

DE LOS CUANTOS A LAS ESTRELLAS: 100 AÑOS DE HUELLAS EN LA EXPLORACIÓN DEL UNIVERSO

J. Grisales-Casadiegos^{a,*}

^a Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato, Apdo. Postal 144, 36000 Guanajuato,
México. J.grisalescasadiegos@ugto.mx

Resumen

En este artículo realizo una revisión de los conceptos más fundamentales que permiten comprender cómo la astronomía moderna se fundamenta en los principios de la mecánica cuántica, abriendo una nueva ventana a la exploración del universo, permitiéndonos ver mucho más allá de nuestros sentidos. Esta rama de la física no solo cambió la forma como interactuamos con la naturaleza a través de la tecnología, también transformó nuestra visión del mundo. Este año, declarado por la UNESCO como el *año internacional de la ciencia y la tecnología cuántica*, es una oportunidad para aunar esfuerzos en concienciar al público general sobre su impacto pasado y futuro. En esta ocasión, será a través de la astronomía.

Palabras clave: Mecánica cuántica, espectroscopía, astronomía moderna, historia de la ciencia.

FROM QUANTUM TO STARS: 100 YEARS OF FOOTPRINTS IN THE EXPLORATION OF THE UNIVERSE

Abstract

In this article, I review the most fundamental concepts that allow us to understand how modern astronomy is based on the principles of quantum mechanics, opening a new window to the exploration of the universe and allowing us to see far beyond our senses. This branch of physics has not only changed the way we interact with nature through technology, it has also transformed our view of the world. This year, declared by UNESCO as the International Year of Quantum Science and Technology, is an opportunity to join forces in raising public awareness of its past and future impact. On this occasion, it will be through astronomy.

Keywords: Quantum mechanics; spectroscopy; modern astronomy; history of science.

1. Introducción

La "física cuántica" es un concepto que ha alcanzado un significado propio en la cultura popular con el pasar de los años. Principalmente, por la aparente simplicidad de sus resultados en contraste con una evidente complejidad en su formalidad. La observación de fenómenos contraintuitivos ha despertado la curiosidad hasta del espectador menos interesado por la ciencia. Esto ha convertido a esta rama de la física en uno de los misterios más convenientes para el mundo de la pseudociencia y la charlatanería.

Sin embargo, el hecho de que haya cobrado vida propia en el imaginario colectivo (aun con conceptos erróneos en la mayoría de los casos), tiene poderosos y obvios motivos. Principalmente porque la física cuántica es uno de los cimientos con el que se sostiene nuestra sociedad, y es imposible no hablar de ella.

Nos sorprendemos, siempre que nos sentamos por un momento a pensar rigurosamente en cómo sería el mundo hoy si la física cuántica no se hubiera desarrollado. Aún más ¿Cómo sería la astronomía? En esta ocasión, quiero hacer ese importante ejercicio con usted, lector. Pero antes de abordar estas cuestiones debemos entrar en materia

construyendo un significado común. Comencemos por el principio.

2. Los átomos y la luz

Hubo diversos momentos en el pasado de nuestra especie en donde comenzamos a comprender e incluso dimensionar que había un universo material mucho más allá de lo que los sentidos nos mostraban. Las antiguas culturas humanas, en medio de sus diversas cosmovisiones, desarrollaron explicaciones de la materia y de su interacción con la luz (Aveni, 2021).

Por otro lado, a diferencia del mito, la ciencia se sustenta en conceptos que requieren comprobación y reproducibilidad sin excepciones. Desde esta óptica, uno de los primeros grandes avances en la comprensión de la materia ocurrió en 1987. En ese año, Joseph John Thomson experimentando con un tubo de rayos catódicos (Figura 1), descubrió que dentro de los átomos hay partículas diminutas con carga eléctrica a las que llamó electrones. Subsecuentes experimentos, dieron luz sobre la existencia de un núcleo atómico, de carga eléctrica

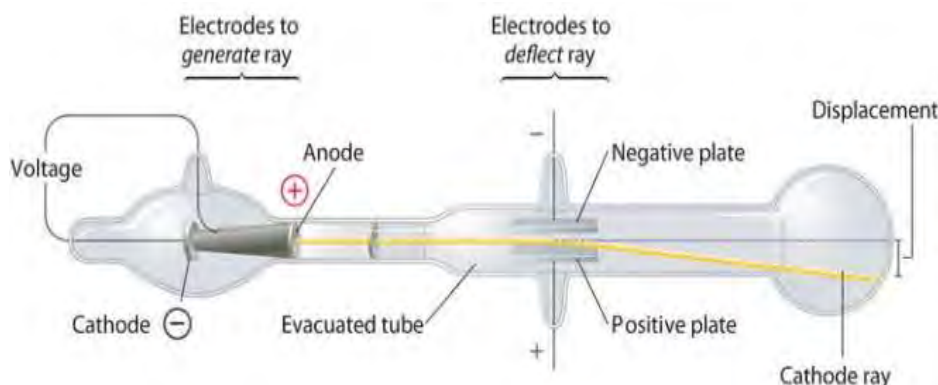


Figura 1. Esquema del experimento de Thompson, se observa la desviación de los rayos catódicos (amarillo) por un campo eléctrico. La deflexión observada del haz en la dirección del cátodo positivo es lo que demuestra que tienen carga negativa. CC BY-SA-NC

positiva y además de una componente neutra (Feynman, 1963).

Por otro lado, ya hacía siglos que se venía experimentando con la luz. Intuitivamente, entendemos a la luz como algo etéreo, algo con lo que todo interactúa, pero no podemos tocar, pesar o retener. Para el año 1800, los astrónomos William y Caroline Herschel descubrieron la radiación infrarroja, que se podía medir, pero no ver. Lo lograron al dispersar la luz solar blanca en los colores del arcoíris, ubicando un termómetro más allá del rojo típico observado (Figura 2).

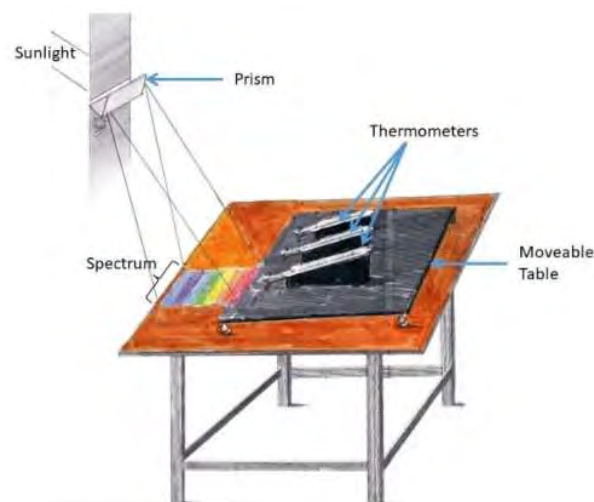


Figura 2. Montaje experimental de Hershell.

Fuente: The arena, 2024

Muy cercano a este descubrimiento, pero usando placas cubiertas de cloruro de plata, el químico Johann Wilhelm Ritter observó que estas reaccionaban si las aproximaba justo más allá del violeta del arcoíris. Con esto descubre otra radiación invisible: la ultravioleta. Ya en 1886, contemporáneo a

Thompson el físico Heinrich Hertz construye un aparato capaz de generar y captar otro tipo de radiación invisible que hoy conocemos como ondas de radio y microondas (Figura 3).

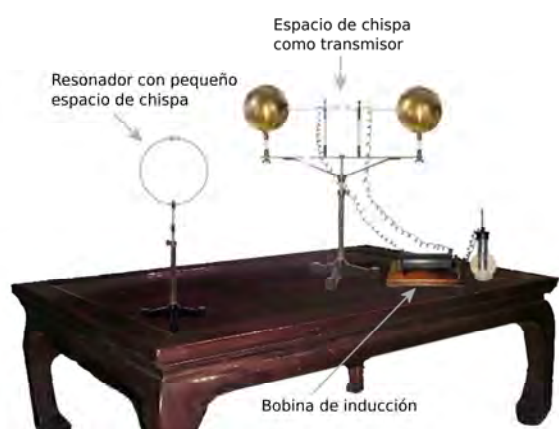


Figura 3. Montaje del experimento de Hertz. CC BY-SA-NC

Estos descubrimientos, que continúan durante el siglo XIX se creían inconexos hasta 1865. Para ese año, el físico James Clerk Maxwell demostró matemáticamente que los campos eléctricos y magnéticos acoplados forman ondas que viajan por el espacio sin un medio que las propague. A esto le llamó *Ondas Electromagnéticas* cuya velocidad es exactamente la velocidad de la luz. Este desarrollo llevó a la sorprendente conclusión de que todas las radiaciones descubiertas hasta la fecha son manifestaciones de este nuevo tipo de onda. De esta manera el arcoíris es solo la parte visible por el ojo humano dentro un gran espectro (Figura 4). En la

naturaleza existe la luz visible y la luz invisible (Bennett et al 2023).

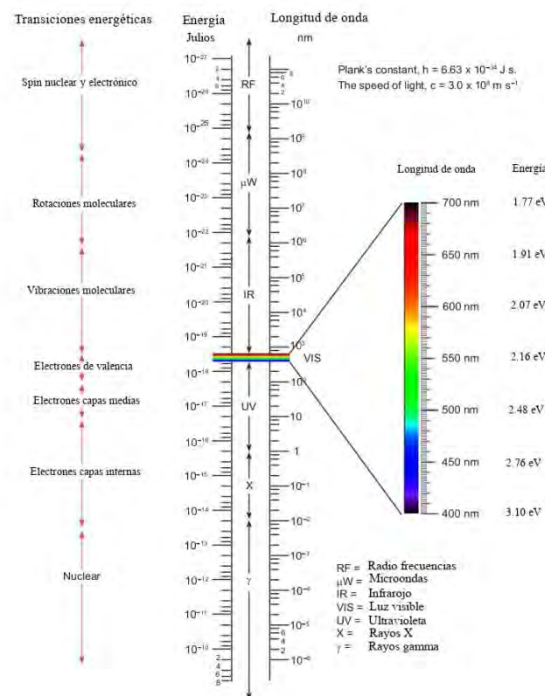


Figura 4. Espectro electromagnético. Se muestra un esquema comparativo entre longitud de la onda, la energía en Julios con una ampliación al espectro visible (arcoíris). A la izquierda se muestran el tipo de transiciones energéticas que ocurren en cada nivel. CC BY-SA-NC

3. Relación entre la materia y la luz

Hasta aquí, el estudio de la composición del átomo y el de la naturaleza de la luz parecen no estar relacionados. Sin embargo, teniendo en cuenta que la luz en última instancia es emitida por la materia, es inevitable pensar

¿qué papel tiene entonces la luz en la composición y estructura interna del átomo? ¿Tiene algún sentido esta pregunta? La respuesta es un rotundo sí, y su explicación va de la mano de uno de los problemas más coyunturales para la física del siglo XX y fue el de la radiación de cuerpo negro.

Sabemos que los materiales u objetos a alcanzar una cierta temperatura irradian luz y calor. Este problema, fue un enigma sin resolver hasta 1900, cuando Max Planck propuso que la energía que irradiaban estos

objetos solo podía emitirse en paquetes o cantidades fijas, múltiplos de un valor constante (la famosa constante de plank, h). A estos paquetes los llamó *cuantos* (Figura 5). En 1905, Albert Einstein usando este concepto, propuso que la luz estaba formada por cuantos de energía (fotones) capaces de interactuar con los átomos (De la Peña, 2014). ¡Los fotones podrían entonces alterar la estructura de la materia!

Esta maravillosa conexión marcó el comienzo de la física moderna, una colección de

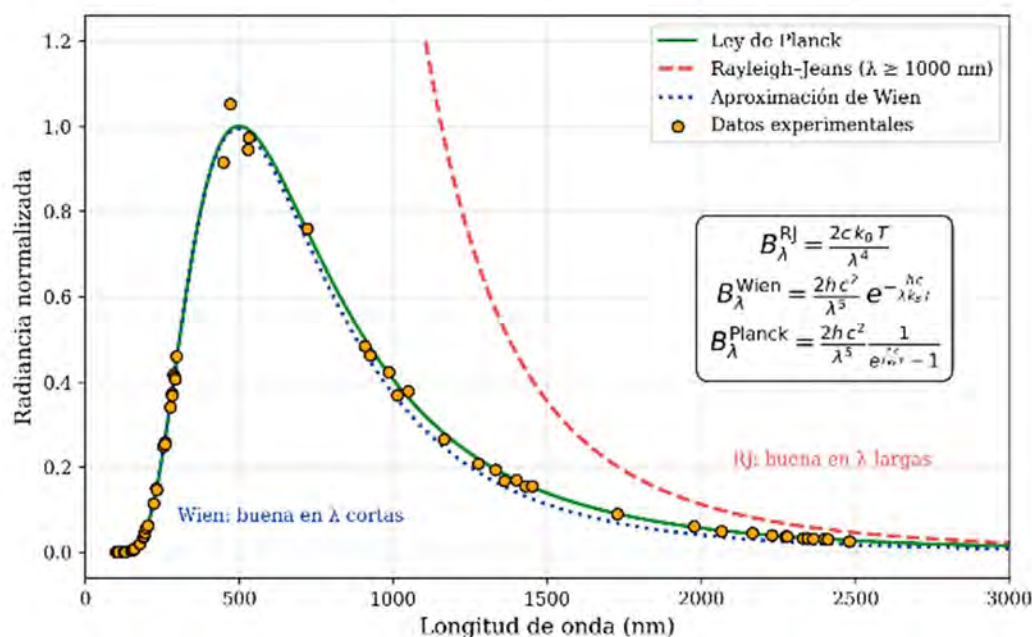


Figura 5. Distribución espectral de la radiación para una estrella como el Sol ($T=5800K$) En puntos amarillos datos simulados para esta temperatura, en verde, la ley de Plank que se ajusta a los datos experimentales tanto a bajas como altas longitudes de onda, en azul la aproximación de Wien válida a longitudes de onda cortas, y en rojo la aproximación de Rayleigh–Jeans que diverge rápidamente a longitudes de onda cortas.

conceptos soportados a través de evidencia experimental, que nos permitieron tener un dominio profundo de la naturaleza.

4. Nueva era para la ciencia

A finales del siglo XIX ya se sabía que los átomos producían espectros de líneas bien definidas (Figura 6). No obstante, hacía falta una explicación que predijera las posiciones tan específicas que se observaban para cada elemento.

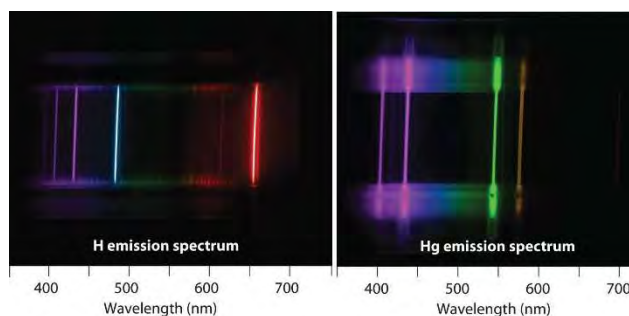


Figura 6. Espectros de emisión obtenidos a través de lámparas de descarga de baja presión.

A la izquierda se observan las líneas correspondientes al espectro de emisión del hidrógeno. A la derecha las líneas correspondientes al espectro del mercurio.

El misterio no duraría mucho tiempo puesto que en 1913 el físico Niels Bohr presentó al mundo un modelo atómico que resolvía el problema. En su modelo, los electrones estaban distribuidos alrededor del núcleo con

niveles de energía bien definidos, pudiendo saltar de un nivel a otro emitiendo o absorbiendo un fotón que coincidiera con la diferencia entre esos niveles (Figura 7).

El trabajo de Bohr y posteriores dio lugar al descubrimiento de fenómenos fundamentales como la dualidad onda-partícula, el principio de exclusión de Pauli, principio de superposición, el principio de incertidumbre, el efecto túnel, y el spin del electrón que constituyen la columna vertebral de la física cuántica tal y como la conocemos (definiciones en la sección 7).

Todos estos descubrimientos descritos anteriormente generaron un impacto en la tecnología: La explicación del efecto fotoeléctrico propuesta por Einstein dio lugar a la creación de las primeras celdas fotovoltaicas que no son otra cosa que dispositivos capaces de convertir la luz en corriente eléctrica. El entendimiento cada vez más refinado de la cuantización de niveles de energía atómicos y del principio de incertidumbre permitió el desarrollo de los láseres, la comunicación por fibra óptica y los relojes atómicos que regulan el GPS y las redes de telecomunicaciones.

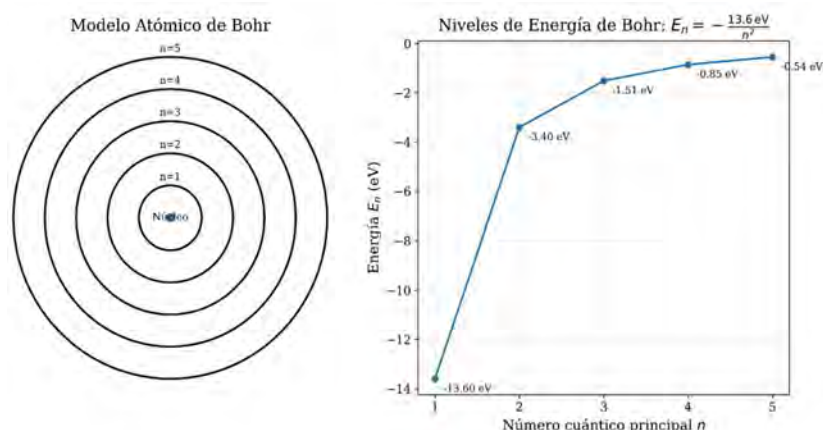


Figura 7. Esquema representativo del modelo atómico de Bohr. A la derecha se muestra una representación de las órbitas circulares permitidas para un electrón alrededor del núcleo según los números cuánticos principales $n=1$ a $n=5$. A la izquierda se muestran de energía para estos cinco primeros niveles.

El principio de exclusión de Pauli explica las propiedades electrónicas que aprovechamos en los semiconductores, y que son la base de todos los transistores y circuitos integrados. Además, hace posible los LEDs y pantallas de televisores y celulares. El spin del electrón es la base de los dispositivos de resonancia magnética usados para diagnósticos médicos de alta resolución. Adicionalmente, muchos otros descubrimientos acerca de propiedades de partículas subatómicas son usados a diario en otros dispositivos médicos y comerciales (Bennett et al 2023).

5. La espectroscopía en la astronomía

Los mismos principios que gobiernan la materia han abierto una ventana al cosmos sin

precedentes. Antes del desarrollo de la física moderna, la astronomía se apoyaba de tres grandes pilares: La astrometría, donde se medían posiciones y brillos globales de estrellas y objetos celestes. El estudio de las órbitas y la dinámica newtoniana, a través de la determinación de trayectorias de planetas y cometas. Y por último la fotografía / curvas de luz, donde las placas fotosensibles permitían registrar variaciones de brillo (Karttunen, 2017). De esta forma, podíamos determinar dónde y cuánto brillaba una fuente, pero no por qué ni cómo se generaba esa luz.

Con la introducción del concepto de niveles de energía discretos, fue posible modelar con precisión las curvas de emisión de estrellas,

los discos de acreción y atmósferas planetarias (Rieke, 2012).

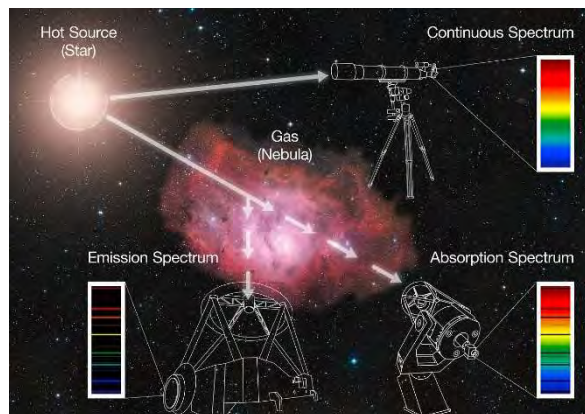


Figura 8. Esquema ilustrativo de tipos de espectros obtenidos en astronomía. Esquema ilustrativo de tipos de espectros obtenidos en astronomía. En la esquina superior derecha el espectro continuo, que muestra una distribución ininterrumpida de longitudes de onda. Abajo a la izquierda, un espectro de emisión, generado por gas excitado tal y como en el ejemplo de la Figura 6. Finalmente, abajo a la derecha se observa un espectro de absorción, que se produce cuando la luz atraviesa alguna capa de gas, este absorbe en ciertas longitudes de onda dejando líneas oscuras en el continuo. Fuente:

Nasa Science. (s.f.)

Este mismo marco conceptual explica el bombeo radiativo que genera los máseres astronómicos de OH, H₂O o CH₃OH en regiones de formación estelar (Bennett et al., 2023). También sustenta la presión de degeneración que estabiliza las enanas blancas y las estrellas de neutrones

(Karttunen, 2017) además de la identificación por líneas atómicas y moleculares de iones y compuestos en nubes interestelares o atmósferas planetarias (Kitchin, 1995).

Entre todos estos avances, la espectroscopía se impone como la columna vertebral de la astronomía; prescindir de ella para el estudio detallado y riguroso de alguna fuente galáctica o extra galáctica puede implicar renunciar a información valiosa.

Esta rama de la ciencia estudia a profundidad la interacción entre la radiación con la materia. Se basa en el principio fundamental de que los fotones con una energía determinada pueden ser absorbidos o emitidos por electrones que se mueven de un nivel a otro dentro del átomo. Esta interacción deja una huella única de cada átomo o molécula en forma de líneas de absorción o emisión que se revela al dispersar la luz ya sea con un prisma o una rejilla de difracción (Figura 9). Al analizarlas los astrónomos pueden identificar la composición química del objeto astrofísico en cuestión, estimar su temperatura, su densidad, su campo magnético y su velocidad.

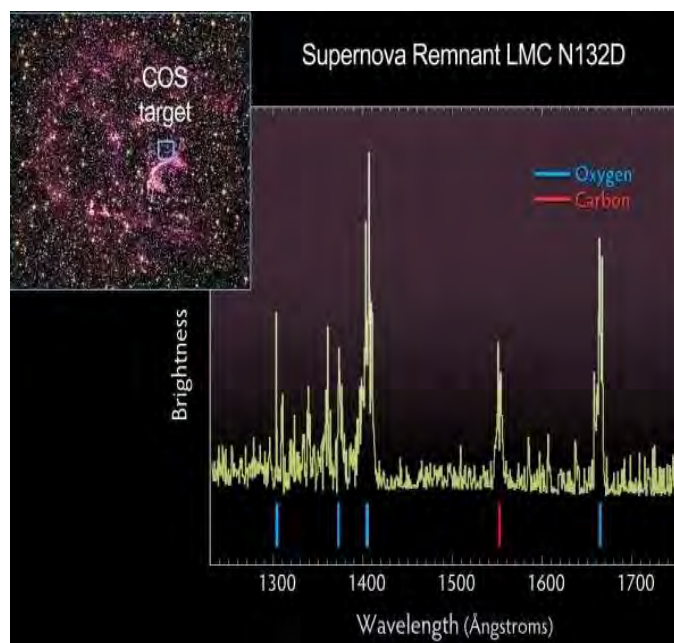


Figura 9. Observación del telescopio Hubble de un remanente de supernova con masa entre 10 y 15 masa solares. El espectro de la región revela que la nube contiene oxígeno y carbono. (Gianopoulos y Gianopoulos, 2025)

Para desentrañar estas huellas cósmicas los científicos distinguen entre cuatro familias de transiciones que cubren casi todo el espectro electromagnético:

- Electrónicas: (UV, visible e IR cercano) revelan abundancias estelares y metalicidad galáctica, diagnostican temperatura, densidad e ionización.
- Vibracionales: (Infrarrojo 3–30 μm) corresponden a oscilaciones internas de las moléculas. Estas ocurren porque los átomos se acercan o alejan

entre sí, emitiendo y absorbiendo fotones. Gracias a este fenómeno podemos rastrear la presencia de agua, dióxido de carbono, metano u otras moléculas más complejas en nebulosas o atmósferas planetarias.

- Rotacionales: (microondas-mm-sub-mm) Los giros que puede tener una molécula también dejan un rastro permitiendo observar gas más frío.
- Hipérfinas: (radio) Los desdoblamientos hipérfinos pueden

describirse como brechas de energía muy pequeñas revelados por interacciones magnéticas (Figuras 10 y 11). Un ejemplo de emisión hiperfina crucial en astronomía es la de la línea de hidrógeno neutro de 21cm ya que permite trazar la materia más difusa de la galaxia.

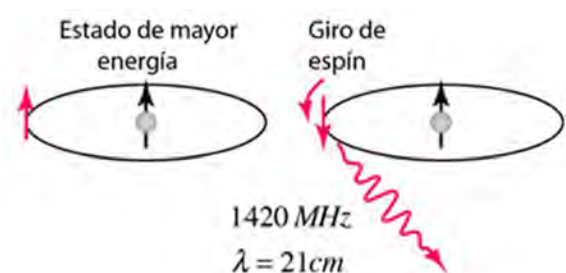


Figura 10. La radiación de 21cm del hidrógeno, ocurre por la transición entre los dos niveles del estado fundamental del hidrógeno, separados por la interacción entre el espín del electrón y el espín nuclear en sus dos posibles configuraciones: paralelos o antiparalelos. Esta división se conoce como estructura hiperfina.

(*The Hydrogen 21-cm Line*, s. f.)

Hoy en día, los telescopios de última generación están cimentando la espectroscopía de alta precisión. Por un lado, en el espacio el *James Webb Space Telescope* (JWST) que combina diversos espectrógrafos para dar detalles desde atmósferas de exoplanetas, hasta galaxias en los primeros inicios del universo (Gardner et al., 2006).

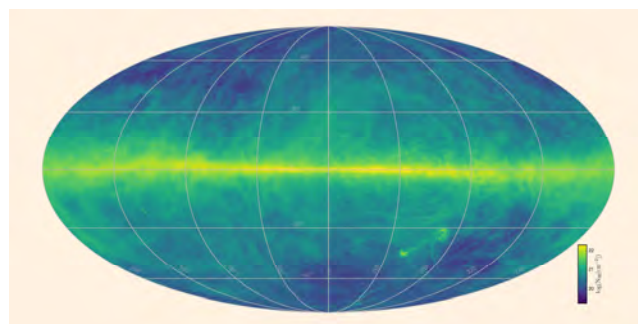


Figura 11. Mapeo completo del cielo observado a través del hidrógeno atómico neutro (HI) utilizando datos del radiotelescopio Max-Planck de 100 metros situado en Effelsberg (Alemania) y del radiotelescopio CSIRO de 64 metros situado en Parkes (Australia). Nuestra galaxia, la Vía Láctea, se observa como una banda luminosa que atraviesa el cielo con el centro galáctico en el medio. La intensidad de la imagen refleja el contenido total de hidrógeno. El plano de la Vía Láctea atraviesa horizontalmente el centro de la imagen. Crédito: Benjamin Winkel / Colaboración HI4PI.

En Tierra, el *Very Large Telescope* (VLA) opera también un espectrógrafo de alta resolución destinado a la identificación de exoplanetas similares a la Tierra, y composición química de galaxias y estrellas (Pepe et al., 2013). Por otro lado, el *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI) ha identificado millones de espectros de galaxias y cuásares que permiten mapear la estructura a gran escala del universo (Aghamousa, A. et al. 2016). Cabe resaltar que estos son solo

algunos ejemplos de todos los instrumentos activos y proyectados destinados a mirar cada vez de forma más precisa el cosmos.

6. Una historia que se sigue contando...

Los descubrimientos y desarrollos tecnológicos que hemos explorado hasta ahora muestran que la física cuántica no es un capítulo cerrado. Mas bien se muestra como una historia que estamos y seguiremos escribiendo. Aún hay muchos problemas por resolver, y desconocemos las nuevas tecnologías que podrían surgir de sus soluciones. Esperamos que la ciencia siga avanzando, pero también se hace necesario que la comprensión de estos fenómenos haga parte de la formación básica que debe tener cualquier humano en nuestra sociedad. Con esto podríamos quitarle poder a la pseudociencia, que impacta directamente en la responsabilidad social y la salud pública. Esto va direccionado a la construcción de una cultura científica, donde los avances más sofisticados no queden como misterios para la mayoría de la población. Por lo anterior, y con el objetivo de aumentar la conciencia pública sobre la importancia de la cuántica y sus aplicaciones, la UNESCO ha declarado al 2025 el Año Internacional de la Ciencia y la

Tecnología Cuánticas. En el 2025 se conmemoran 100 años transcurridos desde su desarrollo.

Este artículo también es una invitación a reconocer que detrás de cada teléfono, cada panel solar o cada exploración espacial, late fuertemente el corazón de una ciencia que lejos de ser enigmática, es hermosa. No solo vale la pena entenderla; urge hacerlo como sociedad para que el progreso tecnológico sea coherente con la capacidad de discernir las ventajas y las consecuencias de cada uno de sus descubrimientos.

7. Glosario

7.1 Dualidad onda-partícula.

Es una propiedad de la materia y la luz según la cual la materia se puede describir de forma simultánea como una onda y como una partícula y la observación de alguna de estas características depende del experimento que realicemos.

7.2 Principio de superposición.

Es una regla que permite a un sistema físico existir simultáneamente en todas sus configuraciones posibles hasta que una medición restringe el sistema y lo obliga a

mostrarse en uno de estos posibles estados superpuestos.

7.4 Espín.

El espín o momento angular intrínseco, es una propiedad interna de las partículas elementales que no tiene un análogo clásico y que determina su comportamiento magnético y estadístico.

7.4 Principio de exclusión de Pauli.

Prohíbe que los fermiones compartan exactamente las mismas propiedades (números cuánticos) dentro de un sistema. La naturaleza está compuesta por dos grupos de partículas según el modelo estándar: Los fermiones con espín semientero que constituyen toda la materia conocida y los bosones con espín entero que no están sujetos a esta restricción y actúan como portadores de las interacciones fundamentales o fuerzas.

7.5 Principio de incertidumbre.

Ley cuántica que establece un límite de naturaleza probabilística para la medición de objetos cuánticos. Entre más precisa sea la medición de una propiedad fundamental, menos será la capacidad de medir su propiedad complementaria. Algunos ejemplos de propiedades complementarias

son la posición-velocidad o la energía-tiempo.

7.6 Efecto túnel.

Es una propiedad de las partículas cuánticas que les permite cruzar a través de una "barrera de energía". En otras palabras, en el mundo microscópico existe una probabilidad de que las partículas puedan pasar a través de barreras en donde clásicamente necesitarían mucha más energía para cruzar sin saltarlas ni romperlas. Este fenómeno desafía nuestra intuición macroscópica.

7.7 Efecto fotoeléctrico.

Se refiere a la capacidad que tienen los materiales de expulsar electrones una vez que se exponen a luz cuya frecuencia supera un umbral determinado. Cada fotón irradiado entrega energía a un electrón del material. Si esta energía rebasa la necesaria para liberarlo, el excedente se convierte en velocidad de salida. El movimiento sistemático de electrones removidos del material genera una corriente eléctrica que se puede medir.

8. Referencias bibliográficas

Aveni, A. (2021). *Creation stories: Landscapes and the human imagination*. Yale

University Press.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1k03gdb>

Bennett, J. et.al, (2023). *The cosmic perspective*. Pearson.

De la Peña, L. (2014). *Introducción a la mecánica cuántica*. Fondo de Cultura Económica.

DESI Collaboration, Aghamousa, A., Bailey, S., Dey, A., et al. (2016). *The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design*. arXiv:1611.00036.

Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., & col. (2006). *The James Webb Space Telescope*. *Space Science Reviews*, 123, 485-606.

Gianopoulos, A., & Gianopoulos, A. (2025, 24 febrero). *Hubble Spectroscopy*. NASA Science.

<https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-behind-the-discoveries/hubble-spectroscopy/>

HI4PI collaboration, Astronomy & Astrophysics 594, (2016). (DOI: 10.1051/0004-6361/201629178).

JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. *Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere*.

Nature 614, 649–652 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05269-w>

Karttunen, P. (2017). *Fundamental astronomy* (5.^a ed., Cap. 3: "Observational Techniques"). Springer.

Kitchin, C. R. (1995). *Optical astronomical spectroscopy*. CRC Press.

NASA Science. (s. f.). *Hubble spectroscopy*.
<https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-behind-the-discoveries/hubble-spectroscopy/>

Pepe, F., Cristiani, S., Rebolo, R., Santos, N. C., & col. (2013). *ESPRESSO — An Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observations*. *The Messenger*, 153, 6-16.

Rieke, G. H. (2012). *Measuring the universe: A multiwavelength perspective*. Cambridge University Press.

The arena. (2024). *Diagram of Herschel's experimental apparatus*. Hubpages.
<https://discover.hubpages.com/education/William-Herschel-and-the-Discovery-of-Infrared-Radiation>

The hydrogen 21-cm line. (s. f.). Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/h21.html>