

CORRIMIENTO AL ROJO EN RELATIVIDAD ESPECIAL

Hugo A. FERNÁNDEZ

INTRODUCCIÓN

Los espectros de la radiación proveniente de estrellas resultan complejos pero tienen en común las líneas características de elementos tales como el Hidrógeno y el Helio, por lo cual presentan un patrón distinguible. Más complicados aún para la obtención y análisis son los espectros de las galaxias, debido a la baja intensidad de la radiación incidente y a su origen estadístico proveniente de poblaciones no homogéneas (emisores).

Una información más detallada de los espectros estelares y galácticos se adjunta en el anexo de este artículo.

El estudio comparativo entre el espectro (visible y no visible) obtenido del Sol y los espectros de estrellas y galaxias ha demostrado que están desplazados hacia las longitudes de onda mayores salvo casos excepcionales.

El nombre de "corrimiento al rojo" comenzó a usarse a partir del año 1908, luego del trabajo "*Dos métodos de investigación de la naturaleza del corrimiento al rojo nebular*", del astrónomo norteamericano W. Adams.

Podemos definir como **corrimiento al rojo** al fenómeno por el cual el espectro de emisión y/o absorción de radiación, proveniente de un objeto cosmológico, resulta desplazado hacia longitudes de onda mayores debido a la acción de algún proceso independiente del mecanismo de emisión o absorción de radiación.

Este fenómeno adquirió una relevancia notable por dos motivos principales:

1. El primero está vinculado al corrimiento provocado por el campo gravitatorio de un cuerpo masivo, predicho por la Teoría General de Relatividad (1916), que lo interpreta geoméricamente debido a la distorsión espacio-temporal provocada por la materia.

Este fenómeno, llamado "**corrimiento gravitatorio**" o "*Efecto Einstein*", fue comprobado experimentalmente en 1960 por los investigadores Pound y Rebka con una aplicación notable del Efecto Mössbauer.

Este singular experimento y otras verificaciones posteriores deberían actualmente ser consideradas pruebas de consistencia y no pruebas de validez de la Teoría General, como históricamente se tomó. El Efecto Einstein puede ser explicado rigurosamente de forma general con la Teoría Especial de Relatividad, sin la solución particular de Schwarzschild que se utiliza en la Teoría General, y con una interpretación dinámica consistente.

2. El segundo motivo tiene que ver con la Teoría General y el descubrimiento de la **Ley de Hubble** en el año 1929, que describe una relación lineal entre el corrimiento al rojo relativo de cada línea del espectro, y la distancia de la galaxia a la Tierra. El auge y desarrollo de la Teoría General en esa época provocaron las conjeturas de Lemaitre sobre la "*Expansión del Universo*" (1927) y el "*Big Bang*" (1931), que incidieron en los modelos cosmológicos basados en la Teoría General. El fenómeno del corrimiento fue entonces considerado como un soporte experimental muy importante de dichas conjeturas, a mi parecer con exagerado optimismo.

Corresponde aclarar que la interpretación actual de la Expansión del Universo como el crecimiento continuado de la métrica espacial (*expansión del espacio*), conjetura aceptada masivamente debido a que la Teoría General admite una métrica espacial con esa característica (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker), entra en contradicción con la Teoría Especial a menos que en esta última se postule la existencia de un campo de fuerzas central cosmológico que provoque la "fuga" de los cuerpos y su correspondiente variación de la cantidad de movimiento. Nótese que esa interpretación, analizada en la métrica de Minkowski, requiere que las galaxias posean velocidad radial variable en el tiempo y en un sistema inercial eso sólo es posible si hay fuerzas aplicadas.

Debemos agregar que si bien la expansión del universo es un hecho comprobado por mediciones (Ley de Hubble), su interpretación como la expansión del espacio agrega comportamientos no verificados por la observación, tal como la aceleración aparente de los cuerpos que se mediría en una métrica de Minkowski.

En consecuencia, la expansión del espacio es una conjetura compatible con la Teoría General pero no tiene soporte experimental alguno, e incorpora "ad hoc" varios comportamientos no comprobados. Que se observe que una galaxia lejana posee mayor velocidad de fuga que una cercana nada dice sobre su aceleración ni sobre su estado de movimiento pasado o futuro, sobre lo cual no tenemos información.

Es muy probable que en los próximos años se pueda determinar la aceleración de las galaxias, ya sea mediante el estudio de sus variaciones temporales de corrimiento al rojo u otra técnica alternativa, con lo cual recién entonces sabremos si la expansión del espacio es una interpretación posible o una quimera.

Encarar la elaboración fundamentada de un modelo cosmológico con el conocimiento e información existente en la actualidad, cualquiera sea el marco teórico que se utilice, es una tarea con muy pocas probabilidades de éxito. Por esta misma razón no debería extrañarnos que los ajustes de los modelos actuales agreguen propuestas tales como materia oscura, energía oscura, expansión acelerada, inflación, Big Crunch, energía negativa y otras yerbas.

Otra interpretación de la Expansión del Universo, compatible con la Teoría Especial y sin la especulación de una fuerza cosmológica, considera la velocidad de las galaxias como velocidades instantáneas de los objetos en una métrica espacial estacionaria no distorsionada por la materia, condición inconsistente con la Teoría General.

En este enfoque las variaciones de la cantidad de movimiento de cualquier cuerpo sólo son posibles por acción de fuerzas de naturaleza gravitatoria. Lamentablemente esta propuesta actualmente no tiene posibilidades de desarrollo pues desconocemos las ecuaciones del campo gravitatorio en este marco teórico. Las ecuaciones de Einstein del campo gravitatorio de la Teoría General no pueden

ser expresadas en la métrica de Minkowski y no son compatibles con la Teoría Especial.

Asimismo, resulta paradójico y extraño que alguna bibliografía e incluso reconocidos especialistas se refieran a la Teoría General como una generalización de la Especial o, más grave aún, que la contiene, cuando de hecho son dos teorías diferentes, sobre temas y objetivos distintos y con fundamentos mutuamente excluyentes.

El hecho de que en ausencia de materia la Teoría General puede describir un espacio homogéneo e isótropo en cada instante, carece de significado físico y solo indica una propiedad matemática de la geometría de Riemann para la métrica elegida.

Uno de los falsos argumentos más usado refiere que la Teoría General, en ausencia de materia, se reduce mágicamente a la Teoría Especial, sin reconocer que ello es un requisito que debe cumplir cualquier teoría consistente. Por ejemplo, todas las leyes de la Electrodinámica en ausencia de cargas y corrientes, también se reducen a las relaciones básicas de la Relatividad Especial o son idénticamente nulas, y a nadie se le ocurre decir que el Electromagnetismo es una generalización de la Teoría Especial.

Este grave error epistemológico y conceptual no se cometería si se recordara que la Teoría Especial es un modelo físico-matemático para describir todos los fenómenos naturales postulando **propiedades de simetría del espacio-tiempo** de acuerdo a la fenomenología observada (homogeneidad e isotropía del espacio y uniformidad del tiempo), las cuales permiten demostrar los Principios de Conservación Universales, que dicho sea de paso no se cumplen en la General, mientras que la Teoría General es un modelo para explicar la gravitación postulando **asimetrías particulares del espacio tiempo**, dependientes de la materia, y la inexistencia de interacciones entre masas.

Tampoco debemos olvidar que la formulación de la Teoría General fue obtenida luego del fracaso teórico de los múltiples intentos fallidos entre 1905 y 1914 (Einstein, Weyl, Nordstrom, Mie, etc.) y otros posteriores, para incorporar las interacciones gravitatorias en la Teoría Especial de forma consistente (véase "[Caída Libre Relativista – Un tema fundamental](#)").

Al respecto, es oportuno destacar la producción científica del grupo de física teórica liderado por el físico ruso A. Logunov, que en los últimos años publicaron importantes contribuciones sobre gravitación en el espacio de Minkowski. En este enfoque teórico el campo gravitatorio es considerado un campo físico real de igual jerarquía que el nuclear o el electromagnético y, por supuesto, consistente con la Teoría Especial. Estas publicaciones pueden obtenerse en: <http://eprintweb.org/S/authors/All/lo/Logunov>

Entre estos trabajos se destaca la "Teoría Relativista de Gravitación" (revisión 2002), cuyo análisis, discusión y desarrollo podría significar un avance significativo de la física teórica en los próximos años y, eventualmente, una superior teoría de gravitación pues resultaría consistente con la Relatividad Especial.

El objetivo de este trabajo es analizar en el marco de la Teoría Especial cuales de las distintas hipótesis propuestas pueden provocar el corrimiento al rojo observado, como así también su interpretación y aplicación.

DESARROLLO

El desplazamiento de cualquier línea del espectro se mide por la relación:

$$z = \frac{\nu_{emitida} - \nu_{observada}}{\nu_{observada}} = \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta E}{E}$$

En 1981 H. Rebol publico un catálogo con 780 referencias y una clasificación en 17 grupos distintos de corrimiento al rojo anómalos, indicando con ello interpretaciones que no corresponden a los tres casos denominados clásicos (Doppler, Gravitatorio y Cosmológico), que fue enriquecido por varias publicaciones posteriores.

Describiremos algunos de los distintos procesos propuestos que podrían modificar la frecuencia de la radiación, indicando aquellos comprobados experimentalmente.

1. "**Efecto Doppler**". Este fenómeno, demostrado experimentalmente a mediados del siglo XIX, consiste en el cambio de frecuencia que ocurre en la onda emitida por una fuente en movimiento. La formulación rigurosa de este efecto se obtiene con la Teoría Especial (ver el capítulo de [cinemática relativista](#)) y es de naturaleza relativista, siendo válido también para el caso de fotones pues admite un tratamiento corpuscular. Este fenómeno de cambio de frecuencia sucede en el emisor en movimiento y no durante la propagación.

2. "**Corrimiento gravitatorio**" (Efecto Einstein). Predicho por Einstein y verificado en Laboratorio por la genial experiencia de Pound y Rebka (1960). En la Teoría Especial se interpreta como un proceso dinámico debido a la interacción fotón-campo.

Se demuestra que el efecto depende de la diferencia de potencial gravitatorio entre el punto donde está la fuente emisora y el punto donde está el observador, y ocurre durante la propagación. Se destaca que la ley de corrimiento deducida con la Teoría Especial es diferente a la que se obtiene en Relatividad General con la solución de Schwarzschild, aunque ambas llegan al mismo resultado para campos débiles. Esta diferencia reviste gran importancia para el análisis del fenómeno en un sistema inercial, pues la solución rigurosa de la Teoría Especial es de alcance general.

3. "**Corrimiento cosmológico**" (Conjetura basada en la expansión del espacio). Esta propuesta no tiene verificación experimental y no es válida en la Relatividad Especial debido a que la interpretación de la expansión del espacio como modificación de la métrica espacial es inconsistente en un sistema inercial.

4. "**Luz cansada**" (Interacción radiación-materia). El fenómeno de pérdida de energía por interacción radiación-materia es un fenómeno estadístico comprobado e inevitable cuando la radiación se propaga por un espacio con partículas distribuidas, provocando la dispersión de los fotones que interactúan. Estos fotones pierden energía (corrimiento al rojo) modificando también su trayectoria, por lo cual no integran el haz que llega al instrumento de medición. Obviamente la radiación que se recibe en el telescopio está compuesta por fotones que no han sido dispersados, lo que implica que no sufrieron la interacción radiación-materia. En consecuencia, este fenómeno comprobado no puede ser la causa del corrimiento al rojo medido.

5. "**Corrimiento por radiación**" (Conjetura por analogía con el Electromagnetismo sin soporte teórico suficiente). Se asume que los fotones (como partículas con masa relativista) en un campo gravitatorio tienen un comportamiento similar al que poseen los electrones acelerados, emitiendo ondas gravitatorias. Si este fenómeno

existiera no podría ser causa del corrimiento por las mismas razones que el caso anterior (luz cansada). La emisión de energía requiere el cambio de la dirección del fotón para que se cumpla la conservación de la cantidad de movimiento, provocando la dispersión.

En mi opinión este fenómeno no existe pues si ocurriera no podríamos ver los objetos "puntuales" alejados debido a que el fenómeno es global afectando a la totalidad de los fotones, que serían dispersados por el inevitable campo gravitatorio intermedio.

6. "**Corrimiento cuántico**". Esta especulación se basa en la modificación de los niveles de energía de los átomos emisores debido a la interacción campo gravitatorio átomo, resultando en una disminución de sus niveles de energía. Esta conjetura asume que el potencial gravitatorio tiene diferencias significativas en distancias del orden del tamaño del átomo (campo gravitatorio muy intenso). Si este fenómeno existiera su efecto sería muy pequeño por la desigualdad entre las interacciones eléctricas y las gravitatorias, ya que las líneas que registramos en los espectros provienen de átomos de la atmósfera estelar o de los gases interestelares, ambos fuera de la zona de gravedad extrema. En mi opinión, este fenómeno es indetectable o no existe y, por otro lado, no veo la manera de relacionarlo con la distancia observador-galaxia.

7. "**Corrimiento por variación temporal de la gravitación**" (Conjetura de Logunov, basada en la variación cíclica de la gravitación). Esta especulación no ha sido tratada en profundidad por los especialistas y se enmarca en la reciente (última revisión 2002) cosmología sustentada por la Teoría Relativista de Gravitación del Prof. A. Logunov. La propuesta es un fenómeno de corrimiento gravitatorio en un campo variable en el tiempo, de tal manera que se encuentra una relación con la distancia de las galaxias. Esta conjetura es imposible de demostrar experimentalmente y se basa en una teoría cosmológica que aún no ha sido discutida en profundidad.

En mi opinión, cualquier propuesta basada en teorías cosmológicas no debería ser seriamente tenida en cuenta en la actualidad y ello incluye al masivamente aceptado corrimiento cosmológico.

Luego del breve análisis anterior corresponde analizar en detalle los dos efectos que sabemos con certeza que intervienen en el fenómeno de corrimiento al rojo.

EFEECTO DOPPLER RELATIVISTA

Fue comprobado experimentalmente por Fizeau en 1848 y se debe al movimiento de la fuente emisora de radiación respecto del observador.

Su aplicación tiene vigencia en ambos marcos teóricos (General y Especial), pero de manera totalmente diferente debido a la distinta interpretación que ambas teorías dan a la Expansión del Universo. Nos interesa su interpretación en un sistema inercial.

La expresión que vincula la frecuencia medida w con la frecuencia propia w_0 de la fuente emisora, deducida con la Teoría Especial, es:

$$w = w_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{V_s^2}{c^2}}}{1 + \frac{V_s \cos \theta}{c}}$$

Reemplazando en el cálculo de z y operando obtenemos:

$$z = \frac{1 + \frac{V_s \cos \theta}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V_s^2}{c^2}}} - 1 \quad \frac{V_s}{c} = \frac{(z+1) \left(\sqrt{z^2 + 2z + \cos^2 \theta} \right) - \cos \theta}{(z+1)^2 + \cos^2 \theta}$$

Es importante destacar que el ángulo (Theta), formado por la dirección de la velocidad de la fuente y la recta que une el observador con dicha fuente ("línea de visión"), siempre debe considerarse menor o igual a 90° si V_s se toma negativo cuando la fuente se acerca y positivo cuando se aleja (regla mnemotécnica).

En la práctica cotidiana y también en muchas publicaciones los cálculos de velocidad de las galaxias lejanas se suelen hacer asumiendo nula la componente transversal de la velocidad, debido probablemente a la dificultad de su determinación. En este caso (sin componente transversal) las expresiones anteriores quedan:

$$\omega' = \omega_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{V_s}{c}}{1 + \frac{V_s}{c}}} \quad z = \frac{1 + \frac{V_s}{c}}{\sqrt{1 - \frac{V_s^2}{c^2}}} - 1 \quad \frac{V_s}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

Veremos que ignorar la componente transversal de la velocidad, como sucede en muchos trabajos relacionados con observaciones astronómicas (comenzando con el de Hubble), puede conducir a conclusiones falsas, particularmente para z grandes.

La tabla siguiente da el valor de velocidades relativas versus z, para dos casos:

- La galaxia sólo tiene velocidad radial (fuga).
- La velocidad de la galaxia forma un ángulo de 60° con la línea de visión.

Z	V_s / c	$V_s/c-\theta=60^\circ$	$V_r/c-\theta=60^\circ$
0,00	0,0000	0,0000	0,0000
0,01	0,0100	0,0196	0,0098
0,02	0,0198	0,0385	0,0192
0,03	0,0296	0,0567	0,0283
0,04	0,0392	0,0743	0,0371
0,05	0,0488	0,0912	0,0456
0,10	0,0950	0,1685	0,0843
0,20	0,1803	0,2940	0,1470
0,30	0,2565	0,3920	0,1960
0,40	0,3243	0,4706	0,2353
0,50	0,3846	0,5348	0,2674
1,00	0,6000	0,7307	0,3654
2,00	0,8000	0,8775	0,4387
3,00	0,8824	0,9305	0,4652
4,00	0,9231	0,9553	0,4777
5,00	0,9459	0,9689	0,4845
10,00	0,9836	0,9907	0,4954

La segunda columna corresponde a los valores relativos de la velocidad de fuga para el caso que no tiene componente transversal.

La tercera y la cuarta columna dan los valores de velocidad total y componente radial respectivamente, para una velocidad que forma un ángulo de 60° con la línea de visión.

Nótese que para valores pequeños de z el error que se cometería al no considerar la componente transversal es chico, lo cual justifica el cumplimiento de la Ley de Hubble. Por ejemplo para $z=0.01$ el error es 2%. En cambio para $z=3$ el valor de la velocidad de fuga ($0.46c$) es aproximadamente la mitad de lo que se calcularía sin considerar la componente transversal ($0.88c$).

CORRIMIENTO GRAVITATORIO

La demostración general de la Ley de corrimiento al rojo válida para un observador en reposo en un sistema inercial, vista anteriormente en el trabajo "El efecto Mössbauer en la Relatividad Especial", se fundamenta en el Principio de Equivalencia entre Masa y Energía. Vemos su desarrollo:

En la Teoría Especial el campo gravitatorio debe tratarse con igual jerarquía que cualquier otro tipo de campo físico capaz de producir efectos dinámicos sobre otros cuerpos. Asimismo, cualquier ente capaz de interactuar posee energía, masa relativista y cantidad de movimiento. En particular, los fotones son partículas que presentan las siguientes características:

$$\begin{array}{ll} \text{Cantidad de movimiento} & \vec{p} = \frac{h\nu}{c^2} \vec{c} \\ \text{Energía} & E = h\nu \\ \text{Masa relativista} & m = \frac{h\nu}{c^2} \end{array}$$

El Principio de Equivalencia entre Masa y Energía establece que el contenido total de energía de una partícula es igual al producto de su masa relativista por el cuadrado de la velocidad de la luz. Cualquier modificación de su contenido energético, sin importar el mecanismo que la produzca, irá acompañada por un cambio de su masa relativista, cumpliéndose:

$$dE = c^2 dm$$

Si la partícula (fotón) está en presencia de un campo gravitatorio conservativo, el trabajo elemental realizado por el campo es igual a la variación de energía del fotón, resultando:

$$\begin{aligned} dE &= \vec{F} \cdot d\vec{s} = -m \nabla \phi \cdot d\vec{s} = -m d\phi = c^2 dm \\ \Rightarrow \quad \frac{dm}{m} &= -\frac{d\phi}{c^2} \end{aligned}$$

Integrando esta ecuación diferencial entre dos puntos (1 y 2) obtenemos la **Ley de Conservación de la Masa (relativista) y el Potencial Gravitatorio**.

$$m_1 e^{\phi_1/c^2} = m_2 e^{\phi_2/c^2} = Cte$$

$$\Rightarrow m e^{\phi/c^2} = Cte$$

Para el caso de un fotón emitido en el punto 1 y detectado en el punto 2, la relación anterior conduce a la expresión de la ley de corrimiento gravitatorio:

$$v_1 e^{\phi_1/c^2} = v_2 e^{\phi_2/c^2}$$

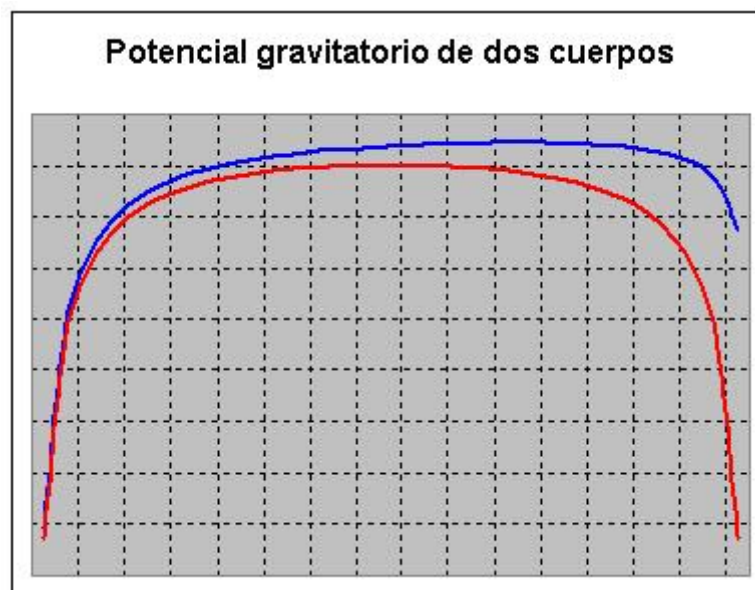
$$z = \frac{\Delta E}{E} = \frac{v_1}{v_2} - 1$$

$$\Rightarrow z = e^{(\phi_2 - \phi_1)/c^2} - 1$$

Cuando se analiza el corrimiento debido a radiación proveniente de galaxias lejanas suele considerarse a este efecto despreciable frente al Doppler, lo cual puede ser un error de método muy grave dada la diversidad de galaxias distintas. Observamos que el corrimiento depende del **potencial gravitatorio del sistema** y no del valor local del campo, lo que introduce un elemento que puede provocar variaciones importantes de z cuando se aplica a galaxias distintas.

Aclaremos lo anterior con un gráfico cualitativo del potencial gravitatorio (newtoniano) de dos cuerpos puntuales con sus masas ubicadas en cada extremo del eje horizontal.

La línea de trazo rojo corresponde a dos cuerpos de igual masa, la azul es para dos cuerpos de masa distinta en relación 4/1, es decir que el cuerpo de la izquierda tiene 4 veces la masa del de la derecha (nótese la deformación que provoca al potencial)



Del análisis del gráfico se obtiene que el valor de la diferencia de potencial entre un punto cercano a la masa de la izquierda y el otro punto cercano a la de la derecha,

es muy dependiente de la masa de los cuerpos, particularmente entre puntos cercanos de las masas.

Ahora podemos analizar el efecto para el caso de galaxias.

El corrimiento al rojo correspondiente a una galaxia se determina de un espectro que está formado estadísticamente por fotones que provienen de la corona estelar de miles de millones de estrellas y gases distribuidos en la galaxia. La galaxia entera está en movimiento de rotación y sus estrellas poseen velocidades y parámetros diferentes entre si. En consecuencia, el espectro obtenido corresponderá al subconjunto más populoso de **espectros similares**, provenientes de un inmenso número de estrellas y gases distribuidos en la galaxia. Probablemente ese subconjunto esté ubicado en el borde del núcleo galáctico.

Evidentemente, la posición de un emisor único no existe pero podemos asumir una "posición equivalente" como si fuera un emisor único que nos da el mismo corrimiento de espectro, al que le corresponde una posición y un potencial gravitatorio definido, el cual dependerá del tipo de galaxia particular, sus características, orientación en el espacio y el grado de evolución de la misma. Corresponde señalar que no existen determinaciones experimentales de corrimiento gravitatorio provocado por galaxias pues el fenómeno coexiste con el efecto Doppler sin poderse discriminar sus efectos actualmente.

No queda duda alguna que los corrimientos gravitatorios de las galaxias pueden dar valores muy distintos. Posiblemente ésta sea la razón de la diferencia del corrimiento correspondiente a cuásares y galaxias ligadas, comunicado por el astrónomo H. Arp.

CONCLUSIONES

Considerando que ambos efectos (Doppler y corrimiento gravitatorio) son concurrentes e inevitables, y que los dos presentan problemas metodológicos importantes para su utilización por el desconocimiento, en un caso del ángulo de la velocidad con la línea de visión, y en el otro del potencial gravitatorio correspondiente a la emisión, su aplicación como método cuantitativo está seriamente cuestionada y las conclusiones anteriores obtenidas con estos efectos deben ser revisadas.

Anexo Espectroscopia

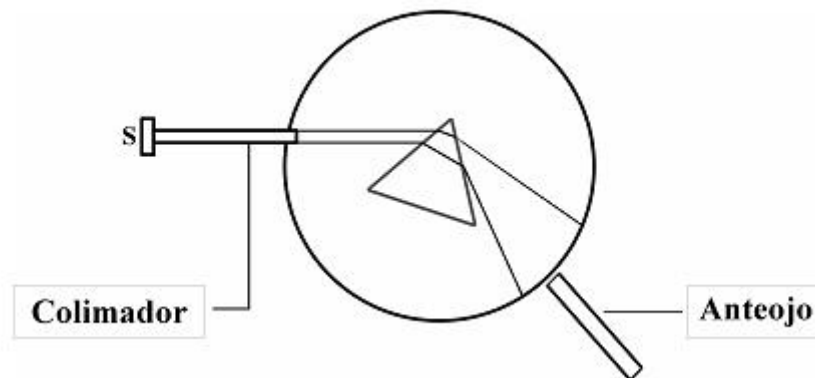
Se denomina espectro visible al conjunto de colores que forman un haz de luz luego de ser separado en sus componentes por un elemento dispersor. El mismo concepto de espectro se aplica a radiaciones en rangos no visibles por el ojo humano, tales como el infrarrojo y el de microondas, más allá del rojo, o el ultravioleta, el de rayos X y el de rayos gamma, más allá del violeta.

La separación de las radiaciones que componen un haz puede realizarse de varias formas, siendo las más usuales por medio de prismas, redes de difracción o una combinación de ambos tipo de elementos dispersores.

La espectroscopia astronómica cuantitativa fue iniciada en el año 1814 por el óptico e inventor Joseph von Fraunhofer (1787 -1826), cuyos desarrollos tales como la red de difracción y el espectroscopio de anteojo óptico, hicieron que esta técnica resultara la principal herramienta de análisis de las radiaciones. Los espectros del Sol obtenidos por este singular científico autodidacta le permitieron determinar la longitud de onda de 574 líneas de absorción en el rango visible. Asimismo, al obtener y analizar el espectro visible de otras estrellas, demostró que había diferencias entre sí, iniciando lo que hoy se conoce como espectroscopía estelar.

En general el espectro visible de las estrellas es complejo y está constituido por un fondo brillante continuo de todo el rango visible, desde el rojo al violeta, sobre el que se superponen líneas de absorción (oscuras) y, ocasionalmente, líneas de emisión (más brillantes), emitidas por elementos constitutivos de la atmósfera estelar.

El espectroscopio posee un colimador y un anteojo ocular montados sobre una escala circular. El colimador tiene por función lograr un haz paralelo de la radiación cuyo espectro desea conocerse. El anteojo permite enfocar el espectro que se obtiene luego de ser dispersado el haz. La figura muestra el esquema de un espectroscopio simple de prisma.



Los espectros se clasifican en continuos, de bandas y discretos (o de líneas). Los continuos presentan todos los colores sin interrupción. Son producidos por los sólidos incandescentes, como es una lámpara de filamento.

Los de bandas también son continuos pero a tramos, es decir que presentan zonas sin radiación. Se obtienen de líquidos o gases poliatómicos complejos incandescentes.

Los discretos o de líneas están formados por colores bien definidos. Son producidos por gases simples incandescentes.

Los espectros pueden ser de emisión, cuando el haz proviene directamente de un objeto emisor, o de absorción, cuando una sustancia se interpone entre la fuente de luz (usualmente un filamento incandescente) y la rendija de entrada. Los de emisión sirven para obtener información de la sustancia incandescente, mientras que los de absorción lo serán para la sustancia absorbente. Las líneas que emite un gas simple incandescente son las mismas que dicho gas absorbe. La imagen siguiente muestra tres ejemplos diferentes.



Superior - continuo de emisión
 Medio - de líneas de absorción
 Inferior - de líneas de emisión

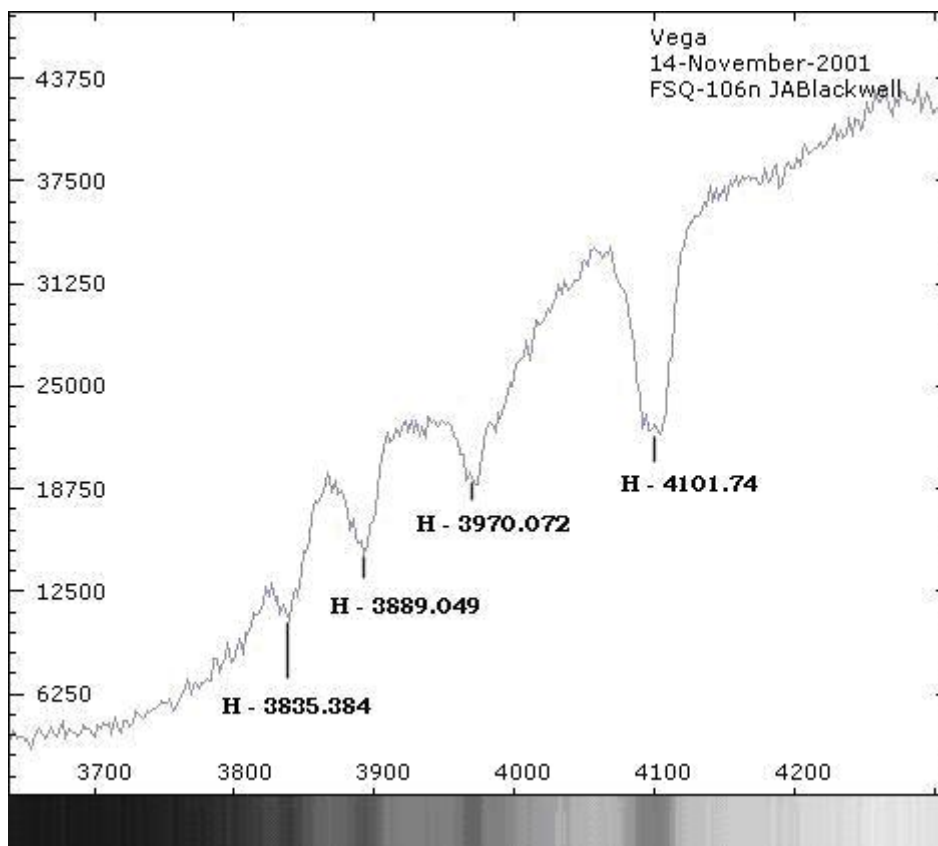
Los espectros de línea son los de mayor interés debido a que todos los elementos de la tabla periódica, en estado gaseoso, poseen espectros diferentes entre si, lo que permite un método óptico de análisis de composición de extraordinaria precisión.

Espectros estelares

Actualmente en Astronomía se utilizan espectrofotómetros, que son dispositivos similares a los espectroscopios pero que tienen reemplazado el antejo ocular por un sensor (fotoeléctrico o ccd), lo que permite registrar un gráfico de alta resolución, obteniendo espectros estelares muy precisos.

La figura muestra el espectro visible de la estrella Vega. Este y otros registros pueden verse en

<http://www.regulusastro.com/regulus/spectra/vega.html>



Espectro visible de Vega (Cortesía Dr. John Blackwell)

El eje de las abcisas es la longitud de onda expresada en Angstrom (10^{-10} metros); el eje de las ordenadas es una medida relativa de intensidad.

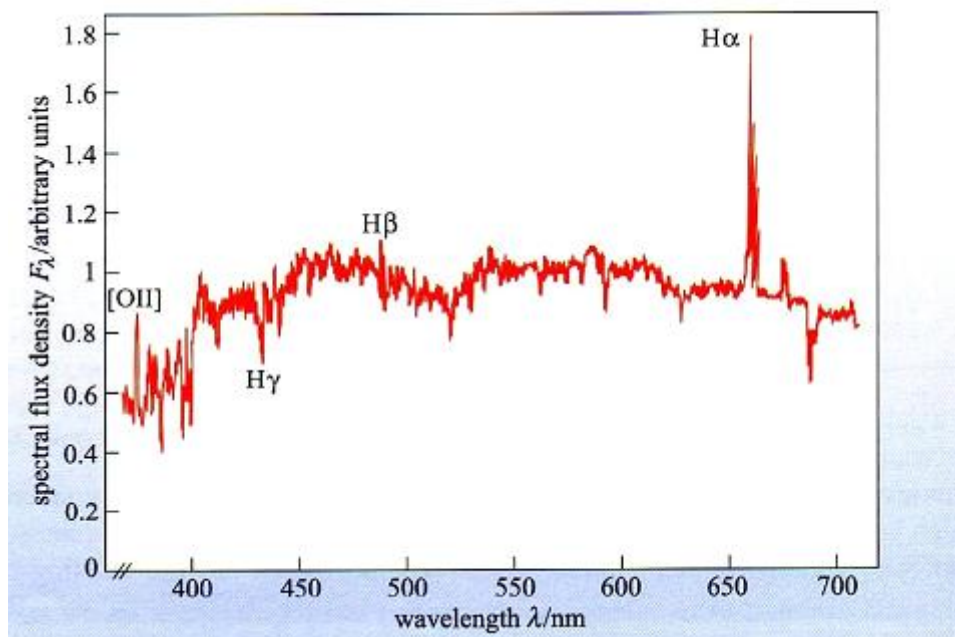
Las líneas con referencia indicadas en el gráfico corresponden a la absorción de la radiación en la atmósfera estelar, característica del Hidrógeno presente.

El estudio sistemático de los espectros estelares permitió elaborar una clasificación muy detallada de las estrellas. Ello puede verse en:

http://www.espacioprofundo.com.ar/verarticulo/Clasificacion_de_los_espectros_estelares.html

Espectros galácticos

Los espectros de radiación proveniente de galaxias, como el caso de una galaxia activa (líneas de emisión muy brillantes) que se muestra en el gráfico siguiente, son los más difíciles de obtener y analizar.



Espectro (rango visible) galaxia espiral NGC 4750

Las líneas hacia "arriba" se deben a la emisión característica de gases presentes en la atmósfera estelar, en este caso Hidrógeno (H) y Oxígeno (OII). Los picos hacia "abajo" nos indican absorción de radiación.

Los espectros de diferentes galaxias puede verse en:

http://www.astro.ugto.mx/cursos/astrofisicaII/AstrofisicaII_Parte_II/capitulo_7/cap_7_docs/Espectros_deGalaxias.htm

Nota.

Es importante destacar que el espectro de una galaxia está conformado de manera estadística por radiación proveniente en general de más de cien mil millones de estrellas. Las líneas de absorción que forman el espectro característico tienen su origen en la atmósfera estelar y en la materia interestelar existente. En consecuencia, cabe esperar que el espectro (de emisión) que se registre en cada caso corresponda al subconjunto de estrellas con características similares de emisión, más significativo estadísticamente, hecho que está relacionado con la intensidad de la radiación y con la subpoblación espectral homogénea más numerosa.

No existe aún un modelo teórico satisfactorio sobre el espectro de emisión y

absorción de radiación de galaxias, en parte debido a la gran diversidad de galaxias diferentes observadas.

No obstante, se especula que en la mayoría de los casos los espectros corresponden al denso subconjunto de estrellas pertenecientes al borde del núcleo central de la galaxia.

Hugo A. Fernández
hafernandez@fibertel.com.ar
Profesor Titular de Física Moderna
Universidad Tecnológica Nacional - Argentina