

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Rector: Dr. Guillermo R. Tamarit

Vicerrectora: Mg. Danya V. Tavela

Secretario General: Abog. Diego J. Batalla

Secretario de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Dr. Jerónimo E. Ainchil

Secretaria Académica: Abog. Ma. Florencia Castro

Secretario de Extensión Universitaria: Lic. Juan P. Itoiz

Secretaria de Asuntos Económico-Financieros: Cdora. Mariela E. García

Secretario Legal y Técnico: Abog. Carlos D. Pérez

Secretaria de Cultura: Lic. Laura Durán

Prosecretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Lic. Silvina Sansarriecq

Directora de Instituto de Posgrado: Prof. Ma. Rosa Depetris

Directora Centro de Edición y Diseño: DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Guardasellos: Ing. Luis J. Lima

DIRECTOR DE LA REVISTA

Dr. Ángel L. Plastino

SUMARIO

#2 AGUA RECURSO VITAL

PÁG. **4**

**DEL VIEJO SISTEMA
MÉTRICO DECIMAL
(1799) AL ACTUAL
SISTEMA
INTERNACIONAL
DE UNIDADES
(1960) Y DESPUÉS...**

MARIO GARAVAGLIA

PÁG. **30**

**USO DEL AGUA
SUBTERRÁNEA
Y DESARROLLO
SOSTENIBLE**

EDUARDO E. KRUSE

PÁG. **37**

**LA FÍSICA CUÁNTICA
EN EL MUNDO
MACROSCÓPICO:
LOS FLUIDOS
CUÁNTICOS**

SUSANA HERNÁNDEZ

PÁG. **44**

**LA RELEVANCIA
DE CHINA
EN EL ESCENARIO
MUNDIAL ACTUAL**

NORBERTO E. CONSANI

Edita



CEDi Centro de Edición y Diseño. UNNOBA
DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Callao 289 3.º piso, CP. 1022
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina

Diseño y diagramación

CEDi Centro de Edición y Diseño
Coordinador: DCV Cristian Rava
DCV Ma. de las Mercedes Ortín,
DCV Claudia Di Paola, DCV Bernabé Díaz

Corrector de estilo: Mariángel Mauri

Impresión

Buschi S.A.

Año 1 N.º 2

Agosto de 2015

Tirada 500 ejemplares

ISSN 2408-4492

Queda hecho el depósito
que marca la ley 11723

*Se invita a potenciales colaboradores
a remitir sus trabajos al CEDi
(cedi@unnoba.edu.ar)*

Sede Junín

Libertad 555, CP. 6000
Tel 54 236 4407750
Junín, Prov. de Buenos Aires, Argentina

Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP. 2700
Tel 54 2477 409500.
Pergamino, Prov. de Buenos Aires, Argentina

www.unnoba.edu.ar

EDITORIAL

Acercamos al amable lector el segundo número de la revista *NÚCLEOS*, perteneciente a la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, en el que se abordan cuatro temas de diversa naturaleza, con una interesante y muy importante temática.

La metrología es una disciplina científica sobre la que el público conoce poco, pero que está estrechamente vinculada a buena parte del quehacer productivo. Ofrecemos una magistral introducción a esta disciplina redactada por el profesor Mario Garavaglia.

El agua es el recurso básico de toda civilización. Su disponibilidad es cuestión de vida o muerte para la comunidad. Esta problemática debería ser de interés general, pero, nuevamente, no es fácil encontrar abordajes tan completos y certeros como el que aquí nos presenta el profesor Eduardo Kruse.

La física cuántica constituye la mayor revolución científica del siglo XX. Ha impactado y transformado profundamente nuestro mundo. Baste mencionar la computadora, el teléfono móvil y el tomógrafo como algunos de los tantos ejemplos que podrían traerse a colación. La vida misma es esencialmente un fenómeno cuántico. La profesora Susana Hernández nos habla en este número de los líquidos cuánticos, los cuales nos ofrecen novísimas posibilidades tecnológicas.

Finalmente, les brindamos una muy relevante y reciente disertación sobre un tema fundamental en el panorama contemporáneo: el de China, a cargo del profesor Norberto Consani.

Confiamos plenamente en que este abanico de discusiones ha de ser de interés y agrado para nuestros lectores.

Dr. Ángel Luis Plastino
Director revista NÚCLEOS

LA FÍSICA CUÁNTICA EN EL MUNDO MACROSCÓPICO: LOS FLUIDOS CUÁNTICOS

SUSANA HERNÁNDEZ

1. INTRODUCCIÓN

Si se le pregunta a una persona seleccionada al azar “qué es la Física Cuántica”, es probable que la respuesta se parezca a “es una rama de la ciencia que tiene que ver con átomos y moléculas”, es decir, con lo que los físicos llamamos *componentes elementales de la materia*, a los que deben agregarse los núcleos atómicos y las numerosas partículas subnucleares; todos ellos integrantes de lo que coloquialmente se denomina el *mundo microscópico* [1]. En líneas generales, esta percepción es correcta; sin embargo, la Física Cuántica, en realidad, es hija dilecta de una rama de la ciencia de lo macroscópico: la Termodinámica. En efecto, la primera propuesta de cuantificación, que más tarde Niels Bohr (Dinamarca, 1885–1962) aplicaría exitosamente a su celebrado modelo atómico, se debe a Max Planck (Alemania, 1858–1947) y fue diseñada alrededor de 1900 para explicar el fenómeno de la *radiación de cuerpo negro*. Puede afirmarse que la radiación de cuerpo negro es una manifestación genuina de la Física Cuántica en el mundo macroscópico. Durante el siglo XX los físicos fueron capaces de identificar otras manifestaciones genuinas: la *superconductividad* [2] y la *superfluidez* [3]. En otras palabras, la materia condensada puede existir en estados, o fases, que no corresponden a los sólidos, líquidos o gases que se inscriben en nuestra experiencia cotidiana.

Este artículo ilustra la naturaleza de los llamados *fluidos cuánticos*, que exhiben la característica de superfluidez y que, a diferencia de los superconductores, son eléctricamente neutros. En el segundo apartado se presenta el helio, que por numerosas razones puede considerarse el hermano mayor de la familia. La sección tres describe generalidades sobre los fluidos cuánticos; la cuatro proporciona más detalles sobre el helio superfluido y la cinco se ocupa de los protagonistas de la revolución de fines de siglo: los gases ultrafríos, también llamados *gases cuánticamente degenerados*. La última sección presenta algunas observaciones y comentarios finales.

2. EL HELIO GASEOSO Y LÍQUIDO: SU HISTORIA Y SUS USOS

El átomo de helio es el más pequeño de la tabla periódica de elementos. A primera vista esto puede sorprender, dado que un átomo con tres o cuatro partículas en el núcleo y con dos electrones en lugar de uno intuitivamente debería ser más corpulento que el hidrógeno, elemento inaugural de la tabla. Sin embargo, aquellos que conocen el modelo de Bohr recordarán que los radios de las órbitas electrónicas decrecen con el número atómico Z —en particular, son inversamente proporcionales a Z —y que en el átomo de helio la primera órbita está ocupada por los dos electrones. Ahora bien, esta predicción del modelo de Bohr solo proporciona una estimación, pues el radio correcto de la órbita electrónica debe determinarse mediante un cálculo riguroso que aplica las leyes de la Física Cuántica a los dos electrones interactuando entre sí y con los dos protones. El resultado de ese cálculo es algo mayor que lo que señala el modelo de Bohr, pero, de todos modos, menor que en el hidrógeno. Las propiedades físico-químicas más importantes del helio se resumen en el Cuadro 1.

- Es el segundo elemento más liviano de la tabla periódica.
- Es el átomo más pequeño.
- Posee una estructura simétrica particularmente estable.
- Su potencial de ionización [4] es más alto que el de cualquier otro elemento. En consecuencia, es químicamente inerte: no se combina con otros elementos, lo que significa que es un *gas noble* [5].
- Es radiológicamente inerte: no se vuelve radioactivo.
- Aparecen dos isótopos [6]. El más liviano, ^3He , es relativamente raro: se lo obtiene en reactores nucleares a partir del decaimiento radiactivo de tritio. El ^4He está presente en gran cantidad en el Sol. A escala terrestre, el contenido de helio en la atmósfera es de alrededor de una parte en 200 000, y se lo encuentra en el gas natural en proporciones de 0,1% hasta 8%, según el yacimiento.
- Entre todos los gases, el gas de helio tiene el punto de licuefacción más cercano al cero absoluto, lo que convierte al helio líquido en el refrigerante (líquido “criogénico”) por excelencia.
- El líquido en equilibrio con su vapor no presenta punto triple, es decir, no se congela cuando disminuye la temperatura.
- El helio líquido experimenta una transición al estado superfluido a una temperatura de 2,174 K [7]. En ese estado, posee propiedades físicas extraordinarias, como la de fluir sin viscosidad y presentar una conductividad térmica seis a siete veces más alta que la de los demás gases y mayor que la de los mejores conductores metálicos.

Cuadro 1

A temperaturas ambiente como las que existen sobre la corteza terrestre y en la atmósfera, el helio se presenta en fase gaseosa y es el más liviano de los gases nobles. Su descubrimiento tuvo lugar en varias etapas: entre 1868, cuando se observó por primera vez en el espectro solar una línea parecida a la del sodio, y 1895, cuando se aisló helio en la corteza terrestre en gases emanados de minerales de uranio y torio. Muy poco después fue detectado en la atmósfera. Desde comienzos del siglo XX viene cumpliendo numerosos y eficientes servicios, como se detalla en el Cuadro 2. Los Estados Unidos son el principal exportador de helio (aproximadamente 55% del total) y, junto con Rusia, Argelia y Catar, poseen los mayores reservorios del mundo.

Para los físicos, el principal impacto del helio en el desarrollo del conocimiento reside en sus propiedades a bajas temperaturas. La comunidad reconoce que la disciplina Física de Bajas Temperaturas nació en 1908 al producirse la licuefacción del helio, a 4,2 K a la presión atmosférica [8]. Este hecho tuvo lugar en el laboratorio del científico Heike Kammerlingh-Onnes (Holanda, 1853–1926), en Leiden, Holanda, en el cual se empleó el procedimiento llamado de cascada para licuar gases y así obtener temperaturas más y más bajas: un gas licuado se empleaba como fuente térmica para enfriar otro gas, que luego se comprimía para licuarlo alcanzando así una temperatura aún menor, y así sucesivamente. En el caso del helio, se utilizó hidrógeno previamente licuado para preenfriar el gas, que luego fue conducido hacia una expansión llamada de Joule–Thompson, lo cual disminuyó todavía más su temperatura y permitió su licuefacción.

Licuar el helio significó una verdadera proeza, si bien el nuevo líquido quedó algo opacado poco después cuando, en el mismo laboratorio, en 1911, se descubrió el fenómeno de la superconductividad. El impacto de este descubrimiento motivó que, de allí en más, el grueso de los esfuerzos científicos y financieros, tanto en el laboratorio de Kammerlingh-Onnes como en la mayoría de los laboratorios de bajas temperaturas del mundo, se orientara al estudio de este impactante fenómeno. No obstante, algunos físicos heliófilos y tenaces insistieron en el estudio de este fluido tan peculiar, en parte motivados por la obstinación del helio en no dejarse solidificar por debajo de las 25 atm de presión. El capricho de los pioneros fructificó y en los treinta años siguientes el helio líquido marcó dos nuevos tantos. En 1928, Willem Keesom (Holanda, 1876–1956) y Mieczyslaw Wolfke (Polonia, 1883–1947) advirtieron que en el helio líquido sucedía una transición a una temperatura de 2,174 K en la cual el líquido quedaba separado en dos fases, que recibieron los nombres helio I y helio II, con distintas propiedades. Poco después, en 1932, Willem Keesom y Klaus Clusius (Polonia, 1903–1963) encontraron que la capacidad calorífica del líquido en equilibrio con su vapor presentaba un pronunciado incremento al acercarse a los 2,174 K. Este fenómeno se denominó *transición lambda*, debido a que la forma de la curva experimental del calor específico en función de la temperatura se asemejaba a la letra griega λ . En 1938, Pyotr Kapitza (Rusia,

1894–1984) observó que el helio enfriado por debajo de la temperatura de transición podía fluir por un capilar delgado sin viscosidad [9]. Este resultado fue confirmado por mediciones que realizaron de manera independiente James Allen (Canadá, 1908–2001) y Donald Misener (Canadá, 1911–1996). Por esto se acordó nombrar al nuevo fenómeno *superfluididad*. Los estudios teóricos no tardaron en demostrar que solo podía explicarse acudiendo a la Física Cuántica, de allí que el helio se haya convertido en el paradigma del fluido cuántico.

En 1972, David Lee (EE.UU., 1931–), Douglas Osheroff (EE.UU., 1945–) y Robert Richardson (EE.UU., 1937–2013) descubrieron experimentalmente que el isótopo liviano ^3He también presenta una transición a una fase superfluida [10], que en este caso se explica por un mecanismo similar al de la superconductividad de los metales. Debe notarse que, como la proporción de ^3He en el helio natural es bajísima —poco más que una parte por millón—, cuando hablamos de helio líquido sin aclaraciones, se trata del isótopo ^4He . El ^3He debe aislarse, o fabricarse, expresamente para la investigación de sus propiedades y su utilización.

Cuadro 2

- Criogenia: por ser el mejor líquido refrigerante, se utiliza en enfriado de imanes superconductores utilizados en toma de imágenes por resonancia magnética con fines médicos. Otras actividades en la industria utilizan el enfriamiento por helio, como la producción de ciertos materiales semiconductores.
- Como líquido criogénico, interviene en el refrigerado de imanes superconductores y de cavidades de microondas y radiofrecuencias empleados en aceleradores de partículas cargadas y en grandes colisionadores nucleares.
- Se utiliza también para enfriar detectores de infrarrojos y otros detectores de señales astronómicas, a fin de reducir el ruido térmico y eléctrico y facilitar el estudio de señales extremadamente débiles.
- Presurización y purgado: por existir en fase gaseosa a temperaturas en las cuales el hidrógeno es líquido, es especialmente útil para purgar y presurizar sistemas de propulsión basados en hidrógeno líquido.
- Soldaduras: se lo utiliza para blindar la muestra y así prevenir la contaminación del metal fundido.
- Control atmosférico: se lo emplea en la manufactura de fibras ópticas, pues su rápida difusión asegura que no permanezcan burbujas que podrían deteriorar y hasta destruir las propiedades de la fibra.
- Detección de fugas a través de paredes: por su baja viscosidad y alto coeficiente de difusión, fluye fácilmente a través de poros y ranuras con tamaños en escala molecular.
- Mezclas respiratorias: se utilizan mezclas de helio y oxígeno para buzos de profundidad y, en general, para individuos que trabajan bajo altas presiones atmosféricas.
- Gas ascensional: fue el primer empleo del helio; se lo utilizó en zepelines, a partir de la Primera Guerra Mundial, en sustitución del hidrógeno, que es inflamable. En la actualidad se lo emplea para el inflado de globos de esparcimiento y propaganda.
- Investigación básica en física de la materia condensada en condiciones extremas.
- Las mezclas isotópicas ^3He - ^4He son la base de los refrigeradores de dilución utilizados en laboratorios para alcanzar temperaturas inferiores a 1 K y hasta alrededor de $1 \mu\text{K}$.
- Por ser inerte y no presentar viscosidad en su fase superfluida, sus gotas proporcionan excelentes matrices inertes para aislar átomos y moléculas de una variedad de sustancias y estudiar sus propiedades físico-químicas como si se encontraran en el vacío.

3. LOS FLUIDOS CUÁNTICOS

Pero intentemos responder con algo más de rigor a la pregunta “qué es un fluido cuántico”. Veamos: en primer lugar, la noción de fluido abarca líquidos y gases, es decir, se opone a la de sólido. Ahora bien, un

sólido cristalino, por ejemplo, un metal, se caracteriza por un orden, esto es, los átomos o moléculas que lo componen se organizan en un arreglo periódico o red en cuyos vértices o nodos se instalan los átomos o moléculas, que se convierten en iones positivos cediendo electrones, los cuales a su vez se constituyen en los protagonistas de la conducción eléctrica. Sin embargo, los iones no permanecen quietos, sino que realizan pequeñas oscilaciones alrededor de los vértices o *nodos* de la red, y la extensión del desplazamiento depende esencialmente de la temperatura. La red cristalina es una red en tanto en cuanto esos desplazamientos son mucho menores que la distancia entre nodos vecinos. Por eso, al cabo de cada excursión, el ion vuelve a su sitio sin mezclarse ni confundirse con los demás. A medida que la temperatura desciende, la extensión de los paseos va disminuyendo hasta que, a temperatura muy cercana al cero absoluto, solo queda una pequeña vibración residual, de origen cuántico, conocida como *vibración de punto cero*.

Sucede que en el helio la amplitud de la vibración de punto cero alcanza el 26% de la distancia media entre átomos. Eso hace imposible la existencia de la red, porque si dos átomos se acercan suficientemente, las interacciones entre ellos destruyen el arreglo cristalino. Por esta razón, los conjuntos de muchas partículas idénticas con gran amplitud de vibración de punto cero caen en la categoría de *fluidos cuánticos*, porque las exigencias de la naturaleza que solo puede explicar la física cuántica les impiden existir bajo la forma de un sólido cristalino.

Huelga decir que los *fluidos cuánticos* son sistemas de laboratorio que no existen en la naturaleza [11]. Basta con advertir que el helio experimenta la transición superfluida a 2,174 K, mientras que la temperatura media del universo es 3 K; vale decir, el universo está demasiado caliente para permitir que el helio interestelar, donde lo hubiera, se vuelva superfluido. Esto, por supuesto, es una afirmación en escala cosmológica que no excluye la existencia de fluctuaciones, esto es, de regiones del universo con condiciones ambientales propicias para la licuefacción del helio y la transición al estado superfluido. Ciertamente, eso no sucede en el planeta Tierra.

Los físicos de fluidos cuánticos reconocemos dos grandes grupos. En el primero ubicamos a los isótopos del helio [12]. El segundo grupo está compuesto por los gases cuánticos atrapados en trampas magnéticas y/o magnetoópticas cuyo estudio constituyó uno de los hitos de los últimos veinte años. Debido a la relevancia científica y a sus aplicaciones, nos referiremos a ambos miembros de la familia de manera más extensa en la sección que sigue.

4. EL HELIO SUPERFLUIDO

Por tener núcleos diferentes, los isótopos de helio tienen distinta masa, pero las fuerzas entre dos átomos del mismo isótopo o entre átomos de uno y otro isótopo son iguales. Para la Física Cuántica se trata de dos sistemas muy diferentes: mientras que el ^3He pertenece a la categoría de *fluido fermiónico* (o de *fermiones*), el ^4He es un *fluido bosónico* (o de *bosones*). Esto hace que las técnicas experimentales para investigar las propiedades de uno y otro deban ser muy distintas, así como las teorías que los describen, lo que genera no poca preocupación —y ocupación— a los investigadores.

Cuando se descubrió la superfluididad del ^4He , inmediatamente se formularon diversas explicaciones del fenómeno. A muchos de los físicos más notables del siglo XX —por ejemplo, Fritz London (Polonia, 1900–1954), László Tisza (Hungría, 1907–2009), Lev Landau (Azerbaiyán, 1908–1968), Richard Feynman (EE. UU., 1918–1988)— los fascinó el desafío: acuñaron conceptos novedosos que hoy pueblan el vocabulario de la *física de la materia condensada* y produjeron contribuciones que, de a poco, fueron despejando el camino. London y Tisza fueron los primeros en hablar de un *fluido cuántico de bosones*, pero Landau desarrolló una aproximación diferente, muy exitosa para comprender muchos aspectos conceptuales de la fenomenología del superfluido. Feynman recuperó para la teoría el carácter bosónico de los átomos de helio y, desde mediados del siglo XX, numerosos físicos experimentales y teóricos analizan y explican las inagotables propiedades de este interesante líquido.

El ^3He es un líquido *fermiónico* y el estudio de sus peculiaridades demanda otro punto de vista y otras formas de ataque. Una buena parte de las propiedades del ^3He , medidas experimentalmente, se describen bastante bien, al menos en los aspectos cualitativos, por medio de la llamada *teoría del líquido de Fermi*, debida al físico ruso Lev Landau. Curiosamente, esta teoría se propuso originalmente para describir las propiedades de los electrones liberados dentro de un sólido, pero mostró su fuerza y validez al interpretar, con éxito, propiedades termodinámicas del ^3He , tales como la capacidad calorífica y la susceptibilidad magnética, y otras más complejas como la respuesta a estímulos que varían la densidad del líquido o su densidad de magnetización. Cuestiones aún más sofisticadas, por ejemplo, cómo responde el líquido ante estímulos de distinta energía, impulso, etc., a diferentes temperaturas, requieren teorías mucho más elaboradas que pertenecen al ámbito de la física cuántica de muchas partículas. La superfluididad del ^3He es sorprendente,

ya que se trata de un fluido eléctricamente neutro y, sin embargo, el estado superfluido se parece notablemente al estado superconductor de los electrones en metales. La razón es el mecanismo de formación de *pares de Cooper*, de los que se habla en la sección siguiente.

5. LOS GASES ULTRAFRÍOS

El origen del gran desarrollo que adquirió esta rama del conocimiento es el siguiente: hacia 1925, el físico Satyendra Nath Bose (India, 1894–1974) envió a Albert Einstein (Alemania, 1879–1955) un manuscrito de su autoría en el cual proponía modelar la radiación electromagnética en el interior de una cavidad como si se tratara de un gas de partículas idénticas. Sorprendentemente, las propiedades observadas de la radiación llamada de *cuerpo negro* resultaban descritas en detalle por ese modelo. Einstein, entusiasmado, pensó que, si ese modelo se extendía a otro tipo de partículas, tal vez algo nuevo pasaría y, al desarrollar la teoría, descubrió lo que hoy se llama *condensación de Bose o de Bose-Einstein* (aunque en honor a la verdad, haríamos bien en llamarla *condensación de Einstein*, pero así se escribe la historia). Einstein descubrió que ciertas partículas, entre las cuales se encuentran los átomos de ^4He , al encontrarse en una fase gaseosa en la cual no ejercen interacciones entre ellas y al ser sometidas a compresión y/o enfriamiento, alcanzan una situación en la cual se comportan como una onda de materia —algo así como el haz de luz de un láser—, porque casi todas están ocupando el mismo y único estado cuántico. Este fenómeno, predicho teóricamente por Einstein en 1925, fue producido experimentalmente setenta años después. Por supuesto, las investigaciones y experimentos se estaban llevando a cabo desde mucho antes, pero los primeros resultados que confirmaban la teoría fueron publicados en 1995 por dos grupos que trabajaban simultáneamente en los Estados Unidos: uno en Boulder, Colorado, liderado por Eric Cornell (EE.UU., 1961–) y Carl Wieman, (EE.UU., 1951–), y el otro, conducido por Wolfgang Ketterle (Alemania, 1957–), en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Como correspondía, estos líderes recibieron el Premio Nobel poco después. En este punto es interesante destacar que numerosos científicos que trabajaron en la disciplina *Fluidos Cuánticos* y en temas afines que posibilitaron muchos de los desarrollos que marcaron hitos se hicieron acreedores al Premio Nobel. Sus nombres y un resumen de sus contribuciones (traducidos del inglés), tal como aparecen en el sitio web oficial del Premio Nobel (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/), se detallan en el Cuadro 3. En el sitio antedicho pueden encontrarse tanto detalles sobre las investigaciones como precisiones biográficas de los laureados.

Cuadro 3

- 1913: Heike Kammerlingh-Onnes, “por sus investigaciones sobre las propiedades de la materia a bajas temperaturas que condujeron, *inter alia*, a la producción de helio líquido”.
- 1962: Lev Landau, “por sus teorías pioneras para la materia condensada, especialmente, helio líquido”.
- 1972: John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer, “por el desarrollo conjunto de la teoría de la superconductividad, usualmente llamada teoría BCS”.
- 1978: Pyotr Kapitza, “por sus inventos y descubrimientos básicos en el área de física de bajas temperaturas”.
- 1987: J. Georg Bednorz y K. Alexander Müller, “por su importante innovación en el descubrimiento de la superconductividad en materiales cerámicos”.
- 1996: David Lee, Douglas Osheroff y Robert Richardson, “por su descubrimiento de la superfluidez en helio-3”.
- 1997: Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William Phillips, “por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con luz láser”.
- 2001: Eric Cornell, Carl Wieman y Wolfgang Ketterle, “por haber alcanzado la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos, y por los primeros estudios fundamentales de las propiedades de los condensados”.
- 2003: Alexei Abrikosov, Vitaly Ginzburg y Anthony Legget, “por sus contribuciones pioneras a la teoría de los superconductores y los superfluidos”.
- 2012: Serge Haroche y David Wineland, “por métodos experimentales innovadores que permitieron mediciones y manipulación de sistemas cuánticos individuales”.

Los experimentos con condensados de bosones abrieron una nueva etapa en la física de los sistemas cuánticos de muchas partículas, ya que por primera vez se produjo experimentalmente un gas cuánticamente degenerado. Denominamos así a los gases en los que la incerteza cuántica (promedio) de la posición de una partícula es tan grande, con respecto a la distancia media entre partículas, que la noción de partículas pierde significado y solo se puede pensar al gas como una jalea o sopa cuántica en la que ninguna de las componentes se puede visualizar separadamente de las otras. Vale la pena notar que, si “generar” es conceder identidad a algo como separado y distinto, “de-generar” es suprimir esa identidad. Los gases ideales cuánticamente degenerados ocupan varios capítulos en los textos universitarios de Física Estadística, pero los profesores siempre advertimos que estamos hablando de idealizaciones, ya que, en los sistemas reales, los efectos de las interacciones no pueden soslayarse. Por eso, atentos al criterio según el cual los gases ideales cuánticos no existen en la naturaleza, su fabricación en laboratorio significó un antes y un después en la física de sistemas de muchos cuerpos. A la construcción de condensados de Bose-Einstein le siguió, hacia el año 2000, el enfriado de isótopos fermiónicos hasta alcanzar la degeneración cuántica.

¿Para qué sirven los gases fríos —tan fríos—? Alguien habló de “la heladera más fría del universo”, lo cual parece bastante acertado si pensamos que se habla de temperaturas de entre algunos *diezmillonésimos* y algunos *diezmilmillonésimos* de grado K; ciertamente las más bajas jamás alcanzadas en laboratorios. Desde el punto de vista de la producción de bajas temperaturas, este es por sí mismo un hito, ya que, técnicamente, es preciso combinar una variedad de procedimientos altamente sofisticados, tales como frenado por láser, atrapado y compresión en trampas magnéticas y/o magnetoópticas, posterior enfriado por evaporación, etc. Al mismo tiempo, nos acercamos cada vez más a poder observar el comportamiento de la materia en condiciones en las que todos los mecanismos térmicos desaparecen y quedan expuestos los mecanismos estrictamente cuánticos. En el caso de los condensados de Bose-Einstein, su naturaleza cuántica se traduce en el hecho de que los átomos o moléculas en el condensado se comportan como lo hacen los fotones en el haz de un láser; luego, así como estos conforman una onda de luz, decimos que las partículas del condensado constituyen una onda de materia. Más específicamente, hablamos de materia coherente, una nueva categoría o estado de la materia, cuyo origen y naturaleza escapa por completo a la física clásica y solo puede ser comprendida en el marco de la física cuántica.

Todo esto es muy importante desde la perspectiva del conocimiento puro, pero hay más, porque la materia coherente constituye un láser de materia. Un dispositivo tal puede complementar al láser electromagnético tradicional ampliando el alcance de los usos y aplicaciones, ya que un láser de materia puede operar en condiciones y ante estímulos y sujetos muy diferentes a los de los láseres tradicionales. Una aplicación sugerida es el empleo para litografía de muy alta resolución para fabricar chips para computación y comunicaciones.

Por otra parte, el enfriamiento extremo de la materia a los niveles de degeneración cuántica hace lugar a una multitud de verificaciones: es posible aislar átomos individuales, suprimiendo por completo sus posibles interacciones, y estudiar sus propiedades últimas, o utilizar ese átomo como agente para alguna misión, como las que se llevan a cabo en el ámbito de la Metrología, que necesita contar con patrones rigurosos, repetitivos y confiables. Se dice actualmente que los *átomos fríos* son sistemas cuánticos bien controlados que, combinados con capacidades tecnológicas de fabricación de objetos nanoscópicos, hacen lugar a los denominados *chips atómicos*, que a criterio de muchos serán los futuros protagonistas del procesamiento cuántico de la información.

6. OBSERVACIONES FINALES

El descubrimiento de la superfluidez del helio líquido colocó a la ciencia en presencia de una nueva fase de la materia que compartía muchas de sus peculiaridades con el estado superconductor. London fue el primero en sugerir que la transición observada a 2,174 K se debía a la formación de un condensado de Bose-Einstein. Tisza rápidamente tomó la idea y propuso un modelo de dos fluidos, uno normal y otro superfluido, siendo este último un condensado en el cual todos los átomos participan de manera coherente y fluyen sin viscosidad por encontrarse en el mismo estado cuántico. La teoría BCS de la superconductividad, formulada en 1957 por John Bardeen (EE.UU., 1908–1991), León Cooper (EE.UU., 1930–) y John Schrieffer (EE.UU., 1931–), propone que, en el estado superconductor, los electrones se asocian de a dos formando los denominados pares de Cooper. La relación entre el estado que se dio en llamar estado BCS y los condensados de bosones no resultó evidente en los comienzos, pero en la actualidad se admite que esos pares pueden fluir sin resistividad porque forman parte de un condensado de bosones. Esta teoría es la base de la explicación de la aparición de la fase superfluida en el ^3He . Finalmente, la creación de condensados en gases ultrafríos introduce los gases superfluidos para investigar a la par de los líquidos superfluidos. La población de estos singulares personajes de la ciencia continúa creciendo, con la incorporación de integrantes que se distinguen por sus personalidades diferentes, pero que, no obstante, conservan rasgos de familia: en el ADN de todos ellos se encuentran los condensados de Bose-Einstein.

ALGUNAS DEFINICIONES Y NOTAS ACLARATORIAS

1. Por razones históricas se habla de *mundo macroscópico* —lo que se ve a simple vista— en oposición a *mundo microscópico* —lo que no se ve sin recursos especiales—. Esto no tiene nada que ver con el tamaño de los objetos: los átomos y moléculas no son microscópicos sino *nanoscópicos*, porque no miden micrómetros (recordemos que un micrómetro — μm — equivale a una millonésima de metro), sino *nanómetros*: un nanómetro (nm) equivale a una milmillonésima de metro.

2. El término *superconductividad* designa la habilidad de la corriente eléctrica de fluir en el interior de un cable conductor sin encontrar prácticamente resistencia. Se revela experimentalmente por una dramática caída en la resistividad eléctrica, o equivalentemente por un alza de varios órdenes de magnitud en la conductividad de la muestra.

3. La *superfluididad* es algo más compleja de definir, aunque la noción más afín a la de superconductividad hace referencia a la habilidad de los fluidos eléctricamente neutros de fluir por un tubo delgado sin frenarse, tal como lo haría un fluido ideal.

4. El *potencial de ionización* —o la *energía de ionización*— es la energía que hay que suministrar a un átomo de un gas en su estado fundamental para arrancar el electrón menos ligado al núcleo.

5. Los *gases nobles* (helio, neón, argón, xenón, kriptón y radón) poseen muy baja reactividad química, es decir, baja capacidad de combinarse con otros elementos para dar nuevas sustancias.

6. *Isótopos* de un elemento son aquellos cuyos átomos poseen el mismo número de protones (mismo número atómico) y diferente número de neutrones.

7. Los físicos utilizamos la escala de temperaturas absoluta (la unidad es el kelvin, denotado por la letra K) en la cual el cero absoluto, origen de la escala, corresponde a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ (grados Celsius). La temperatura de licuefacción del helio a la presión atmosférica es, así, $-268,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

8. El punto crítico del helio corresponde a una temperatura de 5,2 K a una presión de 2,2 atm. Por arriba de la temperatura crítica, no existe la fase líquida.

9. La viscosidad juega un rol semejante, si bien no idéntico, al de la resistencia en los conductores: si la resistencia revela el efecto del medio que se opone al paso de una corriente de partículas con carga eléctrica, la viscosidad mide de qué manera el medio se opone a las variaciones de la velocidad con que fluyen partículas neutras.

10. La temperatura de transición superfluida del ^3He depende de su densidad y es inferior a 3 mK (milikelvin), de modo que el isótopo liviano del helio permanece en su fase normal cuando el isótopo pesado se vuelve superfluido a 2,174 K.

11. Desde muchos puntos de vista, sistemas como los electrones de conducción en metales (*gas de electrones*) y el interior de los núcleos atómicos (*materia nuclear*) pertenecen a esta categoría, pero los electrones y los protones del núcleo son partículas cargadas sometidas a interacciones electromagnéticas. En general, la nomenclatura *fluidos cuánticos* se reserva para sistemas de átomos o moléculas eléctricamente neutros.

12. El núcleo del ^3He posee dos protones y un neutrón, y el del ^4He , dos de cada tipo, ambos con dos electrones que balancean la carga nuclear. La constitución de los núcleos es responsable, entre otras cuestiones, de que el ^3He sea un material paramagnético, vale decir, responde a la aplicación de un campo magnético externo adquiriendo una magnetización, mientras que el ^4He no reconoce la presencia de un campo magnético.

Susana Hernández es doctora en Ciencias Físicas. En la actualidad es profesora emérita de la Universidad de Buenos Aires e investigadora superior del CONICET. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Instituto de Física de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.