UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES (UMSA)

FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES (FCPN)

CARRERA DE FÍSICA

1er DIPLOMADO EN FISICA PARA PROFESORES DE COLEGIO

(Semi-Presencial)

DFIS

MODULO: ASTRONOMÍA y ASTROFÍSICA
Semana 7: Estrellas *(Parte A)*

Docente: ***Lic. Roy Omar Edgar Bustos Espinoza***

La Paz - Bolivia

2008

SYLLABUS (Semana 7)

1) Astrofísica Básica
2) Coordenadas y tiempo
3) Sistema Solar
4) **Estrellas**
5) Sistemas Estelares
6) Cosmología
7) Instrumentación y tecnología espacial

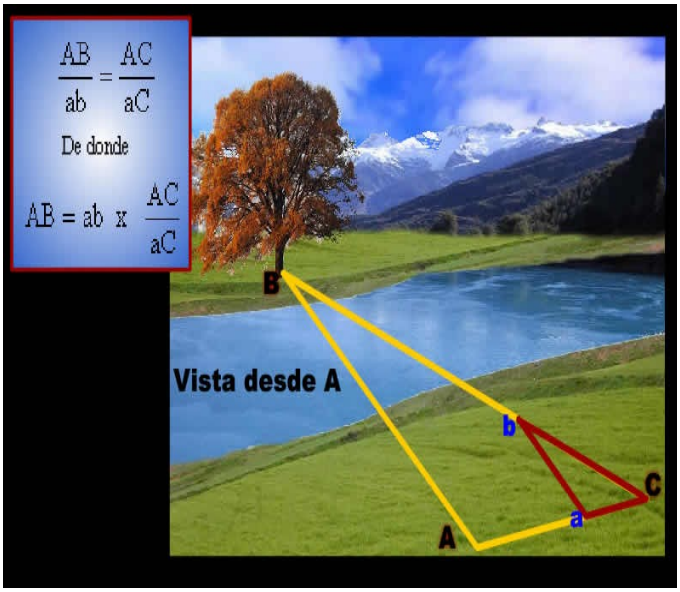
SYLLABUS EXTENDIDO (Semana 4)

1) Astrofísica Básica
2) Coordenadas y tiempo
3) Sistema Solar
4) Estrellas
    - **Estrellas**
        - **Teoría Electromagnética y Física Cuántica**
        - **Termodinámica**
        - **Espectroscopia y Física Atómica**
        - **Física Nuclear**
        - **Propiedades Estelares**
            - **Determinación de la Distancia**
            - **Flujo, Luminosidad y Magnitud**
            - **Índices de Color y Temperatura**
            - **Determinación del Radio y la Masa**
            - **Movimiento Estelar**
            - **Variación Estelares**
        - **Atmósferas**
        - **Evolución Estelar**
            - **Formación Estelar**
            - **Diagrama Herzsprung-Russell**
            - **Estrellas en las Secuencias Pre Principal, Principal y Post Principal**
            - **Estado final de las Estrellas**
5) Sistemas Estelares
6) Cosmología
7) Instrumentación y Tecnología Espacial

4) Estrellas

S Estrellas

- **Propiedades Estelares**
  - **Determinación de la Distancia**



El método más usado para medir distancias grandes que sean inaccesibles, como la distancia hasta una estrella, es conocido como **Triangulación**. Introduzcamos este concepto con un ejemplo más accesible: ¿Cómo medir la distancia hasta un árbol que está al otro lado de un río que no se puede pasar?. La solución se la encuentra colocando al árbol en una de los vértices del triangulo rectángulo *ABC*. Luego se construye el triangulo equivalente *abC*. *AC* es conocida como la línea base del primer triangulo, y *aC* es la línea base del segundo triangulo. *AP* es la distancia que se desea averiguar. Note que se cumple la siguiente equivalencia:

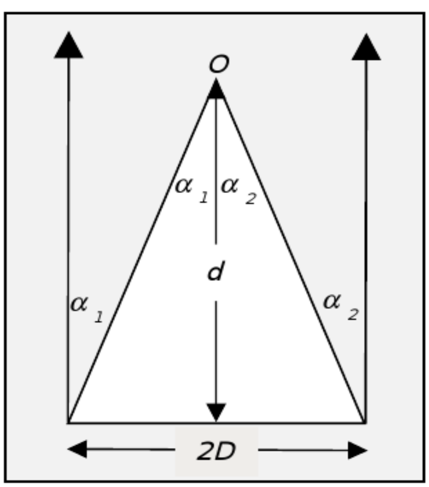
$$\frac{AB}{ab} = \frac{AC}{aC}$$

de donde:

$$AB = ab \times \frac{AC}{aC} \qquad (1)$$

Al ser las distancias: *ab*, *AC* y *aC* ¨fáciles¨ de medir, la distancia A*B* será también fácil de calcular.

Notemos que la dirección del árbol, visto desde *A*, es diferente a la dirección del árbol visto desde C. Esto se hace evidente cuando se compara la visión del arbol con la montaña del fondo, desde la posición *A* y desde la posición *C*. Se define **paralaje** al cambio de posición aparente del objeto en observación debido al cambio de posición del observador. Este mismo concepto se usará en Astronomía.



Estudiemos la *figura 2* (costado izquierdo). Supongamos que en el punto *O* está una estrella de la cual queremos medir la distancia *d*. La línea base en este caso será 2*D*; α_1 y α_2 son los ángulos entre la dirección del objeto visto desde ambos extremos de la línea base con respecto a una dirección de otro objeto (otras estrellas) mucho más distantes que serán tomadas como referencia (en el ejemplo del árbol esta referencia es la montaña detras, en el horizonte). De la figura es posible ver que:

$$\tan(\alpha_1) = \tan(\alpha_2) = \frac{D}{d} \qquad (2)$$

Para ángulos pequeños, como por ejemplo, α = 3°, se cumple que: $\tan\alpha_1 \approx \alpha_1$, y como $\alpha_1 = \alpha_2$, entonces es posible escribir: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, por tanto,

$$\tan\alpha \approx \alpha \qquad (3)$$

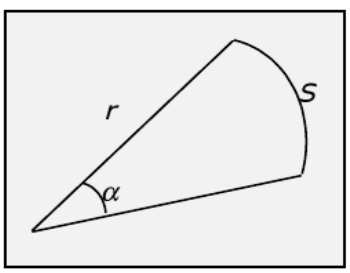
entonces, la ecuación (2) quedará simplemente como:

$$\alpha = \frac{D}{d} \qquad (4)$$

de donde, despejando la distancia buscada:

$$d = \frac{D}{\alpha} \qquad (5)$$

NOTA: El ángulo α debe estar en radianes.



El valor de cierto ángulo, α , medido en radianes, es igual al arco *S* que el encierra, dividido entre el radio *r* de dicho arco, donde se asume que *S es parte* de una circunferencia de radio *r (figura 3)*. Es decir:

$$\alpha = \frac{S}{r}[rad] \qquad (6)$$

Ejemplo

Encuentre el valor de α = 3° en radianes luego el valor de $\tan\alpha$ y finalmente compare ambos resultados.

Solución.-

Usemos el hecho de que $180^\circ = \pi[rad]$, por tanto: $3^\circ \times \frac{\pi[rad]}{180^\circ} \approx 0{,}0524[rad]$

Ahora calulemos la tangente de ese ángulo: $\tan(0{,}0524) \approx 0{,}0524$

Al comparar ambos resultados se encuentra que son aproximadamente iguales, es decir, se cumple la relación (3): $\tan\alpha \approx \alpha$

Paralaje Geocéntrico y Heliocéntrico

Cuando la línea base es tomada igual al diámetro de la órbita de la Luna alrededor de la Tierra, entonces se puede medir la distancia a la que están, por ejemplo, algunos Planetas visibles. Este método se conoce como *Paralaje Geocéntrico* (la Tierra en el centro).

De la ecuación (5): $d=\frac{D}{\alpha}$, D será igual al radio de la órbita de la Luna, es decir, $D=R_{Luna-Tierra}$, de donde tendremos que:

$$d=\frac{R_{Luna-Tierra}}{\alpha}[m] \qquad (7)$$

De manera equivalente se puede usar como línea base al diametro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, es decir, $D=R_{Tierra-Sol}$, entonces, se puede medir la distancia a la que están, por ejemplo, algunas estrellas cercanas. Este método se conoce como *Paralaje Heliocéntrico* (el Sol en el centro), y la ecuación (5) quedará:

$$d=\frac{R_{Tierra-Sol}}{\alpha}[m] \qquad (8)$$

A la distancia: $R_{Tierra-Sol}$ se la conoce como una unidad astronómica (u.a.), es decir,

$$1\,u.a.=R_{Tierra-Sol} \qquad (9)$$

Hoy en día se conoce con una muy buena exactitud a dicha distancia:

$$1\,u.a.=(149597870660\pm 20)[m] \qquad (10)$$

Esta última ecuación, indica que es posible conocer esta distancia con un margen de error de 20 metros! Esto significa que dicha distancia fluctua estadísticamente entre los valores:

$$(149597870680)[m] \quad \text{y} \quad (149597870640)[m]$$

En resumen, a medida que nuestro planeta gira en torno al Sol, es posible medir la distancia a la que está una estrella midiendo la dirección de la estrella en relación a otras estrellas más lejanas que quedan como fondo, para lo cual se debe fijar la fecha, hora, minuto y segundo de la observación, es decir, cuando la Tierra está a un lado del Sol y volver a hacer la medición exactamente seis meses más tarde, cuando la Tierra está al otro lado del Sol.

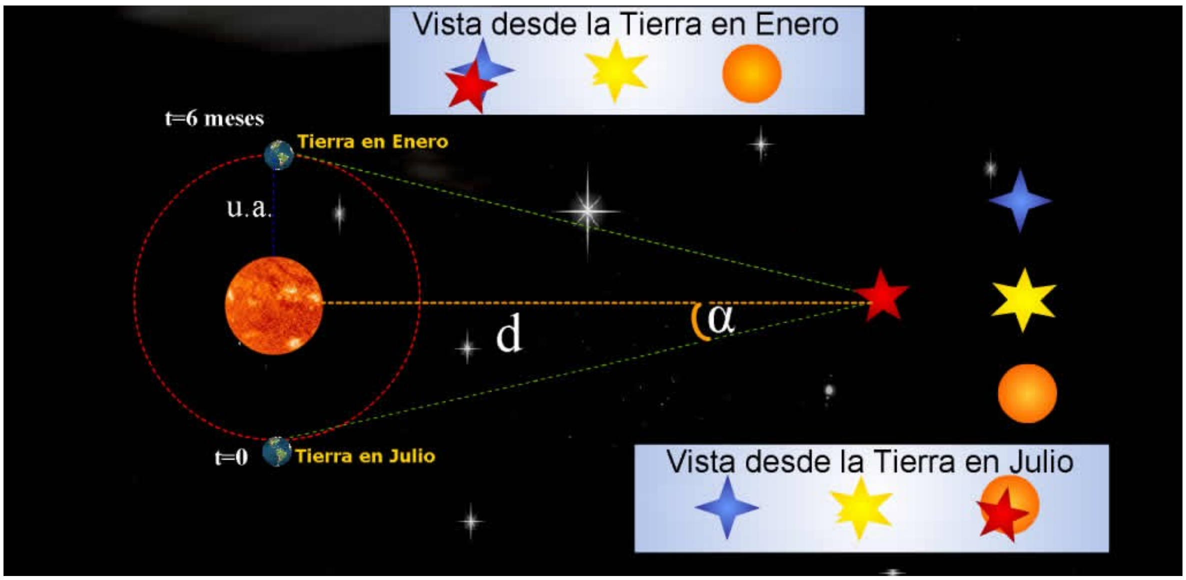
Colocando la ecuación (9) en la ecuación (8):

$$d=\frac{R_{Tierra-Sol}}{\alpha}=\frac{1}{\alpha}[u.a.]$$

es decir:

$$d=\frac{1}{\alpha}[u.a.] \qquad (11)$$

Estudiemos la *figura 4:*



Ejemplo

En vista de la inmensidad de las distancias en el cosmos resulta muy incomodo seguir usando kilómetros, por eso se usa el *pársec* que se define como la distancia que corresponde a la paralaje heliocéntrica de 1''. Analice tal definición. Solución.-

Estudiemos una vez más la *figura 4;* en ese caso según la definición de 1 parséc:

Si $d=1[pc] \quad \Rightarrow \quad \alpha=1[''] $

Pero el ángulo α, que está en segundos, debe estar en radianes, por tanto, realicemos la conversión:

$$\alpha=1['']\times\frac{1[^\circ]}{3600['']}\times\frac{2\pi[rad]}{360[^\circ]}=4{,}848136811\times10^{-6}[rad]$$

y por tanto la ec. (11) quedará:

$$d=1[pc]=\frac{1}{\alpha}=\frac{1}{4{,}848136811\times10^{-6}}[ua]=206264{,}8062[ua]\approx206265[ua]$$

Es decir: $1[pc]=206265[u.a.]$

9) ¿Cuantos kilómetros viaja la luz en un año?

Solución.-

La velocidad de la luz es una de las constantes fundamentales en la naturaleza cuyo valor exacto es: $299792458[\frac{m}{s}]$, por lo tanto:

$$299792458[\frac{m}{s}]\times\frac{1[km]}{10^3[m]}\times\frac{3600[s]}{1[h]}\times\frac{24[h]}{1[d]}\times\frac{365[d]}{1[a]}=9{,}4608\times10^{12}[\frac{km}{a}]$$

10) Exprese un pársec en años luz.

Solución.-

$$1[pc]\times\frac{206265[ua]}{1[pc]}\times\frac{149597870{,}660[km]}{1[ua]}\times\frac{1[al]}{9{,}4608\times10^{12}[km]}=3{,}262[al]$$

11) Calcule la distancia a la que está una estrella cuyo ángulo, α , medido vale $7\times10^{-5}[rad]$

Solución.-

Usando la ecuación (11) tendremos:

$$d=\frac{1}{\alpha}=\alpha^{-1}=(7{,}0\times10^{-5})^{-1}\approx14285{,}7[ua]$$

Conversiones y definiciones importantes:

- 1 u.a. =(149 597 870 660±20) [m]
- 1 año luz (a.l.) = $9{,}46\times10^{12}$ [km]
- 1 Parcec (pc) es una distancia tal que representa un paralaje heliocéntrico igual a 1'', es decir: 1 [pc] = 206265 [u.a.]= 3,26 [a.l.]

■ Flujo, Luminosidad y Magnitud

El flujo, cuyo simbolo es: ϕ , es una cantidad fundamental para el estudio estelar. Es una medida de la energía emitida por una fuente (por ejemplo una estrella) por unidad de área por unidad de tiempo que llega a un determinado punto en el espacio como por ejemplo el ocular de un telescopio.

Como sabemos, en el sistema internacional: MKS, la energía, *E,* se mide en Joules (= Newton por metro), el area, *A,* en metros cuadrados (m^2) y el tiempo, *t,* en segundos.
La potencia, *P*, es igual a la cantidad de energía, *E*, por unidad de tiempo, *t*, y se mide en Watts (*W*) es decir,

$$P=\frac{E}{t} \quad [\frac{J}{s}=W] \qquad (12)$$

En consecuencia es posible indicar una definición apriori del flujo:

$$\phi=\frac{E}{A\,t} \quad [\frac{J}{m^2\,s}=\frac{W}{m^2}] \qquad (13)$$

El flujo luminoso del Sol es conocido como la *Constante Solar* que tiene unidades de [Energía / (Tiempo Área)] o lo que es lo mismo [Potencia / Área] (Ver recuadro).

El Sol: nuestra estrella
Muchas de las propiedades que conocemos del Sol son típicas para la mayoría de las demás estrellas. Por ejemplo, es importante conocer la denominada *Constante Solar (* ϕ_{Solar} *)* de la radiación solar, que no es otra cosa que el flujo solar y que se define como la potencia [W] por unidad de área [m^2], es decir, [W/m^2].
La *Constante Solar (* ϕ_{Solar} *)* tiene un valor igual a:

$$\phi_{Solar} = 1360 \; [\,W / m^2 = J / (s\, m^2)]$$

Es decir, C_S es la cantidad de energía solar, igual a 1360 [*J*], que atraviesa una superficie, perpendicular a los rayos solares, de 1 [m^2] en un tiempo igual a 1 [*s*] y que está a una distancia media entre la Tierra y el Sol, o sea, 1 [u.a.].
La *luminosidad total* del Sol es igual a la cantidad de energía [J] total que sale del Sol en una unidad de tiempo [s], o sea , la potencia [W], y viene dada por:

$$L_{Sol} = (3{,}846 \pm 0{,}008) \times 10^{26} \; [W = J / s]$$

La luminosidad, *L*, como se menciono en el recuadro, es equivalente a la Potencia [Watts = W] que una determinada fuente (estrella) emite al espacio, es decir, *L* es la energía total por unidad de tiempo emitida por la fuente en todas las direcciones. En consecuencia, el flujo será igual a la luminosidad por unidad de área, es decir,

$$\phi=\frac{L}{A}\ \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad (14)$$

Para una estrella de radio *R* conocido, y recordando que la superficie de una esfera viene dada por la relación $A_{Esfera}=4\pi R^2$, el flujo saliente de toda su superficie será:

$$\phi(R)=\frac{L}{A_{Estrella}}=\frac{L}{4\pi R^2}\ \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad (15)$$

Nota: La notación: $\phi(R)$, significa que el flujo , ϕ , depende del radio de la estrella, R .

Si buscamos calcular el flujo a una cierta distancia, *r,* de la estrella, éste será:

$$\phi(r)=\frac{L}{4\pi r^2}\ \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad (16)$$

El radio, *R*, de una estrella se lo puede conocer de sus dimensiones angulares. Pero muchas estrellas están tan lejos de nosotros que es prácticamente imposible determinar estas dimensiones angulares, por lo tanto, la única información que poseemos sobre estas fuentes lejanas es el flujo de la misma.

Este flujo se mide generalmente en una escala logarítmica, por el amplio espectro de posibilidades de magnitudes de flujo existentes, es decir, es sufiente comparar, por ejemplo, el flujo del Sol con el flujo de la estrella más pequeña que se pueda ver a simple vista en la esfera celeste. Es tan amplia la diferencia que solo una escala logarítmica es capaz de abarcar tan amplio rango.

Se define a la *magnitud estelar, m*, como la cantidad que permite cuantificar el flujo proveniente de las estrellas, permitiéndonos de este modo, clasificar los flujos estelares.

Una magnitud estelar igual a uno se escribe: 1^m , o también: $m=1$. Se toma la relación de los flujos igual a 2,5119 veces. Este número ha sido elegido por comodidad, de tal manera que su logaritmo con base diez sea aproximadamente igual a $0,4$, es decir:

$$\log_{10}(2{,}5119)=0{,}400002\approx 0{,}4 \qquad (17)$$

En 1856, N. Pogson verificó que la percepción del brillo de una fuente luminosa por el ojo humano utiliza una escala logarítmica, tal que, el flujo, Φ_1, de una estrella de magnitud estelar igual a uno (1^m) es 100 veces más intenso que el flujo, Φ_2, de una estrella de magnitud estelar igual a seis (6^m).

Esto se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2}=2{,}5119^{-(m_1-m_2)} \qquad (18)$$

<u>Se acordó a nivel internacional que las estrellas cuyo flujo es menor tienen mayor magnitud estelar</u>.

Es decir, el flujo de las estrellas más intensas, en principio, comienza desde menos infinito, se acerca a una magnitud cero y prosigue hasta más infinito para las estrellas menos intensas, la progresión tiene una razón exponencial igual a 2,5119, es decir:

$$...-7^m,-6^m,-5^m,-4^m,-3^m,-2^m,-1^m,0^m,+1^m,+2^m,+3^m,+4^m,+5^m,+6^m,+7^m...$$

O colocando la intensidad del flujo en la escala:

$$FLUJO\,INTENSO...,-3^m,-2^m,-1^m,0^m,+1^m,+2^m,+3^m,...\,FLUJO\,DEBIL$$

Esta escala es muy parecida a la que propuso *Hiparco de Nicea (194 – 120 a.C.)* hace 21 siglos atrás.

HIPARCO fue el observador más grande de la antigüedad, tanto que su catálogo estelar, que contenía posiciones y brillos de unas 850 estrellas, fue superado en precisión solamente en el siglo XVI. Su escala de los brillos aparentes, que distingue seis magnitudes, está en la base de la actual clasificación fotométrica de las estrellas. Por otra parte, hizo el notable descubrimiento de la precesión de los equinoccios, es decir, del desplazamiento de los puntos equinocciales –puntos comunes a la eclíptica y al ecuador celeste- a lo largo de la eclíptica. Para ello, procedió a desarrollar un método que anteriormente había sido ideado por Aristarco; midió la distancia y tamaño de la Luna.
Más información en: http://www.astrocosmo.cl/biografi/b-e_hiparco.htm

Aplicando logaritmos a la ecuación (18):

$$\log\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)=\log\left(2{,}5119^{-(m_1-m_2)}\right)=-(m_1-m_2)\log(2{,}5119)=-(m_1-m_2)(0{,}4)=-(m_1-m_2)\frac{4}{10}$$

De donde finalmente:

$$\log\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)=-(m_1-m_2)\frac{2}{5}$$

$$\Rightarrow \quad (m_1-m_2)=-\frac{5}{2}\log\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right) \qquad (19)$$

De la ecuación (19) es posible encontrar la magnitud aparente de un astro:

$$m=-\frac{5}{2}\log(\phi)+Cte. \qquad (20)$$

Algunas Magnitudes Estelares

Sol	$-26{,}8^m$
Luna	$-12{,}7^m$
Mercurio	$-0{,}2^m$
Venus	$-4{,}1^m$
Marte	$-1{,}9^m$
Júpiter	$-2{,}4^m$
Saturno	$+0{,}8^m$
Urano	$+5{,}8^m$
Neptuno	$+7{,}6^m$
Sirio	$-1{,}42^m$

Práctica

1. Calcula el flujo saliente total de una estrella de radio igual al del Sol pero cuya luminosidad es mucho menor, igual a L = 12×10^9 [W], Ayuda: El radio del Sol es igual a $R_e = 696000\,[km]$.

2. Calcula el flujo detectado de la misma estrella, si está a una distancia de nosotros igual a 5 [pc].

3. Calcula la *magnitud estelar* de dicha estrella, sabiendo que la magnitud del Sol es igual a $-26{,}8^m$ y su flujo en la Tierra es igual a $\phi_e=1{,}37\times10^9\left[\frac{W}{m^2}\right]$

4.- Demuestre la ecuación *(20)*

Sabias que...? Los Neutrinos son partículas sin masa, sin carga eléctrica e interactuan con la materia de un modo extremadamente debil, prácticamente no interactúan y llegan del Sol a la Tierra con un un flujo espectacular: !hay unos 1011 = 100000000000 neutrinos que pasen por un centímetro cuadrado en un segundo!. Uno de los retos actuales es detectarlos para poder entender mejor lo que sucede en el interior del Sol y en consecuencia de las estrellas.