficaces de colisión y en sus aplicaciones a campos diversos como por ejemplo la atrofísica, el análisis de efectos de radiaciones y el uso de las mismas para estudios de propiedades de materiales y de superficies.

En cambio, a nivel regional, es notable el desarrollo que ha alcanzado nuestro vecino Brasil en el campo de la óptica cuántica y la manipulación coherente de materia fría. En ese país existen laboratorios en los que se han producido condensados de Bose Einstein (como el del Profesor Vanderlei Bagnato en UFSC, San Pablo) así como también otros en los que se realizan novedosos experimentos de óptica cuántica (como el del Profesor Steve Walborn en UFRJ, en Rio de Janeiro, el de Cesar Monken en UFMG en Belo Horizonte o el de Paulo Souto Ribeiro en UFSC en Florianopolis) o de espectroscopía coherente de alta resolución (como el del Profesor Jose Tabosa en Recife o el del Profesor Paulo Nussensweig en San Pablo). Sin embargo, no existen en América Latina laboratorios que dominen la tecnología de atrapamiento y enfriamiento de iones. Por eso, el laboratorio cuya construcción proponemos sería pionero en todo nuestro sub-continente.

2. PROPUESTA CIENTÍFICA Y DESCRIPCIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO

2.1. INVESTIGADORES INVOLUCRADOS - GRUPO FUNDADOR

El grupo de investigadores que formará este nuevo Laboratorio estará integrado, en una primera etapa, por tres profesores del DF: Juan Pablo Paz (que en esta instancia actuará como Director/Coordinador), Augusto Roncaglia y Miguel Larotonda. Estos tres investigadores conforman el “grupo fundador” del LIAF-UBA. Cabe destacar que JPP y AR son profesores del DF y tienen lugar de trabajo como investigadores de CONICET en el DF/IFIBA. Por su parte, ML es Profesor en el DF e investigador del CONICET con lugar de trabajo en CITEDEF, donde dirige el Laboratorio de Óptica Cuántica. Los tres tienen experiencia de trabajo en equipo, forman parte del mismo grupo de investigación, comparten varios proyectos de investigación subsidiados por agencias nacionales y han participado en la puesta en marcha del laboratorio de óptica cuántica en el ámbito de CITEDEF. Los tres manifiestan su decisión de enfocar sus esfuerzos en la creación de este nuevo Laboratorio.

La presente propuesta se basa fuertemente en el inminente regreso al país del Dr. Christian Schmiegelow que está realizando una importante experiencia post doctoral en el laboratorio de Iones Atrapados dirigido por el Profesor Ferdinand Schmidt-Kaler en la Universidad de Mainz (Alemania) y cuenta con la experiencia necesaria para montar el nuevo laboratorio [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40].

El proyecto que presentamos aquí, es posible luego de un importante trabajo de nuestro grupo en la formación de recursos humanos y capacidades técnicas. Un ejemplo destacado es el desarrollo del laboratorio de Óptica Cuántica a cargo del Dr. Larotonda. El laboratorio de Óptica Cuántica funciona en el ámbito de CITEDEF y su creación fue enteramente financiada por proyectos PICT y PIP dirigidos por los miembros de nuestro grupo fundador. De hecho, el montaje de ese laboratorio y los primeros experimentos que allí se hicieron constituyeron la tesis de doctorado de Christian Schmiegelow [41, 42]. Sin duda, buscaremos reproducir nuevamente la valiosa experiencia de intensa colaboración teórica experimental en el seno del QUFIBA.

Esperamos también, que recursos humanos valiosos que allí se formaron en los últimos años tengan inserción en este nuevo proyecto.

En consecuencia, este proyecto se funda en la existencia de un pequeño grupo de expertos argentinos, con coherencia interna y experiencia de trabajo en grupo y con conocimientos avanzados en la física de iones fríos (tanto experimental como teórica). El objetivo del grupo fundador es incorporar, en el mediano plazo, nuevos investigadores con experiencia de trabajo en la física de iones fríos. En el largo plazo este objetivo debería completarse con el de crear un grupo con intereses más amplios y diversos, que incluyan tanto a los iones como a los átomos fríos y que tenga interacción fuerte con instituciones estatales que trabajan en aplicaciones metrológicas.

2.2. HISTORIA Y PROYECCIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO

En la última década el grupo QUFIBA, del cual forman parte los investigadores involucrados en este proyecto, ha mantenido una intensa actividad en el campo del estudio de aspectos fundamentales de la mecánica cuántica, de la óptica cuántica y de la información cuántica. Entre sus actividades realizó algunas contribuciones teóricas a problemas vinculados a la física de iones atrapados [43, 34, 44]. Estas incluyen tanto el estudio de propiedades termodinámicas emergentes en cristales de iones atrapados como el análisis de la utilización de estos sistemas como simuladores cuánticos. Nuestro grupo ha propuesto varios experimentos con este tipo de sistemas y colaborado con grupos extranjeros. En efecto, como parte de estos trabajos se establecieron vínculos con grupos de primer nivel internacional en estos temas, como los dirigidos por Chris Monroe (Maryland, EEUU), Rainer Blatt (Innsbruck, Austria) y Ferdinand Schmidt-Kaler (Mainz, Alemania).

Además, dentro del grupo se incentivó y motivó a varios estudiantes para que realicen doctorados y postdoctorados en estos temas en diversos grupos del exterior. En este sentido, es destacable el hecho de que hay varios estudiantes argentinos haciendo estadías doctorales, doctorados o posdoctorados en este mismo tema. En la Universidad de Innsbruck dos estudiantes argentinos están completando su doctorado en el grupo de Rainer Blatt (Bernardo Casabone y Esteban Martínez); en el Grupo de Ferdinand Schmidt-Kaler en la Universidad de Mainz, donde Christian Schmiegelow está actualmente terminando su estadía posdoctoral, también hay un estudiante de doctorado argentino haciendo una estadía de formación doctoral (Marcelo Luda). A estos estudiantes aspiraremos a atraer a nuestro ámbito en el mediano plazo.

Se debe notar que en el DF/IFIBA hay otros investigadores con formación experimental que trabajan desde hace años en temas de óptica y láseres (en los laboratorios LPI y LEC) y otros que recientemente se incorporaron (como G. Puentes y P. Grinberg). Todos ellos son colaboradores potenciales de este proyecto en una segunda etapa .

2.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO

Como ya fue mencionado, el control coherente de la materia fría es un área de vacancia nacional. Cubrir esta área de manera integral, incluyendo ciencia básica y aplicaciones es nuestro

objetivo a largo plazo. En una primera etapa proponemos crear en el ámbito del DF/IFIBA un laboratorio donde nos enfocaremos en el estudio de sistemas de iones atrapados [16]. Nuestro principal objetivo es crear, en un plazo razonable, un laboratorio donde se haga buena ciencia básica investigando fenómenos cuánticos fundamentales y donde se aporte a la formación de recursos humanos que puedan contribuir al desarrollo concreto de las diversas tecnologías cuánticas asociadas en nuestro país.

En una segunda etapa, contemplamos abrir progresivamente nuevas líneas de investigación en el campo de la manipulación de átomos fríos [7]. Las técnicas utilizadas en estos dos sistemas (átomos neutros e iones) son similares y es posible lograr una sinergia natural entre ambas. Con el atrapamiento de átomos e iones se exploran dos regímenes diferentes de la naturaleza y se tiene acceso a diferente tipo de observaciones. En efecto, con sistemas atómicos se trabaja en el régimen de muchas partículas (con gases o condensados que contienen cientos de miles, o millones, de átomos) mientras que en el caso de iones se analizan sistemas con pocas partículas (desde una sola, hasta algunos centenares). Por contraposición, en el caso de los iones se explora el límite de alto control y detectabilidad individual mientras que en el caso de los átomos el sistema ofrece menos versatilidad en ese sentido.

Las técnicas utilizadas también tienen varios puntos en común con otras técnicas experimentales de control coherente de la materia como en cierto tipo de circuitos superconductores, sistemas de puntos cuánticos, vacancias de nitrógeno en diamante o tierras raras en cristales, por mencionar solo algunos [45, 46, 47]. Esperamos, que a mediano plazo, la creación de LIAF, ayude e incentive a la formación de nuevos grupos en la argentina que trabajen en estos temas de vanguardia.

Tanto las trampas de iones como los sistemas de átomos neutros atrapados son dispositivos versátiles que pueden encontrar diversas aplicaciones. El desarrollo de tecnologías que permitan por ejemplo hacer nuevos tipos de relojes atómicos, sensores gravimétricos ultra sensibles, simuladores cuánticos o incluso computadoras cuánticas, requiere de esfuerzos de gran escala y de recursos humanos calificados específicamente, de los que, en nuestra opinión, el país carece actualmente. Por esta razón, aspiramos a que el LIAF sea un laboratorio de referencia a nivel nacional e internacional en investigación básica que permita generen los recursos humanos y técnicos que en el mediano plazo puedan hacer propuestas específicas orientadas a aplicaciones.

2.4. OBJETIVOS CIENTÍFICOS DEL LABORATORIO DE IONES Y ÁTOMOS FRÍOS @ DF/IFIBA

En lo que sigue nos limitaremos a describir algunos aspectos de nuestros planes en el Laboratorio de Iones y Átomos Fríos (LIAF) que forma parte de este proyecto. Específicamente, tal como mencionamos mas arriba, en esta primera etapa nuestro objetivo es armar un laboratorio de iones atrapados para realizar experimentos de física en el campo de los fundamentos de la mecánica cuántica, la óptica cuántica, la espectroscopia coherente de alta resolución y la información cuántica. Aspiramos a tener una instalación que permita trabajar tanto en proyectos de interés básico como aplicado (con foco en la metrología). En este contexto el proyecto tendrá

tres líneas principales de trabajo:

- Fundamentos de mecánica cuántica y óptica cuántica (física básica de interacción luz-materia)
- Simulaciones cuánticas (información y fundamentos de mecánica cuántica)
- Espectroscopía atómica de alta resolución (aplicación a metrología, con especial interés en relojes atómicos)

En la primera etapa, las tres direcciones principales de trabajo se desarrollarán en un equipo versátil que permitirá tanto llevar a cabo los objetivos a corto y mediano plazo así como expandirse con futuras actualizaciones. Cada línea, también, se llevará adelante con distintas colaboraciones, algunas de ellas dentro del DF/IFIBA, otras dentro de la Argentina y otras en el exterior.

En el laboratorio trabajaremos con una trampa de Paul micro-estructuradas para atrapar iones de Yb^+ , Ca^+ (Iterbio y Calcio). Las trampas se montarán en cámaras de ultra alto vacío y se dispondrá diverso tipo de láseres estabilizados para ionización, control coherente, enfriamiento, manipulación y detección. Asimismo, el laboratorio deberá contar con sistemas opto electrónicos de control, sistemas de adquisición de datos, etc. Estos equipos se describirán detalladamente mas abajo. Usaremos una trampa y láseres apropiados que permitirán el control coherente de cadenas lineales formadas por una o dos especies iónicas. La trampa permitirá trabajar de manera estable con iones individuales así como también con cadenas de más de 20 iones (en este caso combinando las dos especies). Los láseres permitirán el control coherente tanto de los estados internos así como el de los grados de libertad asociados al movimiento de ambas especies.

Cabe destacar que, teniendo en cuenta que el laboratorio recién estará en condiciones de realizar experimentos originales a principios (o mediados) de 2017, no es posible presentar aquí una descripción detallada de ningún experimento ya que los mismos serán definidos más adelante. Tan solo presentaremos una descripción general del tipo de experimentos en los que nos interesaremos.

En cuanto a la espectroscopía de alta resolución y la óptica cuántica, nos enfocaremos en el estudio de la interacción entre iones y haces de luz estructurados (en este caso, en una primera etapa se trabajará con iones únicos de Yb^+ . La interacción entre iones y haces que llevan momento angular orbital presenta varios aspectos interesantes así como también varias ventajas prácticas con respecto a los haces Gaussianos, que son hasta el momento los utilizados en este tipo de experimentos [34, 48, 49, 50, 51]. En efecto, estos haces permiten excitar transiciones dipolarmente prohibidas. Por cierto, los fotones de estos haces tienen momento angular orbital, lo que implica que las reglas de selección de las transiciones atómicas son drásticamente distintas que las habitualmente observadas con los sistemas Gaussianos. En el laboratorio generaremos haces con momento angular orbital y estudiaremos su interacción con iones únicos examinando, por ejemplo, las transiciones S-P y S-F del Iterbio. Nuestro objetivo será no solamente el estudio

de transiciones electrónicas sino también el de aquellas que acoplan los estados internos con los asociados al movimiento iónico. Además, se estudiarán métodos para transferir estados cuánticos multi-dimensionales de los fotones a los átomos. Cabe destacar que las transiciones electrónicas en iones inducidas por haces estructurados recién comenzaron a ser estudiadas muy recientemente. A pesar de haber sido predichas por varios estudios teóricos en los últimos 5 o 10 años, fueron observadas por primera vez por Schmiegelow et. al. en 2015 [40] en la Universidad de Mainz. En este campo se avizoran varias colaboraciones posibles con grupos teóricos que han estudiado el efecto de luz con momento angular orbital en materiales (por ejemplo Guillermo Quinteiro y Pablo Tamborenea) como con otros grupos experimentales con experiencia en haces estructurados (como el del Laboratorio de Procesado de Imágenes DF-UBA, entre otros). También a mediano y largo plazo se proyecta extender esta técnica a otros sistemas físicos, como puntos cuánticos, tierras raras en cristales o átomos en trampas magneto ópticas, para lo cual se proyectan colaboraciones con grupos con experiencia en esos temas (como el dirigido por el Dr. F. Stefani – CIBION así como también el grupo de la Dra. M. F. Pascual Winter – IB-CAB y el del Dr. D. Felinto- Recife -Brasil).

En cuanto al estudio de propiedades emergentes de cadenas (o cristales) de iones en general, usaremos nuestro setup experimental para crear cadenas y cristales formados por distintas especies (aprovechando la existencia de abundantes isótopos naturales que permitirán trabajar con desorden de masa). Este tipo de dispositivos constituyen una plataforma ideal para la simulación de sistemas cuánticos. Con ellos puede estudiarse las propiedades termodinámicas emergentes para sistemas cuánticos de pocas partículas así como también sistemas cristalinos que forman cadenas o redes de espines. Usando cadenas de más de una decena de iones es posible simular sistemas cuánticos que son tan complejos como para estar más allá de aquello que puede ser simulado con computadoras convencionales. En nuestro grupo hemos trabajado en esta línea. Realizaremos, entonces, experimentos en esta dirección así como también estudios teóricos asociados (en lo posible, mantendremos la tradición de nuestro grupo: no publicaremos propuestas de experimentos sino trabajos que contengan los resultados de los mismos!). Entre los objetivos del laboratorio estará el desarrollo de un sistema óptico que permita la medición de "temperaturas locales.^{en} algunos puntos de la cadena de iones, para lo cual hay varias posibilidades bajo estudio. De este modo, tendremos un sistema versátil para estudiar propiedades termodinámicas emergentes con precisión nunca antes alcanzada (con posibilidades, por ejemplo, de estudiar propiedades de transporte de energía). En estos dispositivos, además, analizaremos la realización de experimentos de "decoherencia controlada" así como también de otros que permitan observar las distintas fases que caracterizan la dinámica del entrelazamiento así como también de otro tipo de correlaciones cuánticas entre iones vecinos, etc. [43, 44, 52, 53, 54]. Como dijimos, en nuestro nuevo laboratorio aspiramos a reproducir la experiencia que tuvimos con la conformación del laboratorio de Óptica Cuántica en CITEDEF: buscaremos lograr una gran sinergia entre la componente teórica y la experimental, lo que oportunamente nos permitió alcanzar un gran impacto tanto a nivel nacional como internacional.

Finalmente, el posible impacto para el desarrollo de la metrología en nuestro ámbito es digno de ser destacado. Nuestro laboratorio aspira a formar recursos humanos con capacidad

para hacer innovación en metrología. En efecto, las trampas de iones son hoy una de las dos tecnologías candidatas a reemplazar la fuente de Cesio como patrón internacional para definir la unidad de tiempo: el segundo [18]. En este campo, intentaremos contribuir al conocimiento y caracterización de estas transiciones para definir un “nuevo segundo”. También intentaremos crear experiencia y competencia para contribuir al desarrollo de relojes atómicos en Argentina. En particular, en una primera etapa, se estudiará la posibilidad de usar las transiciones inducidas por haces estructurados para reducir el impacto del efecto Stark-AC, que es una de las de las fuentes de incertidumbre preponderantes que afecta la precisión de los relojes atómicos. El motivo por el cual esta reducción es esperable es que al utilizar haces estructurados como los descriptos anteriormente, el ion bajo estudio realiza transiciones atómicas aún estando ubicado en una zona del espacio en la que la intensidad del campo eléctrico es muy baja (y, por lo tanto, el efecto Stark es pequeño). Paralelamente a estos estudios espectroscópicos, nuestro laboratorio tendrá el objetivo de interactuar con otras instituciones nacionales en el desarrollo de un reloj atómico de estas características. En este campo, se avizoran colaboraciones futuras tanto con el INTI como con CITEDEF. En el exterior mantendremos interacciones tanto con el PTB (Alemania) como con el grupo del Profesor Bagnato en Brasil.

3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA PROPUESTA

3.1. PLAN DE DESARROLLO Y LUGAR DE EMPLAZAMIENTO PROPUESTO

Este es un proyecto ambicioso que propone metas a mediano plazo. Como mencionamos, en una primera etapa construiremos un laboratorio enfocado en el atrapamiento de iones, área en la cual tenemos mayor experiencia y posibilidades de contar con el personal capacitado y con la colaboración internacional necesaria. Esta primera etapa abarcará los años 2015-2017. Se estima que los primeros resultados experimentales originales podrían obtenerse a mediados de 2017. La segunda etapa comenzará cuando haya avanzado la primera. Por ese motivo, en este documento nos concentramos casi exclusivamente en describir los pasos concretos a seguir en este primer bienio, así como en la descripción de la infraestructura y el equipamiento que intentaremos incorporar en este primer período.

El nuevo laboratorio necesita en forma inmediata de al menos dos salas que puedan estar bien aisladas (con sistemas de filtrado de aire y de acondicionamiento de temperatura). También necesita de otros ámbitos para desarrollo y ensamblado de equipos, taller y sala de control de experimentos y procesamiento de datos. Asimismo, es importante prever que el lugar asignado permita crecer y abrir nuevos ámbitos de trabajo. El lugar ideal para su emplazamiento es el que actualmente ocupa el LNC (Laboratorio de Neurociencia Cognitiva), que sería desocupado en breve. De asignarse ese espacio, comenzaríamos con el acondicionamiento de dos salas (las dos primeras salas que se encuentran a la derecha del pasillo de ingreso). En estas salas colocaríamos nuevos pisos, bajaríamos cielorrasos, acondicionaríamos paredes, renovaríamos la instalación

eléctrica y de red, etc. Estos trabajos podrían hacerse durante lo que queda de 2015 aunque el resto del laboratorio ocupado por LNC continúe siendo utilizado durante ese período. Teniendo en cuenta la magnitud del trabajo (que es relativamente menor) lo ideal sería que la obra la realice personal del DF (Técnico Andrés Ramos Lemes) o eventualmente contrataciones específicas para tareas técnicamente demandantes. Los materiales podrían ser provistos por nuestro grupo o bien ser solventados por el IFIBA (si es que existieran fondos para ese fin). En paralelo con estos trabajos realizaríamos gestiones para obtener e instalar sistemas de filtrado de aire y de acondicionamiento. El financiamiento necesario para adquirir estos equipos está en vías de ser garantizado. De acuerdo a nuestra estimación sería posible terminar con los trabajos de acondicionamiento de las dos salas para principios de 2016.

3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPAMIENTO

La trampa microestructurada que usaremos en esta primera etapa será fabricada con una técnica de corte láser, evaporado y electroplateado de oro sobre un sustrato de óxido de aluminio. La primer trampa se fabricará en colaboración con el grupo de Ferdinand Schmidt-Kaler (Mainz, Alemania). Aspiramos a que el electroplateado, ensamblado y conectorizado se hará en la sala de preparación de muestras de la DF-UBA (que contará en el futuro próximo con una sala limpia adecuada). Para que esto sea posible se requiere contar con un equipo de micromanipulado, un equipo de *wire-bonding* y un equipo básico de electroquímica. En siguientes etapas se proyecta fabricar el 100 % de las trampas en colaboración con grupos de investigación argentinos. El corte láser requiere un láser de Titanio-Zafiro de femtosegundos amplificado (disponible tanto en CIOp-UNLP como en INQUIMAE-FCEyN-UBA). También hay diversos grupos capaces de hacer evaporación de oro (CNEA, CITEDEF) con los que planeamos interactuar con este fin. El desarrollo de nuevas trampas planas (2D) es un campo de mucha actualidad a nivel internacional. Para incursionar en el mismo aspiramos a incorporar sistemas litográficos que son esenciales para fabricar dichas trampas.

El laboratorio que montaremos tendrá un sistema modular de ultra alto vacío capaz de lograr presiones de 10^{-10} mbar. Esto incluye bomba mecánica, turbo-molecular y horno de cocido. Tal sistema, con la ayuda de bombas iónicas, puede utilizarse para preparar cámaras de vacío independientes con presiones por debajo de 10^{-12} mbar. Será por lo tanto una instalación que podrá prestar servicios a otros laboratorios que requieran de él.

Los láseres para enfriamiento Doppler, rebombeo y foto-ionización para ambas especies de iones serán todos láseres de diodo sintonizables con ancho de línea menor que 1MHz. El láser para control coherente de los iones, que sirve tanto para Ca^+ como Yb^+ , será un Titanio-Zafiro sintonizable con ancho de línea menor a 1kHz con opción de doblado de frecuencia. El láser de Titanio-Zafiro sintonizable será comprado “llave en mano” mientras que la mayoría de los láseres de diodos serán desarrollados y armados en el laboratorio. Los sistemas de lockeo de ambos, tanto a cavidades Fabry-Perot, como a líneas de absorción atómica serán desarrollados e instalados siguiendo diseños conocidos en la comunidad adaptados para las necesidades requeridas. El láser de Titanio-Zafiro sintonizable por sus cualidades, podrá integrar el Sistema

Nacional de Láseres del MINCyT.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS REQUERIDOS PARA EL LIAF@UBA

En los nuevos espacios acondicionados se instalarán dos mesas ópticas cuya compra iniciaremos en breve usando fondos de subsidios propios. Con estos mismos fondos adquiriremos material diverso de óptica y electrónica básica. Proponemos que el DF/IFIBA apoyen la presentación a un proyecto PME que incluya la compra de los equipos que se listan más abajo. El costo total de los equipos a adquirir (que incluyen equipos de uso compartido) asciende a los 720.000 USD (precios de lista).

1. Sistema de Ultra Alto Vacío. Costo estimado 70.000 USD (incluye: equipos de bombeo, horno para bakeout, accesorios y detectores para UHV, cámaras de UHV con ventanas reflex, bombas iónicas y accesorios).
2. Sistema láser y de electrónica para atrapamiento y enfriamiento Doppler de iones. Costo estimado 250.000 USD (incluye electrónica RF para control de trampa, láseres de diodo sintonizables para ionización, rebombeo, fluorescencia y enfriamiento, optoelectrónica de control y sistemas de lockeo de frecuencias, sistemas ópticos y electrónicos de adquisición).
3. Sistema láser para control coherente de los estados internos de iones. Costo Estimado 300.000 USD (incluye láser de titanio-zafiro sintonizable con módulo de doblado, sistemas electrónicos y opto electrónicos de lockeo y control, wavemeter y accesorios de control).
4. Equipos de uso compartido que se instalarían en sala de preparación de muestras del DF/IFIBA (y que son necesarios para construcción local de trampas). Costo estimado 100.000 USD (incluye sistema de micro manipulación y wire bonding, sistema de electroquímica y limpieza por plasma de oxígeno, sistema de litografía).

4. CONSIDERACIONES FINALES

Hemos descripto un proyecto que propone la creación de un nuevo Laboratorio en el ámbito del DF/IFIBA. En nuestra opinión el proyecto tiene un objetivo científico interesante y potencialidad para generar aplicaciones futuras que pueden ser de interés para otras instituciones públicas argentinas. Asimismo, el proyecto viene a cubrir un área de vacancia en nuestro país (la física de iones y átomos fríos) en la cual nuestra Facultad podría transformarse en pionera en la formación de recursos humanos. Para que esta propuesta sea implementada es necesario una inversión inicial significativa (cercana a los 700 mil dólares). En el sistema científico argentino no es posible, en la actualidad, acceder a subsidios de ese monto destinados a financiar proyectos encarados por grupos de investigación (en formación o consolidados). En efecto, para que esta

propuesta prospere es necesario que una institución la haga suya y le brinde un decidido apoyo institucional que le permita acceder a fuentes de financiación del tipo de los subsidios PME. Por eso solicitamos al DF/IFIBA su apoyo en la gestión de estos fondos por esa y por otras vías.

REFERENCIAS

- [1] “*Nobel Lecture: Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary*”, Serge Haroche, Rev. Mod. Phys. **85**, 1083 (2013).
- [2] “*Nobel Lecture: Superposition, entanglement, and raising Schrödinger’s cat*”, David Wineland, Rev. Mod. Phys. **85**, 1103 (2013).
- [3] “*Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects*”, Brian Julsgaard, Alexander Kozhekin & Eugene S. Polzik, Nature **413**, 400-403 (2001).
- [4] “*Entanglement of Single-Atom Quantum Bits at a Distance*”, D. L. Moehring, P. Maunz, S. Olmschenk, K. C. Younge, D. N. Matsukevich, L.-M. Duan, and C. Monroe, Nature **449**, 68 (2007).
- [5] “*14-Qubit Entanglement: Creation and Coherence*”, Thomas Monz, Philipp Schindler, Julio T. Barreiro, Michael Chwalla, Daniel Nigg, William A. Coish, Maximilian Harlander, Wolfgang Hänsel, Markus Hennrich, and Rainer Blatt, Phys. Rev. Lett. **106**, 130506 (2011).
- [6] “*Quasiparticle engineering and entanglement propagation in a quantum many-body system*”, P. Jurcevic, B. P. Lanyon, P. Hauke, C. Hempel, P. Zoller, R. Blatt, C. F. Roos, Nature **511**, 202 (2014).
- [7] “*Many-body physics with ultracold gases*”, I. Bloch and W. Zwerger, Rev. Mod. Phys. **80**, 885 (2008).
- [8] “*Quantum dynamics of single trapped ions*”, D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, Rev. Mod. Phys., **75**, 281 (2003).
- [9] “*Nobel Lecture: Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments*”, E. A. Cornell and C. E. Wieman, Rev. Mod. Phys. **74**, 875 (2002).
- [10] “*Nobel Lecture: When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser*”, Wolfgang Ketterle, Rev. Mod. Phys. **74**, 1131 (2002).
- [11] *Bose-Einstein condensation*, Lev Pitaevskii y Sandro Stringari, Oxford Science Publications, Oxford, 2003.
- [12] *Quantum Liquids: Bose condensation and Cooper pairing in condensed matter systems*, A. J. Leggett, Oxford University Press, Oxford, 2006.
- [13] “*Nobel Lecture: The manipulation of neutral particles*”, Steven Chu, Rev. Mod. Phys. **70**, 685 (1998).
- [14] “*Nobel Lecture: Manipulating atoms with photons*”, Claude N. Cohen-Tannoudji, Rev. Mod. Phys. **70**, 707 (1998).
- [15] “*Nobel Lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms*”, Williams D. Phillips, Rev. Mod. Phys. **70**, 712 (1998).
- [16] “*Atom cooling, trapping, and quantum manipulation*”, Carl E. Wieman, David E. Pritchard, and David J. Wineland, Rev. Mod. Phys. **71**, S253 (1999).

- [17] “*Frequency Ratio of Al⁺ and Hg⁺ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place*” Rosenband, et. al., Science **319**, 1808 (2008).
- [18] “*Optical atomic clocks*”, A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015).
- [19] “*High-accuracy mass spectrometry with stored ions*”, K. Blaum Physics Reports **425**, 1 (2006)
- [20] “*Observation of Quantum Jumps*”, Sauter, Th. and Neuhauser, W. and Blatt, R. and Toschek, P. E, Phys. Rev. Lett. **57** 1696, (1986).
- [21] “*A “Schrödinger cat” superposition state of an atom*”, C Monroe, DM Meekhof, BE King, DJ Wineland, Science **272**, 5265 (1996).
- [22] “*Experimental violation of a Bell’s inequality with efficient detection*”, M. A. Rowe, D. Kielpinski, V. Meyer, C. A. Sackett, W. M. Itano, C. Monroe, and D. J. Wineland, Nature **409**, 791 (2001).
- [23] “*Realization of the Cirac–Zoller controlled-NOT quantum gate*”, F. Schmidt-Kaler, H. Häffner, M. Riebe, S. Gulde, G. P. T. Lancaster, T. Deuschle, C. Becher, C. F. Roos, J. Eschner, and R. Blatt, Nature **422**, 408 (2003).
- [24] “*Deterministic quantum teleportation with atoms*”, M. Riebe, H. Häffner, C. F. Roos, W. Hänsel, J. Benhelm, G. P. T. Lancaster, T. W. Körber, C. Becher, F. Schmidt-Kaler, D. F. V. James, and R. Blatt, Nature **429**, 734 (2004).
- [25] “*Quantum simulation of frustrated Ising spins with trapped ions*”, K. Kim, M.-S. Chang, S. Korenblit, R. Islam, E. E. Edwards, J. K. Freericks, G.-D. Lin, L.-M. Duan & C. Monroe, Nature **465**, 590–593 (2010).
- [26] “*Emergence and Frustration of Magnetism with Variable-Range Interactions in a Quantum Simulator*”, R. Islam, C. Senko, W. C. Campbell, S. Korenblit, J. Smith, A. Lee, E. E. Edwards, C.-C. J. Wang, J. K. Freericks, and C. Monroe, Science **340**, 583 (2013).
- [27] “*Observation of the Kibble–Zurek scaling law for defect formation in ion crystals*”, S. Ulm, J. Roßnagel, G. Jacob, C. Degünther, S. T. Dawkins, U. G. Poschinger, R. Nigmatullin, A. Retzker, M. B. Plenio, F. Schmidt-Kaler & K. Singer, Nature Communications **4**, 2290 (2013).
- [28] “*Non-local propagation of correlations in quantum systems with long-range interactions*”, P. Richerme, Z.-X. Gong, A. Lee, C. Senko, J. Smith, M. Foss-Feig, S. Michalakis, A. V. Gorshkov, and C. Monroe, Nature **511**, 198 (2014).
- [29] “*Experimental Realization of a Quantum Integer-Spin Chain with Controllable Interactions*”, C. Senko, P. Richerme, J. Smith, A. Lee, I. Cohen, A. Retzker, C. Monroe, Phys. Rev. X **5**, 021026 (2015).
- [30] “*Tuning friction atom-by-atom in an ion-crystal simulator*”, A. Bylinskii, D. Gangloff, V. Vuletić, Science **348**, 1115 (2015).
- [31] “*Quantum computing with trapped ions*” H. Häffner, C.F. Roos, R. Blatt, Physics Reports **469**, 155 (2008).
- [32] “*Concept of deterministic single ion doping with sub-nm spatial resolution*”, Meijer, J. and Vogel, T. and Burchard, B. and Rangelow, I.W. and Bischoff, L. and Wrachtrup, J. and Domhan, M. and Jelezko, F. and Schnitzler, W. and Schulz, S.A. and Singer, K. and Schmidt-Kaler, F. , Applied Physics A **83**, 321 (2006).
- [33] “*Single-Ion Heat Engine at Maximum Power*”, O. Abah, J. Roßnagel, G. Jacob, S. Deffner, F. Schmidt-Kaler, K. Singer, E. Lutz, Phys. Rev. Lett. **109**, 203006 (2012).

- [34] “*Light with orbital angular momentum interacting with trapped ions*”, C. T. Schmiegelow, F. Schmidt-Kaler, The European Physical Journal D **66**, 157 (2012).
- [35] “*Dynamics and control of fast ion crystal splitting in segmented Paul traps*”, H. Kaufmann, T. Ruster, C. T. Schmiegelow, F. Schmidt-Kaler, U. G. Poschinger, New Journal of Physics **16**, 073012 (2014).
- [36] “*Experimental realization of fast ion separation in segmented Paul traps*”, T. Ruster, C. Warschburger, H. Kaufmann, C. T. Schmiegelow, A. Walther, M. Hettrich, A. Pfister, V. Kaushal, F. Schmidt-Kaler, U. G. Poschinger, Phys. Rev. A **90**, 033410 (2014).
- [37] “*Phase-stable free-space optical lattices for trapped ions*”, C. T. Schmiegelow, H. Kaufmann, T. Ruster, J. Schulz, V. Kaushal, M. Hettrich, F. Schmidt-Kaler, U. G. Poschinger, arXiv:1507.05207, (2015).
- [38] “*Two-Dimensional Spectroscopy for the Study of Ion Coulomb Crystals*”, A. Lemmer, C. Cormick, C. T. Schmiegelow, F. Schmidt-Kaler, M. B. Plenio, Phys. Rev. Lett. **114**, 073001 (2015).
- [39] “*Measurement of dipole matrix elements with a single trapped ion*”, M. Hettrich, T. Ruster, H. Kaufmann, C. F. Roos, C. T. Schmiegelow, F. Schmidt-Kaler, U. G. Poschinger, arXiv:1505.02574, (2015).
- [40] “*Excitation of an atomic transition with a vortex laser beam*”, C. T. Schmiegelow, et. al. In final stages of preparation (2015).
- [41] “*Selective and Efficient Quantum Process Tomography with Single Photons*”. Christian Tomás Schmiegelow, Miguel Antonio Larotonda, and Juan Pablo Paz. Phys. Rev. Lett. **104**, 123601 (2010).
- [42] “*Selective and Efficient Quantum Process Tomography without Ancilla*”, C.T. Schmiegelow, A. Bendersky, M.A. Larotonda, J.P. Paz, Phys. Rev. Lett. **107**, 100502 (2011).
- [43] “*Observing different phases for the dynamics of entanglement in an ion trap*”, Cecilia Cormick and Juan Pablo Paz. Phys. Rev. A **81**, 022306 (2010).
- [44] “*Analytic solution for heat flow through a general harmonic network*”, Nahuel Freitas, Juan Pablo Paz. Phys. Rev. E **90**, 042128 (2014).
- [45] “*Quantum-state engineering with Josephson-junction devices.*”. Makhlin, Y., Schön, G., & Shnirman, A. Rev. Mod. Phys. **73**, 2 (2001).
- [46] “*Photon-echo quantum memory in solid state systems.*”. Afzelius, M., Chanelière, T., Cone, R. L., Kröll, S., Moiseev, S. A. & Sellars, M. Laser & Photonics Reviews, 4(2), 244-267.
- [47] “*Relaxation of isolated quantum systems beyond chaos*”. Imamog, A., Awschalom, D. D., Burkard, G., DiVincenzo, D. P., Loss, D., Sherwin, M., & Small, A. Phys. Rev. Lett. **83**, 4204 (1999).
- [48] “*Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*”, Allen, L., Beijersbergen, M. W., Spreeuw, R. J. C., & Woerdman, J. P. Physical Review A **45**, 8185 (1992).
- [49] “*Twisted photons*”, G. Molina-Terriza, Juan P. Torres & Lluís Torner, Nature Physics **3**, 305 (2007).
- [50] “*Quantum entanglement of high angular momenta*”, R. Fickler, R. Lapkiewicz, W. N. Plick, M. Krenn, C. Schaeff, S. Ramelow, & A. Zeilinger, Science **338**, 640 (2012).
- [51] “*Angular momentum transfer in interaction of Laguerre-Gaussian beams with atoms and molecules*”, P.D. Mondal, B. Deb, and S. Majumder. Physical Review A **89**, 063418 (2014).

- [52] “*Dynamics and thermodynamics of linear quantum open systems*”, E. A. Martínez, J. P. Paz, Phys. Rev. Lett. **110**, 130406 (2013).
- [53] “*Work Measurement as a Generalized Quantum Measurement*”. Augusto J. Roncaglia, Federico Cerisola, Juan Pablo Paz. Phys. Rev. Lett. **113**, 250601 (2014).
- [54] “*Measuring work and heat in ultracold quantum gases*”. G. De Chiara, A. J. Roncaglia, J. P. Paz. New J. Phys. **17**, 035004 (2015).