

Introducción a Astrofísica

Programa:

Introducción

{ Tema 0: Historia
Tema 1: Astronomía de posición
Tema 2: Propiedades y medición de la radiación electromagnética
Tema 3: Instrumentos astronómicos

Sistema solar

{ Tema 4: Propiedades generales del sistema solar
Tema 5: Planetas y sus satélites, asteroides y cometas
Tema 6: Formación del sistema solar

Estrellas

{ Tema 7: Estructura estelar
Tema 8: Observaciones de estrellas
Tema 9: Evolución estelar

Galaxias

{ Tema 10: La Vía Láctea
Tema 11: Galaxias

Cosmología

{ Tema 12: Cosmología



¿Qué es la Astrofísica?

- Estudia e intenta comprender el universo
- Aplica leyes físicas al universo
- Es una ciencia, usa métodos científicos
- Ciencia observacional: no podemos hacer experimentos (casi), sólo observaciones



Un ejemplo:
Stonehenge (sur de
Inglaterra)

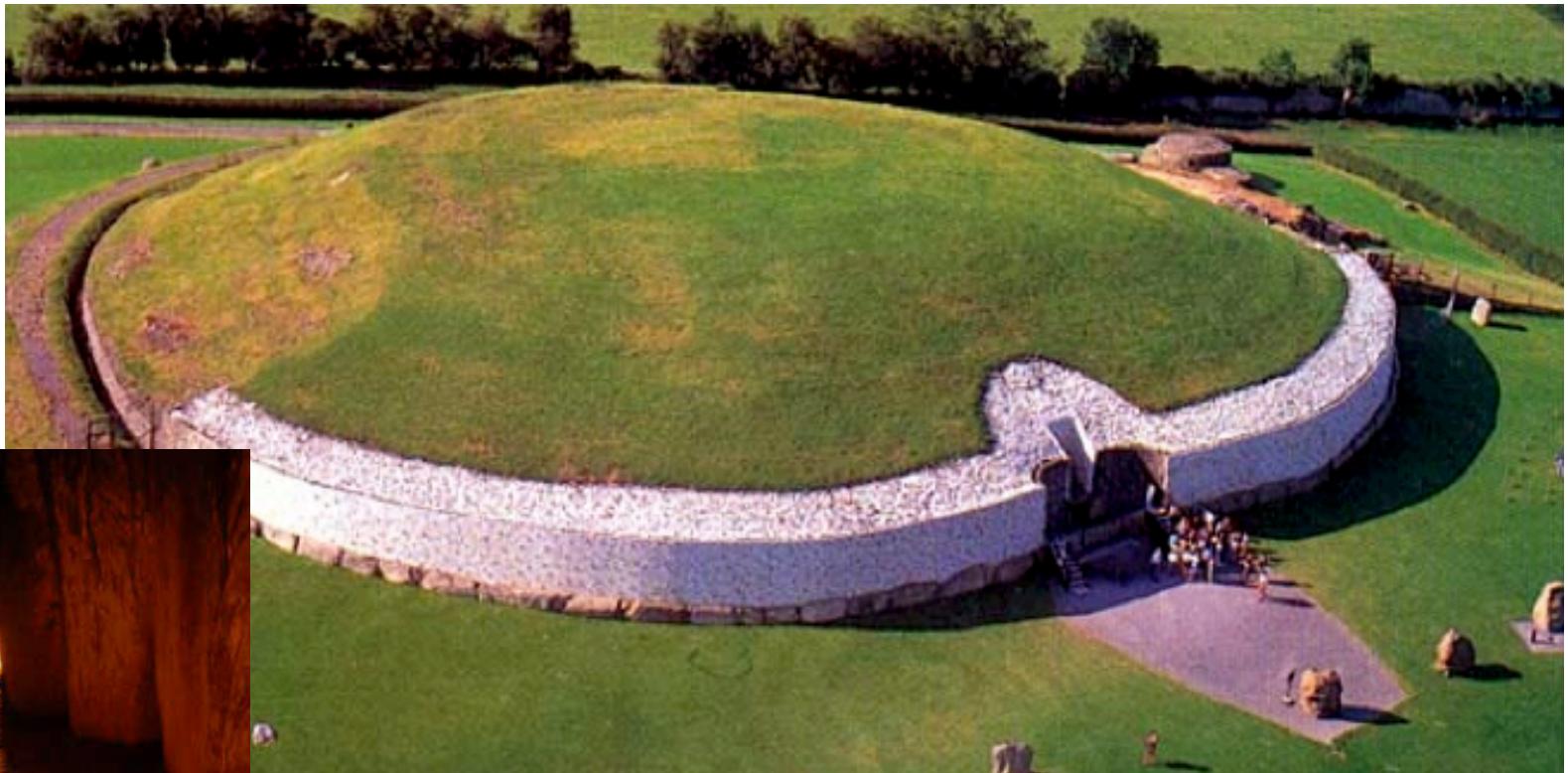
Fue construido entre el neolítico
y la edad de bronce (approx.
Entre 2700 y 2100 a.C.)

Historia de la astronomía

Arqueoastronomía



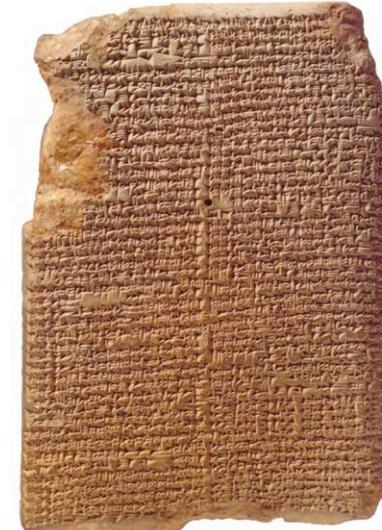
Newgrange - Tumba prehistórica (Irlanda)

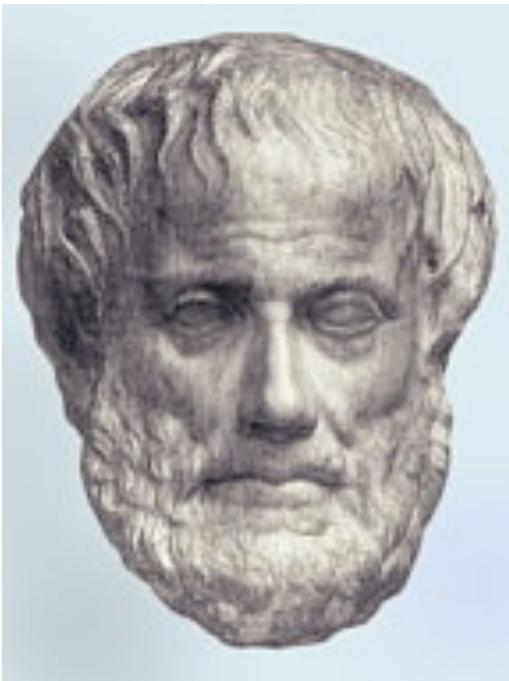


•Orientación cuidadosamente elegida:

En el amanecer del Solsticio de Invierno, el Sol penetra por abertura y recorre la galería hasta el corazón de la cámara.

- **Babilonia:** medidas de las posiciones de los planetas (tablas babilónicas)
- **Grecia** → primeros científicos
 - Primeros en querer comprender el universo (antes había estrecha relación con religión)
 - Intentaron explicar el universo basándose en formas geométricas → construyeron los primeros modelos del movimiento de la Luna, Sol, planetas

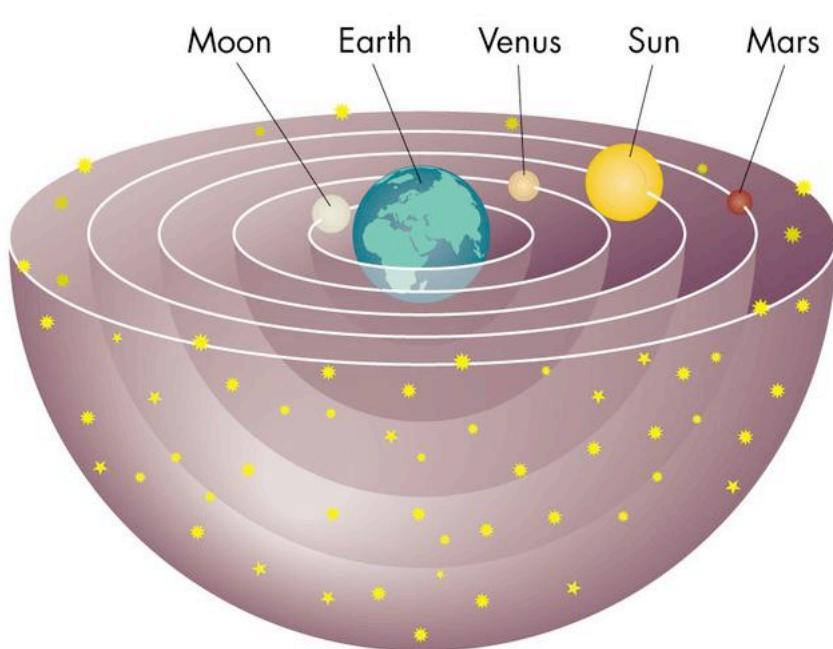




La astronomía griega

Aristóteles (384-322 a.C.)

- Sus ideas sobre el universo se mantuvieron durante muchos siglos
- Modelo del universo: Sol, planetas y estrellas giran alrededor de la Tierra en diferentes esferas
- Adelantó los primeros argumentos de que la tierra no era plana:



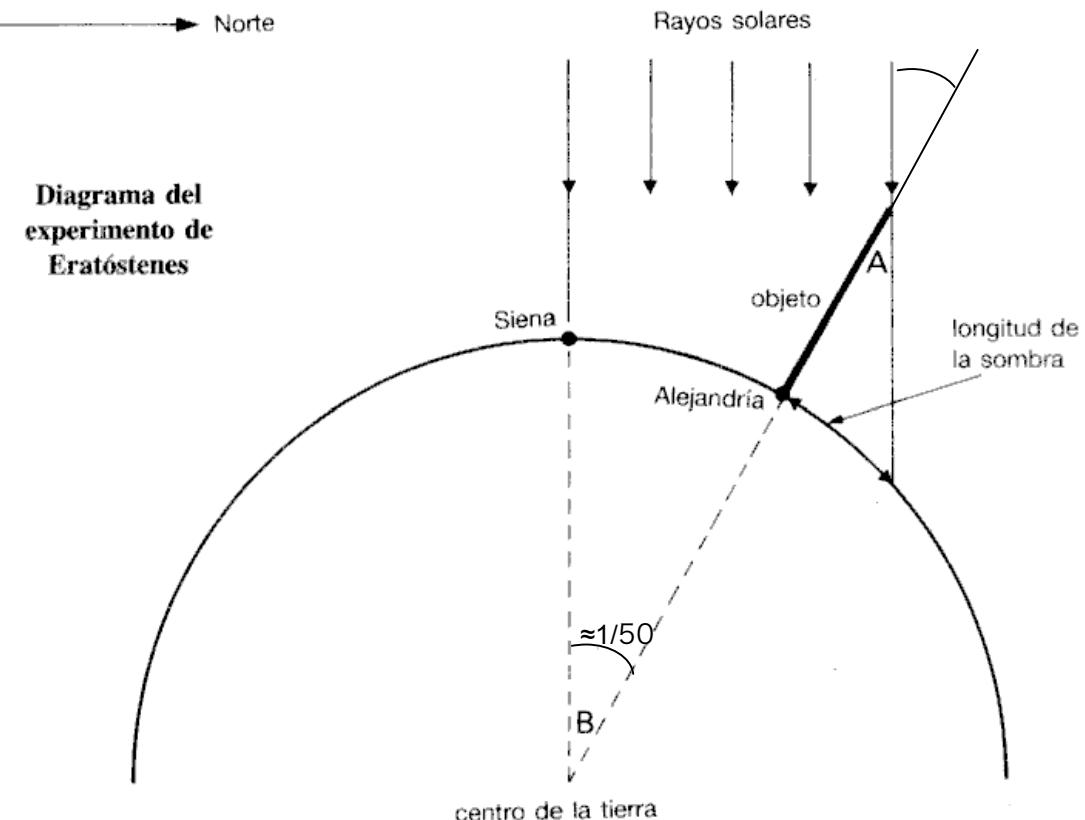
- Las estrellas cambian la posición en el horizonte según el sitio en la Tierra.
- Sombra de la Tierra en la Luna en eclipses es curvada



La astronomía griega

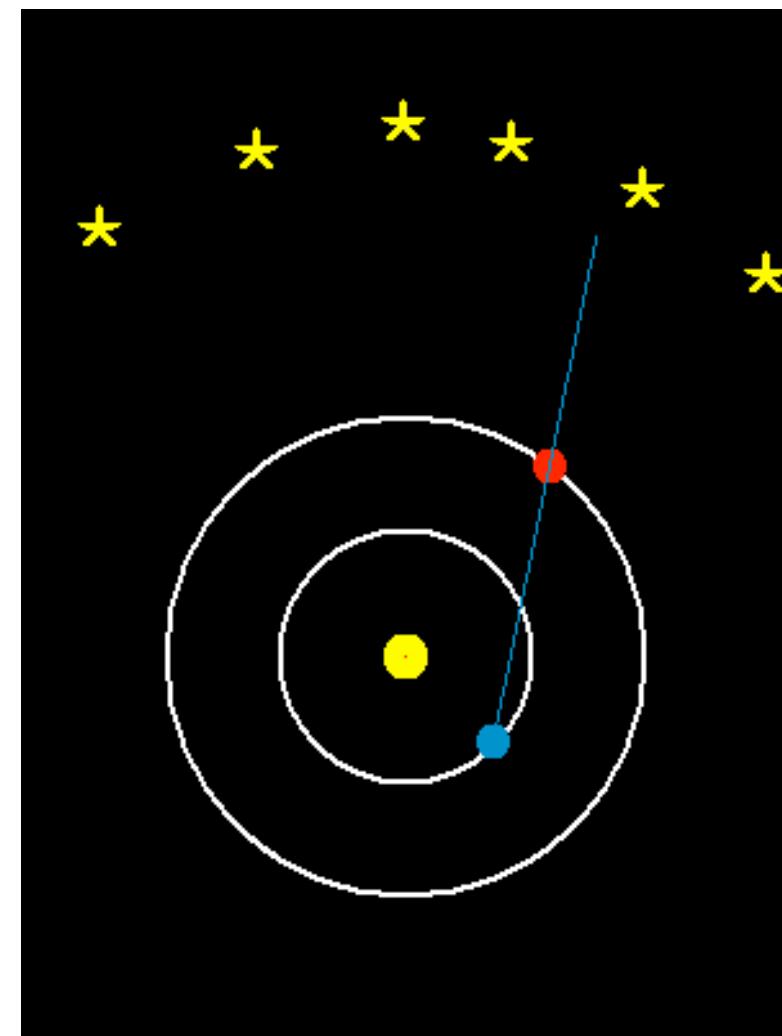
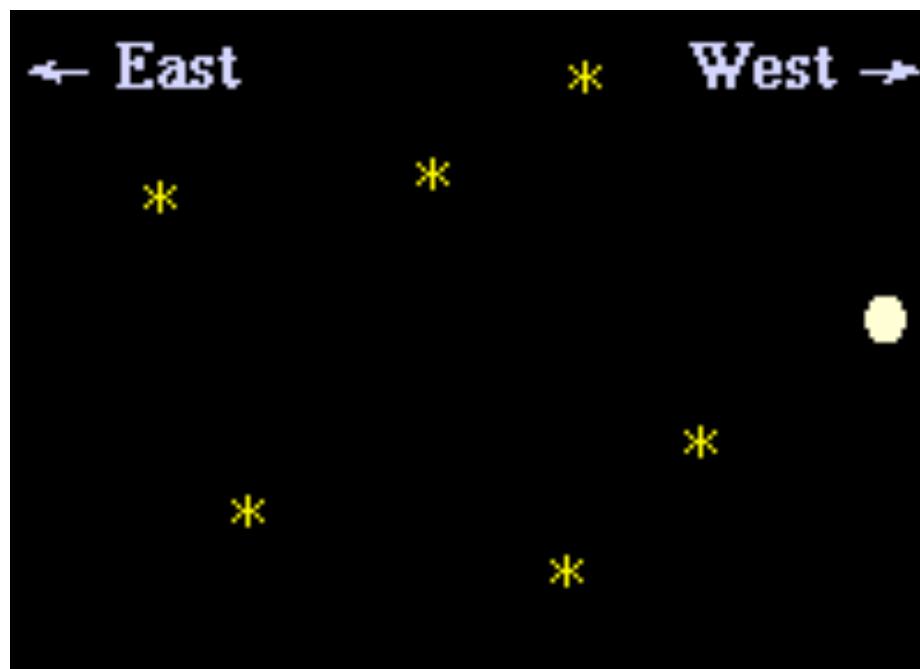
Eratóstenes (siglo III a.C.)

Midió el diámetro de la Tierra



- **Aristaco de Samos** (siglo III a.C.):
 - propuso modelo heliocéntrico (17 siglos antes que Copérnico!)
→ no fue tomado en serio.
- **Más logros** de la astronomía griega:
 - Sistemas de magnitudes para clasificar estrellas según su brillo
 - Midieron la inclinación entre plano de la órbita del *Sol en torno a la Tierra* y el Ecuador (inclinación de la eclíptica)

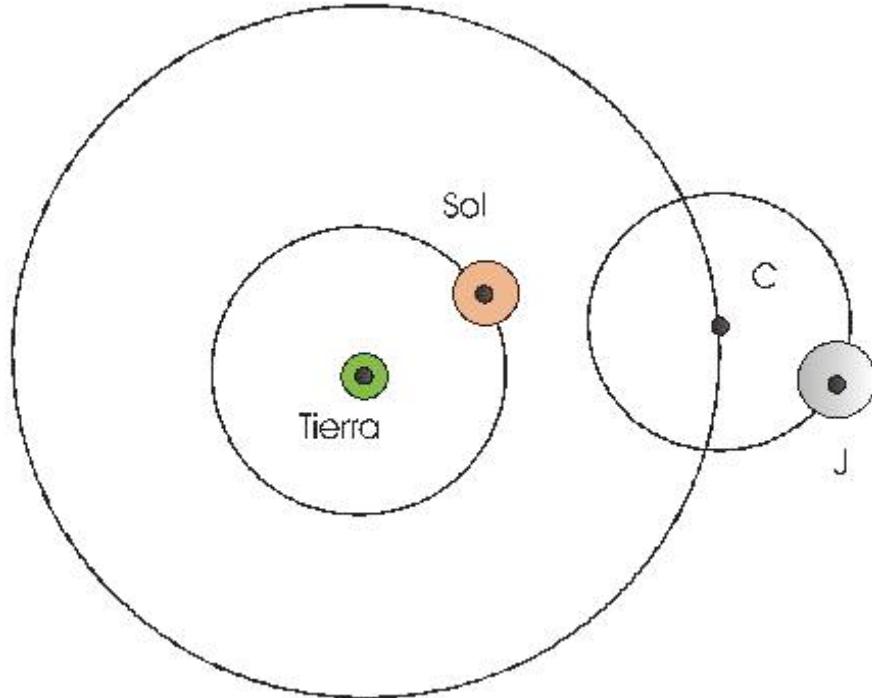
Movimiento de los planetas



Movimiento de los planetas visto en el cielo

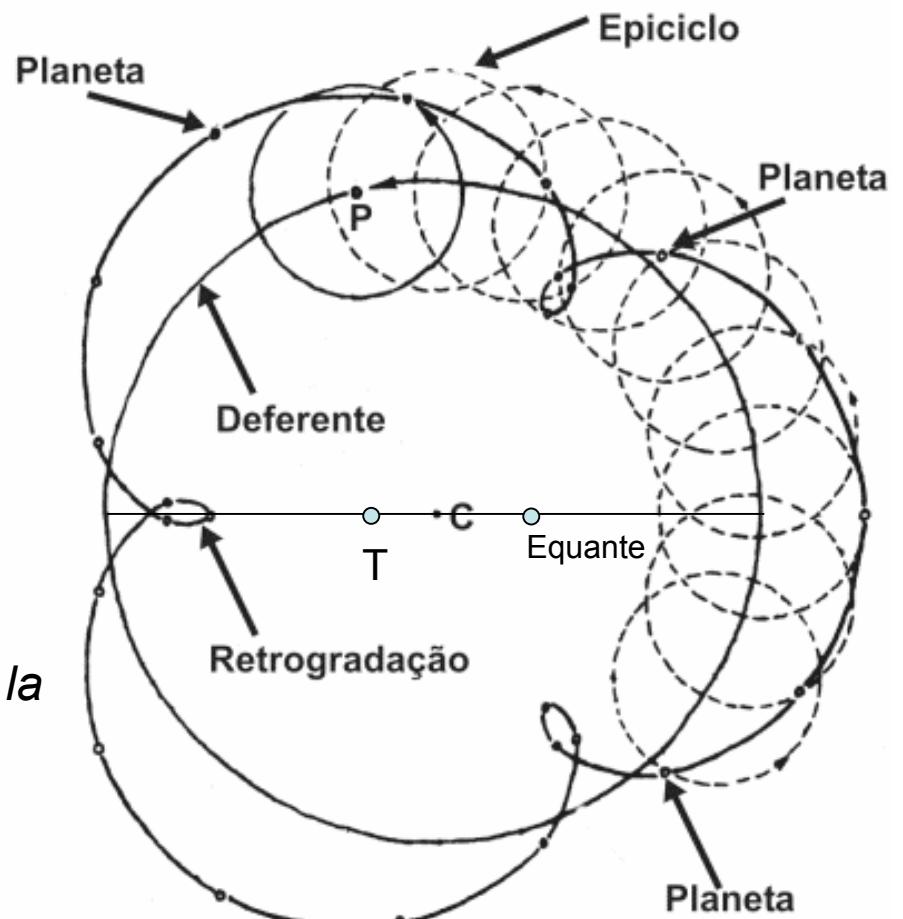


La astronomía griega



Ptolomeo (100-170 dC) construyó un modelo de **epiciclos** para describir los movimientos de los planetas que funcionó muy bien.

- Ptolomeo fue el último gran astrónomo de la Antigüedad.
- Su trabajo dominó la Astronomía durante 1500 años.



El nacimiento de la ciencia moderna...

- **Nicolás Copernicus (1473-1543) - El revolucionario**
 - Ruptura con la concepción griega de Sistema Solar
 - Su modelo:
 - { - modelo heliocéntrico
 - órbitas circulares
 - Implica una forma mucho más sencilla de explicar el movimiento retrógrado de los planetas.
 - Además: ordenó los planetas por su distancia al Sol y determinó los periodos de sus órbitas.
- **Tycho Brahe (1546-1601) - El observador**
 - Impresionante trabajo observacional (observatorio en isla Hveen)
 - Descubrió una “nueva estrella en el cielo” (la supernova de Tycho)
 Esta observación chocaba con la idea de universo inmutable de la época.
 - Es responsable de las observaciones y medidas de posiciones de estrellas y planetas más precisas hasta la fecha (sin telescopio!).
 - En 1597, se marcha a Praga y desde 1600 trabaja con su joven asistente Johannes Kepler.
- **Johannes Kepler (1571-1630) - El analista**
 - En 1600 comenzó a estudiar los datos observacionales de Tycho
 - Entre 1609-1618 publicó sus 3 famosas leyes que hoy día sirven para entender los movimientos de los planetas en el Sistema Solar (obtenidas de observaciones y cálculos matemáticos muy complejos).

- **Galileo Galilei (1564 – 1642)**

- Se le atribuye el primer uso de un telescopio para fines astronómicos (1609)
- Entre sus logros:
 - Vía Láctea y otras *manchas* en el cielo están formadas por muchas estrellas!
 - Cráteres, montañas, mares en la luna.
 - Descubrió los satélites de Júpiter: no todos los astros giran en torno a la Tierra.
 - Descubrió la *extraña forma* de Saturno, aunque no supo determinar por qué.



Entre Copérnico y Galileo se establece el método científico moderno:

- *evidencia, observación y medidas*
- *aplicación de las matemáticas a la resolución de preguntas científicas*

- **Isaac Newton (1642-1727)**

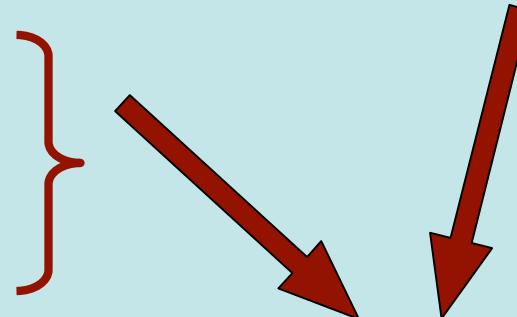
- Grandes contribuciones a las matemáticas y la física:
 - Cálculo diferencial
 - Ley de gravitación universal
 - Leyes de la dinámica
- Consigue explicar las leyes de Kepler a partir de leyes físicas sencillas
- Otras importantísimas contribuciones en relación con la astronomía:
 - Descomposición de la luz blanca al atravesar un prisma
 - Invención del telescopio reflector



Bases de la nueva astronomía

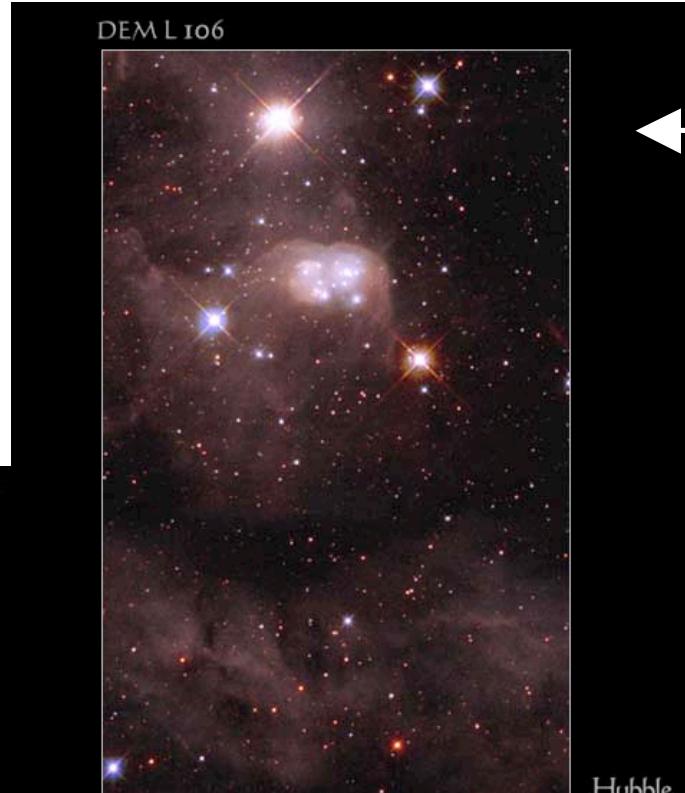
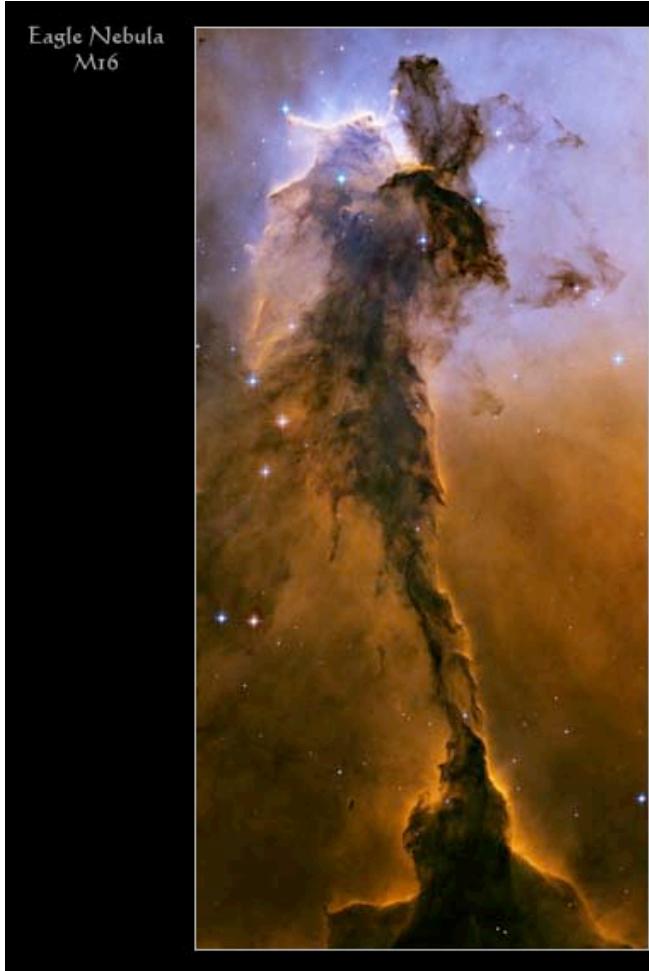
- **Después de Newton y hasta nuestra época:**

- Fundamental el uso de la Física de Newton para el estudio del cosmos
- Importante el desarrollo de nuevas teorías:
 - Radiación electromagnética
 - Física cuántica
 - Física relativista
 - Física de partículas
 - Utlimamente: Desarrollo en ordenadores



Interpretación de las observaciones astronómicas

Algunos logros recientes en imágenes



Zona de formación de estrellas nuevas



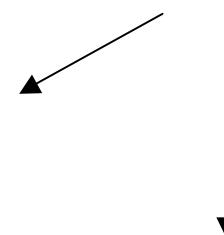
Gas ionizado alrededor de estrellas masivas en la galaxia vecina *Gran Nube de Magallanes*

Nebulosa de reflexión con gobulo de Bok

Chorros
bipolares
alrededor de una
estrella gigante
roja



Nebulosas planetarias:
Final de la vida de una
estrella como el sol

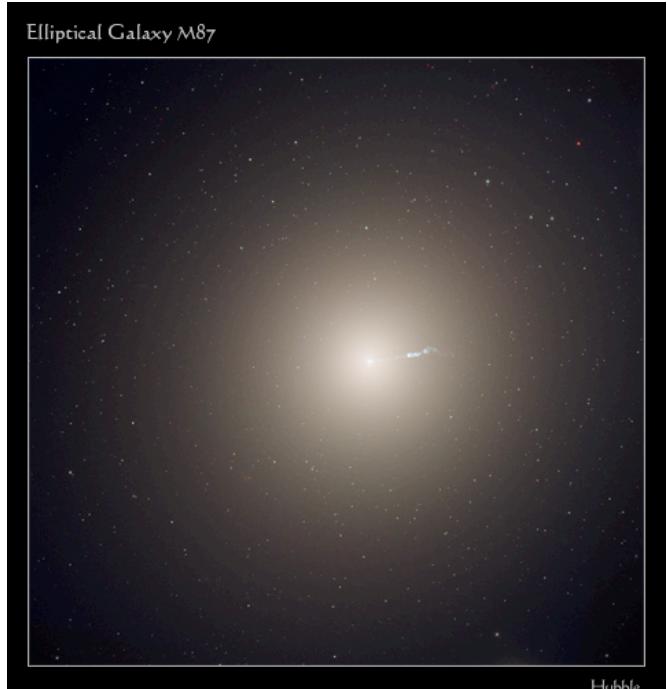
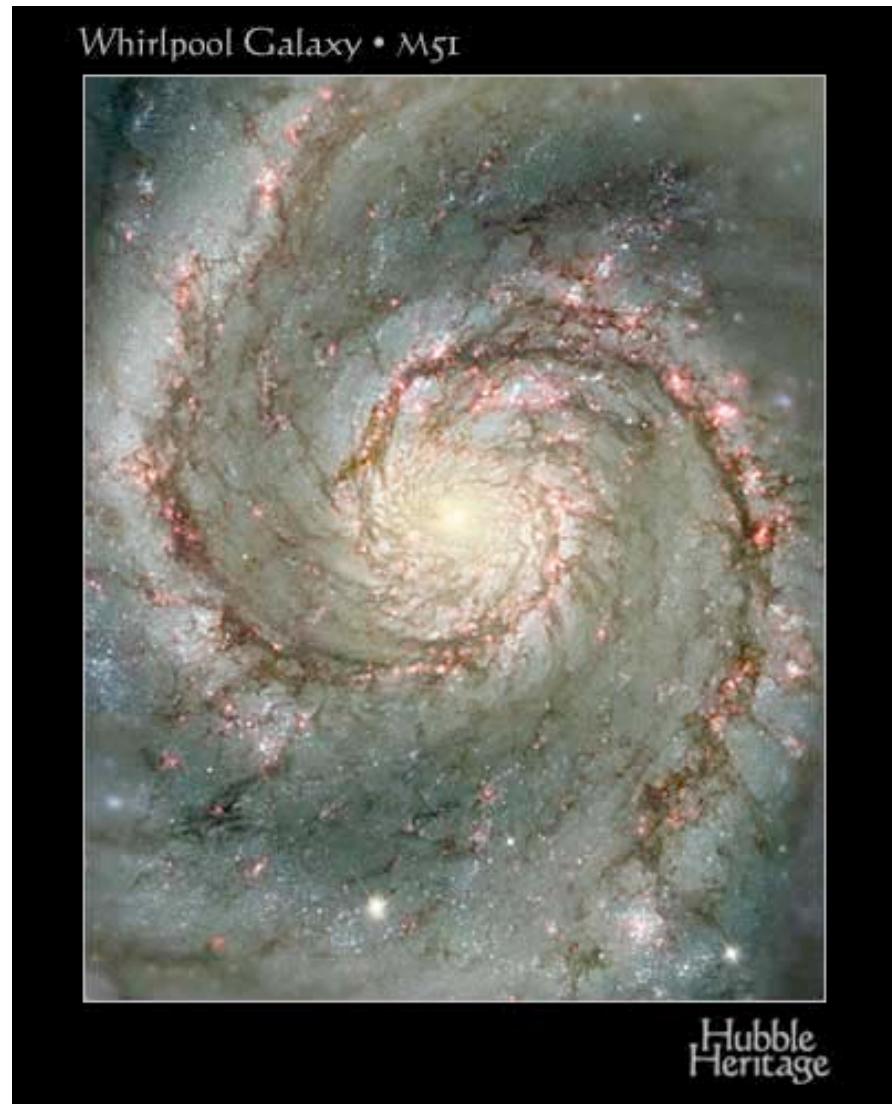


Planetary Nebula IC 418



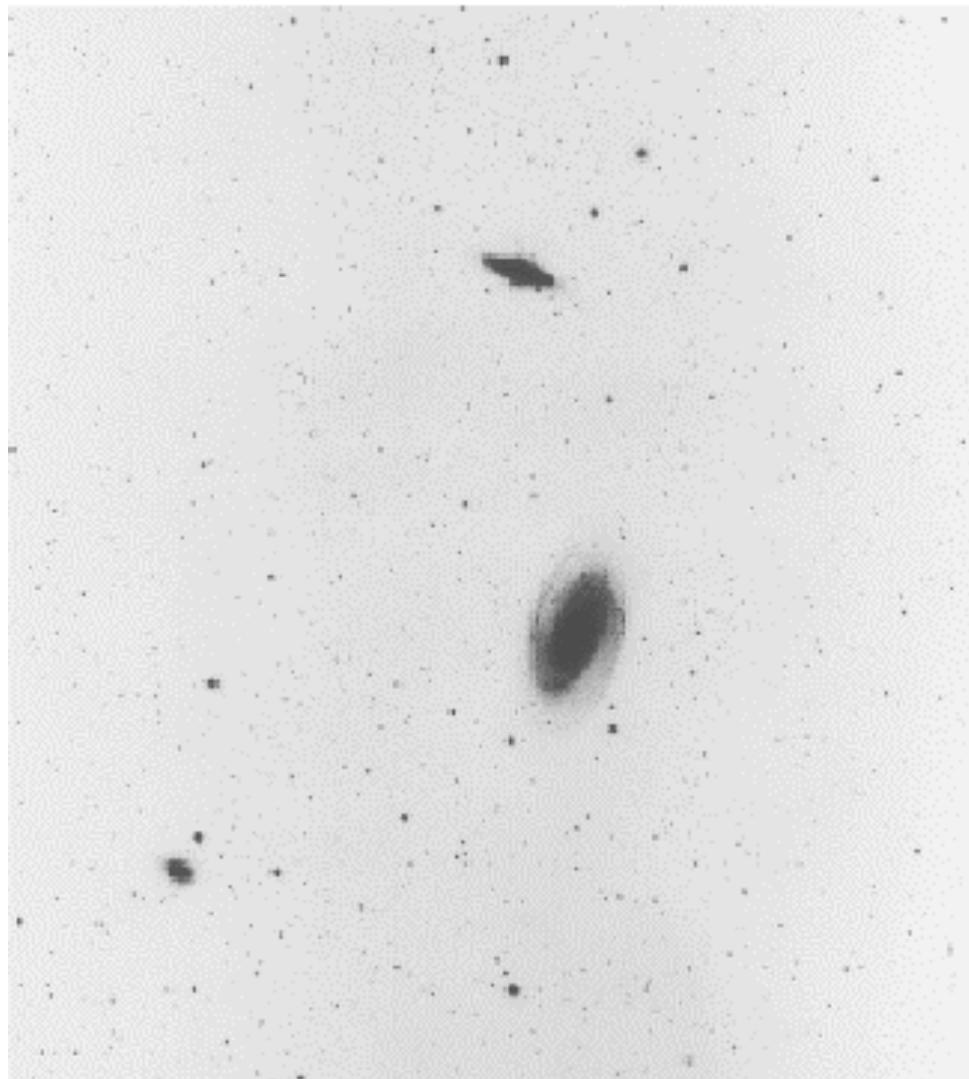
and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Space Telescope ACS • STScI-PRC04-27

Diferentes tipos de galaxias



NASA, ESA, A. Aloisi (STScI/ESA), and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration • *Hubble Space Telescope ACS* • STScI-PRC07-26

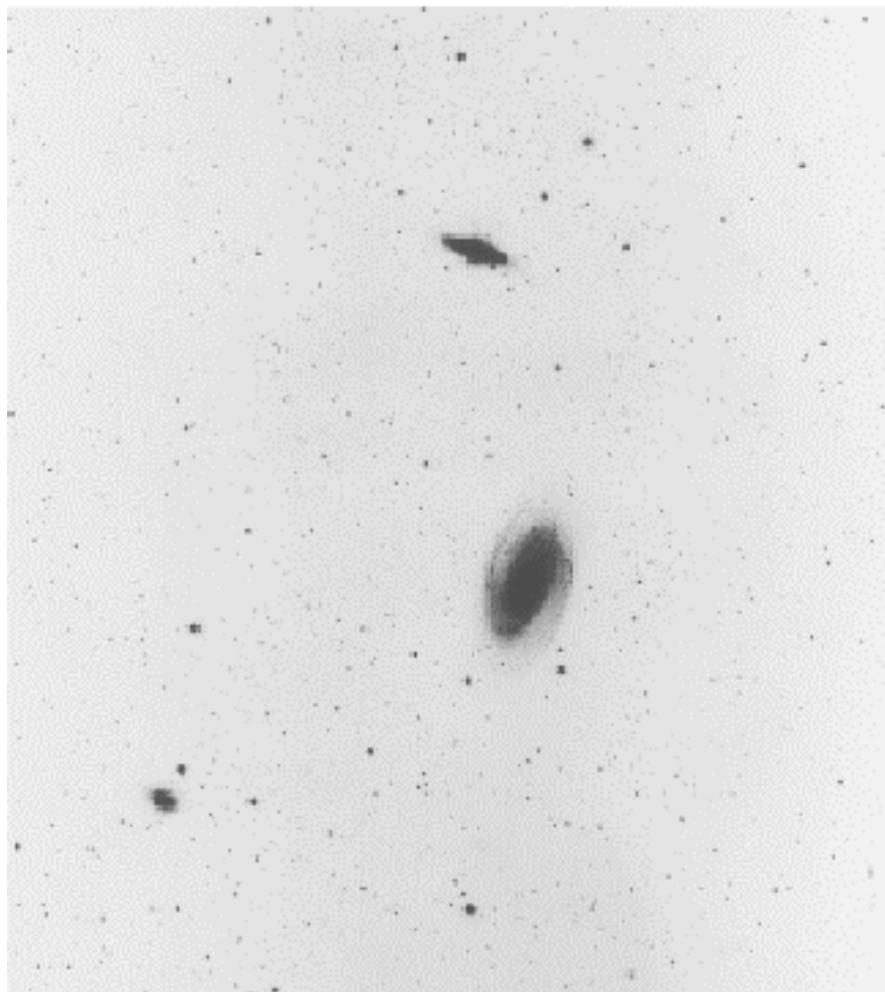
Grupo M81: La observación del gas atómico puede cambiar la imagen



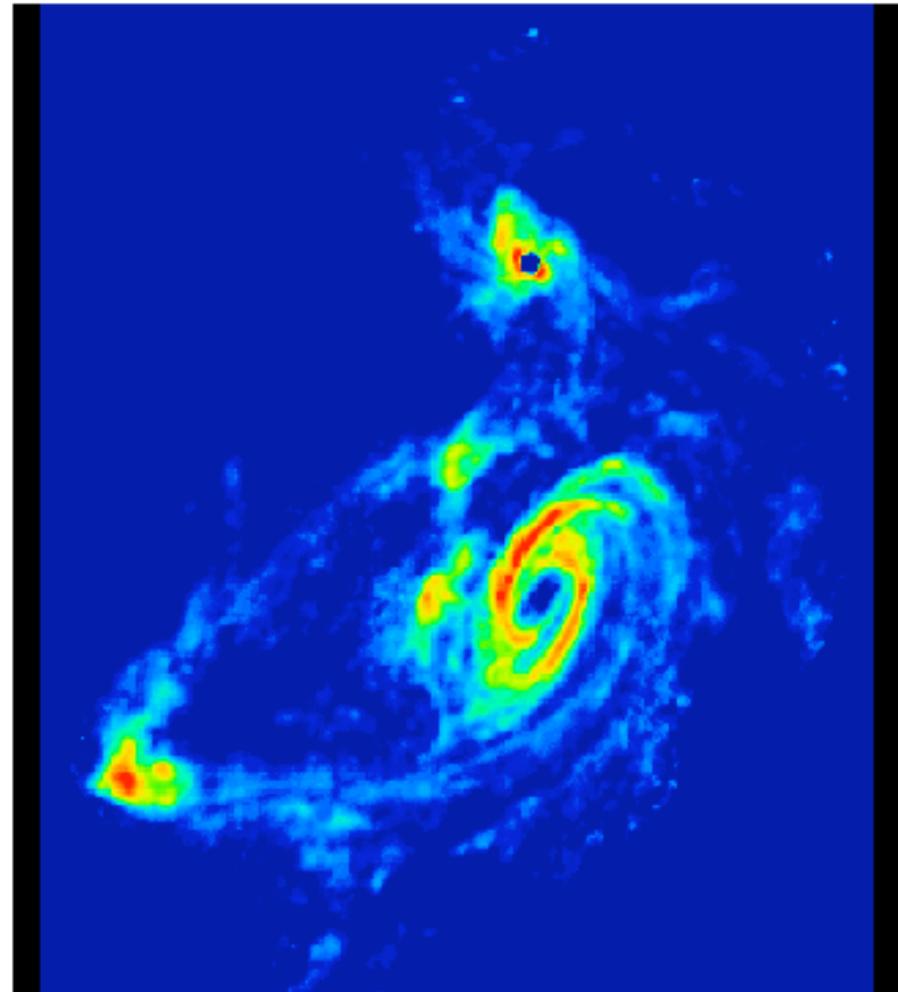
Galaxias en interacción gravitatoria

TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



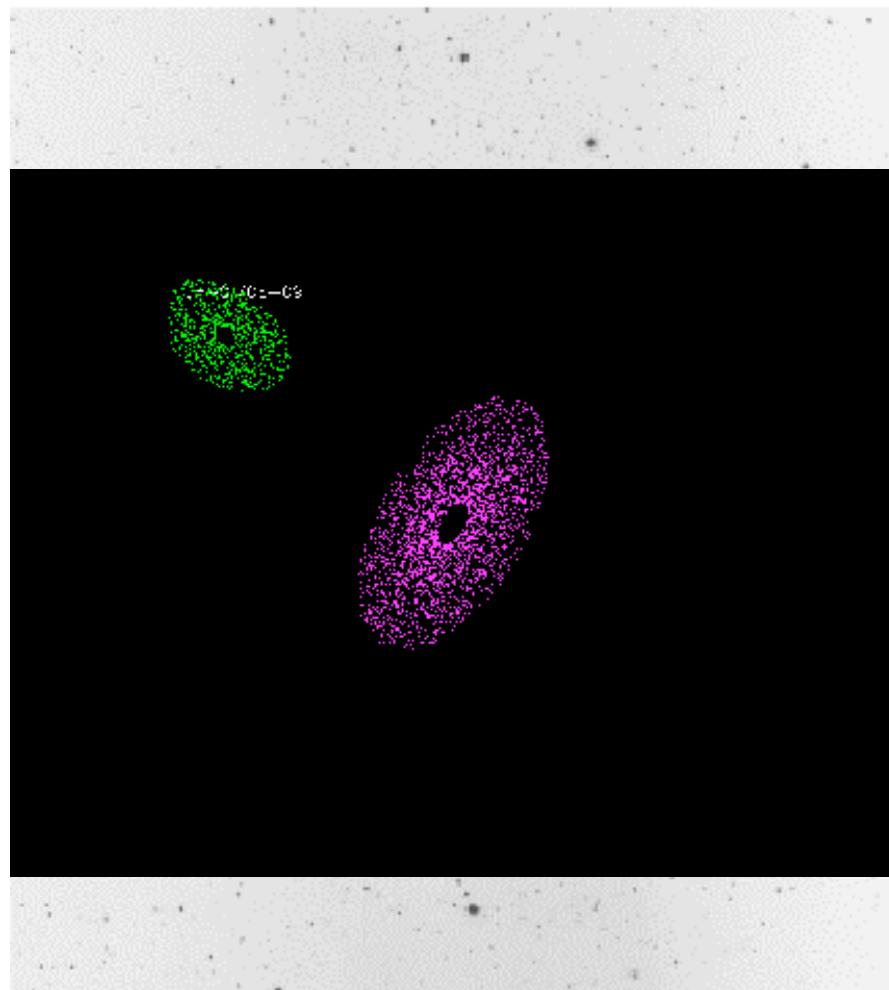
21cm HI Distribution



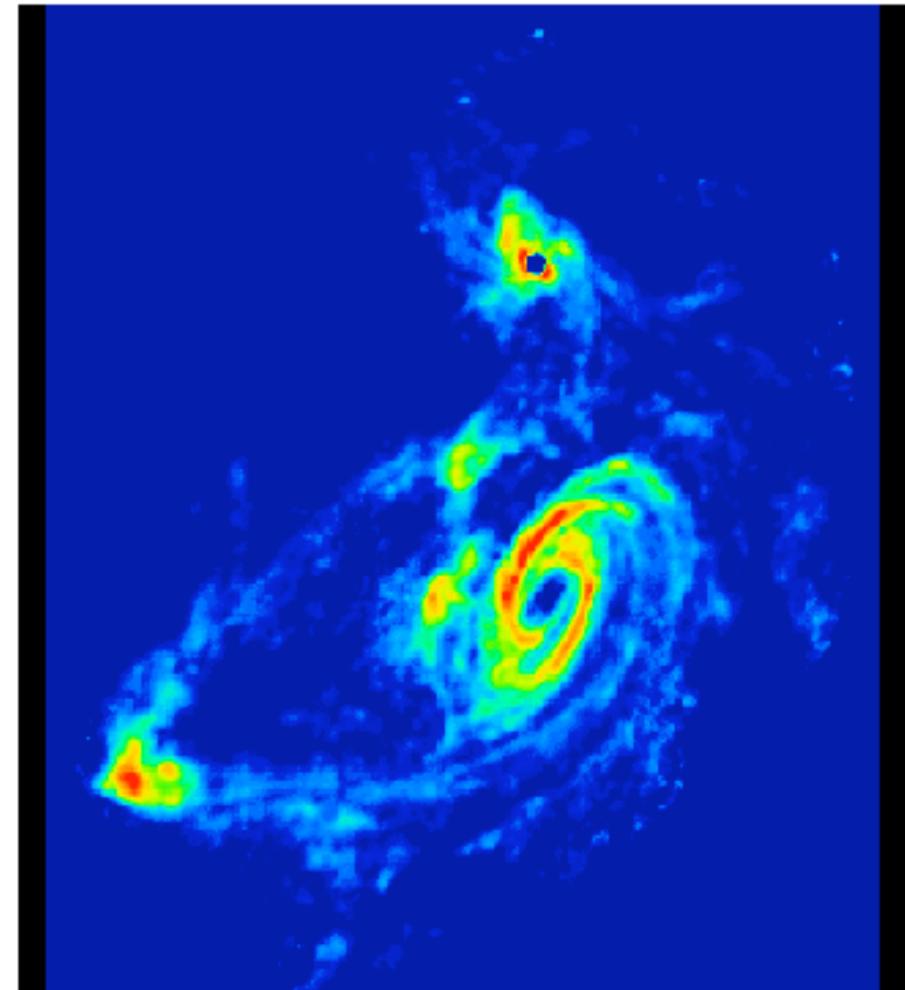
Galaxias en interacción gravitatoria

TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



21cm HI Distribution



Colisiones entre galaxias

Interacting Galaxies • Arp 87



Hubble
Heritage

Ring Galaxy AM 0644-741



Hubble
Heritage

Hickson Compact Group 87



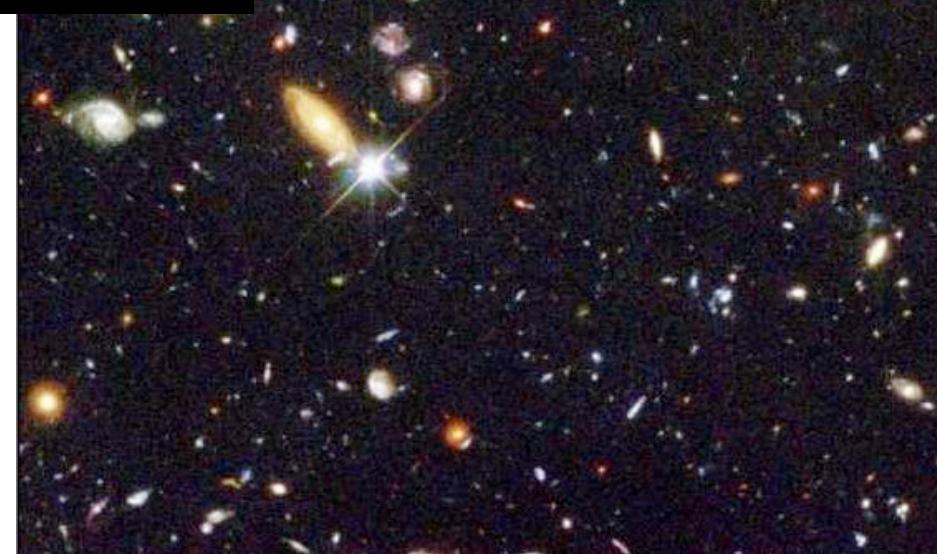
↑
Grupo
Compacto de
galaxias

Coma Cluster of Galaxies



Cúmulo de galaxias

“Hubble Deep Field”
Observaciones
profundas para
muestrear galaxias
lejanas



Las distancias astronómicas

Si pudiésemos viajar tan rápido como la luz (300 000 km/s)
llegaríamos.....

- ... a la **luna** en 1.3 segundos
- ... al **sol** en 8 minutos
- ... a la **estrella más próxima** en 2 años
- ... al **centro de la Vía Láctea** en 26.000 años
- ... a las **Nubes de Magallanes** en 200.000 años
- ... a la **galaxia vecina de Andrómeda** en 3 millones de años
- ... a la **galaxia más lejana** que vemos en el cielo en 13.000 millones de años

El tiempo astronómico

| | |
|-------------------------------|---------------------------|
| Edad del universo: | 13.000 millones de años |
| Vida del sol: | 9.000 millones de años |
| Edad del sol: | 5.000 millones de años |
| Vida de una estrella masiva: | 1 millón de años |
| | |
| Edad de la tierra: | 5.000 millones de años |
| Aparición de los mamíferos: | hace 200 millones de años |
| Extinción de los dinosaurios: | hace 65 millones de años |
| Historia humana: | unos 6.000 años |
| Vida humana: | (menos de) 100 años |

→ ! No vemos cambios en el cielo !

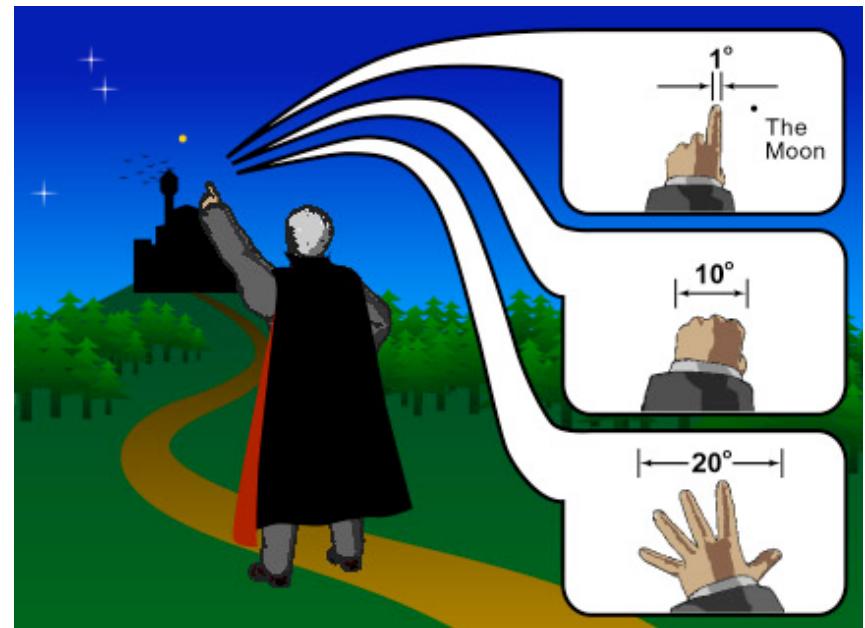
Ángulos en el cielo

- Las **distancias y tamaños aparentes** en el cielo se miden en grados, minutos de arco y segundos de arco
- El círculo completo tiene 360 grados
- 1 grado tiene 60 minutos de arco (arcmin)
- 1 arcmin tiene 60 segundos de arco (arcsec)



Algunos ejemplos

- *Tamaño angular de luna y sol:* aprox. medio grado
- Galaxia espiral más cercana (Andrómeda): 3 grados
- *Resolución de un telescopio óptico terrestre:* 1-2''
- *Resolución del telescopio espacial Hubble:* 0.1-0.3''
- *Resolución de observaciones interferométricas:* hasta milli-arcsec



Diferentes mediciones del ángulo

1. Grados:

- Circulo completo: 360 grados
- 1 grado = 60 minutos de grado
- 1 minuto de grado = 60 segundos de grado

2. Horas:

- circulo completo 24 horas
- 1 hora = 60 minutos
- 1 minuto = 60 segundos

3. Radian:

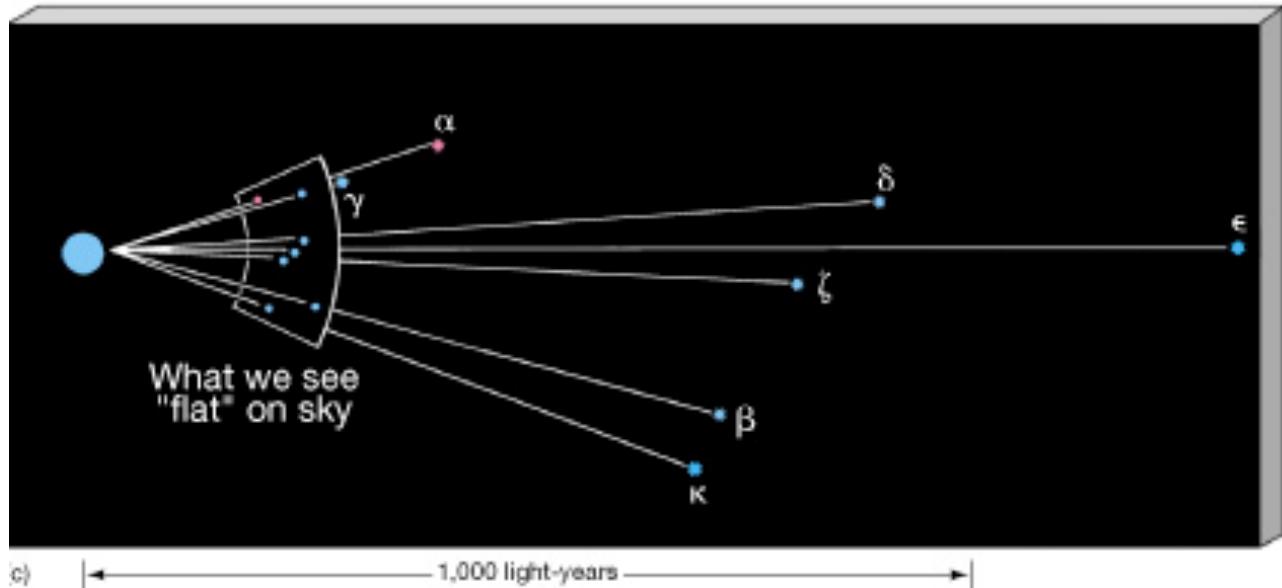
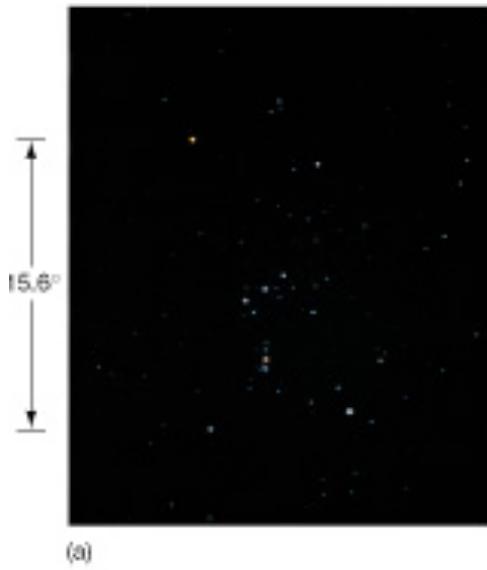
- Circulo completo: 2π

- **Atención:** No confundir minutos/segundos de grado con minutos/segundos de hora

Esfera celeste

Proyectamos todas las estrellas en esfera con radio muy grande y centrado en la Tierra.

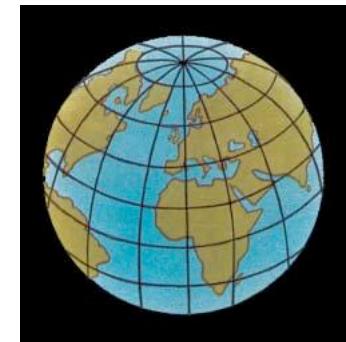
Vemos unos 5000 estrellas, agrupados en constelaciones



Coordenadas terrestres

La posición de un punto sobre la superficie terrestre → coordenadas esféricas:

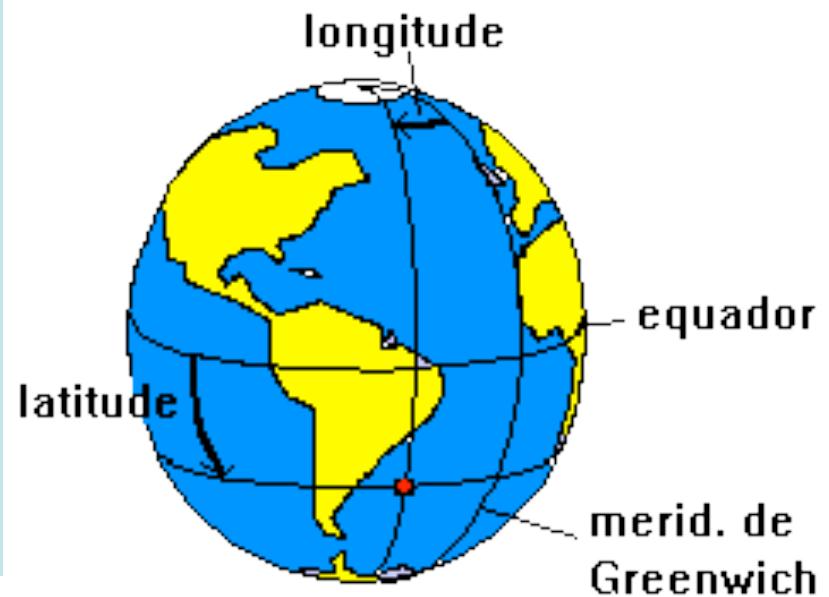
- Plano de referencia: **Plano ecuatorial** (*plano que contiene el centro y es perpendicular al eje de rotación*)
- **Ecuador:** *Intersección del plano ecuatorial con superficie terrestre*
- **Paralelos:** *Líneas paralelas al ecuador*
- **Meridianos:** *Semicírculos máximos que unen los polos.*



• **Longitud geográfica:** ángulo entre el meridiano que pasa por el punto y el meridiano cero (que pasa por Greenwich). Longitud positiva hacia el oeste de Greenwich

• **Latitud geográfica:** ángulo que define la plomada con el plano ecuatorial. Positiva en hemisferio norte, negativa en el sur. Tierra achatada -> línea de plomada no pasa por centro!

• **Latitud geocéntrica:** la definida por el ángulo que forma cierto punto con el plano ecuatorial desde el centro de la Tierra (coordenada esférica ϕ).

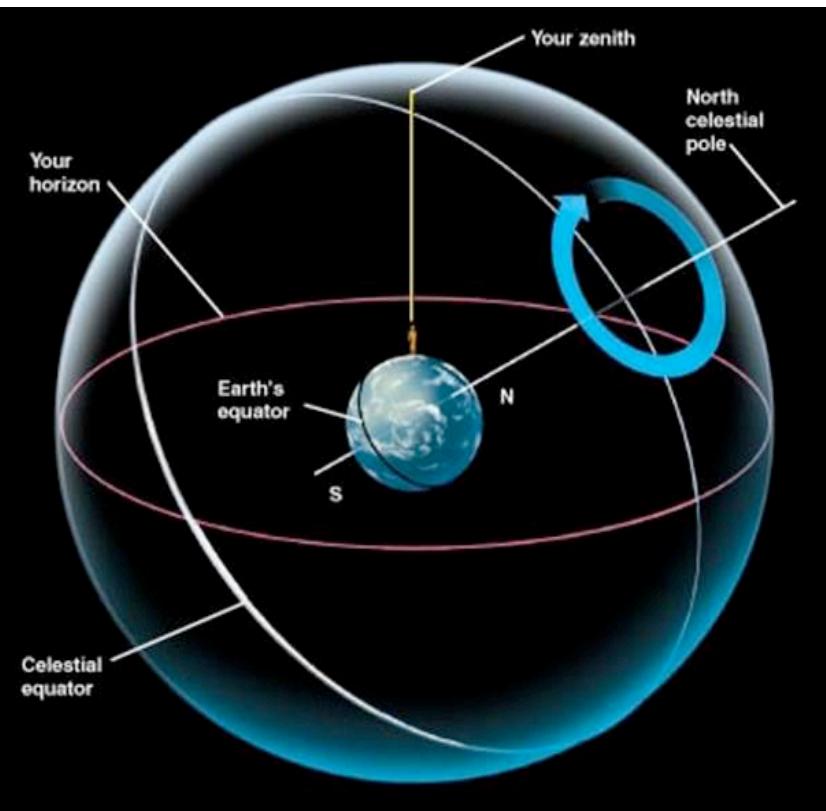


- **La esfera celeste:** Esfera imaginaria de radio arbitrario (pero grande^{(*)!}) concéntrica con la Tierra.

- Llamamos polos de la esfera celeste a la intersección de la esfera celeste con los polos de la Tierra
- Llamamos ecuador celeste a la intersección del plano ecuatorial terrestre con la esfera celeste.

(*) Radio grande porque suponemos que las estrellas están todas situadas sobre la superficie de dicha esfera imaginaria

→ ventaja: sólo necesitamos dos coordenadas para determinar la posición de un objeto.



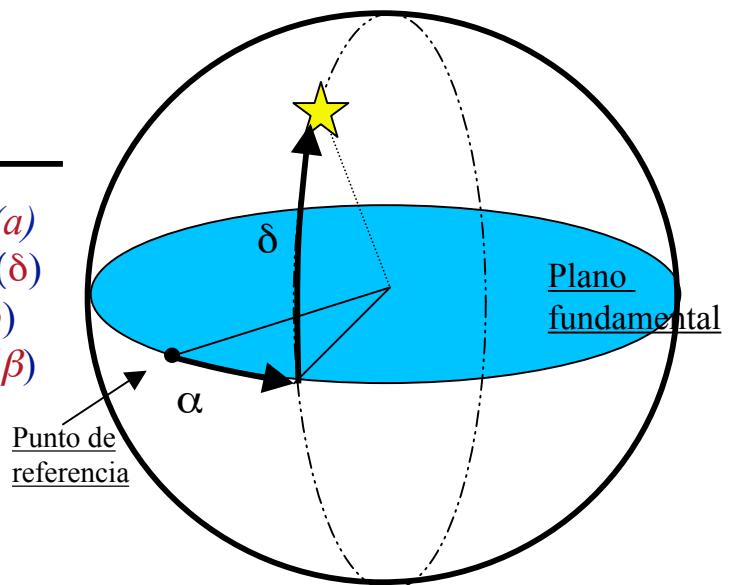
• Distintos sistemas de coordenadas en Astronomía:

- Todos ellos tienen un plano de fundamental, que contiene al centro y divide la esfera celeste en dos hemisferios.
- Coordenadas de un astro vienen dada por:
 - Distancia angular entre dicho astro y plano fundamental (δ)
 - Ángulo (α) entre:
 - Punto de intersección del círculo máximo que contiene al astro y que es perpendicular al plano fundamental, con dicho plano fundamental.
 - Y un punto contenido en plano fundamental definido de manera arbitraria.

| Coordenadas | Plano fundamental |
|---------------------|--------------------------|
| <u>Horizontales</u> | horizonte del observador |
| <u>Ecuatoriales</u> | plano Ecuatorial |
| <u>Galácticas</u> | plano de Vía Láctea |
| <u>Eclípticas</u> | plano de la eclíptica |

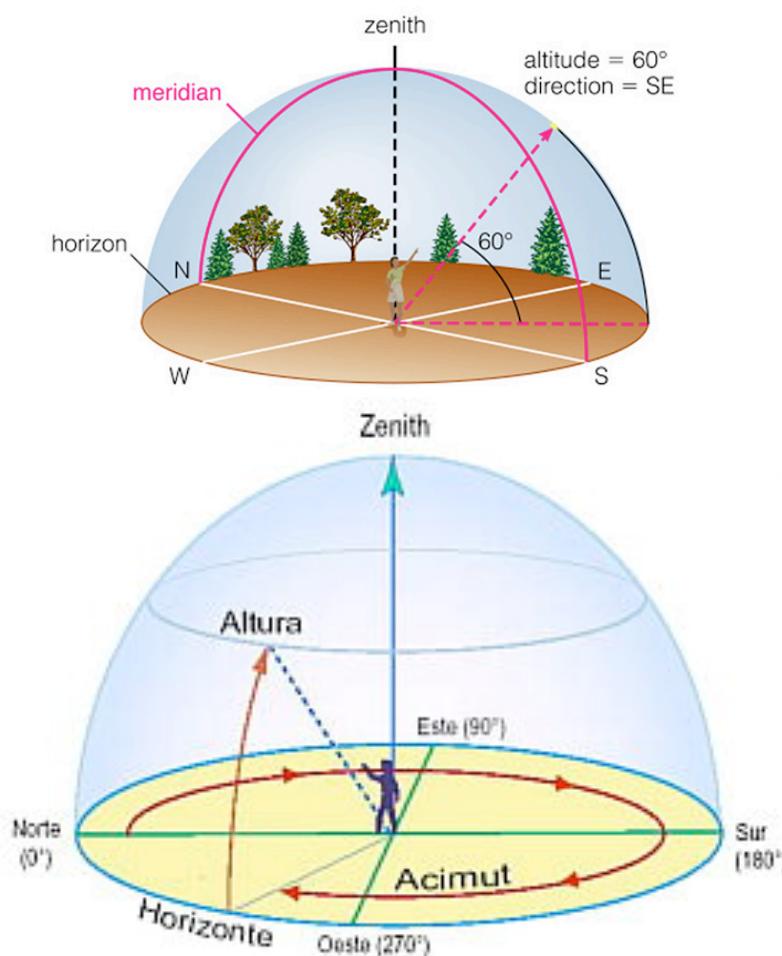
Coordenadas

acimut A , elevación (a)
 RA (α), declinación (δ)
 longitud (l), latitud (b)
 longitud (λ), latitud (β)



. Coordenadas horizontales:

Plano de referencia Plano tangente a la superficie de la Tierra que pasa por el observador → **Horizonte**



- **a, altitud o elevación**, distancia angular del horizonte $[-90^\circ, +90^\circ]$
 - Muy usada la distancia cenital, $z = 90^\circ - a$
- **A, acimut**, ángulo de la vertical del objeto desde alguna posición de referencia $[0, 360^\circ]$
 - (¡OJO! Según convenio: medido en sentido horario desde el sur o desde el N)
- Debido a la rotación terrestre, las estrellas salen por el E, se ponen por el W y **culminan** en el meridiano (círculo máximo que pasa por los polos celestes y céntit del observador)
- Direcciones N y S determinadas por intersección de meridiano con horizonte.
- cénit: Intersección de la vertical en la posición del observador con la esfera celeste.
- nadir: punto diametralmente opuesto al céntit

Inconveniente:

Las coordenadas horizontales cambian con el tiempo y dependen de la posición del observador

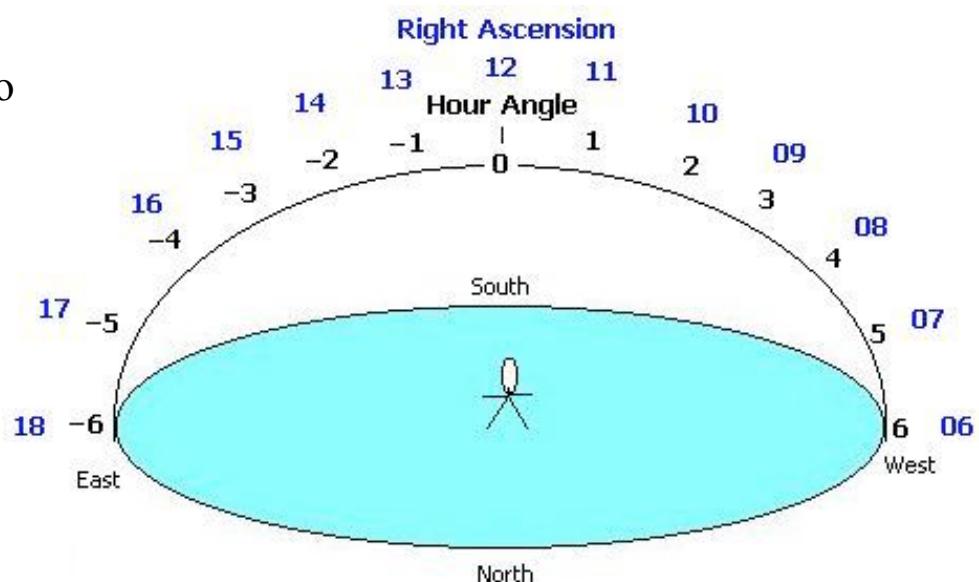
Ángulo horario

- **Ángulo horario (h)** de una estrella (u objeto):

- Ángulo entre el meridiano y la posición de la estrella (en sentido horario)

- No es constante, va cambiando al mismo ritmo en que rota la Tierra.

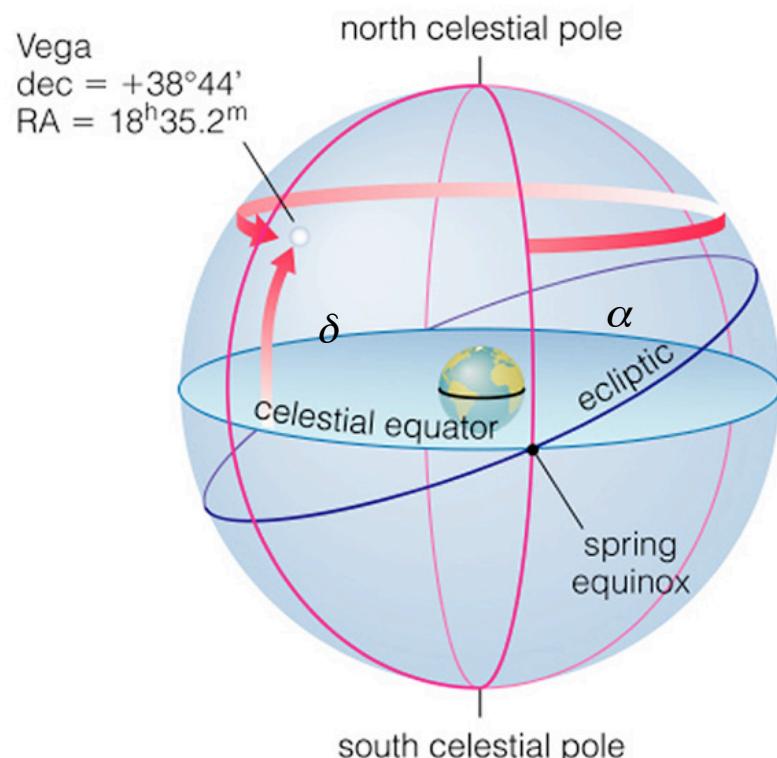
- **El ángulo horario se mide en tiempo**
(recordar: 360° corresponden a 24h)



Cuanto menor es el ángulo horario de un objeto, más cerca está de su culminación
 $h > 0$, ya ha culminado,
 $h < 0$, no ha culminado aún

. Coordenadas ecuatoriales:

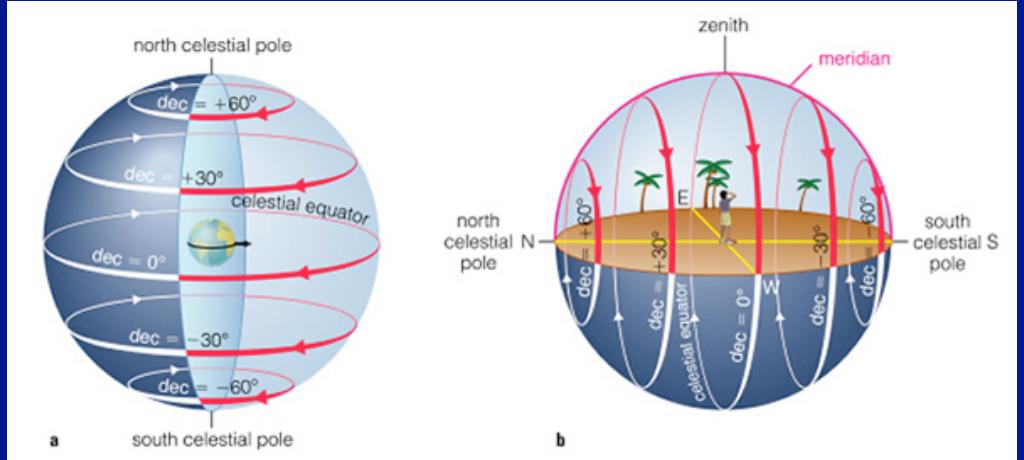
.Plano de referencia Plano Ecuatorial



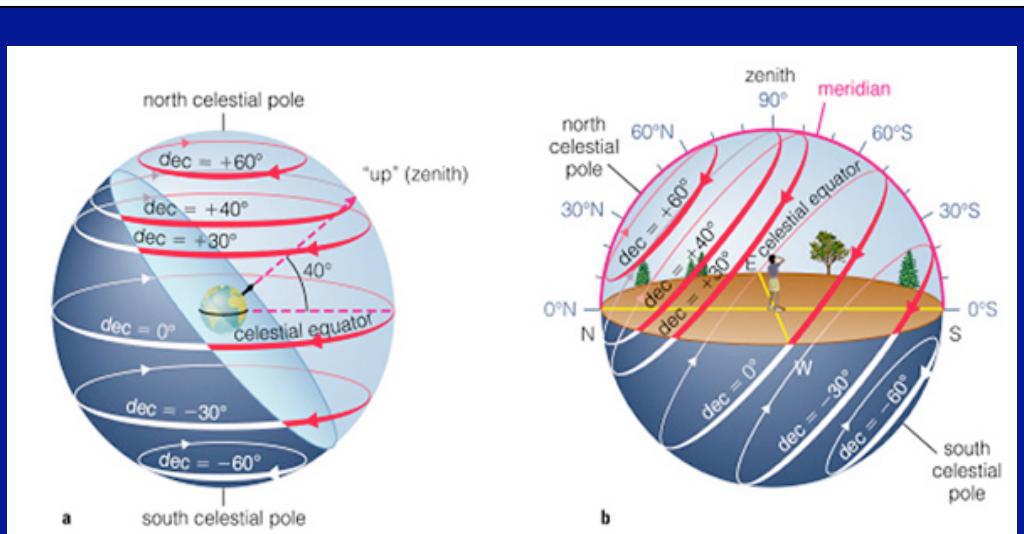
- δ , declinación (Dec), distancia angular del plano ecuatorial [-90°,+90°]
- α , ascensión recta (RA) , ángulo entre equinoccio vernal (o punto de Aries) y la intersección de la vertical del objeto con el plano ecuatorial [0h,24h]
(convenio: medido en sentido anti-horario desde punto vernal. RA aumenta hacia el E)
- α y δ son constantes; no dependen del tiempo ni de la posición del observador
→ catálogos

Punto de Aries o equinoccio vernal:
punto de intersección entre el plano del ecuador celeste y la eclíptica.

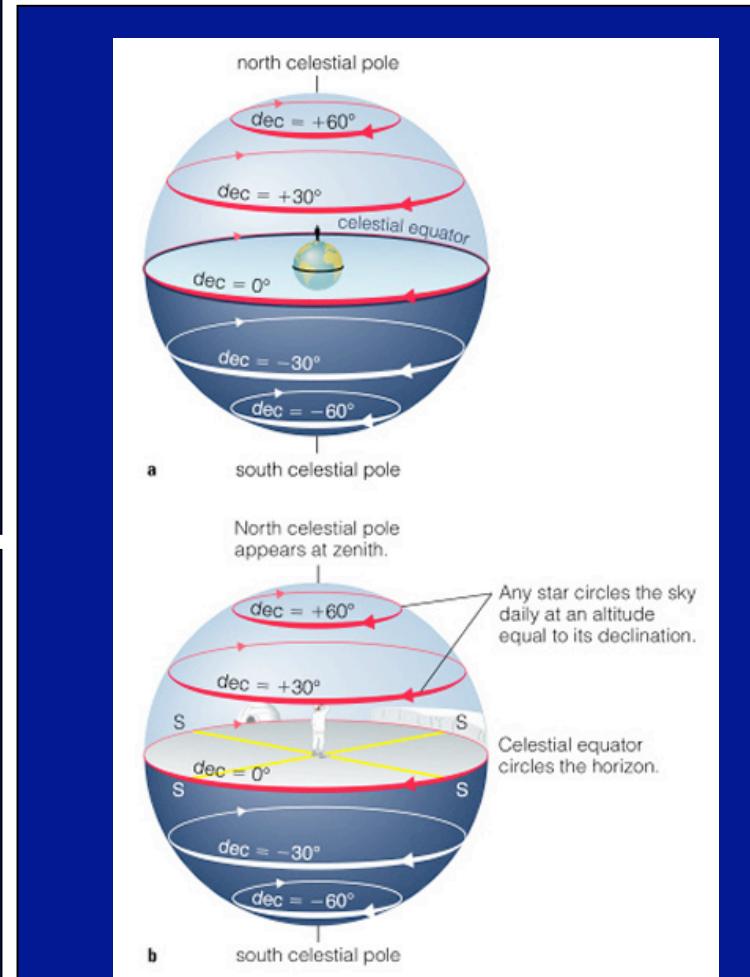
Astronomía de posición



Observador en Ecuador



Observador a latitud 40°



Observador en Polo Norte

Estrellas circumpolares

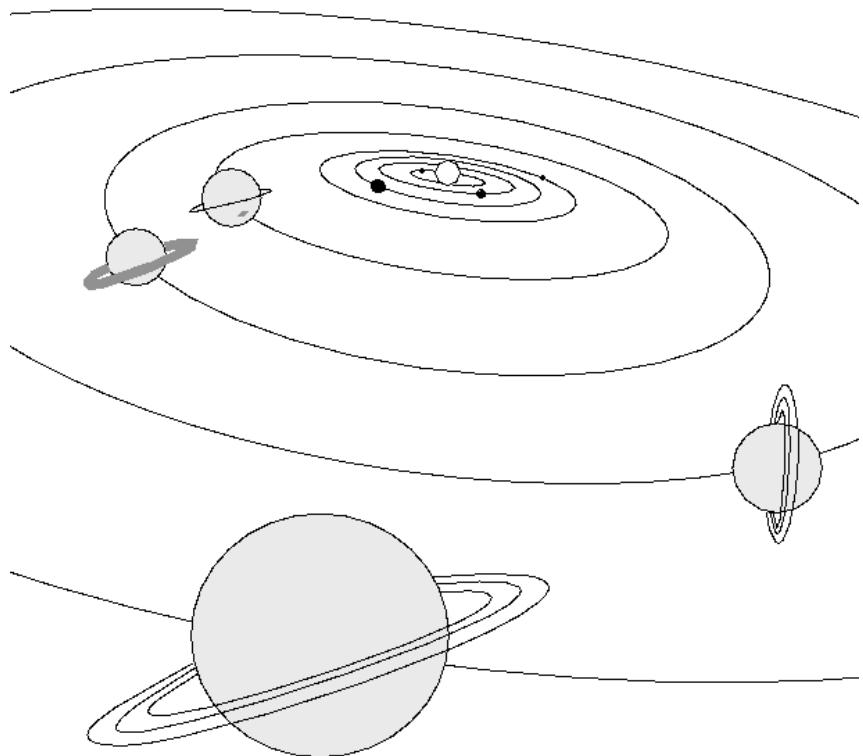


- Aquellas estrellas, que nunca salen o se ponen para un observador determinado.
- Depende de la latitud en la tierra
- Condición necesaria:

$$\delta > 90 - \varphi$$

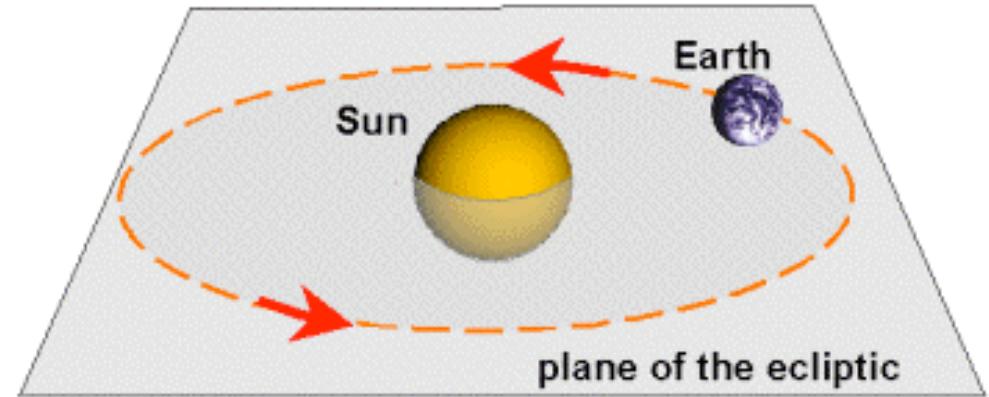
(φ es latitud terrestre, δ es declinación de la estrella)

The Plane of the Ecliptic



* Not to scale *

FIG. 1

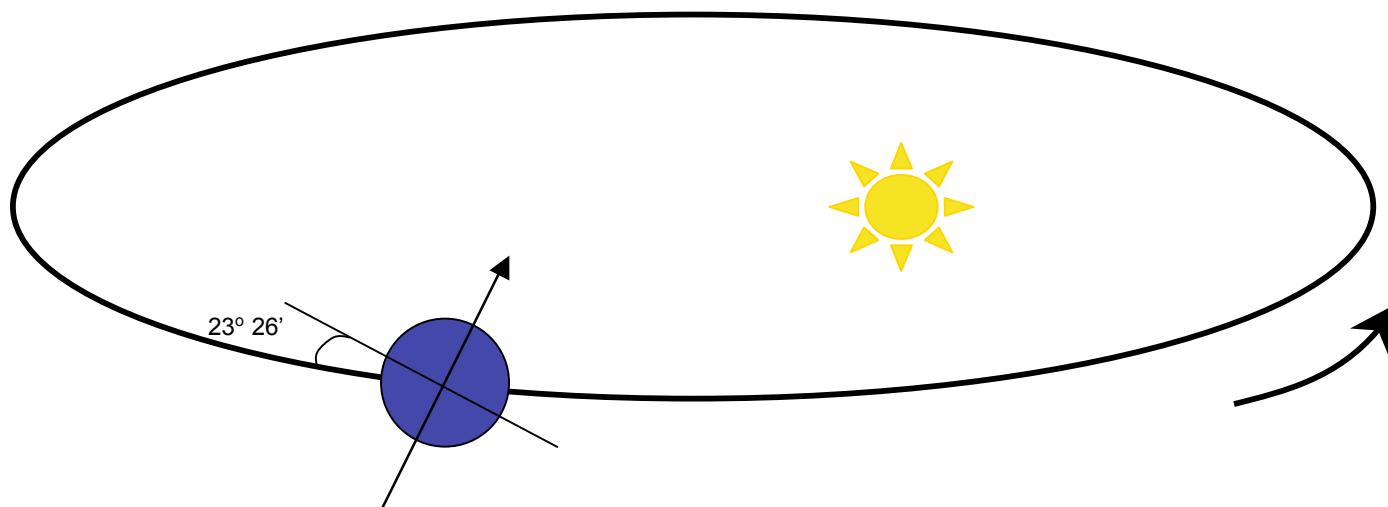


Eclíptica: Plano que contiene el sol y los planetas

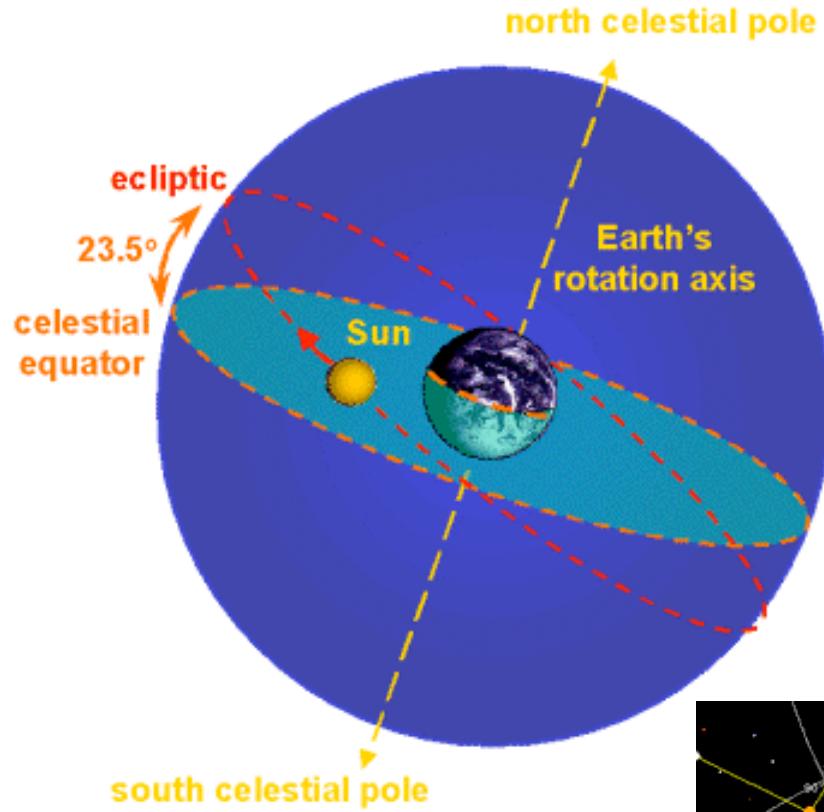
La Eclíptica y la órbita de la Tierra

- La órbita de la Tierra alrededor del Sol es una **elipse** (poco excéntrica)
- El Sol está en uno de los focos → movimiento no uniforme a lo largo del año
- Traslación (365.25 días), rotación (aprox. 24h)
- El plano Ecuatorial está inclinado con respecto al plano de la eclíptica

Oblicuidad de la eclíptica = $23^{\circ} 26'$



La eclíptica desde la Tierra...

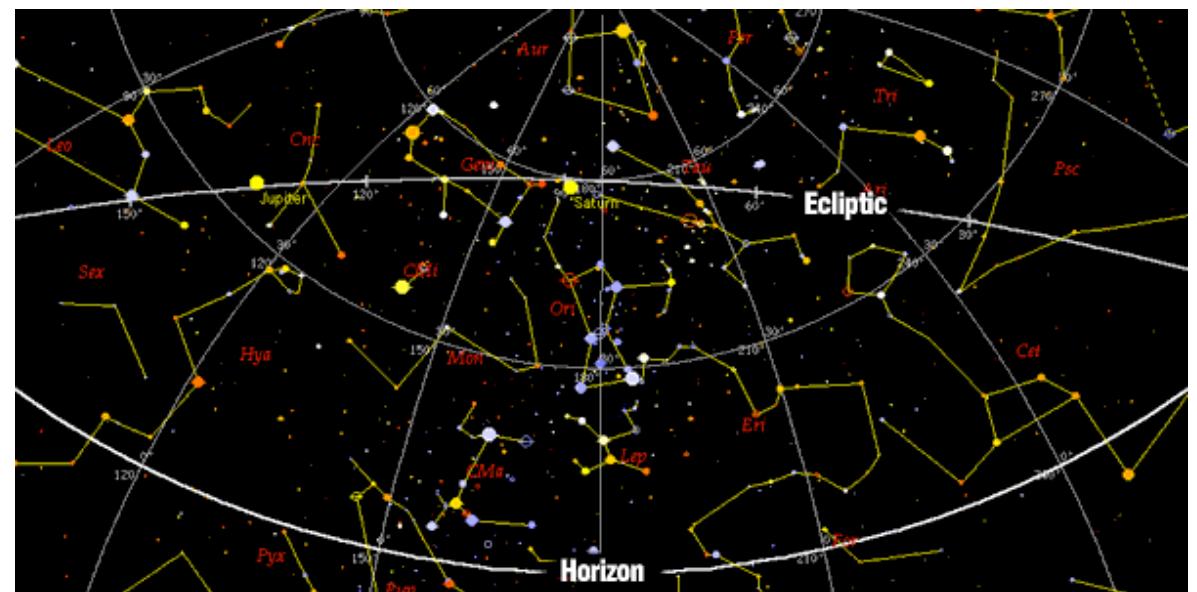


La eclíptica en el cielo:

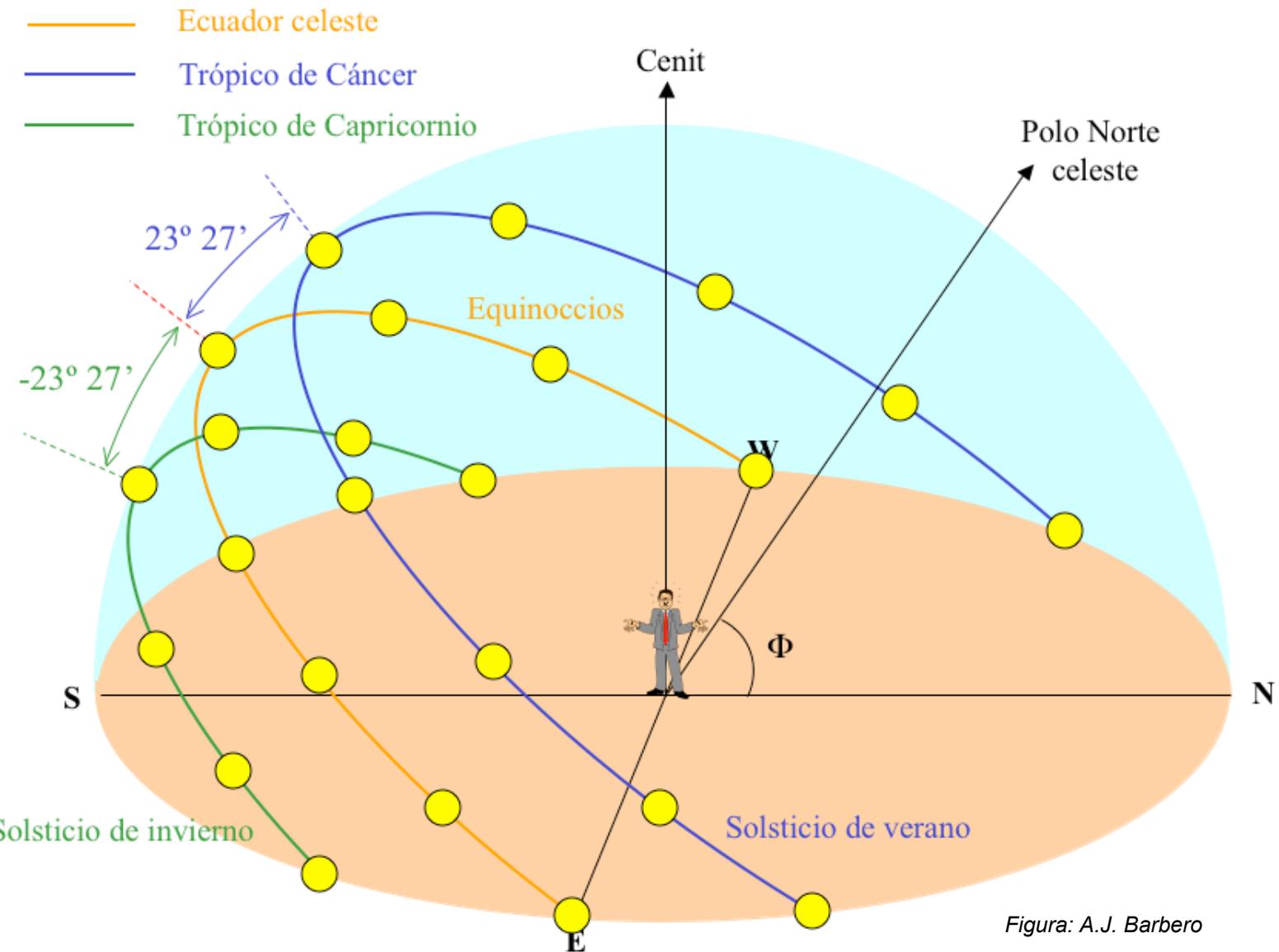
Posición donde se encuentra el sol (se puede determinar solamente al atardecer/amanecer) y los planetas

Astronomía de posición

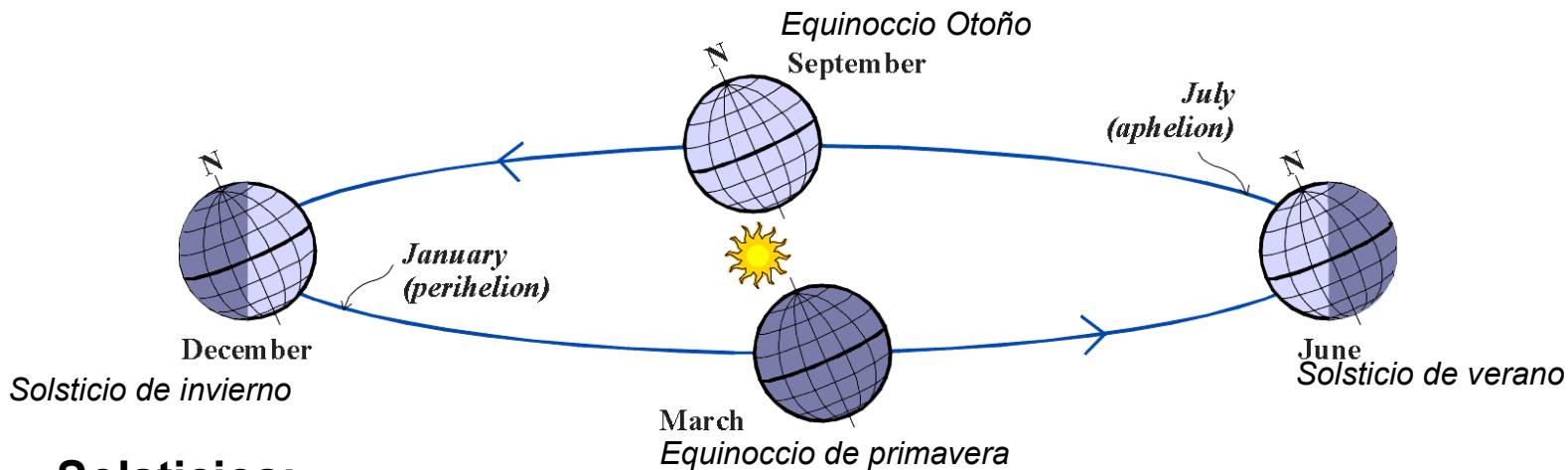
Recordemos:
Inclinación (u oblicuidad) de la eclíptica:
Ángulo entre plano ecuatorial y el plano de la eclíptica: $23^\circ 26'$



Movimiento aparente del Sol en latitudes intermedias



Implicaciones de la inclinación de la eclíptica: equinoccios y solsticios

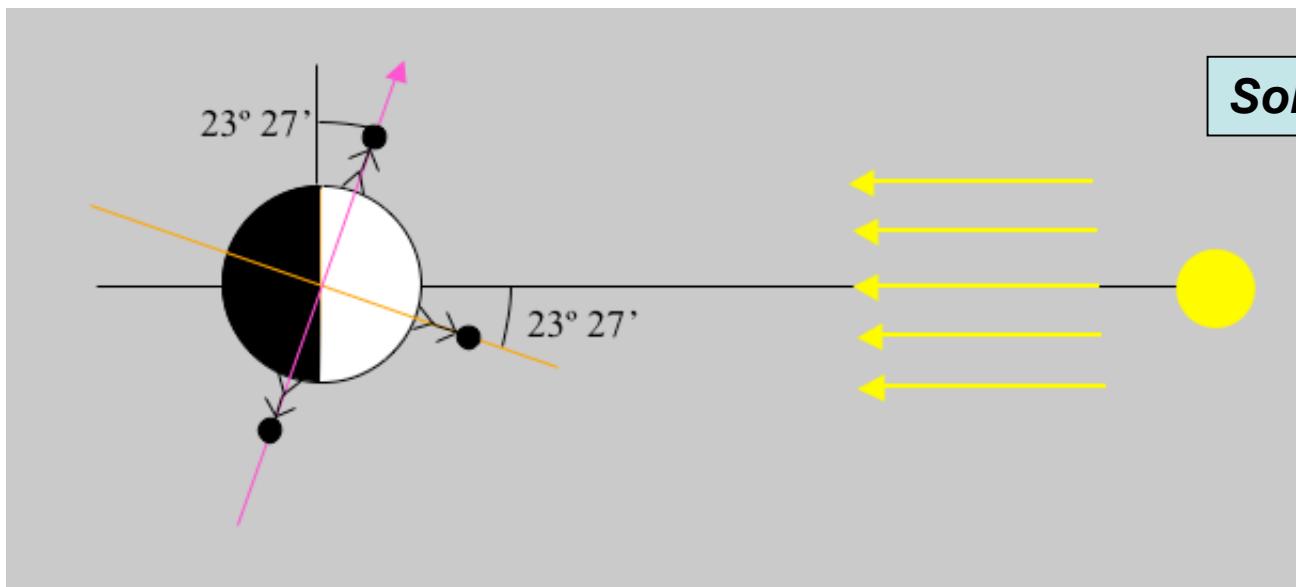


•Solsticios:

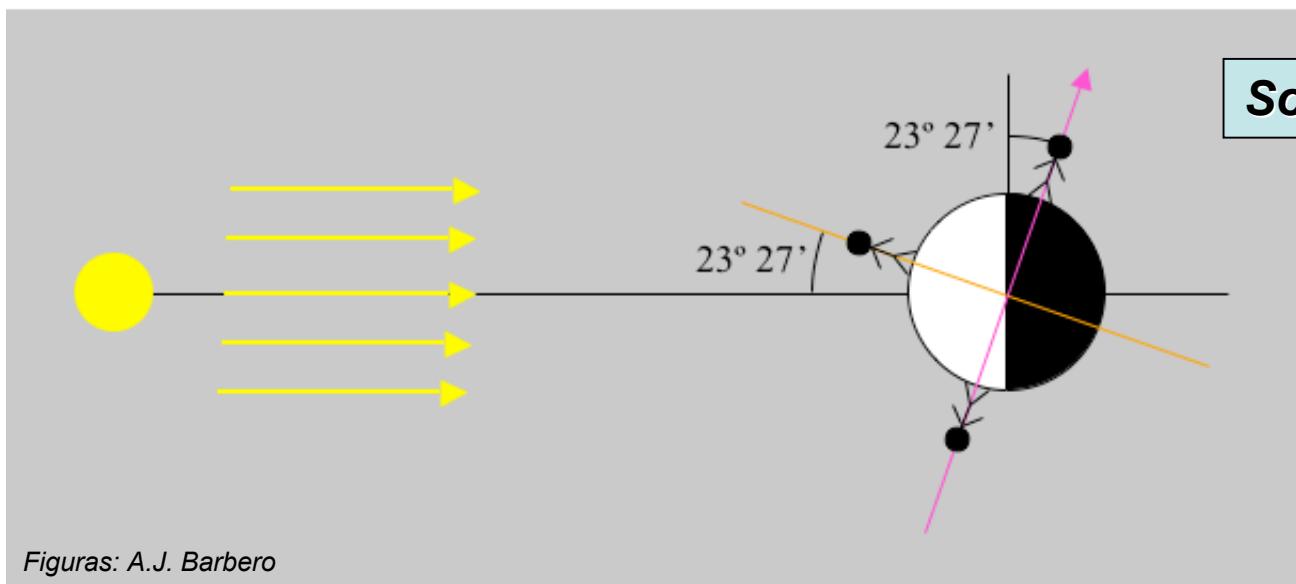
- Ocurren dos veces al año
- Cuando el ángulo entre el eje terrestre y la línea Sol-Tierra es máximo o mínimo

•Equinoccios:

- Ocurren dos veces al año
- Eje Terrestre es perpendicular a la línea Tierra-Sol
- Día y noche tienen igual duración en todos los lugares de la Tierra (salvo los polos)



Solsticio de verano

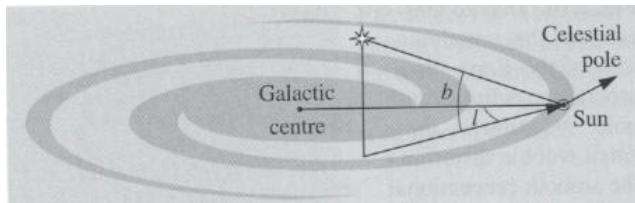


Solsticio de invierno

Figuras: A.J. Barbero

• Sistema Galáctico:

Plano de referencia Plano de la Vía Láctea,
(pero centro en el Sol!)



(de Fundamental astronomy, Karttunen et al.)

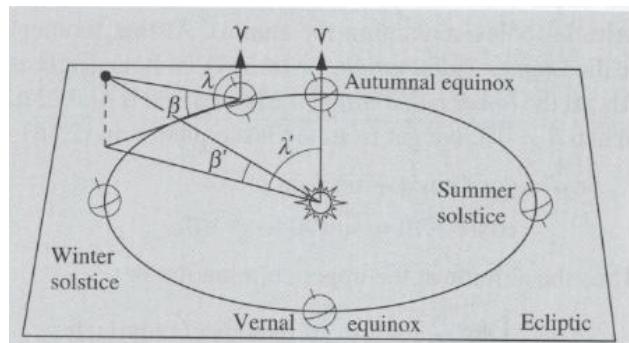
- b , latitud galáctica, distancia angular del plano de la Galaxia $[-90^\circ, +90^\circ]$

- l , longitud galáctica, medida en sentido antihorario desde la dirección del centro de la Vía Láctea, $[0, 360^\circ]$

- Útil para describir posición de objetos dentro de la Vía Láctea, o para saber como se posiciona otra galaxia con respecto al plano de la Vía Láctea

• Sistema Eclíptico:

Plano de referencia Plano orbital de la Tierra (plano de la Eclíptica)



(de Fundamental astronomy, Karttunen et al.)

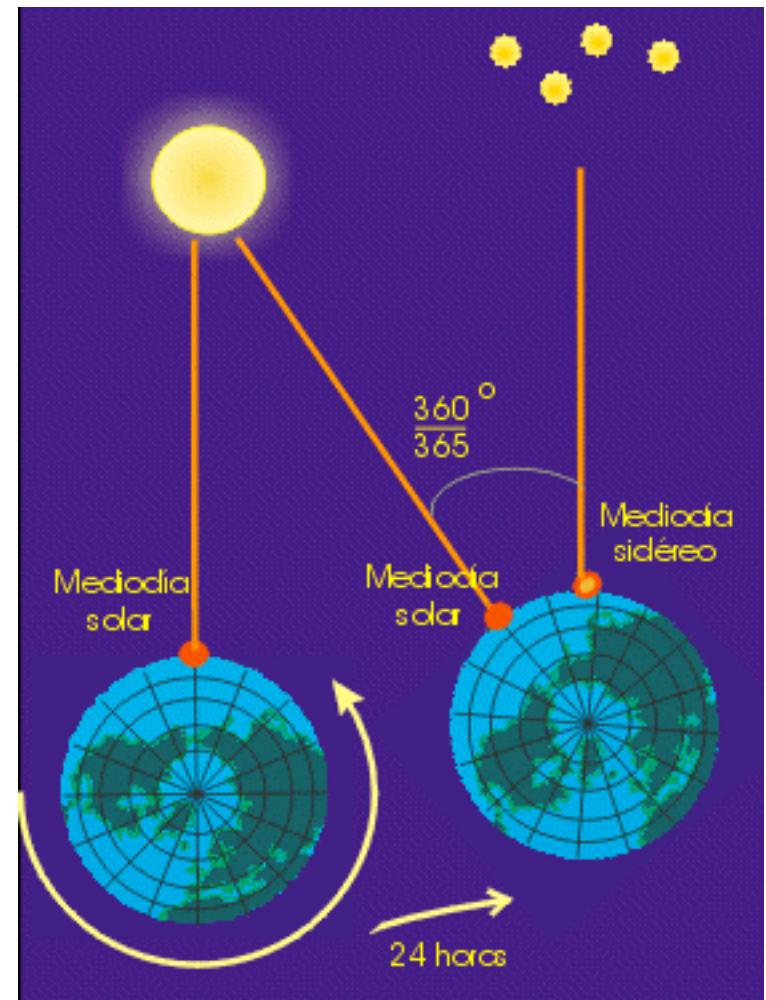
- β , latitud eclíptica, distancia angular del plano de la eclíptica $[-90^\circ, +90^\circ]$

- λ , longitud eclíptica, medida en sentido antihorario desde el equinoccio vernal $[0, 360^\circ]$

- Útil para dar posiciones de objetos del sistema solar

Día sidéreo y día solar

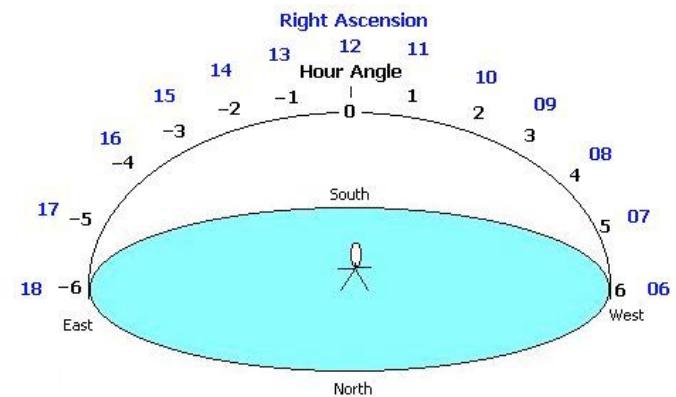
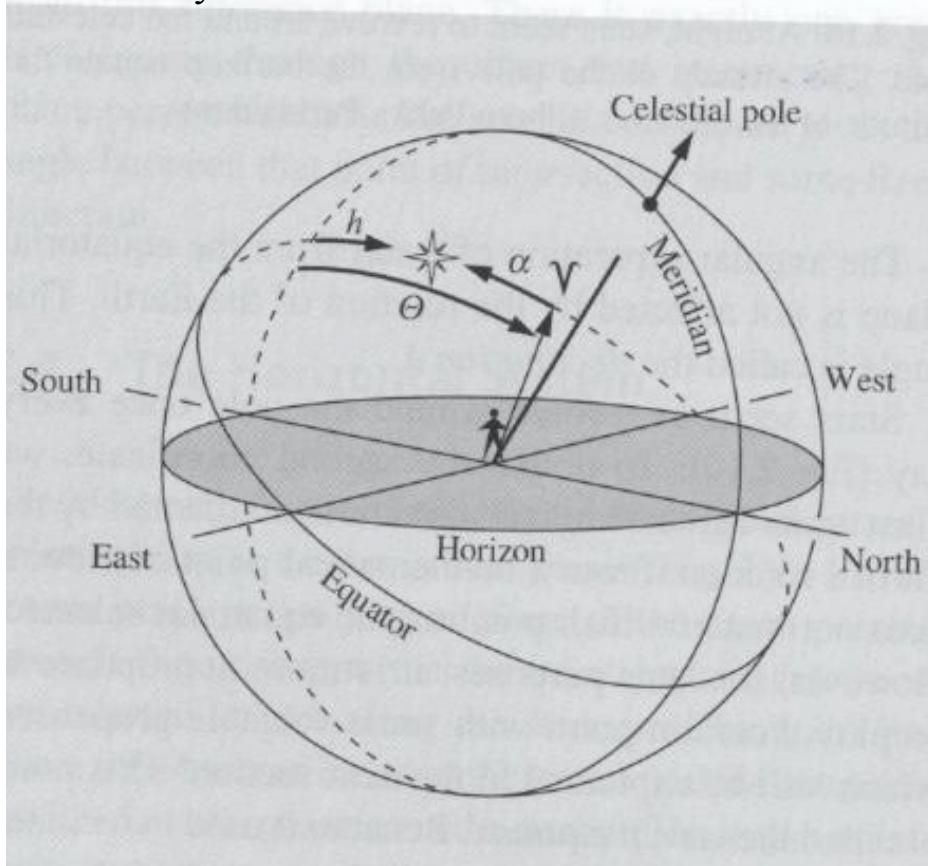
- Día solar y tiempo solar:
 - Cuando la tierra tiene otra vez la misma orientación hacia el sol.
 - El sol no se mueve uniformemente durante el año → Se define día solar medio para tener un día de igual duración.
 - Duración de un día solar medio: 24 horas
 - Tiempo solar medio: Ángulo horario del sol medio más 12 horas
- Tiempo universal: Tiempo solar medio de Greenwich (referencia Universal)
- Día sidereo:
 - Cuando la tierra tiene otra vez la misma orientación hacia las estrellas
 - Duración de un día sidereo: 23h56m4s
- Un año tiene un día sidereo más que días solares (para el movimiento progrado de la tierra).



Tiempo sidéreo

Recordamos: Ángulo horario (h) es el ángulo entre el meridiano y la posición de la estrella (en sentido horario)

El tiempo sidéreo se mide desde la referencia local de la ascension recta: intersección entre el meridiano y el ecuador celeste

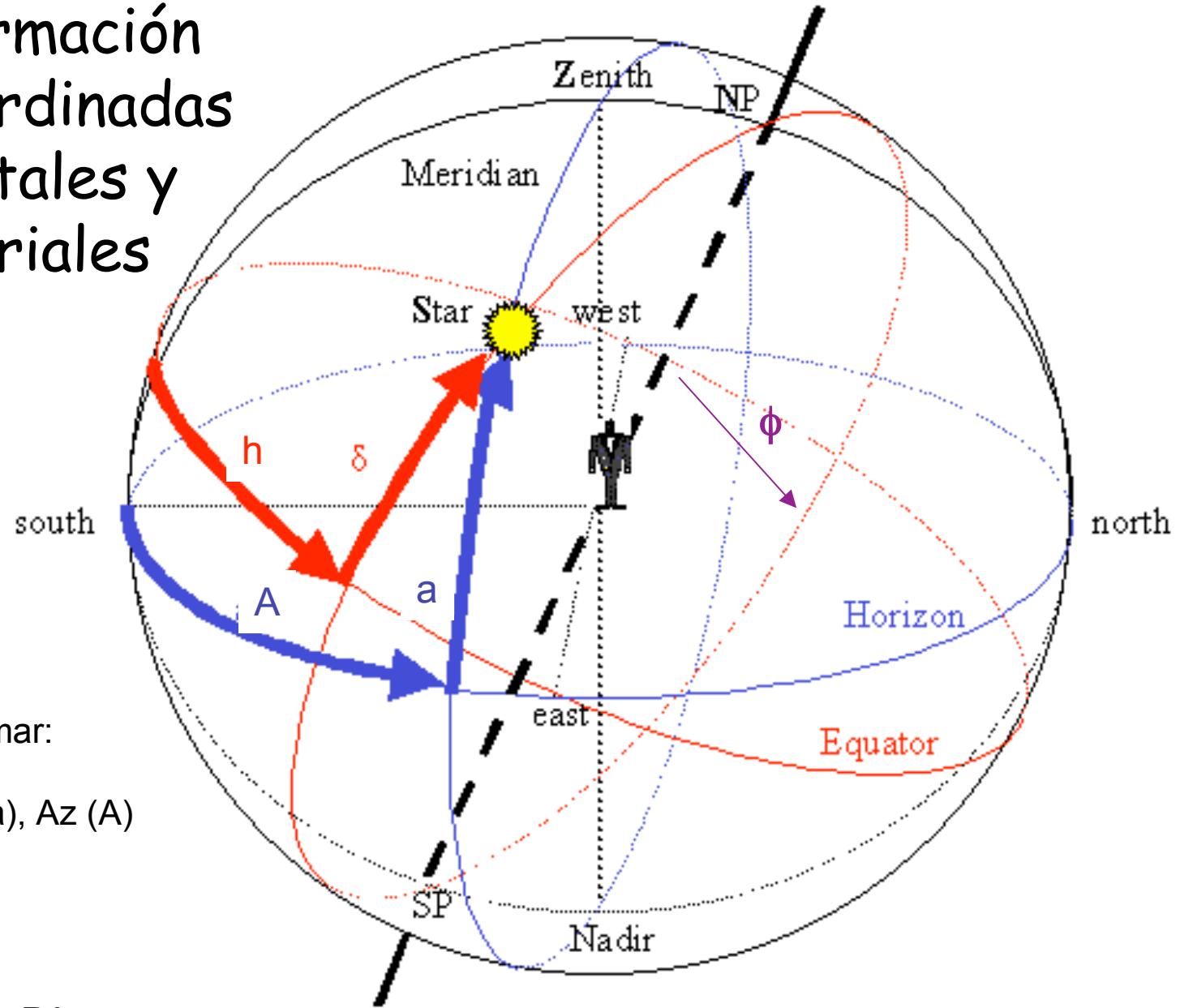


El ángulo horario del equinoccio vernal es el tiempo sidéreo (Θ)

$$\Theta = h + \alpha$$

→ Si conocemos el RA de una fuente y el tiempo sidéreo, podemos calcular fácilmente el ángulo horario de la fuente

Transformación entre coordinadas horizontales y ecuatoriales



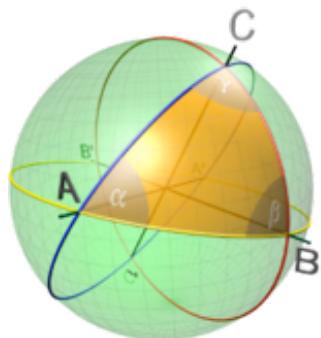
Queremos transformar:

RA, dec (δ) \rightarrow El (a), Az (A)

Necesitamos saber

1. Latitud (ϕ),
2. tsidéreo (junto con RA \rightarrow ángulo horario (h))

Trigonometría esférica



- Triangulo esférico: tres puntos de la superficie esférica, unidos por arcos de círculos máximos menores de 180 grados.
- La suma de los ángulos en el triángulo esférico es mayor de 180 grados

Fórmulas de triangulos esféricos:

- Fórmula del seno:

$$\frac{\sin(a)}{\sin(A)} = \frac{\sin(b)}{\sin(B)} = \frac{\sin(c)}{\sin(C)}$$

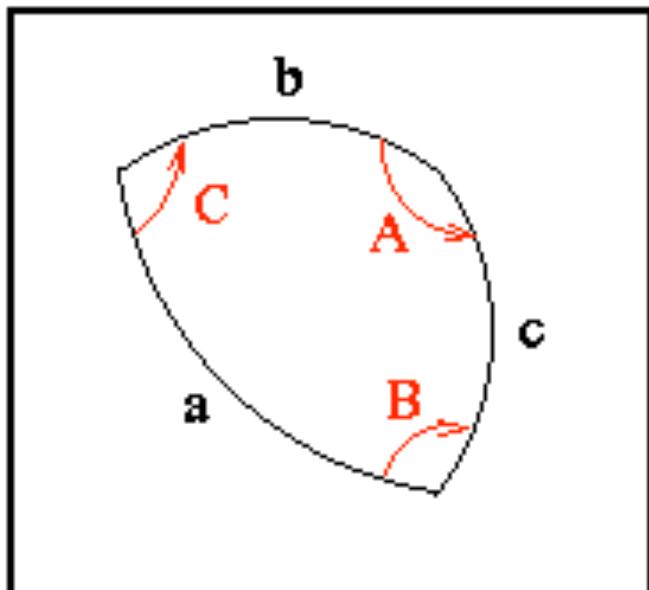
- Fórmula del coseno:

$$\cos(a) = \cos(A)\sin(b)\sin(c) + \cos(b)\cos(c)$$

*

- Fórmula del seno-coseno:

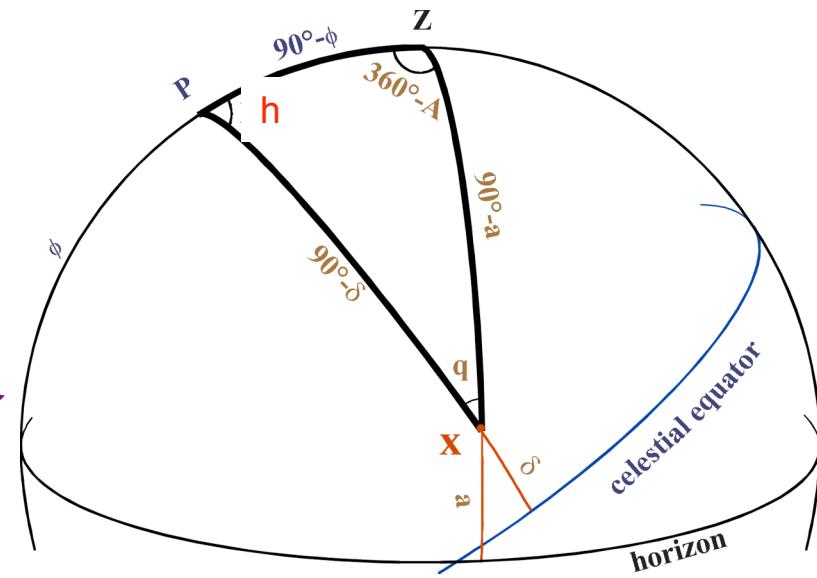
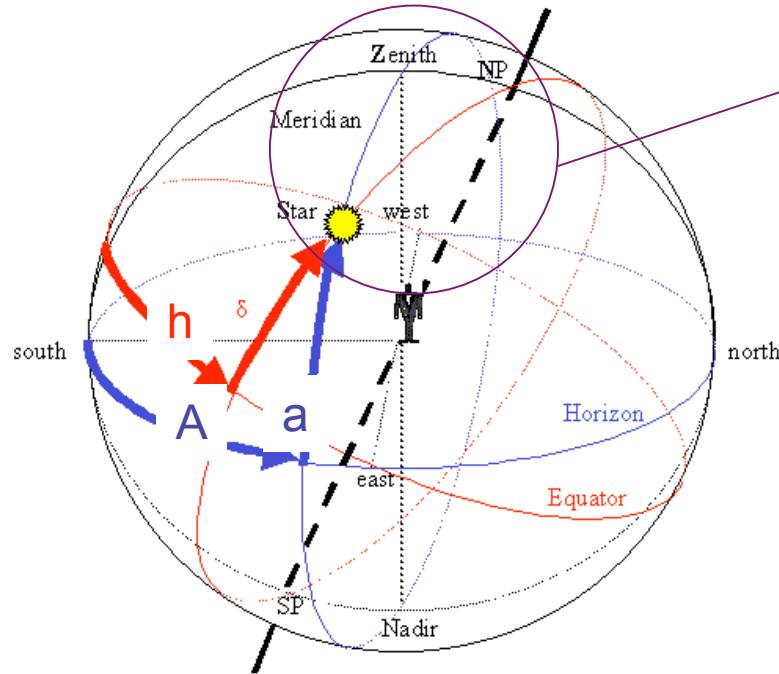
$$\cos(B)\sin(a) = -\cos(A)\sin(b)\cos(c) + \cos(b)\sin(c)$$



* **Ojo:** hay un error en p. 75 de “Introducción a la Física del Cosmos”

Fórmulas para la transformación entre las coordenadas ecuatoriales y horizontales

Miramos el triángulo entre el objeto, el polo norte y el cenit. Conocemos 5 de los 6 ángulos



Fórmulas para la transformación entre las coordenadas ecuatoriales y horizontales

- Aplicando las fórmulas del triangulo esférico podemos deducir las siguientes relaciones entre coordenadas horizontales y ecuatoriales

1. Aplicando la fórmula del seno :

$$\sin(h)\cos(\delta) = \sin(A) \cos(a)$$

2. Aplicando dos veces la fórmula del seno - coseno :

$$\cos(h) \cos(\delta) = \cos(A) \cos(a) \sin(\Phi) + \sin(a) \cos(\Phi)$$

$$\cos(A) \cos(a) = \cos(h) \cos(\delta) \sin(\Phi) - \sin(\delta) \cos(\Phi)$$

*

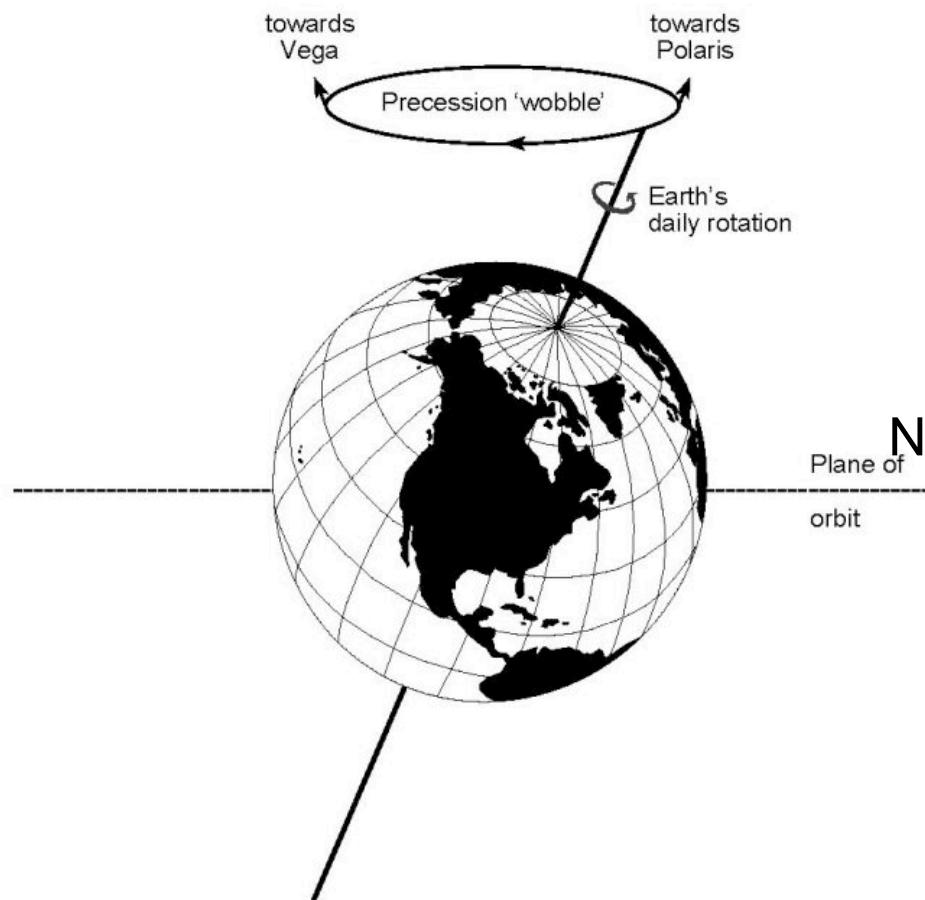
3. Aplicando dos veces la fórmula del coseno :

$$\sin(a) = \cos(h) \cos(\delta) \cos(\Phi) + \sin(\delta) \sin(\Phi)$$

$$\sin(\delta) = -\cos(A) \cos(a) \cos(\Phi) + \sin(a) \sin(\Phi)$$

* **Ojo:** hay un error en p. 84 de “Introducción a la Física del Cosmos”

Alteraciones: Precesión y nutación

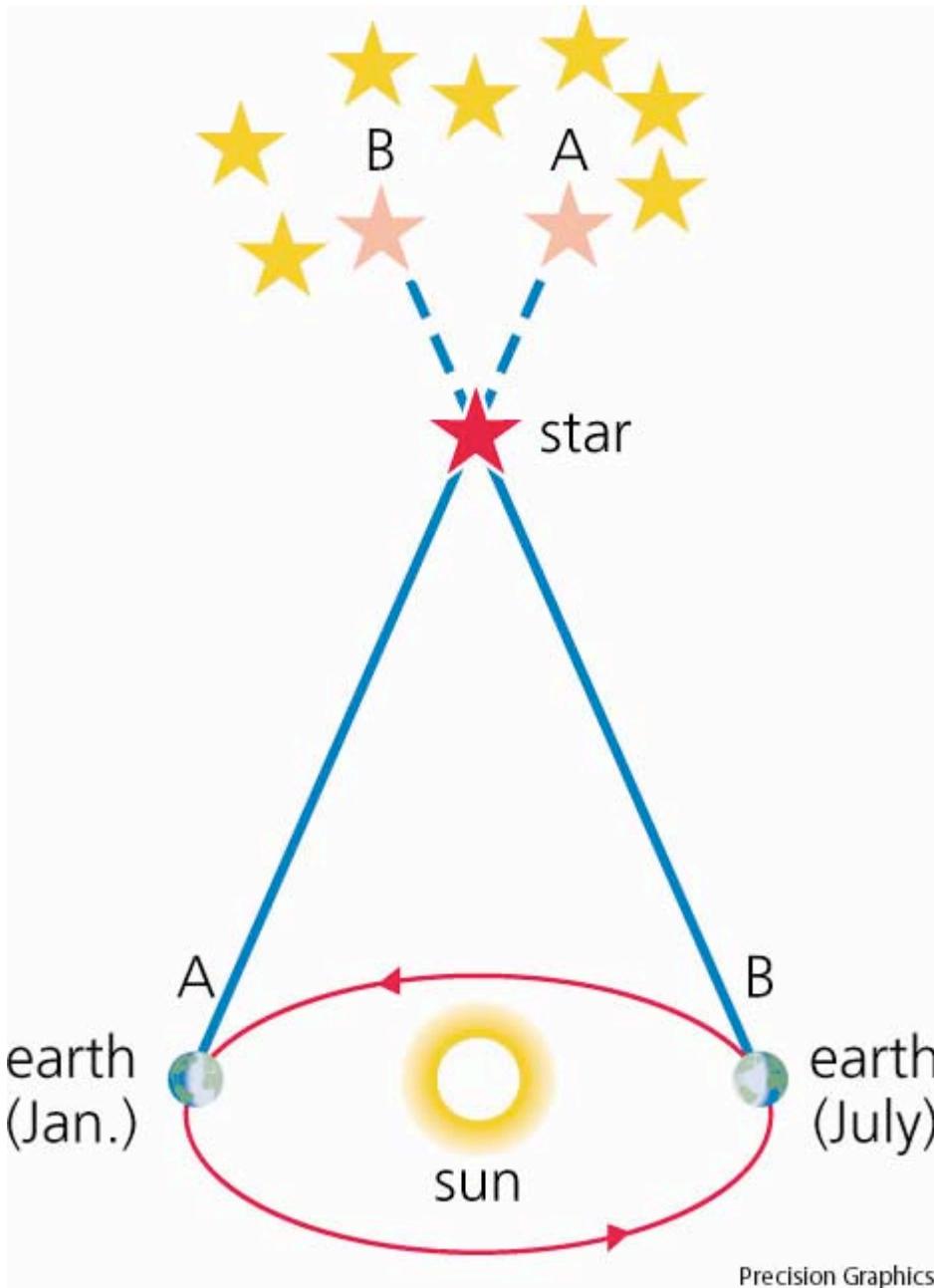


Precesión:

- Debido al efecto de marea de los demás miembros del sistema solar, sobre todo sol y luna.
- Periodo: 26.000 años
- El equinoccio vernal se desplaza a lo largo de la eclíptica en 50.26 segundos de arco por años

Nutación:

- debido a la inclinación de la órbita de la luna, el eje de rotación tiene una precesión con un periodo de 18.61 años
- Efecto es más pequeño que de la precesión



Alteraciones: Paralaje

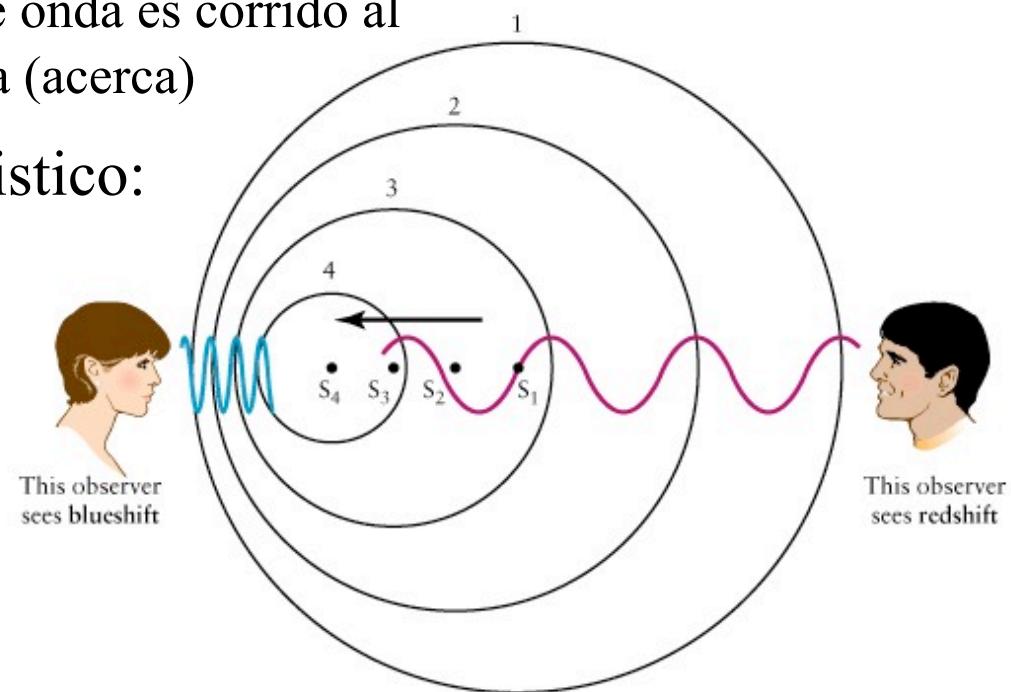
Existe paralaje diurno y paralaje anual.

Da base a una definición de distancia: 1 parsec es la distancia que causa un paralaje semi-anual de 1 segundo de arco

Otras alteraciones:

- Movimientos propios de la estrellas:
 - Componente tangencial: para medirla hace falta mucho tiempo (décadas o más).
 - Componente radial: se puede medir mediante el efecto Doppler → longitud de onda es corrido al rojo (azul) si el objeto se aleja (acerca)
- Efecto Doppler nonrelativistico:

$$\Delta\lambda/\lambda = v/c$$



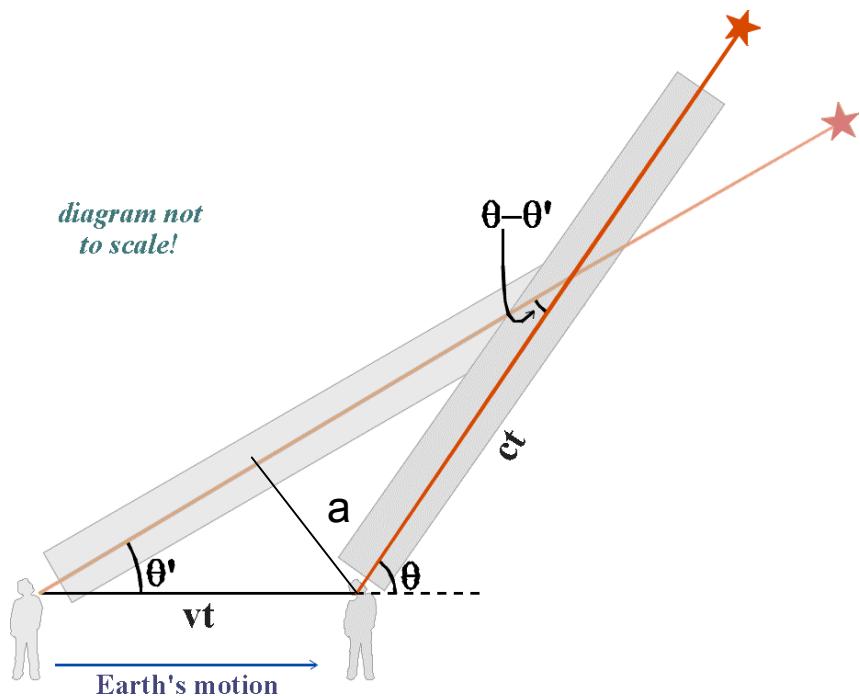
Otras alteraciones: aberración

Efecto parecido a una persona andando en lluvia vertical.

Cambia ángulo aparente:

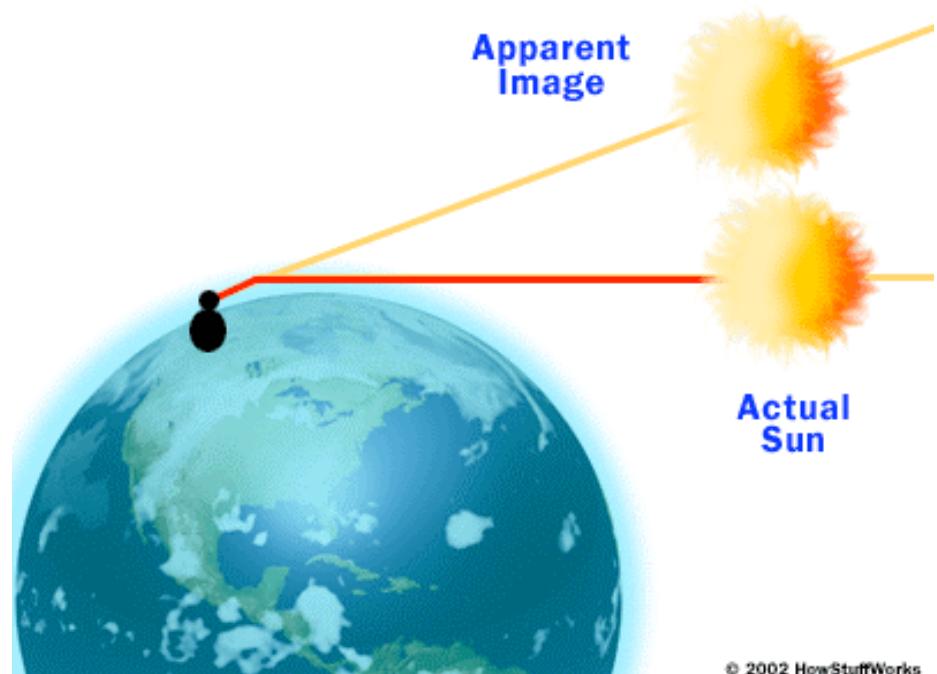
$$\alpha = \Theta - \Theta' = \sin(\Theta) v/c$$

Cambio máximo (=constante de aberración): 20.5''



Refracción atmosférica

- La luz está refractada al entrar en la atmósfera de la Tierra: al entrar en un medio más denso, su ángulo con la vertical se hace más pequeño.
- La imagen aparente está a una elevación superior
- El efecto es especialmente notable a elevaciones pequeñas
→ no es aconsejable observar objetos por debajo de 10-20 grados.



© 2002 HowStuffWorks