



Las estrellas

Juan Espinoza G.

juan.espinoza@umce.cl

Departamento de Física

Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación

INTRODUCCIÓN

La siguiente guía didáctica de actividades se elabora sobre la base de la producción audiovisual "Las estrellas" y tiene el propósito de aplicar conceptos y leyes físicas a la descripción de las principales características de las estrellas. Entre otras propiedades que se describen se encuentran: magnitud estelar; escala de magnitudes, relación temperatura-color de las estrellas; color y longitud de onda, espectros: continuo, de líneas y de absorción; espectro del Sol y de las estrellas; clasificación de espectros; estrellas gigantes y dobles; órbitas de estrellas dobles; efecto Döppler; estrellas variables y exoplanetas. Las explicaciones de las órbitas y el diagrama de las estrellas dobles se ilustran con animaciones. El video apoya contenidos de los programas de Física de Educación Media y Básica.

El presente programa guía de actividades o guía didáctica para el profesor, se elabora sobre la base del modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación, el que puede ser analizado en diversas fuentes bibliográficas, tales como el libro editado por la UNESCO (Gil et al, 2005)¹, que propone una nueva metodología para aumentar el interés de los estudiantes por la cultura científica, ante el fracaso o falta de interés por estudiar contenidos científicos en la educación secundaria. En el libro antes citado, el profesor encontrará ejemplos de programas de actividades para diversos temas científicos. Otra referencia del modelo se encuentra en el artículo (Gil, 1993)² en que se analiza la contribución de la historia y filosofía de la ciencia a la fundamentación del modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación, donde se comparan las principales tendencias en la enseñanza de las ciencias y se plantea que, además del cambio conceptual debe haber un cambio metodológico, considerando que existe una cierta semejanza o paralelismo entre las concepciones alternativas de los estudiantes en algunos campos del conocimiento y las concepciones históricas de la ciencia que fueron reemplazadas por los conocimientos actuales, aceptados hoy por la comunidad científica. Lo que ha ocurrido en la historia de la ciencia, según los autores del modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación, al reemplazar las teorías nuevas por las antiguas,

1 Gil Pérez, D., Macedo, B., Martínez Torregrosa, J., Sifredo, C., Vilches, A. (2005) ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años. OREALC/UNESCO. Libro on line.

2 Gil Pérez, D. (1993) Contribución de la historia y filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. Enseñanza de las Ciencias, 1993, 11(2), 197-212.

ha sido un cambio metodológico, abandonando de tal modo lo que podría denominarse como una *Física del sentido común*.

El modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación está bien fundamentado teóricamente, puesto que según diversos autores, cumple con ciertos elementos o factores necesarios que debe presentar la fundamentación de toda propuesta didáctica acerca de la enseñanza y aprendizaje de las ciencias, como lo plantea Campanario (2004) en su sitio web de La Enseñanza de las Ciencias en preguntas y respuestas³, y como lo planteó anteriormente en otro artículo⁴. A los elementos que se deben considerar se ha agregado, en los factores pertinentes, lo que plantea la nueva taxonomía de Marzano-Kendall⁵, como una alternativa para enriquecer el trabajo educativo desde su planificación. Entonces, los factores se pueden expresar en los siguientes términos:

- Naturaleza de la Ciencia (trata de la Filosofía, Historia y Sociología de la ciencia, o en otras palabras, cómo funciona la ciencia y el trabajo científico); hay que tener en cuenta que no todos los modelos o enfoques de enseñanza de las ciencias consideran explícitamente este factor en su fundamentación teórica.
- Psicología del aprendizaje de las ciencias (influenciado por suposiciones y teorías acerca de cómo se aprende, en las que se puede considerar: desarrollo evolutivo; teoría de Ausubel; aprendizaje significativo; la teoría del esquema; la metacognición; taxonomía de Marzano-Kendall con su sistema interno, sistema metacognitivo y sistema cognitivo).
- Motivación y actitudes hacia las ciencias (esto también está relacionado con la metacognición, siendo la motivación y las actitudes procesos del sistema interno de los aprendices, según la taxonomía de Marzano-Kendall).
- Lo que los alumnos saben hacer y piensan (donde se deben considerar: las ideas alternativas o preconceptos; las concepciones alternativas; las pautas de pensamiento y razonamiento; las concepciones epistemológicas).

En los trabajos del profesor Gil Pérez y las dos obras citadas del profesor Campanario se analiza el modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación, adoptado para la elaboración de este material didáctico, por lo que se remite a los docentes a estos trabajos.

Con esta guía didáctica y el estudio del contenido de esta producción audiovisual, se pretende que los estudiantes comprendan algunas de las características físicas de las estrellas y cómo los científicos han descubierto algunas de sus propiedades.

3 Campanario, J. (2004) La Enseñanza de las Ciencias en Preguntas y Respuestas. Visto en el año 2004. Hay en la web una versión más breve.

4 Campanario, J. y Moya, A. (1999) ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. Enseñanza de las ciencias, 1999, 17 (2), 179-192.

5 Marzano, R.J. y Kendall, J.S. (2007) The new taxonomy of educational objectives, California, USA, Corwin Press. Existe un resumen en español en internet.

Esta producción audiovisual, que se puede ver para ser analizada en clases, se encuentra en youtube en la dirección URL <https://www.youtube.com/watch?v=dk1dg4u0PMc>. En el video se muestran diversos contenidos relacionados con las estrellas y su descripción física, entre ellos están los del índice siguiente.

Índice

1. Descripción de las estrellas.
2. La esfera celeste y su nomenclatura.
3. Constelaciones del cielo nocturno.
4. Las estrellas más brillantes del firmamento.
5. Intensidad de la luz de una estrella en función de la distancia.
6. Distancias a las estrellas: año luz y parsec.
7. La magnitud estelar.
8. Clasificación del sistema de magnitudes estelares.
9. Identificación de las magnitudes estelares de las estrellas en una carta estelar.
10. El espectro electromagnético.
11. El color de una estrella.
12. El cuerpo negro en Física y las curvas de cuerpo negro.
13. Las leyes de la radiación.
14. Aplicación de las leyes de la radiación a la descripción de las estrellas.
15. Determinación de la luminosidad de las estrellas y la del Sol.
16. Construcción de un fotómetro para determinar la luminosidad del Sol.
17. La ecuación de Planck para un cuerpo negro.
18. Tipos de espectros: continuo, de emisión de líneas y de absorción.
19. Espectros de los elementos químicos.
20. Espectro del Sol y de las estrellas.
21. Clasificación de espectros estelares.
22. Estrellas gigantes rojas y sus características.
23. Estrellas dobles: órbitas y características.
24. El sistema estelar más cercano y sus características.
25. Estrellas binarias eclipsantes.
26. El efecto Döppler.
27. Estrellas dobles espectroscópicas.
28. Estrellas variables.
29. Exoplanetas en órbita a otras estrellas y su detección.
30. Sistemas planetarios alrededor de otras estrellas.

Situación problemática

El conjunto de actividades planteadas en este programa guía de actividades responde a la siguiente situación problemática:

¿Qué son las estrellas, cómo se describen y cuáles son sus características físicas principales, en cuanto a tamaño, color, temperatura en su superficie, temperatura en su interior, masa, radio, densidad, entre otras magnitudes físicas?

Para resolver esta situación problemática, los estudiantes trabajarán en grupos de 3 o 4 integrantes, debiendo, en primer lugar, responder los interrogantes planteados en la Actividad 1, de manera individual y después grupal, antes de ver el video.

Programa guía de actividades

Actividad 1. Antes de ver el video "Las estrellas", respondan los siguientes interrogantes. Escriban cada una de las opiniones y conocimientos de los integrantes del grupo de trabajo. Planteen hipótesis respecto a los interrogantes planteados. Tomemos estas ideas como planteamiento de hipótesis, las que se tienen que demostrar para aceptarlas.

- a) ¿Qué son las estrellas?
- b) ¿Cómo se describen?
- c) ¿Dónde se ubican las estrellas?
- d) ¿Son las mismas estrellas que aparecen cada noche en el cielo?
- e) ¿Qué es una constelación?
- f) Las estrellas que componen una constelación, ¿están cercanas unas de otras, tal como se ven en el cielo?
- g) Las estrellas del cielo nocturno, ¿están todas a la misma distancia de la Tierra?
- h) ¿Qué interés tiene el estudio de las estrellas?
- i) ¿Todas las estrellas tienen el mismo tamaño?
- j) ¿Cuáles son sus principales características físicas, temperatura en su interior y en la superficie, masa, radio, densidad, luminosidad, distancia a la que se encuentran, etc.?
- k) ¿Cómo se estudia y se miden las principales características físicas de una estrella?

Comentarios A1.- Estas preguntas iniciales tienen el propósito de revisar aquello que los estudiantes saben respecto a estos temas, sus concepciones alternativas y probables creencias acerca de estos conceptos. La investigación en didáctica de las ciencias⁶ muestra que los estudiantes y público general poseen preconcepciones acerca de conceptos científicos en general, lo que influye en el aprendizaje de las ciencias⁷. En Astronomía también se han detectado diversas concepciones alternativas y su origen (Comins, 1993)⁸, y es un tema vigente en la investigación didáctica puesto que hasta el presente se sigue indagando al respecto.^{9 10 11}. En uno de estos últimos trabajos (Ref. 9), se examina la persistencia de 215 preconcepciones comunes de Astronomía y se sugieren correlaciones entre ellas con la finalidad de mejorar la efectividad de la enseñanza. Se han publicado también libros como el de Plait (Plait, 2002)¹² en el que trata diversas concepciones alternativas, desde la astrología hasta diversas ideas astronómicas, indicando que las preconcepciones comienzan en casa. El capítulo 3 aborda diversos temas relacionados con las estrellas. Este autor ha realizado también una serie de documentales, bajo esta misma óptica, con el nombre de "Mitos del Universo" en los que se muestran algunas de estas concepciones alternativas.

Otras referencias que estudian las concepciones alternativas (o preconceptos) acerca de temas básicos de Astronomía, que mantienen los estudiantes de nivel de educación básica, secundaria y de profesorado se encuentran en los siguientes artículos (Lanciano¹³, 1989; Camino¹⁴,

6 Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. 2ª edición (1992) Ideas científicas en la infancia y la adolescencia. Ed. Morata.

7 Children's ideas in science, on line con listas de preconceptos de todas las ciencias en: <http://homepage.mac.com/vtalsma/sylabi/2943/handouts/misconcept.html>

8 Comins, N.F. (1993) Sources of Misconceptions in Astronomy. Publicado en Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in science and Mathematics, J.Novak, ed. Ithaca, NY; Cornell University, 1993. On line en: http://www.mlrg.org/proc3pdfs/Comins_Astronomy.pdf

9 Favia, A., Comins, N., Thorpe, G., Batuski, D. (2014) A direct examination of college student misconceptions in Astronomy: A new instrument. Journal and Review of Astronomy Education and Outreach, Vol. 1, N° 1, Hemograph Press. On line en: <http://jraeo.com/wp-content/uploads/2014/05/JRAEO010101A21AFetal.pdf>

10 Korur, F. (2015) Exploring seventh-grade students' and pre-service science teachers' misconceptions in astronomical concepts. Revista Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education, 1 – 20. On line en: <http://www.ejmste.com/Ek/3467-eurasia.2015.1373a.pdf>

11 Utami, D., Wulandari, H. (2016) The use of astronomy questions as an instrument to detect students' misconceptions regarding physics concepts at high school level by using CRI (Certainty of Response Index) as identification methods. Journal of Physics Conference. On line en: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/771/1/012027/pdf>

12 Plait, P. (2002) Bad Astronomy: Misconceptions and Misuses revealed, from astrology to the Moon landing "hoax". Ed. John Wiley.

13 Lanciano, N. (1989) Ver y hablar como Tolomeo y pensar como Copérnico. Revista Enseñanza de las Ciencias 7 (2), 173-182.

14 Camino, N. (1995) Ideas previas y cambio conceptual en Astronomía. Un estudio con maestros de primaria sobre el día y la noche, las estaciones y las fases de la Luna. Revista Enseñanza de las Ciencias 13(1), 81-96.

1995; Camino y Cracco¹⁵, 1991; De Manuel¹⁶, 1995; Afonso López¹⁷, et al, 1995; De Manuel y Montero¹⁸, 1995; Vega¹⁹, 2001; Martínez-Peña y Gil-Quilez²⁰, 2003; Martínez Sebastiá²¹, 2004; Cohen²², 2003). También, el autor²³ de este trabajo ha realizado un estudio de las concepciones alternativas de temas básicos de Astronomía, en el contexto de la asignatura Ciencias del Espacio en la formación inicial de profesores de Física para la Educación Media.

Las concepciones alternativas específicas de los temas tratados en el video "Las estrellas" se han investigado en diversos artículos publicados de didáctica de la Astronomía, tales como: explorando las ideas de los estudiantes acerca de las estrellas²⁴; aplicando un inventario conceptual de propiedades de las estrellas²⁵; explorando las ideas de los estudiantes acerca de las estrellas y la formación estelar²⁶; el desarrollo y validación de un inventario conceptual de propiedades de las estrellas²⁷ que cubre las principales magnitudes físicas que las describen.

15 Camino, N. y Cracco, J. (1001) Estudio sobre las ideas de estudiantes terciarios sobre el sistema Tierra – Sol – Luna. VII Reunión Nacional de Educación en la Física, Mendoza 1991, Actas, p. 150 – 130.

16 De Manuel, J. (1995) ¿Por qué hay veranos e inviernos? Representaciones de estudiantes (12 – 18) y de futuros maestros sobre algunos aspectos del modelo Sol – Tierra. Revista Enseñanza de las Ciencias 13 (2), 227-236.

17 Afonso López, R. et al. (1995) Una aproximación a las representaciones del alumnado sobre el Universo. Revista Enseñanza de las Ciencias 13 (3), 327-335.

18 De Manuel, J. y Montero, A. (1995) Dificultades en el aprendizaje del modelo Sol – Tierra. Implicaciones didácticas. Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra 1995 (3.2), 91-101.

19 Vega, A. (2001) Tenerife tiene seguro de Sol (y de Luna): Representaciones del profesorado de primaria acerca del día y la noche. Revista Enseñanza de las Ciencias 19 (1), 31-44.

20 Martínez-Peña, B. y Gil-Quilez, MJ. (sin fecha) Images & texts in the learning of models: The Sun – Earth – Moon system.

21 Martínez Sebastiá, B. (2004) La enseñanza/aprendizaje del modelo Sol – Tierra: Análisis de la situación actual y propuesta de mejora para la formación de los futuros profesores de primaria. Revista Latino-Americana de Educación en Astronomía – RELEA, N° 1, p. 7-32.

22 Cohen, J. (2003) Student ideas about the Moon and its phases and the impact of a real model of the Sun – Earth – Moon system in an introductory Astronomy laboratory course. Thesis Master of Science. University of Maine.

23 Espinoza, J. (2007) Didáctica de la Astronomía. Aplicación del modelo de enseñanza – aprendizaje como investigación en la asignatura Ciencias del Espacio. Ediciones DIUMCE, Santiago, Chile.

24 Agan, L. (2004) Stellar Ideas: Exploring students' understanding of stars. Revista electrónica Astronomy Education Review, Vol. 3, Mar 2004 – Oct 2004. En:

25 LoPresto, M. y Murrell, S. (2009) Using the Star Properties Concept Inventory to compare instruction with lectura tutorials to traditional lectures. Revista electrónica Astronomy Education Review, Vol. 8. En:

26 Bailey, J., Johnson, B., Prather, E. y Slater, T. (2019) College students' preinstructional ideas about stars and star formation. Revista electrónica Astronomy Education Review Vol 8. En: https://www.researchgate.net/publication/241210532_College_Students'_Preinstructional_Ideas_About_Stars_and_Star_Formation

27 Bailey, J., Johnson, B., Prather, E. y Slater, T. (2011) Development and validation of the Star Properties Concept Inventory. Revista International Journal of Science Education. En: https://astronomy101.jpl.nasa.gov/files/Star_Properties11.pdf

Algunas concepciones alternativas comunes que presentan los estudiantes, acerca de los temas abordados en el video, específicamente de las estrellas, constelaciones y el Sol como una estrella, extraídos de la investigación didáctica, se presentan a continuación. El profesor debe estar atento para construir conocimientos a partir de ellos. Una selección de estas concepciones alternativas son:

- Las estrellas y constelaciones aparecen en el mismo lugar en el cielo cada noche.
- Confusión entre una constelación y una estrella, lo que serían lo mismo.
- Todas las estrellas de una constelación están cerca una de la otra.
- Hay doce constelaciones del zodiaco.
- Todas las estrellas están a la misma distancia de la Tierra.
- Las estrellas están distribuidas uniformemente en el cielo nocturno y en el universo.
- Todas las estrellas tienen el mismo tamaño.
- El brillo de una estrella depende sólo de su distancia a la Tierra.
- Las estrellas están distribuidas uniformemente a través de la galaxia.
- Todas las estrellas tienen el mismo color.
- Todas las estrellas están fijas en el espacio.
- Las estrellas verdaderamente titilan.
La luminosidad de una estrella depende de la distancia desde la que es observada.
- Una estrella fugaz es realmente una estrella que cae del cielo.
- El Sol y las estrellas resplandecen debido a que queman gas o mediante lava fundida.
- El Sol no es una estrella.
- El Sol no tiene movimiento de rotación.
- El Sol es un cuerpo sólido.
- El Sol sale exactamente por el Este y se pone exactamente por el Oeste todos los días.
- El Sol es de mayor tamaño que las otras estrellas.
- Todas las estrellas son blancas.
- Hay muchas estrellas en el sistema solar.
- La temperatura en la superficie de una estrella roja es mayor que las estrellas blancas y azules.
- Una estrella está hecha de fuego o lava.
- Las estrellas y planetas difieren principalmente debido a su composición o tamaño.
- Las estrellas no cambian en el tiempo.
- Las estrellas son más pequeñas que los planetas.
- Algunas estrellas reflejan más luz desde el Sol, de modo que ellas resplandecen más que otras.
- El brillo de las estrellas depende de cuánta luz reflejan desde la Luna.
- Durante la noche las estrellas reflejan la luz que reciben desde el Sol durante el día.
- Las estrellas reflejan la luz que ellas reciben desde la Luna, debido a que ésta durante el día no aparece.
- Las estrellas reflejan la luz de otros cuerpos celestes.

Actividad 2. Vean y analicen el video "Las Estrellas" anotando las principales ideas presentadas, los conceptos y leyes físicas que se describen y su aplicación para explicar las principales características físicas de las estrellas.

Comentarios A2.- Una vez que los estudiantes hayan planteado por escrito sus ideas acerca de los interrogantes anteriores, se puede exhibir y analizar la producción audiovisual, recordándoles que pongan especial atención a sus principales ideas, que tomen notas y dibujen bocetos de algunos de los esquemas y experimentos mostrados. Si es necesario, el video puede ser exhibido nuevamente o la exhibición se puede hacer por partes. Como se manifestó en la introducción, la exhibición de este video presenta la oportunidad de tratar contenidos de: termodinámica, es decir el concepto de cuerpo negro, las leyes de la radiación y su aplicación para determinar algunas propiedades físicas de las estrellas; el espectro electromagnético y los tipos de espectros; espectros del Sol y de las estrellas; las distancias astronómicas en el sistema solar, en la Vía Láctea y en el universo; el efecto Döppler.

En esta guía para el docente se presenta con mayor profundidad los contenidos abordados en el video, como también se aplica conceptos, leyes y teorías físicas, tratados en el nivel medio de escolaridad y primer año universitario, para que el docente profundice y sepa de dónde provienen esos contenidos, aunque no sean tratados en clase, dependiendo del nivel en que se aplique esta guía didáctica. Para analizar los contenidos tratados en el video, al final de esta guía didáctica se presentan diversas referencias, ya sean artículos de revistas, textos y libros especializados.

Actividad 3. ¿Qué son las estrellas?

Comentarios A3.- Una estrella es un cuerpo celeste, una gigantesca esfera de gas incandescente a muy alta temperatura, en la que están equilibradas dos fuerzas: la gravedad, una fuerza de atracción, que tiende a juntar la materia de la que está constituida la estrella; la otra corresponde a la que ejercen los gases incandescentes, que tienden a separar la materia de la estrella. Luego, el Sol es una estrella y no se ve que se extienda por el cielo debido a que una de esas fuerzas supera a la otra. Las estrellas son esferas estables, gran parte de su existencia, están equilibrándose mutuamente esas fuerzas.

Para el ojo humano, las estrellas son sólo puntos luminosos en el cielo nocturno, pero en realidad, cada una de ellas es como un sol, algunas semejantes al Sol, otras de mayor tamaño que el Sol y otras menores que él. En el núcleo de cada estrella ocurren reacciones termonucleares que son la fuente de energía de la estrella.

Las características físicas para describir una estrella, y que se analizará posteriormente, son las siguientes:

- La **luminosidad** de la estrella es la energía total que irradia por segundo.
- La **temperatura** de la superficie de la estrella es la que determina su color.
- El **radio** de la estrella, que informa de su tamaño.
- La **masa** de la estrella es un parámetro fundamental y que determina su evolución.
- La **composición química** de una estrella es la proporción de elementos químicos que contiene.

Las estrellas que resplandecen en el cielo nocturno son enormes esferas de gas con luminosidad propia. La gravedad, una fuerza de atracción, mantiene a la masa gaseosa de la estrella, contrayéndola hacia su interior. Por otra parte, la fuerza ejercida por la presión de la radiación que emite la estrella, tiende a separar los gases incandescentes. El equilibrio entre estas dos fuerzas mantiene estable a la estrella: en efecto, nunca vemos que la estrella se hunda sobre sí misma ni que se extienda por el cielo.

A veces se confunde las estrellas con las estrellas fugaces, las que no son estrellas. Las estrellas fugaces son trozos de material (roca y polvo) que al penetrar a la atmósfera de la Tierra se incineran, provocando una traza luminosa, como la que se observa en la fotografía (figura 1). Se las denomina meteoros, y que son diferentes a los denominados meteoritos (trozo de roca que llega a la superficie de la Tierra y no se incinera completamente) y meteoroides (trozo de material que se encuentra en el espacio orbitando al Sol o a un planeta). En determinados períodos del año se pueden producir verdaderas lluvias de estrellas fugaces²⁸.

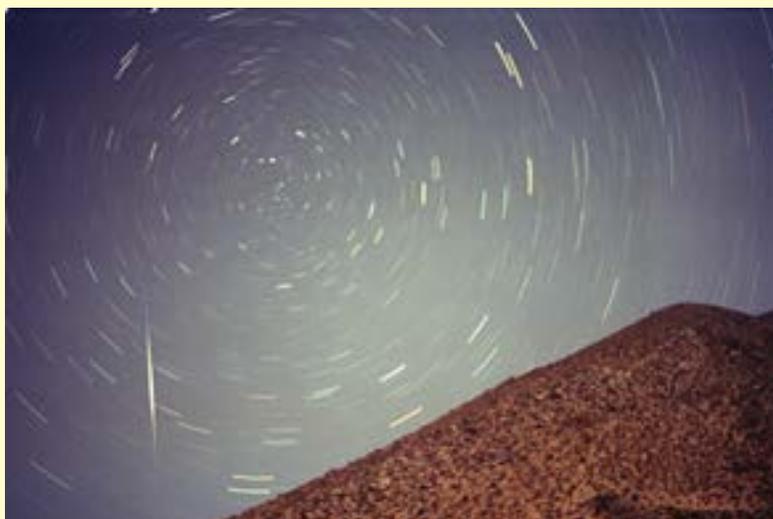


Figura 1

Actividad 4. ¿Qué es la esfera celeste? ¿Y el ecuador y polos celestes?

Comentarios A4.- Cuando se observa el cielo nocturno en una noche despejada, sin nubes y sin Luna, lejos de las ciudades y poblados iluminados, las estrellas del cielo parecen definir una esfera, la esfera celeste o firmamento, sobre la cual están todas las estrellas que se ven a simple vista. En la figura 2 se ilustra la esfera celeste y otras definiciones de ella. La esfera celeste es una esfera imaginaria con la Tierra ubicada en su centro, sobre la cual parecen estar situados los objetos del cielo, siendo esta visión una visión geocéntrica. La esfera celeste cambia una vez al día, pero en realidad es el resultado de la rotación de la Tierra alrededor de su eje. Interrogantes importantes para plantear a los estudiantes son las siguientes: ¿En qué sentido parece moverse la esfera celeste? ¿Y la Tierra? El movimiento de la esfera celeste es aparente, puesto que es la Tierra la que se mueve en sentido opuesto.

28 Maurette, M. y Hammer, C. (1985) Las estrellas fugaces. Revista Mundo Científico N° 51.



Figura 2

El ecuador celeste está situado sobre la esfera celeste, directamente sobre el ecuador de la Tierra; es la proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste y divide a la esfera celeste en dos hemisferios iguales. Los polos celestes están situados sobre la esfera celeste, directamente proyectando los polos geográficos terrestres. El polo sur celeste sobre el polo sur geográfico y el polo norte celeste sobre el polo norte geográfico.

La esfera celeste se ha dividido, por convención, en 88 constelaciones con el propósito de identificar objetos celestes en ella (planetas, estrellas, galaxias, nebulosas, etc.). Una constelación corresponde a una agrupación de estrellas que parecen describir figuras en el cielo. Así, en la actualidad, algunas constelaciones tienen los nombres que les dieron las antiguas culturas de Oriente Medio y el Mediterráneo en sus mitologías, tal como Orión, Sagitario, Escorpión y muchas más; otras son nuevas, como objetos inventados hace algunos cientos de años (telescopio, microscopio, compás, etc.). La estrella más brillante de una constelación se le asigna la letra griega α (alfa) del alfabeto griego, las que le siguen en brillo se les asignan las siguientes letras: β (beta), γ (gamma), δ (delta), ϵ (épsilon), y así sucesivamente.

¿Qué efectos se obtienen al fotografiar el cielo nocturno con tiempos de exposición prolongados? Las fotografías siguientes son una evidencia que la Tierra está rotando. En la figura 3 se apuntó la cámara hacia el cielo nocturno, cercano al ecuador celeste, desde el hemisferio sur (5ª región, Chile) ¿Cómo nos damos cuenta que la fotografía no fue tomada en el hemisferio norte? ¿Cómo aparecerían las estrellas en la fotografía captada desde el hemisferio norte? La constelación que aparece corresponde a Orión. En la figura 4 se apuntó la cámara hacia el polo sur celeste. En esta fotografía aparecen la constelación Cruz del Sur y los punteros de la Cruz. También se visualiza la galaxia satélite de la Vía Láctea, la Nube Grande de Magallanes. Más tenue, en la parte superior, aparece la Nube Pequeña de Magallanes, otra galaxia satélite de la Vía Láctea.

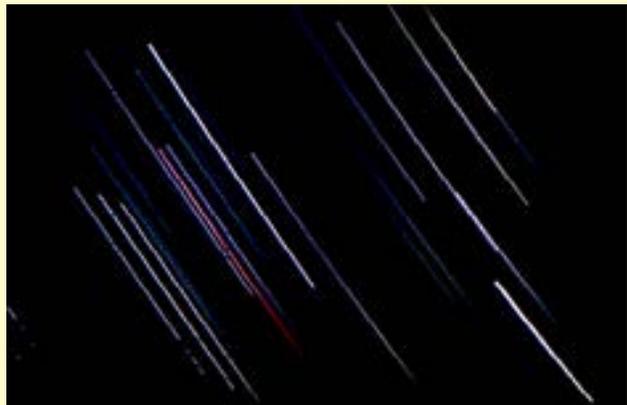


Figura 3



Figura 4



Figura 5

Esta fotografía (Figura 5) corresponde también a la zona del polo sur celeste, debido a que las estrellas forman arcos de circunferencia respecto al eje de rotación. El polo sur celeste está aproximadamente en el extremo superior de la techumbre de la casa.

Actividad 5. ¿Cuál es la estrella más brillante del firmamento?

Comentarios A5.- Sirio, perteneciente a la constelación del Can Mayor, es la estrella más brillante del firmamento. Por ser también la más brillante de la constelación se la denomina "Alfa Can Mayor". En la figura 6, que corresponde a una sección de una carta estelar, se ilustra la brillante estrella Sirio (Sirius) del Can Mayor, y en la que se pueden identificar otros objetos celestes de ese sector del cielo. En la fotografía (figura 7), la estrella brillante que aparece corresponde a Sirio.

En la figura 8 se representa el sector del cielo cercano a las constelaciones del Can Mayor y de Orión, en las que se ilustran las figuras vistas por la mitología. Orión es un cazador al que lo acompañan los perros y otros animales.

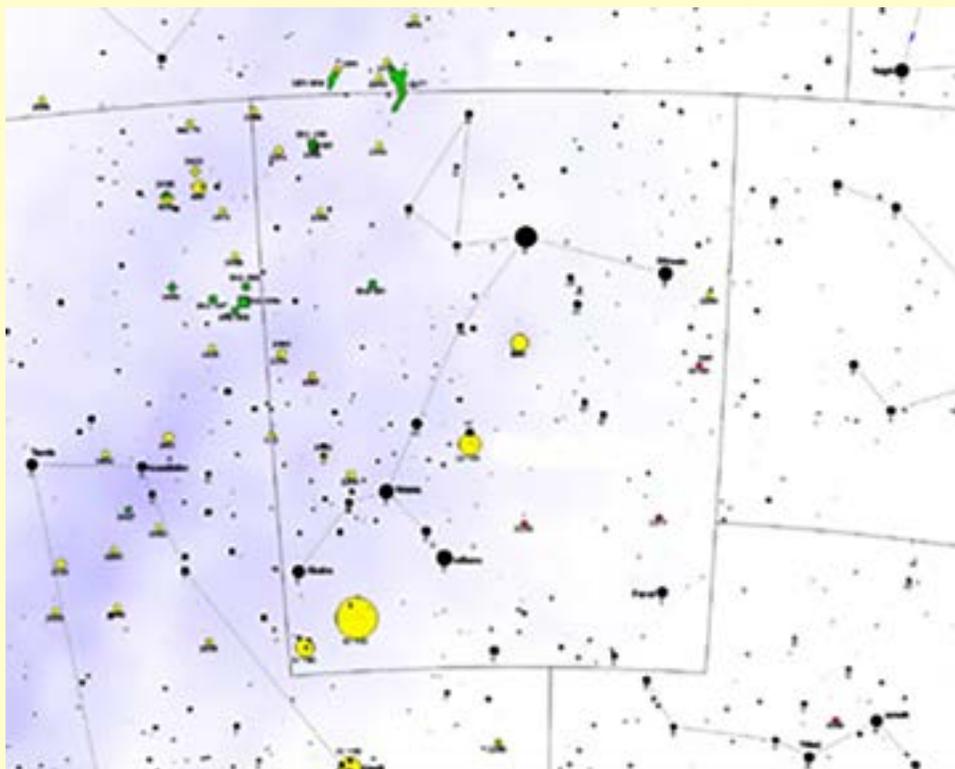


Figura 6



Figura 7

Las estrellas visibles a simple vista en el cielo nocturno son todas estrellas de la Vía Láctea, galaxia a la que pertenece el Sol y el sistema solar. Hay otras galaxias visibles en el cielo nocturno como la Nube Grande de Magallanes y la Nube Pequeña de Magallanes, visibles desde el hemisferio sur, mirando hacia el punto cardinal sur del cielo, durante una noche despejada y sin Luna, lejos de las luces de las ciudades. Parecen dos nubes en el cielo nocturno y, en realidad, son dos galaxias satélite de la Vía Láctea, como se ilustra en la figura 9.

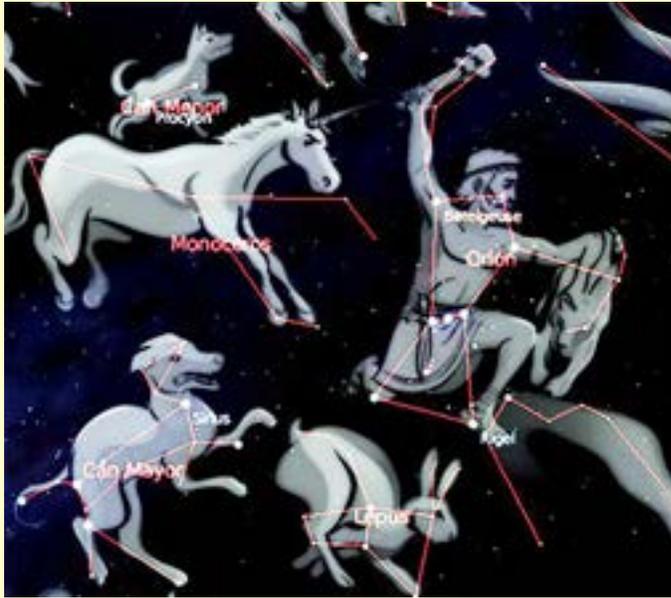


Figura 8



Figura 9

La Vía Láctea está compuesta por más de 150 mil millones de estrellas, o más. Algunos astrónomos han estimado que nuestra galaxia podría albergar una cantidad de 200 mil millones, o hasta unos 400 mil millones de estrellas. Más adelante se va a calcular, empleando algunas relaciones de la Física del movimiento planetario, que podrían ser algo más de 100 mil millones de estrellas, sobre la base de algunas suposiciones. La fotografía de la figura 10 ilustra parte de la Vía Láctea tal como se observa en el cielo nocturno, captada con un tiempo de exposición de 8 minutos (VI región, latitud $34^{\circ} 26'$), con cámara montada en una plataforma ecuatorial de brazo doble con motor.

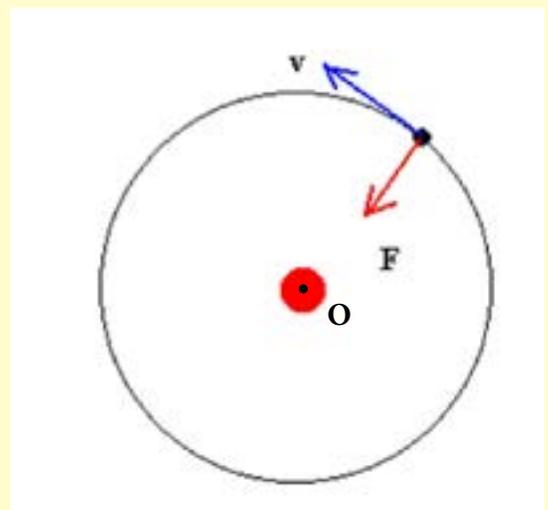


Figura 10

¿Cómo determinar, aproximadamente, la masa de la galaxia Vía Láctea? Se determina mediante la aplicación de la tercera ley de Kepler, $T^2 = K R^3$, pero antes se deben recordar algunos conceptos físicos y hacer algunas suposiciones, como las siguientes.

Cuando se estudia la ley de gravitación universal, un planeta en P, o cualquier otro cuerpo celeste, describe una órbita circunferencial alrededor de otro de mayor masa ubicado en O como, por ejemplo, el Sol, como se ilustra en la figura 11. Existe una fuerza dirigida hacia el centro O, denominada **fuerza centrípeta**. Si no existiera esta fuerza el cuerpo que gira se alejaría moviéndose tangente a la circunferencia.

Figura 11



La fuerza centrípeta F_c se expresa mediante la siguiente relación: $F_c = m \frac{v^2}{R}$, en donde m es la masa del cuerpo celeste que gira alrededor de otro, v es la velocidad que tiene en su órbita, R es el radio de la circunferencia. El movimiento circunferencial se estudia a nivel de Educación Media, pero aquí daremos lo esencial de él para obtener una relación importantísima: la formulación de Newton de la tercera ley de Kepler.

La velocidad v del cuerpo que gira, durante un período T , tiempo que se demora en dar una vuelta completa, en el movimiento circunferencial está expresado por $v = \frac{2\pi R}{T}$, en donde R es el radio de la circunferencia.

Como la fuerza de gravitación universal de Newton es una fuerza de atracción, también dirigida hacia el centro, podemos igualar la fuerza centrípeta con la fuerza de gravitación, y reemplazando v por la expresión anterior, obtenemos la expresión para la tercera ley de Kepler:

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad (1)$$

En donde G es la constante de gravitación universal y M es la masa del cuerpo central, es decir, la masa del Sol. A partir de esta última expresión se puede conocer la constante K que aparece en $T^2 = K R^3$. Resulta: $K = 4\pi^2 / GM$.

Se puede ahora calcular la masa de la galaxia Vía Láctea. Las observaciones astronómicas indican que el Sol describe una órbita circunferencial alrededor del centro de nuestra galaxia. El radio de la órbita es de 28 000 años luz, aproximadamente, y su período de una revolución completa es de 220 millones de años. En este movimiento el Sol experimenta la atracción gravitatoria de una gran cantidad de estrellas que están dentro de su órbita. a) Calcular la masa total de esas estrellas a partir de los datos anteriores. b) ¿Cuántas estrellas de masa igual a la del Sol, que es de 2×10^{30} kg, representa ese valor numérico?

a) Los datos que se dan son el radio de la órbita del Sol alrededor del centro de la Vía Láctea y su período, por lo cual se debe emplear la expresión (1), despejando la masa M que correspondería a la masa total de las estrellas al interior de la órbita del Sol. Por lo tanto,

$$M = \frac{4\pi^2 R^3}{G T^2} \quad (2)$$

Pero un año luz es equivalente a $9,46 \times 10^{15}$ m, por lo que 28 000 años luz es igual a $2,65 \times 10^{20}$ m. El período de 220 millones de años debemos transformarlo a segundos, así

$$T = 220 \times 10^6 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 6,94 \times 10^{15} \text{ s}$$

La constante de gravitación $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$. Luego, reemplazando todo en la expresión (2):

$$M = 4\pi^2 (2,65 \times 10^{20} \text{ m})^3 / (6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2) (6,94 \times 10^{15} \text{ s})^2$$

$$M = 4\pi^2 (18,61 \times 10^{60} \text{ m}^3) / (6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2) (4,8 \times 10^{31} \text{ s}^2)$$

Recordar que $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$, con lo que

$$M = 7,35 \times 10^{62} / 3,2 \times 10^{21} \text{ kg}$$

$$M = 2,3 \times 10^{41} \text{ kg},$$

que es la masa de todas las estrellas dentro de la órbita del Sol.

b) Como la masa del Sol es $2 \times 10^{30} \text{ kg}$, entonces la masa total dividida por la del Sol corresponde al número de estrellas dentro de la órbita del Sol:

$$\text{N}^\circ \text{ de estrellas} = 2,3 \times 10^{41} \text{ kg} / 2 \times 10^{30} \text{ kg} = 1,15 \times 10^{11}$$

Es decir, unas 115 mil millones de estrellas al interior de la órbita del Sol.

Actividad 6. ¿Cómo la intensidad de la luz de una estrella depende de la distancia?

Comentarios A6.- Todas las estrellas que se pueden ver en el cielo nocturno resplandecen porque en sus núcleos ocurre lo que se denomina la fusión termonuclear, tal como sucede en el Sol. Pero las estrellas no son idénticas al Sol, difieren en su luminosidad L , magnitud física que es la cantidad de energía que irradia la estrella en cada segundo, la que se mide en watt (símbolo W) y corresponde a 1 Joule/segundo ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$). Así, la luminosidad del Sol es de

$$L_{\odot} = 3,90 \times 10^{26} \text{ W}.$$

El símbolo L_{\odot} se utiliza para la luminosidad del Sol, puesto que la de otras estrellas se la puede expresar como un múltiplo de la luminosidad del Sol. Por lo tanto, muchas estrellas son menos luminosas que el Sol, mientras que algunas emiten con una luminosidad de miles de veces mayor a la del Sol. Conocer la luminosidad de una estrella permite determinar la distancia a la que se encuentra y la historia de la estrella, es decir, conocer su estructura interna actual y su evolución futura.

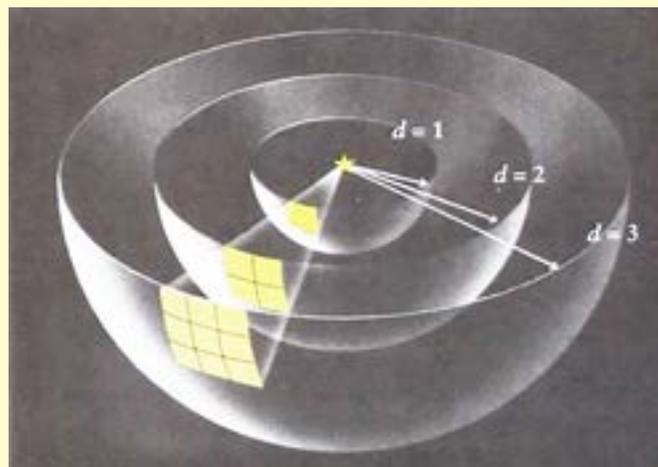


Figura 12

Cuando una estrella irradia, u otra fuente luminosa como una ampollita, emite energía luminosa en todas direcciones, distribuyéndose por todo el espacio. Suponer una esfera de radio **d** centrada en la estrella, como se ilustra en la figura 12. La energía que incide en cada segundo en un metro cuadrado de la superficie de la esfera a la distancia **d** de la fuente luminosa, representado en la figura 12 por el cuadrado de la esfera interior, corresponde a la luminosidad total **L** emitida por la fuente luminosa, dividido por la superficie total de la esfera, es decir $4 \pi d^2$, lo que se denomina el brillo aparente o simplemente brillo (**b**) de la fuente luminosa, ya que el brillo de una fuente luminosa depende de la cantidad de energía que incide por segundo a la superficie de un detector luminoso, por ejemplo el ojo. El brillo aparente **b** se mide en W/m² y corresponde a la ley del inverso del cuadrado de la distancia observador-fuente y se expresa como:

$$b = \frac{L}{4 \pi d^2} \quad (3)$$

En donde:

b = brillo aparente de la luz de una estrella en W/m²;

L = luminosidad de la estrella en W;

d = distancia a la estrella en m.

Por ejemplo, la luminosidad del Sol es $L_{\odot} = 3,86 \times 10^{26} \text{ W}$, y para calcular el brillo aparente del Sol a la distancia de 1 UA = $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$,

$$b = \frac{3,86 \times 10^{26} \text{ W}}{4 \pi (1,5 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 1370 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Este valor numérico $b = 1370 \text{ W/m}^2$ corresponde también a la constante solar.

Se mide el brillo aparente de una estrella utilizando un fotómetro adaptado a un telescopio. El fotómetro que mide la cantidad de luz, es similar al fotómetro de una cámara fotográfica que determina la exposición apropiada a las condiciones de luz. El área de la ciencia que mide el brillo aparente de las estrellas se denomina fotometría.

La ley del inverso del cuadrado de la distancia expresa que se puede determinar la luminosidad de una estrella si se conoce su distancia **d** y su brillo aparente **b**, ya que la luminosidad **L** queda expresada como: $L = 4 \pi d^2 b$.

Cuando se aplica esta relación para determinar la luminosidad del Sol L_{\odot} para una distancia Sol-Tierra d_{\odot} (de 1 UA) y el brillo aparente b_{\odot} del Sol, se tiene $L_{\odot} = 4 \pi d_{\odot}^2 b_{\odot}$

Si se toma la luminosidad **L** de otra estrella y se hace el cociente respecto a la luminosidad del Sol L_{\odot} , se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{d}{d_{\odot}} \right)^2 \frac{b}{b_{\odot}} \quad (4)$$

En la ecuación (4) se tiene:

$\frac{L}{L_{\odot}}$ = razón entre la luminosidad de una estrella respecto a la del Sol.

$\frac{d}{d_{\odot}}$ = cociente entre la distancia a la estrella y la distancia Sol-Tierra.

$\frac{b}{b_{\odot}}$ = cociente entre el brillo aparente de la estrella y el brillo aparente del Sol.

Mediante la ecuación (4) se puede determinar la luminosidad L de una estrella, conociendo la distancia a la estrella comparándola con la distancia Tierra-Sol y el brillo aparente de la estrella en relación al del Sol (el cociente $\frac{b}{b_{\odot}}$).

Actividad 7. ¿Cómo se miden las distancias a las estrellas? ¿Cuáles son las unidades que se emplean para medir las distancias a las estrellas?

Comentarios A7.- Las estrellas se encuentran a enormes distancias y para expresarlas se emplean unidades especiales como el año luz y el parsec.

El **año luz** corresponde a la distancia que recorre la luz en un año, moviéndose con la rapidez de 300 000 km/s . Por lo tanto, en un año, con 365 días, la luz recorre una distancia de:

$$1 \text{ año luz} = (365 \text{ d} \cdot 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ min} \cdot 60 \text{ s}) \cdot 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$1 \text{ año luz} = 9,4608 \times 10^{12} \text{ km} \quad (5)$$

La estrella más cercana es Próxima Centauro (α Centauro C) ya que es un sistema estelar constituido por tres estrellas: alfa Centauro A, B y C, esta última es Próxima, como se verá más adelante, y se encuentra a la distancia del Sol de 4,22 años luz. Esto significa que la luz demora más de cuatro años en llegar hasta nuestros ojos. En realidad, la estrella Próxima no se ve a simple vista como las otras dos componentes, alfa Cent A y B, que se observan a simple vista como una sola estrella (figura 13).



Figura 13 (a)



(b)

El **parsec** se obtiene determinando el ángulo de paralaje de una estrella cercana, como se ilustra en las figuras 14 y 15. Se mide el ángulo de paralaje **p** en dos posiciones de la órbita de la Tierra, separadas por seis meses. Cuando la Tierra orbita al Sol, se observa que una estrella cercana cambia su posición contra el fondo de estrellas distantes (figura 14). La paralaje **p** de la estrella es igual al radio angular de la órbita de la Tierra vista desde la estrella.

Una estrella más cercana a nosotros tiene un ángulo de paralaje **p** mayor (figura 15). La distancia **d** a la estrella (en parsecs) es igual al recíproco del ángulo de paralaje (en segundos de arco):

$$d = \frac{1}{p} \quad (6)$$

d = distancia a la estrella en parsecs (símbolo pc);

p = ángulo de paralaje de la estrella en segundos de arco.

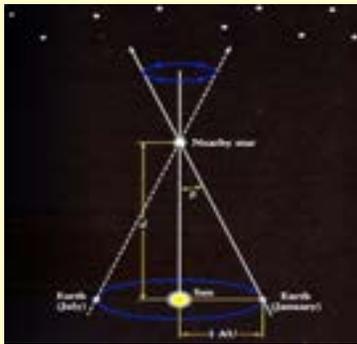


Figura 14

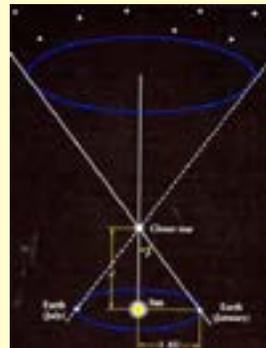


Figura 15

Ver Animación

Por ejemplo, si una estrella tiene un paralaje $p = 0,1''$, entonces está a una distancia $d = 1/(0.1) = 10$ parsecs de la Tierra.

La estrella Barnard, una de las estrellas más cercanas, tiene un paralaje de $0,545''$, entonces la distancia a esta estrella es:

$$d = \frac{1}{p} = \frac{1}{0.545} = 1,83 \text{ pc}$$

La estrella Próxima Centauro tiene un paralaje de $0,77''$, por lo tanto:

$$d = \frac{1}{0,77} = 1,2987 \text{ pc}$$

Pero $1 \text{ pc} = 3,26$ años luz, con lo cual se obtiene la distancia a las estrellas en años luz.

También es posible obtener las distancias a las estrellas en términos de unidades astronómicas, una unidad utilizada para medir distancias en el sistema solar. De la figura 14 se tiene:

$$\frac{1 \text{ UA}}{2 \pi d} = \frac{p}{360^\circ} \rightarrow d = \frac{360^\circ}{2 \pi} \frac{1 \text{ UA}}{p} \rightarrow d = 206 \, 265 \frac{1 \text{ UA}}{p}$$

Por ejemplo, si $p = 0,77''$ para Próxima, entonces $d = 206\,265 \frac{1}{0,77''} = 267\,877 \text{ UA}$

Actividad 8. ¿Qué es la magnitud estelar? ¿Cuál es la clasificación del sistema de magnitudes estelares?

Comentarios A8.- Las constelaciones son grupos de estrellas en una región del cielo y cuyas configuraciones parecen describir figuras, según las culturas antiguas. Algunas de las estrellas visibles a simple vista tienen un nombre propio como Aldeberán, Betelgeuse, Rigel, etc. A las estrellas de una constelación determinada se las describe por una letra griega en función de su brillo. La estrella más brillante de la constelación es la alfa (α) y las otras son clasificadas en orden decreciente de brillo; beta (β) es la segunda estrella más brillante de la constelación; gamma (γ) es la tercera y así sucesivamente. La fotografía de la figura 16 es una exposición fotográfica corta (de unos 15 segundos) de la constelación Orión captada desde el hemisferio sur (IV región, Chile). La estrella Betelgeuse corresponde al punto rojizo amarillento de la parte inferior. En la figura 17 está la constelación Orión como se representa en una carta estelar.



Figura 16



Figura 17

Con la nomenclatura anterior, la estrella más brillante de la constelación Cruz del Sur es Alfa Cruz, la segunda es Beta Cruz, etc. Este sistema continúa hasta que se acaban las estrellas de la constelación, o hasta que se acaba el alfabeto griego. La figura 18 corresponde a una fotografía de larga exposición del sector del cielo de la Cruz del Sur (captada con plataforma ecuatorial en la VI región, Chile, latitud $34^\circ 26'$ sur). La figura 19 constituye una carta estelar del sector de la Cruz del Sur.



Figura 18



Figura 19



Figura 20



Figura 21

En la figura 20 se identifican las estrellas principales que constituyen la constelación Cruz del Sur (α , ACrux; β ; γ ; δ ; ϵ) como también una zona oscura, el Saco de Carbón, y una galaxia, la NGC 4755, el Joyero (Kappa Crucis), denominada así por los colores que presentan las estrellas que lo componen. En la figura 21 se representa la constelación Centauro, cercana en el cielo a la Cruz del Sur. Las estrellas que constituyen las piernas delanteras del Centauro corresponden a los "punteros de la Cruz", dos estrellas brillantes que apuntan hacia la Cruz y de esto el nombre que reciben. Alfa de Centauro es el sistema estelar más cercano al Sol.

Para cuantificar y comparar el brillo de las estrellas y planetas, se utiliza una escala de magnitudes estelares. Se trata de una escala logarítmica en la que el brillo de los objetos celestes disminuye cuando el número de la escala aumenta, tal como aparece en el video y también se nota en la Tabla 1.

Tabla 1
Ejemplos de magnitudes (en orden decreciente de brillo)

Nombre objeto celeste	Magnitud
Sol	-26,7
Luna llena	-12,7
Venus	-4 a -2
Júpiter	-2 a -1
Marte	-2 a +2
Mercurio	-2 a +3
Sirio (estrella más brillante)	-1,5
α Centauro (sistema estelar más cercano)	-0,1
Saturno	0 a +1
Galaxia Andrómeda (objeto más distante a simple vista)	+3,5
Límite de sensibilidad del ojo humano (promedio)	+6,5
Urano	+6.5
Neptuno	+8
Plutón	+14
Límite del telescopio espacial Hubble	+28 a +29

En la escala de magnitudes estelares se destaca **Sirio** como la estrella más brillante del firmamento. Se puede localizar, principalmente en las vacaciones en verano, cerca del grupo de estrellas conocidas comúnmente como "las tres Marías", el cinturón de Orión.

Actividad 9. ¿Cómo se identifican las magnitudes estelares de las estrellas en un mapa o carta estelar?

Comentarios A9.- En las cartas estelares las magnitudes estelares se representan por círculos, correspondiendo los mayores a las estrellas más brillantes, como se indica en la parte superior izquierda de la figura 22. De este modo, se representan estrellas de magnitud 1 (la más brillante) hasta 6 (la menos brillante). La carta estelar²⁹ corresponde al polo sur celeste y constelaciones circumpolares, notándose que en el polo sur celeste no hay una estrella brillante, sino que cerca del polo sur celeste se encuentra una estrella de magnitud 6 (σ Octans), muy poco brillante,

²⁹ Norton's Star Atlas and reference handbook (1998) Epoch 2000, Editor: Ian Ridpath. 19th edition, Editorial Prentice Hall.

casi en el límite de sensibilidad del ojo humano. Al lado derecho de la carta estelar destacan las estrellas de la Cruz del Sur y las de α y β Centauro (los punteros de la Cruz). Destacan también las dos Nubes de Magallanes, rodeando al polo sur celeste, la Grande en la parte inferior, y la Pequeña, hacia la izquierda. También se pueden observar otras estrellas brillantes, como Achenar (a la izquierda). La franja verde del lado derecho corresponde a un brazo de la galaxia Vía Láctea en la que se encuentra el sistema solar.

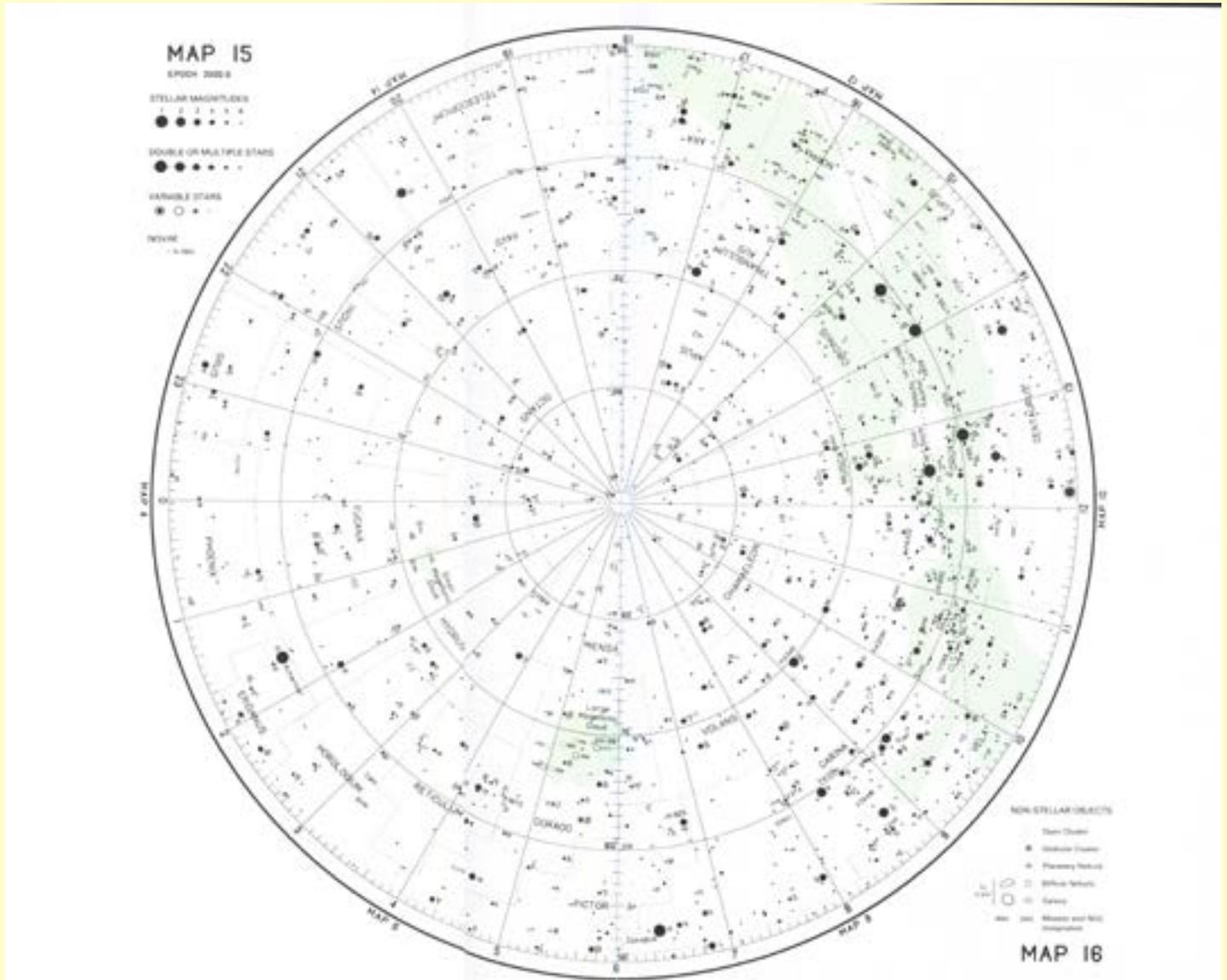


Figura 22

Otra manera de representar las constelaciones de una carta estelar se ilustra en la figura 23, en la que destacan algunas constelaciones de la eclíptica, como Escorpión con su brillante estrella Antares, y otras constelaciones de la eclíptica: Libra, Ofiuco, Sagitario.



Figura 23

La figura 24 es una fotografía de la constelación Escorpión captada con un tiempo de exposición de unos 15 segundos, puesto que se notan muy pocas estrellas, pero destaca claramente el Escorpión.

Otro sector del cielo representado en la figura 25, destacándose otras constelaciones de la eclíptica (de derecha a izquierda): Taurus, Géminis, Cáncer y Leo. En Tauro se encuentra la estrella Aldebarán, el ojo rojizo anaranjado del toro, que ya se ha mencionado.



Figura 24



Figura 25

Actividad 10. ¿De qué depende el color de una estrella?

Comentarios A10.- El color de las estrellas destaca claramente en las fotografías de larga exposición, trazas estelares (figura 26) o fotografías con seguimiento (figura 27). Cuando se observa a simple vista, solo es posible identificar el color en las estrellas más brillantes, tal como Betelgeuse, Aldebarán. Antares y otras.

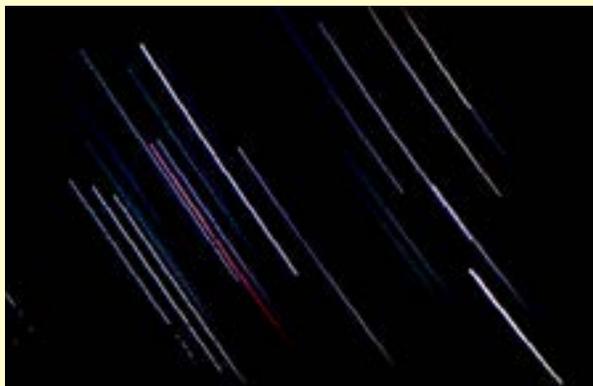


Figura 26



Figura 27

El efecto del color de las estrellas es más notorio en los registros fotográficos de larga exposición. El tiempo de exposición de la fotografía (figura 27) fue de unos cinco minutos, captada mediante seguimiento, contrarrestando el movimiento aparente del cielo; y el de la figura 26, alrededor de un cuarto de hora. Ambas muestran la constelación Orión. ¿Por qué en la fotografía de la figura 26 aparecen trazas en vez de puntos? Comparar ambas fotografías respecto a los colores que se distinguen. En la figura 28 se identifican los nombres que tienen las principales estrellas de la constelación Orión. La fotografía de la figura 29 muestra el sector del cielo de la constelación Cruz del Sur (en la parte superior) en la que destacan los colores de numerosas estrellas. Esta fotografía tiene un tiempo de exposición de 5 minutos (VI región, latitud $34^{\circ} 26'$ sur), captada con seguimiento con una plataforma ecuatorial de brazo doble con motor.

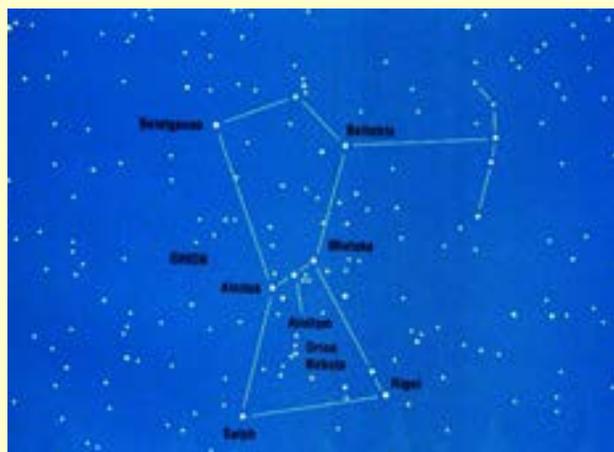


Figura 28



Figura 29

La luz que se capta de una estrella proviene de su exterior. Analizando cuidadosamente la composición de esta luz (el espectro de la estrella), los astrónomos pueden conocer de qué elementos está compuesta la estrella.

El color de una estrella depende de la temperatura de su superficie. Así, una estrella relativamente fría es de color rojo, como Betelgeuse de la constelación Orión. Mientras que una estrella muy caliente, como por ejemplo Rigel, también de Orión, es azul. Estos colores se pueden distinguir a simple vista. En la tabla 2 se presenta una selección de estrellas con sus colores y temperaturas respectivas. Estas temperaturas corresponden a la superficie de la estrella, puesto que en sus núcleos (parte central de la estrella) la temperatura es mucho mayor, del orden de los millones de kelvin.

Tabla 2

Estrella	Temperatura superficial (K)	Color
Bellatrix (γ Orión)	28 000	Azul
Rigel (β Orión)	13 400	Azul
Sirio (α Can Mayor)	10 000	Azul - blanco
Sol	5800	Amarillo
Aldebarán (α Tauro)	3700	Anaranjado
Betelgeuse (α Orión)	2400	Rojo

Actividad 11. ¿Qué es un cuerpo negro en Física? ¿Cómo se analiza la radiación emitida por un cuerpo negro?

Comentarios A11.- Para iniciar este tema, es habitual recordar un experimento sencillo que se realiza al estudiar temas de calor: se trata del termoscopio de radiación que se ilustra en la figura 30. Consiste de dos matraces esféricos unidos por una manguera que contiene agua coloreada, herméticamente colocados. Uno de los matraces está ennegrecido con hollín de una vela, el que tiene un coeficiente de absorción cercano a la unidad. Al colocarlo frente a diversas fuentes de radiación térmica, tal como una lámpara infrarroja, se origina un desnivel en el agua coloreada. Se concluye que el negro de humo se comporta como un cuerpo negro.

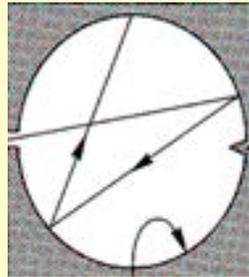


[Ver Animación](#)

Figura 30

Un cuerpo negro es un sistema como se muestra en la figura 31, un orificio por el cual penetra radiación y es múltiplemente reflejada y absorbida por las paredes de la cavidad, pintadas de color negro mate. Toda la radiación que penetra por el orificio es absorbida y nada sale por él. Esto corresponde a un cuerpo negro ideal en Física. Las paredes y el interior del sistema alcanzan una cierta temperatura T . (McGillivray, 1987)³⁰

Orificio pequeño actúa como cuerpo negro.



El cono evita que la radiación que incide normalmente sea reflejada inmediatamente.

Figura 31

Ahora si experimentalmente, con un aparato que se denomina espectrorradiómetro (figura 32), se hace que la radiación emitida por un cuerpo negro incida en el aparato y se explora su espectro, se obtienen las denominadas curvas de cuerpo negro de la figura 33.

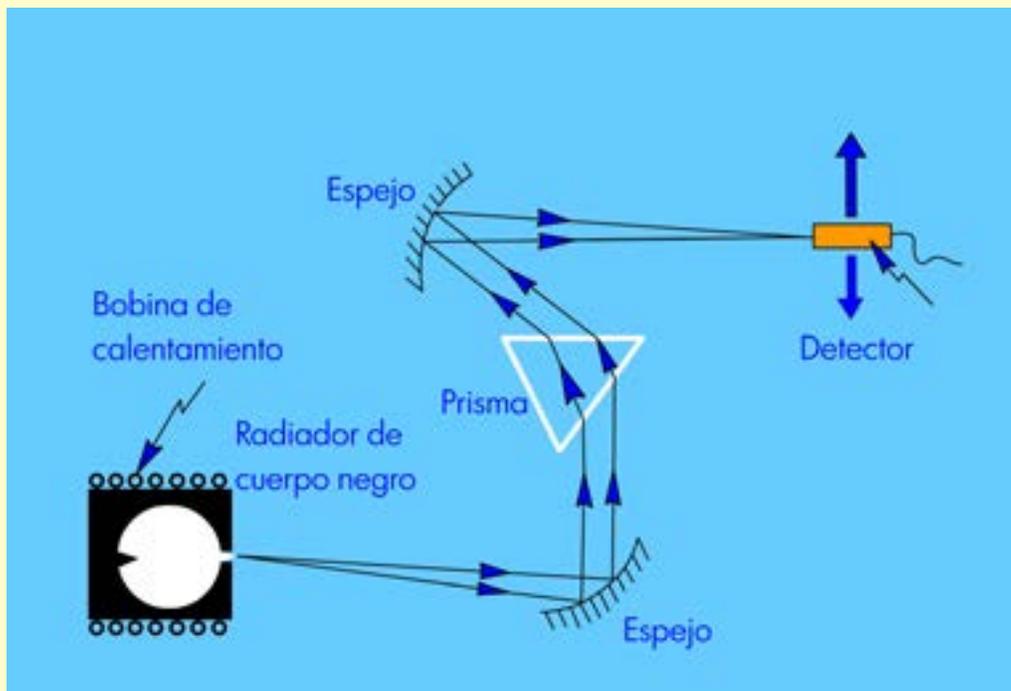


Figura 32

30 McGillivray, D. (1987) Physics and Astronomy. Editorial Macmillan.

Actividad 12. ¿Cuáles son las curvas de cuerpo negro obtenidas, analizando la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro?

Comentarios A12.- Al explorar el espectro de la radiación emitida por un cuerpo negro, con el detector del espectrorradiómetro, se obtienen las curvas de cuerpo negro de la figura 33, en que se grafica la intensidad de la radiación emitida (en unidades de W/m^2) en función de la longitud de onda λ , en nm ($nm = nanómetro$), para tres diferentes temperaturas de cuerpo negro. $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.

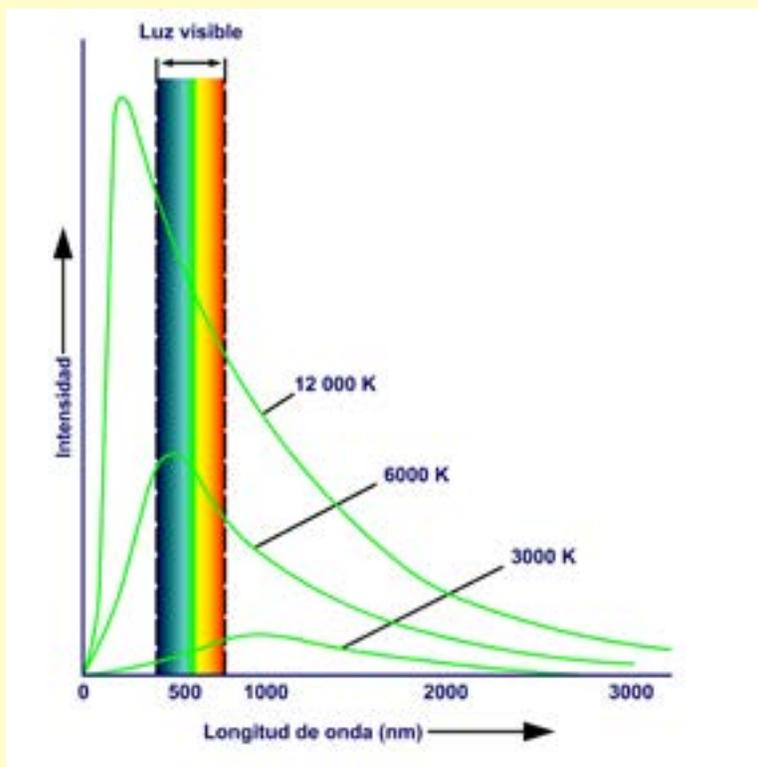


Figura 33

Actividad 13. ¿Cómo se interpretan las curvas de cuerpo negro en un gráfico Intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro en función de la longitud de onda de la radiación, para distintas temperaturas?

Comentarios A13.- Del gráfico de la figura 33, Intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro en función de la longitud de onda, se observa que todos los cuerpos emiten radiación en todo el espectro de longitudes de onda, pero según sea su temperatura, el máximo de intensidad puede estar en el espectro visible, infrarrojo o en el ultravioleta. Así, un cuerpo a la temperatura de 6000 K, que es una temperatura cercana a la temperatura de la superficie del Sol, emite su máxima intensidad en el espectro visible. En Física se considera que el Sol es un cuerpo negro, en los términos que se ha tratado aquí, y por supuesto también las estrellas se comportan como cuerpos negros.

Actividad 14. ¿Cuáles son las leyes de la radiación? ¿Cómo se interpretan las leyes de Wien y de Stefan – Boltzmann?

Comentarios A14.- Del gráfico de la figura 33 se pueden inferir las leyes de Wien y de Stefan Boltzmann. La primera, siguiendo los máximos de intensidad para las distintas temperaturas, establece que

$$\lambda_m \cdot T = \text{cte} \quad (7)$$

en donde λ_m es la longitud de onda a la cual la intensidad de la radiación es máxima, como se ve en la figura, y la constante de proporcionalidad equivale a $2,90 \times 10^{-3} \text{ m K}$. Como ejemplo, para el Sol cuya longitud de onda a la que emite su mayor intensidad de radiación es $\lambda_m = 500 \text{ nm}$; entonces se puede calcular la temperatura de la superficie del Sol. Reemplazando en la ecuación para la ley de Wien se obtiene una temperatura de $T = 5800 \text{ K}$.

La relación intensidad en función de la temperatura se denomina ley de Stefan– Boltzmann que es la energía total emitida por cada metro cuadrado de la superficie de un objeto en cada segundo, y se expresa por

$$R_N(T) = \sigma T^4 \quad (8)$$

en donde R_N es la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura T , con el valor numérico de $\sigma = 56,697 \text{ nW}/(\text{m}^2\text{K}^4)$.

Actividad 15. ¿Cómo se aplican las leyes de la radiación para determinar algunas magnitudes físicas que describen a las estrellas?

Comentarios A15.- Para determinar la luminosidad del Sol se utiliza la expresión de la ley de Stefan-Boltzmann: $L_{\odot} = 4 \pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$, en donde R_{\odot} es el radio del Sol y la superficie del Sol es igual a $4 \pi R_{\odot}^2$, el área de una esfera. Para otra estrella distinta al Sol, la luminosidad es de la misma manera, $L_{\star} = 4 \pi R_{\star}^2 \sigma T_{\star}^4$ y dividiendo ambas expresiones se obtiene:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 \quad (9)$$

Como ejemplo se puede determinar el radio de la brillante estrella supergigante roja Betelgeuse de la constelación Orión que es 60 000 veces más luminosa que el Sol, es decir $L = 60\,000 L_{\odot}$, y su temperatura en la superficie es de 3500 K. Sustituyendo en la ecuación (9) se obtiene

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \left(\frac{5800\text{K}}{3500\text{K}}\right)^2 \sqrt{6 \times 10^4} = 670$$

Y finalmente se obtiene: $R_{\odot} = 6,96 \times 10^5 \text{ km}$ y el radio de la estrella Betelgeuse es $R = 4,7 \times 10^8 \text{ km} > 3 \text{ UA}$.

Actividad 16. ¿Cómo se determina la luminosidad de una estrella, y en particular la del Sol?

Comentarios A16.- La figura 34 es una fotografía del Sol, captada con un filtro especial en el foco primario del telescopio. Se puede determinar la luminosidad del Sol mediante la expresión $L_{\odot} = 4 \pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$, con radio del Sol $R_{\odot} = 6,96 \times 10^5$ km y la superficie del Sol $= 4 \pi R_{\odot}^2$. La temperatura en la superficie de Sol es $T_{\odot} = 5800$ K. Reemplazando en la expresión para la luminosidad del Sol, se obtiene aproximadamente: $L_{\odot} = 3,90 \times 10^{26}$ W



Figura 34

Actividad 17. ¿Cómo se puede armar un fotómetro con bloques de parafina para determinar experimentalmente la luminosidad del Sol, comparándola con la potencia emitida por una ampollita?

Comentarios A17.- Se puede construir dos tipos de fotómetros: (i) de mancha de aceite o grasa, y (ii) de bloques de parafina³¹. Estos fotómetros permiten estudiar y determinar la intensidad relativa de dos fuentes luminosas, como se describe en la figura 35, que ilustra un fotómetro de bloques de parafina. La iluminación de una superficie, producida por una fuente puntual, se puede variar con sólo cambiar la distancia de la fuente a la superficie. Si consideramos dos fuentes luminosas de intensidades I_1 e I_2 , colocadas a las distancias d_1 y d_2 , respectivamente, de la superficie que iluminan cada uno de ellos (los bloques de parafina). Si las iluminaciones son iguales entre sí, se llega a la siguiente conclusión:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (10)$$

Entonces, si podemos igualar las iluminaciones producidas por cada una de las fuentes luminosas puntuales, el cociente de sus intensidades (es decir, las intensidades relativas), son directamente proporcionales a los cuadrados de las distancias de cada uno de ellos a las superficies que los iluminan. Este es el fundamento teórico de los fotómetros.

³¹ Espinoza, J. (2009) Manual de actividades de Astronomía. Trabajo inédito.



Figura 35

Para la medición de la luminosidad del Sol, es decir la energía emitida por segundo, por el Sol, se utiliza el fotómetro de bloques de parafina, con el cual se obtiene el orden de magnitud de la luminosidad del Sol. El montaje se ilustra en la figura 36, en donde una de las ampolletas es reemplazada por el Sol.

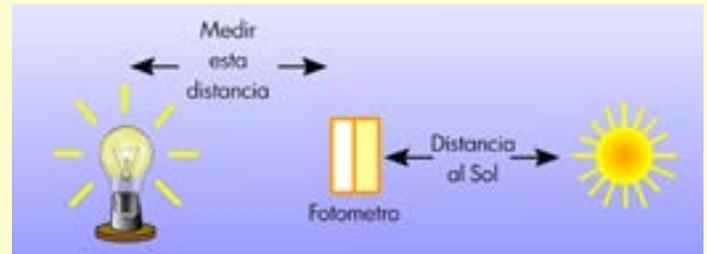


Figura 36

Si se utiliza una ampolleta de potencia igual a $P = 200 \text{ W}$, la distancia a la que debe colocarse de los bloques de parafina (figura 36) es de $r = 11,5 \text{ cm} = 11,5 \times 10^{-2} \text{ m}$. El Sol ilumina a

la distancia Sol-Tierra con $b_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{ST}^2}$, como se analizó en una actividad anterior, y para $b_{amp} = \frac{P_{amp}}{4\pi r^2}$. La luminosidad del Sol L_{\odot} se obtiene mediante la expresión:

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi R_{ST}^2} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (11)$$

Despejando $L_{\odot} = 200 \text{ W} \frac{R_{ST}^2}{r^2} = 3,4 \times 10^{26} \text{ W}$.

Actividad 18. ¿Cuál fue la hipótesis, la interpretación y la ecuación planteadas por Planck para explicar la emisión de radiación de un cuerpo negro?

Comentarios A18.- Una descripción matemática de la energía irradiada a diferentes longitudes de onda por un cuerpo negro es $E = h\nu$, en donde E es la energía de un fotón, h la constante de Planck ($h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J s}$) y ν es la frecuencia igual a c/λ , con c velocidad de la luz y λ la longitud de onda de la radiación. Esta hipótesis fue formulada en 1900 por Max Planck (1858 – 1947) para explicar las curvas de cuerpo negro de la figura 34, formulando que la energía es irradiada en paquetes discretos, que Planck llamó *quanta* y estableció las bases de la Física cuántica. La relación empírica que planteó Planck describe exactamente el espectro experimental del cuerpo negro, cuya expresión es:

$$I(\nu; T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1} \quad (12)$$

Actividad 19. ¿Cómo se estudia la luz de las estrellas?

Comentarios A19.- La luz de las estrellas se estudia mediante instrumentos especiales acoplados a los telescopios. Uno de estos instrumentos es el espectroscopio, que el más básico consiste en un simple prisma. La luz blanca se analiza con el prisma, el que descompone la luz blanca en colores, como se ilustra en la figura 37. El color está relacionado con la longitud de onda de la luz que emiten o reflejan los objetos. En la figura 37 los colores del espectro visible tienen longitudes de onda comprendidas entre los 400 nm hasta los 700 nm. Nótese que el espectro que se ilustra a la derecha, los colores van cambiando de un color a otro en forma gradual, no existiendo un límite entre color y color. A este tipo de espectro se le denomina espectro continuo.



Figura 37

La descomposición en colores por un prisma se puede volver a componer, mediante un segundo prisma, para obtener luz blanca, como se ilustra en la figura 38.

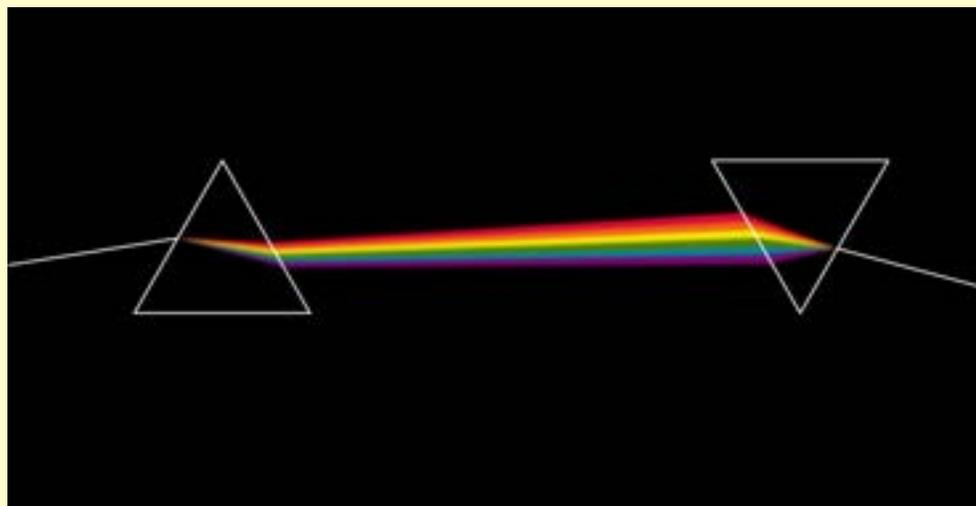


Figura 38

Pero la luz visible es solo una parte del espectro electromagnético, como se verá enseguida (figura 39), que ilustra el espectro electromagnético completo, con todas sus bandas.

Actividad 20. Teniendo a la vista una ilustración de un espectro electromagnético, ¿qué es el espectro electromagnético? ¿Cuáles son sus principales bandas?

Comentarios A20.- El espectro electromagnético se ilustra en la figura 39, en el que aparecen todos los tipos de radiación electromagnética, extendiéndose desde las longitudes de onda más largas, las ondas de radio, hasta las longitudes de onda más cortas, los rayos gamma. Nótese que la luz visible ocupa solo una porción pequeña del espectro electromagnético. Otras bandas importantes del espectro son: las microondas (entre unos 10 cm a 1 mm), el infrarrojo (desde 1 mm hasta 1000 nm), luz visible (desde 700 nm hasta 400 nm), el ultravioleta (de 100 nm hasta 10 nm), rayos X (desde, aproximadamente, 1 nm hasta 10^{-2} nm), y rayos gamma.

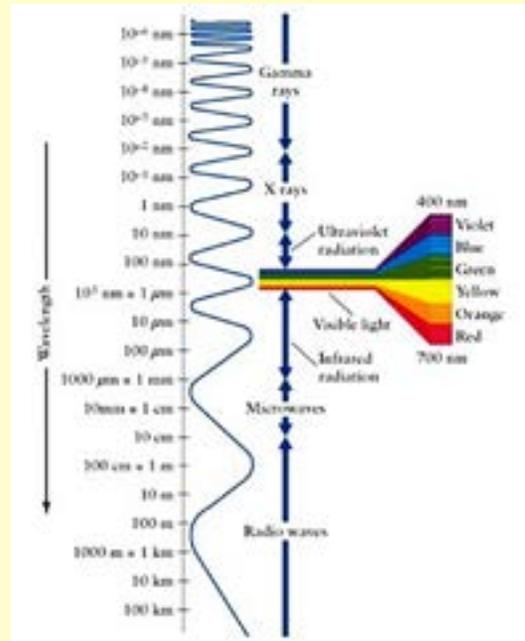


Figura 39

Actividad 21. ¿Cómo se clasifican los espectros? ¿En qué se diferencian los espectros continuo, de emisión de líneas y de absorción?

Comentarios A21.- Los espectros se clasifican en: espectro continuo, espectro de líneas de emisión y espectro de líneas de absorción, como se ilustra en la figura 40 (a). En la figura 40 (b) se ilustra cómo se analiza la luz de una estrella.

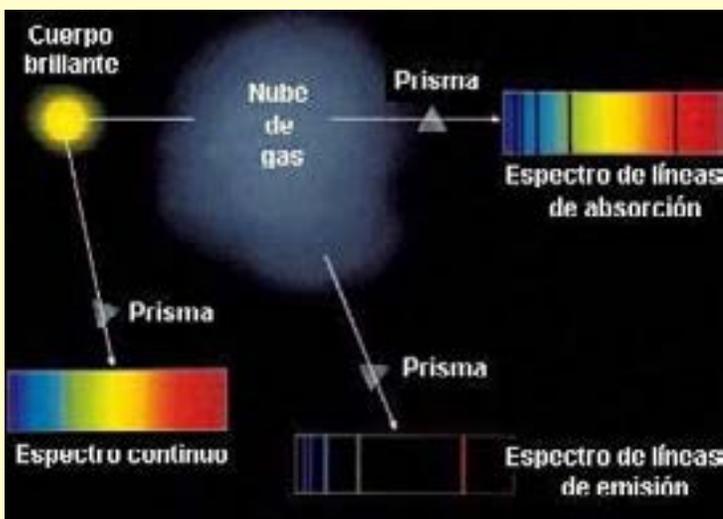


Figura 40 (a)

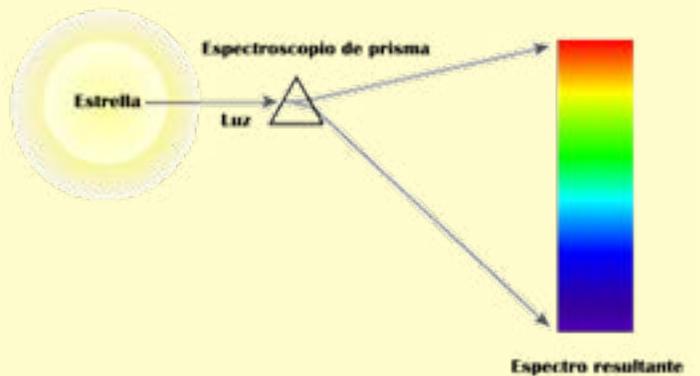


Figura 40 (b)

En la figura 40 (a) un objeto caliente que resplandece, tal como un cuerpo negro, su luz se analiza con un prisma y se obtiene un espectro *continuo* de luz. Si la luz que emite este objeto pasa a través de una nube compuesta por un gas más frío pero que también resplandece, entonces este gas absorbe ciertas longitudes de onda, según sean los elementos químicos que componen la nube, obteniéndose un *espectro de líneas de absorción*. Si se analiza la luz proveniente de la nube que resplandece, entonces se obtiene un *espectro de líneas de emisión*. En la figura 41, arriba, se tiene el espectro de una estrella y abajo, los espectros de absorción de varios elementos químicos, los que coinciden con el espectro de absorción de la estrella. Se concluye que la estrella contiene los elementos químicos que se muestran.

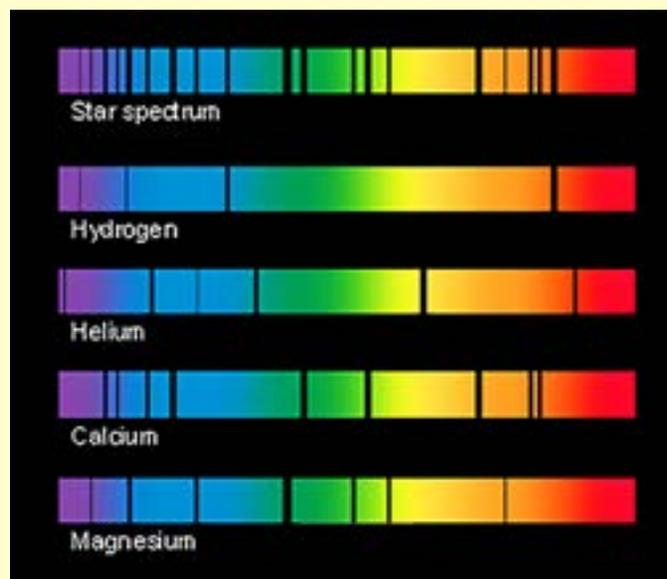


Figura 41

Actividad 22. ¿Cómo se obtienen experimentalmente los espectros: continuo, de emisión de líneas y de absorción?

Comentarios A22.- El instrumento con el que se obtienen los espectros de distintas muestras se denomina espectroscopio, cuyo esquema se ilustra en la figura 42 (a). La luz penetra al instrumento a través de una delgada abertura rectilínea. Un espectroscopio común de laboratorio se ilustra en la figura 42 (b). En Astronomía se emplean espectroscopios que se acoplan a los telescopios, tales como los que se ilustran en las figuras 42 (c) y (d).

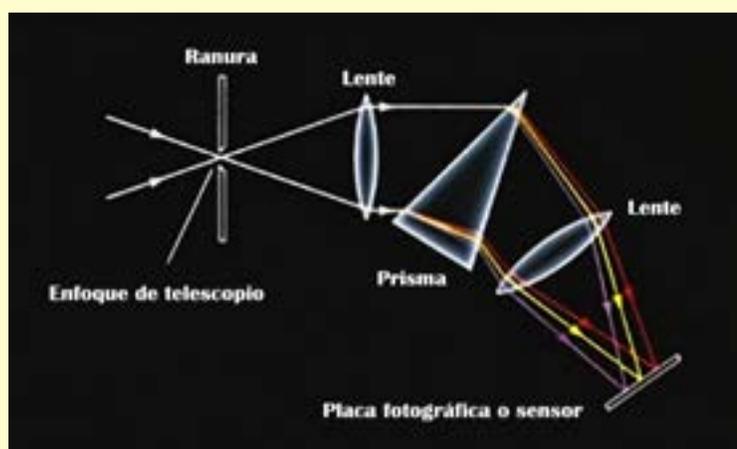


Figura 42 (a)



Figura 42 (b)



Figura 42 (c)



Figura 42 (d)

Actividad 23. Observar en una carta de espectros de emisión de líneas los distintos elementos químicos. ¿Qué diferencia hay entre ellos? ¿Hay espectros de dos elementos químicos diferentes que tengan el mismo espectro de emisión de líneas?

Comentarios A23.- En la figura 43 se ilustra una selección de espectros de emisión de líneas de varios elementos químicos: hidrógeno, sodio, helio, neón y mercurio. Nótese que cada elemento químico tiene su configuración de líneas específica, como si fuese su "huella digital". Si se coloca una escala del espectro visible, desde 400 a 700 nm, se observa que las líneas de emisión de los distintos elementos químicos tienen diferentes longitudes de onda, como se muestra en la figura 44. Por lo tanto, se puede ver que ningún elemento químico tiene un espectro igual al de otro elemento.

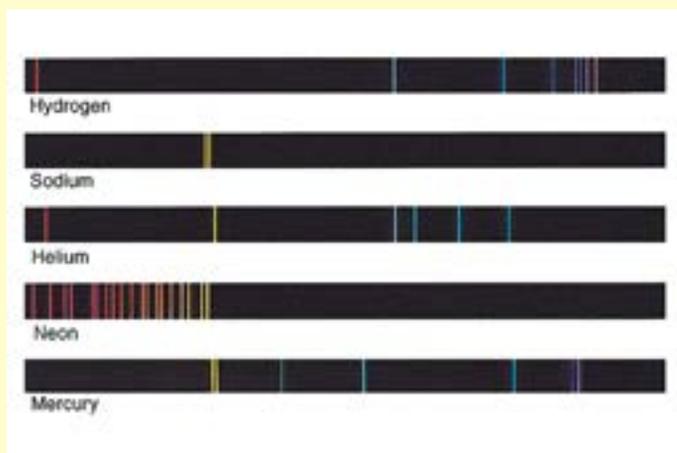


Figura 43

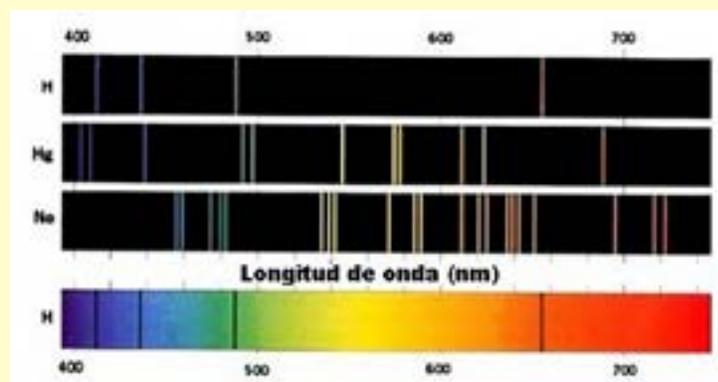


Figura 44

El origen del espectro de los elementos químicos se comprendió cuando, en 1913, el físico Niels Bohr empleó las ideas cuánticas para construir un modelo del átomo de hidrógeno.

Actividad 24. ¿Cuáles son las principales características espectrales del Sol?

Comentarios A24.- El Sol es una estrella, y es la más cercana a nosotros. Está solo a unos 8 minutos luz, o a una unidad astronómica de la Tierra. Sus propiedades principales se enlistan en la Tabla 3 siguiente:

Tabla 3

	Datos del Sol
Masa	$1,989 \times 10^{30}$ kg ($3,33 \times 10^5 M_{\odot}$)
Radio	$6,96 \times 10^5$ km
Distancia promedio a la Tierra	1 UA = $1,496 \times 10^8$ km
Tiempo luz Sol - Tierra	8,32 minutos
Diámetro angular promedio	32 minutos de arco
Densidad promedio	1410 kg m^{-3}
Composición	74% H, 25% He, 1% otros
Luminosidad	$3,86 \times 10^{26}$ W
Temperatura en la superficie	5800 K
Temperatura central	$1,55 \times 10^7$ K
Período de rotación ecuatorial	25 días



Figura 45

Fotografiado el Sol por medio de una cámara adosada a un telescopio provisto de un filtro especial, en el visible, se obtiene una fotografía como la de la figura 45.

La figura 46 ilustra el espectro de absorción del Sol en el que se observan numerosas líneas oscuras que corresponden a los elementos químicos que presenta en su espectro, siendo este muy ancho, por lo que en la ilustración se ha recortado en varias partes. En la figura 47 se representan algunas líneas del hidrógeno en el espectro solar.

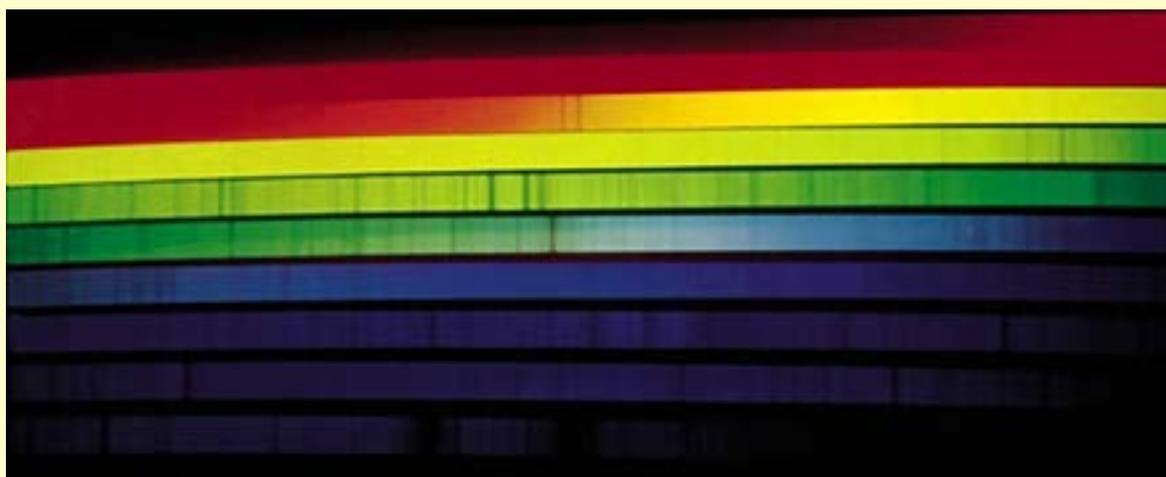


Figura 46

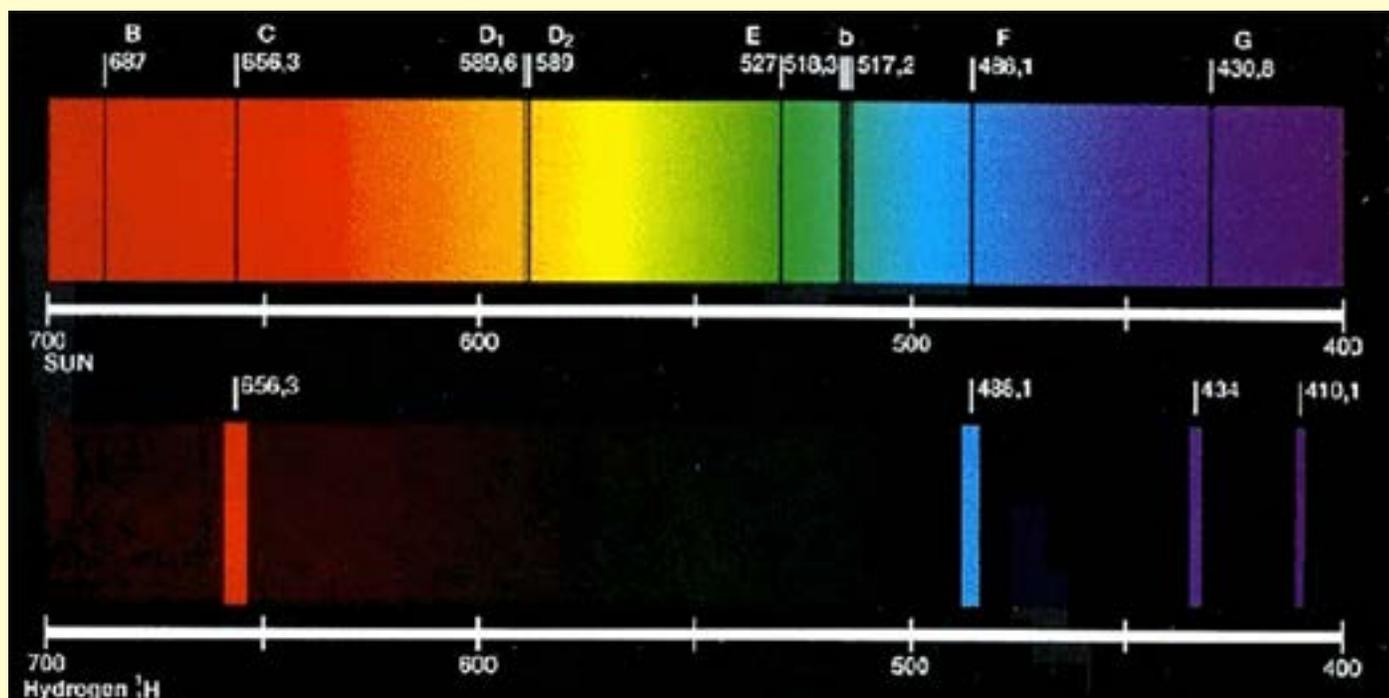


Figura 47

Actividad 25. ¿Qué son los espectros estelares? ¿Cuál es la clasificación de espectros de las estrellas?

Comentarios A25.- Cuando se interpone una red de difracción o un prisma ante el objetivo de una cámara fotográfica y se fotografía el cielo nocturno, durante una noche sin Luna y lejos de las luces de las ciudades, se obtiene una fotografía como la de la figura 48. Cada punto luminoso de las estrellas se descompone en colores, permitiendo estudiar el espectro de ellas. Mediante este estudio se puede aprender acerca de sus masas, temperaturas en la superficie, diámetros, composición química y sus movimientos cuando la estrella se aleja o se dirige hacia la Tierra.

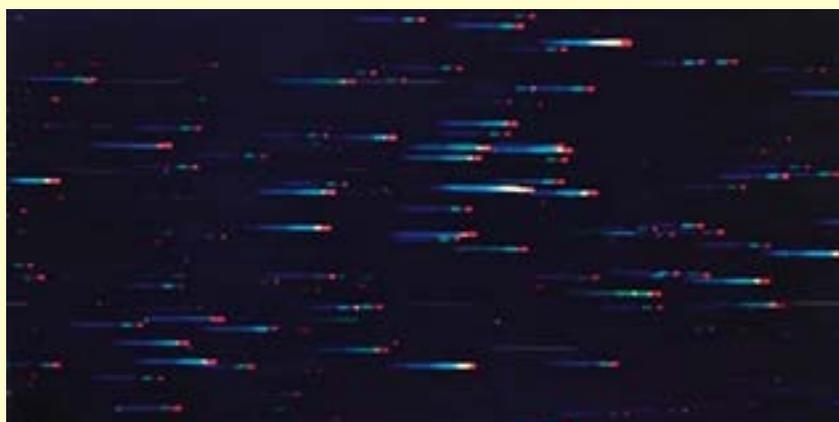


Figura 48

El espectro de una estrella está relacionado con su temperatura superficial. Así los espectros de las estrellas se han clasificado con letras:

O - B - A - F - G - K - M

como se ilustra en la figura 49. Cada letra representa la temperatura superficial y color de la estrella.

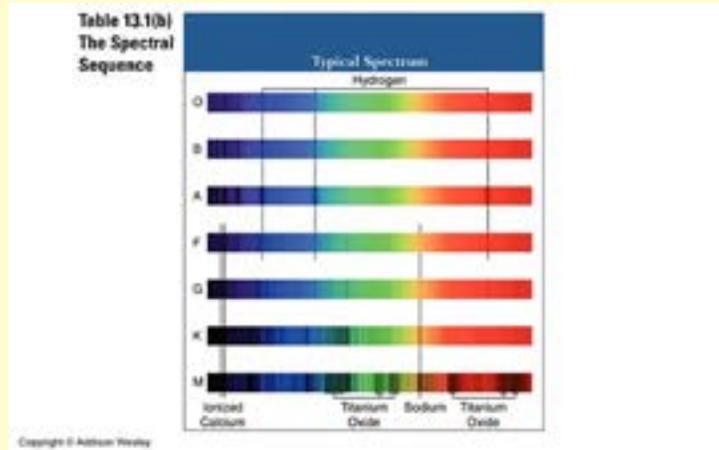


Figura 49

En la figura 50 se ilustran los principales tipos de espectros estelares, en el que se muestran los espectros de estrellas de diferentes clases espectrales y temperaturas superficiales.

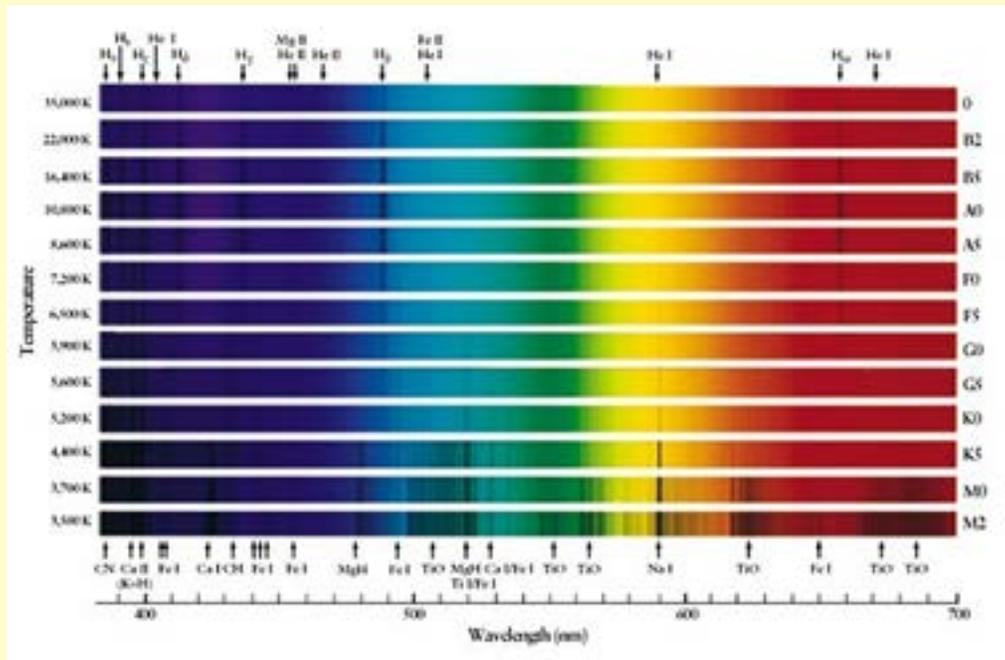


Figura 50

Se puede notar en la figura 50 que en las estrellas de clase espectral A, con temperaturas en su superficie de unos 10 000 K, son intensas las líneas de Balmer del hidrógeno (H_{α} , H_{β} , H_{γ} y H_{δ}). Las estrellas de clase espectral G y K, cuyas temperaturas superficiales están entre 4000 y 6000 K, tienen numerosas líneas que se deben a metales como el hierro (Fe) y calcio (Ca). Las bandas anchas y oscuras del espectro de las estrellas de clase M son provocadas por moléculas del óxido de titanio (TiO), el que puede existir en una estrella cuando su temperatura superficial es de unos 3500 K, o menos. Un número romano después del símbolo químico indica si la línea de absorción es provocada por átomos no ionizados (número romano I) o a átomos que han perdido un electrón (número romano II).

Actividad 26. ¿Cuáles son las estrellas gigantes rojas que se nombran en el video? Describan algunas de sus características.

Comentarios A26.- En la figura 51 siguiente se puede comparar el tamaño del Sol con el de estrellas gigantes y súper gigantes rojas, tales como Betelgeuse, Antares, Aldebarán, Rigel, Arcturus, Pollux y Sirius. El Sol es el punto debajo de Betelgeuse y al lado de Rigel. El Sol es la estrella más pequeña de las ilustradas en la figura.

Tabla 4

Estrella	Radio (respecto al del Sol R_{\odot})
Betelgeuse (α Orión)	887 - 1180
Antares (α Escorpión)	883
Eta Carinae	240
Gacrux (γ Crux)	113
Canopus (α Carina)	65
Aldebarán (α Tauro)	43
Rigel (β Orión)	74
Arcturus	21
Pólux	8
Sirius	2
Sol	1

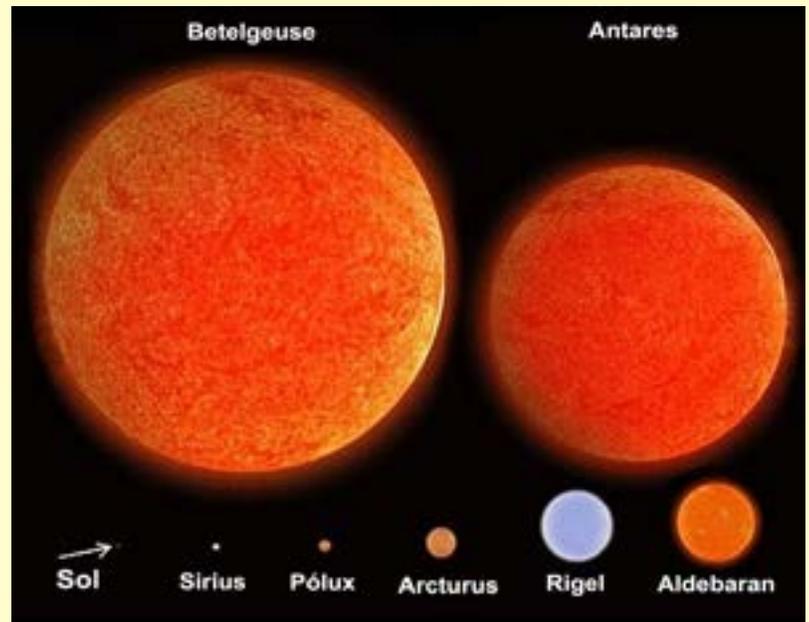


Figura 51

Actividad 27. ¿Qué son las estrellas dobles? ¿Cuáles son sus principales características y órbitas?

Comentarios A27.- Aproximadamente la mitad de las estrellas visibles son realmente estrellas dobles. Con el término "estrella doble" se designa a dos estrellas que aparecen cercanas una de la otra en el cielo, las que se dividen en dos tipos³²: *dobles ópticas*, en que las estrellas no están ligadas gravitatoriamente; y *dobles físicas*, en que las estrellas están orbitando alrededor de su centro de masa común. Según esta referencia, el término "estrella doble", y frecuentemente así se establece en los textos consultados, se reserva para el primer grupo. A las estrellas de la segunda acepción (dobles físicas) se les designa por "**estrellas binarias**". Aunque a veces en revistas especializadas, como *Astronomy* y *Sky & Telescope*, a las estrellas ligadas gravitatoriamente se les llama "estrellas dobles". El esquema de la figura 52 muestra la diferencia entre estrella doble óptica y otra doble física o binaria.

³² Ridpath, Ian; Editor (1997) Dictionary Oxford of Astronomy. Oxford University Press, New York.



Figura 52

Un sistema estelar binario es ζ (zeta) Ursa Major compuesto por dos estrellas separadas por solo 0,01 segundos de arco. Las imágenes que rodean al diagrama de la figura 53 muestran las posiciones relativas de las dos estrellas durante la mitad de su período orbital. El período orbital de las estrellas, una alrededor de la otra, es evidente en las fotografías. Cada estrella puede ser considerada fija para tales gráficos.

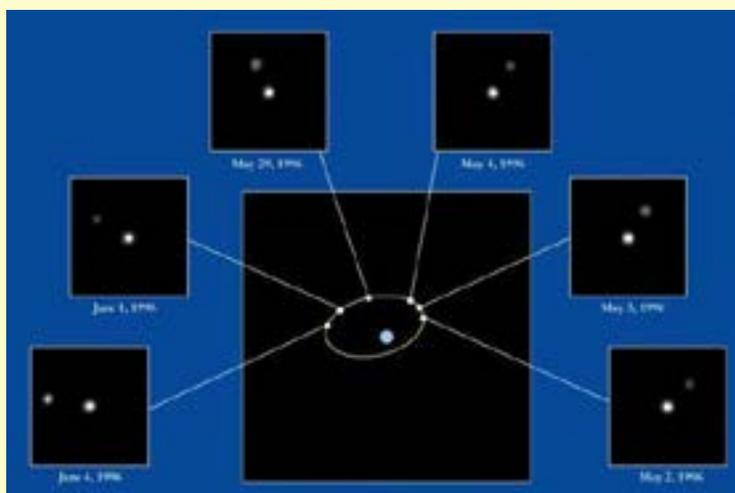


Figura 53

Otro sistema estelar binario lo constituye Sirio, la estrella más brillante del firmamento, puesto que al observar a través de un telescopio, se revela una segunda estrella que la acompaña. El diagrama de la figura 54 ilustra la órbita de Sirio B (de magnitud 8,4) alrededor de Sirio A (de magnitud -1,5). También se muestra una escala en segundos de arco para determinar la separación angular de las componentes. En la figura 55 se ilustra cómo se verían Sirio A y B con un telescopio Schmidt-Cassegrain de 200 mm de diámetro y un número f de f10 con un aumento de 200x.³³ El dato que aparece en la figura 54 como p.a. indica el ángulo de posición medido desde el eje N hacia el E y S; así, en la ilustración se indica que Sirio B tiene un ángulo de posición de 2° en 1989. En la tabla 5 se presenta una selección de sistemas binarios, en donde se indica la ascensión recta (R.A.), declinación (Dec), magnitud estelar, la separación angular (Sep.) y el ángulo de posición (p.a.).

33 Goldstein, A. (1989). Split a star in two. Astronomy, december 1989.

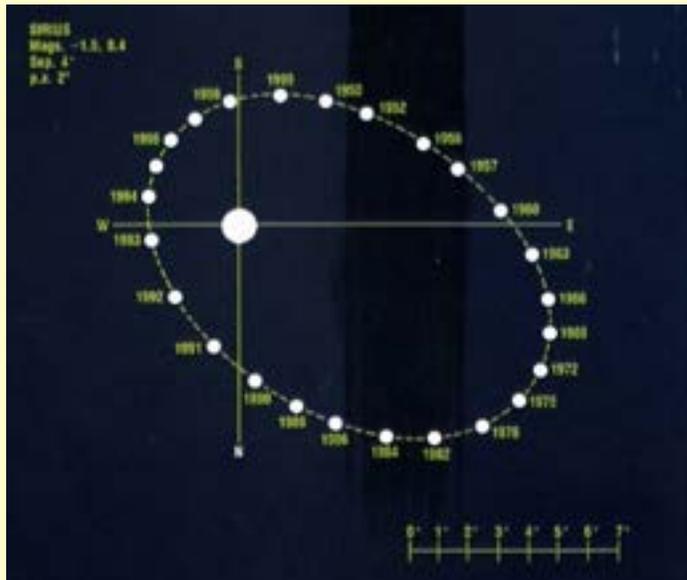


Figura 54

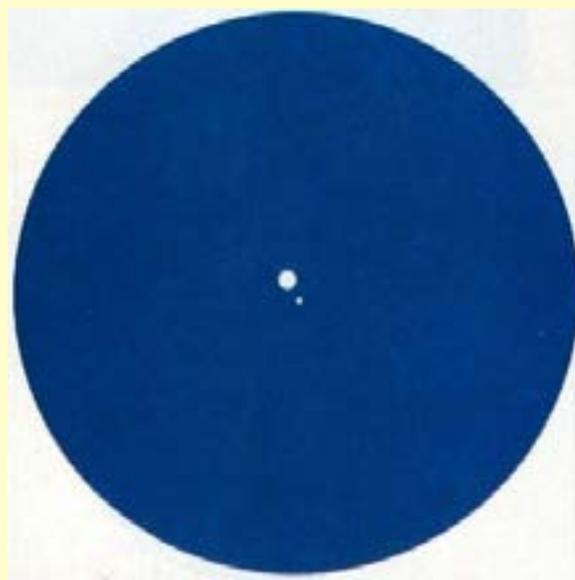


Figura 55

Tabla 5*

Objeto	R. A. (2000.0)	Dec.	Magnitud	Sep.	p.a.
Rigel	5h 14.5m	-8° 12'	0.1 , 6.7	9"	202°
Sirius	6h 45.1m	-16° 43'	-1.5 , 8.4	4"	2°
Castor	7h 34.6m	+31° 53'	2.0 , 2.8	2"	75°
Zeta Cancri	8h 12.2m	+17° 39'	5.6 , 5.9 , 6.0	0.6"	250° , 80°
Beta Scorpii	16h 5.4m	19° 48'	2.6 , 10.3	0.5"	132° (1959)
Delta Corvi	12h 29.9m	-16° 31'	3.0 , 9.2	24.2"	214° (1958)
Theta Orionis	5h 35.3m	-5° 23'	6.7 , 7.9	8.8"	31° (1975)
			5.1	12.8"	132° (1975)
			6.7	21.5"	96° (1975)

* Datos seleccionados de dos artículos de la revista Astronomy. ³⁴

³⁴ Harrington, P. (1989). The ten best doubles stars. Astronomy, July 1989.

Goldstein, A. (1989). Split a star in two. Astronomy, December 1989.

Actividad 28. ¿Cuál es el sistema estelar más cercano al nuestro? ¿Cuántas estrellas lo componen?

Comentarios A28.- El sistema estelar más cercano al Sol es el de alfa Centauro (α Cent) que está constituido por un sistema de tres estrellas. Alfa Centauro corresponde a la más brillante de la pierna del Centauro como se lo imagina en la figura 21. En la fotografía de la figura 56 se muestra a la constelación Centauro en donde las dos estrellas brillantes centrales, alineadas a lo ancho de la fotografía, corresponden a α y β Centauro (α está más abajo). La fotografía tiene un tiempo de exposición de 5 minutos y fue captada con una plataforma ecuatorial de brazo doble con motor en la latitud sur de $34^\circ 26'$, con objetivo normal y película de sensibilidad ISO 400.



Figura 56



Figura 57

Notar que α Centauro se ve a simple vista como una sola estrella. Un telescopio puede resolver α Centauro en dos estrellas: α Centauro A y B. En la fotografía siguiente (figura 57) del sector de α Centauro se muestra la posición de la tercera estrella, Próxima, respecto a la de alfa Centauro A y B. Notar la enorme distancia entre AB y Próxima (alrededor de 13 000 unidades astronómicas), lo que lleva a manifestar a algunos astrónomos que Próxima no estaría ligada gravitatoriamente³⁵ con las estrellas alfa Centauro A y B. La estrella Próxima (α Centauro C) tiene magnitud 11 con lo que no es visible a simple vista, apareciendo en las fotografías de larga exposición.

35 Matthews, R. y Gilmore, G. (1993). Is Proxima really in orbit about α Cen A/B? Mon. Not. R. Astron. Soc. 261, L5-L7 (1993). Online.

Wertheimer, J. (2006). Are Proxima and Alpha Centauri Gravitationally Bound? arXiv:astro-ph/0607401v1 17 Jul 2006. Online.

Actividad 29. ¿A qué distancia se encuentran las estrellas del sistema estelar más cercano al Sol? ¿Qué valor numérico tienen sus magnitudes físicas principales?

Comentarios A29.- La distancia a la estrella más cercana al Sol es de $4,1 \times 10^{13}$ km: α Centauro A y B. El sistema estelar α Centauro está compuesto por tres estrellas, cuyas principales características se presentan en la tabla 6 siguiente, en donde se las compara con las características del Sol, expresando la distancia en años luz (a.l.), la temperatura en kelvin (K), el diámetro en kilómetros (km) y la masa en kilogramos (kg). La ilustración de la figura 58 muestra los diámetros relativos de las tres estrellas del sistema α Centauro en comparación con el Sol. Nótese que alfa Centauro A es muy parecida al Sol, con un diámetro levemente mayor al que tiene él.

Tabla 6

Estrella	Distancia (a.l.)	Color	T _{sup} (K)	Diámetro (Respecto al Sol)	Masa (Respecto al Sol)	Luminosidad (Respecto al Sol)	Edad (10 ⁶ años)
Próxima	4,22	rojo	3040	0,123	0,1	0,000136	4850
α Centauro A	4,35	amarillo	5790	1,227	1,09	1,519	4850
α Centauro B	4,35	Anaranjado	5260	0,865	0,90	0,500	4850
Sol	-	amarillo	5770	1,00 (1,39 x 10 ⁶ km)	1,00 (2 x 10 ³⁰ kg)	1,00 (3,86 X10 ²⁶ W)	4650

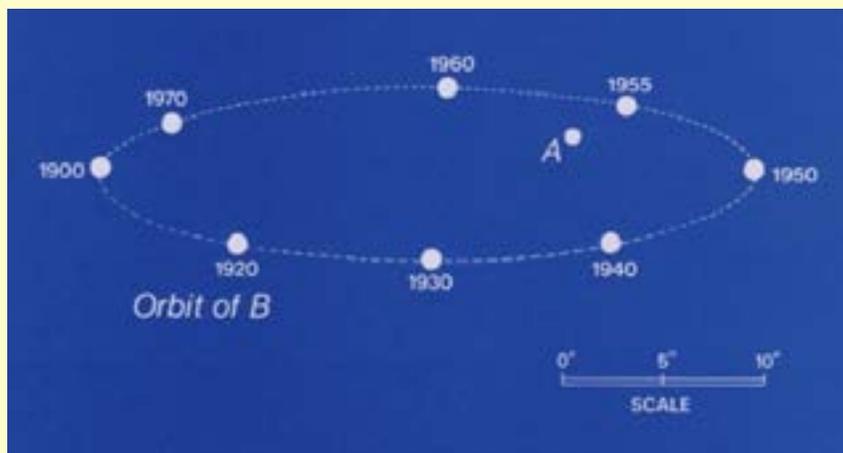


Figura 58

Actividad 30. ¿Cuál es la órbita de A y B de alfa Centauro? ¿Cuál es la distancia en unidades astronómicas a la que se encuentran entre sí?

Comentarios A30.- En la figura 59 se ilustra la órbita de Centauro B alrededor de A con un período de revolución de 80 años y la distancia entre ellas varía desde las 11 hasta las 35 unidades astronómicas. Como se mencionó anteriormente, la distancia a la que está Próxima (alfa Centauro C) del par AB es de alrededor de 13 000 unidades astronómicas (UA)³⁶.

36 MacRobert, A. (1993). Searching out the nearest stars. Sky & Telescope, april 1993.



[Ver animación](#)

Figura 59.

Si Alfa Centauro A y B tuviesen planetas espaciados como Mercurio, Venus, Tierra y Marte, al menos uno de ellos estaría en la zona habitable de la estrella (zona verde), región caliente donde el agua puede estar líquida.³⁷ Estas suposiciones se hacían ya en 1991, antes que se descubrieran los primeros exoplanetas en 1995, en que se manifestaba que estas estrellas eran buenas candidatas para poseer planetas. Ya que las dos estrellas en un sistema binario orbitan una alrededor de la otra, su movimiento orbital cumple la tercera ley de Kepler, expresada como:

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{T^2} \quad (13)$$

en donde M_1 y M_2 son las masas de las estrellas del sistema binario, en masas solares; a es el semieje mayor de la estrella que orbita alrededor de la otra, en UA; y T es el período orbital, en años.

La distancia de 11 unidades astronómicas (UA) que separan a alfa Centauro A y B cuando están a la distancia más cercana entre ellas, como se ilustra en la figura 60, en la que se destacan las zonas de habitabilidad de cada una de ellas. En el artículo (Crosswell, 1991) se analizaban las condiciones que tienen cada una de las estrellas de α Centauro para tener planetas. Ya se han descubierto algunos planetas alrededor de estas estrellas y se ha estudiado la formación de planetas en estas estrellas y su estabilidad.^{38 39 40 41}

37 Crosswell, K. (1991). Does Alpha Centauri have intelligent life? *Astronomy*, abril 1991.

38 Wieger, P. (1997). The stability of planets in the Alpha Centauri system. *The Astronomical Journal*, abril 1997

39 Barbieri, M. et al. (2002). Formation of terrestrial planets in close binary systems: The case of α Centauri A. *A & A* 396, 219-224. Online.

40 Quintana, E. et al. (2002). Terrestrial planet formation in the α Centauri system. *The astrophysical Journal* 576, 982-996, 002 september 10. Online.

41 Guedes, J.M. et al (2008). Formation and detectability of terrestrial planets around α Centauri B. arXiv:0802.3482v3 [astro-ph] 17 Mar 2008. Online.

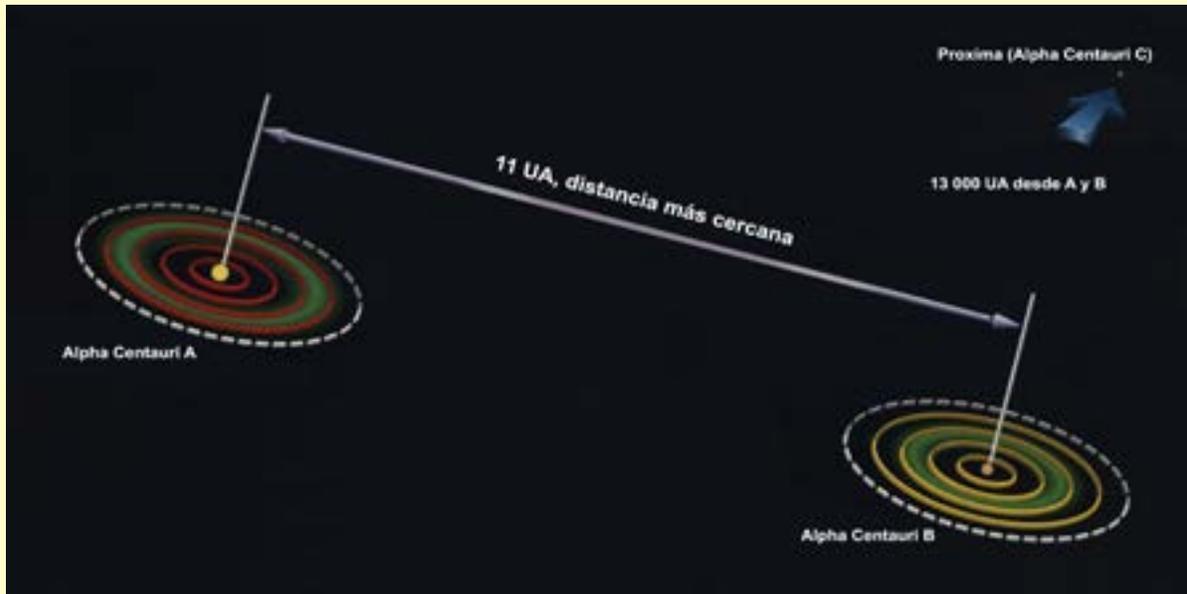


Figura 60

También se ha descubierto un planeta en órbita alrededor de α Centauro C, Próxima b, del cual la figura 61 muestra una visión artística de su superficie, y en el cielo se observa la estrella Próxima y las estrellas α Centauro AB.



Figura 61

Actividad 31. ¿Qué son las estrellas binarias eclipsantes? ¿Cómo se interpretan las curvas de luz?

Comentarios A31.- Las estrellas binarias eclipsantes son aquellas cuyos planos orbitales están lo suficientemente cerca de nuestra línea de visión para que se originen eclipses parcial o total (figura 62 a y b), de al menos una de las componentes. En la figura se representan también las curvas de luz de binarias eclipsantes. La forma de la curva de luz de binarias eclipsantes puede revelar muchos detalles de las dos estrellas como se ilustra en la figura 62: (a) un eclipse parcial, (b) un eclipse total.

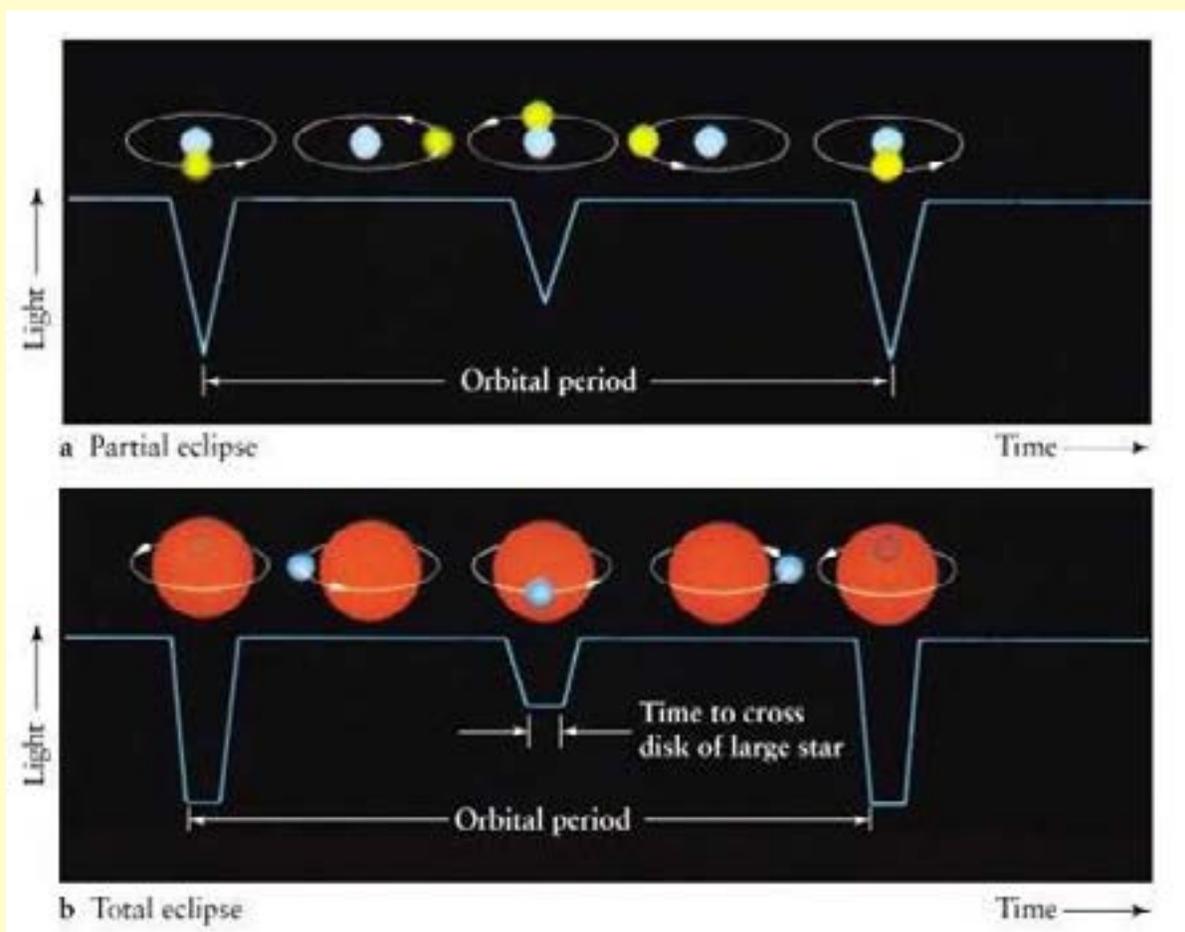


Figura 62

[Ver animacion](#)

Actividad 32. ¿En qué consiste el efecto Doppler? ¿Cómo se aplica al estudio de las estrellas?

Comentarios A32.- El efecto Doppler consiste en el mismo efecto aplicado al sonido en que la frecuencia del sonido cambia cuando la fuente sonora se acerca o se aleja del observador. Este concepto fue propuesto por el físico Christian J. Doppler afirmando que la luz se ve afectada por el movimiento, posibilitando notar si un objeto astronómico se está moviendo hacia nosotros o se está alejando. Recordemos la aplicación notable del efecto Doppler para el sonido, por ejemplo, cuando una ambulancia se aproxima a nosotros, el sonido de su sirena tiene una longitud de onda menor y una frecuencia mayor que si estuviera en reposo: se oye un tono más alto. Cuando la ambulancia se está alejando, se escucha un tono más bajo puesto que el sonido tiene una longitud de onda más larga y frecuencia más baja.

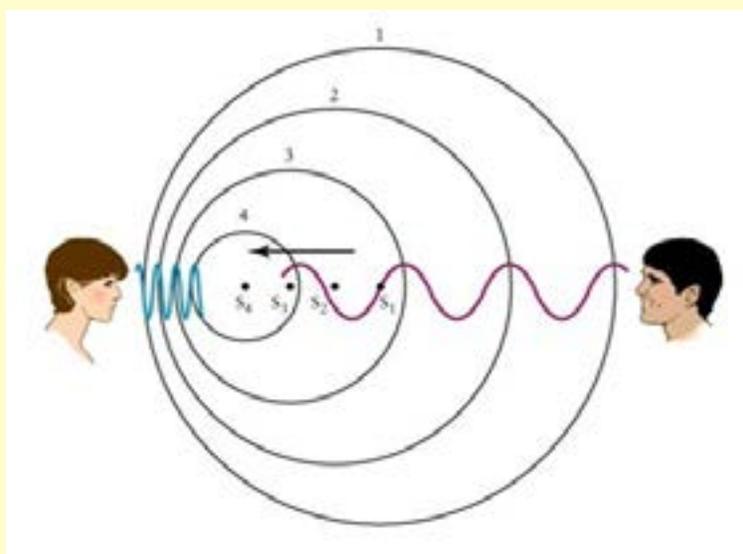


Figura 63

Para la luz sucede un efecto similar. En la figura 63 se ilustra una fuente luminosa hacia la izquierda, como indica la flecha, en donde los círculos representan las ondas emitidas en distintas posiciones. Las ondas son emitidas en posiciones más cercanas para el observador de la izquierda, por lo que ve longitudes de onda más cortas, dibujadas en azul, que si estuviera en reposo. Esto significa que todas las líneas del espectro de una fuente luminosa, como por ejemplo una galaxia o una estrella, están desplazadas hacia las longitudes de onda del extremo azul del espectro. Este efecto se denomina **corrimiento al azul**.

Si la fuente luminosa se aleja del observador de la derecha, entonces las ondas que llegan a él están más separadas, de modo que detecta una longitud de onda más larga que la que vería si la fuente estuviera en reposo. Esto significa que todas las líneas del espectro de una fuente luminosa que se aleja, están desplazadas hacia el extremo de longitudes de onda del rojo del espectro, y se origina el **corrimiento hacia el rojo**. En ambos casos, el efecto del movimiento relativo en la longitud de onda se denomina efecto Doppler.

El efecto Doppler se expresa en forma matemática mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \text{ con } \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (14)$$

Donde:

$\Delta\lambda$ = corrimiento o variación de la longitud de onda de una línea espectral

λ_0 = longitud de onda de una línea espectral medida en el laboratorio

λ = longitud de onda de la misma línea del espectro de una estrella o galaxia

v = velocidad de la fuente luminosa

c = velocidad de la luz

La velocidad de una estrella o galaxia que se determina mediante el efecto Doppler se denomina velocidad radial ya que corresponde a la línea de visión desde la Tierra.

Actividad 33. ¿Qué son las estrellas dobles espectroscópicas?

Comentarios A33.- El efecto Doppler se aplica al descubrimiento de estrellas binarias espectroscópicas, ya que las estrellas al moverse en sus órbitas, periódicamente se aproximan o se alejan, vistas desde la Tierra. Por lo tanto, alternadamente se origina un corrimiento hacia el azul o hacia el rojo de las líneas espectrales de las estrellas.

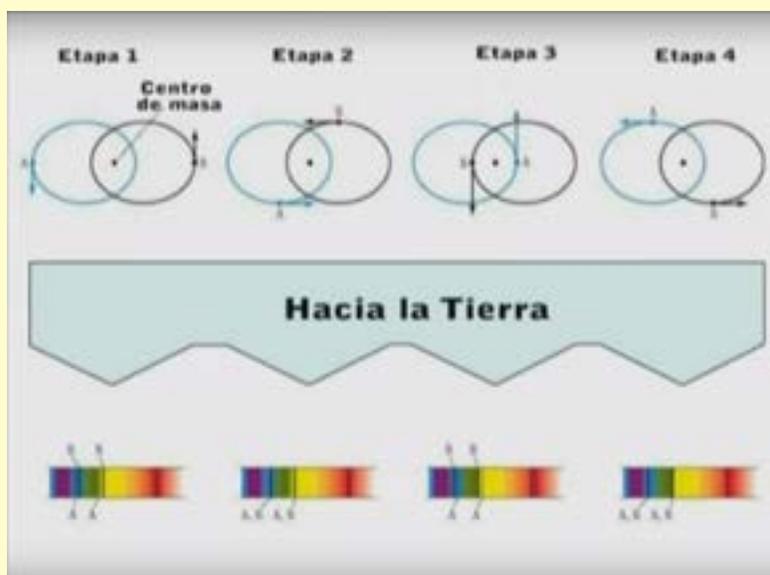


Figura 64

En la figura 64 se muestran los espectros de la binaria espectroscópica κ (kappa) Arietis de la constelación zodiacal Aries (cerca de α Aries en la figura 65), tomados con una diferencia de pocos días. En la figura 64, en las ilustraciones de arriba, se indican las posiciones de las estrellas

(designadas por A y B) y los espectros de la binaria en cuatro instantes seleccionados (etapas 1, 2, 3 y 4) durante el período de una órbita. Hay que hacer notar que en las etapas 1 y 3, el efecto Doppler intercambia las líneas de absorción A y B de las estrellas. El sistema binario completo se está alejando de nosotros a la velocidad de 12 km/s, que se denomina velocidad radial.

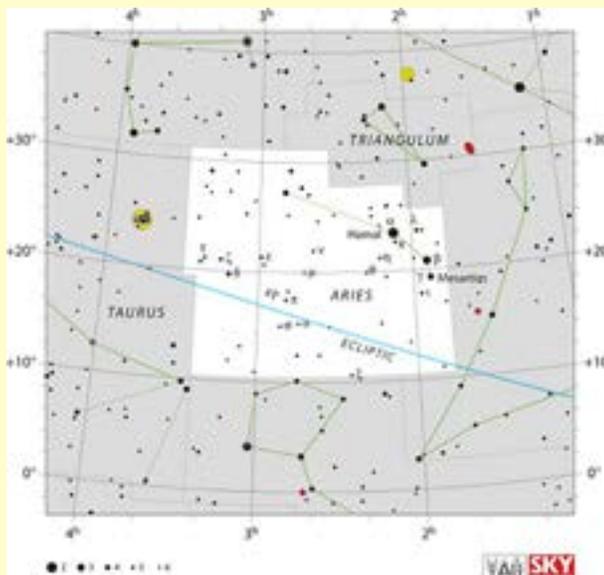


Figura 65

Actividad 34. ¿Qué son las estrellas variables?

Comentarios A34.- Son estrellas que varían su brillo, de las que existen dos grandes categorías: las "variables extrínsecas", que varían por una razón mecánica, por ejemplo su rotación; las "variables intrínsecas", que experimentan un cambio real en la luminosidad, ya sea de una estrella individual o de algún elemento de un sistema binario, debido a que, por ejemplo, la estrella se expande y contrae periódicamente. Hay diversos tipos de estrellas variables y, entre ellas, se encuentran las Cefeidas como uno de los más importantes, debido a que mediante la relación periodo – luminosidad, descubierta a principios del siglo XX, pueden utilizarse como indicadores de distancia. En la figura 66 se ilustra el gráfico luminosidad en función del período para una estrella variable del tipo Cefeidas, cuyo período es de algunos días.

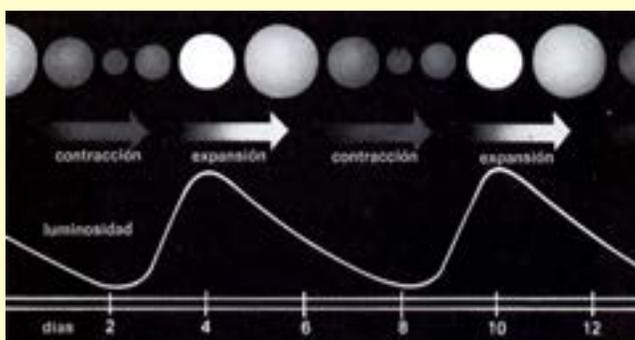


Figura 66

Actividad 35. ¿Existen planetas orbitando en torno a otras estrellas? ¿Cuántos se han descubierto hasta la fecha?

Comentarios A35.- Hace un par de décadas atrás no se conocía la existencia de planetas y de otros sistemas solares en la Vía Láctea. Tan solo a partir de 1995 se ha descubierto una cantidad importante de planetas orbitando alrededor de estrellas en nuestra galaxia. Algunos son planetas mayores que Júpiter, el planeta más grande del sistema solar, pero mediante nuevas técnicas y observatorios espaciales, como el telescopio espacial Kepler, se está intentando descubrir planetas de un tamaño semejante al de la Tierra. El descubrimiento de planetas en torno a otras estrellas se puede considerar como la culminación de la revolución copernicana iniciada hace ya quinientos años⁴².

Se han descubierto ya más de 2000 planetas, confirmados a la fecha, orbitando alrededor de otras estrellas y algunos sistemas planetarios, siendo Cancri 55 uno de ellos. En el sitio www.exoplanets.org es posible informarse de los últimos descubrimientos de exoplanetas y sus principales características. En la figura 67 (a) se ilustran algunos de los tipos de exoplanetas descubiertos y su número aproximado al año 2010. Nótese que el número mayor de planetas se encuentra entre los gigantes gaseosos, pero también se han detectado algunos del tamaño de la Tierra. La figura 67 (b) corresponde a una ilustración artística de un satélite orbitando un exoplaneta del tipo Júpiter.



Figura 67 (a)



Figura 67 (b)

42 Galadí-Enriquez, D. (2000) La culminación de la revolución copernicana. Tribuna de Astronomía y Universo, II Época, marzo 2000.

Actividad 36. ¿Qué métodos se emplean en la detección de planetas extrasolares?

Comentarios A36.- Se utilizan distintos métodos para detectar planetas orbitando alrededor de otras estrellas. En la lista siguiente se identifican los principales métodos para la detección de exoplanetas.

Observación indirecta

- Método astrométrico (balanceo estelar) – imagen de la estrella
- Velocidad Radial (efecto Doppler)–espectro de la estrella
- Fotometría de tránsito – curva de luz de la estrella
- Lente gravitatorio – curva de luz de la estrella
- Pulsar timing – otro método fotométrico, usando timing

Observación directa (imagen del planeta)

- Telescopios muy grandes
- Interferómetros

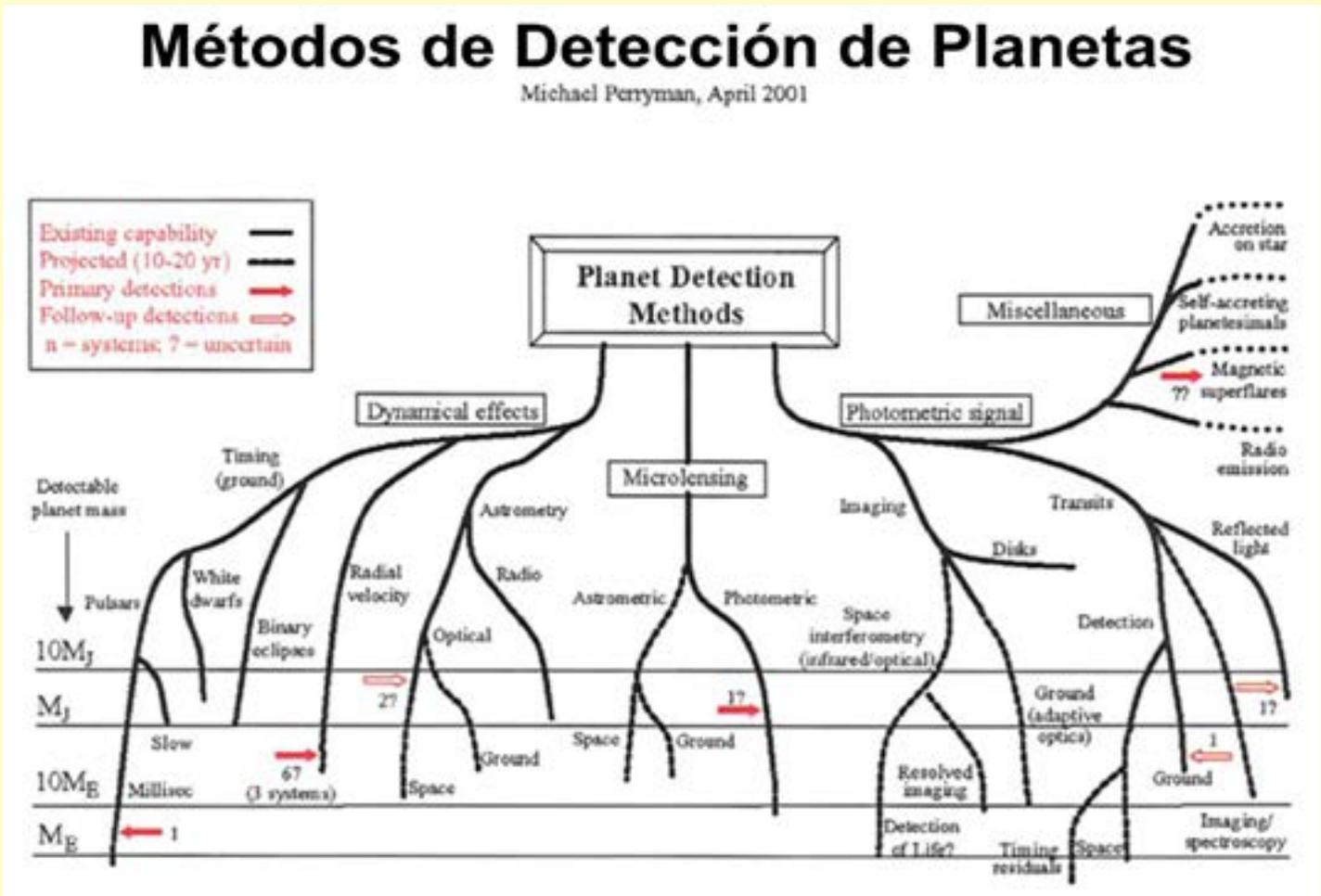


Figura 68

En la figura 68 se organizan las distintas técnicas que existen para detectar planetas, las cuales son sensibles para la detección de planetas y estrellas binarias y sus propiedades. Se presentarán a continuación, gráficamente, algunos de los métodos para detectar planetas.

Uno de los métodos consiste en determinar el balanceo de la estrella debido a que esta y el planeta orbitan alrededor de su centro de masas común, como se ilustra en la figura 69.

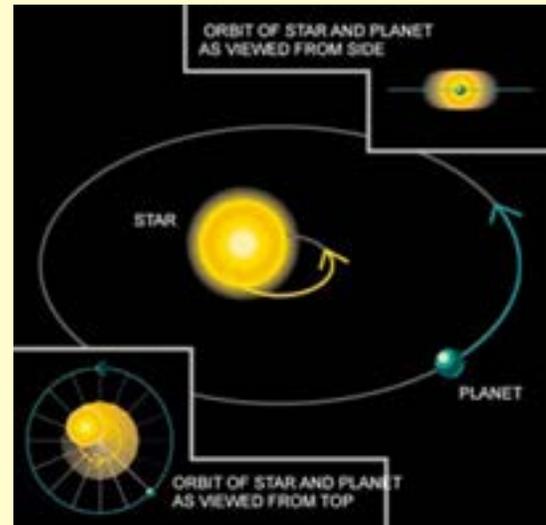


Figura 69

El método de la velocidad radial está basado en la búsqueda de variaciones periódicas en la velocidad radial de estrellas binarias, en que se origina un efecto Doppler periódico debido al movimiento orbital, como se ilustra en la figura 70. Esto da como resultado una curva de velocidad radial que se ilustra en el gráfico de la figura 71.

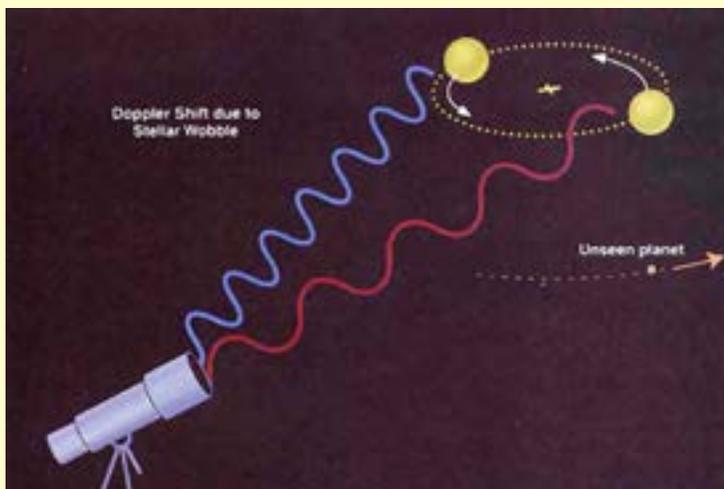


Figura 70

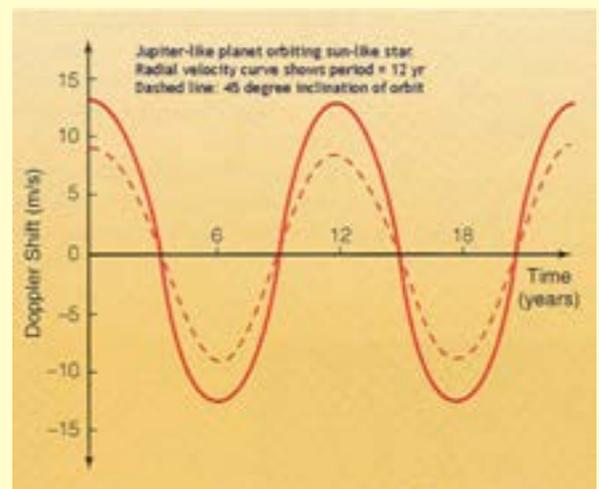


Figura 71

Los corrimientos Döppler permiten detectar el ligero movimiento de una estrella provocado por un planeta que orbita en torno a ella, tal como en la figura 72 a. El corrimiento Döppler periódico en el espectro de la estrella 51 Pegasi muestra la presencia de un gran planeta con un período orbital de alrededor de 4 días. Los círculos son datos reales y las barras que los cruzan corresponden a las incertezas.

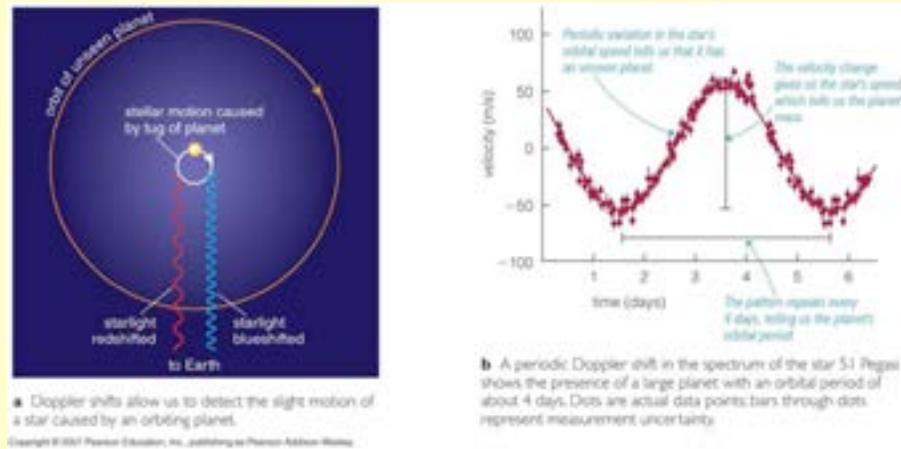


Figura 72

Método de tránsito: La idea básica de este método consiste en que cuando el planeta pasa frente a la estrella, su brillo disminuirá un poco y se debe determinar la curva de luz mediante fotometría, tal como se ilustra en las figuras 73 y 74. En esta última figura se ilustra el planeta orbitando alrededor de la estrella.

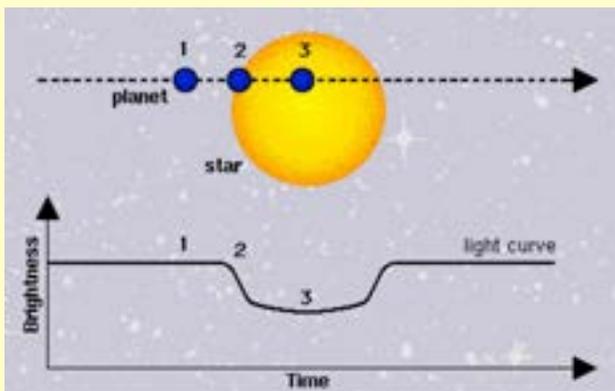


Figura 73

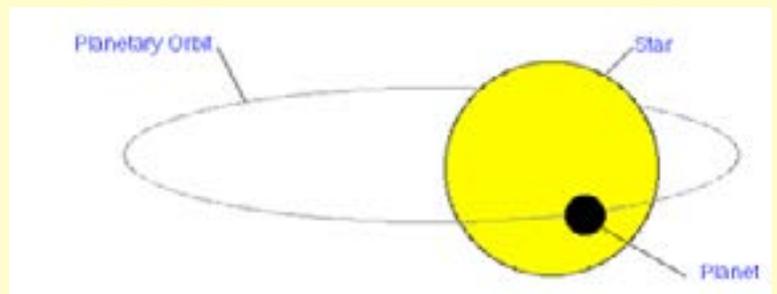


Figura 74

Actividad 37. ¿Se han descubierto planetas orbitando alrededor de las estrellas más cercanas al Sol?

Comentarios A37.- El sistema estelar más cercano al Sol es Alfa Centauro que, como sabemos, la componen tres estrellas: Alfa Centauro A, B y C (Próxima). El año 2012 el Observatorio Europeo Austral (ESO) anunció el descubrimiento de un planeta en órbita alrededor de Alfa Centauri B, que recibió el nombre de Alfa Centauri Bb. Fue detectado en el Observatorio de La Silla de Chile. Con una masa estimada similar a la de la Tierra, orbita su estrella a una distancia aproximada de seis millones de kilómetros (una distancia más pequeña que la distancia de Mercurio con respecto al Sol en nuestro sistema solar, muy lejos de la zona de habitabilidad, haciendo que las posibilidades de vida tal y como conocemos sean prácticamente nulas) y realiza una traslación alrededor de su estrella cada 3,2 días.

Próxima es la estrella más cercana a nuestro sistema solar, y es el destino más interesante para la búsqueda de vida extraterrestre. Dado que tiene un planeta en la zona de habitabilidad, Proxima Centauri b, junto con la posible existencia de atmósfera y su composición rocosa, con un tamaño cercano al de la Tierra, es considerado el sistema extrasolar prioritario en astrobiología. Este planeta fue anunciado el 24 de agosto de 2016. A principios de octubre de 2016, el Centro Nacional Francés de Investigaciones Científicas (CNRS) emitió un comunicado en el que indica que el equipo internacional del estudio determinó que "las dimensiones y las propiedades" de Próxima b favorecen su "habitabilidad", pues se trataría de un planeta de "tipo océano" con una temperatura que permitiría la vida.



Figura 75

En la figura 75 se ilustran en 3 dimensiones las estrellas más cercanas al Sol hasta una distancia de 10 años luz. En la tabla 7 se presentan los planetas que orbitan las estrellas más cercanas hasta una distancia de 15 años luz, descubiertos hasta la fecha, anotando su masa y radio (en términos de los de Júpiter), el semieje mayor (en UA) y período (en días) de su órbita.

Tabla 7

Estrella	Distancia (a.l.)	Magnitud	Masa (M_{\odot})	Planeta	Masa (M_{\oplus})	Radio (R_{\oplus})	Semieje mayor (UA)	Período orbital (días)	Año descubrimiento
Próxima Centauri	4,2	11,13	0,123	b [♥]	0,004	-	0,049	11,2	2016
Alfa Centauri B	4,36	1,33	0,93	Bb [†] Bc [†]	0,0036 -	- 0,083 6	0,04 0,10	3,24 ~12,4	2012 2015
Luhman 16	6,59	23,0	~0,04	(AB)b [†]	~10	-	-	-	2013
Epsilon Eridani	10,49	3,73	0,83	b [†] c [†]	1,55 ~0,1	- -	3,39 <40	2500 ~100 000	2000 2002
Groombridge 34	11,70	8,08	0,38	Ab [†]	0,0168	-	0,0717	11,4	2014
Epsilon Indi	11,81	4,83	0,76	Ab [†] b [†] c [†]	0,97 0,0063 0,0098	- - -	8,6 0,105 0,195	>10 000 14,0 35,4	2002 2012 2012
Tau Ceti	11,90	3,50	0,78	d [†] e [♥] f [†]	0,011 0,0135 0,021	- ~0,14 -	0,374 0,552 1,35	94,1 168 642	2012 2012 2012
Kapteyn's star	12,76	8,8	0,28	b [♥] c [†]	0,015 0,022	~0,14 -	0,168 0,311	48,6 122	2014 2014
Wolf 1061	14,00	10,1	0,25	c [♥] d [†]	0,013 0,0164	~0,14 -	0,0843 0,204	17,9 67,3	2015 2015
Gliese 687	14,77	9,15	0,41	b	0,058	-	0,164	38,1	2014
Gliese 674	14,81	9,38	0,35	b	0,04	1,13	0,039	4,69	2007

♥ Exoplaneta potencialmente habitable.
 † Exoplaneta no confirmado todavía (2016, Wikipedia).

En la figura 76 se ilustra la zona de habitabilidad para la estrella Gliese 591, que está a una distancia de unos 20 años luz, en comparación con la del Sol.

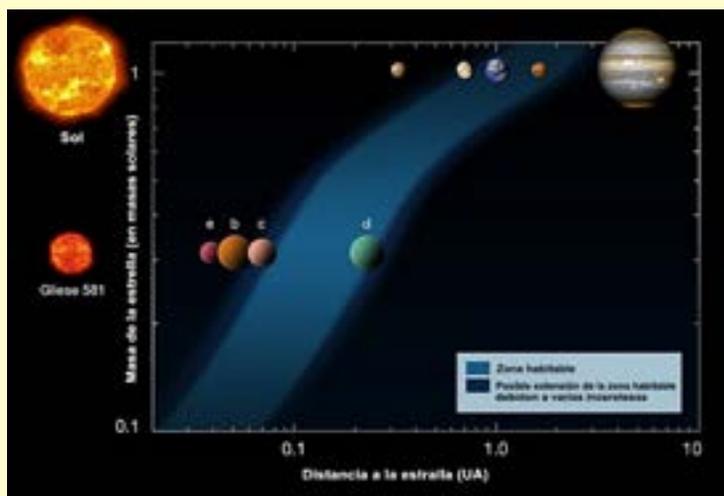


Figura 76

Actividad 38. ¿Se han descubierto sistemas planetarios, como el nuestro, orbitando alrededor de otras estrellas? ¿Cuántos y cuáles son a la fecha?

Comentarios A38.- En la figura 77 se representa una ilustración artística de un sistema planetario extrasolar. Además del sistema solar, se han descubierto ya varias decenas de sistemas planetarios, tales como los siguientes:

- Sistema Solar, con el Sol y su sistema planetario, ha sido el primer sistema descubierto.
- PSR B1257+12, el primer sistema planetario descubierto y el primero alrededor de un pulsar.
- Upsilon Andromedae, el primer sistema planetario multiplaneta descubierto alrededor de una estrella de la secuencia principal, encontrado en abril de 1999.
- PSR B1620-26, es el primer sistema planetario extrasolar descubierto en un sistema estelar múltiple.
- Gliese 581, contiene el mayor número de planetas descubiertos (6 planetas en octubre 2010).
- 55 Cancri, el sistema planetario extrasolar con 5 planetas descubiertos, alrededor de una distante estrella binaria de magnitud 6.
- Gliese 876, el primer sistema alrededor de una estrella enana roja y con resonancia orbital.
- HD 69830, el primer sistema planetario con tres planetas del tamaño de Neptuno y un cinturón de asteroides llamado la "piedra de roseta" de los sistemas planetarios (mayo 2006).
- 2M1207, el primer sistema con un planeta que orbita alrededor de una estrella enana marrón y la primera vez en lograr una imagen del planeta.



Figura 77.

REFERENCIAS

Para profundizar los contenidos tratados en la producción audiovisual y en la presente guía destinada al docente, Se pueden consultar los siguientes textos, artículos de revistas y de internet:

1. Freedman, R.A., Geller, R.M. y Kaufmann III, W.J. (2011) Universe. Editorial W.H. Freeman.
2. Kaufmann III, W.J. y Comins, N.F. (1997) Discovering the Universe. Editorial W.H. Freeman.
3. Kutner, Marc L. (2003) Astronomy: A Physical Perspective. Editorial Cambridge University Press.
4. Seeds, Michael A. (2001) Foundations of Astronomy. Editorial Brooks/Cole.
5. Ridpath, Ian, editor (1997) Dictionary of Astronomy. Editorial Oxford.
6. Kippenhahn, Rudolf (1988) Cien mil millones de soles: Estructura y evolución de las estrellas. Biblioteca Científica Salvat. Editorial Salvat.
7. Nicolson, Ian (1999) Unfolding our Universe. Editorial Cambridge University Press.
8. Galadí-Enriquez, David (2000) La culminación de la revolución copernicana. Revista Tribuna de astronomía y Universo, marzo 2000.
9. Molina-Cuberos, Gregorio (2001) Planetas extrasolares. Revista Tribuna de astronomía y Universo, abril 2001.
10. Lissauer, Jack J. (2003) Buscar planetas como la Tierra. Revista Mundo Científico N° 242.
11. Mason, John W. editor (2008) Exoplanets: Detection, formation, properties, habitability. Editorial Springer.
12. Doyle, L.R., Deeg, H-J. y Brown, T.M. (2000) Sombras de otras estrellas. Revista Investigación y Ciencia, noviembre 2000.
13. Black, D. (1991) Mundos en torno a otras estrellas. Revista Investigación y Ciencia, marzo 1991.
14. Boss, Alan P. (1996) Extrasolar planets. Revista Physics Toda, septiembre 1996.
15. MacRobert, Alan M. (1993) Searching out the nearest stars. Revista Sky & Telescope, abril 1993.
16. Sabadell, Miguel A. (1992) Introducción a la evolución estelar (I). Revista Tribuna de Astronomía N° 83, octubre 1992.
17. Harrington, Phil (1989) The ten best double stars. Revista Astronomy, julio 1989.
18. Goldstein, Alan (1989) Split a star in two. Revista Astronomy, diciembre 1989.
19. Crosswell, Ken (1991) Does Alpha Centauri have intelligent life? Revista Astronomy, abril 1991.
20. Crosswell, Ken (1987) Visit the nearest stars. Revista Astronomy, enero 1987.
21. LoPresto, M.C. y McKay, R. (2005) An introductory physics exercise using real extrasolar planet data. Revista Physics Education 40 (1), enero 2005.
22. Marcaide Osorio, Juan (2010) Planetas de otros soles. Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vol. 104, N° 2.
23. Masset, Frédéric (2011) Sistemas planetarios extra-solares. Revista Digital Universitaria, volumen 12, N° 5.
24. Extrasolar planet. Wikipedia, visto el 2010.
25. List of nearest exoplanets. Wikipedia, visto el 2016.
26. The search for planets around other stars: An introductory resource guide for college instructors. (2014) Compiled by Andrew Fraknoi.

ANEXO

A continuación se incluye información respecto a las plataformas ecuatoriales con las que se han tomado algunas de las fotografías con seguimiento que ilustran esta guía didáctica.

Una plataforma ecuatorial, en su construcción más básica, consiste en dos trozos de madera unidos por una bisagra. En el otro extremo se coloca un perno que se fija a la madera superior en donde se ubica un soporte para la cámara fotográfica, como se ilustra en la figura 78. La perilla de la madera inferior permite mover la tabla superior al ritmo que se mueve el cielo, aparentemente, alrededor de la Tierra. El borde en donde se ubica la bisagra se debe colocar paralelo al eje de rotación de la Tierra, alineándola con el buscador, apuntando hacia el polo sur celeste. Para determinar el ritmo al que debe moverse la perilla, se tiene que considerar la geometría de la plataforma y el día sideral. La plataforma ecuatorial de la figura 78 (a) corresponde a una plataforma de brazo simple manual. La de la figura 78 (b) a una plataforma de brazo doble manual para evitar errores en el seguimiento. La figura (c) ilustra una plataforma ecuatorial de brazo simple con motor y la (d) muestra una plataforma de brazo doble con motor. En ambos casos se debe determinar la diferencia de potencial a aplicar al motor para que la parte superior, en donde va la cámara fotográfica, siga correctamente el movimiento aparente del cielo nocturno.



(a)



(b)

Figura 78



(c)



(d)