

¿Cómo sabemos de qué están hechas las estrellas?

QTC-005 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

No podemos recoger material del Sol, pero la astronomía moderna mide las abundancias químicas estelares con una precisión extraordinaria. El camino de la luz a la composición no consiste en leer directamente un código de barras cósmico. Un espectro registra interacciones entre radiación y materia que dependen de la longitud de onda; la física atómica identifica las transiciones posibles, mientras que la temperatura, la presión, la ionización, la excitación, la saturación de las líneas y la estructura atmosférica determinan con qué intensidad aparecen. Este artículo sigue esa cadena desde las líneas oscuras inexplicadas de Fraunhofer y la afirmación de Comte de que la química estelar era inaccesible, pasando por Kirchhoff, Bunsen, Saha, Cannon, Maury y Cecilia Payne, hasta los análisis modernos de abundancias en 3D y fuera del LTE. También muestra dónde el método sigue dependiendo de modelos. La espectroscopia funciona porque la física de laboratorio, los modelos atmosféricos y múltiples comprobaciones observacionales restringen conjuntamente la inferencia, no porque una línea oscura indique automáticamente cuánto contiene una estrella de un elemento.

En 60 segundos

Sabemos de qué están hechas las estrellas sin tocarlas porque su luz ha interactuado con materia antes de llegar hasta nosotros. Los átomos y los iones absorben o emiten fotones en longitudes de onda características, de modo que los patrones de líneas pueden identificar especies químicas. Pero la identificación es solo el primer paso. Una línea intensa puede deberse a una gran abundancia, una excitación favorable, un estado de ionización concreto, la saturación, la presión, la temperatura o la probabilidad de una transición atómica. La teoría de ionización de Saha ayudó a convertir los espectros estelares, antes un esquema de clasificación, en física, y Cecilia Payne utilizó esa física en 1925 para mostrar que el hidrógeno y el helio dominan las atmósferas estelares. Los análisis modernos van más lejos: comparan los espectros observados con cálculos de transferencia radiativa, datos atómicos de laboratorio y modelos atmosféricos, a menudo con correcciones 3D y fuera del LTE. El resultado es una inferencia con incertidumbres, no una muestra física. El Sol permite comprobaciones especialmente poderosas y también ofrece una advertencia: sus mejores abundancias fotosféricas todavía forman parte de una tensión de alta precisión no resuelta con la heliosismología.

Por qué importa esta pregunta

La astronomía nos pide repetidamente que confiemos en afirmaciones sobre lugares que ningún ser humano puede visitar. La química estelar constituye una prueba especialmente exigente porque, en 1835, Auguste Comte sostuvo que no era solo difícil, sino fundamentalmente inaccesible. En una generación, la espectroscopia cambió las reglas. La lección importante no es que Comte fuera ingenuo. Es que la ciencia puede ampliar lo que cuenta como evidencia. Una estrella distante sigue sin enviar a la Tierra una botella de gas; en su lugar, sus fotones se convierten en la muestra a partir de la cual se construye una reconstrucción física restringida por la evidencia.

1. Un código de barras hecho de luz ausente

La pregunta

Si una estrella es inalcanzable, ¿qué podría contar como muestra química? En 1835 Auguste Comte sostuvo que la composición estelar quedaba fuera de la observación. La respuesta de la astronomía no fue llegar hasta la estrella, sino descubrir que la luz que ya nos alcanza transporta huellas físicas de la materia que atravesó.

El argumento de Comte era coherente con sus premisas. En la decimonovena lección de su Cours de philosophie positive, separó las preguntas astronómicas que podían reducirse a la observación visual de aquellas que, a su juicio, exigían otras formas de acceso. Las formas, los movimientos y las distancias parecían obtenibles; la composición química, escribió, no lo era.[17] El error no fue tanto un fallo de lógica como una teoría incompleta de lo que la luz podía revelar.

Joseph Fraunhofer ya había aportado parte del rompecabezas empírico. En 1814 midió sistemáticamente cientos de rasgos oscuros y estrechos que cruzaban el espectro solar, a partir de una observación anterior de William Hyde Wollaston.[3,4] Fraunhofer utilizó las líneas como marcadores ópticos estables. Todavía no disponía de la teoría física necesaria para leerlas como química. La observación precedió a la explicación.

Kirchhoff y Bunsen aportaron el cambio decisivo. Las sustancias de laboratorio producían rasgos espectrales reproducibles, y Kirchhoff relacionó las líneas de emisión brillantes de gases calentados con los rasgos oscuros de absorción del espectro solar. Hacer corresponder la señal del sodio en el laboratorio con líneas de Fraunhofer solares convirtió un patrón remoto de luz ausente en evidencia de sodio en la atmósfera solar.[5] La estrella no se había vuelto físicamente accesible. Había cambiado el significado de sus fotones.

La expresión código de barras solo es útil, por tanto, si evitamos tomarla literalmente. Un código de barras comercial está diseñado para que un escáner relacione directamente un patrón con un artículo. Un espectro estelar lo produce la transferencia radiativa a través de una atmósfera física. Contiene identificadores, pero esos identificadores están integrados en la temperatura, la presión, el movimiento, la opacidad y la geometría. El espectro es la observación; la composición química es la inferencia.[1,13]

En qué punto estamos

Una estrella no tiene que entregar materia a la Tierra para que su química sea accesible. Fraunhofer midió un patrón antes de que se conociera su significado; Kirchhoff y Bunsen mostraron que la física de laboratorio podía descodificar una parte. La luz se había convertido en una muestra remota. Pero ¿por qué unas longitudes de onda concretas permiten identificar átomos concretos?

2. Por qué cada elemento deja un patrón

La pregunta

Un espectro puede contener miles de líneas. ¿Por qué alguna de ellas debería pertenecer de forma fiable al hidrógeno, el sodio, el hierro u otra especie, en vez de ser marcas arbitrarias producidas por una estrella compleja? La respuesta comienza con la estructura cuántica: los átomos y los iones no intercambian energía en cantidades arbitrarias.

Los electrones ligados en átomos e iones ocupan estados cuánticos permitidos. Una transición radiativa entre dos estados corresponde a un fotón con una energía concreta y, por tanto, una longitud de onda concreta. Los laboratorios pueden medir esas longitudes de onda, niveles de energía, energías de ionización y probabilidades de transición con gran precisión. Bases de datos como la Atomic Spectra Database del NIST reúnen valores evaluados críticamente que se utilizan para identificar líneas astronómicas.[2]

Eso convierte la longitud de onda en un identificador poderoso, pero nunca en una etiqueta infalible de una sola línea. Distintas transiciones pueden quedar muy próximas; la rotación estelar, la presión y el movimiento térmico ensanchan los rasgos; las moléculas crean bandas densas; y muchos espectros astronómicos contienen mezclas de líneas. Una identificación segura utiliza, por tanto, la etapa de ionización correcta, varias líneas compatibles y un modelo coherente con las condiciones físicas de la estrella.[2,13]

La formación de una línea de absorción también es más sutil que la imagen escolar de un gas frío que simplemente bloquea un fondo más caliente. En una longitud de onda donde la opacidad de la línea es alta, los fotones escapan desde profundidades distintas que los fotones cercanos del continuo. Como la temperatura y la función fuente de radiación varían a través de la atmósfera, esa longitud de onda puede emerger más oscura. Las líneas de emisión exigen otras combinaciones de geometría, excitación y función fuente.[1,13] La imagen de la «nube fría» es un caso límite útil, no una teoría de las atmósferas estelares.

Esta distinción importa porque la misma transición atómica que identifica una especie también es sensible al entorno en el que se forma. El átomo proporciona un conjunto de longitudes de onda posibles; la atmósfera decide qué transiciones están pobladas, qué opacidad alcanzan y qué perfil llega al telescopio. Identificación y abundancia comparten, por tanto, la misma física, pero no son el mismo problema.

En qué punto estamos

Los niveles cuánticos de energía hacen que las longitudes de onda espectrales sean lo bastante reproducibles para identificar átomos e iones, mientras que la transferencia radiativa explica cómo emergen esos rasgos de una atmósfera. Sin embargo, la línea que identifica un elemento también responde a la temperatura, la ionización y la opacidad. La siguiente trampa aparece de inmediato: una línea más intensa no significa necesariamente que haya más cantidad de ese elemento.

3. La trampa: las líneas intensas no significan muchos átomos

La pregunta

Si el hidrógeno es el elemento dominante en las estrellas ordinarias, ¿por qué sus líneas visibles no dominan por igual todos los espectros estelares? La respuesta es la clave de la espectroscopia cuantitativa: un telescopio solo ve los átomos y los iones que en ese momento ocupan estados capaces de producir una transición determinada.

Las líneas de Balmer ofrecen el ejemplo clásico. Surgen de transiciones que implican el nivel $n=2$ del hidrógeno. En una atmósfera fría, relativamente pocos átomos de hidrógeno están excitados hasta ese nivel. A temperaturas más altas aumenta la población $n=2$ y se refuerza la absorción de Balmer; con aún más calor, el aumento de la ionización retira hidrógeno neutro de la población pertinente. El hidrógeno puede seguir siendo abrumadoramente abundante mientras el patrón visible de Balmer primero se intensifica y después se debilita.[7,8]

Meghnad Saha proporcionó a los astrónomos el puente de la mecánica estadística. Su teoría de ionización relacionó las poblaciones de las etapas de ionización con la temperatura y la presión electrónica, lo que permitió interpretar físicamente los cambios en los patrones espectrales en vez de tratarlos solo como categorías.[6,7] Los supuestos de equilibrio no son universalmente exactos, y se necesitan cálculos modernos fuera del LTE cuando la radiación y las colisiones no mantienen el equilibrio termodinámico local, pero el cambio conceptual fue fundamental.

Ese cambio también explica una secuencia notable en la historia de la clasificación. En Harvard, Annie Jump Cannon reorganizó clases empíricas anteriores en la secuencia OBAFGKM y clasificó cientos de miles de espectros en el programa Henry Draper.[10,18] Antonia Maury había desarrollado un esquema más detallado en el que el carácter y la anchura de las líneas aportaban información que una sola secuencia no captaba, anticipando la importancia de la luminosidad y la gravedad superficial.[19] La clasificación funcionó antes de que se comprendiera por completo su significado físico.

Payne aplicó después el marco de Saha a la secuencia de Harvard. Gran parte de la progresión OBAFGKM normal podía entenderse como un cambio de excitación e ionización impulsado por la temperatura, no como si las estrellas estuvieran construidas con conjuntos de elementos completamente distintos.[8] La temperatura no es el único eje: también importan la gravedad, la metalicidad, las abundancias peculiares y las moléculas. Pero la variedad aparente de los espectros ya no exigía una química global diferente para cada clase espectral.[1,13]

En qué punto estamos

La línea que parece más intensa puede deberse a una población atómica favorable y no a una abundancia enorme. Saha proporcionó la física de la ionización; Cannon y Maury mostraron cuánto orden empírico existía antes de que esa explicación estuviera completa. Una vez separadas clasificación y composición, una astrónoma pudo formular la pregunta cuantitativa más difícil: ¿qué cantidad de cada elemento hay realmente?

4. Payne: convertir los espectros en composición

Stellar Atmospheres, la obra de Cecilia Payne de 1925, se construyó precisamente sobre esa distinción. Payne trató los espectros estelares mediante la física de la ionización y la excitación en vez de suponer que la intensidad de las líneas representaba directamente la abundancia. El resultado fue radical: sus cálculos implicaban que el hidrógeno era alrededor de un millón de

veces más abundante que los metales en las atmósferas estelares, y que el helio también estaba enormemente enriquecido respecto a la mezcla semejante a la terrestre que entonces se suponía habitualmente.[8,15]

El registro histórico es más interesante que el relato simplificado del triunfo. Payne publicó las grandes abundancias de hidrógeno y helio, pero también escribió que los valores excepcionales «casi con seguridad no eran reales».[8] Henry Norris Russell obtuvo más tarde el mismo resultado cualitativo mediante un análisis distinto y citó explícitamente el trabajo anterior de Payne.[9,15] Esa vía independiente importa científicamente: fue una comprobación cruzada que trianguló la inferencia de Payne, no el origen de su prioridad. La cronología preserva así tanto su descubrimiento como la cautela genuina que rodeaba un resultado contrario a las expectativas dominantes.

El trabajo solar moderno confirma la conclusión física general, al tiempo que cambia la precisión y el procedimiento. Un análisis actual en 3D y fuera del LTE proporciona fracciones de masa fotosféricas presentes cercanas a $X = 0,7438$ para el hidrógeno, $Y = 0,2423$ para el helio y $Z = 0,0139$ para todos los elementos más pesados combinados.[11] Redondeadas, son aproximadamente un 74,4%, un 24,2% y un 1,4% en masa. Esas cifras no son constantes estelares universales; son una inferencia dependiente de modelos para la superficie solar actual.

La importancia del resultado de Payne no consiste, por tanto, en que un cálculo de 1925 proporcionara la tabla definitiva de hoy. Consiste en que se había formulado la pregunta física correcta. Una vez tenidas en cuenta la temperatura, la ionización y la excitación, los espectros podían utilizarse para inferir una composición radicalmente distinta de la mezcla terrestre que los astrónomos esperaban. Los valores cuantitativos pudieron mejorar después a medida que mejoraban los datos atómicos, las observaciones y los modelos atmosféricos.

En qué punto estamos

Payne mostró que descodificar un espectro exige modelos físicos, no contar visualmente las líneas, y el Sol moderno todavía confirma su conclusión central: la materia solar ordinaria es abrumadoramente hidrógeno y helio. Sin embargo, los valores exactos de abundancia han seguido cambiando a medida que mejoran los modelos. Entonces, ¿cómo convierte un análisis actual de abundancias un perfil de línea medido en un número?

5. Cómo se mide hoy la abundancia

Un espectro moderno de alta resolución proporciona primero observables: longitudes de onda, perfiles de línea, profundidades y anchuras equivalentes. La anchura equivalente comprime el área eliminada por un rasgo de absorción en la anchura de una línea hipotética completamente oscura con el mismo flujo ausente. Es útil porque mide la intensidad total de la línea sin depender solo de su profundidad central.[1,13]

Pero ni siquiera la anchura equivalente es linealmente proporcional a la abundancia en todos los regímenes. La curva de crecimiento clásica hace visible la razón. Las líneas débiles se encuentran en una rama aproximadamente lineal: más absorbentes producen proporcionalmente más anchura equivalente. Cuando el núcleo de la línea se satura, añadir absorbentes modifica la anchura equivalente mucho más despacio. En líneas muy intensas, las anchas alas de

amortiguamiento hacen que la anchura equivalente vuelva a crecer con más fuerza que en la rama saturada, aunque en el régimen clásico de amortiguamiento sigue creciendo de forma sublineal con la abundancia.[1,13] Esta curva es el puente entre «la intensidad de una línea no es la abundancia» y un diagnóstico útil de abundancia.

Muchos análisis ajustan hoy espectros sintéticos completos. Un modelo atmosférico especifica la temperatura, la presión, la densidad y la opacidad en función de la profundidad; los cálculos de transferencia radiativa predicen qué espectro debería emerger para una mezcla química de prueba. Las abundancias se ajustan hasta reproducir simultáneamente muchas líneas y perfiles observados.[1,13] Un trabajo de calidad no pide a una sola línea que sostenga toda la conclusión.

Los datos atómicos de entrada importan tanto como el modelo. Las longitudes de onda identifican transiciones; las fuerzas de oscilador o probabilidades de transición ayudan a determinar sus intensidades intrínsecas; las energías de ionización y las tasas de colisión influyen en las poblaciones; los datos de ensanchamiento dan forma a los perfiles. Un parámetro atómico inexacto puede hacerse pasar por un error de abundancia química, por lo que las mediciones de laboratorio y las bases de datos evaluadas críticamente siguen formando parte de la astronomía observacional.[2,13]

Los astrónomos también deben indicar qué significa su cifra de abundancia. En la escala logarítmica habitual por número, se define que el hidrógeno tiene $\log \epsilon(\text{H}) = 12$. La notación $[\text{Fe}/\text{H}]$ compara la razón numérica hierro-hidrógeno de una estrella con el valor solar. En cambio, X, Y y Z son fracciones de masa para el hidrógeno, el helio y todo lo que es más pesado que el helio. «Metal» significa por tanto en astronomía estelar cualquier elemento más pesado que el helio, no la categoría química cotidiana.[11,13]

Por último, la propia atmósfera es un modelo. El trabajo clásico suponía a menudo una atmósfera estática unidimensional en equilibrio termodinámico local. Los modelos hidrodinámicos tridimensionales representan las inhomogeneidades convectivas, y los cálculos fuera del LTE permiten que las poblaciones de los niveles atómicos y los campos de radiación se aparten del equilibrio local. Sus correcciones no son universalmente grandes ni apuntan siempre en la misma dirección, pero para algunos elementos y parámetros estelares modifican materialmente la abundancia inferida.[12,13]

En qué punto estamos

El análisis moderno de abundancias es un problema inverso: se mide un espectro, se adoptan datos atómicos y una atmósfera, se calcula la luz emergente y se ajustan las abundancias hasta que concuerdan muchos diagnósticos. Las anchuras equivalentes, las curvas de crecimiento y la síntesis completa hacen explícita esa dependencia. Pero una inferencia puede ser internamente elegante y aun así estar equivocada. ¿Qué comprobaciones independientes muestran que la reconstrucción está anclada en la realidad?

6. ¿Cómo sabemos que el método funciona?

Una comprobación histórica resulta casi teatral. Durante el eclipse solar de 1868, Pierre Janssen observó un rasgo espectral amarillo brillante en una prominencia, y Norman Lockyer estudió de forma independiente la misma línea solar; Lockyer y Edward Frankland sostuvieron que indicaba

un elemento nuevo. El helio fue aislado de minerales terrestres en 1895 y su espectro coincidió con la identificación solar anterior.[14,16] Una especie química inferida a partir de la luz antes de ser aislada en la Tierra apareció más tarde en una muestra de laboratorio.

Las comprobaciones modernas son más sistemáticas. Pueden compararse las abundancias inferidas a partir de distintas líneas del mismo elemento, de diferentes etapas de ionización y, en ocasiones, de moléculas distintas. En el Sol, muchas abundancias fotosféricas de elementos refractarios también pueden compararse con meteoritos condriticos CI primitivos. La concordancia suele ser alta, aunque los volátiles y algunos elementos concretos proporcionan comprobaciones meteoríticas deficientes o discrepantes.[11,13] La triangulación es valiosa precisamente porque ningún diagnóstico aislado es perfecto.

El Sol también deja al descubierto los límites del método. Los análisis mejorados en 3D y fuera del LTE redujeron abundancias importantes de elementos pesados respecto a compilaciones anteriores. Los modelos solares estándar que utilizan esas composiciones pasaron entonces a discrepar más intensamente de las restricciones heliosísmicas sobre el interior solar, una tensión conocida como problema de la abundancia solar o del modelado solar.[11,20] Trabajos heliosísmicos recientes indican que la opacidad radiativa es una parte importante de la discrepancia, pero los distintos cálculos y experimentos de opacidad todavía no cierran el problema.[21] Es un problema abierto dentro de un método por lo demás maduro, no una prueba de que la espectroscopia haya fracasado.

Hay un segundo límite importante. Para la mayoría de las estrellas, la espectroscopia ordinaria mide la fotosfera u otra capa donde se forman líneas, no directamente el núcleo donde se produce la combustión nuclear. La difusión, la mezcla, la pérdida de masa, la acreción y la evolución pueden modificar la composición superficial.[1,13] Una abundancia fotosférica no es, por tanto, automáticamente una composición natal prístina ni una medición directa del núcleo. La inferencia siempre debe nombrar la región física que describe.

El mismo espectro puede codificar más que química. Los desplazamientos Doppler pueden revelar la velocidad radial, mientras que las formas de las líneas restringen la rotación, la presión y la turbulencia.[1] Pero la distancia es un problema de inferencia separado: un espectro químico no indica por sí mismo a qué distancia está la estrella. Ese límite conduce directamente a QTC-006, donde la geometría, las luminosidades calibradas y el corrimiento al rojo cosmológico construyen una escala de evidencias muy distinta.

En qué punto estamos

La química estelar es creíble porque convergen vías distintas, e informativa porque a veces no convergen por completo. Los espectros de laboratorio, múltiples líneas estelares, los meteoritos y los modelos solares restringen la misma inferencia desde direcciones diferentes. La tensión solar restante muestra cómo es la ciencia de precisión cuando el método funciona pero el modelo está incompleto. A continuación llega otra magnitud remota: la distancia.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

Los átomos y los iones tienen transiciones cuánticas características cuyas longitudes de onda pueden medirse en laboratorios e identificarse en espectros estelares. Esto permite establecer

especies químicas a partir de luz remota, mientras que los modelos de transferencia radiativa explican cómo se forman esos rasgos.[2,5,13]

La abundancia cuantitativa se infiere, no se observa directamente. La temperatura, la ionización, la excitación, la opacidad, la saturación, los datos atómicos y la estructura atmosférica afectan a las intensidades de las líneas, por lo que el trabajo moderno utiliza anchuras equivalentes o síntesis espectral junto con modelos atmosféricos y comprobaciones cruzadas entre múltiples diagnósticos.[1,12,13]

Para el Sol, los modelos fotosféricos actuales siguen respaldando el resultado general de la época de Payne, según el cual el hidrógeno y el helio dominan en masa, al tiempo que proporcionan valores modernos dependientes de modelos cercanos al 74,4% de H, el 24,2% de He y el 1,4% de elementos más pesados.[11]

Lo que todavía no sabemos

- El problema de la abundancia y el modelado solares sigue sin resolverse: la mejor composición superficial, la estructura heliosísmica y los cálculos de opacidad radiativa aún no forman una imagen de alta precisión completamente coherente.
- Para muchas estrellas y elementos, las incertidumbres de abundancia todavía están limitadas por los datos atómicos, la estructura atmosférica, la física fuera del LTE, las mezclas de líneas y la calidad de la señal, no por una única fuente universal de error.
- Los espectros superficiales no revelan en general directamente la composición del núcleo estelar, y los cambios evolutivos pueden complicar la relación entre la abundancia fotosférica actual y la composición natal.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Nuevos datos de espectroscopia de laboratorio o cálculos atómicos que revisaran sistemáticamente probabilidades de transición, tasas de colisión o identidades de líneas se propagarían a las escalas de abundancias estelares.
- Una nueva generación de modelos 3D y fuera del LTE que desplazara las abundancias solares o estelares de referencia más allá de las incertidumbres actuales actualizaría la composición cuantitativa sin modificar los espectros observados.
- Un modelo solar autoconsistente que satisficiera simultáneamente las restricciones espectroscópicas, heliosísmicas, de neutrinos y de opacidad podría cerrar el problema actual de la abundancia solar o revelar que el responsable es otro ingrediente ausente.

Si solo recuerdas una cosa

Un espectro estelar es la observación, no la composición: la química solo emerge cuando la física atómica, los modelos atmosféricos y las comprobaciones independientes convierten patrones de luz en inferencias de abundancia restringidas por la evidencia.

Artículos relacionados

- QTC-001 — Todo lo que ves pertenece al pasado
- QTC-004 — ¿Dónde se fabricaron los átomos de tu cuerpo?

Referencias

- [1] David F. Gray. The Observation and Analysis of Stellar Photospheres, 4th ed.. 2021. DOI 10.1017/9781009082136. <https://doi.org/10.1017/9781009082136>
- [2] NIST ASD Team. Atomic Spectra Database, SRD 78, v5.12. 2024 update. DOI 10.18434/T4W30F. <https://physics.nist.gov/asd>
- [3] Joseph von Fraunhofer. Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten.... 1814. <https://books.google.com/books?id=HQk68aXiqeQC>
- [4] Fraunhofer-Gesellschaft. Joseph von Fraunhofer — Fraunhofer Lines. 2026 consulted. <https://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer/profile-structure/chronicles/joseph-von-fraunhofer.html>
- [5] G. Kirchhoff; R. Bunsen. Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. 1861. DOI 10.1002/jlac.18611180314. <https://doi.org/10.1002/jlac.18611180314>
- [6] M. Saha. Ionisation in the Solar Chromosphere. 1920. DOI 10.1038/105232b0. <https://doi.org/10.1038/105232b0>
- [7] Megh Nad Saha. Ionization in the Solar Chromosphere. 1920. DOI 10.1080/14786441008636148. <https://doi.org/10.1080/14786441008636148>
- [8] Cecilia H. Payne. Stellar Atmospheres: A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars. 1925. <https://www.gutenberg.org/cache/epub/73996/pg73996-images.html>
- [9] Henry Norris Russell. On the Composition of the Sun's Atmosphere. 1929. DOI 10.1086/143197. <https://doi.org/10.1086/143197>
- [10] Annie Jump Cannon; Edward C. Pickering / Harvard College Observatory. The Henry Draper Catalogue. 1918–1924. https://www.si.edu/object/siris_sil_176585
- [11] M. Asplund; A. M. Amarsi; N. Grevesse. The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision. 2021. DOI 10.1051/0004-6361/202140445. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140445>
- [12] M. Asplund. New Light on Stellar Abundance Analyses: Departures from LTE and Homogeneity. 2005. DOI 10.1146/annurev.astro.42.053102.134001. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.42.053102.134001>
- [13] Carlos Allende Prieto. Solar and stellar photospheric abundances. 2016. DOI 10.1007/s41116-016-0001-6. <https://doi.org/10.1007/s41116-016-0001-6>
- [14] American Physical Society. August 18 and October 20, 1868: Discovery of Helium. 2014. <https://www.aps.org/apsnews/2014/08/discovery-of-helium-1868>
- [15] American Astronomical Society / Harvard Plate Stacks. Cecilia Payne-Gaposchkin: history of thesis and Russell confirmation. 2022 / consulted 2026. <https://aas.org/posts/news/2022/04/month-astronomical-history-april-2022>
- [16] William Crookes. The Spectrum of Helium. 1895. DOI 10.1038/052428a0. <https://doi.org/10.1038/052428a0>

- [17] Auguste Comte. Cours de philosophie positive, Tome II. 1835.
<https://www.gutenberg.org/cache/epub/31882/pg31882-images.html>
- [18] Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, Wolbach Library. Astronomy and Spectroscopy — Annie Jump Cannon. 2018 / consulted 2026.
<https://platestacks.cfa.harvard.edu/annie-jump-cannon/astronomy-and-spectroscopy>
- [19] Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, Harvard Plate Stacks. Antonia Maury — stellar spectral classification. consulted 2026.
<https://platestacks.cfa.harvard.edu/women-at-hco/antonia-maury>
- [20] G. Buldgen; P. Eggenberger; A. Noels; R. Scuflaire; A. M. Amarsi; N. Grevesse; S. Salmon. Higher metal abundances do not solve the solar problem. 2023. DOI 10.1051/0004-6361/202245448.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245448>
- [21] G. Buldgen et al. Helioseismic inference of the solar radiative opacity. 2025. DOI 10.1038/s41467-024-54793-y. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54793-y>