

# Convocatoria a Ideas Proyecto para Unidades Ejecutoras

CONICET

Abril 2016

**Unidad Ejecutora:** IFIBA, Instituto de Física de Buenos Aires

**Denominación del proyecto:** Materia coherente para la física fundamental y aplicada

**Orden de prelación del proyecto dentro de la unidad:** B

**Director del proyecto:** Juan Pablo Paz

**Datos de contacto:** paz@df.uba.ar, IFIBA, Intendente Guiraldes S/N, 1428, CABA, 011 4576 3353

**Responsable científico técnico del proyecto:** Juan Pablo Paz

**Datos de contacto:** paz@df.uba.ar, IFIBA, Intendente Guiraldes S/N, 1428, CABA, 011 4576 3353

## Resumen del proyecto

### 1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

El proyecto combina capacidades de varios grupos experimentales y teóricos del IFIBA con un objetivo disruptivo: Contribuir a la puesta en funcionamiento del LIAF (laboratorio de iones y átomos fríos), una nueva facilidad experimental que cubre un área de vacancia en Argentina. En efecto, el eje central del proyecto es lograr que el LIAF funcione y sea utilizado tanto para investigar nueva física fundamental como también para desarrollar diversas aplicaciones. En este laboratorio, en el que se utilizarán técnicas que permiten la manipulación coherente de material fría, se podrán realizar investigaciones básicas y aplicadas en temáticas amplias, que atraviesan transversalmente a varios grupos que trabajan en el ámbito del IFIBA. La creación de una facilidad de este tipo tiene una importancia estratégica, que fue resaltada recientemente en el relevamiento realizado por el Sistema Nacional de Láseres. Como mencionamos, es una vacancia evidente en la Argentina, pero también lo es en toda América Latina (donde no existen grupos que dominen el atrapamiento, enfriamiento y manipulación coherente de iones). La construcción de este nuevo laboratorio fue aprobada por el IFIBA y el Departamento de Física de la FCEyN UBA, quienes no solamente le asignaron espacio (que está siendo acondicionado en este momento) sino que también le brindaron apoyo institucional para la gestión de fondos para equiparlo a través del programa PME). Este proyecto tiene objetivos a mediano y largo plazo y, sin duda, tendría un impacto significativo en la formación de recursos humanos pues contribuiría a entrenar las primeras camadas de investigadores argentinos con capacidad para intervenir directamente en una tecnología que puede ser clave en el futuro tanto de la metrología [1, 2] como del procesamiento de la información [3]. El proyecto aprovechará la sinergia entre diversos grupos del IFIBA, experimentales y teóricos, para utilizar el LIAF en aplicaciones que requieren la simulación de sistemas naturales complejos [4, 5]. Las simulaciones que serían posibles de realizar en el LIAF pueden permitir resolver problemas cuyo interés abarca desde la física de altas energías y la cosmología hasta la física de la material condensada en sus diversos aspectos, incluyendo la físico-química. Todo esto, por supuesto, sin perjuicio de mantener en primer plano el trabajo hacia la utilización de la materia coherente en el desarrollo de nuevas tecnologías metrológicas y de otras vinculadas al procesamiento de la información.

## 2. RELEVANCIA DEL PROYECTO

La mecánica cuántica surgió hace más de un siglo y, desde su formulación generó a la vez fascinación por su enorme precisión e insatisfacción intelectual por sus casi incomprensibles implicancias acerca de la naturaleza del mundo. Hoy, en los comienzos del siglo XXI, vivimos una nueva revolución cuántica en la que las propiedades más curiosas de la física cuántica no solamente son fuente de discusiones teóricas sino que son la base de una nueva familia de tecnologías cuánticas con aplicaciones en el procesamiento de la información, en el desarrollo de dispositivos ultra sensibles [2] y en la definición de nuevos patrones metrológicos [1]. En las últimas dos décadas se ha logrado manipular y controlar sistemas cuánticos individuales (átomos, moléculas y fotones) y preparar estados de la materia con coherencia cuántica macroscópica. Asimismo, se ha podido preparar estados entrelazados (robustos) de sistemas cuánticos multipartitos en escalas macroscópicas, controlar eficazmente su evolución, etc. Estos logros han tenido mucho impacto en la comunidad científica y dado lugar al surgimiento de muchas tecnologías: Desde 1997 a la fecha, uno de cada cuatro Premios Nobel en física fue otorgado en reconocimiento al avance hacia el atrapamiento, la manipulación y el enfriamiento de materia coherente (átomos o iones) y al estudio de sus propiedades cuánticas. También es el caso de más premios otorgados en 1997, 2001, 2005 y 2012 a personalidades como Serge Haroche [6], David Wineland [7], Eric Cornell [8], Carl Wieman [8], Wolfgang Ketterle [9] y otros [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Es razonable imaginar que en la próxima década asistiremos a premios otorgados por los estudios sobre las curiosas propiedades de las correlaciones cuánticas (la no localidad, el entrelazamiento, etc) así como también el desarrollo de nuevos campos como la información cuántica, la metrología cuántica y los simuladores cuánticos.

En el LIAF se dispondrá de una herramienta excelente para el estudio de problemas actuales de muchas ramas de la física: se construirán y utilizarán simuladores cuánticos [4, 5]. Estos dispositivos fueron propuestos en forma casi simultánea con las computadoras cuánticas pero, a diferencia de estas (que todavía no son tecnológicamente viables) los simuladores cuánticos ya comienzan a estar disponibles, a modo experimental, en varios laboratorios [16, 17, 18, 19, 20]. Los simuladores cuánticos son sistemas sobre los cuales se tiene control parcial (por contraposición al control universal, que los transformaría en auténticas computadoras cuánticas) pero que permiten hacer resolver una gran gama de problemas específicos. A modo de ejemplo, en una cadena de iones atrapados y enfriados es posible manipular coherentemente tanto los grados de libertad vibracionales (bosónicos) como grados de libertad internos de cada ión (que se comportan como pseudo spines) [21, 22]. Aplicando pulsos de luz apropiadamente elegidos es posible controlar las interacciones entre ellos y de ese modo “diseñar” la dinámica efectiva que gobierna el sistema [19, 20]. El simulador contiene, en la práctica, un universo en miniatura cuya dinámica es fijada por el experimentador. Esto permite simular estas leyes y poner a prueba modelos que, de otro modo, son imposibles de estudiar, debido a su extrema complejidad.: por ejemplo, la complejidad de la simulación de redes de 40 spines con interacciones arbitrarias es tal que el problema no puede ser resuelto en la práctica en ninguna computadora real. El tipo de sistemas físicos que pueden ser simulados y la manera de implementar la mencionada simulación es un problema abierto cuya solución se conoce solamente en algunos casos interesantes. Como mencionamos, estos problemas incluyen sistemas de interés para la materia condensada y la física estadística [16, 19, 20], la física de altas energías [17, 23, 24], la cosmología [25, 18, 26], la físico-química [27], los fundamentos de la termodinámica [28, 29, 30] y la física cuántica [7]. En una primera etapa, el LIAF contará con simuladores construidos con conjuntos de iones atrapados y enfriados (cadenas lineales o redes más

complejas). En una segunda etapa se trabajará con trampas de átomos fríos [8, 16]. Las técnicas utilizadas en estos dos sistemas son distintas pero 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 eficiencia de detección individual mientras que en el caso de los átomos el sistema ofrece menos versatilidad en ese sentido.

En la Argentina, el estudio de la física de la materia coherente (átomos e iones) tiene una rica tradición que se concentra en estudios teóricos (en los que, como es el caso de los líquidos y gases cuánticos, algunos investigadores del IFIBA han sido pioneros). Este proyecto representa la primera iniciativa concreta y realista por construir y poner en marcha una facilidad experimental en este campo en nuestro país.

### 3. ACTIVIDADES

El laboratorio LIAF tendrá una facilidad de micro fabricación que permitirá la construcción de trampas micro-estructuradas y que será de uso compartido por todos los grupos experimentales del IFIBA (esta facilidad, que estará ubicada en el sector limpio de la Sala de Preparación de muestras del IFIBA) contará también con un sistema de foto litografía y de sputtering. El laboratorio tendrá un sistema modular de ultra-alto vacío que también podrá prestar servicios a otros laboratorios que requieran de él. Asimismo, contará con varios sistemas láser para enfriamiento Doppler, rebombeo y foto-ionización para manipular y detectar iones de Calcio e Iterbio. La mayoría serán láseres de diodo sintonizables con ancho de línea menor que 1Mhz. El láser para control coherente, será un Titantio-Safiro sintonizable con ancho de línea menor a 1kHz con opción de doblado de frecuencia. Los sistemas de lockeo a cavidades Fabry-Perot o a líneas de absorción atómica serán desarrollados localmente. En el laboratorio se realizarán experimentos de óptica cuántica, espectroscopía de alta resolución y de simulaciones cuánticas que se nutrirán de los aportes e ideas de todos los grupos teóricos. Será una instalación que permita trabajar tanto en proyectos de interés básico cómo aplicado (con foco en la metrología). Permitirá construir simuladores con algunas decenas de iones con un control relativamente versátil de las interacciones. Si bien el núcleo de la actividad experimental del proyecto tendrá lugar en este laboratorio, es vital que otros laboratorios del IFIBA realicen tareas vinculadas al desarrollo de algunas de las técnicas de control, enfriamiento, detección y manipulación coherente. Para eso, la colaboración inter grupos será fundamental y abarcará los investigadores activos que forman parte de los grupos LEC (electrónica cuántica), LPI (procesamiento de imágenes), BT (bajas temperaturas).

El montaje del LIAF y su puesta en marcha requiere un esfuerzo coordinado y sostenido. Durante los primeros años de este proyecto se realizarán actividades aprovechando el conjunto de capacidades de grupos del IFIBA con experiencia en áreas afines. Estas actividades pueden dividirse globalmente en dos grandes grupos:

- Una parte de los esfuerzos estará encaminada a desarrollar nuevas técnicas de manipulación coherente de luz y materia así como también de detección de alta eficiencia. Entre estos trabajos se incluyen nuevos métodos de producción y detección de haces de luz estructurada [31, 32, 33] y

de la caracterización de su interacción con diverso tipo de materiales [34, 35, 36, 37], el desarrollo y prueba de métodos y sistemas para el control coherente de luz y materia [38, 29, 39], el estudio de sistemas para producción y detección de múltiples pares de fotones entrelazados [40, 41] y el diseño y construcción de interfaces para acoplarlos a diversos dispositivos [42], la generación de fuentes de luz sintonizables de alta coherencia [14], el desarrollo de métodos ópticos y magnéticos para el confinamiento y enfriamiento de materia coherente [10, 7], el análisis y el desarrollo de detectores fotónicos superconductores de alta eficiencia [43], etc. De estos estudios participarán, en un ambiente de intercambio, los integrantes de los grupos del IFIBA con conocimiento y experiencia en física de láseres, física atómica y molecular, óptica cuántica, electrónica cuántica, electromagnetismo aplicado, procesamiento de imágenes, bajas temperaturas y LIAF.

- Otra parte de los esfuerzos se orientará al estudio de modelos teóricos de diversos sistemas físicos que podrán ser puestos a prueba en los simuladores analógicos que se construirán en el LIAF. Entre ellos, son de particular interés y actualidad aquellos que permiten estudiar propiedades de sistemas magnéticos (redes de espines con interacciones arbitrarias, con y sin desorden) [44], de sistemas de interés para la física de altas energías (diversas teorías de campos en la red) [45] y la cosmología (estudio de formación de defectos en transiciones de fase cosmológicas) [18], dinámica y estructura molecular [27] así como también al estudio de los fundamentos de la información cuántica [7] y el desarrollo de algoritmos para el procesamiento cuántico de la información [46, 47]. A estos estudios contribuirán los grupos de física de fundamentos e información cuántica, física de altas energías, cosmología y teoría cuántica de campos, física molecular y materia condensada.

#### 4. RECURSOS ECONÓMICOS

1. Acondicionamiento sala de preparación de muestras. Sistema de micro fabricación, wire bonding y sputtering.
2. Elementos para montar computadoras.
3. Material de electrónica y óptica.
4. Insumos de laboratorio varios.
5. Equipos menores para laboratorio.

#### 5. RECURSOS HUMANOS

Listado de investigadores, becarios y personal de apoyo

Investigadores CONICET: Juan Pablo Paz, Susana Hernandez, (Superiores), Esteban Calzetta, Victoria Bekeris, Ricardo Depine, Silvia Ledesma, Claudio Iemmi, Ricardo Piegai, Horacio Grinberg, Gustavo Lozano (Principales) Diego Wisniacki, Pablo Tamborenea, Andrea Bragas, Fernando Lombardo, Gabriela Pasquini, Carlos Acha, Diana Skigin, Marina Inchaussandague, Diego Alcoba, Gustavo Otero y Garzón (Independientes), Augusto Roncaglia, Pablo Capuzzi, Hernán Grecco, Guillermo Quinteiro, Graciana Puentes, Paula Villar, Alberto Camjayi (Adjuntos), Gabriela Capelutto, Patricio Grimberg, Daniel Lopez (Asistentes) Profesionales de Apoyo CONICET: Eduardo Luzzi Becarios de

doctorado: Nahuel Freitas, Martín Drechsler, Federico Cerisola, Adrián Rubio Lopez, Belén Farías, Pablo Poggi, Becarios de post-doctorado: Christian Schmiegelow  
Tipo de becas a concursar: 1 Doctorado: 3 Post-doctorado: 2  
Personal de apoyo a concursar:

## REFERENCIAS

- [1] Andrew D. Ludlow, Martin M. Boyd, Jun Ye, E. Peik, and P. O. Schmidt. Optical atomic clocks. *Reviews of Modern Physics*, 87(2):637–701, 2015.
- [2] Dmitry Budker and Derek F Jackson Kimball. *Optical magnetometry*. Cambridge University Press, 2013.
- [3] Michael A Nielsen and Isaac L Chuang. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press, 2010.
- [4] IM Georgescu, Sahel Ashhab, and Franco Nori. Quantum simulation. *Reviews of Modern Physics*, 86(1):153, 2014.
- [5] Rainer Blatt and CF Roos. Quantum simulations with trapped ions. *Nature Physics*, 8(4):277–284, 2012.
- [6] Serge Haroche. Nobel lecture: Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary. *Reviews of Modern Physics*, 85(3):1083, 2013.
- [7] David J Wineland. Nobel lecture: Superposition, entanglement, and raising schrödinger’s cat. *Reviews of Modern Physics*, 85(3):1103, 2013.
- [8] Eric A Cornell and Carl E Wieman. Nobel lecture: Bose-einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments. *Reviews of Modern Physics*, 74(3):875, 2002.
- [9] Wolfgang Ketterle. Nobel lecture: When atoms behave as waves: Bose-einstein condensation and the atom laser. *Reviews of Modern Physics*, 74(4):1131, 2002.
- [10] Claude N Cohen-Tannoudji. Nobel lecture: Manipulating atoms with photons. *Reviews of Modern Physics*, 70(3):707, 1998.
- [11] Steven Chu. Nobel lecture: The manipulation of neutral particles. *Reviews of Modern Physics*, 70(3):685, 1998.
- [12] William D Phillips. Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms. *Reviews of Modern Physics*, 70(3):721, 1998.
- [13] John L Hall. Nobel lecture: Defining and measuring optical frequencies. *Reviews of Modern Physics*, 78(4):1279, 2006.
- [14] Theodor W Hänsch. Nobel lecture: passion for precision. *Reviews of Modern Physics*, 78(4):1297, 2006.

- [15] Roy J Glauber. Nobel lecture: One hundred years of light quanta. *Reviews of modern physics*, 78(4):1267, 2006.
- [16] Immanuel Bloch, Jean Dalibard, and Wilhelm Zwerger. Many-body physics with ultracold gases. *Reviews of Modern Physics*, 80(3):885, 2008.
- [17] Rene Gerritsma, Gerhard Kirchmair, Florian Zähringer, E Solano, R Blatt, and CF Roos. Quantum simulation of the dirac equation. *Nature*, 463(7277):68–71, 2010.
- [18] S Ulm, J Roßnagel, G Jacob, C Degünther, ST Dawkins, UG Poschinger, R Nigmatullin, A Retzker, MB Plenio, F Schmidt-Kaler, et al. Observation of the kibble–zurek scaling law for defect formation in ion crystals. *Nature communications*, 4, 2013.
- [19] P Jurcevic, BP Lanyon, P Hauke, C Hempel, P Zoller, R Blatt, CF Roos, et al. Quasiparticle engineering and entanglement propagation in a quantum many-body system. *Nature*, 511(7508):202–202, 2014.
- [20] Philip Richerme, Zhe-Xuan Gong, Aaron Lee, Crystal Senko, Jacob Smith, Michael Foss-Feig, Spyridon Michalakis, Alexey V Gorshkov, and Christopher Monroe. Non-local propagation of correlations in quantum systems with long-range interactions. *Nature*, 511(7508):198–201, 2014.
- [21] D Leibfried, R Blatt, C Monroe, and D Wineland. Quantum dynamics of single trapped ions. *Reviews of Modern Physics*, 75(1):281, 2003.
- [22] L.-M. Duan and C. Monroe. Colloquium : Quantum networks with trapped ions. *Reviews of Modern Physics*, 82(2):1209–1224, 2010.
- [23] Jorge Casanova, Lucas Lamata, IL Egusquiza, Rene Gerritsma, Christian F Roos, Juan José García-Ripoll, and Enrique Solano. Quantum simulation of quantum field theories in trapped ions. *Physical review letters*, 107(26):260501, 2011.
- [24] X Zhang, M Bishof, SL Bromley, CV Kraus, MS Safronova, P Zoller, AM Rey, and J Ye. Spectroscopic observation of su (n)-symmetric interactions in sr orbital magnetism. *science*, 345(6203):1467–1473, 2014.
- [25] Fernando C Lombardo and Gustavo J Turiaci. Decoherence and loss of entanglement in acoustic black holes. *Physical review letters*, 108(26):261301, 2012.
- [26] S Baier, MJ Mark, D Petter, K Aikawa, L Chomaz, Z Cai, M Baranov, P Zoller, and F Ferlaino. Extended bose-hubbard models with ultracold magnetic atoms. *Science*, 352(6282):201–205, 2016.
- [27] Benjamin P Lanyon, James D Whitfield, Geoff G Gillett, Michael E Goggin, Marcelo P Almeida, Ivan Kassal, Jacob D Biamonte, Masoud Mohseni, Ben J Powell, Marco Barbieri, et al. Towards quantum chemistry on a quantum computer. *Nature Chemistry*, 2(2):106–111, 2010.
- [28] Esteban a. Martinez and Juan Pablo Paz. Dynamics and thermodynamics of linear quantum open systems. *Physical Review Letters*, 110(13):1–4, 2013.
- [29] A Bermudez, M Bruderer, and MB Plenio. Controlling and measuring quantum transport of heat in trapped-ion crystals. *Physical review letters*, 111(4):040601, 2013.

- [30] Augusto J Roncaglia, Federico Cerisola, and Juan Pablo Paz. Work measurement as a generalized quantum measurement. *Physical review letters*, 113(25):250601, 2014.
- [31] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J C Spreeuw, and J. P. Woerdman. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Physical Review A*, 45(11):8185–8189, 1992.
- [32] David L. Andrews and Mohamed Babiker. *The Angular Momentum of Light*. Cambridge University Press, 2013.
- [33] Juan P. Torres and Lluís Torner. *Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum*. Wiley, 2011.
- [34] H. He, M. E J Friese, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop. Direct Observation of Transfer of Angular Momentum to Absorptive Particles from a Laser Beam with a Phase Singularity. *Physical Review Letters*, 75(5):826–829, 1995.
- [35] M. F. Andersen, C. Ryu, Pierre Cladé, Vasant Natarajan, a. Vaziri, K. Helmerson, and W. D. Phillips. Quantized rotation of atoms from photons with orbital angular momentum. *Physical Review Letters*, 97(17):170406, 2006.
- [36] G F Quinteiro, D E Reiter, and T Kuhn. Formulation of the twisted-light–matter interaction at the phase singularity: the twisted-light gauge. *Physical Review A*, 91:1–11, 2015.
- [37] C.T. Schmiegelow, J. Schulz, H. Kaufmann, T. Ruster, U.G. Poschinger, and F. Schmidt-Kaler. Excitation of an Atomic Transition with a Vortex Laser Beam. *arXiv:1511.07206*, 2015.
- [38] A. Lemmer, C. Cormick, C. T. Schmiegelow, F. Schmidt-Kaler, and M. B. Plenio. Two-Dimensional Spectroscopy for the Study of Ion Coulomb Crystals. *Physical Review Letters*, 114(7):073001, 2015.
- [39] Christian Tomas Schmiegelow, Henning Kaufmann, Thomas Ruster, Jonas Schulz, Vidyut Kausal, Max Hettrich, Ferdinand Schmidt-Kaler, and Ulrich G Poschinger. Phase-stable free-space optical lattices for trapped ions. *Physical Review Letters*, 116(3):033002, 2016.
- [40] Christian Tomás Schmiegelow and Miguel Antonio Larotonda. Multiplexing photons with a binary division strategy. *Applied Physics B*, 116(2):447–454, 2014.
- [41] Gabriel J Mendoza, Raffaele Santagati, Jack Munns, Elizabeth Hemsley, Mateusz Piekarek, Enrique Martin-Lopez, Graham D Marshall, Damien Bonneau, Mark G Thompson, and Jeremy L O’Brien. Active temporal multiplexing of photons. *arXiv preprint arXiv:1503.01215*, 2015.
- [42] B. Casabone, K. Friebe, B. Brandstätter, K. Schüppert, R. Blatt, and T. E. Northup. Enhanced Quantum Interface with Collective Ion-Cavity Coupling. *Physical Review Letters*, 114(2):023602, 2015.
- [43] GN Gol’Tsmán, O Okunev, G Chulkova, A Lipatov, A Semenov, K Smirnov, B Voronov, A Dzar-danov, C Williams, and Roman Sobolewski. Picosecond superconducting single-photon optical detector. *Applied Physics Letters*, 79(6):705–707, 2001.

- [44] Nahuel Freitas, Esteban A Martinez, and Juan Pablo Paz. Heat transport through ion crystals. *Physica Scripta*, 91(1):013007, 2015.
- [45] T. Pichler, M. Dalmonte, E. Rico, P. Zoller, and S. Montangero. Real-time dynamics in  $u(1)$  lattice gauge theories with tensor networks. *Phys. Rev. X*, 6:011023, Mar 2016.
- [46] Christian Tomás Schmiegelow, Miguel Antonio Larotonda, and Juan Pablo Paz. Selective and Efficient Quantum Process Tomography with Single Photons. *Physical Review Letters*, 104(12):123601, 2010.
- [47] Christian Tomás Schmiegelow, Ariel Bendersky, Miguel Antonio Larotonda, and Juan Pablo Paz. Selective and Efficient Quantum Process Tomography without Ancilla. *Physical Review Letters*, 107(10):100502, 2011.