

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

**UN VIAJE APASIONANTE POR LA INNOVACIÓN: HELIO LÍQUIDO
“HECHO EN ZARAGOZA”**

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. CONRADO RILLO MILLÁN

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 7 DE MAYO DEL AÑO 2025*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. JUAN BARTOLOMÉ SANJOAQUÍN

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2025

Depósito legal: Z 723-2025

Imprime:

Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

**UN VIAJE APASIONANTE POR LA INNOVACIÓN: HELIO LÍQUIDO
“HECHO EN ZARAGOZA”**

POR EL

Ilmo. Sr. D. CONRADO RILLO MILLÁN

Índice

Preámbulo	6
Introducción	9
PRIMERA ETAPA: Del Sol a la Tierra	13
Propiedades generales y aplicaciones del helio	22
SEGUNDA ETAPA: Helio líquido industrial.	26
Helio líquido y física de bajas temperaturas en Zaragoza	27
TERCERA ETAPA: Helio líquido “hecho en Zaragoza”	29
Refrigerador Criogénico de Ciclo Cerrado (RC3) modificado	34
Propiedades termodinámicas excepcionales del helio a bajas temperaturas	39
Tecnología Avanzada de Licuefacción de helio: ATL-ATLi.	48
Tecnología Avanzada de Recuperación del helio: <i>Direct Recovery</i> (DR)	56
Tecnología Avanzada de Purificación de helio: ATP.	57
Limitaciones de la Recuperación Directa y Complemento con la Tecnología ATP.	57
¿Es el helio líquido una sustancia absolutamente pura?	61
Productos comerciales y resultados de la comercialización	64
Futuro del helio	66
El Regreso de los Dirigibles	66
Equipos médicos MRI y MEG.	67
“Huella de carbono” de los laboratorios de RMN.	68
Grandes aceleradores de partículas, reactores de fisión y fusión nuclear.	70
Helium Conservation Day	71
Anécdotas	72
Patentes y publicaciones.	72
La belleza de la sencillez. El Principio KISS.	74
Presentación de la tecnología en Portland (Oregón-USA). ¿Dónde está el intercambiador?	75
⁴ He-volution.	76
Resumen y conclusiones.	77
Agradecimientos	79
Bibliografía	80

Preámbulo

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza,

Ilustrísimas Sras. Académicas e Ilustrísimos Sres. Académicos,

Autoridades académicas,

Señoras y señores:

Es para mí un honor aceptar la invitación de ingreso en la Real Academia de Ciencias de Zaragoza. Lo hago de la mano de una de las personas que más admiro, como profesor, como investigador infatigable y perseverante, y como persona: el Profesor y Académico Juan Bartolomé Sanjoaquín. Gracias de corazón, a él y a todos los Académicos por aceptar su propuesta.

A este gran honor se une el privilegio de recibir la medalla no. 23 que ostentaba el Académico y Profesor D. Fernando Solsona Motrel. El Dr. Solsona fue un hombre excepcional cuya vida encarnó la excelencia en el ámbito médico, académico y cultural. Nacido en Zaragoza, destacó desde joven por su brillantez intelectual y su profunda vocación por el servicio a los demás. Tras licenciarse en Medicina con la calificación de Sobresaliente, se doctoró con Premio Extraordinario y amplió su formación en las prestigiosas universidades de Roma y Aix-Marsella, lo que le permitió adquirir una sólida base científica y técnica.

Como médico, fue un pionero en su campo, introduciendo en España técnicas innovadoras como la ecografía y la xerografía mamaria. Durante más de tres décadas, su labor al frente del departamento de Radioelectrología y Medicina Nuclear del Hospital Miguel Servet estuvo marcada por un inquebrantable espíritu de servicio, un firme compromiso con la excelencia y una profunda humanidad. Sus investigaciones en áreas como la patología mamaria, los tumores infantiles y la enfermedad de Hodgkin dejaron una huella imborrable en la medicina española.

Como profesor y académico, Solsona fue un maestro excepcional. Su capacidad para transmitir conocimientos con pasión y rigor inspiró a generaciones de profesionales. Ocupó la Cátedra de Terapéutica Física en la Universidad de Valladolid y fue un referente en la Real Academia de Medicina de Zaragoza, donde ejerció como presidente con dedicación ejemplar. Su ingreso en la Real Academia de Ciencias Físicas, Químicas, Exactas y Naturales con el discurso "*La Física también cura*" reflejó su profundo dominio de la radioterapia y su capacidad para unir ciencia y humanismo.

Más allá de su labor científica, Solsona fue un incansable promotor de la cultura aragonesa. Como presidente del Ateneo de Zaragoza y fundador del Instituto de Estudios Sijenenses Miguel Servet, entre otras muchas iniciativas, dedicó su vida a difundir el patrimonio cultural de su tierra. Sus estudios sobre figuras como Santiago Ramón y Cajal, Miguel Fleta y Francisco de Goya son testimonio de su erudición y amor por Aragón.

Hombre de una integridad y generosidad sin igual, Fernando Solsona Motrel dejó un legado imborrable en la medicina, la academia y la cultura. Su vida fue un ejemplo de entrega, esfuerzo y humanidad, y su recuerdo permanecerá como un faro para quienes buscan la excelencia con humildad y pasión. Su obra y su ejemplo perdurarán en el corazón de quienes, como yo, tuvimos el privilegio de conocerle personalmente.

Sin duda, nuestro admirado Doctor Fernando Solsona tuvo grandes maestros de los que aprendió y recogió el testigo para dejarnos el gran legado del que les he hablado brevemente. Yo he contado con maestros excepcionales. Primero, durante mis estudios de Bachiller, en las Escuelas Pías de Alcañiz y de Zaragoza, donde tuve las mejores profesoras y profesores de ciencias y humanidades.

Ya en la Universidad de Zaragoza (UNIZAR), disfruté, sobre todo, con las asignaturas de Electrónica del profesor Pedro Martínez, y, de Termodinámica de sólidos de los profesores Juan Bartolomé, Rafael Navarro, Fernando Palacio y Domingo González. Con Juan, Rafa y Domingo descubrí los sótanos de la Facultad y “la cueva del helio” en la que se hacía Física de Bajas Temperaturas. Con ellos aprendí a hacer ciencia, disfrutando de cada minuto en el laboratorio, y, tan importante o más, a tener paciencia y dedicar tiempo a la gestión, para conseguir los mejores proyectos y el mejor futuro.

Y es trabajando en gestión por el mejor futuro donde he tenido una de las más enriquecedoras experiencias de mi vida profesional. Dos excelentes profesores e investigadores, María Pilar Pina (Pili) y Luis Martín-Moreno (Luis), me han acompañado en una apasionante aventura de gestión: La creación y dirección del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), a partir de la fusión del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA) y del Instituto de Nanociencia de Aragón (INA), un centro mixto entre el CSIC y UNIZAR, que en 2024 fue reconocido como centro de Excelencia Severo Ochoa.

Luis es el Director Científico del primer proyecto de excelencia Severo Ochoa que llega a Aragón. A su prestigio científico se añade su gran capacidad de gestión que lleva con serenidad, inteligencia y humildad. Pili, brillante y dinámica, tras su experiencia como vicedirectora del INMA, va a ser la próxima Vicerrectora de Política Científica, en el equipo de la primera mujer

Rectora de la Universidad de Zaragoza, Rosa Bolea. He aprendido de ellos mucho más de lo que ellos dicen haber aprendido de mí. Mi agradecimiento, a ellos dos, sobre todo, pero también a los dos últimos equipos de gobierno de la Universidad, del CSIC, y del Gobierno de Aragón, porque el apoyo decidido de las tres instituciones ha sido decisivo para la consolidación y los logros del INMA.

Las estancias en el extranjero son muy enriquecedoras y formativas. Nos permiten ver formas distintas de trabajar, de organizarse, de resolver los problemas de todo tipo, de relacionarse. Mi estancia en la Universidad de Twente en Holanda, durante el curso 1984–1985, me permitió conocer a una gran persona y maestro de la física y la innovación, el profesor Jaap Flokstra y todo su equipo. Allí puse en práctica mis conocimientos de electrónica y termodinámica, y aprendí a trabajar en un gran equipo multidisciplinar de ingenieros, químicos, biólogos y físicos, con el objetivo de poner los cimientos de los actuales equipos médicos denominados MEG (magneto-encefalógrafos). También descubrí las muy bajas temperaturas fuera del laboratorio, con un largo invierno en el que -15°C era una temperatura más que frecuente.

En el *Laboratoire de Cristallographie* del CNRS, en Grenoble, conocí otra gran persona, químico-matemático-físico, con unas habilidades naturales para fabricar piezas, montar equipos y desarrollar procedimientos, el profesor Daniel Fruchart. Daniel también tenía una “cueva” en los sótanos del edificio. La “cueva” de la hidruración. Con él aprendí cómo modificar las propiedades de aleaciones magnéticas introduciendo hidrógeno intersticial en la red cristalina. La hidruración de aleaciones era también un procedimiento para almacenar hidrógeno de forma segura, para los vehículos de hidrógeno. Un procedimiento sobre el que Daniel había desarrollado varias patentes. Estas enseñanzas del “maestro” Fruchart nos han servido para obtener helio de pureza sin precedentes, libre de hidrógeno, y resolver un problema de escala mundial.

Tan importantes como los maestros en mi trayectoria científica han sido las personas con las que he colaborado, de las que he aprendido en lo profesional y en lo personal. Así, Paco Lera, Luis Angurel, Antonio Badía, Luis Giordano, Elena Martínez y Germán de la Fuente, entre otros, fueron mis compañeros de trabajo durante el “tsunami” científico que supuso el descubrimiento de la superconductividad de alta temperatura crítica en 1986. El programa español “MIDAS”, de investigación en superconductividad (1988–1996), gestionado por otro gran profesor, Felix Yndurain, consolidó un excelente grupo de superconductividad aplicada en Zaragoza.

Agustín Camón, Javier Sesé y Elena Bartolomé, rigurosos, infatigables y extremadamente precisos, como no podía ser de otra manera en un área de trabajo como la metrología cuántica eléctrica. Juntos contribuimos decisivamente a modernizar la metrología eléctrica en España,

con la introducción y mejora de los patrones cuánticos eléctricos en centros nacionales de metrología. Abelardo Martínez, Jorge Fernández y Guillermo Peón, “aguerridos” ingenieros con los que trabajé, respectivamente, en el desarrollo de sensores SQUID para biomagnetismo, en la optimización de equipos de medida de propiedades de materiales a bajas temperaturas, y, en el diseño de criostatos para el almacenamiento de energía para las compañías eléctricas, y, para aceleradores de partículas, como el *Large Hadron Collider* del CERN.

En ciencia y, sobre todo, en innovación, el personal técnico y de gestión es más que esencial y nunca debidamente reconocido. He tenido la suerte de ver nacer y crecer el Servicio General de Apoyo a la Investigación – SAI de la Universidad de Zaragoza. Su sello de excelencia EFQM refleja el buen hacer de todo su personal. Ninguno de los temas científicos que he mencionado antes hubieran llegado a buen puerto sin personas como Pedro Téllez y Ángel López en el Servicio de instrumentación electrónica; Ana Arauzo y Enrique Guerrero en el Servicio de medidas físicas; Juan Urtizberea, Fernando Gómez, Marta Castrillo, David Finol y Miguel Gabal en el Servicio de líquidos criogénicos; Carol Ginés en la Unidad de Calidad del SAI; y, Marisa Bonilla, administrando y gestionando los proyectos y contratos del grupo de investigación con hábil diligencia. La administración también juega un papel facilitador en la ciencia. A todo el personal técnico y de administración del SAI, del INMA, del CEQMA, de la VIT-CSIC, de OTRI-UNIZAR, y de los distintos servicios de UNIZAR, gracias.

Antes de terminar este preámbulo e iniciar el “viaje apasionante por la innovación” quiero agradecer a Agustín Camón y a Javier Sesé su ayuda y complicidad a la hora de “atrapar” a Miguel Gabal, y convencerle para que trabajase con nosotros, por y para la “conservación del helio”. Finalmente, a todos, y, muy especialmente, a Javier y a Miguel, gracias por haberme acompañado en buena parte del viaje que voy a relatar a continuación.

Introducción

Los avances en ciencia y su proyección en la sociedad son el resultado de un largo proceso, de un viaje apasionante en el tiempo, en el que suelen intervenir muchas personas y circunstancias a menudo extraordinarias. Este es el caso del descubrimiento de un elemento químico muy especial, el helio, y del desarrollo de sus múltiples e importantes aplicaciones, tanto en fase gas como en fase líquida. Al helio se debe el descubrimiento de fenómenos tan sorprendentes como la superconductividad y la superfluidez, el desarrollo de equipos médicos como la resonancia magnética de imagen y los magneto-encefalógrafos, el funcionamiento de aceleradores de partículas para investigación fundamental sobre la constitución de la materia y el origen del

universo, aplicaciones en la industria microelectrónica, en telecomunicaciones, en soldadura de precisión, en submarinismo, en la generación de energías limpias del futuro, en computación cuántica. . . . Aplicaciones todas ellas en las que, por el momento, no tiene sustituto.

He comenzado el título del discurso con la frase “un viaje apasionante por la innovación”, para destacar la importancia que tiene, para hacer la mejor ciencia posible, innovar en el desarrollo de instrumentación científica. La innovación ha de entenderse en sentido amplio, tanto la innovación incremental con la que, por ejemplo, se mejora la precisión de un instrumento existente, como la innovación disruptiva que supone normalmente un cambio de paradigma. Así, la construcción de instrumentos científicos y tratar de que estos sean lo más sencillos y precisos posible es esencial para avanzar en la ciencia. Esto implica estudiar, comprender y tratar de mejorar lo que otros han hecho, poniéndolo nuevamente a disposición de todos, para, entre todos, hacer la mejor ciencia posible. El caso del descubrimiento del helio por el Profesor William Ramsey (1852–1916), a finales del siglo XIX, como nuevo elemento químico de la serie de los gases nobles, es un claro ejemplo de lo que acabo de mencionar.

La segunda parte del título del discurso: Helio líquido “hecho en Zaragoza” está relacionada con la continuación de este histórico viaje. En 1908, en la Universidad de Leiden, el Profesor Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926) consiguió licuar helio por primera vez. Hasta ese momento el helio era el único y último “gas permanente” que quedaba como tal, dado que todos los demás, incluido el hidrógeno, ya se habían conseguido licuar. Este hito en la ciencia permitió el acceso a la Física de Bajas Temperaturas y el descubrimiento de una gran riqueza de fenómenos, hasta entonces ocultos. Esos nuevos fenómenos eran solo visibles a temperaturas inferiores a unos 10 K (-263°C) por tener asociadas energías extremadamente pequeñas, inferiores a 1 meV ($1,6 \cdot 10^{-22}$ J). Kamerlingh Onnes recibió el premio Nobel de Física en 1913 por el descubrimiento de la superconductividad en mercurio y sus investigaciones sobre las propiedades de la materia a bajas temperaturas, en las que el helio líquido fue fundamental.

En la década de 1970, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, se comenzó a trabajar en Física de Bajas Temperaturas. Un profesor y varios estudiantes de doctorado hicieron estancias en la Universidad de Leiden y trajeron a Zaragoza conocimiento y técnicas experimentales de bajas temperaturas. Así se forjó un grupo de investigación para el que la disponibilidad de helio líquido era fundamental. Hoy el helio líquido que se utiliza en Zaragoza para investigación, **y, en más de doscientos cincuenta laboratorios y equipos médicos de hospitales de todo el mundo**, se produce con una nueva tecnología desarrollada en Zaragoza. Esta es la parte del viaje a la que yo me incorporé hace cuatro décadas, viaje que no ha concluido, porque, como veremos al final del discurso, el futuro del helio y de todo lo que depende del helio

(sea como líquido o como gas) es incierto y depende, ahora más que nunca, de la innovación y del buen hacer de todos, investigadores, usuarios, empresas, y, agentes económicos y políticos que intervienen en su gestión.

El discurso está dividido en tres etapas de un viaje histórico que se inicia a principios del siglo XIX y llega hasta la actualidad, con innumerables anécdotas, alguna de las cuales comentaré en un apartado final.

La primera etapa del viaje, **del Sol a la Tierra**, resume la historia del descubrimiento del helio. Un viaje cuyo inicio he situado a principios del siglo XIX, concretamente en 1802. Llegaremos a 1868 cuando parece confirmarse la posible existencia de un nuevo elemento químico en el sol, no identificado todavía en la Tierra, al que se denominaba tímidamente *helium*. A pesar de ingentes esfuerzos, no fue hasta 1895 cuando se anunció el descubrimiento de un nuevo elemento químico en la tierra cuya “huella dactilar”, en un espectrómetro de emisión, coincidía con la del “posible nuevo elemento” detectado en la observación del sol. A partir de ese momento, al ya confirmado como nuevo elemento químico se le denomina, sin reparos, *helium*. El siguiente hecho relevante ocurre unos años después, en 1908, cuando se licuó por primera vez el nuevo elemento, primero de la serie de los gases nobles. Este es el hecho fundamental para el resto de toda esta historia. Pero, tras algo más de un siglo de recorrido, haremos una parada técnica para explicar, brevemente, las propiedades generales y aplicaciones que actualmente tiene el helio, tanto en fase de gas como en fase líquida, y como afecta a nuestras vidas.

En la segunda etapa reanudaremos el viaje histórico, retomando el descubrimiento del helio líquido en 1908, en la Universidad de Leiden (Holanda), hecho que marcó el inicio de la Criogenia y la Física de Bajas Temperaturas. En la década de los años 50 se desarrollaron los primeros licuefactores de helio comerciales, que permitieron, a varios cientos de laboratorios en todo el mundo, disponer de helio líquido para investigación. En España no se dispuso de esta valiosa tecnología hasta 1972, cuando un grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de Zaragoza, que había adquirido experiencia en la Universidad de Leiden, **“de Leiden a Zaragoza”**, consiguió poner en marcha un licuefactor de segunda mano que iba a ser desechado por la Marina de los Estados Unidos y donado a la Universidad de Zaragoza por el *Stevens Institute of Technology*, Hoboken, New Jersey, EEUU.

El helio líquido se convirtió así en un material imprescindible para la investigación en Física del Estado Sólido en la Universidad de Zaragoza. En 1981, el ya consolidado grupo de Física de Bajas Temperaturas de la Universidad de Zaragoza consiguió financiación para la adquisición de un licuefactor de última generación. Gracias a ello la producción científica del grupo en diversas

áreas de física, entre ellas la calorimetría experimental y las transiciones de fase magnéticas y estructurales en sólidos, el magnetismo y la superconductividad, aumentó considerablemente en calidad y relevancia internacional. Pero, con el tiempo, se constató que la tecnología industrial de recuperación, purificación y licuefacción de helio de la que se disponía era demasiado compleja y difícil de mantener. Por otra parte, tras un análisis de eficiencia de dicha tecnología industrial se concluyó que no era adecuada para la demanda y necesidades, tanto en Zaragoza como en cientos de laboratorios de investigación y hospitales de todo el mundo. Por otra parte, en todos ellos el número de resonancias magnéticas y equipos médicos que requieren helio líquido aumentaba de forma exponencial.

Fue este hecho, la necesidad de disponer de una tecnología más sencilla y eficiente de licuefacción, recuperación y purificación del helio, adaptada a laboratorios de investigación y hospitales, lo que motivó que, en Zaragoza, en 2006, tomásemos la iniciativa de explorar nuevas ideas para producir helio líquido, tal y como se explica en la tercera y última etapa del viaje.

En la tercera etapa expondré, en primer lugar, las bases tanto termodinámicas como tecnológicas, para implementar las nuevas ideas. A continuación, describiré la nueva tecnología de licuefacción, recuperación y purificación de helio desarrollada en Zaragoza, patentada y comercializada con éxito a partir de 2012, en todo el mundo. Numerosos laboratorios, empresas y hospitales disponen ya de una forma sencilla y eficiente de utilizar, recuperar, purificar y licuar el helio sin apenas pérdidas. La adquisición de esta tecnología por la Universidad de Leiden, “**de Zaragoza a Leiden**”, ha sido un excelente hito en este apasionante viaje que tuvo allí el inicio de una de las tres etapas. Como colofón, con esta tecnología se ha resuelto un problema mundial, agudizado en las últimas décadas, que ocasionaba enormes pérdidas de helio, y, por tanto, también económicas. Se trataba del bloqueo reiterado de los capilares utilizados en infinidad de equipos científicos y médicos comerciales. En esos equipos es necesario producir temperaturas inferiores a 4,2 K para su funcionamiento, bombeando el helio líquido a través de un capilar. La investigación llevada a cabo en Zaragoza ha permitido resolver el problema definitivamente.

Finalmente haré una breve prospección del “futuro del helio” teniendo en cuenta su uso cada día en más aplicaciones médicas, en grandes instalaciones científicas y en la producción de la energía limpia del futuro. Precisamente, el inexorable camino hacia energías limpias, libres de combustibles fósiles como el gas natural, del que se extrae mayoritariamente el helio que usamos hoy día en la Tierra, plantea cuestiones muy importantes acerca del futuro del helio y sus aplicaciones. Así, todo aquello que en estos momentos depende exclusivamente de la extracción de helio del subsuelo, donde se encuentra como impureza de otros gases fósiles, necesita un análisis de futuro. Es en este punto donde “**la conservación del helio**” es vital.

Terminaré el discurso con algunas anécdotas y conclusiones.

PRIMERA ETAPA: Del Sol a la Tierra

Antes de iniciar esta primera etapa del viaje quiero introducir al verdadero protagonista de toda esta historia, el Sol, y lo que en él ocurre. Reacciones nucleares que producen helio y la energía que mantiene la vida en nuestro planeta Tierra. Lo haré mediante las imágenes de la Figura 1 y la siguiente cita del autor de uno de los libros que trata el problema de la preocupante posible desaparición del helio en la tierra:

“Our Sun, along with virtually every star you see in the night sky is a giant nuclear, helium-producing, life-giving, furnace”. (Sears, 2015).

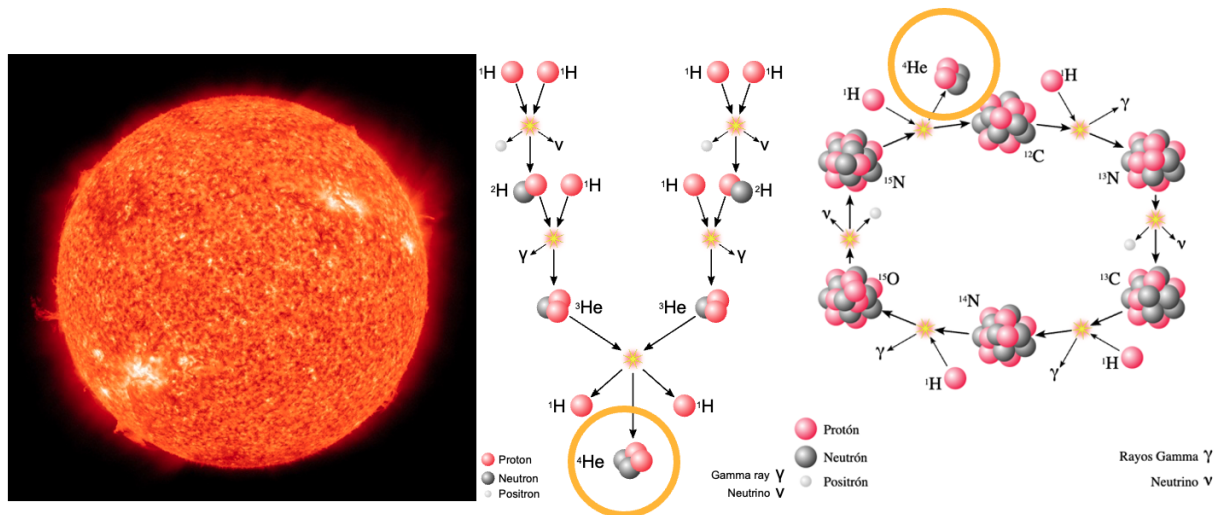


Figura 1: Izquierda: el Sol fotografiado por el Observatorio Solar Dinámico de la NASA –*Solar Dynamics Observatory* (SDO)–. Se trata de una imagen en la región extrema-ultravioleta del espectro, retocada en color por la NASA. A la derecha de la imagen se muestran dos ejemplos de las reacciones de fusión que se producen en las estrellas dando lugar a helio y energía. Centro: Cadena protón-protón, predominante en el Sol. Derecha: Ciclo CNO. El núcleo de helio liberado se indica con un círculo amarillo. (Composición a partir de imágenes de dominio público).

La historia del descubrimiento del helio es un relato fascinante que nos lleva a través de siglos de innovación científica, donde el desarrollo de instrumentos ópticos cada vez más precisos, como los espectroscopios y espectrómetros, jugó un papel crucial. Este viaje no solo nos muestra cómo la humanidad ha desentrañado los misterios del universo, sino también cómo las innovaciones incrementales y disruptivas han impulsado el progreso científico.

He elegido como comienzo del viaje histórico el año 1802. En ese año, el [Dr. William Hyde Wollaston](#) (1766–1828), realizó una aportación aparentemente simple pero fundamental al experimento óptico de Newton de descomposición de la luz solar mediante un prisma de vidrio triangular. En lugar de hacer pasar la luz a través de un agujero redondo, Wollaston utilizó

una rendija estrecha para difractar la luz en un prisma de vidrio de pedernal de alta calidad. Este cambio le permitió obtener un espectro solar que no era continuo, sino que estaba interrumpido por una serie de líneas oscuras. Aunque Wollaston no investigó más a fondo estas líneas, su observación sentó las bases para futuros descubrimientos

El siguiente episodio de esta historia lo protagonizó **Joseph Fraunhofer** (1787–1826), quien, utilizando el espectroscopio tal y como se recrea en el fotograbado de la Figura 2, estudió detenidamente las líneas oscuras observadas por Wollaston. Fraunhofer notó que estas líneas

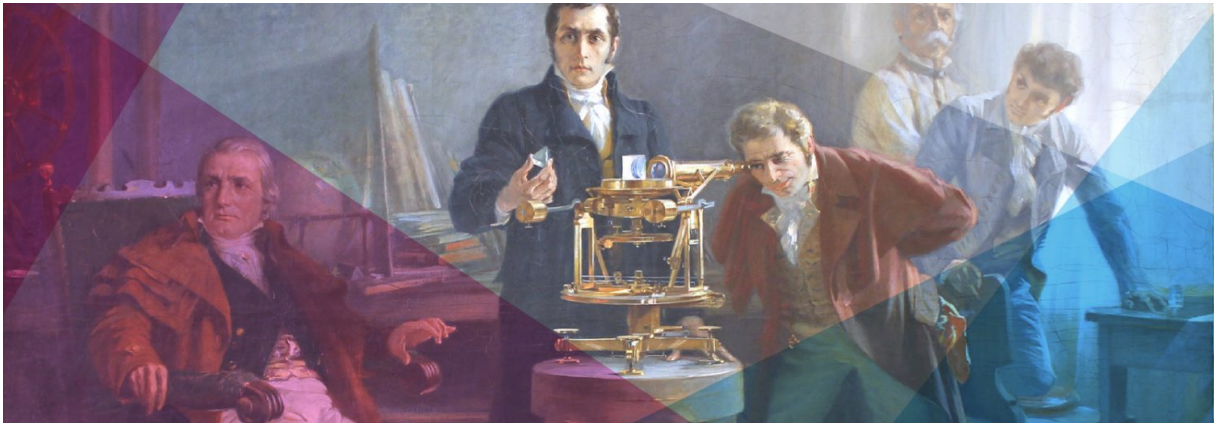


Figura 2: Joseph von Fraunhofer demostrando el funcionamiento del espectroscopio. A su izquierda Joseph von Utzschneider, a su derecha Georg Friedrich von Reichenbach. Fotograbado de una pintura, por Richard Wimmer. <https://www.musoptin.com/fraunhofer-und-seine-mitstreiter/>

tenían posiciones fijas en el espectro solar y las catalogó asignándoles letras mayúsculas de la A a la H, siendo estas las ocho más prominentes entre unas 700 líneas. Este descubrimiento, conocido como las “líneas de Fraunhofer”, fue uno de los avances más importantes en la óptica de la época y permitió el desarrollo de telescopios refractivos que reemplazaron a los reflectivos. Aunque Fraunhofer tampoco investigó el origen de estas líneas, su trabajo fue fundamental para el desarrollo posterior de la espectroscopía.

El siguiente gran avance vino de la mano de Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) y Robert Bunsen (1811–1899), quienes desarrollaron el espectrómetro (Figura 3) y las técnicas de espectroscopía de emisión y absorción (Figura 4).

Con esta herramienta, **Kirchhoff** y **Bunsen** identificaron varios elementos en la atmósfera solar, como sodio (Na), magnesio (Mg), bario (Ba), cobre (Cu), zinc (Zn), calcio (Ca), cromo (Cr), níquel (Ni) y aluminio (Al). Observaron que estos elementos, bien conocidos en la Tierra, cuando se analizaban en el espectrómetro en modo de emisión, mostraban líneas brillantes en las mismas posiciones que las líneas oscuras de Fraunhofer en el espectro solar. Esto llevó a Kirchhoff a concebir la idea de que el Sol está rodeado por vapores de estos elementos, cuyas líneas de emisión son absorbidas por la luz blanca emitida por el Sol.

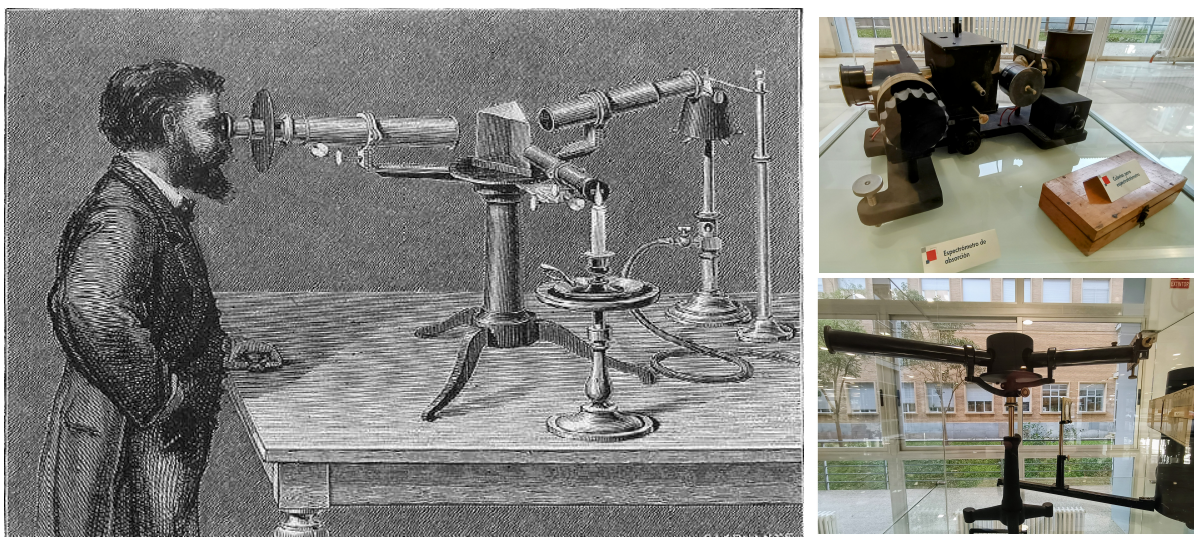


Figura 3: Izquierda: Espectroscopio de Bunsen y Kirchhoff. Recreación artística de Kirchhoff observando el espectro de emisión de una sustancia (imagen de dominio público). Derecha: Espectroscopios de absorción (arriba) y de emisión (debajo) conservados en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza. Estos aparatos permitieron a los químicos del siglo XIX detectar elementos que se encontraban en cantidades demasiado pequeñas para ser analizados con procedimientos químicos tradicionales. Se basan en el estudio de los espectros de emisión de ciertos elementos al ser calentados y en los de absorción cuando se iluminan con luz.

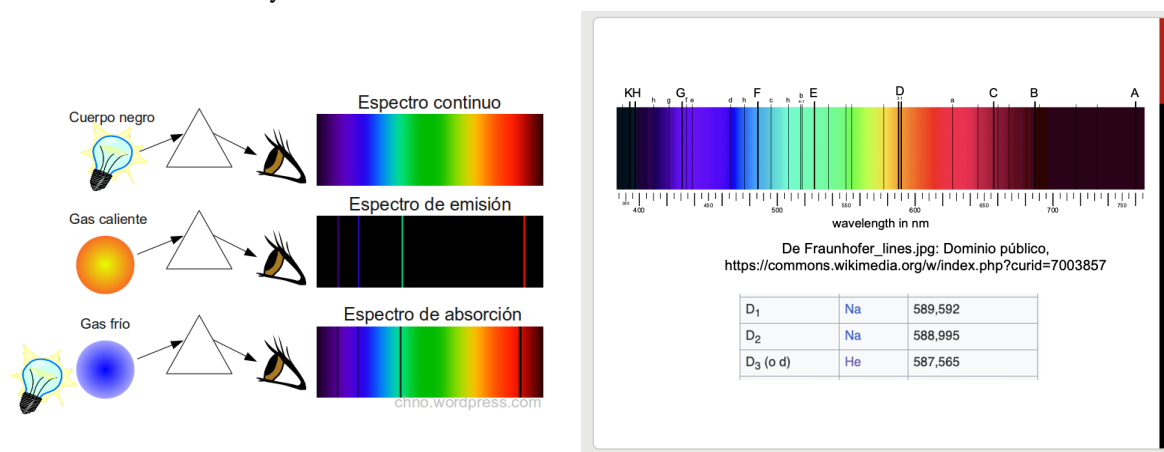


Figura 4: Izquierda: Espectros continuo (luz difractada en un prisma), de emisión (gas caliente diluido) y de absorción (gas frío irradiado con luz). Derecha: Líneas de Fraunhofer y longitudes de onda de las líneas D1, D2 y D3. La línea D3, muy próxima a las líneas D1 y D2 del sodio, corresponde al Helio. Durante años se sospechó que esa línea, observada por primera vez durante el eclipse solar total de 18 de agosto de 1868, podría corresponder a un nuevo elemento químico no descubierto en la Tierra, pero su proximidad a las líneas del sodio y su inexistencia en ningún elemento conocido en la Tierra hizo que su identificación tardase varias décadas. (Composición a partir de imágenes de dominio público).

Anders Jonas Ångström (1814–1874) aportó la siguiente innovación clave en 1868, al utilizar una red de difracción para analizar el espectro. Esto permitió asignar longitudes de onda específicas a las líneas espectrales. Por ejemplo, el sodio se identificó con una línea de 5889 Ångstroms en la región amarilla del espectro. Este avance fue crucial para la precisión en el análisis espectral (Sears, 2015).

El siguiente hito en esta historia involucra a numerosos científicos, la mayoría de ellos astrónomos. Entre otros destacaron [Pierre Janssen](#) (1824–1907), [Norman Pogson](#) (1829–1891), y [Norman Lockyer](#) (1836–1920). Lockyer dedujo que, con un instrumento lo suficientemente avanzado, se podrían analizar las prominencias solares para comprobar si estaban formadas por gas, incluso en ausencia de eclipses. Obtuvo financiación para construir un potente espectroscopio, pero este no estuvo terminado para utilizarlo durante el esperado eclipse total del 18 de agosto de 1868.

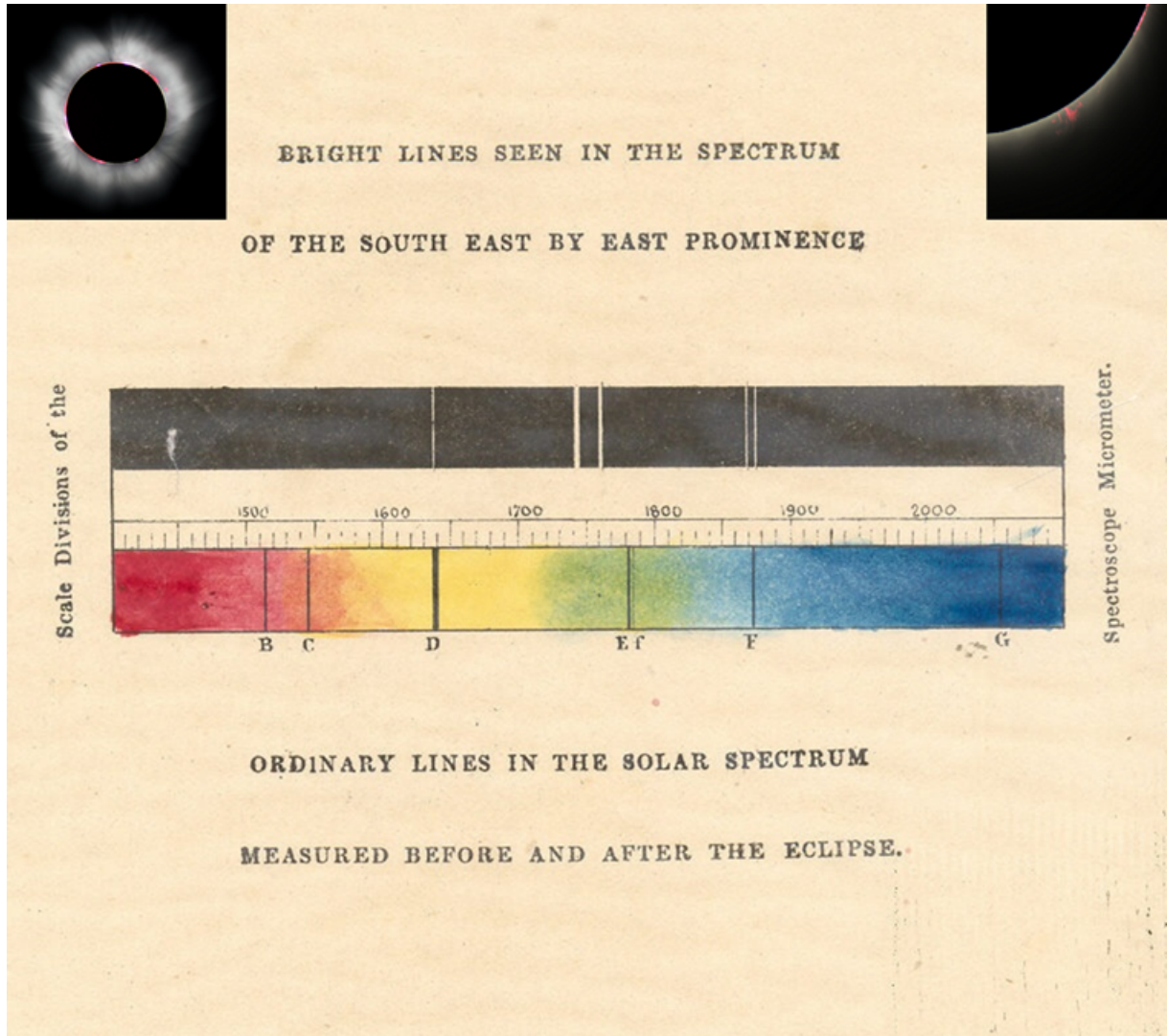


Figura 5: Diagrama pintado a mano por Pogson con las líneas brillantes que observó en una de las prominencias durante el eclipse. Se ha incluido una fotografía de un eclipse total (esquina superior izquierda del diagrama), y un detalle ampliado de una prominencia observada durante el eclipse total (esquina superior derecha del diagrama). El espectro superior consta de líneas brillantes de emisión que fueron vistas por primera vez el 18 de agosto de 1868. El espectro inferior es el usual con las líneas oscuras de absorción. Pogson reflejó en sus anotaciones que la línea brillante del espectro de emisión que se observaba en la zona de la línea D de absorción, aunque cercana a D, parecía no coincidir exactamente con ella. Esto llamó la atención de Lockyer que investigó a fondo el origen de esa línea. Tres décadas después se demostró que esa línea brillante era debida al helio. (Composición a partir de imágenes de dominio público).

Este histórico eclipse iba a ser el primer eclipse total en el que las prominencias solares podrían ser analizadas con espectroscopios. Durante la totalidad del eclipse, científicos y astrónomos, instalados en distintos puntos de la India con sus equipos, obtuvieron el espectro de emisión de las prominencias en la corona solar. Al alinear sus instrumentos de observación con las prominencias, prácticamente todos pudieron ver asombrados cómo las líneas oscuras de Fraunhofer del espectro solar se convertían en líneas brillantes de emisión. Una línea especialmente brillante en la frontera de la zona naranja del espectro llamó la atención, sobre todo a Pogson.

Mientras que todos los observadores, incluido Janssen, pensaron que esa línea naranja brillante era la “huella dactilar” del vapor de sodio (línea D del espectro de Fraunhofer), Pogson se dio cuenta de que no era exactamente coincidente. Así lo plasmó en sus anotaciones junto a un diagrama hecho a mano del espectro de emisión observado en la prominencia (Figura 5). Sin embargo, aquí hay cierta confusión histórica sobre quien o quienes habían reparado en este hecho, que será trascendental en todo lo que aconteció tras el eclipse (Nath, 2013; Sears, 2015).

No obstante, el gran descubrimiento era que las prominencias solares observadas durante el eclipse estaban compuestas de gases y no de sólidos o líquidos, dado que estos darían un espectro continuo.

Ante las dudas de Pogson respecto a la posición de la línea brillante en la región amarillo-anaranjada del espectro, en comparación con las bien conocidas líneas del sodio, Lockyer, quien ya contaba con los medios necesarios para observar las líneas de emisión del limbo solar incluso bajo la luz del día, llevó a cabo una investigación exhaustiva sobre dicha línea. Así, Lockyer confirmó la sospecha de Pogson y pensó que podría tratarse de un nuevo elemento al que tentativamente proponía denominar *helium*. Pero al no coincidir con ningún elemento conocido en la Tierra, tanto él como su colaborador, el químico Edward Frankland (1825–1899), prefirieron, finalmente, denominar la nueva línea como D3, enfatizando su cercanía a las líneas D1 y D2 del sodio (Figura 6). Janssen, que como Lockyer, fue capaz de obtener el espectro de emisión de las prominencias en ausencia de eclipses, nunca hizo referencia a esa línea en sus publicaciones. Sin embargo, la historia atribuye a ambos, Janssen y Lockyer, el descubrimiento del helio en el sol.

El hecho es que Lockyer, aunque sospechaba que esa línea podría deberse a un elemento desconocido en la Tierra, nunca lo afirmó formalmente. Fue Sir William Thomson (1824–1907), más tarde conocido como “Lord Kelvin”, quien, en 1871, mencionó públicamente por primera vez la palabra *helium* para referirse a la línea D3. Lord Kelvin, durante su discurso inaugural

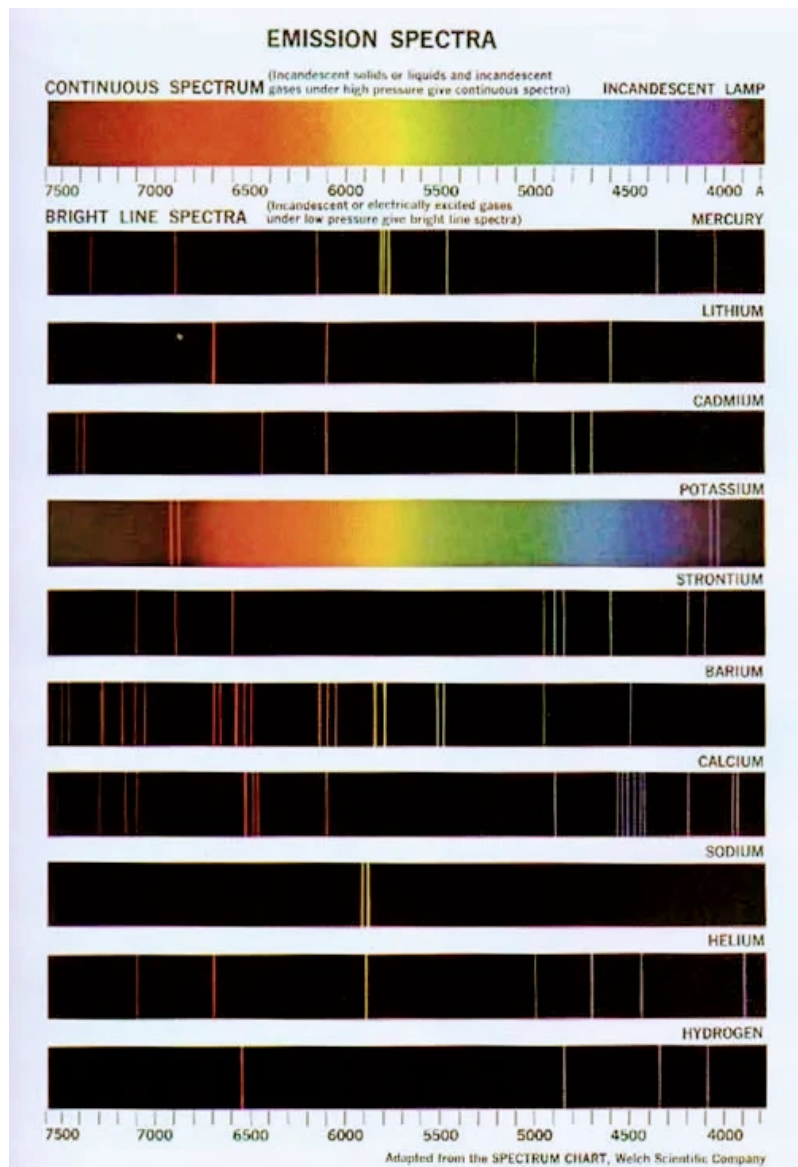


Figura 6: Espectro continuo (arriba) y espectros de emisión de diversos elementos, entre ellos sodio, helio e hidrógeno en la parte inferior (*Welch Scientific company*). Se puede apreciar la dificultad para distinguir la línea D3 de las líneas D1 y D2 del sodio.

ante la “British Association” en Edinburgo, atribuyó a Frankland y Lockyer el hallazgo de la línea brillante cercana a D, y atribuyó a ambos la propuesta de llamarle *helium*. Ellos prefirieron seguir llamándola simplemente “D3” mientras no se confirmara su naturaleza.

Finalmente, el descubrimiento del helio en la Tierra, llegó de la mano de [William Ramsay](#) (1852–1916), quien ya había descubierto otros gases nobles ([Sears, 2015](#)). En 1895, Ramsay aisló el gas atrapado en un mineral de uranio llamado cleveíta (Figura 7), identificándolo como un gas noble y segundo elemento de la tabla periódica tras el hidrógeno. Ese gas presentaba claramente la línea D3 en su espectro de emisión. Era el misterioso *helium* de Lockyer ([Nath, 2013](#)). Este descubrimiento estuvo estrechamente relacionado con el estudio de la radiactividad



Figura 7: Izquierda: Cleveita, mineral radiactivo que contiene uranio, del que se aisló por primera vez el helio. Se trata de una variedad impura de uraninita, y tiene de composición UO_2 con un 10 % de los átomos de uranio sustituidos por elementos de tierras raras (De *UCL Mathematical and Physical Sciences from London, UK* - Clevite, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=61762600>). La cleveíta fue la primera fuente terrestre conocida de helio, que se crea por emisión de radiación alfa del uranio y, a continuación, se queda atrapado (oclusión) en el mineral, como se escenifica en la imagen de la derecha. (Composición a partir de imágenes de dominio público).

natural, ya que el helio se producía como un subproducto de la desintegración radiactiva de elementos como el uranio y el torio (Sears, 2015).

En este punto, es importante mencionar a **Sir William Crookes** (1832–1919), un científico británico cuyo trabajo en espectroscopía y el estudio de gases raros fue fundamental para el avance de la química y la física. Crookes desarrolló técnicas avanzadas para el análisis de espectros y fue uno de los primeros en investigar los gases residuales en tubos de vacío, lo que más tarde llevaría al descubrimiento de los gases nobles. Aunque Crookes no descubrió directamente el helio, sus investigaciones sobre los espectros y su desarrollo de instrumentos de alta precisión ayudaron a sentar las bases para que otros científicos, como Ramsay, pudieran identificar el helio en la Tierra.

Tras el descubrimiento del helio en la Tierra por **William Ramsay** en 1895, el siguiente gran hito en la historia de este elemento llegó de la mano del físico holandés **Heike Kamerlingh Onnes** (1853–1926), quien logró licuar el helio en 1908 (Onnes, 1908). Onnes, que había sido alumno de **Robert Bunsen** y **Gustav Kirchhoff** en Heidelberg, heredó de sus maestros un profundo interés por la experimentación precisa y el desarrollo de instrumentación avanzada. Onnes estaba profundamente influenciado por el trabajo del físico también holandés **Johannes**

Diderik van der Waals (1837–1923), quien había desarrollado una ecuación de estado para gases reales que tenía en cuenta las fuerzas intermoleculares.

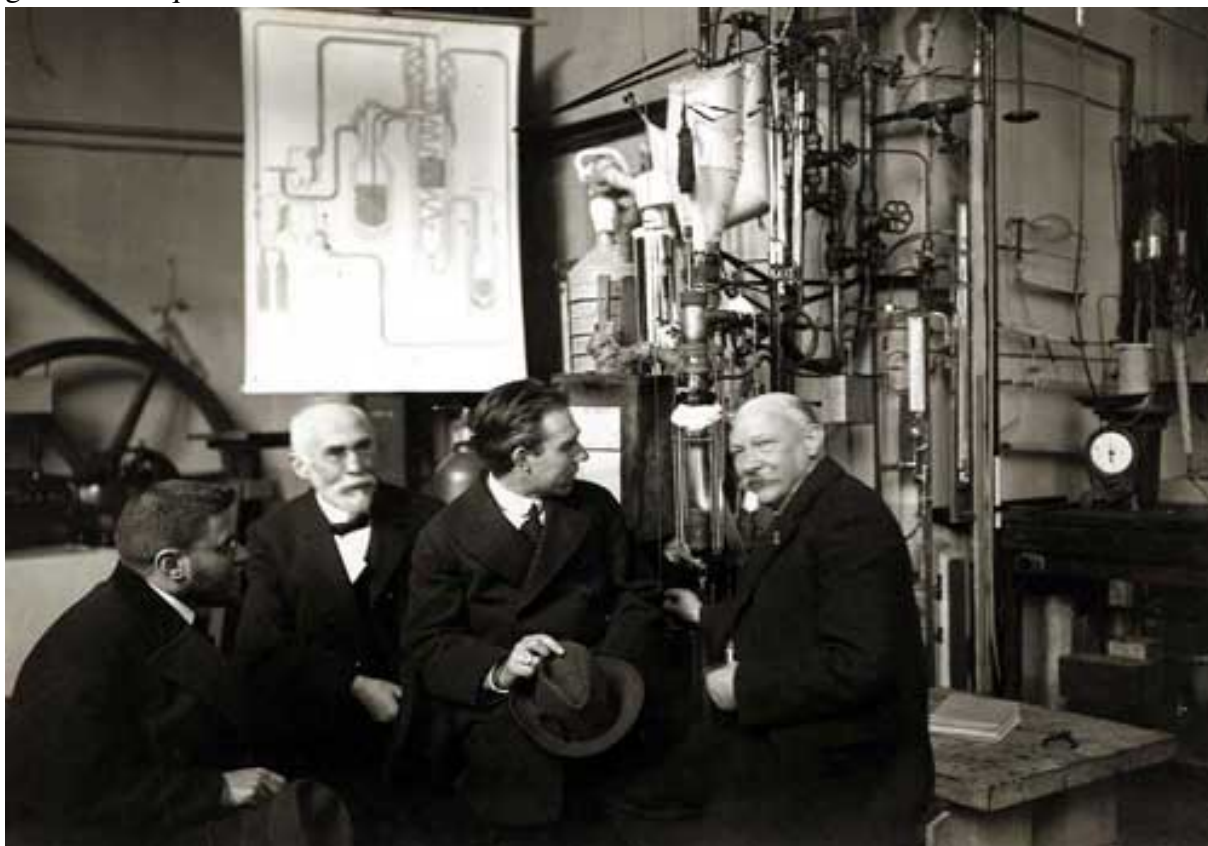


Figura 8: **Paul Ehrenfest, Hendrik Lorentz, Niels Bohr y Heike Kamerlingh Onnes** en 1919 en el Laboratorio Criogénico de Leiden. (Dominio público).

Van der Waals había predicho que, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, todos los gases podrían licuarse. Onnes se propuso comprobar experimentalmente estas teorías, enfocándose en los gases más difíciles de licuar, como el hidrógeno y, finalmente, el helio.

Para lograr la licuefacción del helio, Onnes necesitaba una fuente confiable de helio gaseoso. En aquella época, el helio era un gas extremadamente raro y costoso de obtener. Onnes lo extraía de minerales de uranio, como la cleveíta, que contenían trazas de helio como producto de la desintegración radiactiva. Mediante un proceso cuidadoso de calentamiento y purificación, Onnes y su equipo lograron aislar suficiente helio gaseoso para sus experimentos.

El 10 de julio de 1908, en su laboratorio de la Universidad de Leiden (Figura 8), Onnes logró licuar helio a una temperatura de aproximadamente -269°C (**4,2 K**), la temperatura más baja alcanzada hasta ese momento. Este logro no solo demostró la validez de las teorías de Van der Waals, sino que también marcó el inicio de la física de bajas temperaturas, un campo que Onnes bautizó como “criogenia”.

La Figura 9 presenta la escala logarítmica de temperatura absoluta. La criogenia y la física

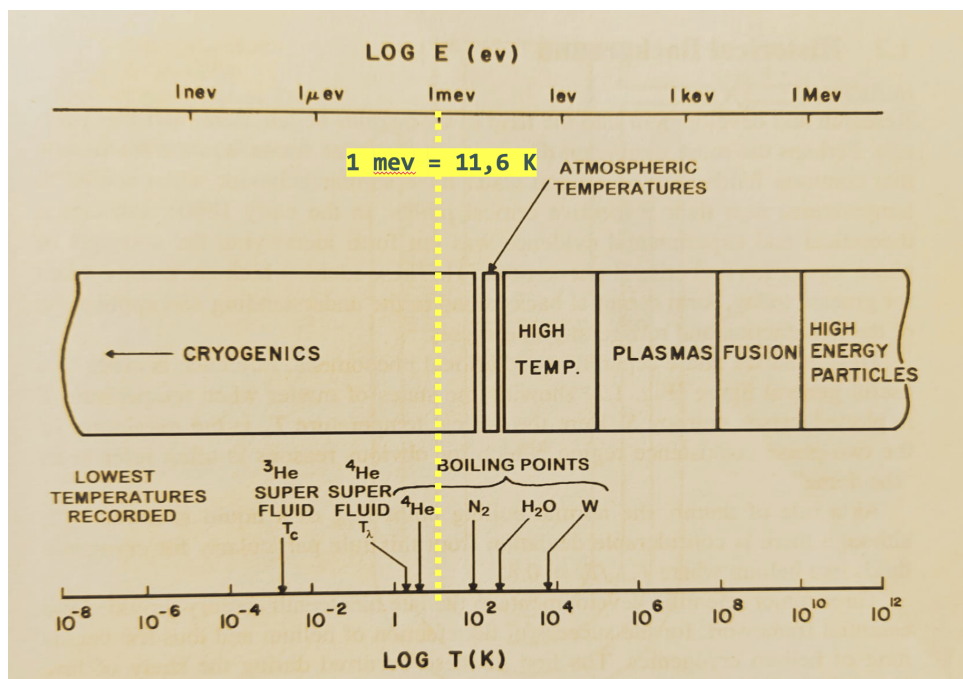


Figura 9: Escala logarítmica de temperatura absoluta con los fenómenos físicos accesibles en cada zona. El descubrimiento del helio líquido ha permitido acceder a la región $\log T < 1,3$ ($T < 20 K$). La criogenia se extiende desde $\log T$ del orden de 2 ($T < 120 K$), hasta las temperaturas más bajas alcanzadas en la actualidad, del orden de unas pocas decenas de piko kelvin ($\log T = -12$). Imagen modificada a partir de la Figura 1.1 de [Sciver, 2012](#).

de bajas temperaturas, con el descubrimiento del helio líquido, han permitido el acceso a los extraordinarios fenómenos físicos que tienen lugar a energías inferiores a unos pocos mili-electronvoltios, como la superconductividad y la superfluidez,

El descubrimiento del helio, desde su observación en el Sol hasta su licuefacción en la Tierra, es un testimonio del poder de la colaboración científica y la innovación tecnológica. Desde los primeros experimentos de Wollaston y Fraunhofer hasta los avances de Kirchhoff, Bunsen, Ångström, Crookes, Pogson, Lockyer, Janssen, Ramsay y Kamerlingh Onnes, cada paso en este viaje ha sido posible gracias al desarrollo de instrumentos cada vez más precisos y a la curiosidad incansable de los científicos.

El trabajo de estos científicos no pasó desapercibido, y muchos de ellos recibieron reconocimientos y premios por sus contribuciones. **Norman Lockyer** y **Pierre Janssen**, por su descubrimiento conjunto de la línea espectral D3 y su papel en la identificación del helio en el

Sol, fueron honrados con una medalla conmemorativa que llevaba sus rostros¹. Esta medalla, acuñada en 1872, simbolizaba la importancia de su colaboración y el impacto de su trabajo en la astronomía y la espectroscopía.

Por su parte, **William Ramsay**, quien identificó el helio en la Tierra y lo clasificó como un gas noble, recibió el **Premio Nobel de Química en 1904**. Este galardón no solo reconoció su descubrimiento del helio, sino también su trabajo pionero en el aislamiento de otros gases nobles, como el argón, el neón, el kriptón y el xenón.

Finalmente, **Heike Kamerlingh Onnes** recibió el **Premio Nobel de Física en 1913** por sus investigaciones sobre las propiedades de la materia a bajas temperaturas, que incluyeron la producción de helio líquido y el descubrimiento de la superconductividad. Su legado sigue siendo fundamental en la física moderna y en la tecnología criogénica.

Aunque **Sir William Crookes** no recibió un Premio Nobel, su trabajo en espectroscopía y el estudio de los gases raros fue ampliamente reconocido. Fue nombrado caballero en 1897 y recibió numerosos honores, incluida la Medalla Real de la Royal Society en 1875, por sus contribuciones a la física y la química.

Estos reconocimientos no solo celebran los logros individuales de estos científicos, sino que también destacan la importancia de la colaboración y el avance colectivo en la ciencia. El descubrimiento del helio, desde su observación en el Sol hasta su identificación en la Tierra, es un recordatorio de cómo el esfuerzo conjunto y la innovación tecnológica pueden llevarnos a descubrir los secretos más profundos del universo.

Propiedades generales y aplicaciones del helio

El helio es un gas noble, monoatómico, con una configuración electrónica muy estable, lo que le confiere un tamaño atómico muy pequeño, 0.031 nm, frente a los 0.053 nm de la molécula de hidrógeno. Además, es muy ligero, inerte y no reactivo. Puede atravesar aberturas o grietas muy pequeñas por las que ninguna otra sustancia puede pasar. No es inflamable ni explosivo como el hidrógeno. En la atmósfera su concentración es muy baja (del orden del 0.0005 %) lo que facilita su detección sin interferencias de otros gases. Así, cualquier presencia de helio

¹ Como se ha mencionado, aunque de forma separada, ambos fueron los primeros en desarrollar casi simultáneamente, la técnica de observación de las prominencias solares en el limbo solar en ausencia de eclipses, contribuyendo de forma decisiva a los avances en la materia en su época. Pero Janssen no mencionaba especialmente la nueva línea D3 cercana a las líneas D1 y D2 del sodio, como sí hicieron Primero Pogson y luego Lockyer (Nath, 2013; Sears, 2015)

en un sistema cerrado o en el ambiente indica claramente la presencia de una fuga. Se puede detectar con gran precisión utilizando modernos espectrómetros de masas. Estas propiedades lo convierten en ideal para detectar posibles fugas en sistemas que han de tener la estanqueidad garantizada.

Así, se utiliza en la **industria aeroespacial** para **detectar fugas** en sistemas de combustible, cápsulas espaciales y tanques de presión. También se utiliza para mantener en todo momento la presión adecuada en los tanques de combustible líquido (hidrógeno líquido (LH2) y oxígeno líquido (LOX)) de los cohetes y vehículos espaciales, por su ligereza, ausencia de reactividad química y baja temperatura de licuefacción. En sistemas de refrigeración y aire acondicionado, para comprobar su estanqueidad. En tuberías y sistemas de vacío, para asegurar que no haya fugas en sistemas críticos como las centrales nucleares. En electrónica, para detectar fugas en componentes sellados como sensores o dispositivos médicos.

Es el **segundo elemento más ligero después del hidrógeno**, con una densidad, en condiciones normales de presión y temperatura, de $0,1785 \text{ kg/m}^3$, frente a los $1,225 \text{ kg/m}^3$ del aire. Esto implica que un globo de 1 m^3 de volumen lleno de helio puede levantar una masa de aproximadamente 1 kg. A pesar de que el hidrógeno es más ligero, tanto para **dirigibles** como para **globos meteorológicos** y globos **de recreo**, se utiliza helio por sus características inertes. El helio de los dirigibles se recicla y mantiene en sistemas cerrados por lo que el consumo por pérdidas en esta aplicación es muy pequeño, del orden de unos pocos m^3 diarios. Sin embargo, los globos meteorológicos, de los que se lanzan varios miles diariamente, con instrumentación para recoger datos y completar con mayor precisión las predicciones meteorológicas, suponen unos $4\,000 \text{ m}^3$ diarios, y los globos de recreo, cerca de $1\,000 \text{ m}^3$ diarios (esta es una aplicación no esencial), son desechables, y suponen, a nivel global unos $5\,000 \text{ m}^3$ de helio diarios, casi una tonelada de helio², que se pierde en la atmósfera, diariamente, para siempre.

Otras aplicaciones son las **soldaduras de precisión TIG** (*Tungsten Inert Gas*), soldaduras extraordinariamente limpias y fuertes gracias a que la atmósfera de helio que rodea el área de la soldadura evita la contaminación por oxígeno y nitrógeno. **En submarinismo se utilizan mezclas respiratorias con helio** (como el Trimix) para reducir los efectos de la narcosis por nitrógeno a grandes profundidades, permitiendo respirar más fácilmente a altas presiones.

Pero la contribución de mayor impacto del helio, desde el punto de vista científico y técnico, ha sido, sin duda, el desarrollo de la física de bajas temperaturas, de la criogenia y las innovaciones asociadas. Nuevos fenómenos como la superconductividad y la superfluidez han

² 1 m^3 de helio $\approx 0,1785 \text{ kg}$ en condiciones estándar. $5\,000 \text{ m}^3$ de helio = 892 kg en condiciones estándar

supuesto retos teóricos extraordinarios y el desarrollo de instrumentos científicos y equipos médicos antes impensables. En particular, la superconductividad ha permitido la generación de campos magnéticos intensos con bobinas superconductoras que, sumergidas en helio líquido, son la base de las resonancias magnéticas de uso en investigación fundamental (Resonancia Magnética Nuclear-RMN) y en diagnóstico médico (Resonancia Magnética de Imagen-RMI). La Figura 10 muestra ejemplos de aplicación del helio tanto en forma de gas como en forma líquida.



Figura 10: Izquierda: Propiedades y aplicaciones del helio con los porcentajes de uso. Arriba: detector de fugas, globo meteorológico y submarinista. Se lanzan varios miles de globos meteorológicos todos los días, en todo el mundo, para recoger datos, tanto durante el ascenso (> 30 km) como durante el descenso, gracias a un paracaídas que se abre una vez que el globo explota. Con esos datos se realimentan los sistemas de predicción meteorológica, para conseguir una mayor precisión. En el centro sala blanca de fabricación de dispositivos microeléctrónicos. Soldadura TIG. Abajo: criostato del acelerador de partículas LHC del CERN y Resonancia Magnética de Imagen, para los que es imprescindible helio líquido. Composición a partir de imágenes de dominio público.

A partir de ahora este viaje por la innovación se centrará en el helio líquido y los esfuerzos por desarrollar tecnologías que permitan disponer de él de la forma más sencilla y eficiente posible y reduciendo las pérdidas al máximo. Pero, antes de seguir, veamos un resumen de la demanda actual porcentual y en Tm/año, tanto de gas como de líquido, en función de la aplicación, y un resumen de la tasa actual de recuperación, todo ello a nivel global.

La demanda global de helio se estima en alrededor de **40 000 toneladas métricas (Tm) anuales** (aproximadamente **110 Tm diarias**)³. Esta demanda se distribuye en las diferentes

³ Estas cifras son estimaciones basadas en datos de mercado y pueden variar según la fuente y el año. El helio es un recurso no renovable, y su disponibilidad está sujeta a fluctuaciones en la producción y la demanda. La información sobre el helio, sus aplicaciones, consumos y pérdidas se basa en una síntesis de conocimiento general disponible públicamente hasta octubre de 2023, complementada con referencias a fuentes como el **US Geological Survey (USGS)**, el **Bureau of Land Management (BLM)** y publicaciones técnicas de la industria.

aplicaciones que se han mencionado, con los porcentajes aproximados de uso y pérdidas que se indican más adelante (Figura 11).

DEMANDA GLOBAL DE HELIO 2024

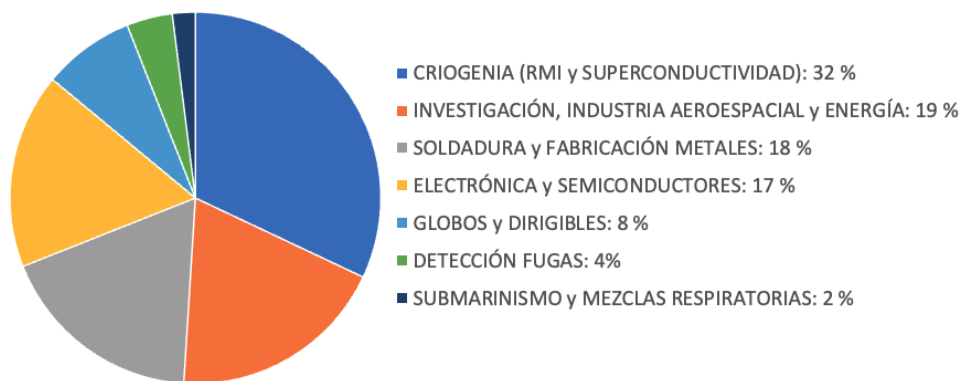


Figura 11: Demanda Global de Helio en 2024: **Criogenia (RMI y superconductividad)**: ~32 % (12800 Tm/año). Uso en resonancias magnéticas (RMI) y magneto-encefalógrafos (MEG), y enfriamiento de imanes superconductores. **Investigación, industria aeroespacial y energía** (fisión y fusión): ~19 % (7600 Tm/año). En experimentos de física de bajas temperaturas y otros estudios. Uso en cohetes, sistemas de presurización y purga en la industria aeroespacial. Como gas refrigerante y de purga en reactores nucleares. **Soldadura y fabricación de metales**: ~18 % (7200 Tm/año). Como gas de protección en soldadura TIG y otros procesos industriales. **Electrónica y semiconductores**: ~17 % (6800 Tm/año). En la fabricación de semiconductores, fibras ópticas y otros componentes electrónicos. **Globos y dirigibles**: ~8 % (3200 Tm/año). Inflado de globos meteorológicos, de recreo y dirigibles. **Detección de fugas**: ~4 % (1600 Tm/año). En la detección de fugas en sistemas herméticos y tuberías. **Submarinismo (mezclas respiratorias)**: ~2 % (800 Tm/año). Uso en mezclas respiratorias como el Trimix para buceo técnico.

En resumen, el helio tiene una demanda global de aproximadamente **110 Tm diarias**, con aplicaciones principales en criogenia, soldadura, aeroespacial, electrónica y otras industrias. Su uso en reactores nucleares, aunque importante, representa un porcentaje menor (alrededor del 3 %) de la demanda total.

La recuperación es más común en aplicaciones industriales y científicas, como la criogenia (MRI, MEG, RMN), la soldadura y los sistemas de presurización en la industria aeroespacial, donde el helio puede capturarse y reutilizarse. Se estima que alrededor del **30–40 %** del helio utilizado a nivel global se **recupera y recicla**. Esto significa que, de las **110 Tm** diarias de demanda, se recuperan aproximadamente **33-44 Tm diarias**. El **60–70 %** restante del helio utilizado se **pierde** o se libera a la atmósfera, donde es económicamente inviable recuperarlo. Esto equivale a aproximadamente **66–77 Tm diarias** de helio que se “desechan”.

Las aplicaciones con mayor tasa de pérdida incluyen globos meteorológicos y de recreo: El helio se libera directamente a la atmósfera cuando los globos se sueltan o se pinchan. Detección de fugas: El helio utilizado en pruebas de fugas a menudo se dispersa en el aire.

Submarinismo: Las mezclas respiratorias que contienen helio se exhalan y se pierden en el entorno. Debido a la escasez de helio y su importancia crítica en aplicaciones como la medicina (MRI) y la investigación científica, se están implementando tecnologías y prácticas para mejorar su recuperación. Por ejemplo, en la industria criogénica e investigación científica, se instalan sistemas de recaptura de helio para reutilizarlo en ciclos cerrados. En la industria aeroespacial, se optimizan los sistemas de presurización para minimizar las pérdidas.

Teniendo en cuenta un precio medio de \$25/m³, el mercado del helio supone unos \$15 millones/día, de los que se recupera helio por un valor de unos \$5 millones y se pierde o desecha helio por valor de \$10 millones.

En conclusión, aunque se recupera una parte significativa del helio utilizado, la mayoría se pierde en la atmósfera. Esto subraya la importancia de mejorar las tecnologías de recuperación y promover un uso más sostenible de este recurso crítico.

SEGUNDA ETAPA: Helio líquido industrial.

Como se ha mencionado al final de la primera etapa del viaje, el helio fue licuado por primera vez por Kamerlingh Onnes, en Leiden, en 1908. Ya desde los años 50 existen licuefactores industriales comerciales desarrollados por [Samuel Collins](#) (1898–1984), químico, físico e ingeniero ([Collins, 1966](#)). La tecnología industrial actual deriva de la de Collins. Es una tecnología bien conocida, compleja, que requiere altas presiones de entrada (20 bar) y para su uso es necesario personal altamente especializado. Los licuefactores más pequeños de esta tecnología tienen unas

LICUEFACCIÓN INDUSTRIAL DEL HELIO

Licuado por primera vez por Kamerlingh Onnes en Leiden (1908)



Primera vez licuado comercialmente por Collins (1947)



Equipos industriales actuales:



Tasa de licuefacción típica: 350 – 1500 L/día

Figura 12: Licuefactor de Leiden. Licuefactor Collins industrial y licuefactores industriales modernos.

tasas de licuefacción de entre 350 y 1 500 l/día (Figura 12), que, como veremos más adelante, son muy superiores a las necesidades de la inmensa mayoría de laboratorios de investigación,

hospitales y empresas de todo el mundo. Por ello, la tecnología industrial de producción y recuperación de helio, cuando se aplica a laboratorios con consumos del orden de 100 l/día, es muy ineficiente. Pero antes de explicar cómo resolver este problema veamos rápidamente un resumen de la historia del helio y la física de bajas temperaturas en Zaragoza.

Helio líquido y física de bajas temperaturas en Zaragoza

La historia del helio líquido y la física de bajas temperaturas en Zaragoza es un relato de innovación, colaboración y perseverancia. Todo comenzó en el **Laboratorio de Física Fundamental**, que disponía de una planta de producción de nitrógeno líquido y equipos capaces de alcanzar temperaturas de hasta $-195,8^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, el verdadero salto hacia la criogenia avanzada llegó en 1970, cuando el **Profesor Domingo González** aceptó una oferta que cambiaría el rumbo de la investigación en España: un licuefactor de helio usado por la Marina de los Estados Unidos, donado a la Universidad de Zaragoza por el **Stevens Institute of Technology** de Nueva Jersey (Figura 13 (izquierda)).

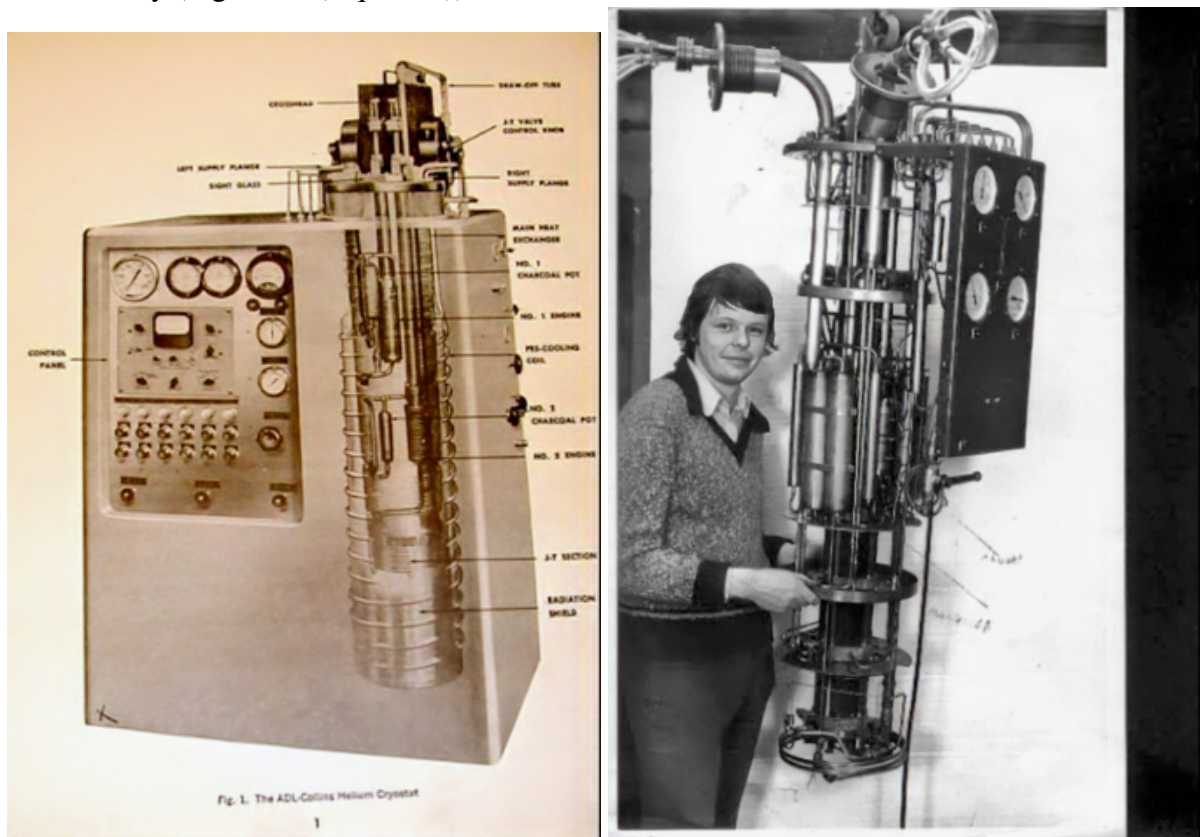


Figura 13: Izquierda: Licuefactor de Helio Arthur D. Little, Collins. Derecha: Licuefactor de Helio Phillips.

Gracias a una beca de la **Fundación Juan March**, el Profesor **Juan Bartolomé** logró instalar este equipo en los sótanos de la Facultad de Ciencias. En 1972, se produjo el **primer helio líquido**

en **Zaragoza**, marcando un hito no solo para la Universidad de Zaragoza, sino para toda España. Este licuefactor, basado en una **válvula de Joule-Thompson**⁴ y varios intercambiadores de calor altamente eficientes, permitía alcanzar temperaturas cercanas a -270°C , acercándose al cero absoluto.

En 1979, el licuefactor Collins fue reemplazado por un licuefactor de segunda mano de la marca Phillips (Figura 13 (derecha)), adquirido a la Universidad de Manchester. Este equipo, transportado e instalado con la colaboración del personal técnico de Manchester, incorporaba una etapa de purificación de helio integrada en la columna de licuefacción, aunque seguía basándose en la tecnología de la válvula Joule-Thompson para la licuefacción final.

“De Leiden a Zaragoza”

Durante los inicios de la Física de Bajas temperaturas en Zaragoza, en la década de 1970, fue esencial el apoyo que varios profesores de la Universidad de Leiden (entre ellos especialmente Jan Huiskamp, A. J. van Duyneveldt y Jos de Jongh) dieron a los profesores Domingo González, Juan Bartolomé y Rafael Navarro, quienes realizaron prolongadas estancias en dicha Universidad. El crecimiento de la ciencia española en la década de 1980 trajo consigo un nuevo impulso para el Laboratorio de Bajas Temperaturas de Zaragoza. En 1981, el **Ministerio de Ciencia** (a través de la entonces denominada CAYCIT), concedió financiación para adquirir un licuefactor de última generación de la marca **Koch**, también basado en el control automático de una válvula Joule-Thompson. Por primera vez, se incorporó al equipo un técnico especializado en refrigeración, **D. Juan Urtizberea**, cuya pericia permitió mantener este licuefactor operativo hasta 2006 (Figura 14).

Durante más de 25 años, los **Profesores Juan Bartolomé, Ramón Burriel y Domingo González** se sucedieron como responsables científicos del **Servicio de líquidos criogénicos (SLC)** de la Universidad de Zaragoza. Junto con el personal técnico del SLC, como **Juan Urtizberea** y **Fernando Gómez**, mantuvieron operativas unas instalaciones que permitieron que Zaragoza fuera un referente nacional e internacional en la investigación de física de bajas temperaturas.

⁴ El efecto Joule-Thomson fue descubierto y estudiado en la década de 1850 por **James Prescott Joule** y **William Thomson (Lord Kelvin)**, quienes observaron que un gas podía enfriarse o calentarse al expandirse libremente a través de una válvula o un tapón poroso, dependiendo de su temperatura inicial y su coeficiente de Joule-Thomson.

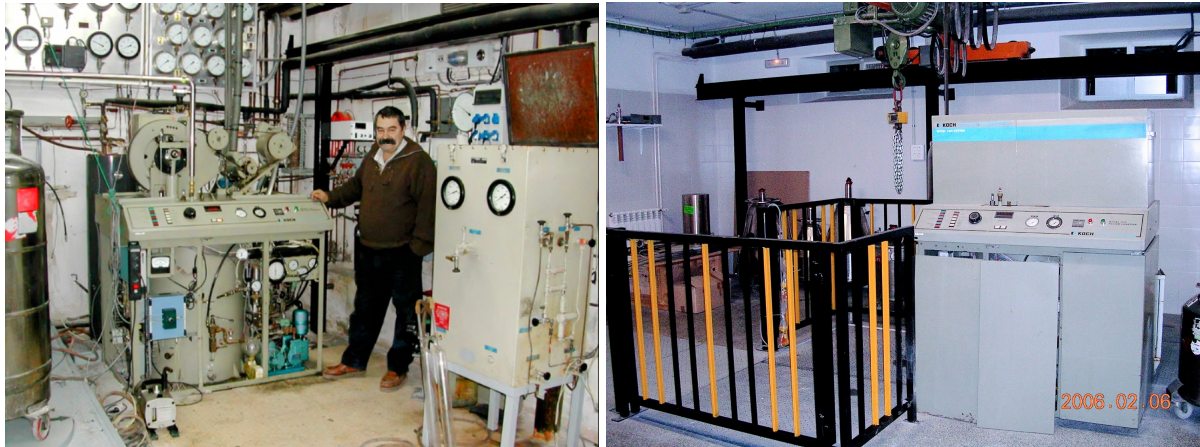


Figura 14: Izquierda: (año 2004)-Licuefactor comercial “Koch” a la derecha del técnico D. Juan Urtizberea, y, purificador de Helio a su izquierda. Derecha: (año 2006) Mismo licuefactor preparado para actualizar y poner en marcha nuevamente. Esto no se llevó a cabo porque, tras un estudio de necesidades y eficiencia energética frente a complejidad, se decidió desarrollar en Zaragoza una tecnología mucho más sencilla y eficiente.

TERCERA ETAPA: Helio líquido “hecho en Zaragoza”

En 2006, me correspondió a mí, como responsable científico del SLC, la tarea de renovar la planta de recuperación, purificación y licuefacción de helio. Frente a las limitaciones y problemas de eficiencia de la tecnología industrial, que producía grandes cantidades de helio líquido con pérdidas diarias equivalentes al consumo, decidí apostar por explorar nuevas ideas basadas en:

- Una **tecnología emergente** en el mercado: los **Refrigeradores Criogénicos de Ciclo Cerrado**⁵ (en adelante RC3), y
- Las extraordinarias **propiedades específicas del helio en una pequeña región de presiones y temperaturas**, desde el punto normal de ebullición a presión atmosférica (4,2 K, 1 bar), hasta el punto crítico (5,2 K, 2,3 bar).

Esa tecnología comercial emergente, que he denominado RC3, me permitió idear y diseñar sistemas mucho más sencillos y eficientes, modulares y escalables, adaptados a las necesidades de cualquier laboratorio y hospital. Las ideas básicas sobre eficiencia, y, la consiguiente necesidad de desarrollar una nueva tecnología, se resumen en la Figura 15.

El círculo de la izquierda representa el consumo q en litros-hora (l/h) de un laboratorio de investigación o centro de investigación típico en física de bajas temperaturas, como el de Zaragoza, donde se dispone de distintos tipos de equipos de investigación que precisan

⁵ Denominados comúnmente en inglés como *Cryocoolers*.

IDEAS for perfect helium recycling (2008-2010)

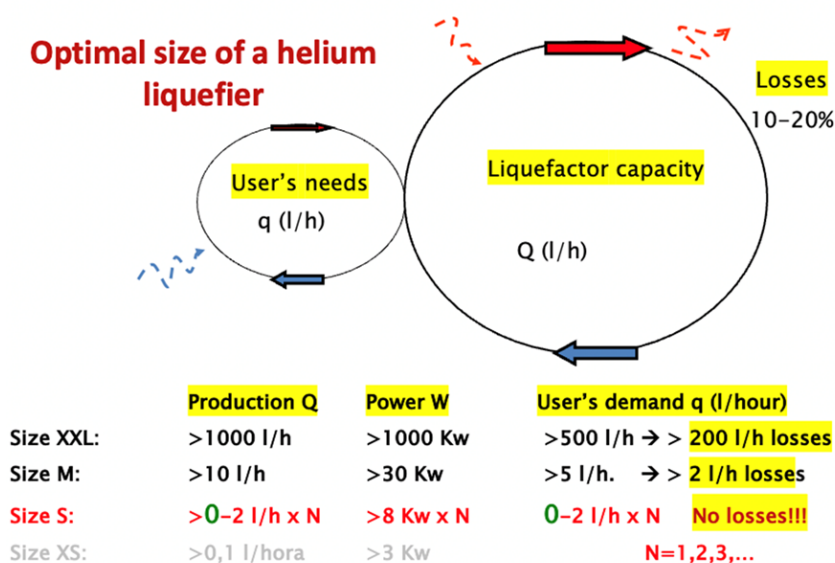


Figura 15: Ideas básicas sobre la eficiencia de la tecnología industrial Collins. Para consumos típicos en laboratorios y hospitales (< 5 l/h, < 120 l/día) las pérdidas de una planta industrial de “tamaño M”, (2 l/h), son del mismo orden que el consumo. El “tamaño S” de planta de recuperación de helio no existía y se ha demostrado que es la solución al problema de eficiencia de las plantas industriales de “tamaños M” y superiores. El diseño de las plantas de tamaño S utiliza refrigeradores de ciclo cerrado del tipo de los utilizados en el tamaño XS, que tan solo permitan recondensar el vapor en equilibrio con el líquido. Pero, aprovechando las propiedades termodinámicas exclusivas del helio, conseguimos desarrollar una tecnología modular, eficiente y prácticamente sin pérdidas, cuya producción se adapta al consumo en todo momento.

helio líquido. Por ejemplo, varios equipos de resonancia magnética nuclear (RMN) con un consumo total de 1 – 2 l/h. Equipos de caracterización física con consumos también del orden 1 – 2 l/h y criostatos de flujo con consumos del mismo orden. En total una media de 4 – 5 l/h máximo. Esto supone unos 100 l/día máximo. Los licuefactores industriales comerciales de menor tamaño (tallas M y L) están diseñados para producir cantidades mucho mayores, entre 350 y 1 500 l/día, y se representan en el círculo de la derecha Q (l/h). Las pérdidas de una planta de recuperación basada en estos licuefactores son del orden del 10–20 % de la producción, es decir, del orden del consumo en la inmensa mayoría de laboratorios de tamaño medio, y, mucho mayor que el consumo en hospitales y pequeños centros de investigación. Por tanto, esas plantas de recuperación, son, en los casos mencionados de consumos inferiores a 100 l/día, totalmente ineficientes. La inexistencia de una tecnología sencilla, adaptada a estas necesidades, ha hecho que todo este tipo de hospitales y centros de investigación arrojen diariamente a la atmósfera toneladas de helio.

Con la tecnología emergente de RC3 se había desarrollado con cierto éxito la recondensación de vapor de helio en el interior de criostatos de investigación (0, 1 l/h) (tamaño XS). También se había explorado la posibilidad de producir helio líquido a partir de gas a temperatura ambiente,

pero con resultados muy lejos de lo esperado teniendo en cuenta la potencia disponible en los RC3 utilizados.

A partir de este análisis y reflexiones, de una revisión exhaustiva del estado del arte, y, de ideas novedosas, que se expondrán con detalle más adelante, durante esta tercera etapa del viaje, concretamente en el periodo 2008–2010, se desarrollaron en Zaragoza prototipos de licuefactores basados en RC3 (Figura 16). Los prototipos se probaron en un entorno real, en el Servicio de líquidos Criogénicos de la Universidad de Zaragoza, en condiciones de laboratorio, lo que permitió validar la tecnología y abordar la fase de diseño de productos comerciales.



Figura 16: Izquierda: El Profesor Juan Bartolomé (INMA, CSIC-UNIZAR), D. Arturo Montón (Integración y Control S.L. y el Profesor Conrado Rillo (INMA, CSIC-UNIZAR), junto a uno de los primeros prototipos pre-comerciales construido en colaboración con *GWR Instruments–San Diego*, Integración y Control-Alagón, Servicio de instrumentación electrónica y Servicio de líquidos criogénicos, ambos pertenecientes al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de Zaragoza. Derecha: Equipo de investigación responsable del desarrollo de la tecnología. De izquierda a derecha: Ángel López, Miguel Galal, Conrado Rillo, Javier Sesé, Marta Castrillo y Pedro Téllez.

Las nuevas tecnologías desarrolladas en Zaragoza fueron **patentadas en 2010 y licenciadas en 2011**⁶, dando lugar a productos comerciales que, desde 2012, se han instalado en más de 250 laboratorios y hospitales de todo el mundo. Estos sistemas no solo han reducido sustancialmente las pérdidas de helio, sino que han garantizado el funcionamiento de cientos de equipos durante las sucesivas crisis de suministro de helio experimentadas en los últimos años. Como colofón, nos han permitido resolver un problema global: la eliminación completa de impurezas de hidrógeno, que causaban bloqueos en equipos científicos y médicos ocasionando enormes pérdidas económicas.

⁶ La tecnología se desarrolló con la colaboración de la empresa *GWR Instruments* (San Diego), con experiencia en el uso de RC3 para recondensación de vapor en el interior de criostatos. La tecnología se licenció a *Quantum Design International* (QDI), con sede en San Diego y Tokio, y filiales en todo el mundo. Los productos comerciales se desarrollaron en el seno de una colaboración entre Universidad de Zaragoza, CSIC, GWR (como licenciantes) y QDI como licenciada. La empresa aragonesa Integración y Control fabricó componentes y desarrolló software de los equipos comerciales durante los primeros años.

“De Zaragoza a Leiden”

El broche de oro para la tecnología “hecha en Zaragoza” llegó en 2016, coincidiendo con la inauguración del nuevo departamento de criogenia de la **Universidad de Leiden**, donde se había formado el grupo de física de bajas temperaturas de Zaragoza. En un giro poético de la historia, la tecnología desarrollada en Zaragoza se instaló en Leiden, cerrando un círculo de colaboración que comenzó décadas atrás. A la inauguración del nuevo departamento de criogenia de Leiden (Figura 17), a la que fuimos invitados, me acompañaron el **Profesor Domingo González** y el **Dr. Javier Sesé**, co-inventor de las patentes y coautor de las publicaciones que han revolucionado la criogenia del helio y su recuperación en todo tipo de instalaciones científicas y médicas.



Figura 17: Izquierda: Inauguración del Departamento de Criogenia de la Universidad de Leiden. Derecha: Transferencia de Helio líquido desde un ATL160 a un Magneto-encefalógrafo (MEG) de un hospital. El ATL ha estado recuperando el helio evaporado en el MEG directamente, sin necesidad de equipos auxiliares como globos, compresores, bloques de botellas de alta presión o purificadores.

Junto con el **Dr. Sesé**, dirigimos la tesis del **Dr. Miguel Gabal** (2016), miembro del equipo investigador y actual responsable técnico del SLC. En su tesis, el Dr. Gabal presentó las técnicas desarrolladas para recuperar, purificar y licuar helio líquido ultrapuro, libre de hidrógeno ([Gabal, 2017](#)). Este avance no solo ha permitido ahorros económicos significativos, sino que también ha garantizado el desarrollo normal de la investigación en cientos de laboratorios de todo el mundo.

Hoy, los aparatos comerciales inventados en Zaragoza son la base de plantas de recuperación de helio como las que se muestran en la (Figura 18), en instituciones de investigación, líderes a nivel global, y en empresas fabricantes de resonancias magnéticas, y magneto-encefalógrafos para investigación química y diagnóstico médico. Desde laboratorios de investigación hasta

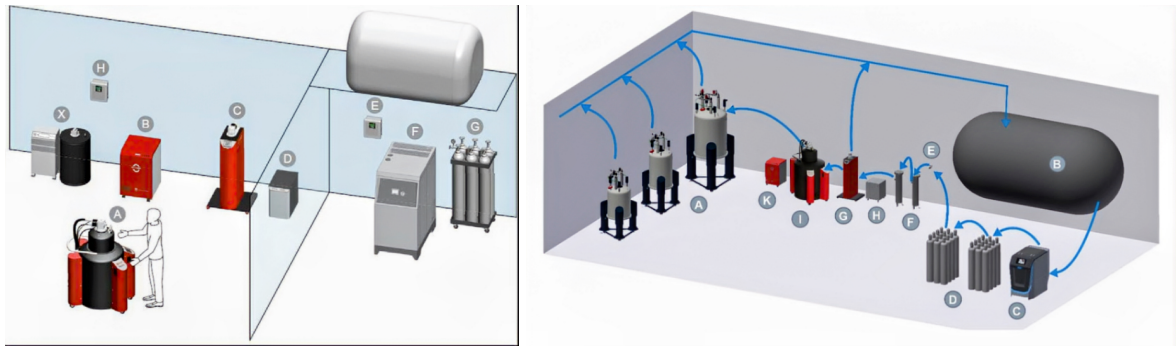


Figura 18: Plantas de recuperación de helio en laboratorios de investigación típicos con diversos instrumentos de bajas temperaturas. Izquierda: Planta HRP diseñada por QDI para varios equipos (X) hasta un consumo de 60 l/día con dos licuefactores ATL160/NexGen160 (A)⁷ y un purificador ATP30 (C). El resto de elementos (H, B, D, E, F y G) son equipos auxiliares. Derecha: Planta HelioSmart diseñada por Bruker para numerosos equipos RMN (A) hasta 60 l/día con dos licuefactores ATL160/NexGen160 (I) y un purificador ATP30 (G). El resto de elementos (B, C, D, E, F, H, K) son equipos auxiliares. Las plantas son escalables de forma que para $N \times 30$ l/día se necesitan N licuefactores y $N/2$ purificadores. Fuente: Información comercial de QDI (izquierda) y Bruker (Derecha).

hospitales, la tecnología desarrollada en Zaragoza ha demostrado que la innovación local puede tener un impacto global.

La historia del helio líquido y la física de bajas temperaturas en Zaragoza es un testimonio del poder de la colaboración internacional y la innovación tecnológica. Desde los primeros licuefactores donados por instituciones extranjeras hasta el desarrollo de tecnologías pioneras que hoy se utilizan en todo el mundo, el grupo de Zaragoza ha demostrado que la ciencia no conoce fronteras.

El broche final de esta historia es la instalación de la tecnología de Zaragoza en la **Universidad de Leiden**, donde todo comenzó para muchos de los pioneros de la criogenia en España. Este círculo virtuoso de colaboración y avance científico es un recordatorio de que, en la ciencia, el progreso es siempre colectivo y el legado perdura más allá de las fronteras y las generaciones.

Continuaremos esta tercera y última etapa del viaje describiendo los dos componentes fundamentales de las nuevas tecnologías de licuefacción, recuperación y purificación de helio desarrolladas en el período 2006–2010, en Zaragoza, y puestas en el mercado a partir de 2012, por la empresa Quantum Design International, con sede central en San Diego.

El primer componente (*hardware*) es un Refrigerador Criogénico de Ciclo Cerrado (RC3) modificado por el fabricante siguiendo nuestras indicaciones, a partir de un modelo comercial muy eficiente.

El segundo componente es un nuevo método y *software*, ideados para producir helio líquido con el primer componente (RC3 comercial modificado). El método se basa en las propiedades

⁷ NexGen es la denominación comercial de la segunda generación de licuefactores ATL.

termodinámicas excepcionales del helio líquido y su vapor en equilibrio, en el entorno de los puntos normal de ebullición y punto crítico.

En los siguientes dos apartados describiré, en primer lugar, las características técnicas del RC3 utilizado para desarrollar la nueva tecnología, y, en segundo lugar, las propiedades excepcionales del helio que nos han permitido idear un método de licuefacción original y muy eficiente frente a todos los desarrollos anteriores.

Refrigerador Criogénico de Ciclo Cerrado (RC3) modificado

Aunque hay distintos tipos de RC3, nos limitaremos a los denominados “Gifford-MacMahon”, inventados y descritos por primera vez en 1960 (Gifford *et al.*, 1960) y mejorados sustancialmente en la última década con modelos comerciales como el RDK-415D de *Sumitomo Heavy Industries (SHI-Cryogenics Group)*. En la Figura 19 vemos un esquema del refrigerador com-

Refrigerador Criogénico de Ciclo Cerrado (RC3)

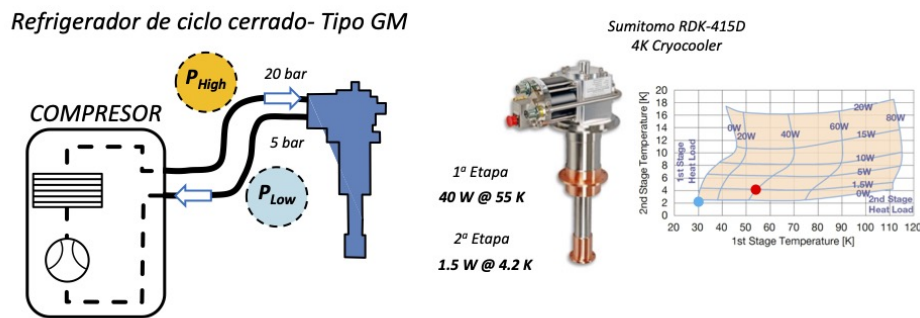


Figura 19: Refrigerador Criogénico de Ciclo Cerrado (RC3). A la izquierda se representa un diagrama del sistema completo. El compresor, que puede estar situado en el laboratorio o en el exterior, comprime de 5 bar hasta 20 bar el helio que vuelve de la cabeza criogénica tras la expansión en los correspondientes volúmenes de expansión de cada etapa. El calor de compresión del helio generado en la cápsula del compresor es absorbido bien por aire con un ventilador o por agua de un circuito cerrado de refrigeración. El compresor está unido a la cabeza criogénica mediante líneas flexibles metálicas que pueden tener longitudes de hasta 20 m para poder situar el compresor alejado del laboratorio. A la derecha se muestra el modelo RDK-415D de cabeza criogénica. Alrededor de los volúmenes de expansión de cada una de las etapas hay unos anillos de cobre preparados para anclar térmicamente los dispositivos a enfriar. Se muestra también el mapa de carga que indica la potencia disponible en cada una de las etapas y las temperaturas de operación correspondientes a esas potencias. Para el caso de enfriar helio hasta su condensación, los puntos “rojo” (punto normal de ebullición, 4,2 K con una potencia de 1,5 W) y “azul” (temperatura mínima alcanzable, 2,5 K con una potencia de 0 W) así como la potencia disponible en la primera etapa durante la condensación, tienen especial interés.

pleto. Consta de un compresor de helio a temperatura ambiente y una unidad de enfriamiento criogénico (cabeza criogénica). Se muestra también la fotografía de una cabeza criogénica, y las curvas de temperatura-potencia de cada etapa, necesarias para desarrollar cualquier aplicación.

Se trata de uno de los modelos actuales con más potencia de refrigeración del mercado, 1,5 W a 4,2 K, aunque existe ya una versión reciente de 2 W a 4,2 K.

Estos sistemas se utilizan normalmente con la cabeza criogénica en el interior de una cámara de vacío con un buen aislamiento térmico con respecto a la temperatura ambiente, minimizando el calor por radiación y por conducción que llega a la cabeza criogénica. El dispositivo que se quiere enfriar se conecta térmicamente al anillo cilíndrico de cobre de la segunda etapa, donde se alcanzan temperaturas de 4,2 K con una carga térmica de hasta 1,5 W, llegando incluso a temperaturas inferiores a 3 K, pero en este caso con cargas térmicas muy pequeñas.

Por otro lado, el anillo de cobre de la primera etapa está conectado térmicamente a la pantalla de radiación de la cámara de vacío donde se lleva a cabo el experimento. Esta conexión permite que el anillo absorba el calor radiante emitido por la pared más externa de la cámara de vacío, la cual se encuentra a temperatura ambiente. En esta etapa se dispone de una potencia de enfriamiento de hasta 40 W a 55 K y en torno a 80 W a 100 K. Estas aplicaciones, que permiten enfriar dispositivos y materiales sin necesidad de usar líquidos criogénicos, están ya muy extendidas en el mercado y se denominan *cryogen free*.

Los RC3 se utilizan también para recondensar el vapor de helio en equilibrio con el líquido en Dewars de helio de distintos tipos de instrumentos. Así se puede conseguir que un equipo científico o médico no precise prácticamente más transferencias de helio que la inicial, y restituir helio líquido evaporado tras una operación de mantenimiento o por pérdidas inevitables. A este tipo de sistemas criogénicos se les denomina sistemas *zero loss*. El gran inconveniente de los sistemas *zero loss* es que se precisa un RC3 para cada equipo, lo que multiplica innecesariamente el consumo eléctrico y el mantenimiento. Finalmente hay que tener en cuenta la complejidad de instalar la cabeza criogénica del RC3 en el instrumento, y, las posibles interferencias, tanto electromagnéticas como por vibraciones mecánicas, que esta puede producir. Aunque hay más aplicaciones para los RC3, estas dos, *cryogen free* y *zero loss* son las más frecuentes y extendidas.

Internamente la cabeza criogénica dispone de un cilindro móvil dentro del cual hay un material de alta capacidad calorífica en la región de temperaturas en la que va a trabajar el refrigerador. El ciclo termodinámico del circuito interior del RC3 consta de las siguientes fases Figura 20 (Barron, 1985):

1. a) Compresión isotérmica: La cabeza criogénica está conectada al lado de alta presión (P_H) del compresor, por lo que todo el volumen interior se presuriza.

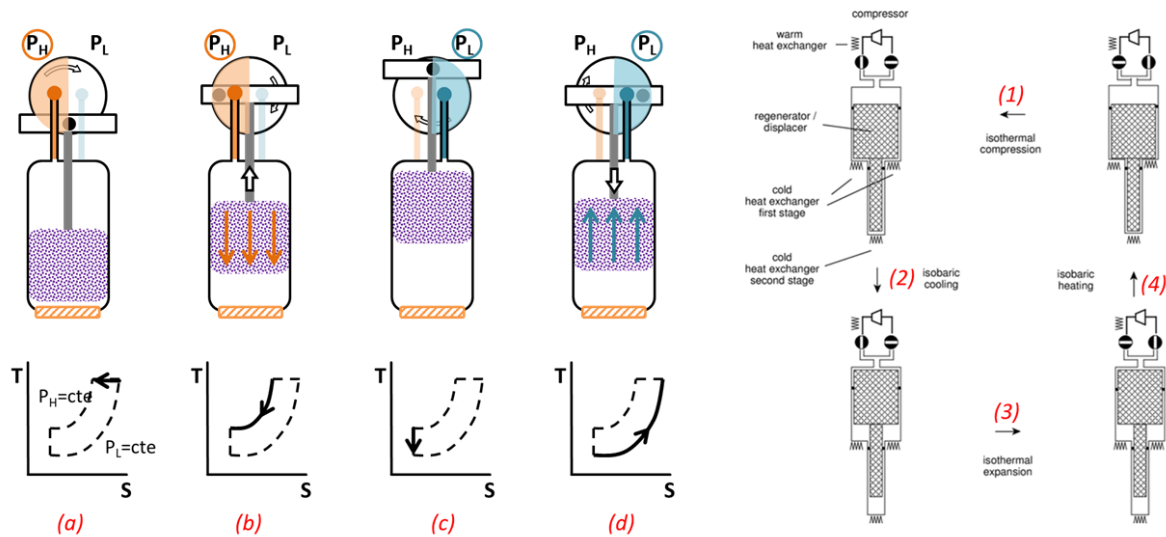


Figura 20: Izquierda: Cuatro pasos de un ciclo GM. El material regenerador se encuentra dentro del desplazador (cuadrado morado), movido por un mecanismo de yugo escocés. La válvula rotativa cambia la línea de presión conectada cada medio período, (a) y (b) línea de alta presión activa (naranja), (c) y (d) línea de baja presión activa (azul). Los gráficos muestran la trayectoria de una unidad de masa en la región fría del fluido de trabajo en el diagrama T-S (compresión isotérmica, enfriamiento isobárico, expansión isentrópica y calentamiento isobárico). Derecha: Esquema de un RC3 de dos etapas. Se muestra el compresor, las válvulas que conmutan las líneas de alta y baja presión durante el ciclo, los regeneradores de cada etapa dentro de sus respectivos cilindros desplazadores. Los puntos fríos de cada una de las etapas están también indicados. El paso de (3) a (4) se corresponde con el paso 1 del ciclo GM. El paso de (4) a (1) se corresponde con el paso 2 del ciclo GM, el paso de (1) a (2) se corresponde con el paso 3 del ciclo GM cuando hay carga térmica (expansión isotérmica), y el paso de (2) a (3) es el paso 4 de calentamiento isobárico del ciclo GM.

2. De (a) a (c) Enfriamiento isobárico: El desplazador asciende mientras la cabeza fría está conectada al lado de alta presión (P_H) del compresor. El gas es forzado a pasar por el regenerador (indicado por las flechas en la Figura 20 (b) y se enfría, dado que este ha sido enfriado por el gas frío del ciclo anterior. En este proceso aumentará la densidad del gas, por lo que algo de gas adicional fluirá desde el lado de alta presión del compresor para mantener una presión constante (P_H).

3. (c) Expansión isentrópica: Con el desplazador en la parte superior del cilindro, se conecta el lado de baja presión (P_L) del compresor. Parte del gas fluye a través del regenerador hacia el lado de baja presión del compresor. Se produce la expansión del gas. El gas que está en la parte inferior del espacio de expansión (región fría) realiza trabajo para expulsar el gas que sale durante este proceso, por lo que se extrae energía en forma de trabajo (Barron, 1985). Esto causa una reducción de la temperatura del gas en la parte inferior del espacio de expansión. Durante esta fase del ciclo se produce la potencia de enfriamiento útil.

4. De (c) a (a) Calentamiento isobárico: El desplazador se mueve hacia abajo mientras la cabeza fría sigue conectada al lado de baja presión del compresor. El movimiento produce el

desplazamiento y calentamiento del gas de abajo hacia arriba y enfría el regenerador. Al final de este paso, el ciclo se cierra y el paso 1 se repite. .

El paso 3 se puede describir como una expansión isotérmica dado que el intercambiador de calor del punto frío (anillo de cobre) no está aislado y está conectado a una carga térmica (aplicación). Por lo tanto, el calor se extrae de la aplicación.

La extracción de calor del sistema al foco caliente se realiza a temperatura ambiente en el intercambiador de calor del compresor, mediante un circuito de agua o mediante aire (ventilador).

En cuanto al regenerador, se trata de una matriz de material sólido poroso, que debe tener una alta capacidad calorífica, un buen contacto térmico con el gas y, al mismo tiempo, debe presentar baja impedancia para el paso del helio (Waele, 2011).

En la primera etapa se utiliza habitualmente una malla de cobre.

En la segunda etapa el plomo fue el material históricamente utilizado como regenerador debido a su alta capacidad calorífica volumétrica a bajas temperaturas. Sin embargo, la temperatura más baja alcanzable con un criorefrigerador GM de dos etapas en este caso es de 8 K, ya que la capacidad calorífica específica del plomo es baja en comparación con la del helio por debajo de 10 K.

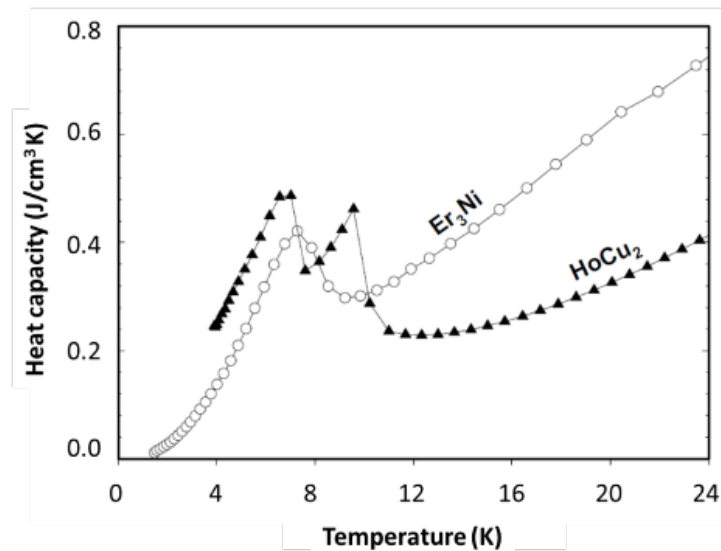


Figura 21: Dependencia con la temperatura del calor específico volumétrico de Er₃Ni y HoCu₂ (Waltenberg, 2015).

El descubrimiento de la elevada capacidad calorífica debido a transiciones de fase magnéticas de los materiales de tierras raras por debajo de 10 K (Figura 21), permitió el desarrollo de criorefrigeradores con una potencia de enfriamiento significativa a temperaturas de helio líquido. Destacan los casos del Er₃Ni y el HoCu₂ (Gschneidner, 2002).

El Pb, considerado material peligroso para la salud, aunque aporta una elevada capacidad calorífica entre 10 K y 30 K se está sustituyendo por Bi, manteniendo las prestaciones de potencia de 1,5 W a 4,2 K en la cabeza criogénica. El gas caliente que entra al inicio del ciclo transfiere calor a la matriz del regenerador, enfriándose en el proceso. Durante la primera mitad del ciclo, el calor se almacena en la matriz debido a su alta capacidad calorífica. En la segunda mitad, el gas frío, que regresa después de la expansión, fluye en dirección opuesta por el mismo canal, recupera el calor de la matriz, se calienta y devuelve la matriz a su temperatura inicial antes de que el ciclo se repita. En equilibrio, un extremo del regenerador mantiene la temperatura ambiente, mientras que el otro alcanza la temperatura fría (ter Brake y Radebaugh, 2016).

La innovación clave de la tecnología desarrollada en Zaragoza, en relación al primer componente (el RC3 “modificado”), radica en un enfoque revolucionario para enfriar el helio gas y licuarlo. En lugar de usar un intercambiador clásico, donde el gas circula por un tubo en espiral alrededor de la cabeza criogénica, se propone un **intercambio directo**: el gas se pone en contacto directo con toda la superficie de la cabeza criogénica, maximizando la transferencia de calor.

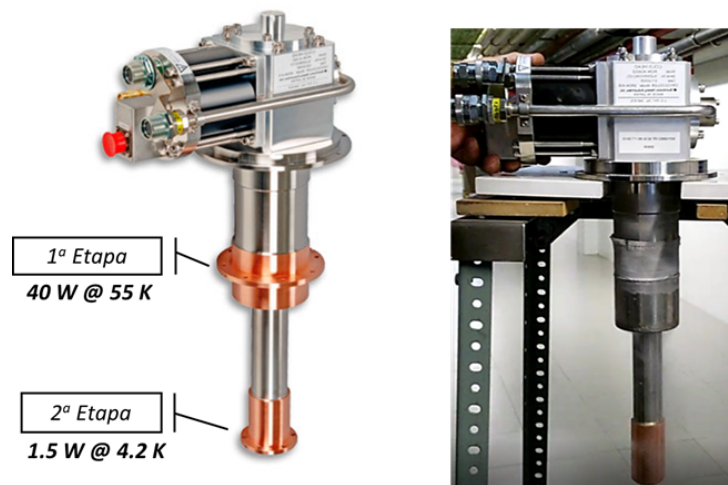


Figura 22: Izquierda: Cabeza criogénica comercial del modelo de RC3 RDK-415D de *SHIcryogenics*. Derecha: Misma cabeza criogénica modificada (según diseño propio) para la licuefacción óptima de helio. Nótese la eliminación del anillo de cobre en la primera etapa y la reducción de espesor del anillo de cobre de la segunda etapa.

La cabeza criogénica se ubicará en el cuello de un Dewar de helio diseñado específicamente para reducir al mínimo las pérdidas de calor por radiación y conducción, incluso cuando la cabeza esté inactiva. Este diseño aumenta la eficiencia, ya que se aprovecha toda la superficie externa de la cabeza criogénica para extraer potencia fría, y no solo los volúmenes de expansión o los “dedos fríos” (donde están los anillos de cobre) de las dos etapas. Además, al eliminar el intercambiador tradicional, se libera toda la sección libre del cuello del Dewar, optimizando el espacio disponible. Por esta razón, este método se denomina **intercambio directo**.

Al no emplear un intercambiador tradicional, prescindiremos del anillo de cobre de la primera etapa y minimizaremos al máximo el de la segunda etapa (Figura 22). Sin embargo, este último no puede eliminarse por completo, ya que actúa como pieza de cierre soldada al cilindro de acero inoxidable de la segunda etapa.

Finalmente, al producir y almacenar el líquido directamente en el Dewar cuyo cuello alberga la cabeza criogénica, eliminamos la necesidad de transferirlo previamente a un Dewar de transporte antes de introducirlo en el equipo científico o médico, simplificando así el proceso.

Propiedades termodinámicas excepcionales del helio a bajas temperaturas

La tecnología de licuefacción desarrollada en Zaragoza está basada en **características específicas, únicas y excepcionales del helio líquido**, exclusivas de su carácter de fluido cuántico.

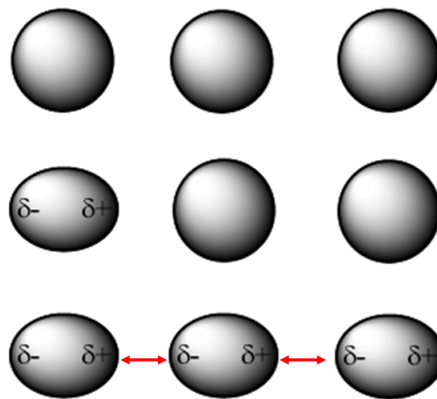


Figura 23: Recreación de las fuerzas de interacción de London. En la parte superior tres átomos de helio, con su nube de carga electrónica perfectamente esférica, no interaccionan. En el centro, el átomo de la izquierda adquiere un dipolo eléctrico instantáneo, fruto de una fluctuación cuántica de la densidad de carga electrónica (dipolo inducido). Abajo, ese dipolo instantáneo induce otro dipolo de forma que la fluctuación del primer átomo se propaga. Las fuerzas de London (dipolo inducido-dipolo inducido) disminuyen con la sexta potencia de la distancia y son tanto más débiles cuanto menor es el número atómico. Así, estas fuerzas, en el caso del helio son inferiores a 1 meV (11 K) por lo que, a presión atmosférica, es necesario reducir la temperatura hasta 4,2 K para que el helio condense y se forme la fase líquida.

El helio líquido es un fluido cuántico. Las fuerzas interatómicas en el helio líquido son fuerzas de dispersión de London, que son las fuerzas de van der Waals más débiles que se conocen. Estas fuerzas surgen debido a fluctuaciones cuánticas en la distribución de la nube de carga electrónica alrededor de los núcleos atómicos. Aunque los átomos de helio son eléctricamente neutros, las fluctuaciones cuánticas pueden crear dipolos eléctricos instantáneos que inducen dipolos a su alrededor. El proceso es el siguiente:

- **Dipolos instantáneos:** En un átomo de helio, la nube de electrones no está estática, sino que fluctúa debido al principio de incertidumbre de Heisenberg. Estas fluctuaciones generan momentos dipolares eléctricos instantáneos.

- **Interacción entre dipolos:** Cuando un átomo adquiere un dipolo instantáneo, induce un dipolo en un átomo vecino. Esta interacción entre dipolos fluctuantes es la base de las fuerzas de dispersión de London. En el caso del helio estas fuerzas se ponen de relieve cuando la energía térmica es del orden de 1 meV, es decir, a temperaturas de unos pocos K. El helio líquido se debe exclusivamente a este tipo de interacción intermolecular (Figura 23).

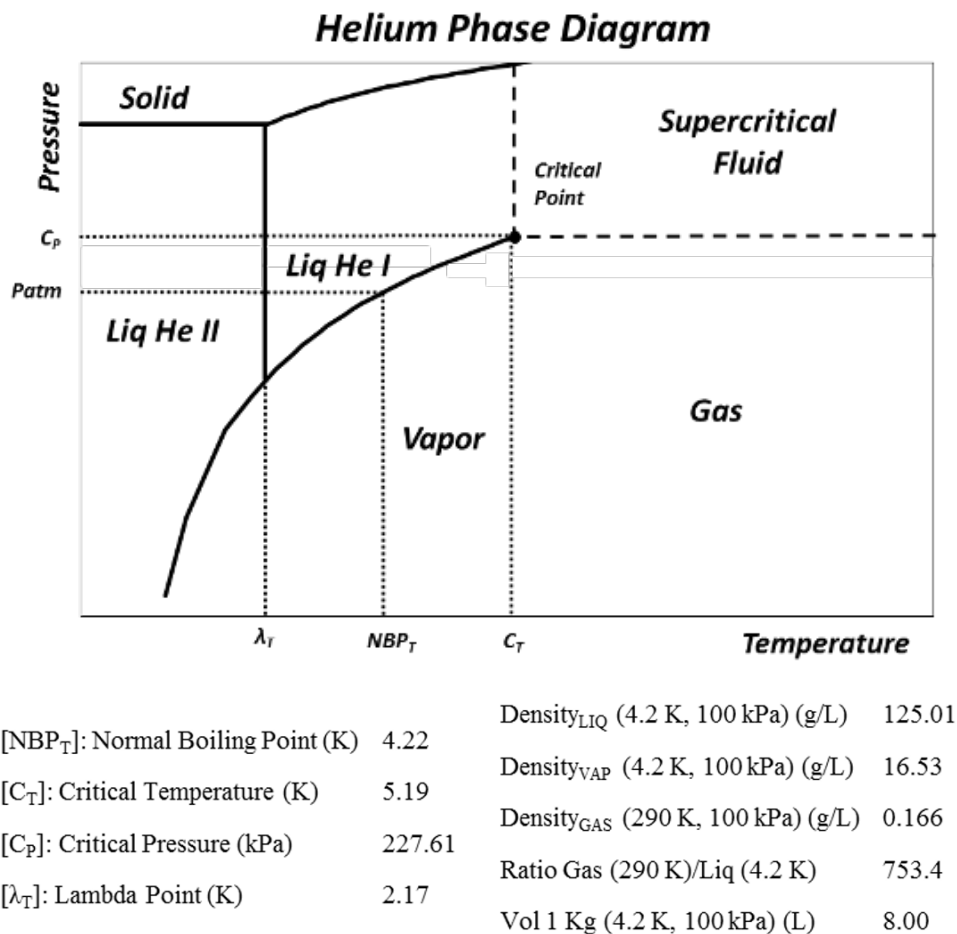


Figura 24: Diagrama $P - T$ de fases del helio a V constante. Arriba diagrama completo mostrando las regiones de Gas, Vapor y Fluido Supercrítico a la derecha, y a la izquierda las regiones de Helio I, Helio II superfluido (líquidos) y la fase sólida por encima de 25 bar. Debajo se dan los valores numéricos de presión, temperatura y densidades (Lemmon *et al.*, 2013). La región de interés para la licuefacción usando RC3 es, en temperatura, la comprendida entre $T = 2, 5$ K que es la temperatura base típica que alcanza un RC3 de dos etapas, y, temperatura ambiente, y, en presión, la región entre presión atmosférica y el punto crítico ($1 \text{ bar} < P < 2, 3 \text{ bar}$). La región de interés para la purificación incluye las presiones por debajo de presión atmosférica, dado que las impurezas tendrán siempre presiones parciales muy inferiores a presión atmosférica.

Por ello el helio líquido presenta un diagrama de fases muy especial, con ausencia de fase sólida a presiones normales, incluso a 0 K. De hecho, el estado sólido del helio solo es posible

a presiones superiores a 25 bar (Figura 24). Pero más interesante y relevante para la aplicación que queremos desarrollar es que el **punto crítico (2,3 bar, 5,2 K) está a tan solo poco más de una atmósfera (+1, 3 bar) sobre presión atmosférica y a +1 K sobre el punto normal de ebullición (1,0 bar, 4,2 K)**. Todo ello es consecuencia de la mencionada naturaleza cuántica del helio líquido

Tanto para la aplicación de producción de líquido como para la purificación de helio gas recuperado, que veremos en detalle más adelante, nos limitaremos a explotar al máximo las propiedades termodinámicas del helio en la zona a la derecha del punto normal de ebullición (NBP) (Figura 24). Más concretamente, para la licuefacción, la zona de interés es la que se encuentra por encima de presión atmosférica. Un licuefactor debe trabajar siempre a presión ligeramente positiva para evitar posibles entradas de aire en ciertas maniobras.

Sin embargo, las posibles impurezas que acompañen al helio que va a ser licuado, y que antes hay que eliminar, tendrán siempre concentraciones pequeñas y por tanto presiones parciales varios órdenes de magnitud inferiores a presión atmosférica. Por tanto, para la purificación, utilizaremos fundamentalmente la zona del diagrama de fases por debajo de presión atmosférica. Como veremos, cuando tratemos la purificación de helio, incluiremos en el diagrama de fases $P - T$ a volumen constante, las líneas de equilibrio vapor-sólido de cada una de las impurezas que puedan acompañar al helio.

Pero analicemos primero la zona del diagrama de fases $P - T$ a V constante, de interés para la licuefacción del helio (Figura 25). Se trata de producir helio líquido por intercambio directo del gas con la cabeza criogénica de un RC3. Hemos incluido los puntos normales de ebullición (A) y el punto crítico en la línea de saturación (P_C), y, las líneas de densidad constante del líquido y del vapor, partiendo en ambos casos del valor en el punto normal de ebullición a presión atmosférica (A), del valor en un punto intermedio (B), y del valor en el punto crítico (P_C).

Vemos que el helio líquido a presión atmosférica tiene una densidad de unos 125 g/l (extraordinariamente pequeña para un líquido), mientras que el vapor tiene una densidad de unos 17 g/l (extraordinariamente grande para un gas), de forma que el cociente es muy pequeño, del orden de 7. Para cualquier otro líquido ese cociente es uno o más órdenes de magnitud superior. Por ejemplo, para el hidrógeno el cociente es 53 y para el nitrógeno el cociente es 175. Esto es consecuencia del carácter cuántico del helio líquido, es decir, de la debilidad de las fuerzas interatómicas y de la cercanía entre el punto normal de ebullición y el punto crítico.

En el caso de los líquidos clásicos, la pendiente de la curva $P(T)$ a densidad constante en la fase de vapor, cerca del punto normal de ebullición, es mucho menor que la del líquido.

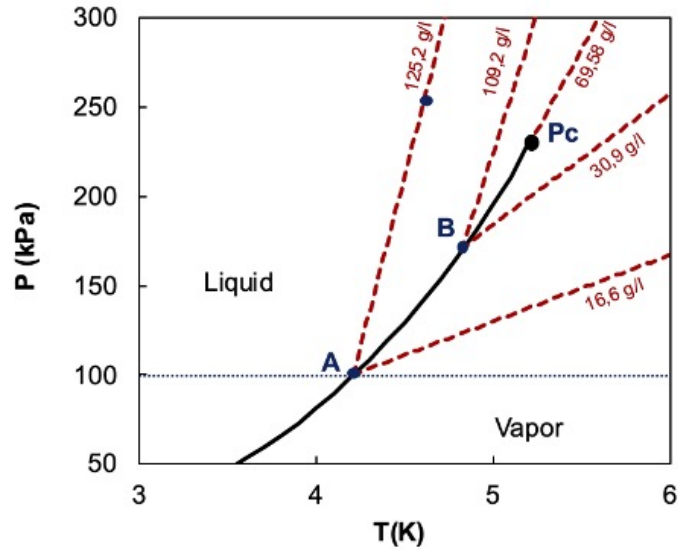


Figura 25: Diagrama $P - T$ a V constante. Región entre el punto normal de ebullición (A) y el punto crítico (P_C). La línea curva negra continua es la línea de saturación Líquido-Vapor. Las líneas rojas discontinuas son líneas de densidad constante del vapor y del líquido. Se han trazado líneas de densidad constante desde A (punto normal de ebullición (4,2 K–1,0 bar) donde el líquido tiene una densidad de 125,2 g/l y el vapor 16,6 g/l), desde B (un punto intermedio (4,8 K–1,7 bar) donde las densidades del líquido y del vapor son 109,2 g/l y 30,9 g/l, respectivamente), y, desde el punto crítico P_C (5,3 K, 2,3 bar) donde el vapor y el líquido son indistinguibles y la densidad es de 69,58 g/l) (Lemmon *et al.*, 2013).

Esto indica que la densidad del vapor es significativamente más baja que la del líquido. En la Figura 26 se ilustran los ejemplos del hidrógeno (H_2) y el nitrógeno (N_2) en las proximidades de sus puntos normales de ebullición: (H_2 : 100 kPa, 20,28 K) y (N_2 : 100 kPa, 77,36 K), ambos muy alejados de sus respectivos puntos críticos (H_2 : 1290 kPa, 33,18 K) y (N_2 : 3390 kPa, 126,19 K), no representados por estar fuera de la escala de las respectivas gráficas.

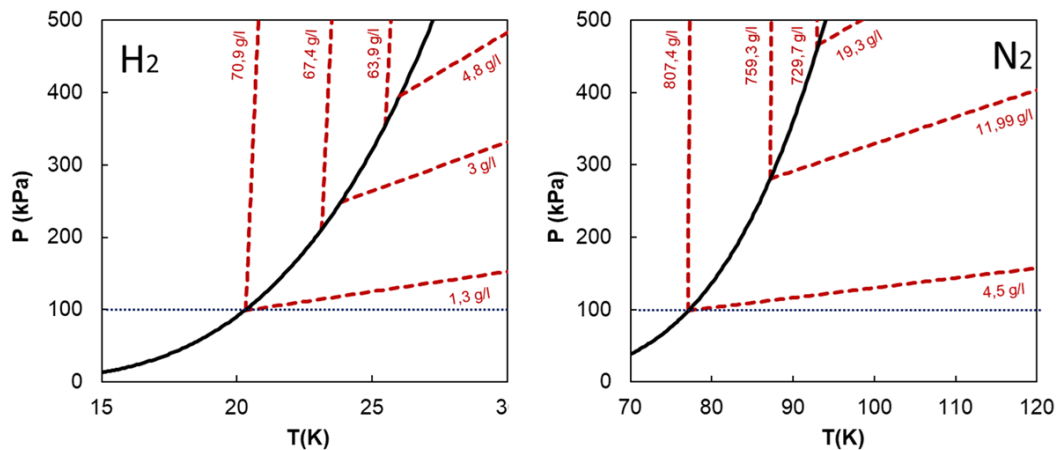


Figura 26: Izquierda: Línea de saturación Líquido-Vapor del hidrógeno (H_2) y líneas de densidad constante por encima del punto normal de ebullición a 100 kPa. El punto crítico del H_2 es $P_C = 1290$ kPa (12,9 bar), $T_C = 33,18$ K, fuera de la escala de la gráfica. Derecha: Línea de saturación Líquido-Vapor del nitrógeno (N_2) y líneas de densidad constante por encima del punto normal de ebullición. El punto crítico del N_2 es $P_C = 3390$ kPa (33,9 bar), $T_C = 126,19$ K, fuera de la escala de la gráfica. Obsérvese que las líneas de densidad constante en la zona de líquido para el hidrógeno y, sobre todo para el nitrógeno, son prácticamente verticales. (Lemmon *et al.*, 2013).

El hecho de que la densidad del helio líquido en su punto normal de ebullición sea solo 7 **veces mayor** que la del vapor representa una gran ventaja a la hora de diseñar el método más eficiente para producir líquido a partir de vapor. Esta ventaja se explica detalladamente con la ayuda de la Figura 27.

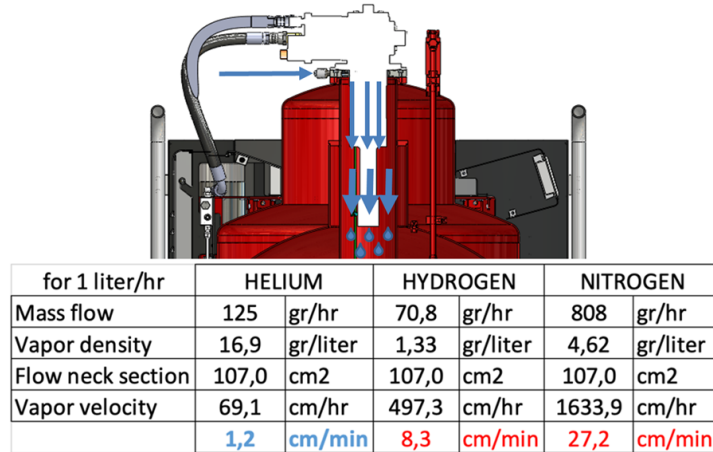


Figura 27: Cálculo de la velocidad del helio en la zona de condensación de un RC3 colocado en el cuello de un Dewar. Al enfriarse el helio gas del cuello, por contacto directo con la cabeza criogénica del RC3, a P y T constantes, se produce un flujo de gas (dm/dT) hacia el interior del Dewar. Las flechas azules en la figura indican el flujo de helio por el cuello del Dewar hacia el interior del mismo y su grosor representa cualitativamente la densidad, que aumenta de forma continua hasta que, en la zona de condensación, para un proceso a presión atmosférica, pasa de 17 g/l a 125 g/l formándose las gotas de líquido. La sección efectiva para el paso de helio por el extremo inferior de la cabeza criogénica fue, en este experimento concreto, de unos 107 cm². Esto tiene como consecuencia que la velocidad del vapor a lo largo de los 5 cm de longitud del anillo de cobre de la segunda etapa, en cuyo interior está la cámara de expansión a 4,2 K, es, para una producción típica de 1 l/h de líquido, del orden de 1 cm por minuto. Por comparación se muestra la velocidad, mucho mayor, que tendría el vapor de hidrógeno (8 cm/min) y el de nitrógeno (27 cm/min) al licuarlos en sus respectivos puntos normales de ebullición (20 K y 78 K respectivamente).

Así, podemos calcular la velocidad del vapor de helio en el cuello de un Dewar donde hemos introducido una cabeza criogénica, para una tasa de licuefacción de 1 l/h a presión atmosférica. Para un caso típico concreto, con una sección efectiva para la circulación del helio en la zona de condensación de 107 cm², la velocidad del vapor de helio justo antes de condensar, es de 1,2 cm/min. Como el anillo cilíndrico de cobre del dedo frío tiene 5 cm de longitud, el vapor de helio, para una tasa de licuefacción típica de 1 l/h, a presión atmosférica, estará 5 minutos en la zona de condensación (Figura 27). Esto implica que el helio va a tener tiempo suficiente para estratificarse en temperatura a lo largo del cuello del Dewar, adquiriendo el perfil de temperatura de la cabeza criogénica y haciendo absolutamente innecesario el uso de intercambiadores

En resumen, el uso de un intercambiador o cualquier intento de aumentar la superficie de condensación añadiendo elementos alrededor de la cabeza criogénica del RC3 (Figura 28), reducirá la sección efectiva de flujo del vapor en la zona de condensación.

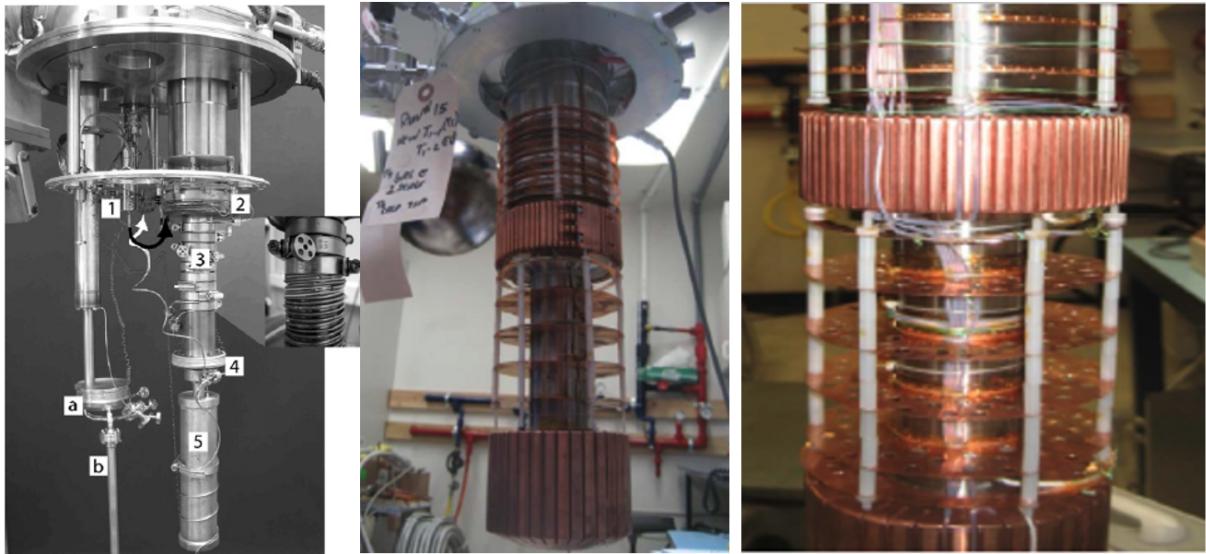


Figura 28: Estado del arte previo a la tecnología desarrollada en Zaragoza. Izquierda: La cabeza criogénica en una cámara de vacío (Schmidt-Wellenburg, 2006). El helio se hace circular por un tubo en espiral alrededor de la primera etapa (2) y de la segunda etapa (3-4). El líquido producido se almacena en un pequeño recipiente sellado (5) bajo la segunda etapa de la cabeza criogénica. Derecha: Se colocan diversos tipos de bloques de cobre en torno a las dos etapas de la cabeza criogénica, además de pantallas de radiación. Todos estos elementos añadidos en torno a la cabeza criogénica reducen la sección efectiva para el flujo de helio y añaden una carga térmica importante. El uso de intercambiadores reduce la sección efectiva de flujo de helio a unos pocos centímetros en el mejor de los casos (por ejemplo, cinco espiras de tubo de 1 cm de diámetro interior).

Por ello, la tecnología desarrollada en Zaragoza, dejando al helio fluir en toda la sección disponible alrededor de la cabeza criogénica, resulta extraordinariamente eficiente. Por otra parte, el sistema es mucho más sencillo. Se elimina el uso de intercambiadores. Se elimina el anillo de cobre de la primera etapa permitiendo reducir el diámetro del cuello del Dewar. Se reduce al máximo el anillo de cobre de la segunda etapa lo que aumenta la sección por la que fluye el vapor helio en la zona de condensación. En resumen, un gran aumento de eficiencia con el sistema más simple posible: una cabeza criogénica “desnuda” en el cuello de un Dewar (Figura 29).

Otra característica clave es que la entalpía del helio disminuye más rápidamente a medida que aumenta la presión. Además de la innovación de realizar un intercambio directo del helio con la cabeza criogénica, podemos aprovechar esta propiedad termodinámica para mejorar aún más la eficiencia del proceso de licuefacción.

La velocidad a la que disminuye la entalpía del helio durante el enfriamiento está determinada por la segunda derivada de la entalpía H en función de la presión P , el volumen V y la temperatura T . En el caso del helio, que se comporta como un gas ideal por encima de su temperatura crítica:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial T^2} = \frac{2PVh_0}{RT^3}$$

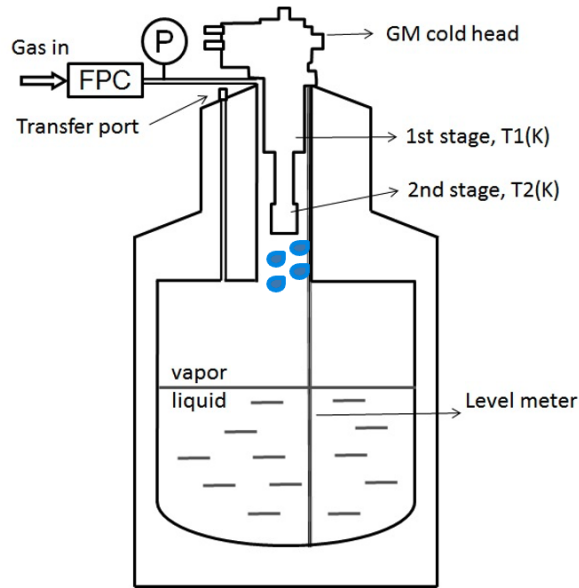


Figura 29: Diagrama del licuefactor: consiste en un Dewar de helio con la cabeza criogénica “desnuda” en el cuello (ver Figura 22 Derecha). Un sistema de regulación de presión y medida de flujo másico, para el control de la presión constante durante la licuefacción, y, para la medida del flujo de gas hacia el interior del Dewar. Termómetros en cada una de las etapas (solo necesarios para diagnóstico) y el medidor de nivel. Además estos últimos son accesorios prescindibles, dado que el flujo de gas en función del tiempo contiene toda la información del estado del proceso de licuefacción.

donde h_0 es la referencia elegida para la entalpía específica a $T = 0$ K. Dado que el volumen V del Dewar es constante, un aumento en la presión de licuefacción (que también se mantiene constante durante el proceso) acelera la disminución de la entalpía a medida que la temperatura desciende. Por lo tanto, al incrementar la presión, se reduce el tiempo necesario para que el helio gas experimente el cambio de entalpía desde 1574 J/g a 300 K hasta 10 J/g en estado líquido a $4,2$ K. Esto se debe a que la potencia de enfriamiento de los refrigeradores criogénicos (RC3) aumenta con la temperatura.

Cerca de la temperatura crítica, esta tendencia se mantiene. De hecho, la expresión anterior adopta la forma:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial T^2} \approx -\frac{2PVC_0 T_c}{RT^3} \left(\frac{T - T_c}{T_c} \right)^{-\alpha}$$

donde α es el exponente crítico (aproximadamente $0,1$ para fluidos simples como el helio) y C_0 es una constante. Esto refleja las fluctuaciones críticas y la singularidad termodinámica en el punto crítico.

Dada la proximidad al punto crítico y el hecho de que la entalpía disminuye más rápidamente a presiones más altas, al utilizar una presión de licuefacción ligeramente superior a la presión crítica, el helio se densifica de manera continua y se enfría mucho más rápido que a presión

normal. Este proceso ocurre sin una transición de fase abrupta, hasta alcanzar la línea de densidad constante correspondiente al punto normal de ebullición.

Una vez alcanzada esta línea de densidad constante, el Dewar contiene toda la masa de helio que cabría a 4,2 K y 1 bar, pero a una presión y temperatura más altas (en estado de fluido supercrítico pero con la misma densidad del punto normal de ebullición). En ese momento, se puede cerrar el flujo de gas, de modo que toda la potencia de la segunda etapa se utilice para reducir la temperatura y la presión del fluido supercrítico a lo largo de la línea de densidad constante, hasta alcanzar el punto normal de ebullición (Figura 30).

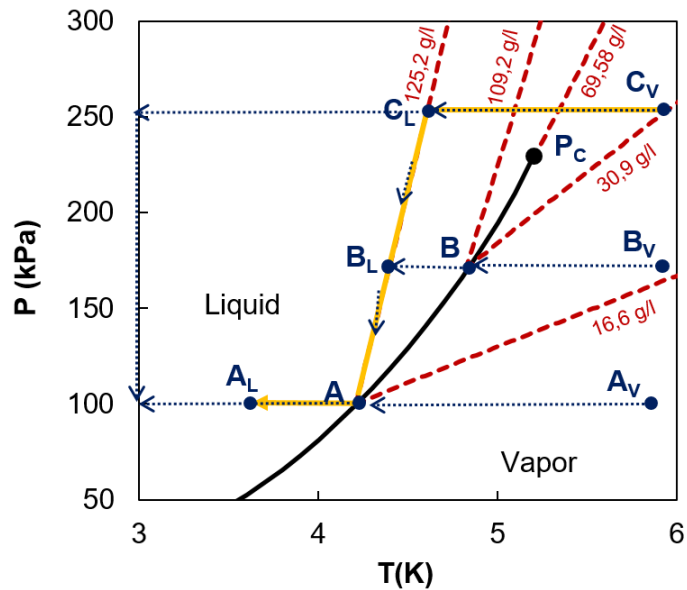


Figura 30: Distintas trayectorias de licuefacción de helio en un diagrama $P - T$ a V constante. Trayectoria $A_V \rightarrow A \rightarrow A_L$ a presión ligeramente superior a la atmosférica. Trayectoria $B_V \rightarrow B \rightarrow B_L \rightarrow A \rightarrow A_L$ a presión intermedia entre el punto normal y el crítico. Trayectoria $C_V \rightarrow C_L \rightarrow A \rightarrow A_L$ por encima del punto crítico, sin transición de fase. Trayectoria $C_V \rightarrow C_L \rightarrow C_L(3\text{ K}) \rightarrow A_L(3\text{ K})$ por encima del punto crítico, sin transición de fase, hasta llegar a líquido subenfriado a 3 K. En este caso la presión de 2,5 bar se reduce instantáneamente a 1 bar en el momento de hacer la transferencia, dado que esa presión elevada es la del pequeño volumen de vapor en el cuello del Dewar, alrededor de la cabeza criogénica. En la figura se ha representado también una trayectoria a una presión intermedia de 1,7 bar (trayectoria $B_V \rightarrow B \rightarrow B_L \rightarrow A \rightarrow A_L$) (Gabal, 2017).

Alternativamente, se puede mantener abierta la entrada de gas para seguir densificando el fluido supercrítico, alcanzando una línea de densidad hasta un 20 % mayor que la correspondiente al punto normal de ebullición. Al conectar la línea de transferencia para trasvasar el líquido a un equipo, la presión del vapor en el cuello del Dewar disminuirá casi instantáneamente hasta el valor programado para la presión de transferencia, ligeramente superior a la del equipo de destino y, por tanto, cercana a la presión atmosférica. De esta manera, se obtiene rápidamente una masa de líquido subenfriado (a una temperatura inferior a 4,2 K) a presión atmosférica. Este líquido, muy denso y sin hervir, puede llegar a ser hasta un 20 % mayor que la masa del

mismo volumen de líquido en condiciones normales. Las transferencias de helio subenfriado son extremadamente eficientes, ya que apenas se produce evaporación durante el proceso.

En la Figura 30 vemos la trayectoria $C_V \rightarrow C_L \rightarrow B_L \rightarrow A \rightarrow A_L$ que resulta ser hasta un 100 % más eficiente que los resultados conseguidos en sistemas con intercambiadores. Además, como se acaba de mencionar, el líquido en A_L está subenfriado (no hierve a pesar de estar a presión atmosférica) y su transferencia a los equipos de investigación y médicos se realiza con mucha mayor rapidez y sin apenas evaporación de helio. De hecho, apenas se aprecia la nube de condensación de vapor de agua típica que produce el vapor de helio evaporado cuando dejamos la salida del Dewar libre a la atmósfera, como se puede apreciar en la Figura 31.



Figura 31: Izquierda: Transferencia de helio subenfriado desde un ATL80 a un Dewar de transporte. Derecha: Detalle de la salida de gas evaporado. No se observa condensación de vapor de agua del aire debido a que el helio que se transfiere está subenfriado y la cantidad que se evapora durante la transferencia es muy pequeña. Tan solo produce condensación en la válvula metálica de salida de gas, pero no produce condensación de vapor de agua del aire como es habitual cuando se transfiere helio en el punto normal de ebullición. De hecho, normalmente, una llamativa nube de vapor de agua, totalmente ausente en este tipo de transferencias de helio subenfriado, asciende arrastrada por el vapor de helio evaporado durante la transferencia.

En los siguientes capítulos se describen en detalle las técnicas de licuefacción, recuperación y purificación desarrolladas a partir de estas ideas fundamentales. Como se ha mencionado, estas ideas se basan en las propiedades excepcionales del helio cerca de su punto normal de ebullición y su punto crítico, que están muy próximos entre sí, así como en descubrimientos inesperados como la producción de helio líquido subenfriado a presión atmosférica. Las nuevas técnicas han permitido la creación de equipos comerciales que duplican la eficiencia de la tecnología anterior utilizando el menor número de componentes posible.

Estos equipos comerciales incorporan innovaciones significativas respecto a cualquier tecnología previa, como la producción de helio líquido subenfriado y su almacenamiento indefinido en el Dewar hasta que sea necesario transferirlo. En otras palabras, la producción se ajusta dinámicamente al consumo, lo que garantiza que los círculos representados en la Figura 15 tengan

ahora el mismo tamaño, es decir, el consumo es igual a la producción, $q(1/h) = Q(1/h)$, y, por otra parte, que las pérdidas se reduzcan prácticamente al 0 %.

Tecnología Avanzada de Licuefacción de helio: ATL-ATLi.

Aun cuando los RC3 se diseñaron para trabajar en vacío, durante las últimas dos décadas, se han estado aplicando también a presión atmosférica o superior para la licuefacción de helio. Pero los prototipos y métodos publicados eran complejos y poco eficientes. Teniendo en cuenta que el calor latente del helio es 21 J/g, con una potencia de 1,5 W a 4,2 K se podrían condensar 2 l/h de líquido. Sin embargo, con la cabeza criogénica en vacío y utilizando intercambiadores, el mejor resultado fue de 0,5 l/h. Utilizando una combinación de bloques de condensación e intercambiadores se alcanzaron 0,75 l/h. El simple hecho de prescindir de intercambiadores, eliminar el anillo cilíndrico de cobre de la primera etapa, y minimizar el de la segunda etapa, nos ha permitido duplicar el mejor resultado previo, con el sistema denominado comercialmente Advanced Technology Liquefier (ATL). Mediante una innovación adicional, totalmente disruptiva, el modelo que hemos denominado ATLi ha permitido alcanzar los 2 l/h calculados teóricamente. Esto es, una eficiencia del 100 %.

ATL

La Tabla 1 resume los datos de tasa de licuefacción (Liquefaction Rate “LR(1/h)”) disponibles en la literatura, obtenidos utilizando diferentes tipos de cabezales fríos y configuraciones de intercambiadores de calor: (Nagao *et al.*, 1990; Kuriyama *et al.*, 1992; Thummes *et al.*, 1998; Wang, 2001; Schmidt-Wellenburg, 2006; Wang, 2009; Rillo *et al.*, 2015).

Tabla 1: Tipo de cabezal frío y referencia. Tipo de intercambiador y valores de LR. He-Vacuum: Tubo de intercambiador de calor para gas de entrada alrededor del cabezal frío en vacío. *Condenser*: Estaciones de refrigeración conectadas a las etapas del cabezal frío y un condensador (cabezal frío en contacto con el vapor). *Direct*: cabezal frío en contacto directo con el vapor. Tasas de licuefacción de helio de sistemas basados en RC3 descritos en la literatura, y, del sistema desarrollado en Zaragoza.

<i>Coldhead Type [REF]</i>	<i>EXCHANGE</i>	<i>LR (l/h)</i>
Gifford-McMahon (Nagao <i>et al.</i> , 1990)	<i>He-Vacuum</i>	0.010
Gifford-McMahon (Kuriyama <i>et al.</i> , 1992)	<i>He-Vacuum</i>	0.050
Pulse Tube (Thummes <i>et al.</i> , 1998)	<i>He-Vacuum</i>	0,127
Pulse Tube (Wang, 2001)	<i>He-Vacuum</i>	0,200
Gifford-McMahon (Schmidt-Wellenburg, 2006)	<i>He-Vacuum</i>	0,542
Pulse Tube (Wang, 2009)	<i>Condenser</i>	0,750
Gifford-McMahon (Rillo <i>et al.</i> , 2015)	<i>Direct</i>	1,450

En lugar de emplear intercambiadores de calor o condensadores tradicionales, la tecnología desarrollada en Zaragoza aprovecha las propiedades únicas del helio, operando a una presión ligeramente elevada (cercana o incluso superior a la presión crítica). Esto permite extraer la potencia del cabezal criogénico del *cryocooler* de manera más eficiente, logrando condensar el vapor en líquido con una **tasa de licuefacción (LR)** significativamente mayor. Gracias a este enfoque, se ha conseguido aumentar las tasas de licuefacción hasta un 80 %, alcanzando valores récord de **LR superiores a 1,45 l/h** (Figura 32) y un rendimiento diario de líquido producido de casi 35 l/día por cabezal criogénico.

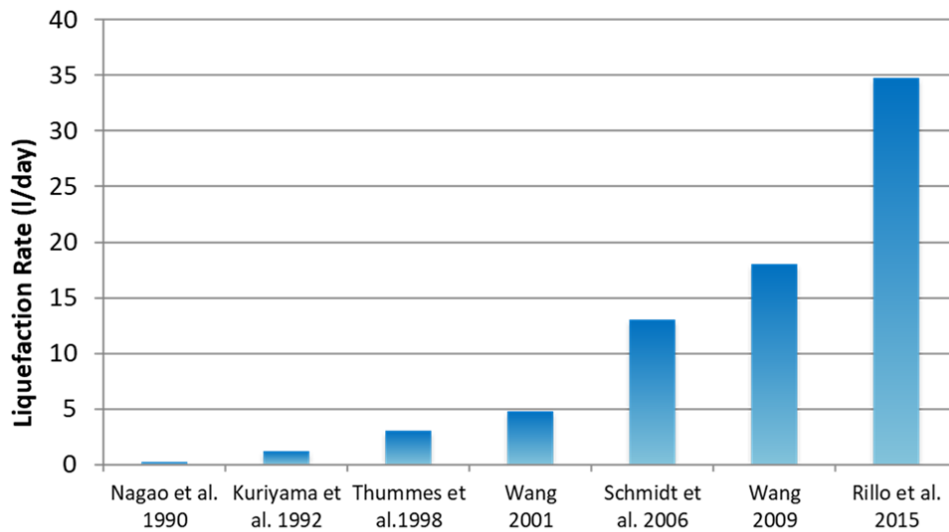


Figura 32: Rendimientos diarios publicados de helio líquido (l/día) utilizando RC3 de cabezal criogénico GM y PT a 4 K.

A continuación, se presentan los experimentos realizados en un modelo de licuefactor comercial de helio, ATL160, fabricado por la empresa a la que se ha licenciado la comercialización de la tecnología (*Quantum Design International*). El licuefactor comercial se muestra en la Figura 33. Este modelo incorpora un RC3 de tipo GM, de dos etapas modificado, que emplea un

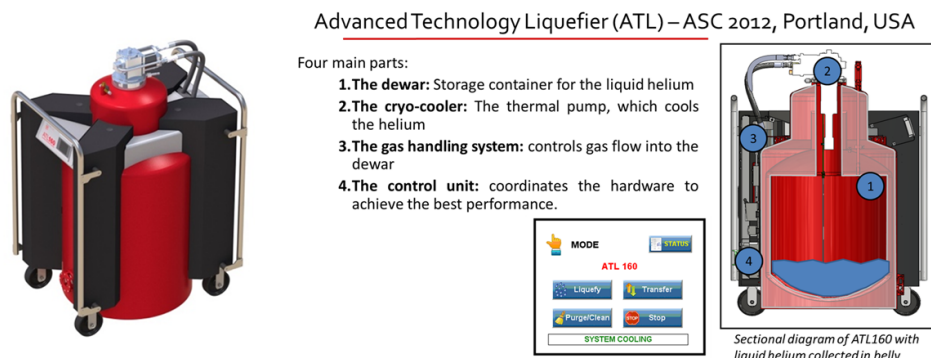


Figura 33: Izquierda: Fotografía del licuefactor comercial ATL160. Derecha: Corte transversal mostrando los elementos principales tal y como se presentó durante el anuncio de la comercialización, en la Conferencia de Superconductividad Aplicada (ASC-2012) en Portland, USA. Se muestra también la pantalla principal de la unidad de control con las funciones *Liquefy*, *Transfer*, *Purge/Clean* y *Stop*.

compresor de 7 kW y tiene una potencia de refrigeración nominal de 1,5 W a 4,2 K en la segunda etapa. El licuefactor está compuesto por un Dewar de 160 litros con el cabezal frío instalado en su cuello, un controlador de presión del gas en el Dewar y componentes auxiliares (manómetro, sensor de temperatura, medidor de nivel, puerto de transferencia) para controlar todas las etapas de producción y manejo del líquido.

Para una mejor comprensión del método desarrollado, en la Figura 34 se han representado, en un diagrama entalpía-temperatura, las tres trayectorias del diagrama $P - T$ de la Figura 30.

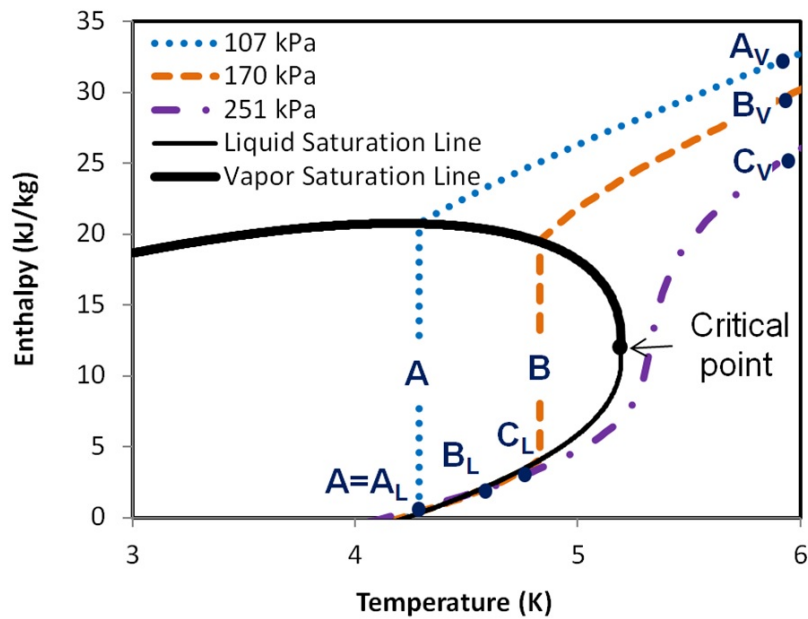


Figura 34: Entalpía del helio correspondiente a varios valores de presión absoluta. La referencia de entalpía cero se ha elegido arbitrariamente a 4,2 K y 100 kPa (Lemmon *et al.*, 2013). Las trayectorias $A_V \rightarrow A \rightarrow A_L$, $B_V \rightarrow B \rightarrow B_L \rightarrow A \rightarrow A_L$ y $C_V \rightarrow C_L \rightarrow B_L \rightarrow A \rightarrow A_L$ corresponden a la licuefacción a 107 kPa, 170 kPa y 251 kPa, respectivamente (ver Figura 30).

El proceso de licuefacción se realiza siempre a una presión constante regulada con la mayor precisión posible. Para una presión cercana a la presión atmosférica, 107 kPa la trayectoria, tanto en el diagrama de fases $P - T$ de la Figura 30, como en la gráfica $H(T)$ de la Figura 34, es $A_V \rightarrow A \rightarrow A_L$. El proceso de licuefacción comienza con gas a temperatura ambiente (en las figuras se representa sólo a partir de 6 K). Así, el gas, al enfriarse pasa por el estado A_V y se detiene en el punto A, donde se va formando líquido saturado a una presión de 107 kPa. Una vez que el Dewar se ha llenado con líquido saturado a 4,2 K, el enfriamiento continúa de forma que el líquido deja de hervir. Por tanto, a partir de ese momento, el Dewar está lleno de líquido subenfriado a presión ligeramente superior a la atmosférica, 107 kPa. El proceso de enfriamiento continúa, pasando por (A_L) hasta alcanzar los 2,5 K de temperatura base de la segunda etapa de la cabeza criogénica. Como se ha mencionado anteriormente, este líquido permite realizar transferencias de helio de manera muy eficiente.

Por otro lado, el proceso a una presión constante de 251 kPa también comienza a temperatura ambiente. En este caso, el helio se condensa de manera continua y mucho más rápida que en el proceso a 107 kPa, debido a la disminución más rápida de la entalpía al estar a una presión superior a la del punto crítico (trayectoria $C_V \rightarrow C_L \rightarrow A \rightarrow A_L$) y a la mayor potencia del refrigerador a mayor temperatura (ver el mapa de carga térmica en la Figura 19).

El flujo de helio en función de la temperatura puede modelarse utilizando la ecuación de estado de los gases ideales hasta cerca de la temperatura de condensación. En estos puntos (A y B en la Figura 30 y en la Figura 35), se observa una pequeña anomalía en el flujo en función del tiempo, indicada con unas flechas en la Figura 35, que es debida al calor latente. A partir de ahí, el flujo se mantiene constante mientras el Dewar se llena con las gotas de líquido que se producen en la zona del anillo de cobre de la segunda etapa (es decir, alrededor del volumen de expansión de la segunda etapa de la cabeza criogénica).

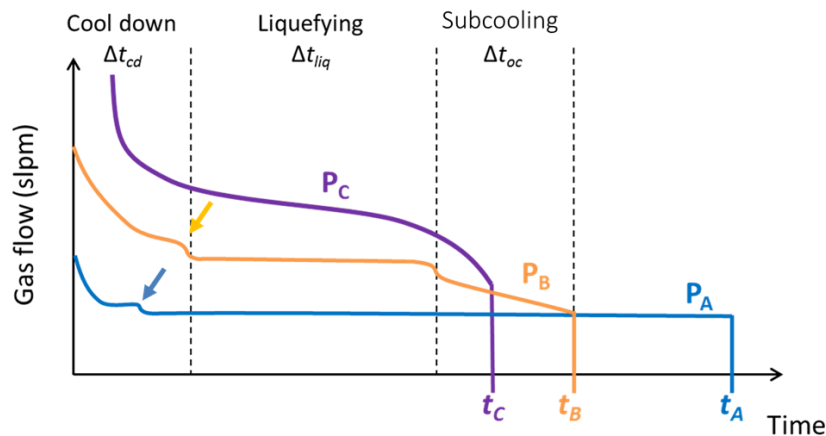


Figura 35: Representación del flujo típico de helio para las operaciones de licuefacción a presiones P_A , P_B y $P > P_C$, correspondientes a los puntos de licuefacción A , B y la línea $C_V \rightarrow C_L$ en el diagrama de fase de la Figura 30. Se indican los períodos de tiempo correspondientes para el enfriamiento del vapor, la licuefacción y del sub-enfriamiento del líquido en el caso de P_B . Las flechas en la región *Cool down* de las curvas de flujo a P_A y P_B indican las anomalías debidas al calor latente. Estas anomalías se corresponden con la llegada a los puntos A y B en las trayectorias de licuefacción a P_A y P_B (Figura 30 y Figura 34). La potencia disponible para pre-enfriar el vapor se ve reducida en la cantidad asociada al calor latente, por lo que el flujo de entrada disminuye. A partir de ese momento el flujo es constante durante todo el proceso *Liquefying* hasta que se alcanza la región *Subcooling* es decir, los puntos A_L y B_L . En ese momento el nivel de líquido en el Dewar alcanza la segunda etapa de la cabeza criogénica, por lo que la primera etapa se enfría por conducción hasta su temperatura mínima (30 K) a la que su potencia es 0 W (Figura 19). Por tanto, la potencia disponible a partir de ese momento es solamente la de la segunda etapa, que, además, va disminuyendo constantemente conforme disminuye la temperatura del líquido. En la figura solo se ha representado esta segunda anomalía en el flujo y la región denominada *subcooling* para el caso P_B .

Cuando el nivel de líquido alcanza el cuello del Dewar y llega a la segunda etapa de la cabeza criogénica, se produce una nueva disminución brusca en el flujo de entrada. En este punto, el nivel de líquido no puede aumentar más, ya que por encima de ese nivel la temperatura supera los 4,2 K, lo que impide la existencia de líquido y solo permite la presencia de gas. Por lo tanto, todo el flujo que entra se destina a densificar el líquido ya producido, el cual continúa

enfriándose y se separa de la línea de saturación en el diagrama de fases (Figura 30). Este proceso de enfriamiento continúa hasta que la segunda etapa alcanza su temperatura mínima con una potencia de 0 W, típicamente 2,5 K.

Hemos visto cómo la aplicación de dos ideas fundamentales de termodinámica, basadas en el diagrama de fases del helio, junto con una tecnología emergente como los refrigeradores criogénicos de ciclo cerrado (RC3 de tipo GM), ha permitido desarrollar un producto comercial que reúne todas las cualidades que cualquier usuario de helio líquido o investigador en física de bajas temperaturas, con consumos inferiores a 100 litros por día, podría desear. Estas cualidades incluyen:

1. **Producción de helio líquido con una máquina compacta y de bajo consumo**, similar a un electrodoméstico, mediante un proceso totalmente automatizado. Además, es posible controlar la máquina de forma remota desde cualquier ubicación.

2. **Regulación y adaptación de la producción** en función del consumo en tiempo real, garantizando un suministro eficiente y ajustado a las necesidades del usuario.

3. **Almacenamiento del helio líquido sin pérdidas por evaporación**, manteniéndolo en estado líquido de manera indefinida hasta que sea necesario su uso.

4. **Transferencia directa del helio líquido** a los equipos científicos y médicos desde el propio licuefactor, eliminando la necesidad de transferencias intermedias a Dewars de transporte. Esto simplifica el proceso y reduce posibles pérdidas o complicaciones logísticas.

5. **Producción de helio subenfriado** a presión atmosférica, lo que reduce significativamente la evaporación durante las transferencias en comparación con el helio líquido en estado de ebullición, que es la situación habitual. Esto mejora la eficiencia y minimiza pérdidas de helio.

6. **Sistema modular y ampliable**: El diseño modular permite expandir la capacidad de licuefacción en cualquier momento. Además, las operaciones de mantenimiento y reparaciones de unidades individuales pueden programarse sin afectar el funcionamiento de la planta de recuperación de helio ni el suministro de helio líquido a los equipos científicos o médicos. Esto garantiza continuidad y flexibilidad en las operaciones.

ATLi

La tecnología ATL nos ha permitido alcanzar una producción de 1,5 l/h. Sin embargo, con una potencia de 1,5 W a 4,2 K disponible en la segunda etapa del *cryocooler*, se podría alcanzar una producción de hasta 2,0 l/h⁸. Este límite indica la necesidad de un nuevo cambio de paradigma, similar al que nos llevó al desarrollo del ATL. Este avance previo se basó en dos

⁸ El calor latente del helio líquido es 21 J/g. Por tanto, con una potencia de 1,5 W(J/s) a 4,2 K, se pueden condensar 0,071 g/s. Como la densidad del helio líquido es 125 g/l, 0,071 g/s equivalen a 2,0 l/h.

ideas clave: realizar un intercambio directo con el helio gas utilizando una cabeza criogénica modificada (sin intercambiador y sin anillo de cobre en la primera etapa), y, producir el líquido por encima del punto crítico para aprovechar las propiedades termodinámicas ventajosas que ofrece una presión ligeramente mayor. Cabe destacar que, en una planta de recuperación de helio, el gas se almacena a 200 bar de presión, por lo que reducirla a 2 bar en lugar de 1 bar no representa ningún inconveniente.

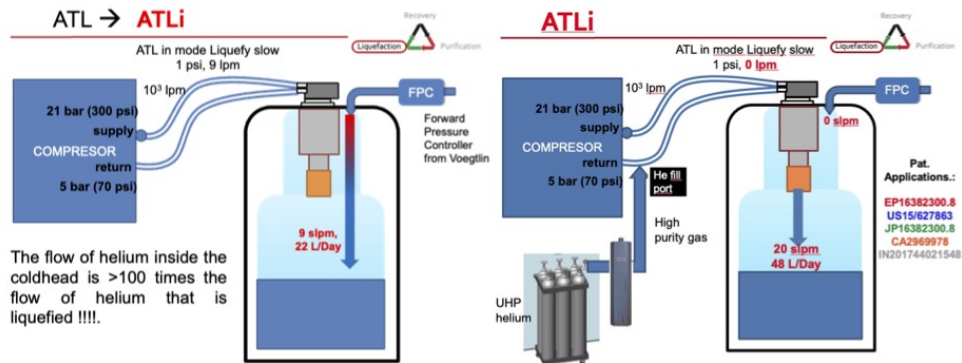


Figura 36: Izquierda: ATL licuando helio a presión atmosférica. Un caudal de 9 slpm a través del regulador de presión FPC equivale a 22 l/día de líquido. Derecha: ATLi: Cuando se extrae un caudal de 20 slpm del interior de la cabeza criogénica, el caudal de entrada a través del FPC se reduce de 9 slpm a un valor cercano a 0 slpm. Para controlar la apertura de la válvula criogénica de forma que el sistema tenga siempre realimentación negativa y no oscile, el parámetro natural de control o señal de error que se utiliza es el propio caudal de entrada a través del controlador de presión FPC. Este ha de mantenerse siempre en un valor positivo cercano a 0 slpm.

Este necesario nuevo cambio de paradigma para tratar de alcanzar los 2 l/h llegó de la mano del Dr. Javier Sesé, quien propuso una idea que, en un principio, parecía descabellada para los científicos e ingenieros de *Quantum Design* y de *Sumitomo*: convertir el refrigerador de ciclo cerrado en un sistema “parcialmente” de ciclo abierto mediante una modificación simple. El Dr. Sesé intuyó que, dado que dentro de un refrigerador de ciclo cerrado circula un flujo de helio de cientos de litros por minuto, “robar” una pequeña fracción de ese flujo (que en la segunda etapa ya está a menos de 4,2 K) no afectaría significativamente a su funcionamiento. Si esto fuera posible, extrayendo el equivalente a 22 sl/min (slpm) del flujo interno de helio del volumen de expansión de la segunda etapa (donde el helio está a 4,2 K y a una presión media de unos 12 bar), se podría lograr una tasa de licuefacción equivalente a 2 l/h de helio líquido⁹, es decir, 48 l/día con una sola máquina. Todo esto manteniendo la misma potencia eléctrica de 7 kW y produciendo el líquido directamente a presión atmosférica. Además, al cerrar la

⁹ La relación entre el flujo másico de gas que entra en el Dewar del ATL (22 sl/min) y la masa de líquido producido a 4,2 K es: $(22 \text{ sl/min} \times 0,166 \text{ g/sl} \times 60 \text{ min/h} \times 1,15) / 125 \text{ g/l} = 2,0 \text{ l/h}$, donde 0,166 g/sl es la densidad del helio gas en condiciones standard, 125 g/l es la densidad del líquido en el punto de saturación a 4,2 K, y, el factor 1,15 es debido al balance de masas en el proceso de licuefacción a volumen y presión constantes ([Spagna et al., 2020](#)).

válvula criogénica de extracción de helio del circuito interno, el sistema conservaría todas las prestaciones del ATL.

La idea fue probada experimentalmente con éxito, como se puede apreciar en las imágenes y gráficas de resultados que forman parte de la patente (Sesé y Rillo, 2019) que protege esta nueva e innovadora tecnología (Figuras 36, 37 y 38).

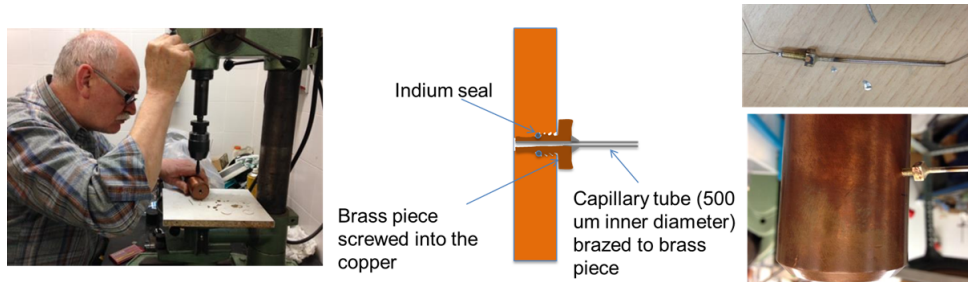


Figura 37: Realización del orificio de 1 mm en el anillo de cobre de la segunda etapa. Mediante un orificio de 3 mm roscado en la parte exterior se instala un capilar de 500 micrómetros de diámetro interior soldado a una pieza de latón. Esta pieza queda sellada en el interior de la zona roscada mediante una junta de indio que por presión se hace fluido y sella perfectamente a muy bajas temperaturas.

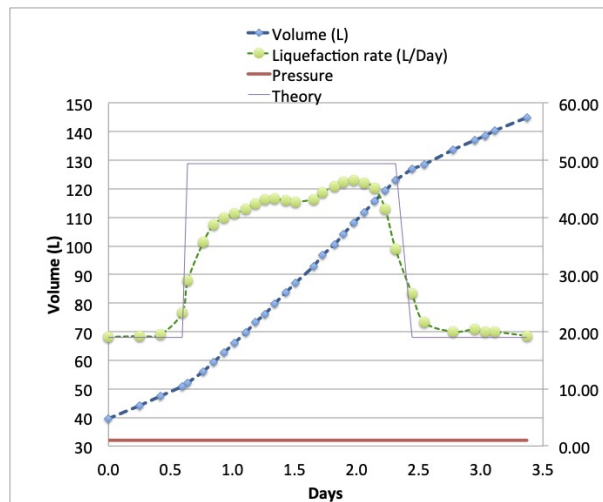


Figura 38: Resultado experimental en el prototipo de ATL. Al abrir poco a poco la válvula criogénica la tasa de licuefacción pasa de 20 l/día a 46 l/día. Por tanto, podemos regular la producción desde 0 l/día hasta los 46 l/día que se obtienen en este prototipo. Con una cabeza enfriadora de 2 W, como el reciente modelo RDK418 de Sumitomo, es esperable una tasa de licuefacción que supere los 60 l/día.

En la Figura 38 vemos cómo la tasa de licuefacción de un ATL que, a presión atmosférica, produce 20 l/día, aumenta hasta 46 litros/día. El sistema prototipo con el que se hicieron estos experimentos preliminares se muestra en la Figura 39.

El sistema de control de la válvula criogénica superconductora es muy sencillo, ya que utiliza el flujo de gas a través del cuello como parámetro de realimentación para la fuente de corriente que acciona la válvula criogénica. Es fundamental mantener este flujo en un valor ligeramente positivo, cercano a 0 l/min, para evitar oscilaciones en el sistema de control y garantizar su estabilidad.

ATLi components

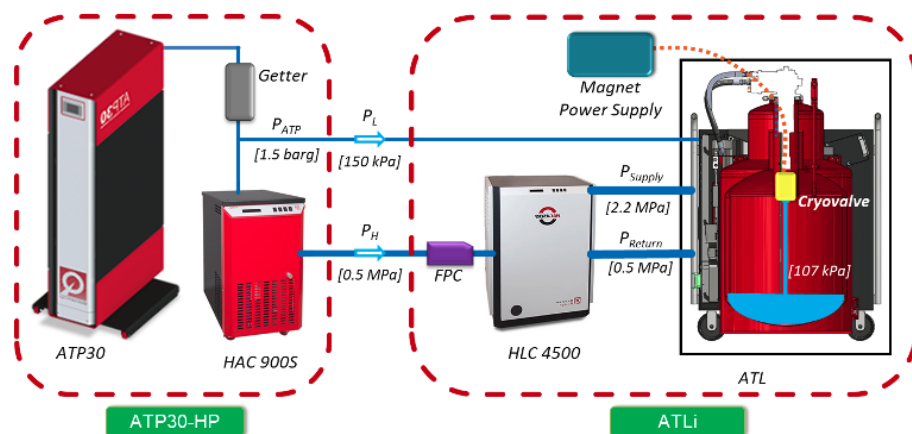


Figura 39: Prototipo de ATLi. A la izquierda un purificador ATP30-HP basado en RC3, que incluye un purificador ATP30, un getter St707 y un pequeño compresor HAC900S para elevar la presión del helio ultrapuro, hasta los 5 bar de entrada que necesita el compresor HLC 4500 del licuefactor ATL. El purificador ATP y el getter St707 (material absorbente de hidrógeno) para producir helio ultrapuro se explican más adelante.

En la Figura 40 vemos la evolución temporal de la tasa de licuefacción incluyendo ahora el ATLi.

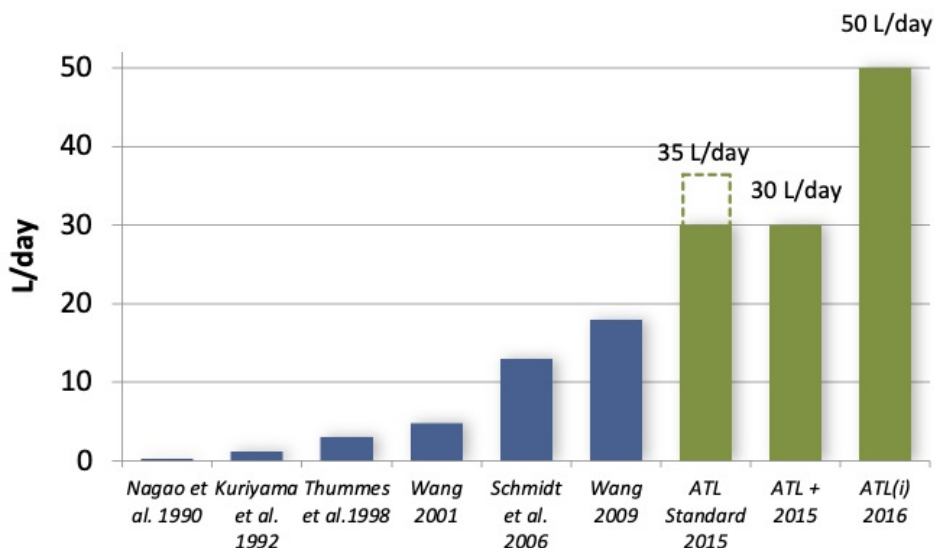


Figura 40: Evolución de la tasa de licuefacción de helio con sistemas basados en RC3. El modelo ATLi(i) permitirá, cuando se comercialice, desarrollar plantas de media escala (> 300 l/día) competitivas en producción y eficiencia con las plantas de tipo Collins, manteniendo la sencillez y todas las características de las plantas de pequeña escala. El modelo ATL+, descrito en (Gabal, 2017) permitía producir 30 l/día sin necesidad de trabajar a la presión crítica, pero ha sido superado comercialmente por el modelo ATL (mucho más sencillo) utilizando cryocoolers de mayor potencia, y por la futura comercialización del ATLi

Tecnología Avanzada de Recuperación del helio: Direct Recovery (DR)

La extraordinaria sencillez de la tecnología ATL para la licuefacción de helio ha permitido diseñar un sistema igualmente simple para la recuperación del helio evaporado en equipos científicos y médicos. El ATL puede operar a presiones cercanas a la atmosférica. Para evitar la entrada de aire debido al posible deterioro de juntas o sellos, la presión de trabajo debe mantenerse siempre ligeramente por encima de la presión atmosférica. De hecho, el ATL cuenta con un sensor de presión relativa que garantiza que la presión de trabajo mantenga una diferencia constante y positiva respecto a la presión atmosférica.

Por otro lado, los equipos científicos y médicos también operan con el baño de helio líquido a presión positiva. Esto se asegura mediante una válvula de seguridad, generalmente calibrada a una presión entorno a 1 PSig (69 mbar). Por lo tanto, si se regula el licuefactor ATL para que opere a una presión ligeramente inferior a la del equipo científico o médico, por ejemplo 1/3 PSig (23 mbar), el helio evaporado en dicho equipo fluirá hacia el cuello del Dewar del ATL debido a la diferencia de presión, donde se licuará mediante el intercambio directo con la cabeza criogénica del ATL.

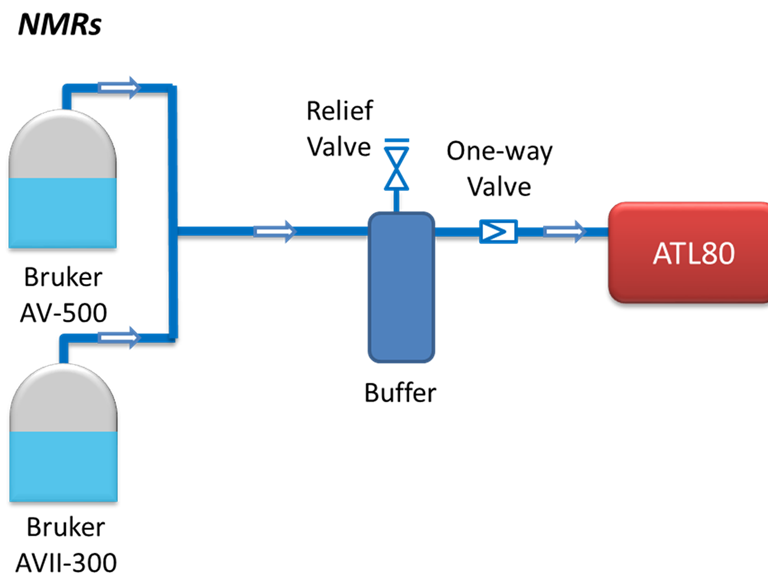


Figura 41: Planta DR: Varios NMR están conectados mediante tuberías metálicas a un *buffer* metálico y luego directamente al licuefactor. Para consumos inferiores a 10 l/día se comercializó el modelo de 80 L denominado ATL80. Solo se necesita una válvula de alivio en el *buffer* y una válvula unidireccional antes del licuefactor como elementos de seguridad.

Las conexiones entre los equipos que evaporan helio y el ATL se realizan con tuberías metálicas, ya sean flexibles o rígidas, pero nunca con materiales plásticos. Esto evita la difusión de aire hacia el interior y la pérdida de helio hacia el exterior (Gabal *et al.*, 2015). De esta

manera, la entrada de impurezas al licuefactor es mínima. Además, al no existir pasos estrechos en la zona fría del cuello del Dewar (recordemos que el helio fluye libremente por toda la sección del cuello), cualquier impureza que llegara simplemente se condensaría en la superficie de la cabeza criogénica, afectando únicamente al intercambio térmico pero sin interrumpir el funcionamiento del sistema, a diferencia de lo que ocurriría con el uso de intercambiadores o válvulas de expansión J-T.

Hemos denominado a esta tecnología de recuperación patentada ([Rillo y Tocado, 2010a](#)) *Direct Recovery* (DR) cuyo esquema se muestra en la Figura 41 para el caso concreto de la recuperación del helio evaporado en NMRs instalados en los sótanos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza.

Tecnología Avanzada de Purificación de helio: ATP.

LIMITACIONES DE LA RECUPERACIÓN DIRECTA Y COMPLEMENTO CON LA TECNOLOGÍA ATP.

La recuperación directa (DR) no permite recuperar el helio evaporado durante las transferencias, ya que los caudales involucrados son mucho mayores de lo que uno o varios ATL pueden licuar. Para alcanzar tasas de recuperación cercanas al 100 %, es necesario recurrir a un diseño tradicional de planta de recuperación de helio. En estas plantas, el helio evaporado se recoge en un globo y se comprime mediante un compresor de alta presión, almacenándolo en botellas a 200 atmósferas. Sin embargo, este proceso inevitablemente introduce impurezas, principalmente nitrógeno y oxígeno, provenientes del aire ([Gabal et al., 2015](#)).

Para abordar este problema, la tecnología ATL se ha complementado con una nueva tecnología de purificación de gases patentada ([Rillo et al., 2014](#)), denominada comercialmente ATP (*Advanced Technology Purifier*). Una vez más, un refrigerador de ciclo cerrado de dos etapas desempeña un papel clave. Este refrigerador se instala dentro de un Dewar cilíndrico recto, donde las impurezas se adhieren en forma sólida a la superficie de la cabeza criogénica. El helio frío se extrae del fondo del Dewar a través de un intercambiador de calor, recuperando así la entalpía. En ausencia de impurezas, el refrigerador solo necesita compensar las pérdidas térmicas, por lo que no requiere la misma potencia que en el proceso de licuefacción. Sin embargo, es fundamental que pueda manejar un flujo significativo de helio mezclado con impurezas provenientes del aire.

Para el diseño de este sistema, se utiliza nuevamente el diagrama de fases del helio, pero esta vez incluyendo las líneas de saturación sólido-vapor de las posibles impurezas. Dado que estas impurezas están presentes en concentraciones bajas, su contribución a la presión total del gas a

licuar será siempre muy inferior a la presión atmosférica. Este enfoque se ilustra en la Figura 42, donde se muestra el diagrama de fases del helio con las líneas de saturación sólido-vapor de las posibles impurezas. A modo de ejemplo se ilustra el proceso de eliminación del O₂ y del H₂. El proceso es el mismo para cualquiera de las otras posibles impurezas.

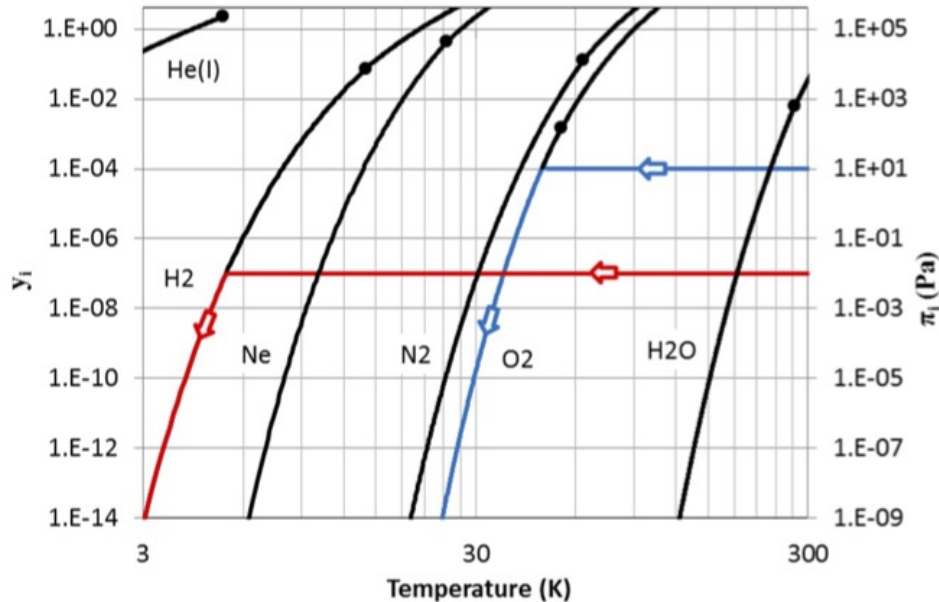


Figura 42: Fracciones molares ($y_j(T)$) y presiones parciales ($\pi_j(T)$) de O₂ (azul) y H₂ (rojo) en el helio recuperado en función de T, para fracciones molares iniciales típicas de 10^{-4} y 10^{-7} , respectivamente, en condiciones estándar (100 kPa y 273,15 K). Las líneas sólidas negras son: arriba a la izquierda la línea de presión de vapor de equilibrio $P - T$ de He(I) y, hacia la derecha las líneas de presión de vapor de algunas impurezas típicas en función de T, en el rango de 3 K a 300 K. Los puntos negros en las líneas de equilibrio de las impurezas son sus respectivos puntos triples. Cuando la impureza alcanza la línea Vapor→Sólido, su presión de vapor sigue la línea continua hacia abajo en T y no se aparta de esta línea. Si consideramos $< 10^{-14}$ como concentración despreciable (presión parcial $< 10^{-9}$ Pa) vemos que por debajo de 20 K solo el H₂ mantiene los valores de concentración y presión parcial iniciales del ejemplo (el Ne no es una impureza presente en He). Hasta aproximadamente 6 K no empieza a reducirse la presión parcial del H₂ libre, y solo a 3 K podemos considerar despreciable su concentración y presión parcial.

Eliminación de Impurezas en el Proceso de Purificación: El vapor de agua se elimina principalmente en el compresor de helio (que opera a 200 bar), el cual incluye una etapa de secado. Por lo tanto, la contaminación por agua que llega al purificador es prácticamente insignificante. Los principales contaminantes que deben considerarse son el nitrógeno (N₂) y el oxígeno (O₂). Ambos tienen presiones parciales despreciables por debajo de 20 K, lo que significa que un simple filtro de partículas sólidas, situado en una zona donde la temperatura sea siempre inferior a 10 K, será suficiente para eliminar estas dos impurezas y garantizar que el helio quede completamente libre de ellas. Este filtro se instalará a la entrada del intercambiador de salida de gas del purificador, situado en el fondo del Dewar. El neón (Ne) no es una impureza relevante debido a su baja concentración en el aire. Por lo tanto, por debajo de 20 K, la única impureza que debe tenerse en cuenta es el hidrógeno (H₂).

El diseño del purificador ATP se detalla en la tesis doctoral del Dr. Miguel Gabal (Gabal, 2017). Una vez más, se trata de un equipo compacto, del tamaño de un electrodoméstico, totalmente automático y dimensionado para suministrar helio de alta pureza a varios licuefactores ATL/NexGen¹⁰ de manera simultánea.

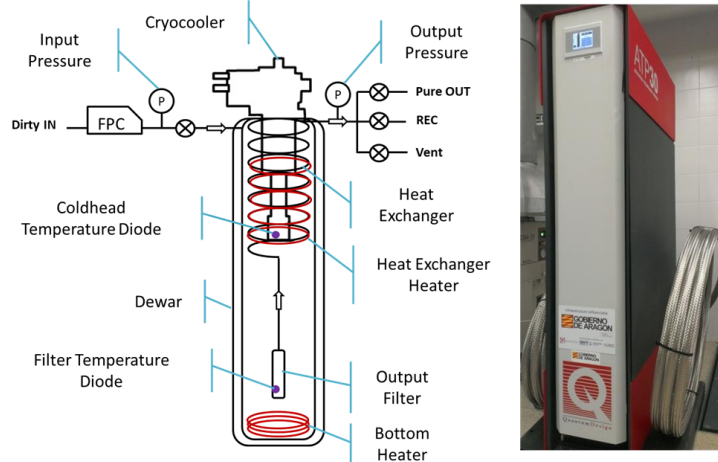


Figura 43: Elementos principales del purificador. El gas “sucio” entra en el Dewar a través de un Controlador de Presión Directa (FPC) que fija la presión del sistema. El gas se enfría desde arriba hacia abajo y pasa a través de un filtro colocado en el extremo inferior del intercambiador de salida, para evitar cualquier arrastre de partículas sólidas congeladas. El gas de salida intercambia entalpía en su camino de salida a través del intercambiador de calor en espiral alrededor de la cabeza criogénica, y el gas limpio se dirige mediante válvulas a la salida adecuada dependiendo de la necesidad. Cuando el purificador tiene suficientes impurezas en su interior, estas pueden eliminarse rápidamente utilizando los calentadores para evaporarlas, enviando el gas de salida al sistema de recuperación o a la atmósfera (dependiendo del contenido de impurezas en cada etapa del proceso de regeneración).

En la Figura 43 se presenta un esquema del producto comercial ATP-30 y una fotografía del mismo.

El purificador ATP está equipado con termómetros y calentadores que permiten controlar los procesos de regeneración. Estos mecanismos son esenciales cuando la cabeza enfriadora pierde eficiencia debido a que su superficie se encuentra completamente cubierta de aire sólido (impurezas congeladas). A continuación, se muestra un esquema del purificador que ilustra las impurezas adheridas a la cabeza enfriadora y su desplazamiento durante el proceso de regeneración (Figura 44).

La verificación de que las impurezas se adhieren a la cabeza enfriadora y luego se subliman al calentarse se demuestra en la secuencia de fotografías que se presenta en la Figura 45. Esta operación de extracción de la cabeza criogénica se realizó únicamente para comprobar que las impurezas se adhieren fundamentalmente al anillo de cobre de la segunda etapa. Observando el interior del Dewar se comprobó que la pared externa del intercambiador también está cubierta de impurezas.

¹⁰ NexGen es la denominación comercial de la segunda generación de ATL. Ambos son técnicamente iguales.

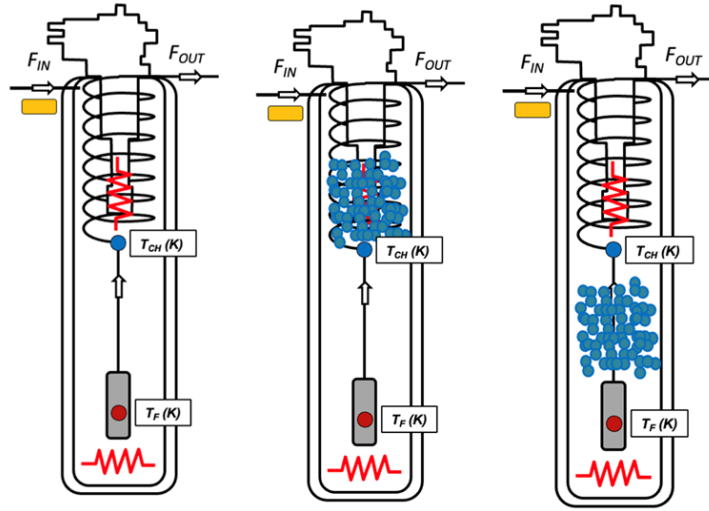


Figura 44: Desplazamiento automático de las impurezas en el ATP. A la izquierda ATP listo para capturar impurezas. En el centro las impurezas se han adherido a las paredes externas de la segunda etapa de la cabeza criogénica y del intercambiador. En la derecha el calentador que está situado en la zona de condensación de impurezas se ha activado y estas se han desplazado hacia abajo, dejando las paredes externas de la cabeza criogénica y del intercambiador limpias para volver a atrapar impurezas.

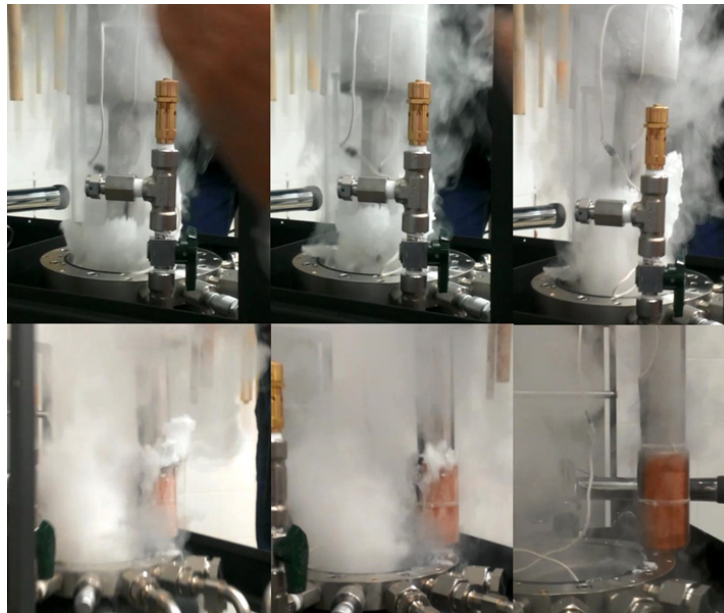


Figura 45: Secuencia de fotografías de la extracción del cabezal frío, con las impurezas aún en su forma de fase sólida. El intervalo de tiempo entre las fotografías es de 0,3 s en la secuencia superior y de 3 s en la secuencia inferior. Secuencia superior, de izquierda a derecha: La fase sólida (aire) rodea el dedo frío de la segunda etapa y comienza a sublimarse inmediatamente después de la extracción del cabezal frío. Secuencia inferior, de izquierda a derecha: El aire sólido desaparece por completo y la parte fría de cobre de la segunda etapa aparece completamente limpia antes de que comience a condensar humedad del aire, dado que su temperatura es del orden de 10 K.

El ATP permite obtener helio con una pureza superior incluso a la del helio comercial más puro disponible en el mercado (Gabal, 2017). Sin embargo, cuando se bombea helio líquido a través de un capilar para alcanzar temperaturas inferiores a 4,2 K, incluso utilizando helio purificado con un ATP, se producen bloqueos en dichos capilares. Este problema, de alcance

mundial, ha causado enormes pérdidas de helio durante décadas, sin que se encontrara una solución efectiva para evitarlo.

Cuando ocurre un bloqueo, es necesario calentar y evaporar todo el helio líquido, liberarlo a la atmósfera y reiniciar el proceso, enfriando el equipo desde temperatura ambiente con la esperanza de que, una vez llenado nuevamente con helio líquido, no se vuelva a producir otro bloqueo.

Este problema se agravó en las últimas décadas y fue objeto de investigación por parte de varios grupos internacionales, sin que se obtuvieran resultados positivos. En Zaragoza también enfrentábamos este desafío. Sin embargo, contar con una herramienta como el ATP y un método de purificación desarrollado por nosotros nos permitió resolver el problema y compartir la solución con la comunidad internacional (Gabal *et al.*, 2016), como se detallará a continuación.

¿Es el helio líquido una sustancia absolutamente pura?

Esta pregunta ya fue abordada en la década de 1970 por Abrikosova y Shal'nikov, 1971. En su estudio partieron de la premisa de que el único contaminante en el helio gaseoso con una presión de vapor no despreciable a la temperatura del helio líquido es el hidrógeno (H_2). Por lo tanto, concluyeron que, incluso a 4,2 K, el helio líquido no es absolutamente puro, a pesar de que se hayan eliminado o filtrado todas las partículas sólidas mediante algún procedimiento.

En otro trabajo de la misma época (Jewell y McClintock, 1979) se menciona que, a temperaturas cercanas a 1 K, la presión de vapor del H_2 sólido puede considerarse despreciable. Esto implica que, a esas temperaturas, el helio líquido, debidamente filtrado, es una sustancia absolutamente pura.

Sin embargo, surge una nueva pregunta: **¿a partir de qué temperatura, sin necesidad de llegar a 1 K, podemos despreciar la presencia de H_2 en el helio?** Además, **¿cuál es la solubilidad límite de H_2 en el helio en ese rango de temperaturas?**

Para responder a estas preguntas, recurrimos a la Figura 46, que muestra la fracción molar de saturación de H_2 a baja temperatura en helio. Esta gráfica incluye dos curvas: la solubilidad límite de H_2 en helio (línea discontinua, $x_{H_2}(T)|_{eq}$, Jewell y McClintock, 1979) y la presión de vapor de saturación de equilibrio de H_2 (línea sólida, $y_{H_2}(T)|_{eq}$, Lemmon *et al.*, 2013), en función de la temperatura (T) en el rango de 3 K a 4,2 K.

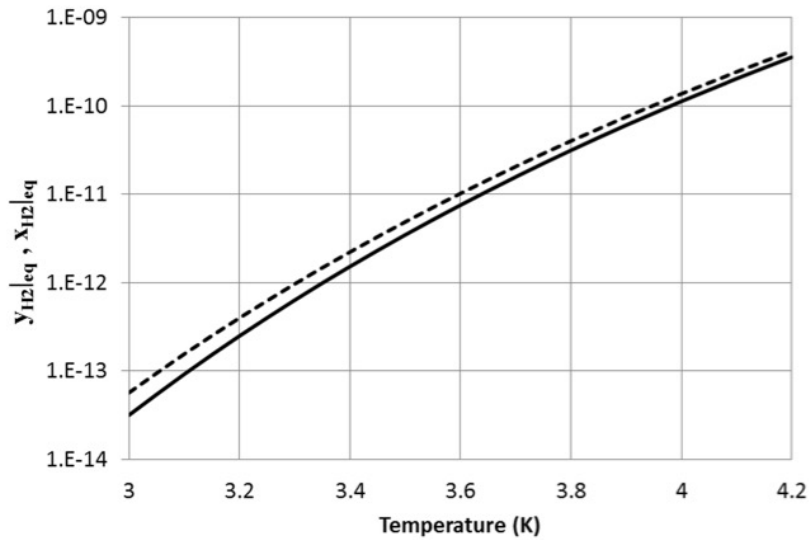


Figura 46: Fracción molar de saturación de H₂ a baja temperatura en helio, obtenida a partir de la solubilidad límite de H₂ en He (línea discontinua, $x_{H_2}(T)|_{eq}$, Jewell y McClintock, 1979), y de la presión de vapor de saturación de equilibrio de H₂ (línea sólida, $y_{H_2}(T)|_{eq}$, Lemmon *et al.*, 2013), como función de T en el rango de 3 K a 4,2 K.

La Figura 46 revela que la presión de vapor de saturación del H₂ (representada por la línea continua) disminuye cuatro órdenes de magnitud al reducir la temperatura del helio de 4,2 K a 3 K, alcanzando valores de fracción molar extremadamente pequeños, inferiores a 10^{-13} . Si consideramos 10^{-13} como un umbral por debajo del cual la fracción molar de una impureza es despreciable, concluimos que no es necesario llegar a 1 K para lograr una pureza significativa. Con llegar a 3 K sería suficiente. Sin embargo, trabajar a 3 K en un sistema ATP es más complicado, ya que la potencia disponible a esa temperatura es mucho menor que a 4,2 K (ver Figura 19), lo que limitaría el flujo máximo de helio o requeriría un refrigerador de ciclo cerrado (RC3) con una potencia muy superior a la de los modelos comerciales actuales.

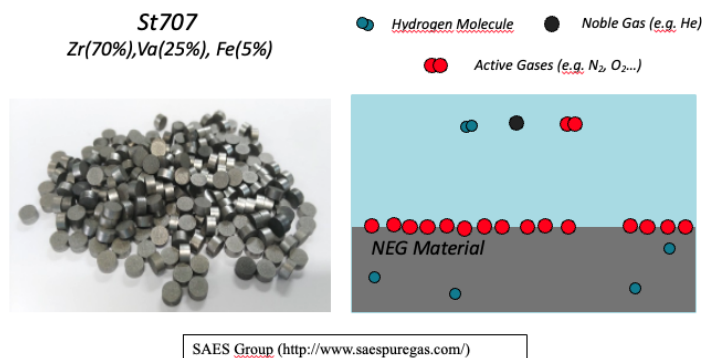


Figura 47: GETTER no evaporable. Se trata de una aleación comercial de Zirconio, Vanadio y Hierro, denominada St707. Esta aleación está formada por pastillas con una capa de pasivación que desaparece a una temperatura de trabajo de aproximadamente 400 °C, donde la absorción de hidrógeno es mucho mayor que a temperatura ambiente. Las moléculas de helio no interactúan con el “getter” y pasan a través de los huecos entre las pastillas. Por otro lado, el hidrógeno molecular se disocia al chocar con la superficie del material y penetra intersticialmente en la aleación. Es crucial que gases muy reactivos como el N₂ y el O₂ hayan sido eliminados previamente en el ATP, a $T < 20$ K, ya que estos podrían disociarse sin penetrar en la red cristalina de la aleación, colapsando la superficie del “getter”.

En la Figura 46 se observa que, tanto la solubilidad límite como la presión parcial de saturación, conducen a una fracción molar de H_2 en el helio muy similar. Esto era de esperar, ya que el helio no interactúa con las moléculas de H_2 , y por lo tanto, no se disuelve más allá de la fracción molar determinada por la presión de vapor de saturación.

Para eliminar completamente el H_2 , se necesitó un enfoque alternativo. La solución surgió gracias al conocimiento sobre la hidruación de aleaciones que se tiene en Zaragoza por trabajos en colaboración con el laboratorio de Cristalografía de Grenoble. Existen aleaciones metálicas capaces de incorporar fácilmente importantes cantidades de hidrógeno, de manera intersticial en su estructura cristalina, como se ilustra en la Figura 47.

Al hacer circular el helio purificado en el ATP a través de una de estas aleaciones (hoy en día comerciales) es posible reducir la pequeña concentración de moléculas de H_2 que no han solidificado en el ATP hasta valores despreciables. Con ello, se ha logrado eliminar totalmente el problema.

En la Figura 48 se presenta el esquema de producción de lo que se ha denominado “Clean Helium” (Gabal *et al.*, 2016).

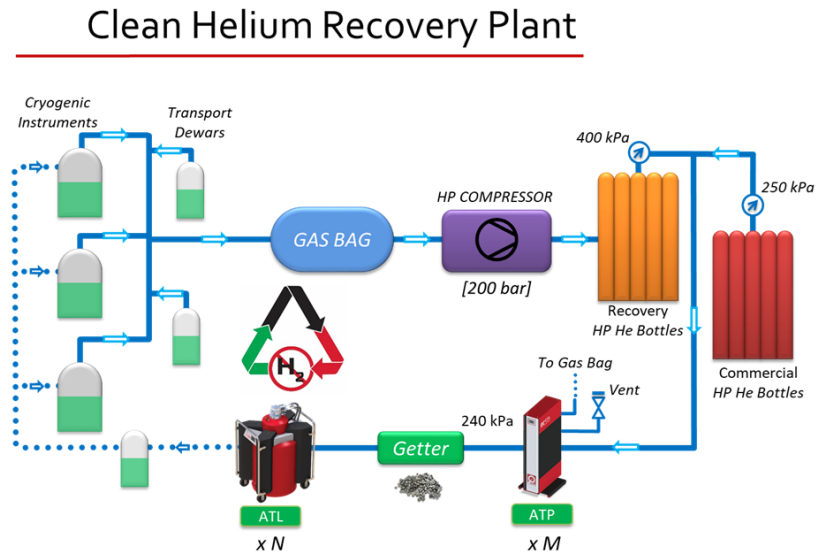


Figura 48: Configuración esquemática de una planta de recuperación de “Helio Limpio” a pequeña escala (libre de hidrógeno). La bolsa de gas, el compresor y las botellas de helio de recuperación no están completamente libres de H_2 (indicado en naranja). Las botellas comerciales de helio son la principal fuente de contaminación (indicado en rojo). El *bypass* se cierra cuando la temperatura de operación del ATP es $T > 3$ K. En ese caso, es necesario utilizar el getter para absorber el H_2 que no ha solidificado en el ATP.

En la Figura 49 se muestra una comparación entre helio contaminado con hidrógeno y helio limpio. Cuando la concentración de H_2 supera la presión de vapor del helio sólido a 4,2 K, se forman aglomeraciones de hidrógeno sólido que flotan en el helio líquido.

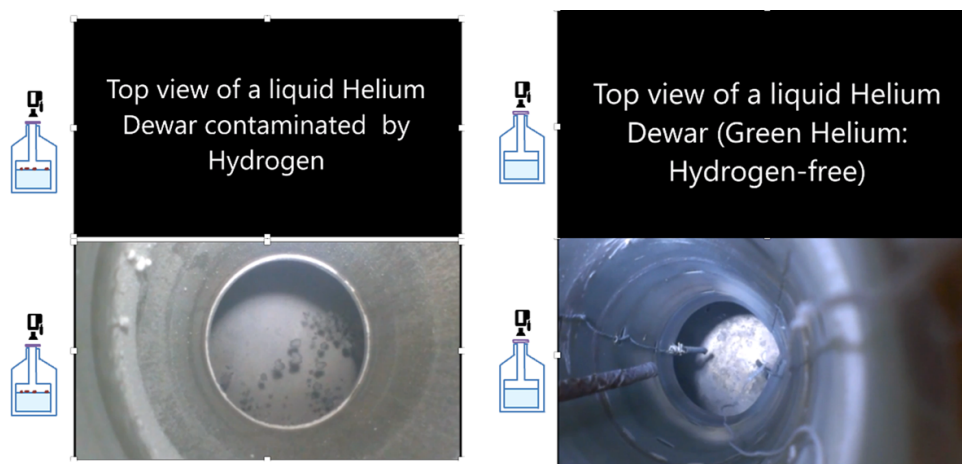


Figura 49: Izquierda, helio líquido contaminado con hidrógeno. Cuando la concentración de hidrógeno supera la presión de vapor del H₂ sólido, este solidifica y flota en la superficie del helio líquido debido a que su densidad es de 80 g/l frente a los 125 g/l del helio líquido. Derecha, helio limpio libre de H₂. Aunque no se observa H₂ sólido flotando, podría haber suficiente H₂ molecular para causar los bloqueos de impedancias. Sin embargo, después de más de diez años de operación de la tecnología ATP+getter, no se han registrado bloqueos, lo que permite concluir que el helio líquido producido en Zaragoza está, a efectos prácticos, libre de H₂ molecular.

Productos comerciales y resultados de la comercialización

Los tres productos comerciales derivados de la tecnología desarrollada en Zaragoza son: ATL/NexGen, BPC y ATP (Figura 50).

Small and Medium Scale Helium Recycling



Figura 50: Productos comerciales ATL/NexGen, BPC y ATP que constituyen la tecnología desarrollada por la Universidad de Zaragoza y el CSIC en colaboración con GWR Instruments y Quantum Design. La introducción del ATLi en el mercado permitirá la instalación de plantas de recuperación de helio de tamaño medio para consumos > 100l/día. Por ejemplo, 300 l/día con 6 ATLi.

1. **ATL y NexGen:** Son modelos similares de licuefactores, basados en la tecnología Advanced Technology Liquefier (ATL) descrita anteriormente. Ambos modelos ofrecen características

como la licuefacción adaptada al consumo, producción de helio subenfriado a presión atmosférica, operación sencilla y control remoto, entre otras ventajas. (*Quantum Design NORTH AMERICA*),

2. **BPC (Back Pressure Controller)**: Es la interfaz de conexión entre el equipo del que se recupera el helio y el resto de la instalación. Su función es garantizar la estabilidad de la presión en el equipo, asegurando que esta sea independiente del estado del resto de la planta de recuperación (*Quantum Design EUROPE*).

3. **ATP (Advanced Technology Purifier)**: Es un sistema de purificación de helio basado en un refrigerador de ciclo cerrado (RC3). Es totalmente automático, sencillo de operar y controlable de manera remota. Combinado con un material “getter”, permite obtener **Clean Helium** (helio ultra-puro, libre de H₂), resolviendo así el problema mundial de bloqueo de capilares en equipos científicos y médicos que trabajan con helio subenfriado a presión negativa (inferior a la atmosférica), mediante bombeo a través de capilares muy finos (*Quantum Design NORTH AMERICA*).

En 2024 se habían instalado más de 250 plantas en todo el mundo, lo que ha supuesto importantes retornos económicos a UNIZAR y CSIC (Figura 51).

Quantum Design offers worldwide service and sales support

“We’re there, where you are”



 Quantum Design Europe/LOT www.lot-qd.com	 Quantum Design Japan www.qd-japan.com	 Quantum Design China www.qd-china.com	
 Quantum Design India www.qd-india.com	 Quantum Design South America (Brazil) www.qd-americanosul.com	 Quantum Design Korea www.qdkorea.com	 QD Southeast Asia (Taiwan) www.qd-sea.com





Quantum Design, Inc.
6325 Lusk Blvd., San Diego, CA 92121
Tel: 858.481.4400 Fax: 858.481.7410
www.qdusa.com

Specifications subject to change without notice 1321-050 Rev. B0

Figura 51: Zonas del mundo donde hay una o más plantas de recuperación de helio basadas en la tecnología desarrollada en Zaragoza.

Futuro del helio

En este apartado, exploraremos de manera gráfica las aplicaciones de mayor impacto y crecimiento actual que requieren grandes cantidades de helio, ya sea en estado gaseoso o líquido.

El Regreso de los Dirigibles

Los dirigibles fueron, en su momento, un medio estratégico de transporte tanto militar como civil, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial. Aunque no estuvieron exentos de accidentes y controversias, fueron desplazados por completo por la aviación militar, civil y comercial. Sin embargo, en la era de las telecomunicaciones, han surgido nuevas necesidades para las que estas espectaculares naves son ideales.

Controlados y operados desde aeropuertos en tierra, los dirigibles modernos pueden proporcionar conectividad a zonas con baja o nula cobertura terrestre, sin necesidad de recurrir a costosas comunicaciones por satélite, que resultan inaccesibles para muchos sectores de la sociedad. Además, ofrecen una plataforma excepcional para la observación y la investigación, contribuyendo a la protección del planeta y al estudio de los fenómenos relacionados con el cambio climático.



Figura 52: Plataforma tipo zepelín operada por Sceye en sus instalaciones del Centro Aéreo Internacional de Roswell. Sceye: <https://sceye.com/>

En España, el aeropuerto de Teruel reúne condiciones inigualables para establecer una plataforma de lanzamiento y control de este tipo de naves. De hecho, en enero de 2025 se anunció

la pavimentación de una plataforma de estacionamiento para dirigibles tipo zepelín (Figura 52). El volumen de helio necesario para una de estas naves es de entre 8 000 y 15 000 m³, y este helio debe purificarse periódicamente. Las técnicas de purificación de gas helio desarrolladas en Zaragoza ya han despertado el interés de la filial española de *Scye*, que se está estableciendo en el aeropuerto de Teruel.

Equipos médicos MRI y MEG.

Los equipos de Imagen por Resonancia Magnética (MRI) y los magnetoencefalógrafos (MEG) son herramientas de diagnóstico médico fundamentales en cualquier hospital con tecnologías avanzadas. Su número está creciendo rápidamente, y existen proyectos de desarrollo de modelos de muy alta resolución. Un ejemplo destacado es el proyecto Iseult en el caso de los equipos MRI, cuyas características se describen en la Figura 53.

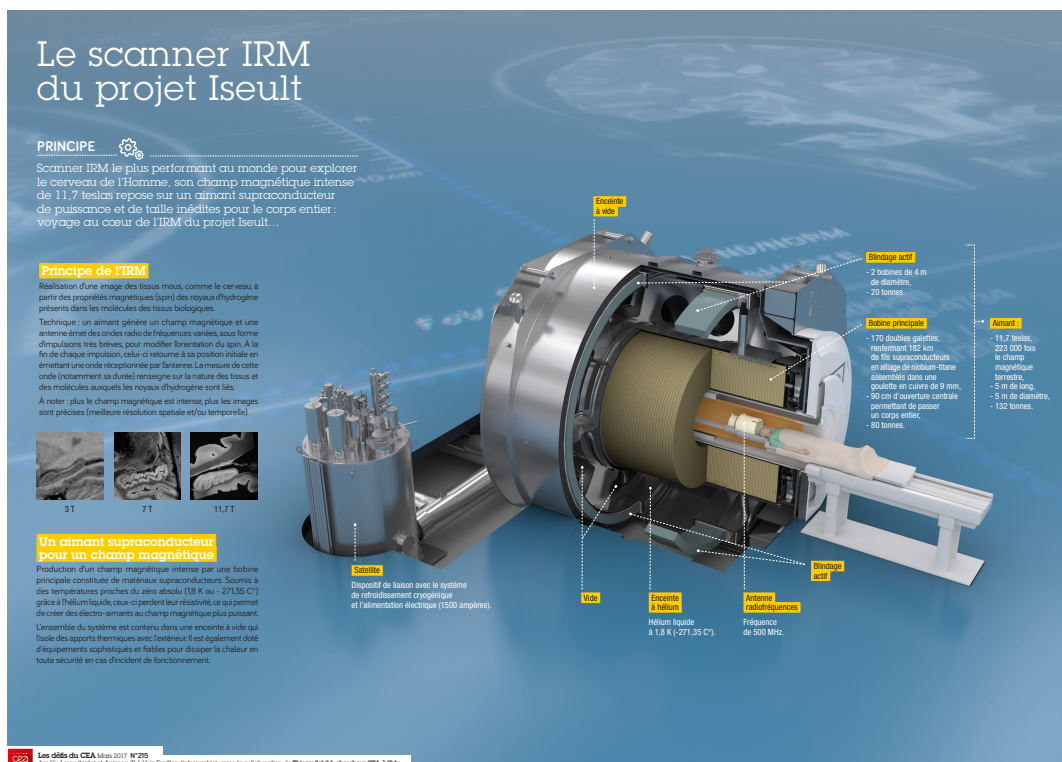


Figura 53: En la figura se muestra una imagen 3D del equipo de MRI que ha comenzado a proporcionar ya imágenes con resolución antes impensable. El imán superconductor tiene una masa de 132 Tm y está sumergido en helio líquido superfluido a 1,8 K. El campo magnético generado por este imán es 11,7 T. Se trata del equipo de RMI más grande del mundo. <https://www.cea.fr/multimedia/documents/infographies/defis-du-cea-le-scanner-irm-du-projet-iseult.pdf>.

Un equipo MRI convencional contiene entre 500 y 1000 litros de helio líquido en su interior. Aunque los modelos más modernos incorporan refrigeradores de ciclo cerrado (RC3), lo que

los hace prácticamente *zero-loss* (sin pérdidas de helio), aún existen miles de equipos MRI operativos que carecen de sistemas de recuperación de helio. Esto los convierte en una fuente importante de pérdidas de este recurso tan valioso.

Los magneto-encefalógrafos (MEG), aunque todavía no están muy extendidos, son equipos que permiten estudiar las señales magnéticas emitidas por el cerebro en respuesta a estímulos. Se utilizan para diagnosticar enfermedades funcionales del cerebro, como la epilepsia y el Alzheimer, entre otras, y complementan los diagnósticos realizados con encefalogramas eléctricos (EEG).

Un equipo MEG evapora aproximadamente una decena de litros de helio líquido al día. Debido a este elevado consumo, algunos fabricantes ya ofrecen estos equipos con la tecnología de recuperación de helio desarrollada en Zaragoza. En la Figura 17 de la TERCERA ETAPA del viaje, se muestra un equipo MEG al que se le está transfiriendo helio recuperado y licuado mediante un sistema ATL.

“Huella de carbono” de los laboratorios de RMN.

El número de equipos de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) utilizados en investigación médica y farmacéutica en todo el mundo es, en la actualidad, prácticamente incalculable. Tradicionalmente, la recuperación del helio evaporado en estos equipos ha sido desaconsejada por los propios fabricantes.

Este rechazo se debía al temor de que los sistemas de recuperación pudieran causar variaciones de presión no deseadas en los criostatos que contienen el helio líquido, donde se encuentra sumergida la bobina superconductora. Las variaciones de presión llevan asociados cambios de temperatura en el helio líquido, lo que puede provocar un fenómeno conocido como *quench*.

Un *quench* ocurre cuando el cable superconductor de la bobina, ya sea en una zona específica o en toda su extensión, supera la temperatura crítica. Cuando esto sucede, toda la energía magnética almacenada en la bobina se libera en forma de calor. En el mejor de los casos, es necesario recargar y ajustar el campo magnético que genera la bobina, una operación delicada y costosa que debe ser realizada por un especialista. Además, hay que reponer el helio evaporado durante el *quench*. En el peor de los casos, la bobina puede resultar dañada o perderse todo el helio líquido, lo que obliga a reiniciar el enfriamiento del sistema desde temperatura ambiente, consumiendo cientos de litros de helio líquido.

La tecnología desarrollada en Zaragoza ofrece una solución con total garantía, gracias a su extrema sencillez. Esta tecnología abarca desde la recuperación directa (con un número mínimo de componentes) para un número limitado de equipos RMN, hasta sistemas completos que incluyen globos de recuperación, compresores y botellas de almacenamiento a alta presión, además de la purificación del helio. De hecho, la empresa Bruker ofrece la solución HelioSmart, basada en la tecnología desarrollada en Zaragoza, como se muestra en la Figura 54.

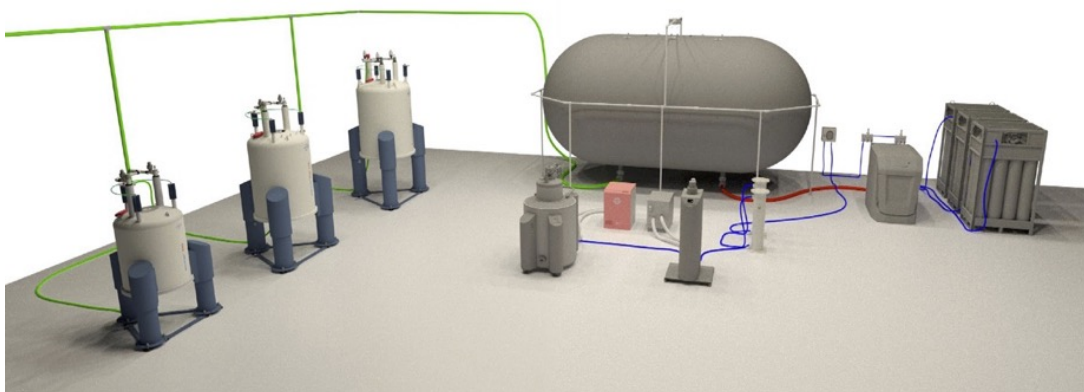


Figura 54: Tecnología HelioSmart ofertada por Bruker, que utiliza desde la más sencilla recuperación directa hasta la planta completa con ATL/NexGen's y ATP's. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/mr/helium-solutions/heliosmart-solutions.html>.


La concienciación entre investigadores y fabricantes de equipos de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) ha alcanzado un nivel significativo. Prueba de ello fue la celebración, el 29 de enero de 2025, de un simposio a nivel europeo titulado “*Helium recovery options for this scarce resource and the carbon footprint implications*” (Opciones de recuperación de helio para este recurso escaso y sus implicaciones en la huella de carbono).

En este evento participaron investigadores de diversos laboratorios europeos que ya han implementado la tecnología desarrollada en Zaragoza. Durante el simposio, se presentó una calculadora en línea que permite a cualquier laboratorio estimar la huella de carbono asociada a sus operaciones de RMN. Esta herramienta tiene en cuenta factores como el consumo de helio líquido, nitrógeno líquido, el consumo eléctrico de la consola electrónica y el resto de equipos auxiliares, como se ilustra en la Figura 55.

El ejemplo que se muestra en la Figura 55 indica que, en un laboratorio de RMN, al menos el 30 % de las emisiones totales se deben a la evaporación de helio líquido cuando no se cuenta con un sistema de recuperación. Sin embargo, esta cifra se reduce drásticamente cuando se instala un sistema ATL, como el que aparece a la izquierda en la Figura 55, el cual permite recuperar y reutilizar el helio, minimizando así las pérdidas y reduciendo significativamente la huella de carbono del laboratorio.

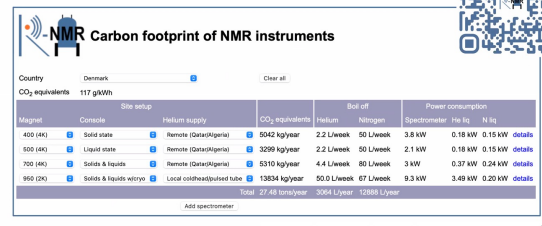
He liquefaction in Aarhus

- Current setup**
 - Only He from the 950 MHz magnet is recycled
 - ATL 160 from QuantumDesign
 - Capacity ~25 L/day
 - Balloon 28 m³
 - The balloon fills up upon filling (reduction from 4 → 3 weeks recycling period)
 - In operation since 2016
 - Average recovery 80% (hole in the balloon)
 - Estimated total saving: 20.000-25.000 L (400-500 k€)



CO₂ calculator web site

<https://csdm.dk/rmr/consumption.html>



Magnet	Console	Site setup	Helium supply	CO ₂ equivalents	Boil off	Nitrogen	Power consumption	Spectrometer	He Fc	N Fc
400 (4K)	Solid state	Remote (Qatar/Algeria)	5042 kg/year	2.2 L/week	50 L/week	3.8 kW	0.18 kW	0.15 kW	details	
500 (4K)	Liquid state	Remote (Qatar/Algeria)	3289 kg/year	2.2 L/week	50 L/week	2.1 kW	0.18 kW	0.15 kW	details	
700 (4K)	Solids & liquids	Remote (Qatar/Algeria)	5310 kg/year	4.4 L/week	80 L/week	3 kW	0.37 kW	0.24 kW	details	
950 (2K)	Solids & liquids wet cryo	Local coldhead/pulsed tube	13834 kg/year	50.0 L/week	67 L/week	9.3 kW	3.49 kW	0.20 kW	details	
Add spectrometer				Total	27.48 tons/year	3264 L/year	12888 L/year			

Figura 55: Imagen presentada por la Universidad de Aarhus (Dinamarca) en la que muestra la tecnología ATL y el sitio web en el que han puesto a disposición de cualquier laboratorio de RMN una calculadora de huella de carbono.

Grandes aceleradores de partículas, reactores de fisión y fusión nuclear.

En los aceleradores de partículas, como el LHC (Large Hadron Collider), que utiliza aproximadamente 130 toneladas de helio (90 toneladas en forma líquida en el anillo principal y los experimentos, y 44 toneladas en forma de gas recuperado), se han optimizado en la última década las técnicas de recuperación. Esto ha permitido reducir las pérdidas anuales de 40 toneladas a solo 10 toneladas. Sin embargo, estas pérdidas siguen siendo significativas si se consideran todos los aceleradores superconductores a nivel mundial.

En el caso de los reactores nucleares de fisión de escala industrial, que operan a temperaturas moderadas, el refrigerante utilizado es el CO₂. No obstante, la tendencia actual se dirige hacia los reactores de fusión más modernos, eficientes y versátiles, que operan a altas temperaturas (*High-Temperature Thermal Reactors*, HTRs). En estos reactores, el único gas refrigerante capaz de mantener la estabilidad química y nuclear requerida a tan elevadas temperaturas es el helio. Lo mismo ocurre con los reactores refrigerados por gas (*gas-cooled fast reactors*).

La demanda de helio para las nuevas generaciones de reactores de fisión, cuyas aplicaciones van más allá de la generación de electricidad (como la síntesis de hidrógeno e hidrocarburos), plantea importantes cuestiones a resolver en el futuro (Nuttall *et al.*, 2012):

¿Puede la industria actual suministrar el helio necesario para estas aplicaciones? Uno de los principales objetivos de los reactores de fisión de nueva generación es reducir la dependencia de los hidrocarburos o proporcionar energía suficiente cuando estos escaseen (hasta que la fusión comercial sea viable). Dado que la principal fuente de helio actual son los propios hidrocarburos, ¿de dónde se obtendrá el helio necesario para mantener operativos estos reactores?

El problema se agrava en el caso de los reactores de fusión, que, aunque están muy avanzados, aún se encuentran en fase de desarrollo e investigación. Mientras que la demanda media de una

central HTR es de 1 tonelada de helio por día, un reactor de fusión (con una potencia de 2,5 GW) requerirá 17 toneladas diarias (Nuttall *et al.*, 2012).

En resumen, el helio es un subproducto de la vasta e insostenible industria del gas natural, y esta situación no cambiará en las próximas décadas. Por ello, como se sugiere en Nuttall *et al.*, 2012, las grandes empresas que comercializan helio deberían adquirir pozos de gas natural para proteger sus intereses y asegurar reservas ante posibles cambios tecnológicos. Además, estos grandes usuarios deberían desarrollar sistemas de muy bajas pérdidas en sus procesos de comercialización.

Las pérdidas de helio en todas sus aplicaciones serán un gran desafío en las próximas décadas. Es el momento de implementar mejoras incrementales y disruptivas, como las descritas aquí, para garantizar un futuro sostenible.

Helium Conservation Day

Este último apartado sobre el futuro del helio pone de relieve cómo la nueva tecnología desarrollada en Zaragoza, a través de los productos comerciales ATL/NexGen, ATP y BPC, contribuye al objetivo de reducir al máximo las pérdidas de helio en aplicaciones donde es posible implementar técnicas de recuperación.

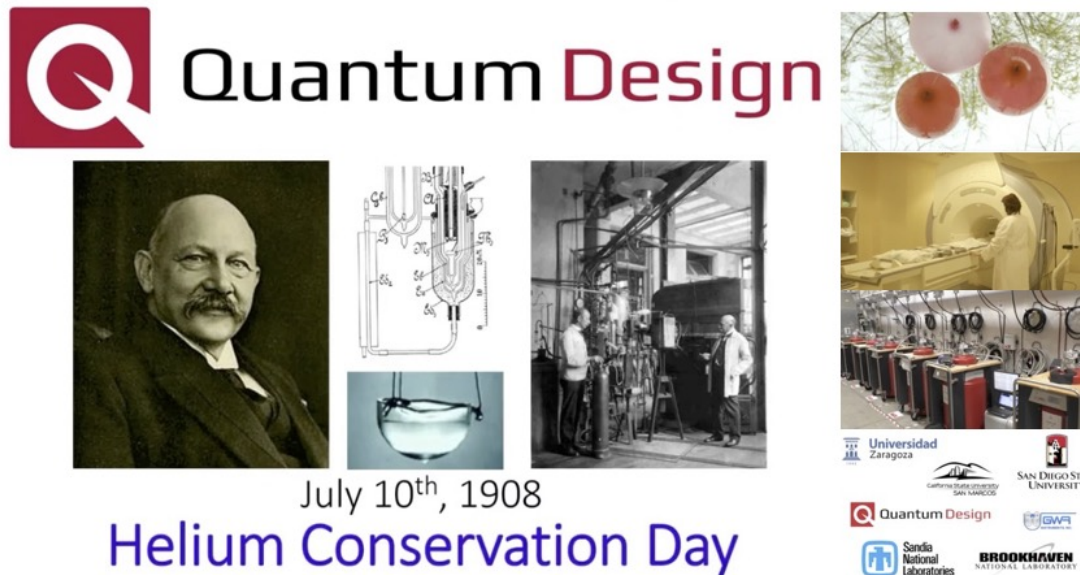


Figura 56: Declaración del día mundial de la Conservación del Helio. Izquierda: Portada del vídeo editado por *Quantum Design* con motivo de la declaración del día mundial de la Conservación del Helio: (Quantum Design, 2019): <https://www.youtube.com/watch?v=n6mJBnqyVUY>. Derecha: Instantáneas del vídeo. Las dos imágenes superiores corresponden al vídeo de la Universidad de Zaragoza y el CSIC: <https://www.youtube.com/watch?v=eBgeEUYqa1E>. Las dos inferiores corresponden a la sala de test de la fábrica de Quantum Design en San Diego y a las instituciones que colaboraron en la declaración inicial del *Helium Conservation Day* el 10 de Julio de 2019. Desde entonces se han sumado a la iniciativa Universidades, empresas y centros nacionales de todo el mundo.

En este contexto, la empresa licenciataria de la tecnología, *Quantum Design*, con nuestra participación directa y el apoyo de numerosos centros de investigación y empresas, propuso, en 2019, declarar el 10 de julio de cada año, como el Día Mundial de la Conservación del Helio (Figura 56). Esta iniciativa ha ido ganando apoyo de universidades, centros nacionales y empresas, participando en actividades de difusión y concienciación sobre la importancia de este objetivo, fundamental para la ciencia y la tecnología tanto del presente como del futuro.

Anécdotas

Este apartado refleja con fotografías y breves comentarios, anécdotas que han ocurrido a lo largo de la tercera etapa del viaje.

Patentes y publicaciones.

En 1991, una empresa estadounidense, *Lake Shore Cryotronics, Inc.* (LSC), basándose en un capítulo de libro publicado por el grupo de Física de Bajas Temperaturas de Zaragoza en mayo de ese mismo año (Rillo *et al.*, 1991), y en material de un seminario impartido por *Quantum Design* en Seúl, en 1990, presentó el 18 de mayo de 1992 una solicitud de patente en Estados Unidos. Esta solicitud (ver Figura 57) describía en detalle un susceptómetro capaz de realizar medidas en corriente alterna (ac) y corriente continua (dc) utilizando el mismo conjunto de bobinas de inducción.

El susceptómetro descrito en la solicitud de patente del **18 de marzo de 1992** era muy similar al que habíamos desarrollado en Zaragoza en colaboración con la Universidad de Leiden, y del cual habíamos proporcionado todos los detalles técnicos en el capítulo 1 del mencionado libro publicado en **mayo de 1991**, así como durante la presentación oral en el taller que dio origen a la publicación.

El seminario impartido por *Quantum Design*, también citado como referencia en la solicitud de patente de LSC, se refería a un susceptómetro ac y dc comercial, similar al nuestro, pero que incluía un sensor de campo magnético superconductor (SQUID). Ni la tecnología descrita por *Quantum Design* ni la publicada por nosotros habían sido protegidas mediante patente, ya que, en ambos casos, se trataba de mejoras incrementales de tecnologías ya descritas en la literatura. Sin embargo, una vez que LSC obtuvo la patente, en 1994, denunció a *Quantum Design*, alegando que su equipo comercial utilizaba la tecnología descrita en su patente y en nuestro artículo.

[54] **MAGNETIC PROPERTY CHARACTERIZATION SYSTEM EMPLOYING A SINGLE SENSING COIL ARRANGEMENT TO MEASURE AC SUSCEPTIBILITY AND DC MOMENT OF A SAMPLE**

[75] Inventors: **John K. Krause; Victor Wang; Bradley C. Dodrill**, all of Westerville, Ohio

[73] Assignee: **Lake Shore Cryotronics, Inc.**, Westerville, Ohio

[21] Appl. No.: **853,400**

[22] Filed: **Mar. 18, 1992**

OTHER PUBLICATIONS

Reference Material for **Quantum Design's Seminar** (Nov. 5-6, 1990, Seoul) **Woo Sin Enterprise, Inc.**

Rillo et al., "Multipurpose Cryostat for Low Temperature Magnetic and Electric Measurements of Solids," *Magnetic Susceptibility of Superconductors and Other Spin Systems*, Edited by **R. A. Hein et al.**, Plenum Press, New York, pp 1-24 **May 1991.**

Magnetic Susceptibility
of
Superconductors and
Other Spin Systems

Edited by
Robert A. Hein
Thomas L. Francavilla
and
Donald H. Liebenberg

Figura 57: La figura ilustra la portada de la solicitud de patente referida en el texto, las referencias (*Other Publications*) al seminario de *Quantum Design* y al capítulo de libro publicado por el grupo de Física de Bajas temperaturas de la Universidad de Zaragoza. A la derecha se muestra la portada del libro, en cuyo capítulo 1 se describe el sistema que fue patentado por *Lake Shore Cryotronics*. En la publicación del grupo de Zaragoza hay coautores de la Universidad de Leiden, dado que el desarrollo hecho en Zaragoza era derivado de tecnología desarrollada previamente en Leiden.

Lo más sorprendente es que esto sea posible, y lo es, pero solo en Estados Unidos. Las leyes estadounidenses permiten solicitar patentes sobre tecnologías publicadas por terceros, siempre que la solicitud se presente dentro del año siguiente a la publicación. Por eso, LSC presentó su solicitud de patente en marzo de 1992, antes de que se cumpliera un año desde la publicación del libro que incluía nuestro artículo.

Quantum Design solicitó ayuda a la Universidad de Zaragoza para cuestionar la validez de la patente de *Lake Shore Cryotronics* (LSC) en Estados Unidos. Para ello, se intentó utilizar publicaciones anteriores que demostraran la existencia de tecnologías similares. Sin embargo, estas publicaciones eran de un ámbito muy restringido y no fueron consideradas por las autoridades competentes para invalidar la patente de LSC.

Casi 20 años después, en 2010, la Universidad de Zaragoza y el CSIC volvieron a coincidir con *Quantum Design* en el ámbito de la protección industrial de nuevas tecnologías. En esta

oportunidad, *Quantum Design* se interesó por la tecnología de licuefacción de helio que habíamos desarrollado y que ya habíamos demostrado a nivel de prototipo en nuestro laboratorio.

A diferencia de la situación anterior, esta vez, las dos patentes principales sobre la nueva tecnología de licuefacción de helio ya habían sido solicitadas por la Universidad de Zaragoza y el CSIC. Actualmente, estas patentes están concedidas y vigentes hasta 2030, con año de prioridad 2010, tanto en Europa (Inglaterra, Francia, Alemania y España) como en China, Japón y Estados Unidos (Rillo y Tocado, 2010a; Rillo *et al.*, 2010b).

Por motivos obvios, en esta ocasión no publicamos las novedades científicas sobre la tecnología patentada hasta más adelante, en 2015 (Rillo *et al.*, 2015), cuando los productos comerciales ya estaban bien establecidos en el mercado. Además, desarrollos más recientes, también patentados (Sesé y Rillo, 2019), pero aún no comercializados, todavía no han sido publicados en revistas científicas.

La belleza de la sencillez. El Principio KISS.

En 2009, cuando los primeros prototipos pre-comerciales de licuefactores, diseñados por nosotros y fabricados por *GWR Instruments* en San Diego, se probaron en Zaragoza, ocurrió algo revelador. A pesar de que nuestra propuesta inicial era no utilizar intercambiadores de ningún tipo, los ingenieros de GWR enviaron a Zaragoza varios bloques de cobre y aluminio, junto con fotografías que explicaban cómo fijarlos alrededor de la cabeza criogénica.

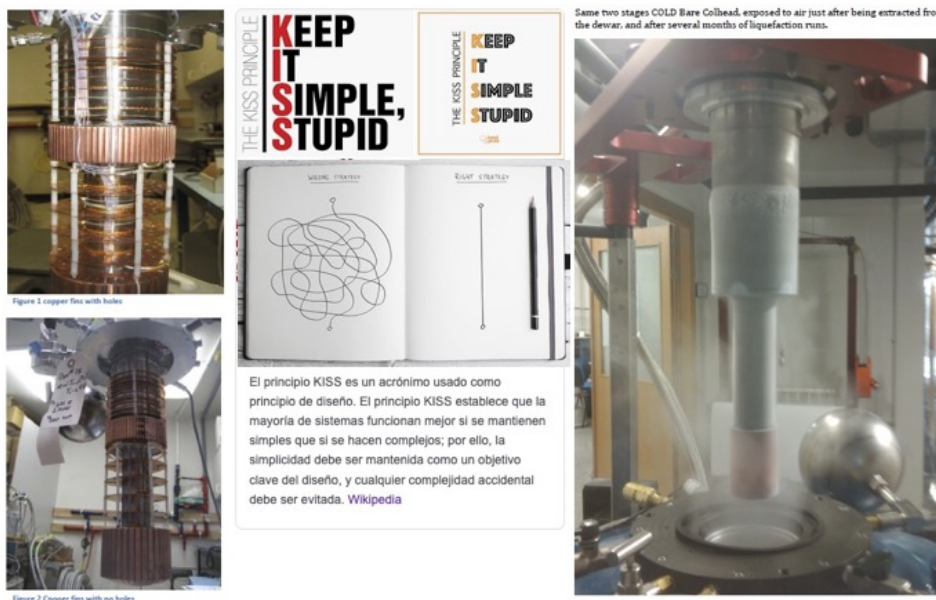


Figura 58: Principio de diseño KISS aplicado al procedimiento de licuefacción de la tecnología ATL desarrollada en Zaragoza: “La mayoría de sistemas funcionan mejor si se mantienen simples que si se hacen complejos”. En este caso había un motivo basado en termodinámica para mantener el sistema lo más simple posible. Izquierda: Bloques de cobre que GWR proponía instalar alrededor de la cabeza criogénica. Derecha: Cabeza criogénica “desnuda” recién extraída de un ATL.

Sin embargo, siguiendo nuestras ideas y cálculos, no instalamos ningún bloque o intercambiador alrededor de la cabeza criogénica. Después de los primeros experimentos, enviamos a GWR una fotografía de la cabeza criogénica recién extraída de un licuefactor, completamente “desnuda”. Los resultados de eficiencia eran espectaculares. Al verlos, los ingenieros de GWR en San Diego comentaron que, en Zaragoza, habíamos aplicado el conocido principio KISS (*Keep It Simple and Short*) de diseño en ingeniería (Figura 58), también denominado popularmente como *Keep It Simple, Stupid*.

Presentación de la tecnología en Portland (Oregón-USA). ¿Dónde está el intercambiador?

En 2012, durante la Conferencia Internacional de Superconductividad Aplicada celebrada en Portland (Oregón, EEUU), *Quantum Design* presentó el nuevo producto ATL en su stand. El evento reunió a los responsables de *Quantum Design*, *GWR Instruments*, *Sumitomo* y del CSIC y la Universidad de Zaragoza.

Advanced Technology Liquefier (ATL)

Product presentation at ASC 2012, Portland, USA



Figura 59: Presentación de la tecnología en la *Applied Superconductivity Conference* en Portland, USA. En el stand de *Quantum Design* un ATL al que se podía extraer la cabeza criogénica modificada por el fabricante, *Sumitomo*. En la fotografía personal de *Sumitomo*, *Quantum Design*, GWR y de CSIC-Universidad de Zaragoza.

En el stand (Figura 59) se exhibió un prototipo comercial del ATL, diseñado para permitir la extracción de la cabeza criogénica “modificada” del refrigerador de ciclo cerrado (RC3),

proporcionada por *Sumitomo* para la ocasión. Esta demostración práctica permitió a los asistentes observar de cerca la innovadora tecnología y su diseño, destacando, para asombro de todos, la ausencia de intercambiadores tradicionales, un aspecto clave de su eficiencia.

Durante la presentación, la pregunta más frecuente entre los investigadores interesados en la tecnología, los expertos en técnicas criogénicas y los representantes comerciales fue siempre la misma: “**¿Dónde está el intercambiador?**”. La respuesta sincera de “**Mirad... No hay intercambiador**” generó reacciones de todo tipo, incluyendo miradas de escepticismo e incluso malas caras, probablemente porque muchos pensaban que les estábamos ocultando parte de la verdad.

⁴He-volution.

En 2013, la Universidad de Leiden adquirió un ATL y un ATP para probar la nueva tecnología desarrollada en Zaragoza. Estos dos equipos se instalaron en un pequeño espacio que quedaba libre tras el comienzo del desmantelamiento del gigantesco licuefactor industrial, que había estado en uso durante décadas y hasta ese momento. Dicho licuefactor industrial presentaba enormes y recurrentes problemas de mantenimiento.

El responsable técnico de la planta industrial, quien aparece en la fotografía (Figura 60) a la derecha, justo debajo de la fotografía del Premio Nobel, profesor Heike Kamerlingh Onnes, exclamó con ironía: “¡Justo ahora, que me jubilo!”. Esta frase reflejaba tanto la sorpresa como el reconocimiento de que la nueva tecnología representaba un cambio significativo en el campo de la criogenia.

La evolución de la tecnología queda claramente reflejada en la Figura 60, donde se aprecia la enorme diferencia de tamaño entre el antiguo licuefactor industrial y los nuevos equipos ATL. Este contraste fue tan impactante que Quantum Design lo plasmó en un logo informal (visible abajo a la izquierda en la fotografía) con la inscripción “⁴He-volution” diseñado para celebrar el lanzamiento de esta innovadora tecnología al mercado en elementos de *merchandising*.

En la Figura 61, los profesores Jan Huiskamp y Jos de Jongh de la Universidad de Leiden, junto con el profesor Domingo González de la Universidad de Zaragoza, en 2016 en el laboratorio de Criogenia de Leiden, observando el funcionamiento de uno de los 5 ATLs que la universidad adquirió para reemplazar por completo su antigua planta industrial, junto con 3 ATPs.



Figura 60: Universidad de Leiden. Instalación del primer ATL y primer ATP para sustituir a la tecnología industrial de la que se disponía en 2013. De izquierda a derecha, delante: Mónica Martínez (*Quantum Design Europe*), Conrado Rillo (INMA, CSIC-UNIZAR), Federica Galli (Universidad de Leiden), Hans van Kuyk (Universidad de Leiden); detrás: Javier Sesé (INMA, CSIC-UNIZAR), Inga Potsch (*Quantum Design Europe*), Wilfred van der Geest (Universidad de Leiden); Izquierda-abajo: Logo diseñado por *Quantum Design* para la presentación de la tecnología a todo el personal de *Quantum Design*, *GWR Instruments* y Universidad de Zaragoza, en 2012, en su sede de San Diego.

Resumen y conclusiones.

El helio, elemento clave en avances científicos y tecnológicos, ha sido el protagonista de este discurso a través de un viaje histórico y científico, desde su descubrimiento en el Sol hasta su aplicación en criogenia, medicina e industria.

En las diferentes etapas del viaje científico hemos recordado que:

- El helio fue identificado en 1868 durante un eclipse solar (línea espectral D3) y aislado en la Tierra por William Ramsay en 1895. Heike Kamerlingh Onnes logró licuarlo en 1908, marcando el inicio de la física de bajas temperaturas.
- Zaragoza integró la criogenia en los años 70 con equipos donados por instituciones internacionales. La dependencia de tecnologías complejas e ineficientes motivó la búsqueda de soluciones innovadoras.



Figura 61: Profesores Jan Huiskamp y Jos de Jongh de Leiden, y el Profesor Domingo González de Zaragoza, en 2016, en el laboratorio de Criogenia de la Universidad de Leiden, observando el funcionamiento de uno de los ATLS que Leiden adquirió para sustituir completamente la planta industrial.

El núcleo del discurso se ha centrado en la innovación desarrollada en Zaragoza para licuar, recuperar y purificar helio de forma eficiente y sostenible, con una nueva tecnología pionera, comercializada a nivel mundial, cuyos componentes principales son:

- **ATL-ATLi (Advanced Technology Liquefiers)**: licuefactores basados en refrigeradores criogénicos de ciclo cerrado (RC3), que licúan helio con hasta un 100 % de eficiencia, adaptándose a demandas de hasta 2 l/h por unidad. Con ellos se pueden diseñar plantas de recuperación de helio modulares y escalables, mucho más eficientes que las plantas industriales.
- **ATP (Advanced Technology Purifier)**: purificador que elimina impurezas como hidrógeno y aire, resolviendo el problema global de bloqueos en equipos médicos y científicos.
- **BPC (Back Pressure Controller)**: regulador de presión para **recuperación directa (DR)**, reduciendo pérdidas en laboratorios y hospitales mediante instalaciones tan sencillas que tan solo precisan de dos elementos, el BPC y el ATL. Además, estos equipos trabajan

a presión atmosférica, sin necesidad de globos, compresores, botellas de alta presión, y purificadores.

Este viaje por la innovación no hubiera sido posible sin la dedicación excepcional del personal técnico y de gestión, cuyo trabajo minucioso y compromiso han sido pilares invisibles pero fundamentales. Desde los talleres de electrónica hasta los laboratorios de criogenia, su “saber hacer” permitió transformar ideas teóricas en realidades tecnológicas. Su papel, aunque a menudo silenciado, es un recordatorio de que la ciencia avanza gracias a equipos multidisciplinares donde cada detalle, cada ajuste y cada solución práctica cuenta tanto como el descubrimiento mismo.

Como conclusión final, Zaragoza se ha consolidado como referente en criogenia, cerrando un ciclo histórico que comenzó en Leiden. La simplicidad (Principio KISS), la colaboración internacional y el enfoque en sostenibilidad han permitido soluciones que hoy benefician a laboratorios, hospitales y empresas en más de 20 países. El legado de este viaje subraya que la ciencia, impulsada por la curiosidad y la perseverancia, trasciende fronteras y generaciones.

Agradecimientos

Quiero cerrar con un reconocimiento sincero a quienes han sostenido este camino en silencio. A mi familia, especialmente a Sophie, Selena y Carlota, a mis padres Josefa y Antonio y a mi hermana Lola, por su paciencia infinita ante mis ausencias físicas y mentales, por los viajes, las noches de trabajo y los fines de semana robados a su compañía. A mis amigos ‘biciclistas’, cómplices de rutas y montañas, donde desconectaba para volver con más fuerza. A los ‘García’ (Jorge, Mauricio y Nacho), hermanos de aventuras en las “Vales”, y a mis raíces en Calanda, donde Lami, Gonzalo, Lucía, Isidoro y tantos otros me recuerdan que la ciencia no es más importante que los lazos que nos hacen humanos. Gracias por ser mi red cuando el peso de los problemas científicos me hacía olvidar lo esencial.

Finalmente, sin el apoyo económico decidido de las instituciones, este viaje por la innovación, sencillamente, no hubiera ni empezado. Así, la investigación llevada a cabo en Zaragoza para el desarrollo de la tecnología de licuefacción y purificación de helio ha sido posible gracias a los proyectos siguientes:

- IPT-2012-0442-420000 y MAT2015-64083-R, del “Ministerio de Economía y Competitividad”.
- UNZA10-4E-590, del Gobierno de Aragón.

– OTRI 2011-2021/0185, cofinanciado por Quantum Design, Inc.

Bibliografía

Abrikosova I.I. and Shal'nikov A.I. The purity of liquid helium, *Cryogenics* (Guildf). 1971. 2 : Vol. 11. pp. 137–138.

Barron R.F. Cryogenic systems, en *Cryogenic systems*. : Clarendon Press, 1985.

Collins S.C. Helium Refrigerator and Liquefier, *Advances in Cryogenic Engineering*, 1966, pp. 11–15.

Gabal M. et al. Helium Contamination Through Polymeric Walls *Phys Procedia*. 2015. Vol. 67. pp. 141–146.

Gabal M. et al. Hydrogen-Free Liquid-Helium Recovery Plants: the solution for Low-Temperature Flow Impedance Blocking *Phys. Rev. Appl.* 2016. 2 : Vol. 6. p. 24017.

Gabal M. *New cryocooler-based helium liquefaction and purification techniques. From recovered gas to ultra-pure liquid.* Zaragoza : Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2017.

Gifford H.O. McMahon and W.E. A New Low-temperature gas expansion cycle *Adv. Cryog. Eng.*, vol. 5. 1960. pp. 354–367.

Gschneidner G. Low Temperature Cryocooler Regenerator Materials *Cryocoolers* 12, no. 13, 2002. pp. 457–465.

Jewell C. and McClintock P.V.E. A note on the purity of liquid helium-4 *Cryogenics* (Guildf), vol. 19, no. 11. 1979. pp. 682–683.

Kuriyama T., Takahashi M. and Nakagome H. Helium Liquefaction by a Two-Stage Gifford-McMahon Refrigerator Using New Regenerator Material of Er₃Ni *Jpn. J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 31. pp. L1206–L1208.

Lemmon E.W., Huber M.L. and McLinden M.O. *REFPROP "NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamics and Transport Properties*, version 9.1. Gaithersburg : Natl. Inst. Stand. Technol., 2013.

Nagao M., Inaguchi T. and Yoshimura H. Helium Liquefaction by a Gifford-McMahon Cycle Cryocooler *Adv. Cryog. Eng.*. 1990. Vol. 35B. pp. 1251–1260.

Nath Biman B. *The Story of Helium and the Birth of Astrophysics*: Springer, 2013.

Nuttall W.J., Clarke R.H. and Glowacki B.A. *The Future of Helium as a Natural Resource*. Oxon, Routledge, 2012.

Onnes H. K. Further experiments with liquid helium. C. On the lowest temperature yet obtained [Journal]. *Leiden : Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden*, 1908. 108.

Quantum Design EUROPE *Helium recovery and liquefaction plants*, marzo 25, 2025. <https://qd-europe.com/es/en/product/helium-recovery-and-liquefaction-plants/>.

Quantum Design *Helium Conservation Day 2019*, 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=n6mJBnqyVUY>.

Quantum Design NORTH AMERICA *Quantum Design NexGen Liquefiers and ATP Purifier*, marzo 2025. https://qdusa.com/products/helium_liquefiers.html#productLiquefiers.

Quantum Design NORTH AMERICA *Quantum Design NexGen Liquefiers and ATP Purifier*, marzo 25, 2025. https://qdusa.com/products/helium_liquefiers.html#productPurifiers.

Rillo C. et al. Enhancement of the Liquefaction Rate in Small-Scale Helium Liquefiers Working Near and Above the Critical Point *Phys. Rev. Appl.* vol 3, no 5,. 2015. pp. 051001-1 – 051001-5.

Rillo C. et al. *Gas Liquefaction System and Method* [Patent]: PCT/US2011/034842, EP11720246.5, US13/801960 , JP20130509151, CN2011833135. Mayo 3, 2010b.

Rillo C. et al. Multipurpose Cryostat for Low Temperature Magnetic and Electric Measurements of Solids, en *Magnetic Susceptibility of Superconductors and Other Spin Systems*, Hein R.A., Francavilla T.L. and Liebenberg D.H. New York : Plenum Press, 1991.

Rillo C. and Tocado L. *Helium Recovery Plant* [Patent]: ES200930904, PCT/ES2010/070632, EP10837077.6, US13/452630, JP20120535886, CN2010848560. Septiembre 28, 2010a.

Rillo C., Diederichs J. and Simmonds M. *Apparatus and Method for Purifying Gases and Method for Regenerating the Same* [Patent] : US 14/496,821, EP14196895.8, CA20152899802, JP20140262714, CN2015189174. Septiembre 25, 2014.

Schmidt-Wellenburg P. Helium liquefaction with a commercial 4K Gifford-McMahon cryocooler *Cryogenics* (Guildf)., vol. 46, no. 11. 2006. pp. 799–803.

Sciver Steven W. Van *Helium Cryogenics*, Springer, 2012.

Sears Wheeler M. “Bo” Helium. *The disappearing Element*, Springer, 2015.

Sesé J. and Rillo C. *Cryocooler Suitable for Gas Liquefaction Applications, Gas Liquefaction System and Method Comprising the Same* [Patent]: PCT/EP2019/062838. - Mayo 17, 2019.

SHI-Cryogenics Group RDE-418D4 4K Cryocooler Series. Marzo 22, 2025. <https://shicryogenics.com/product/rde-418d4-4k-cryocooler-series/>.

SHI-Cryogenics Group RDK-415D2 4K Cryocooler Series. Marzo 22, 2025. <https://shicryogenics.com/product/rdk-415d2-4k-cryocooler-series/>.

- Spagna S. et al.** Cryocoolers for Helium Liquefaction en *Cryocoolers. Theory and Applications*, Atrey M.D., Cham, Springer, 2020.
- ter Brake H.J.M., Radebaugh, R.** Foundations of Cryocoolers 2016, *Short course 19th International Cryocooler Conference*. 2016.
- Thummes G., Wang C. and Heiden C.** Small scale ^4He liquefaction using a two-stage 4K pulse tube cooler *Cryogenics*. 1998. Vol. 38. pp. 337–342.
- Waele A.T.A. M. de** Basic Operation of Cryocoolers and Related Thermal Machines *J. Low Temp. Phys.*, vol. 164 no 5-6. 2011. pp. 179–236.
- Waltenberg K.** Helium as a critical commodity:opportunities in the Northern Territory *Geosci. Aust.*. 2015.
- Wang C.** Helium liquefaction with a 4 K pulse tube cryocooler *Cryogenics*. 2001. Vol. 41. pp. 491–496.
- Wang C.** Small scale helium liquefaction systems *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 150, no. 1., 2009. p. 12053.