

Introducción a Astrofísica

Programa:

<u>Introducción</u>	{	Tema 0: Historia y métodos generales de la astronomía
	{	Tema 1: Astronomía de posición
	{	Tema 2: Propiedades y medición de la radiación electromagnética
	{	Tema 3: Instrumentos astronómicos
<u>Sistema solar</u>	{	Tema 4: Propiedades generales del sistema solar
	{	Tema 5: Planetas y sus satélites, asteroides y cometas
	{	Tema 6: Formación del sistema solar
<u>Estrellas</u>	{	Tema 7: Estructura estelar
	{	Tema 8: Observaciones de estrellas
	{	Tema 9: Evolución estelar
<u>Galaxias</u>	{	Tema 10: La Vía Láctea
	{	Tema 11: Galaxias
<u>Cosmología</u>	{	Tema 12: Cosmología

¿Que 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

Historia de la astronomía

Arqueoastronomía

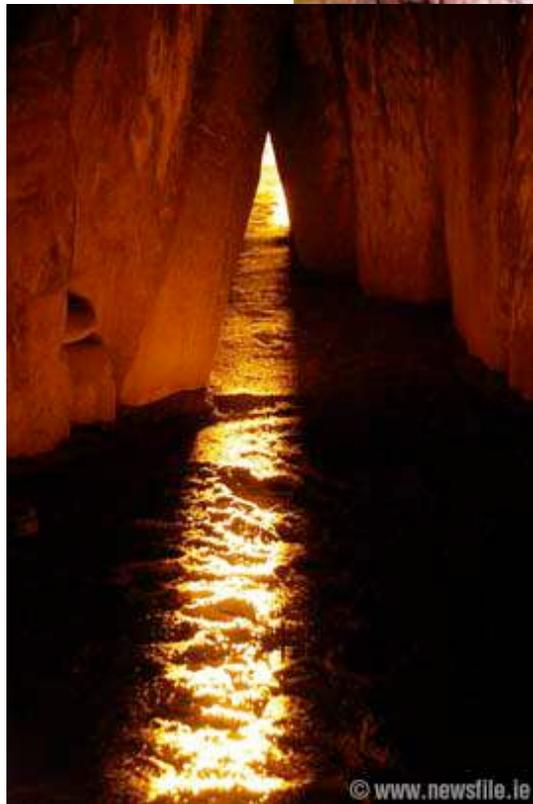


Un ejemplo:
Stonehenge (sur de
Inglaterra)

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



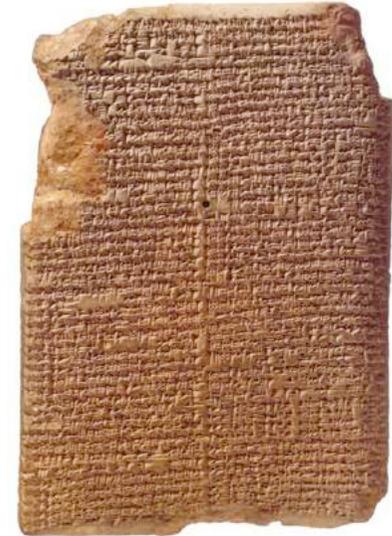
Newgrange - Tumba prehistórica (Irlanda)



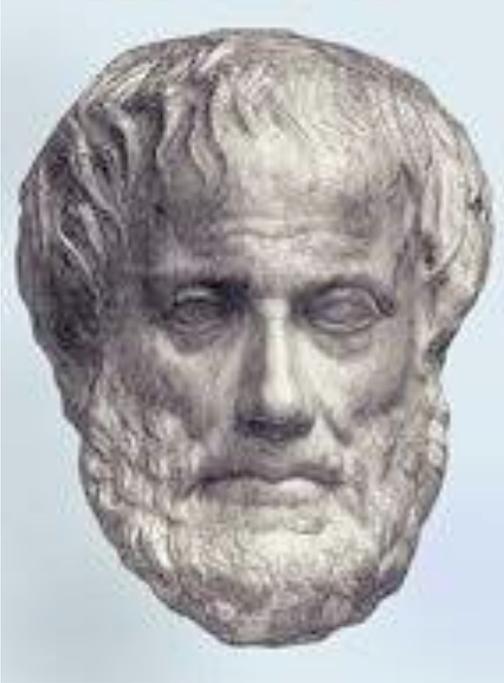
- Orientación cuidadosamente elegida:

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

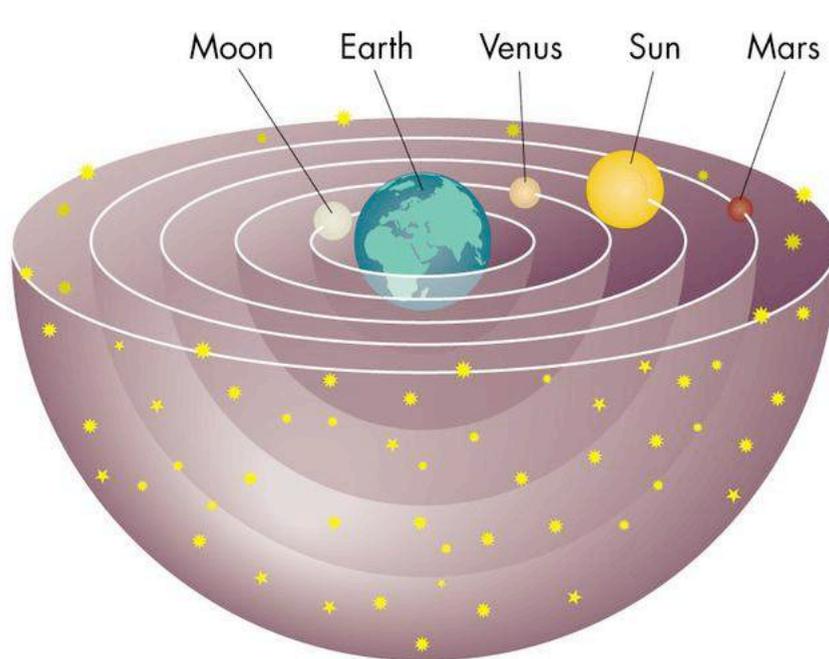
- **Babilonia**: medidas de las posiciones de los planetas (tablas babilónicas)
- **Grecia** → primeros científicos
 - Primeros en querer comprender el universo (antes había estrecha relación con religión)
 - Intentaron explicar el universo basándose en formas geométricas → construyeron los primeros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



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:

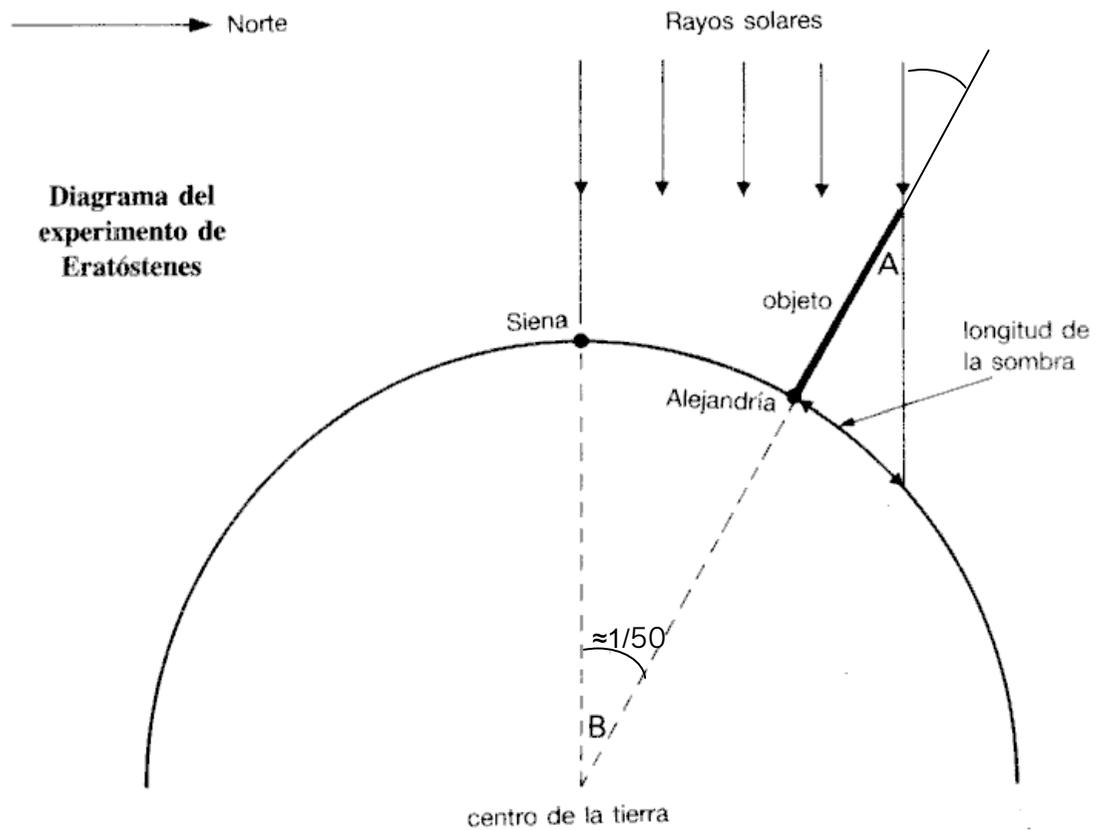


- Las estrellas cambian la posición en el horizonte según el sitio en la Tierra.
- Sombra de la Tierra en la Luna en eclipses es curvada

Eratóstenes (siglo III a.C.)



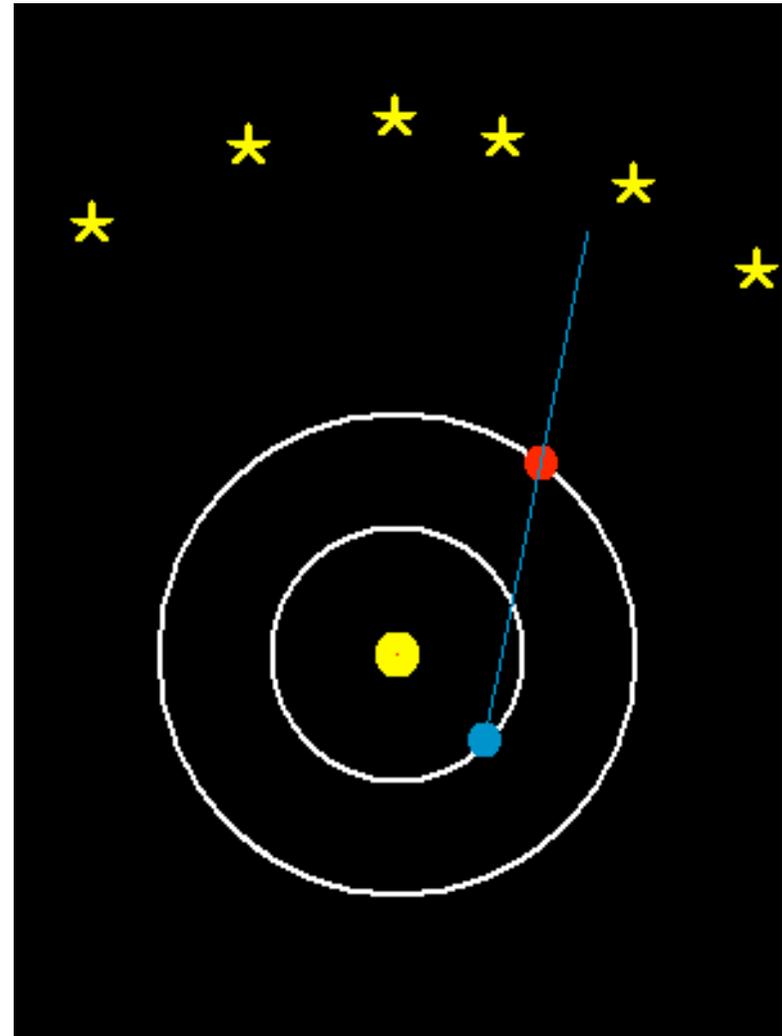
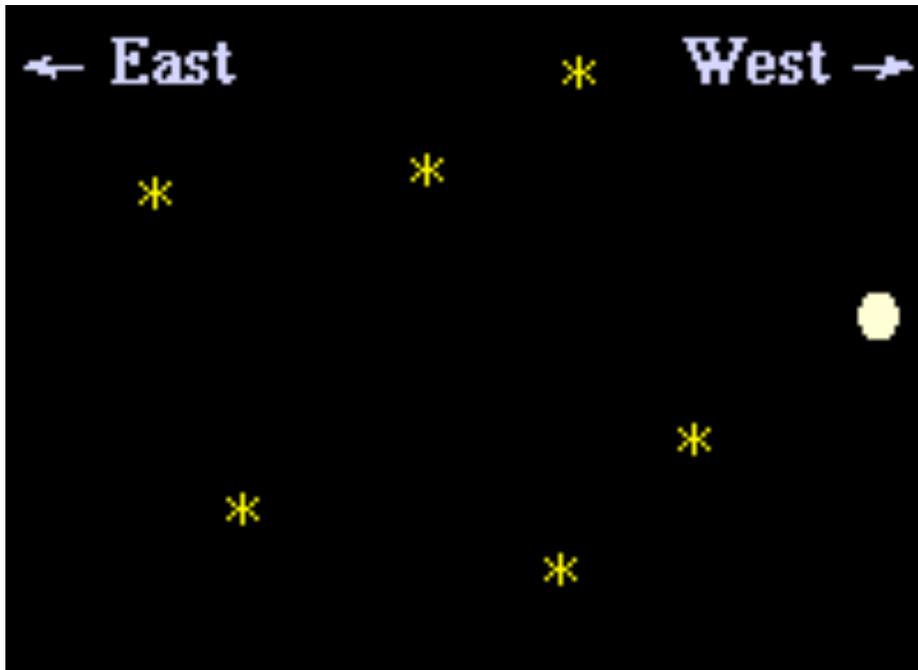
Midió el diámetro de la Tierra



- **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)

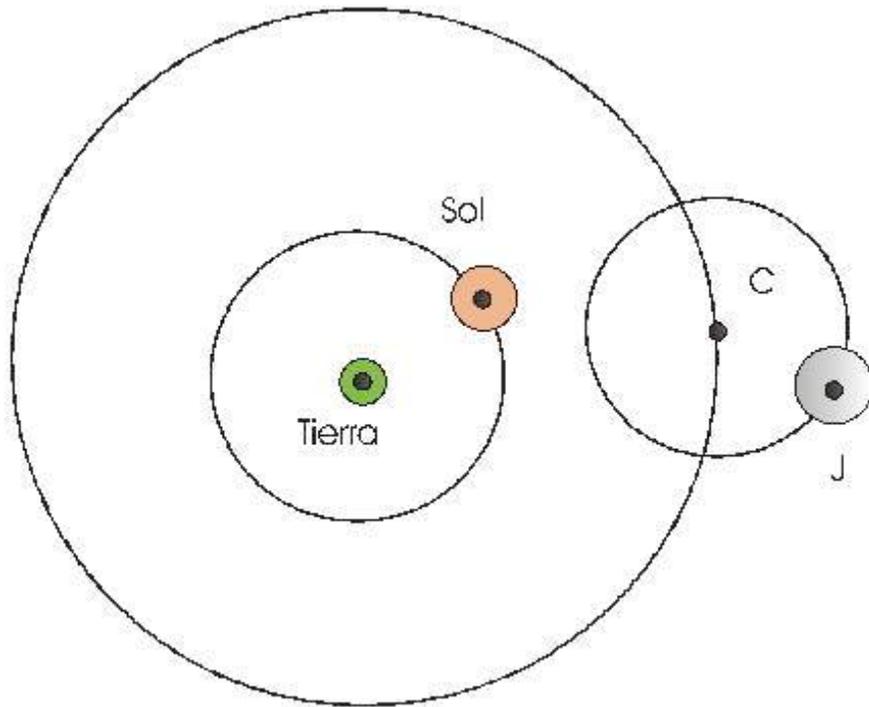
Movimiento de los planetas



Movimiento de los planetas visto en el cielo

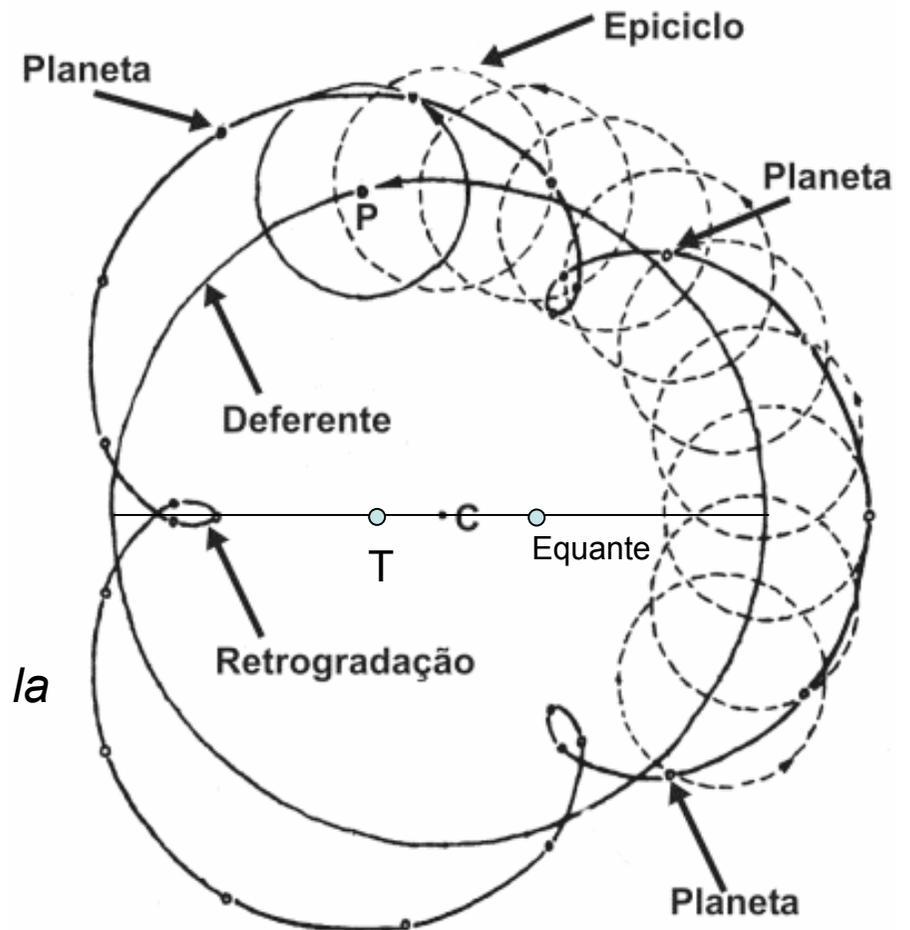


La astronomía griega



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!).

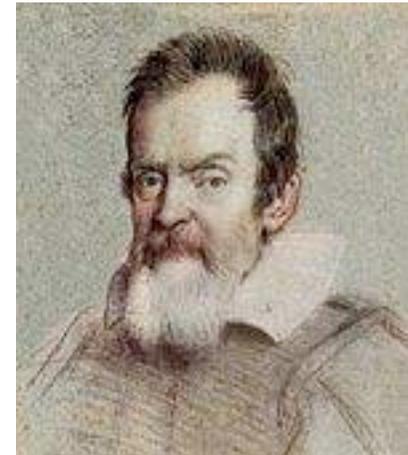
- En 1597, se marcha a Praga y desde 1600 trabaja con su joven asistente Johannes Kepler.

- **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:

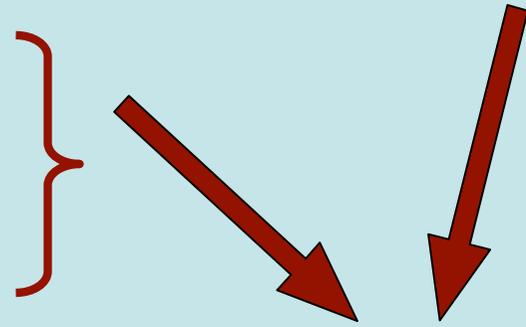
- *evidencia, observación y medidas*

- *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

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

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

Interpretación de las observaciones astronómicas

Algunos logros recientes en imágenes

Eagle Nebula
M16



Zona de formación
de estrellas
nuevas

DEM L 106



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

Nebulosa de
reflexion con gobulo
de Bok

Nebula NGC 1999



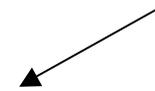
Car's Eye Nebula • NGC 6543



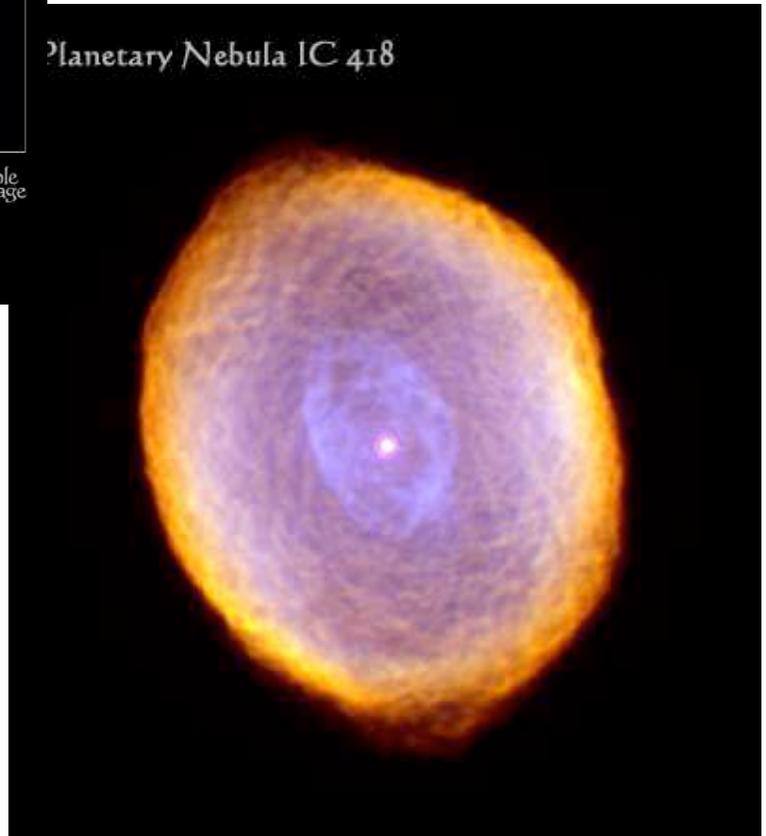
Chorros
bipolares
alrededor de una
estrella gigante
roja



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



Planetary Nebula IC 418



Boomerang Nebula • Polarized Light



Hubble
Heritage

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

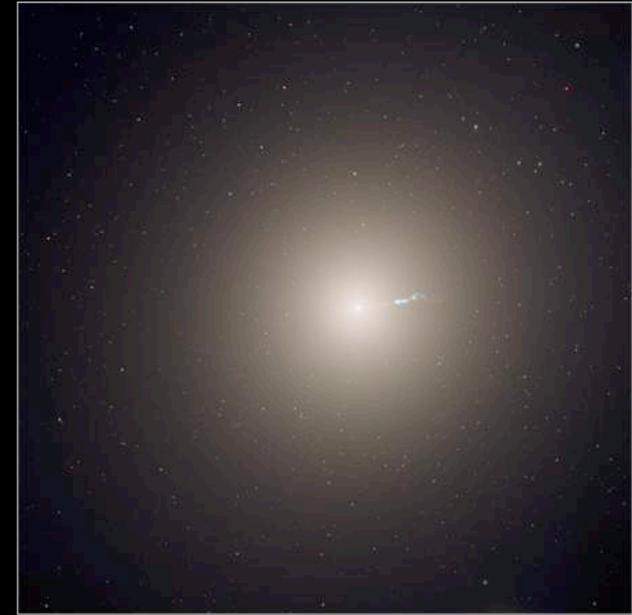
Diferentes tipos de galaxias

Whirlpool Galaxy • M51



Hubble
Heritage

Elliptical Galaxy M87



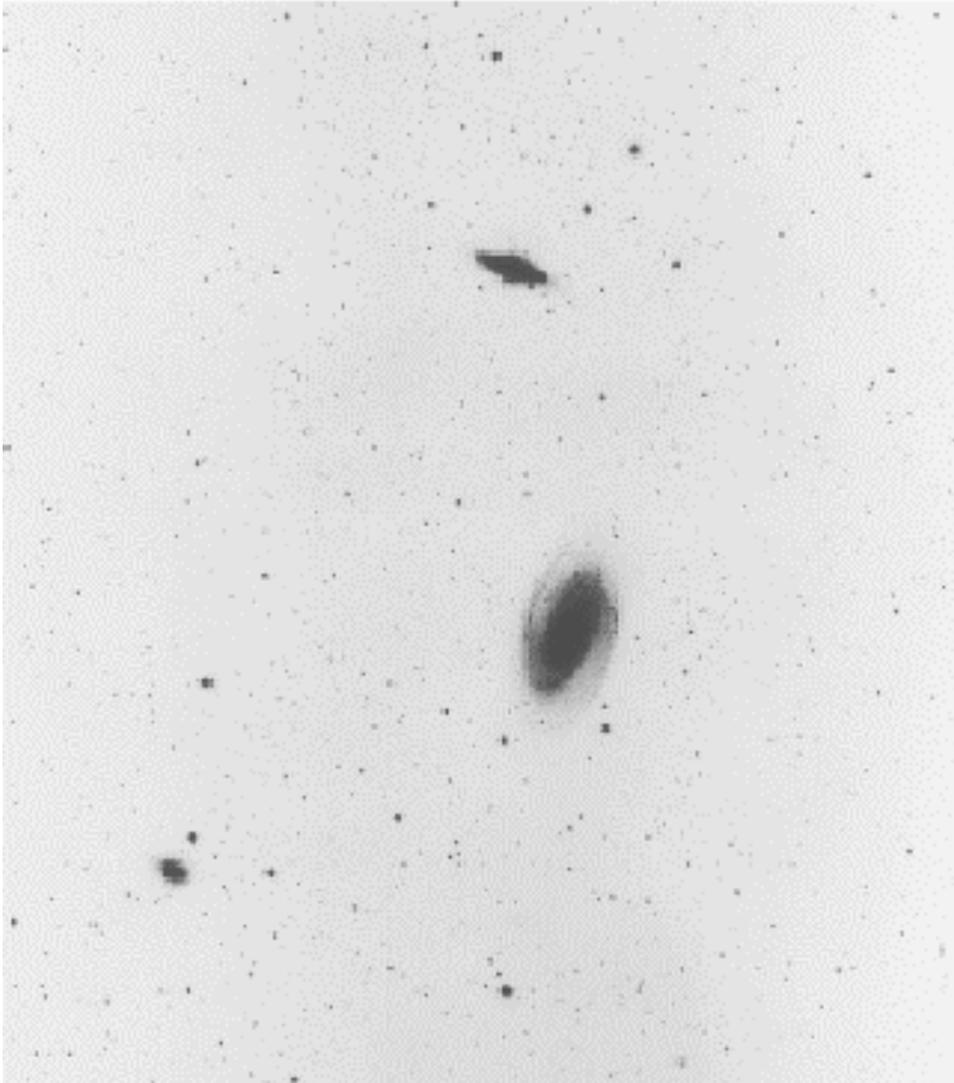
Hubble

Dwarf Galaxy NGC 4449



Hubble
Heritage

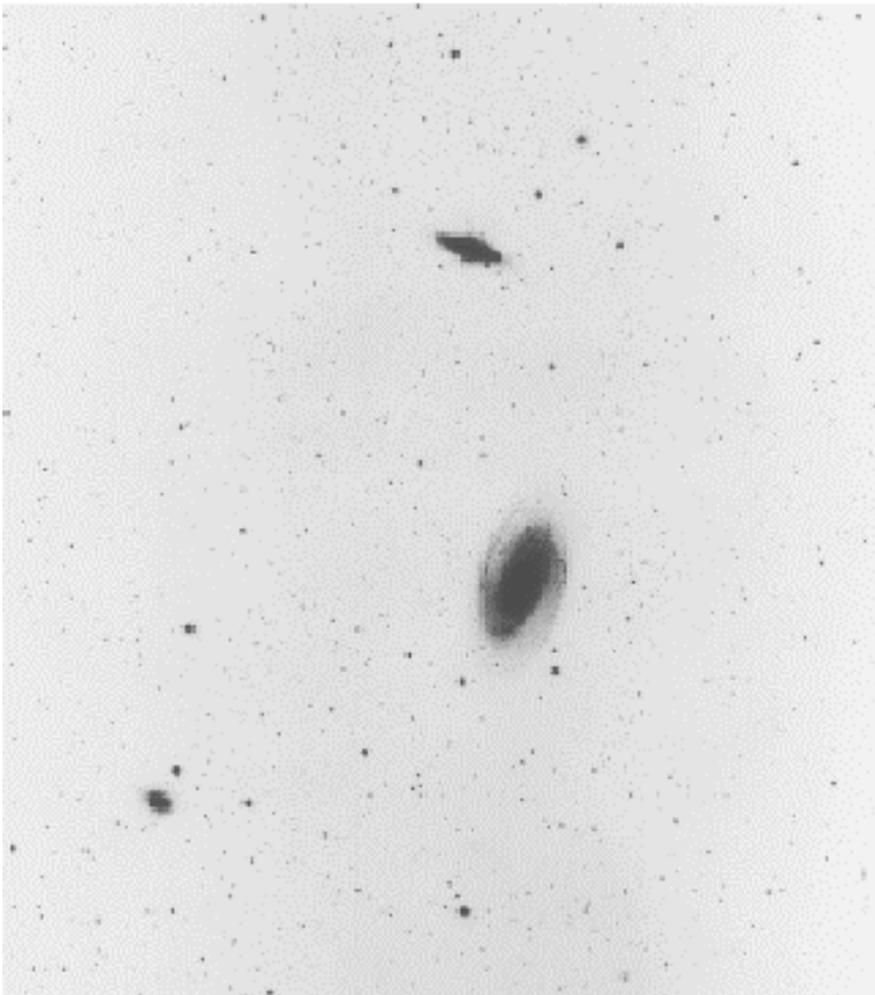
Grupo M81: La observación del gas atómico puede cambiar la imagen



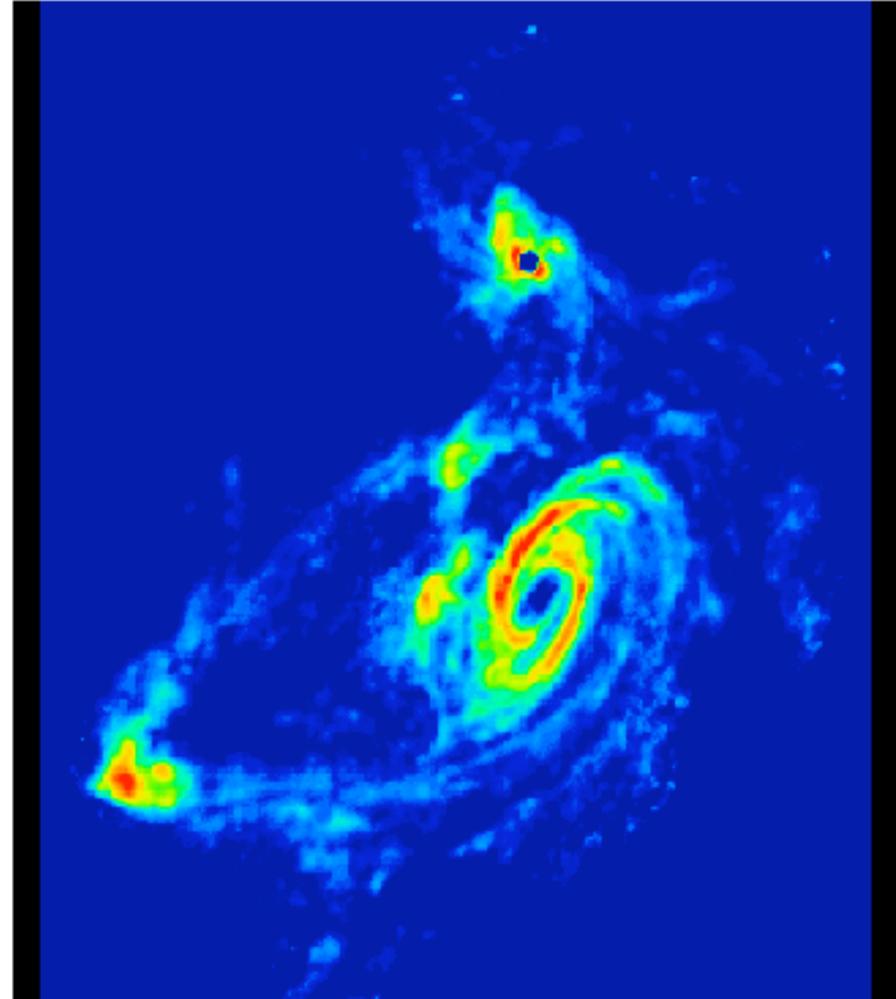
Galaxias en interacción gravitatoria

TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



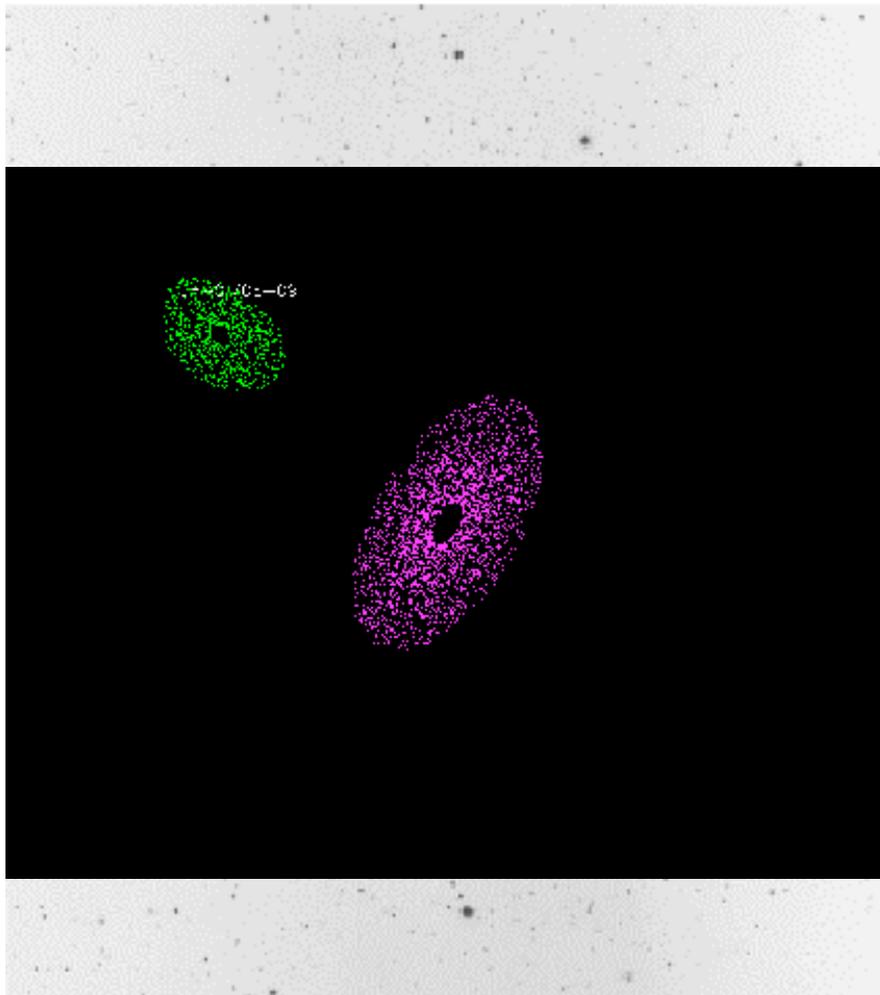
21cm HI Distribution



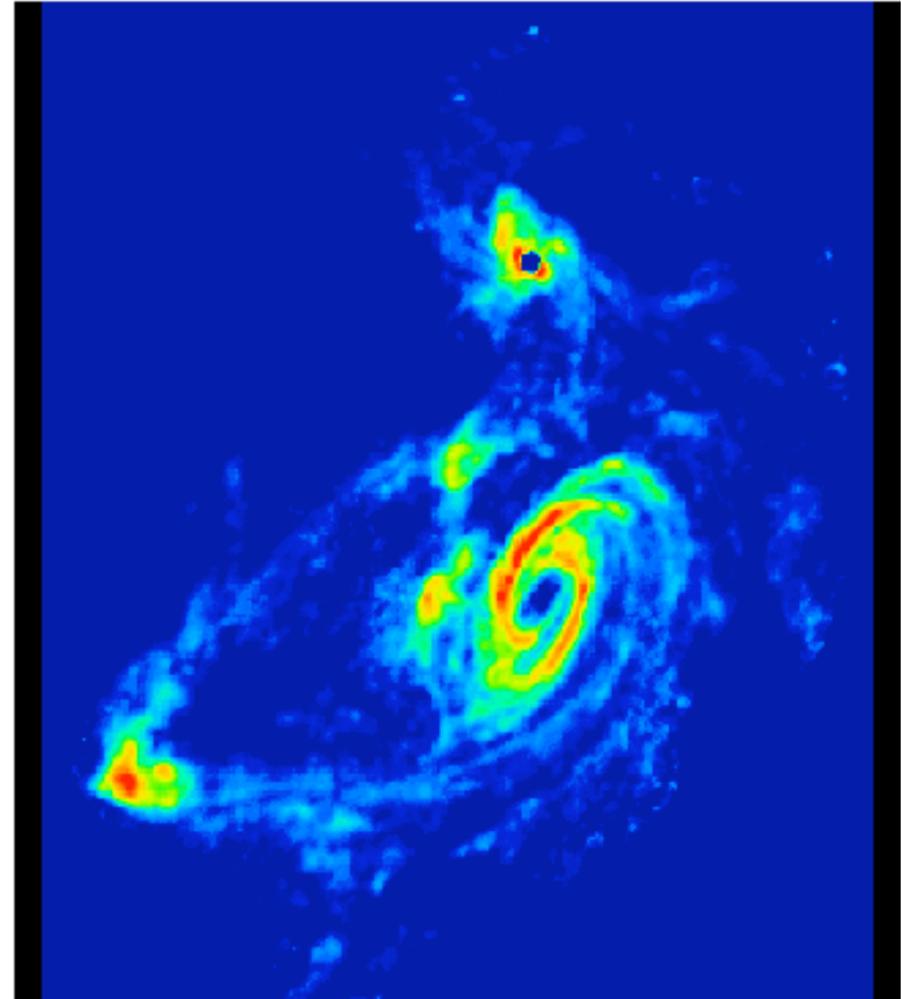
Galaxias en interacción gravitatoria

TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



21cm HI Distribution



Colisiones entre galaxias

Ring Galaxy AM 0644-741



Hubble
Heritage

Interacting Galaxies • Arp 87



Hubble
Heritage

Hickson Compact Group 87

Coma Cluster of Galaxies

Muchas galaxias



Hubble Heritage

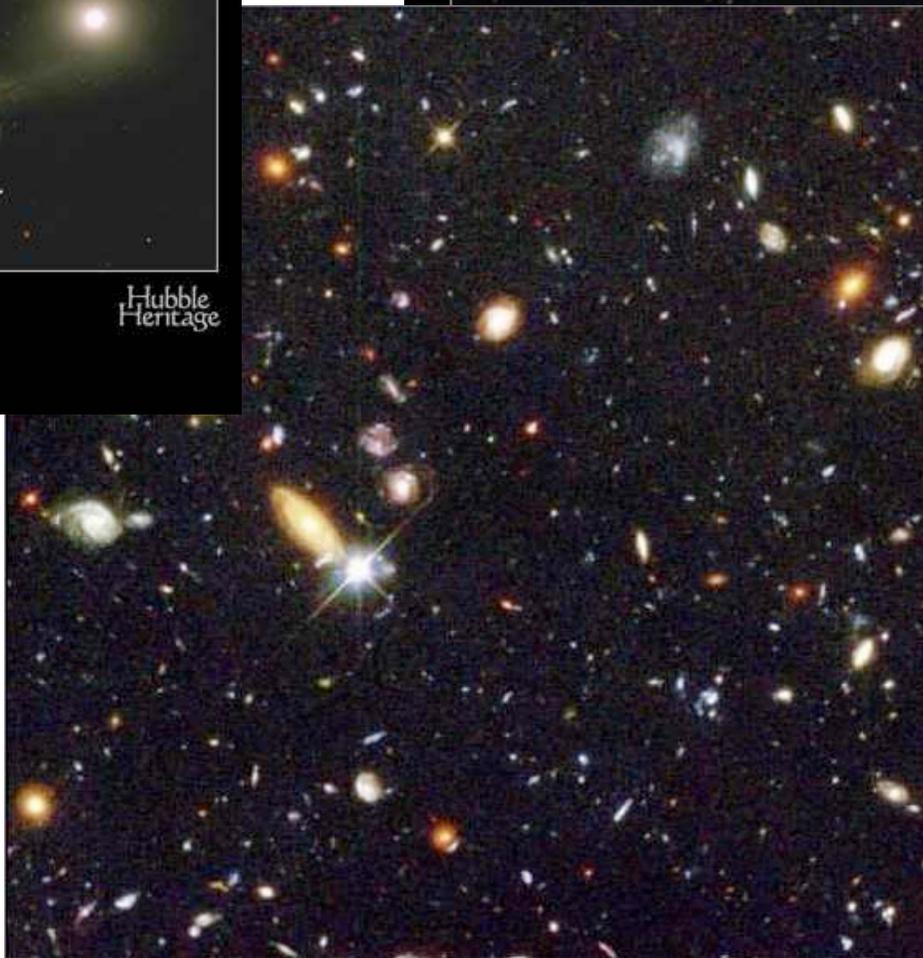


Hubble Heritage

Grupo Compacto de galaxias

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

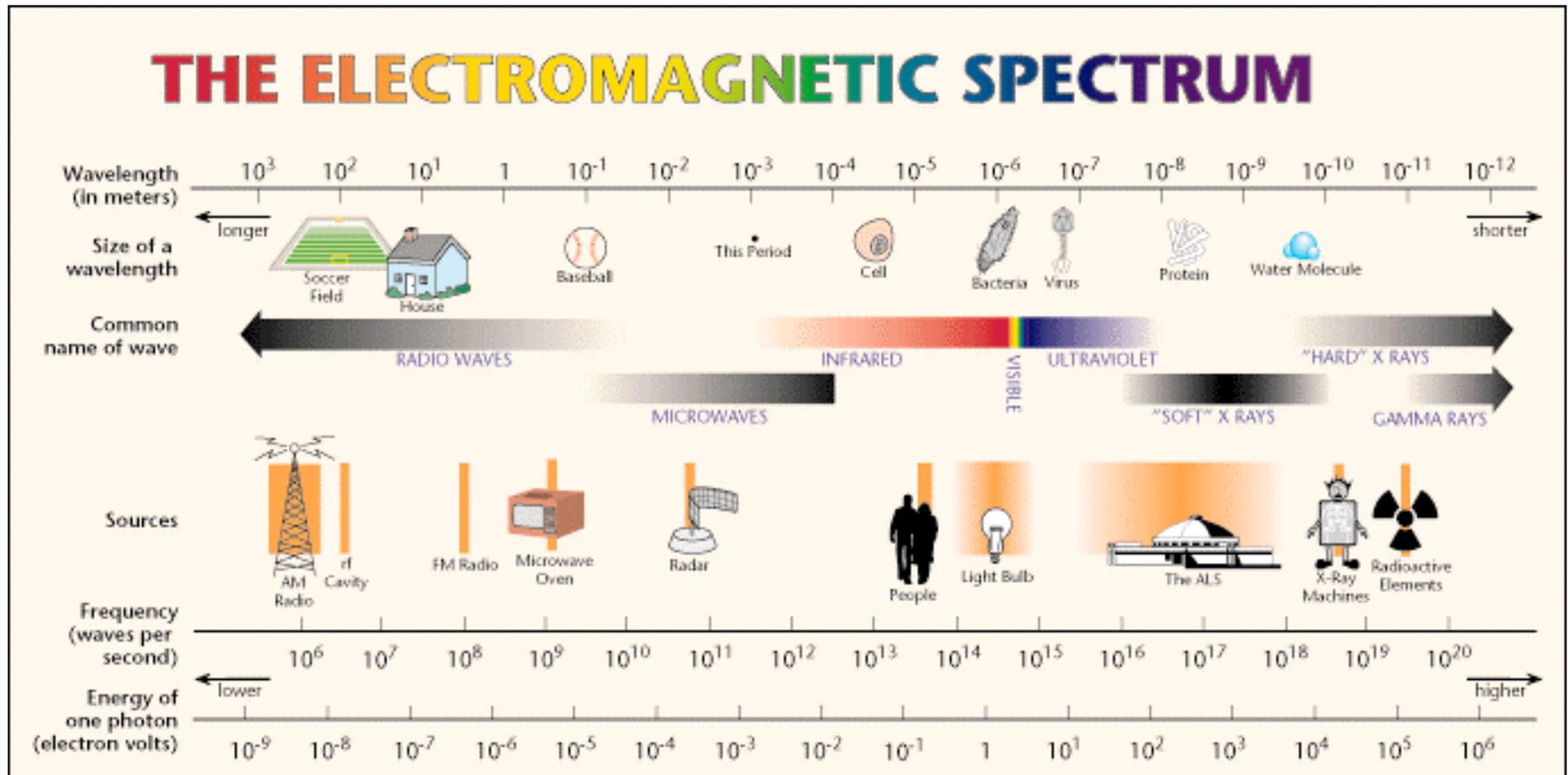
→ ! No vemos cambios en el cielo !

Los canales de información de Astrofísica:

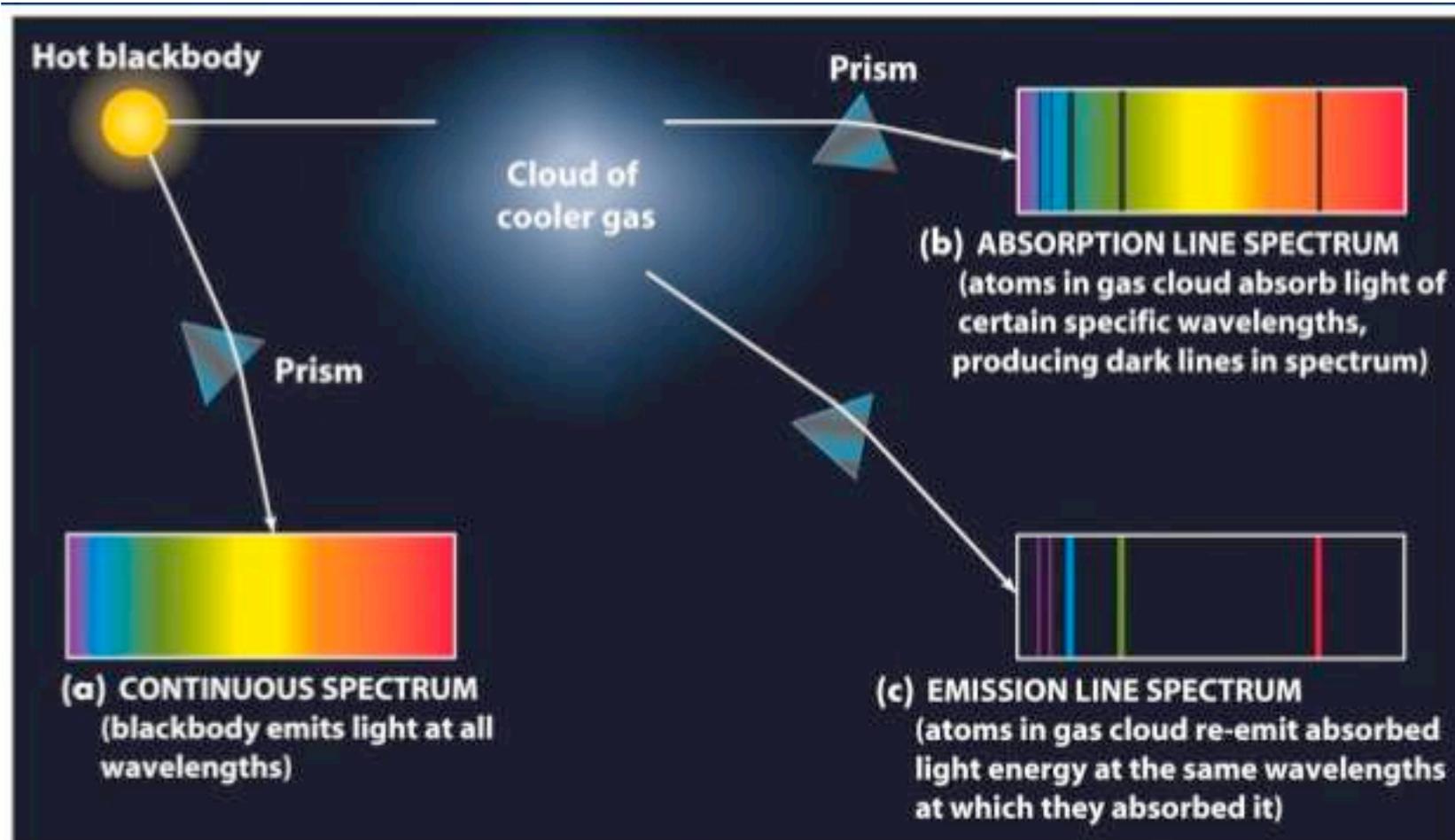
1) El más importante: Espectro electromagnético



Espectro electromagnético entero



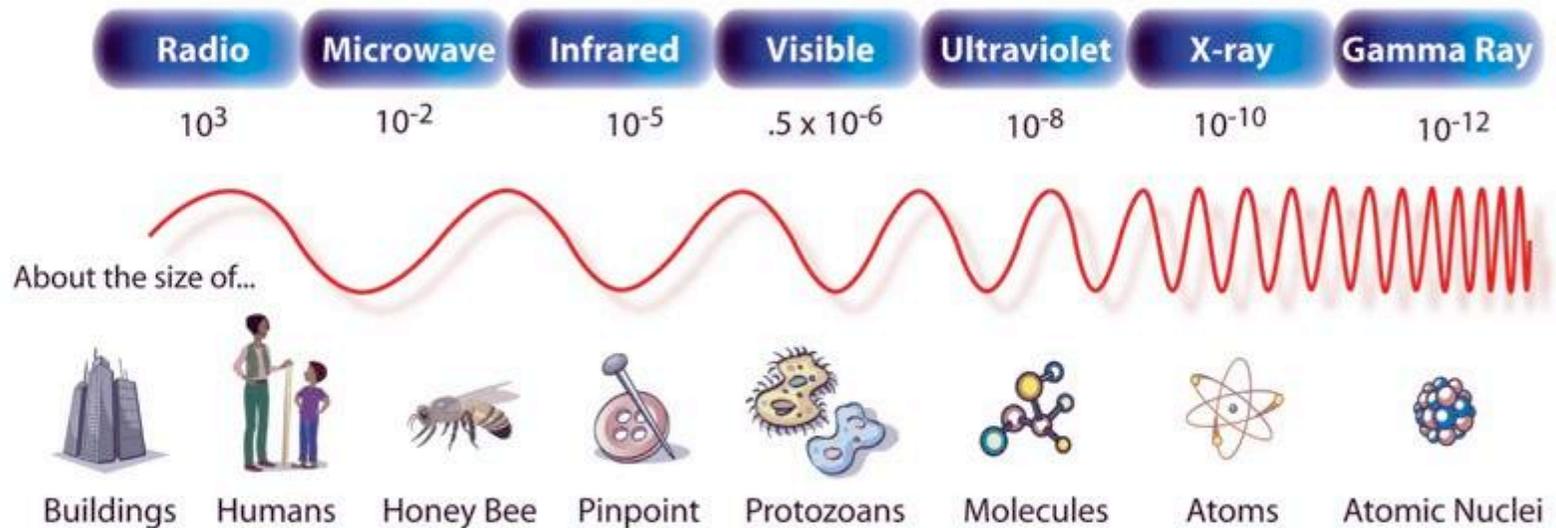
Espectro electromagnético



El espectro de un objeto depende de la naturaleza de éste y del medio que recorre la radiación hasta que la detectamos, que va dejando su huella en la radiación recibida.

Espectro electromagnético entero

Wavelength
(meters)



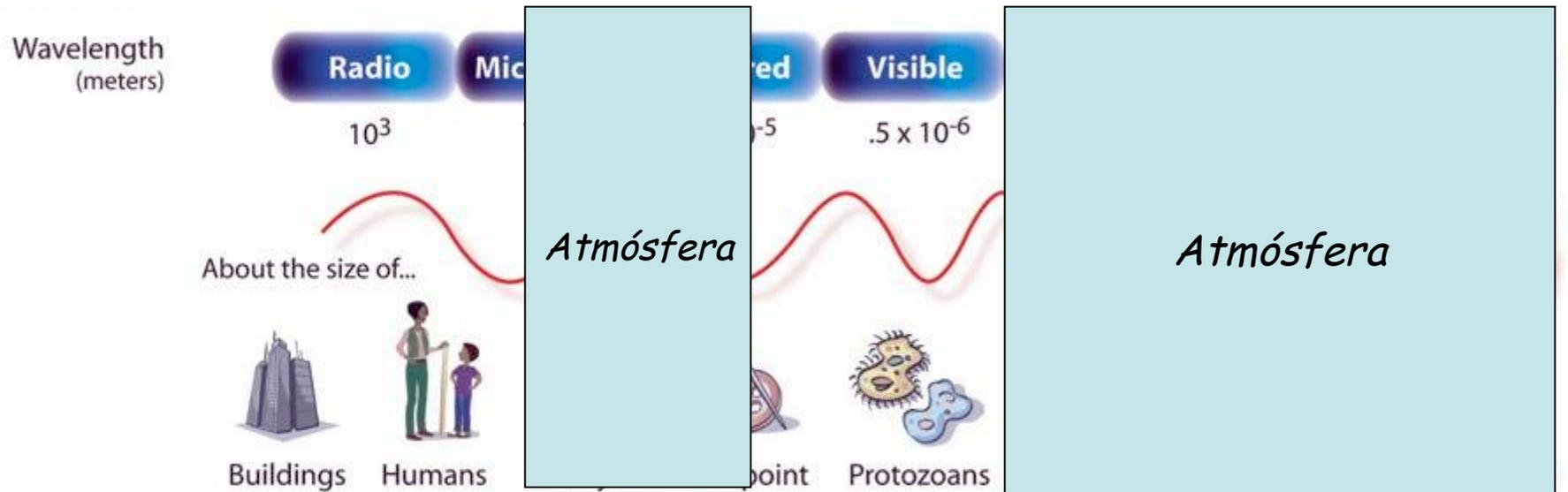
Gas frío
Rayos C3smicos

Polvo interestelar

Estrellas
Gas caliente

Gas muy caliente

Espectro electromagnético entero



Polvo interestelar

Gas muy caliente

Gas frío
Rayos Cósricos

Estrellas
Gas caliente

Otros canales de información

- Neutrinos
- Ondas gravitatorias
- Rayos cósmicos
- Exploración directa

Tema 1: Astronomía de posición

- Conceptos básicos
 - la esfera celeste
 - principales líneas y puntos sobre ésta (*horizonte, ecuador, polos, meridianos, cénit, eclíptica, equinoccios, punto de Aries*)
- Sistemas de coordenadas
 - Definir posiciones sobre la esfera celeste.
 - Transformaciones entre las distintas coordenada.s
 - Efectos que pueden alterar las coordenadas de un astro.
- Objetivos:
 - Orientarnos en el cielo: Saber dónde buscar estrellas y planetas en el cielo, dónde salen, dónde se ponen, dónde está su punto de mayor elevación
 - Entender el origen de las estaciones del año y de las diferentes zonas climáticas en la Tierra

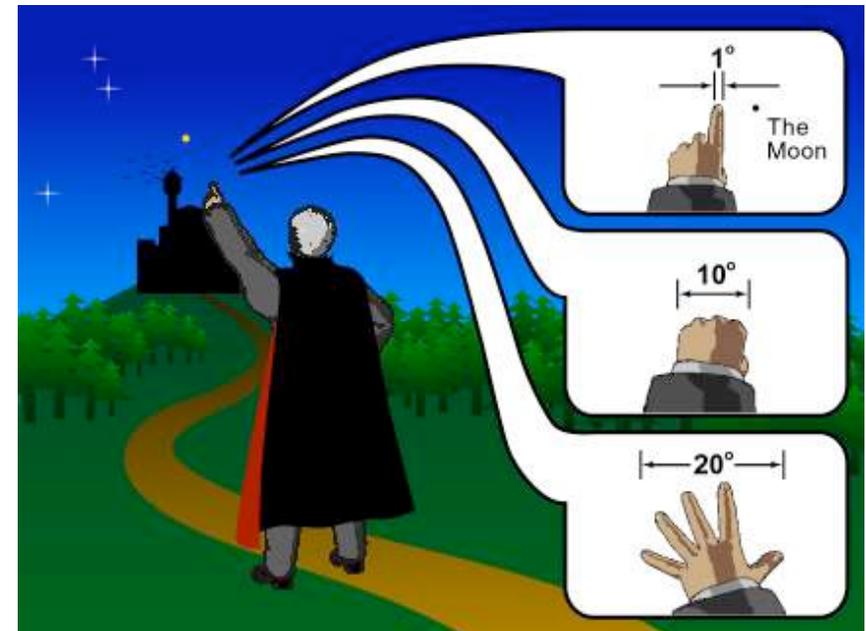
Ángulos en el cielo

- 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:

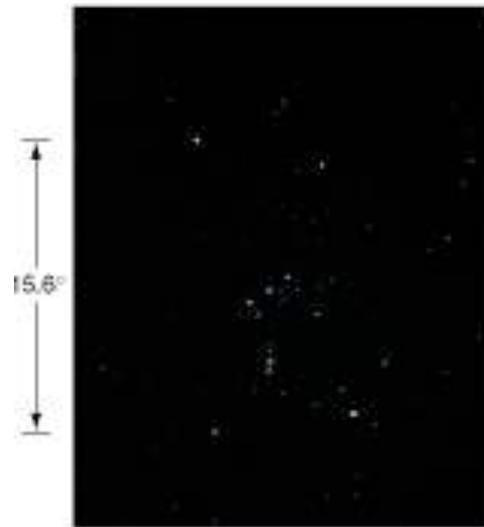
- Circulo completo: 2π

- **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.

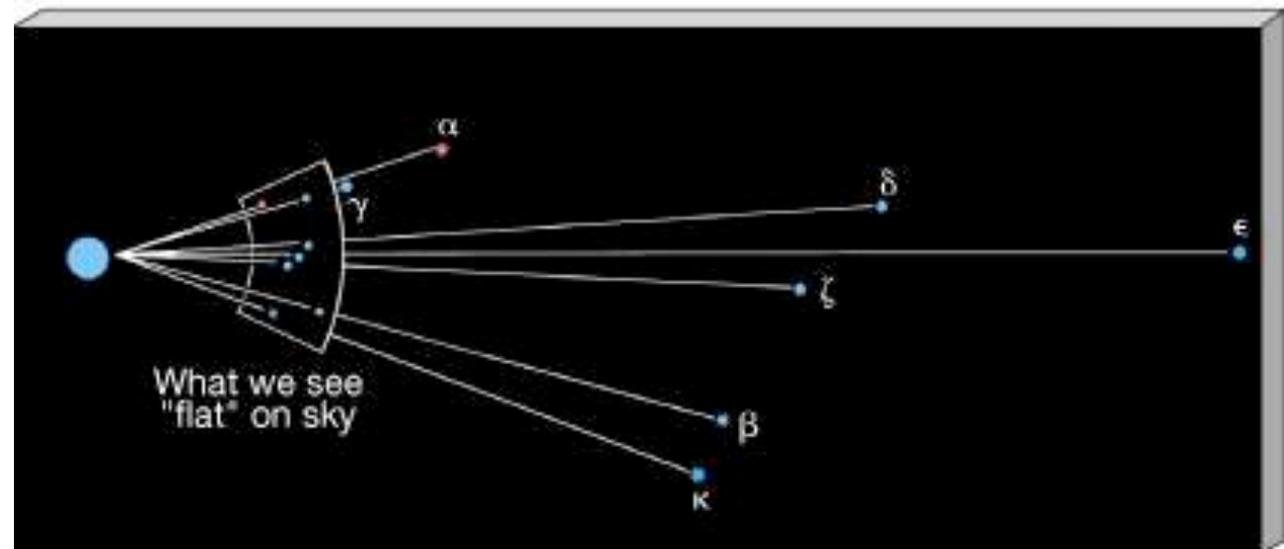
Vemos unos 5000 estrellas, agrupados en constelaciones



(a)



(b)



(c)

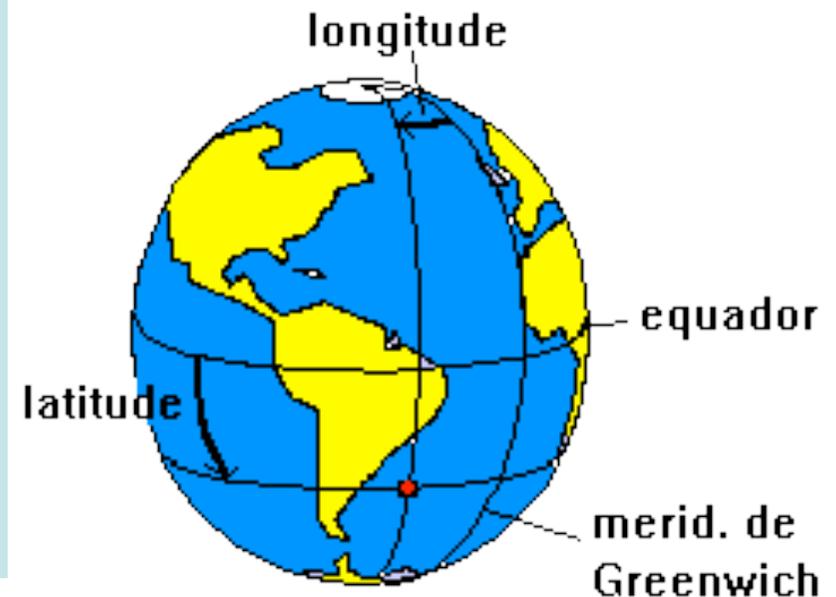
Coordenadas terrestres

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.*



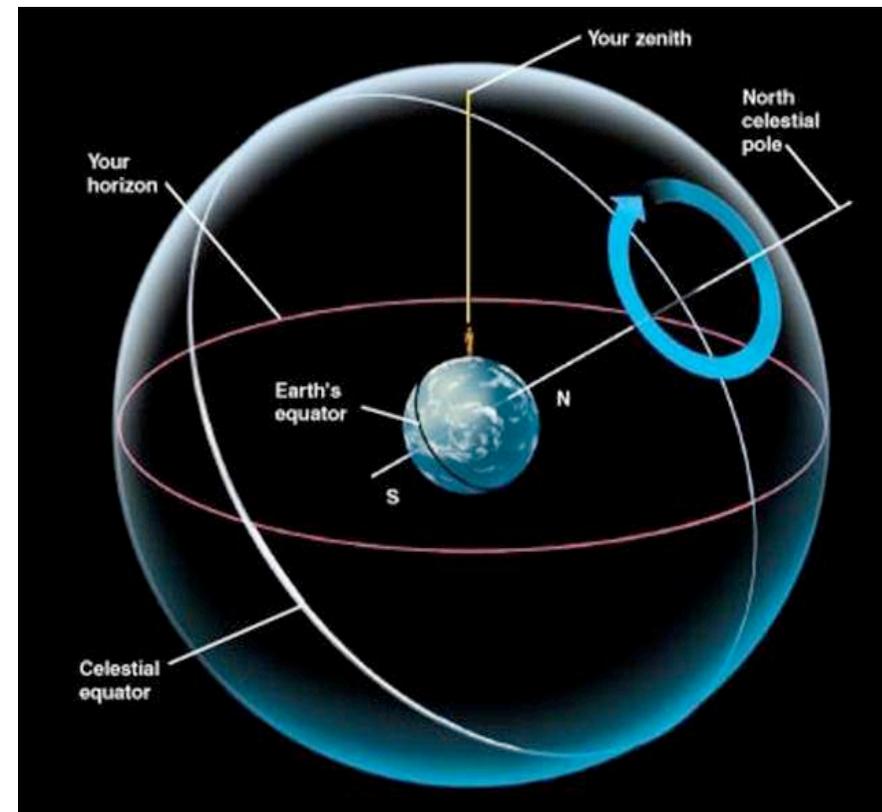
- **Longitud geográfica**: ángulo entre el meridiano que pasa por el punto y el meridiano cero (que pasa por Greenwich). Longitud positiva hacia el oeste de Greenwich
- **Latitud geográfica**: ángulo que define la plomada con el plano ecuatorial. Positiva en hemisferio norte, negativa en el sur. Tierra 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 (cordenada 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

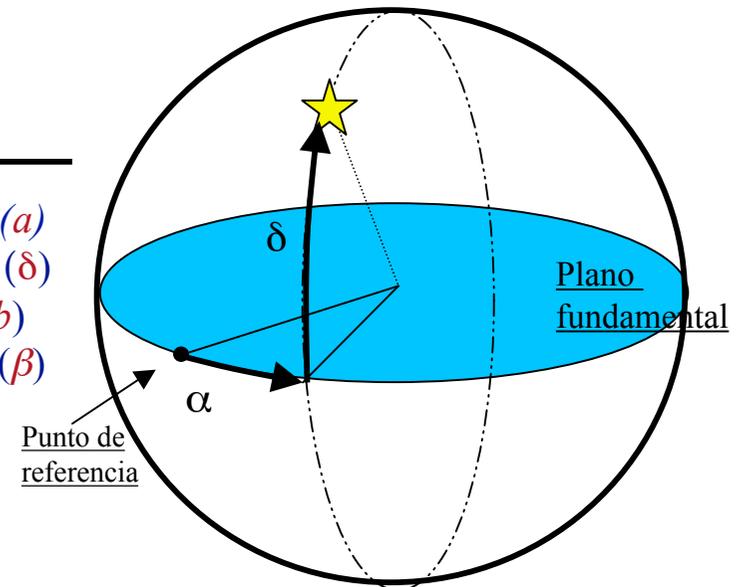
➡ **ventaja:** sólo necesitamos dos coordenadas para determinar la posición de un objeto.



• **Distintos sistemas de coordenadas en Astronomía:**

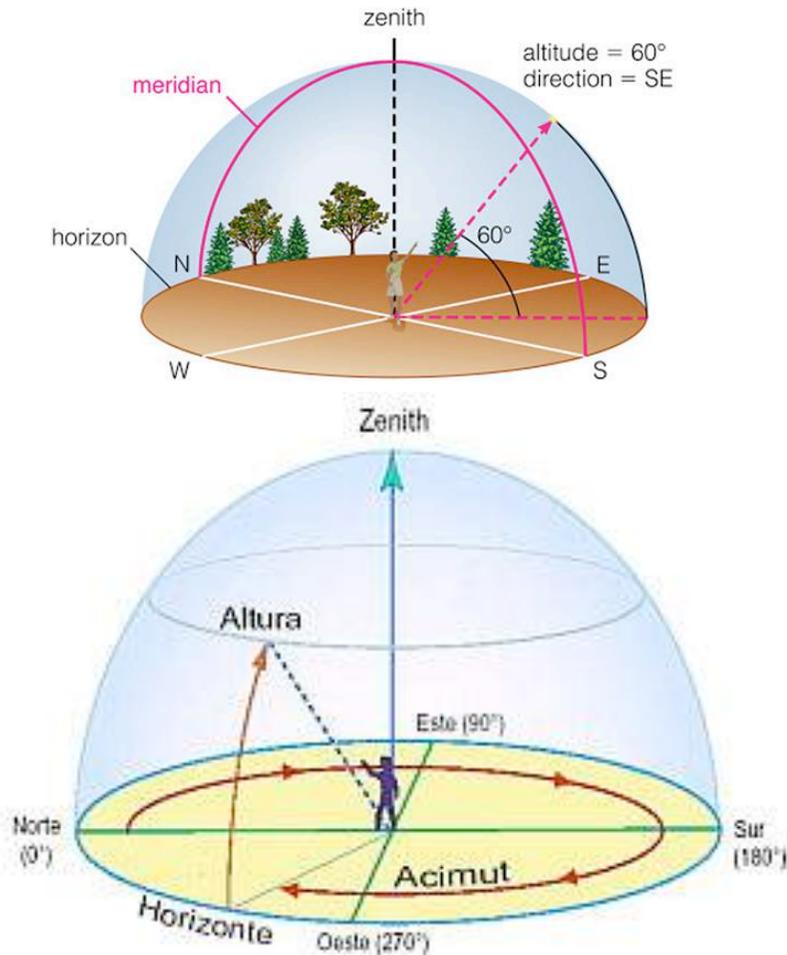
- Todos ellos tienen un plano de fundamental, que contiene al centro y divide la esfera celeste en dos hemisferios.
- **Coordenadas de un astro vienen dada por:**
 - Distancia angular entre dicho astro y plano fundamental (δ)
 - Ángulo (α) entre:
 - Punto de intersección del círculo máximo que contiene 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	Coordenadas
<u>Horizontales</u>	horizonte del observador	acimut A , elevación (a)
<u>Ecuatoriales</u>	plano Ecuatorial	RA (α), declinación (δ)
<u>Galácticas</u>	plano de Vía Láctea	longitud (l), latitud (b)
<u>Eclípticas</u>	plano de la eclíptica	longitud (λ), latitud (β)



Coordenadas horizontales:

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



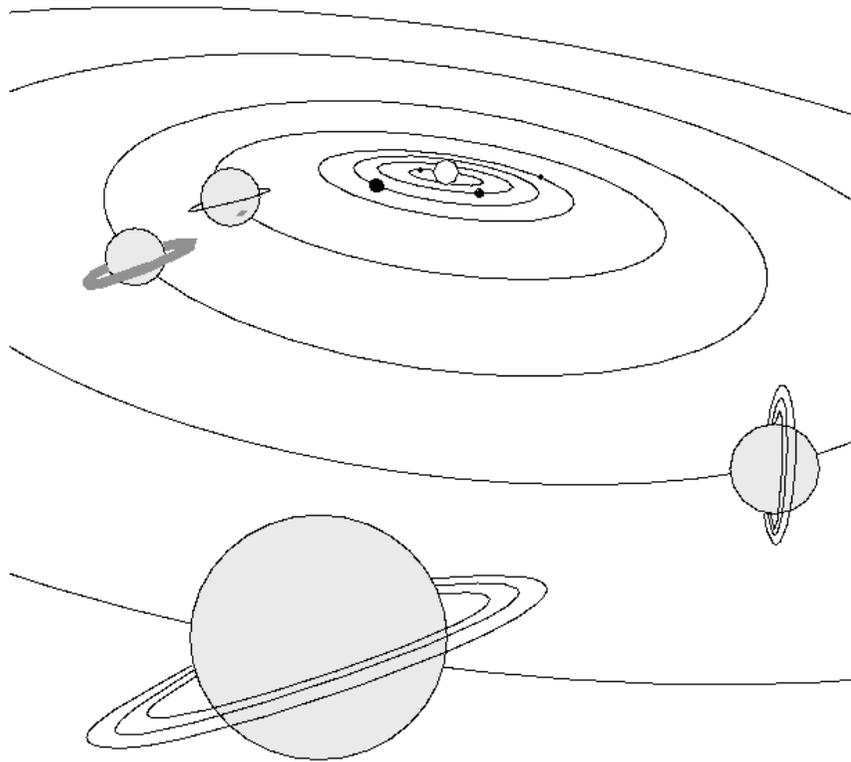
- ***a***, **altitud o elevación**, distancia angular del horizonte $[-90^\circ, +90^\circ]$
 - Muy usada la distancia cenital, $z = 90 - a$
- ***A***, **acimut**, ángulo de la vertical del objeto desde alguna posición de referencia $[0, 360^\circ]$
(¡OJO! Según convenio: medido en sentido horario desde 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 cénit 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 cénit

Inconveniente:

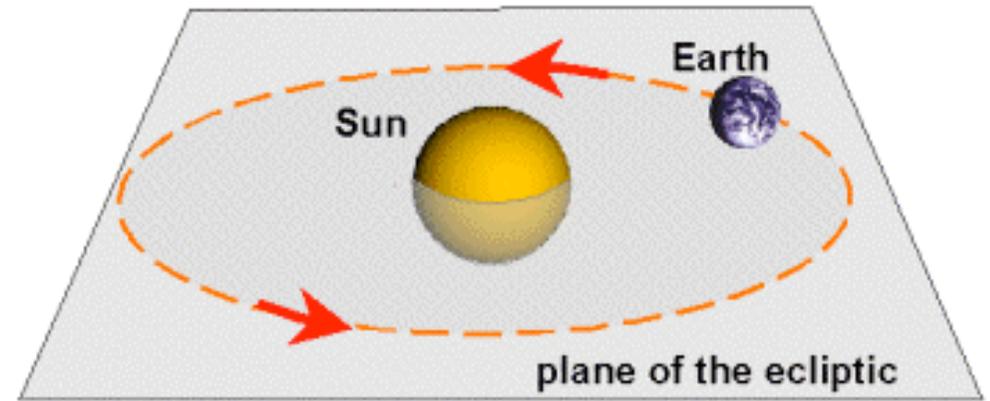
Las coordenadas horizontales cambian con el tiempo y dependen de la posición del observador

The Plane of the Ecliptic



* Not to scale *

FIG. 1

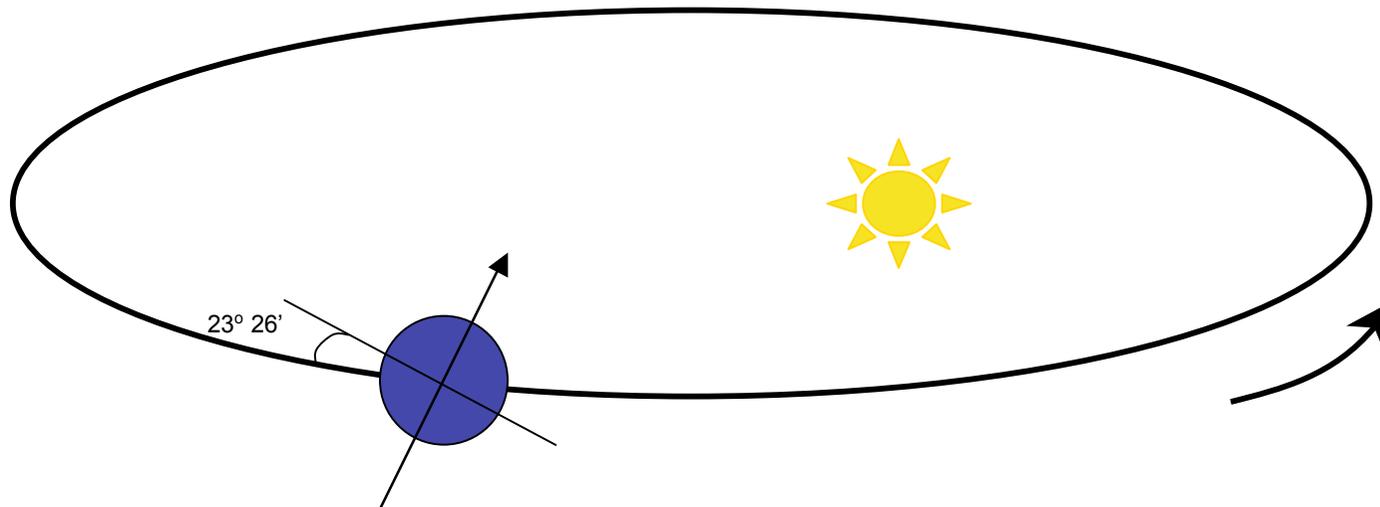


Eclíptica: Plano que contiene el sol y los planetas

La Eclíptica y la órbita de la Tierra

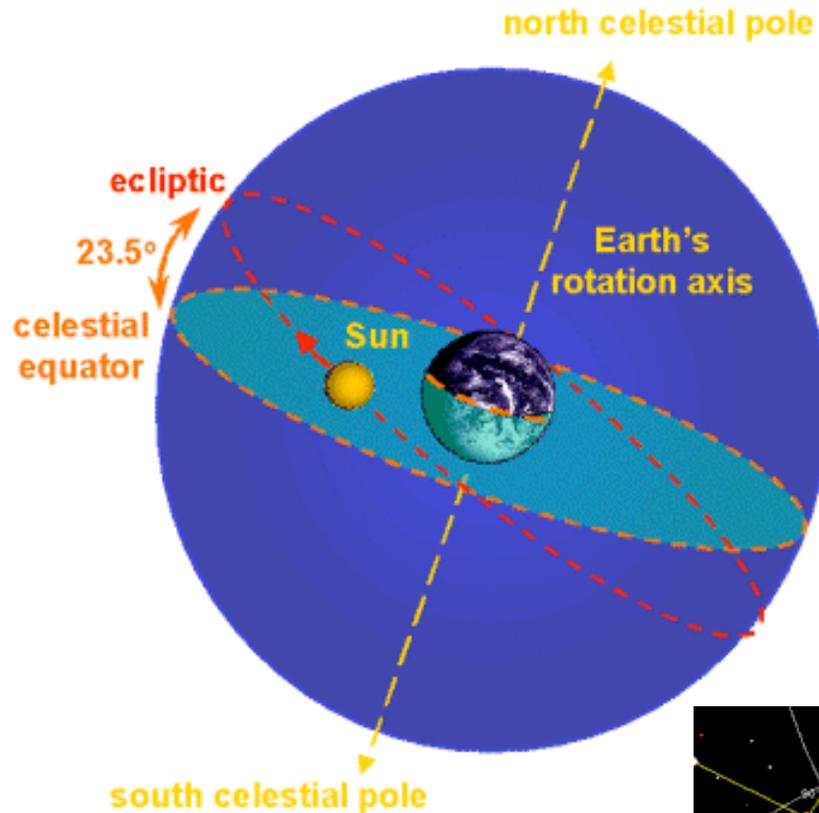
- La órbita de la Tierra alrededor del Sol es una **elipse** (poco excéntrica)
- El Sol está en uno de los focos → movimiento no uniforme a lo largo del año
- Traslación (365.25 días), rotación (aprox. 24h)
- El plano Ecuatorial está inclinado con respecto al plano de la eclíptica

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



La eclíptica desde la Tierra...

Astronomía de posición



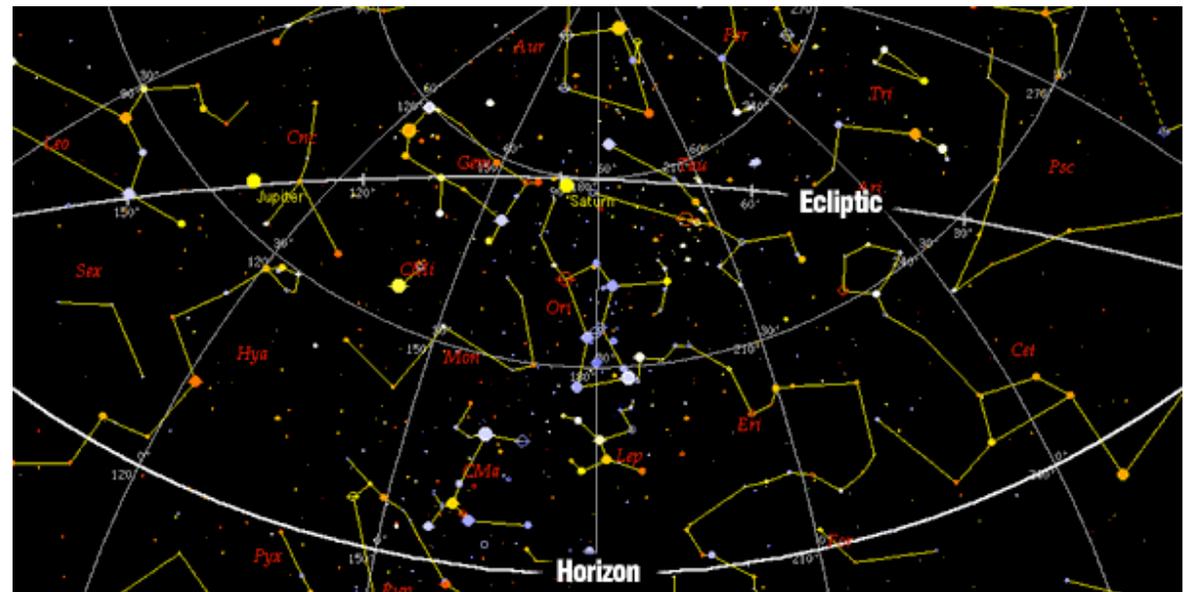
Recordemos:

Inclinación (u oblicuidad) de la eclíptica:

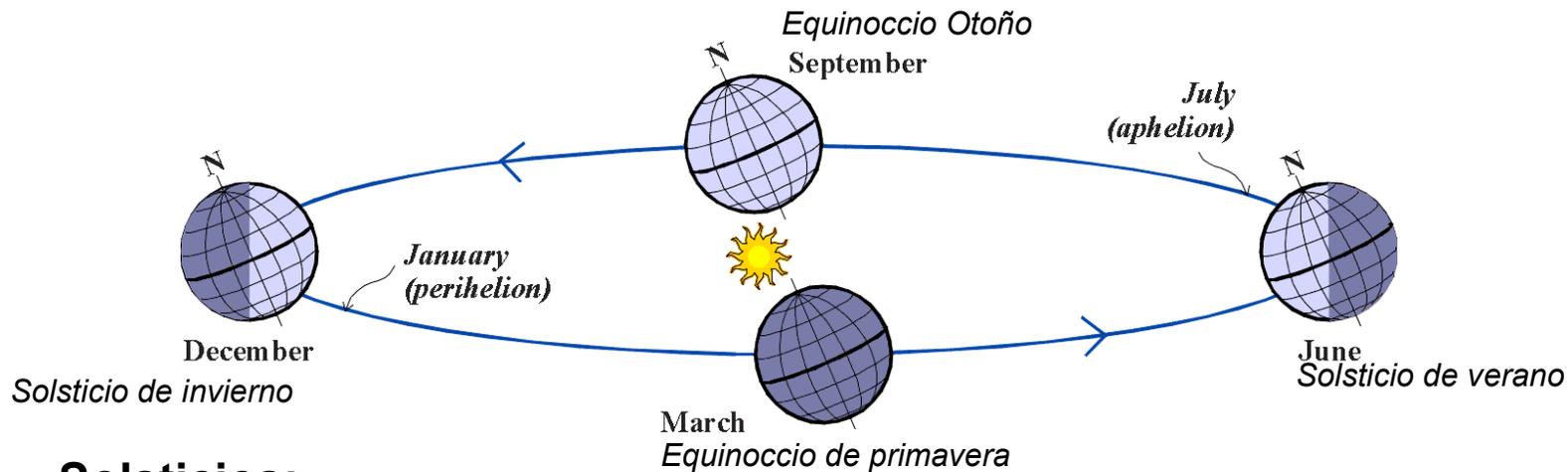
Ángulo entre plano ecuatorial y el plano de la eclíptica: $23^{\circ} 26'$

La eclíptica en el cielo:

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



Implicaciones de la inclinación de la eclíptica: equinoccios y solsticios

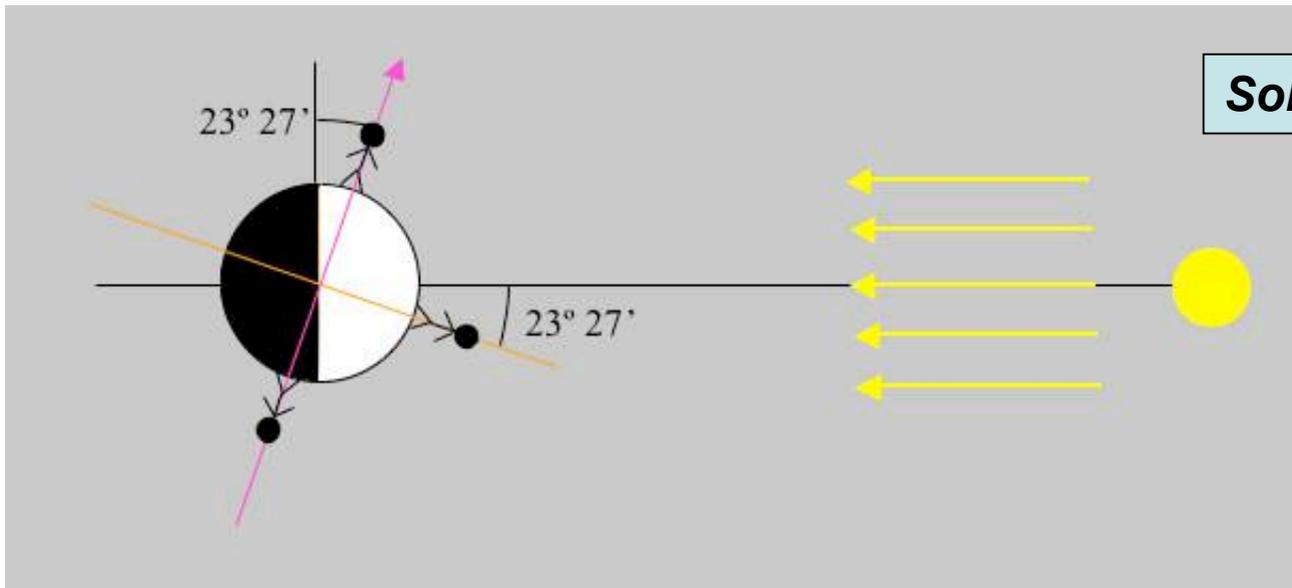


•Solsticios:

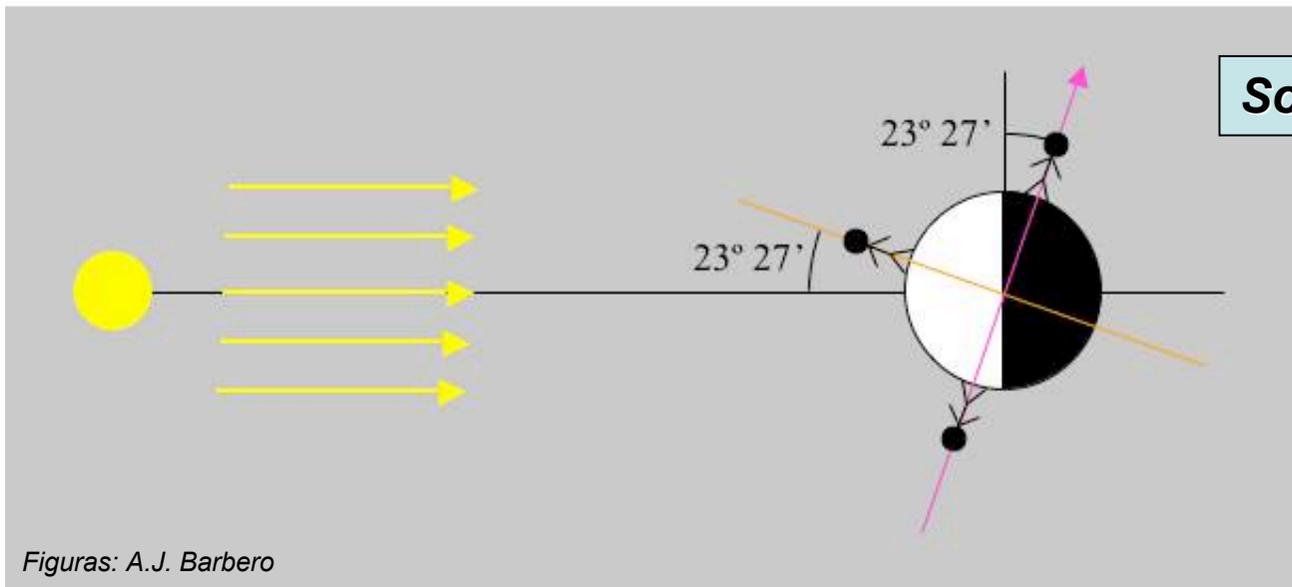
- Ocurren dos veces al año
- Cuando el ángulo entre el eje terrestre y la línea Sol-Tierra es máximo o mínimo

•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)



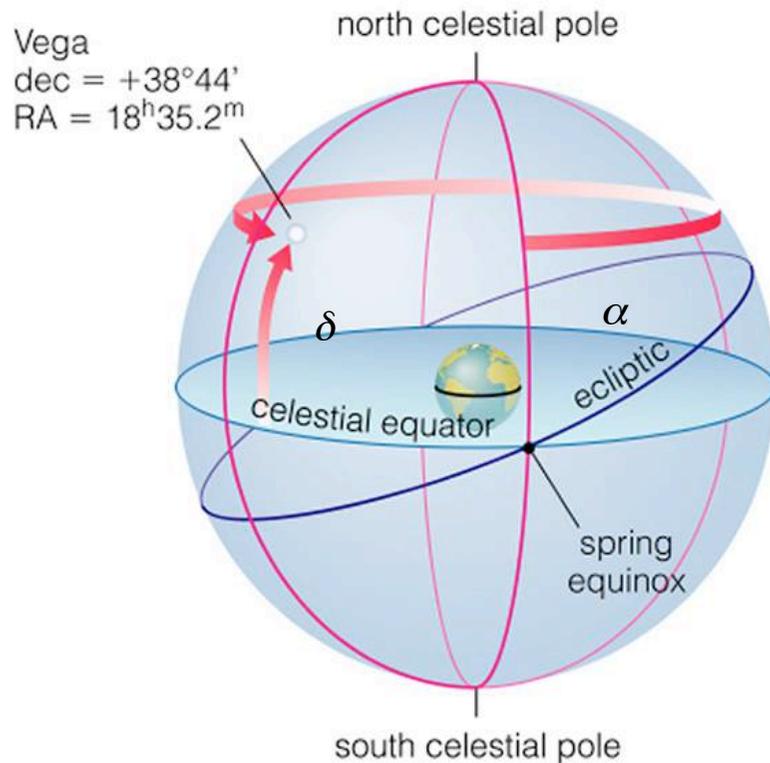
Solsticio de verano



Solsticio de invierno

Coordenadas ecuatoriales:

Plano de referencia Plano Ecuatorial



• δ , **declinación (Dec)**, distancia angular del plano ecuatorial [-90°, +90°]

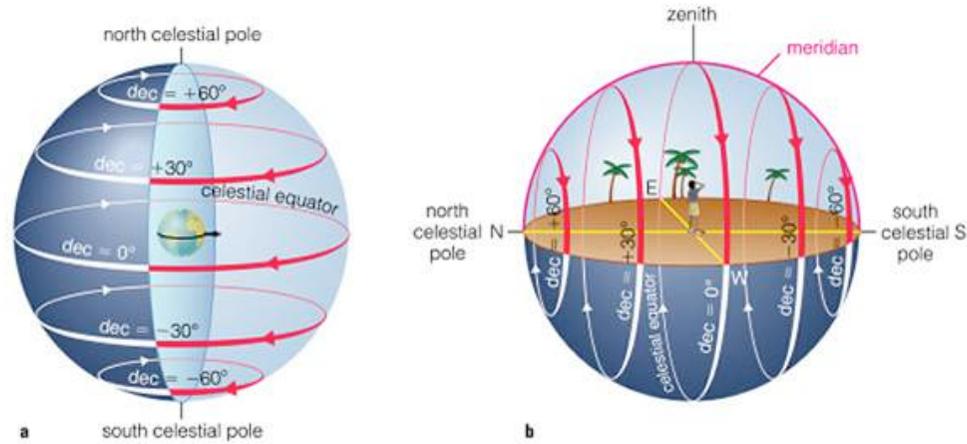
• α , **ascensión recta (RA)**, ángulo entre **equinoccio vernal** (o punto de Aries) y la intersección de la vertical del objeto con el plano ecuatorial [0h, 24h]
(convenio: medido en sentido anti-horario desde punto vernal. RA aumenta hacia el E)

• α y δ son *constantes*; no dependen del tiempo ni de la posición del observador

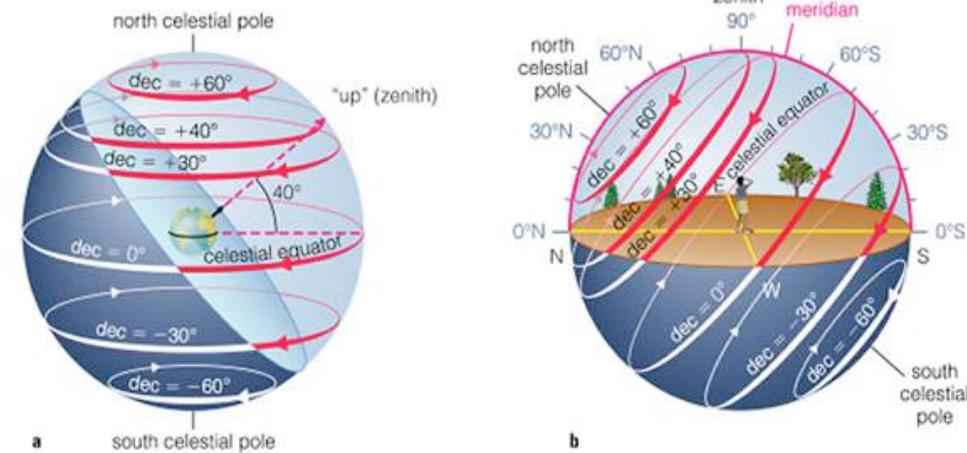
➡ catálogos

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

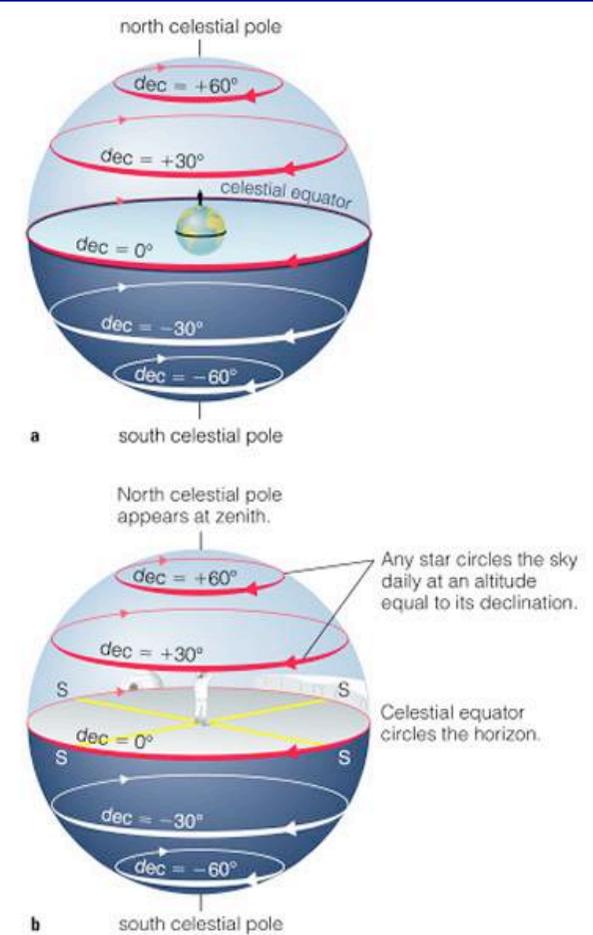
Astronomía de posición



Observador en Ecuador

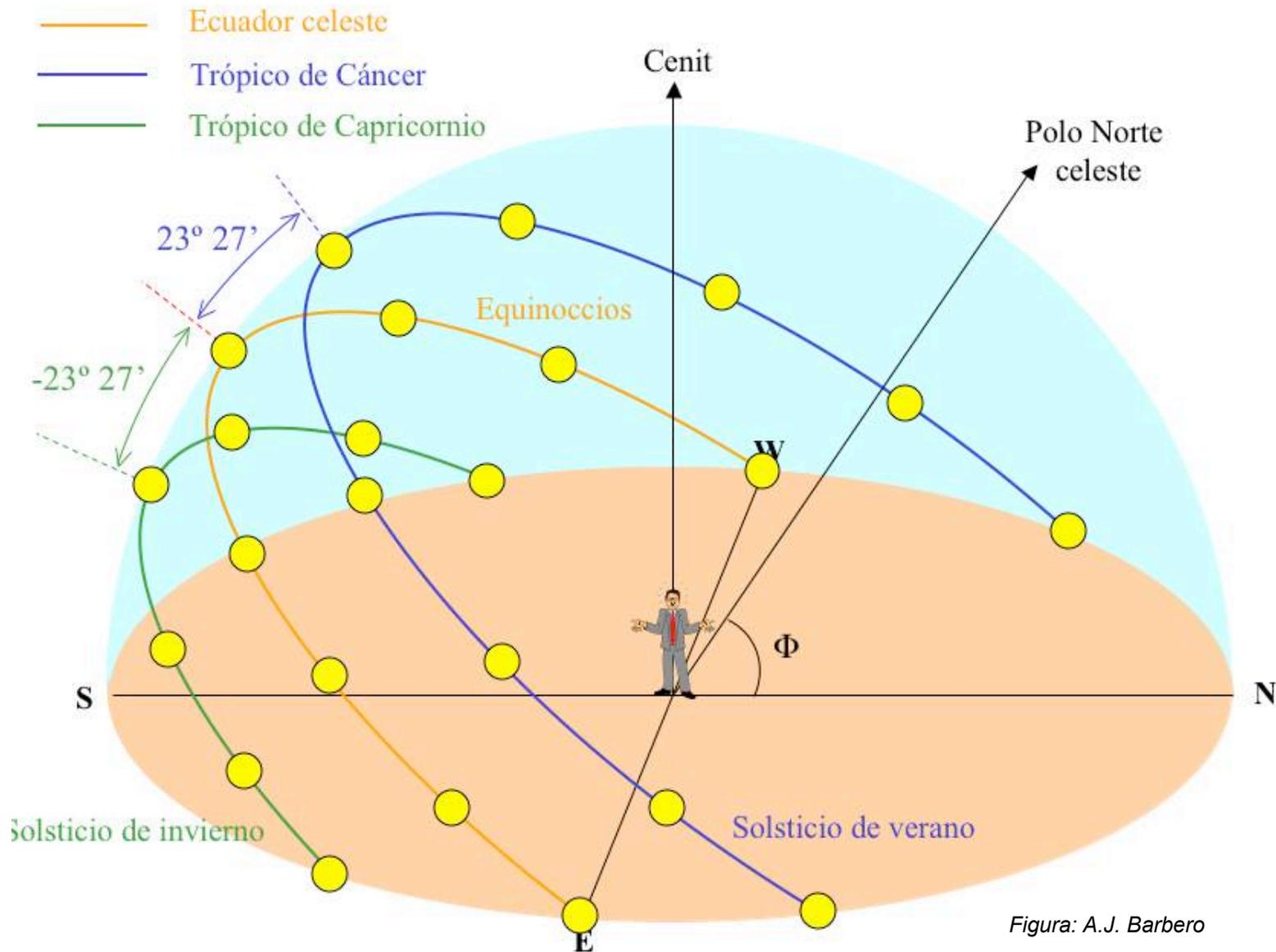


Observador a latitud 40°



Observador en Polo Norte

Movimiento aparente del Sol en latitudes intermedias



Estrellas circumpolares



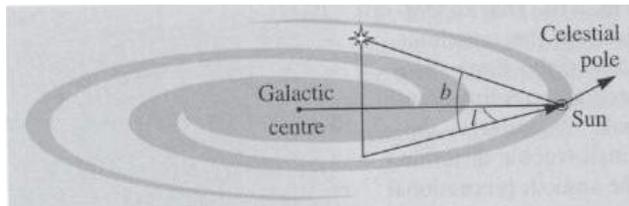
- Aquellas estrellas, que nunca salen o se ponen para un observador determinado.
- Depende de la latitud en la tierra
- Condición necesaria:

$$\delta > 90 - \varphi$$

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

• Sistema Galáctico:

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



(de Fundamental astronomy, Karttunen et al.)

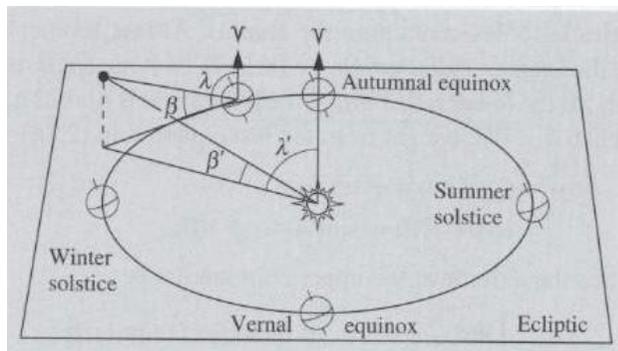
- **b** , latitud galáctica, distancia angular del plano de la Galaxia $[-90^\circ, +90^\circ]$

- **l** , longitud galáctica, medida en sentido anti-horario 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.)

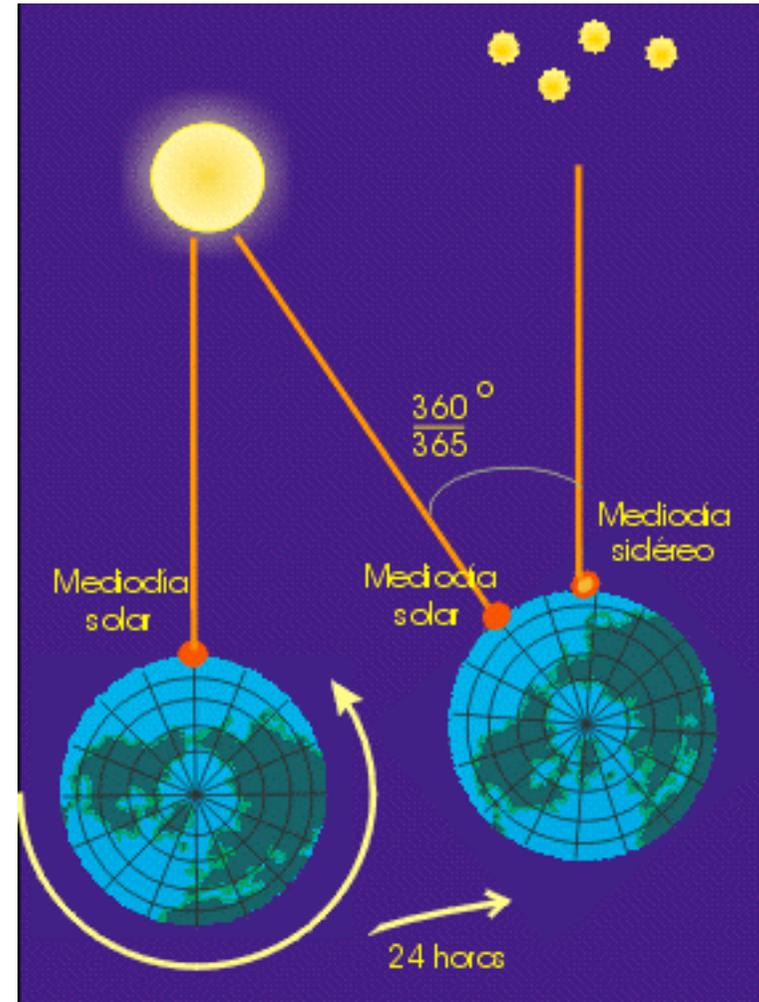
- **β** , latitud eclíptica, distancia angular del plano de la eclíptica $[-90^\circ, +90^\circ]$

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

- Útil para dar posiciones de objetos del sistema solar

Día sidéreo y día solar

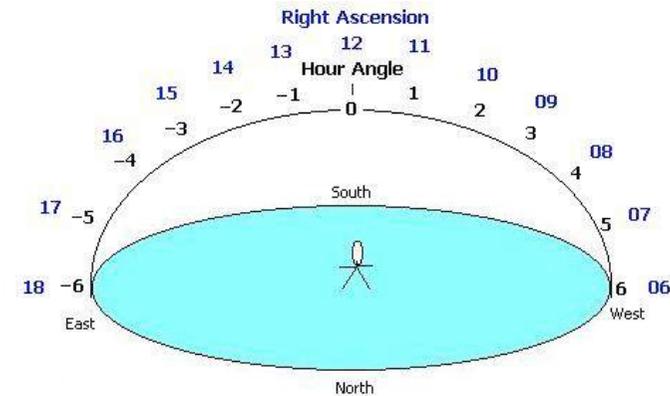
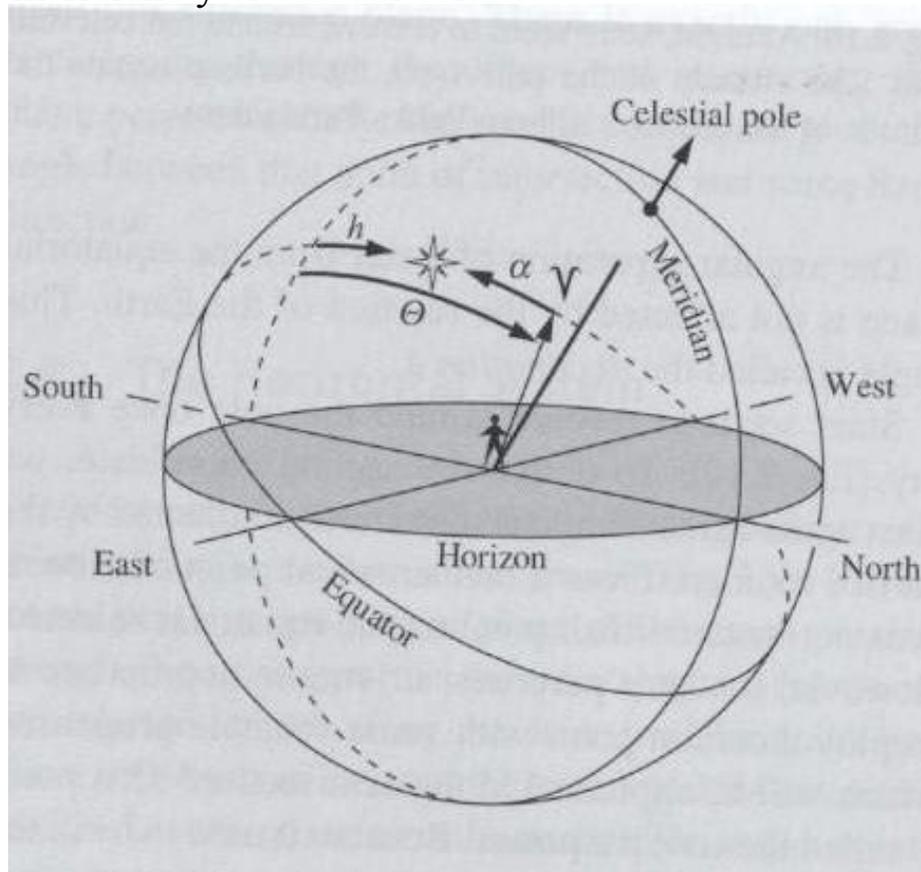
- Día solar y tiempo solar:
 - Cuando la tierra tiene otra vez la misma orientación hacia el sol.
 - El sol no se mueve uniformemente durante el año → Se define día solar medio para tener un día de igual duración.
 - Duración de un día solar medio: 24 horas
 - Tiempo solar medio: Ángulo horario del sol 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 sidéreo 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 ascensión recta: intersección entre el meridiano y el ecuador celeste

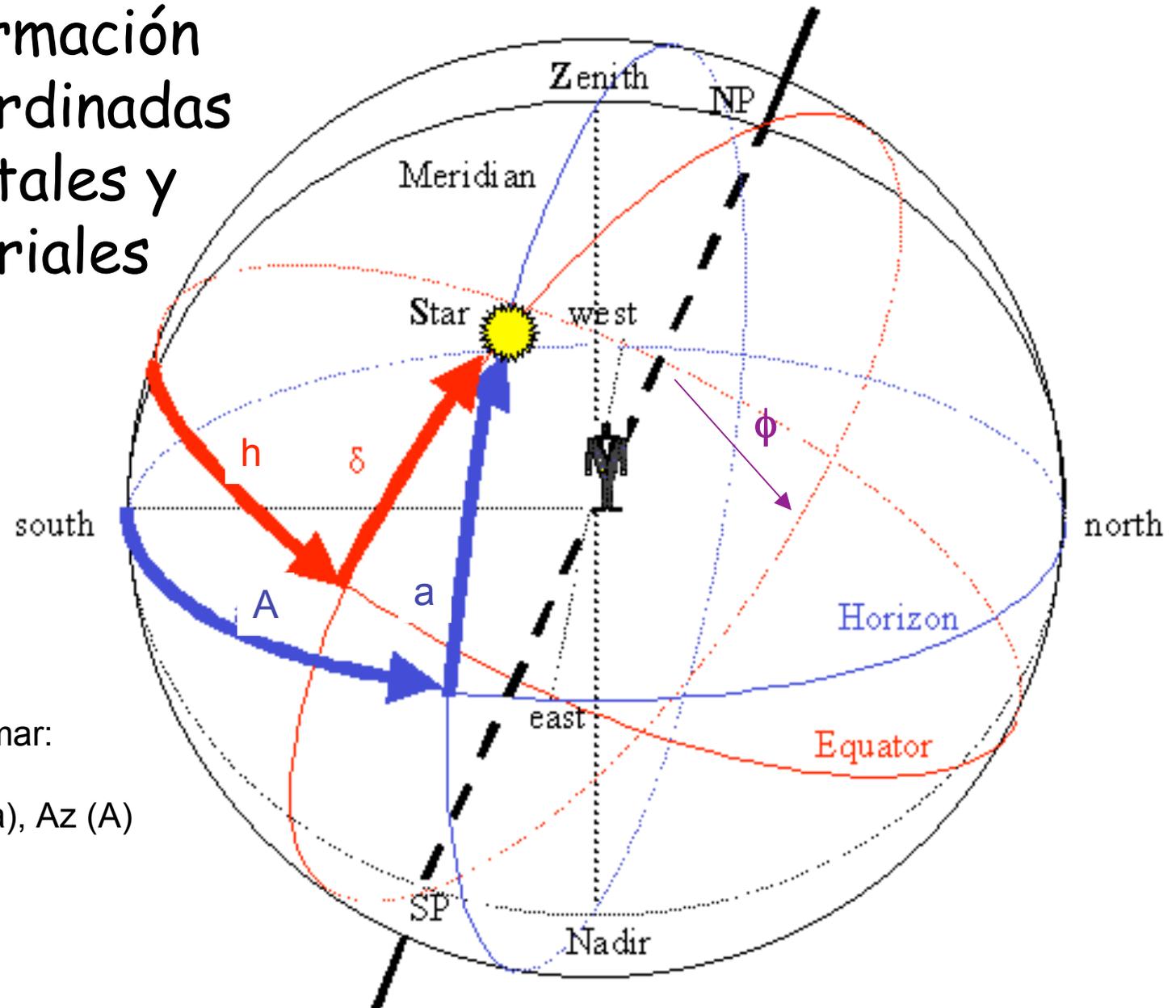


El ángulo horario del equinoccio vernal es el **tiempo sidéreo (Θ)**

$$\Theta = h + \alpha$$

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

Transformación entre coordenadas horizontales y ecuatoriales



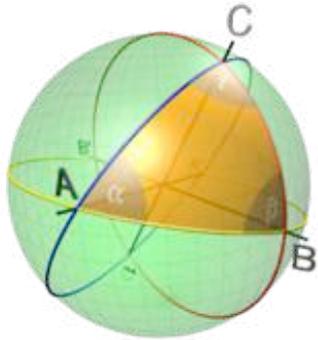
Queremos transformar:

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

Necesitamos saber

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

Trigonometría esférica



- Triángulo 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 triángulos esféricos:

- Fórmula del seno:

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

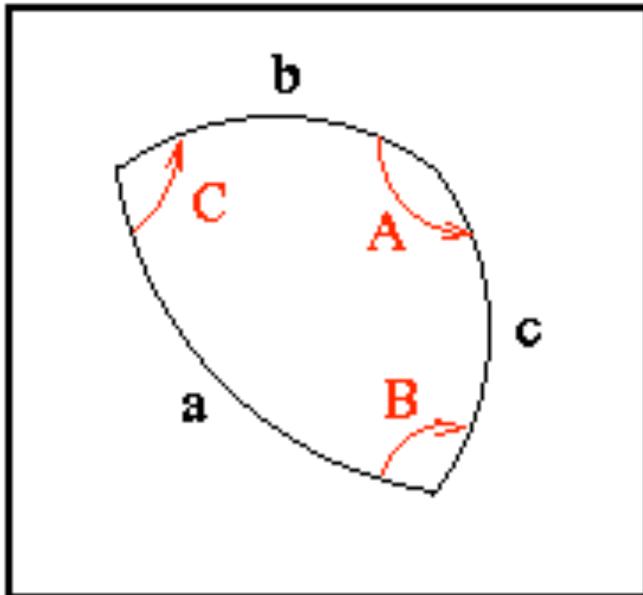
- Fórmula del coseno:

$$\cos(a) = \cos(A)\text{sen}(b)\text{sen}(c) + \cos(b)\cos(c) \quad *$$

- Fórmula del seno-coseno:

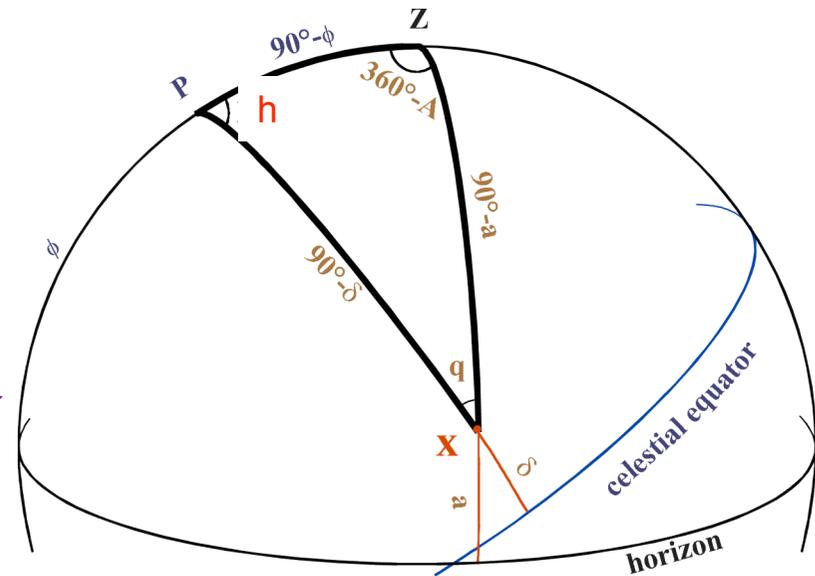
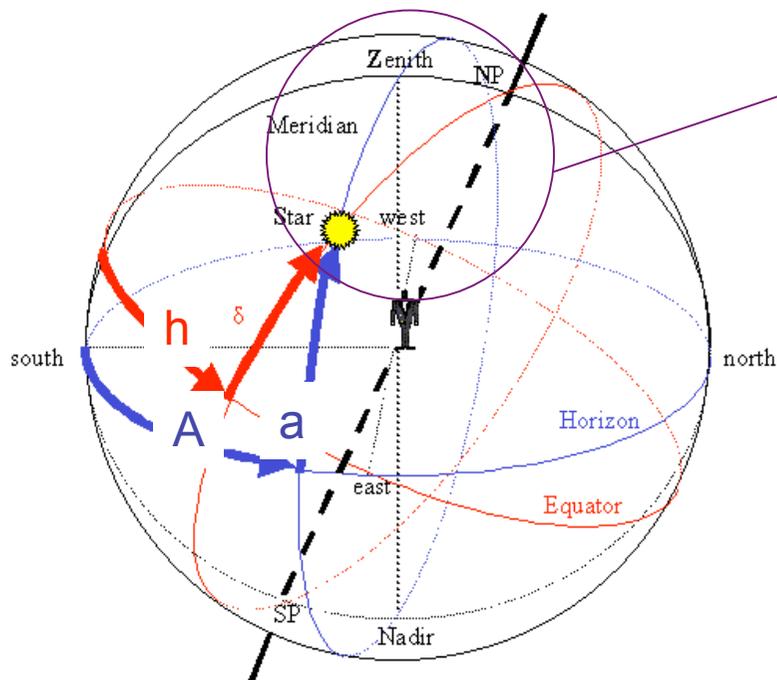
$$\cos(B)\text{sen}(a) = -\cos(A)\text{sen}(b)\cos(c) + \cos(b)\text{sen}(c)$$

* **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 triángulo 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 :

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

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

3. Aplicando dos veces la fórmula del coseno :

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

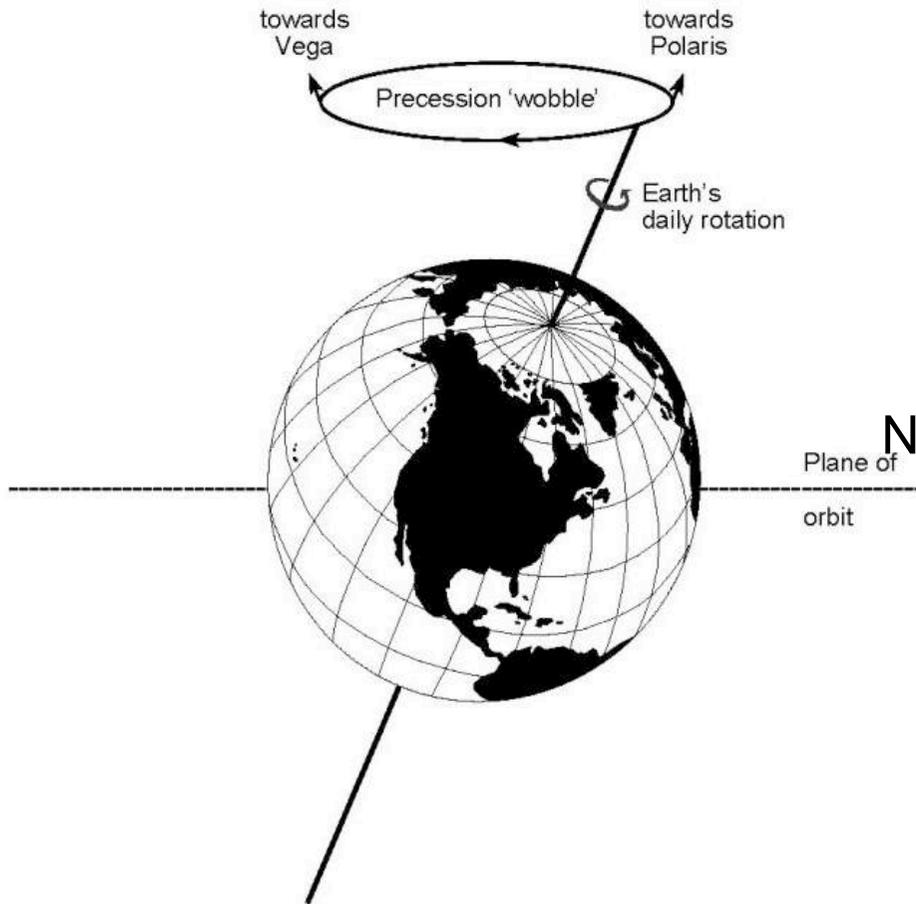
$$\sin(\delta) = -\cos(A) \cos(a) \cos(\Phi) + \sin(a)\sin(\Phi)$$

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

Alteraciones: Precesión y nutación

Precesión:

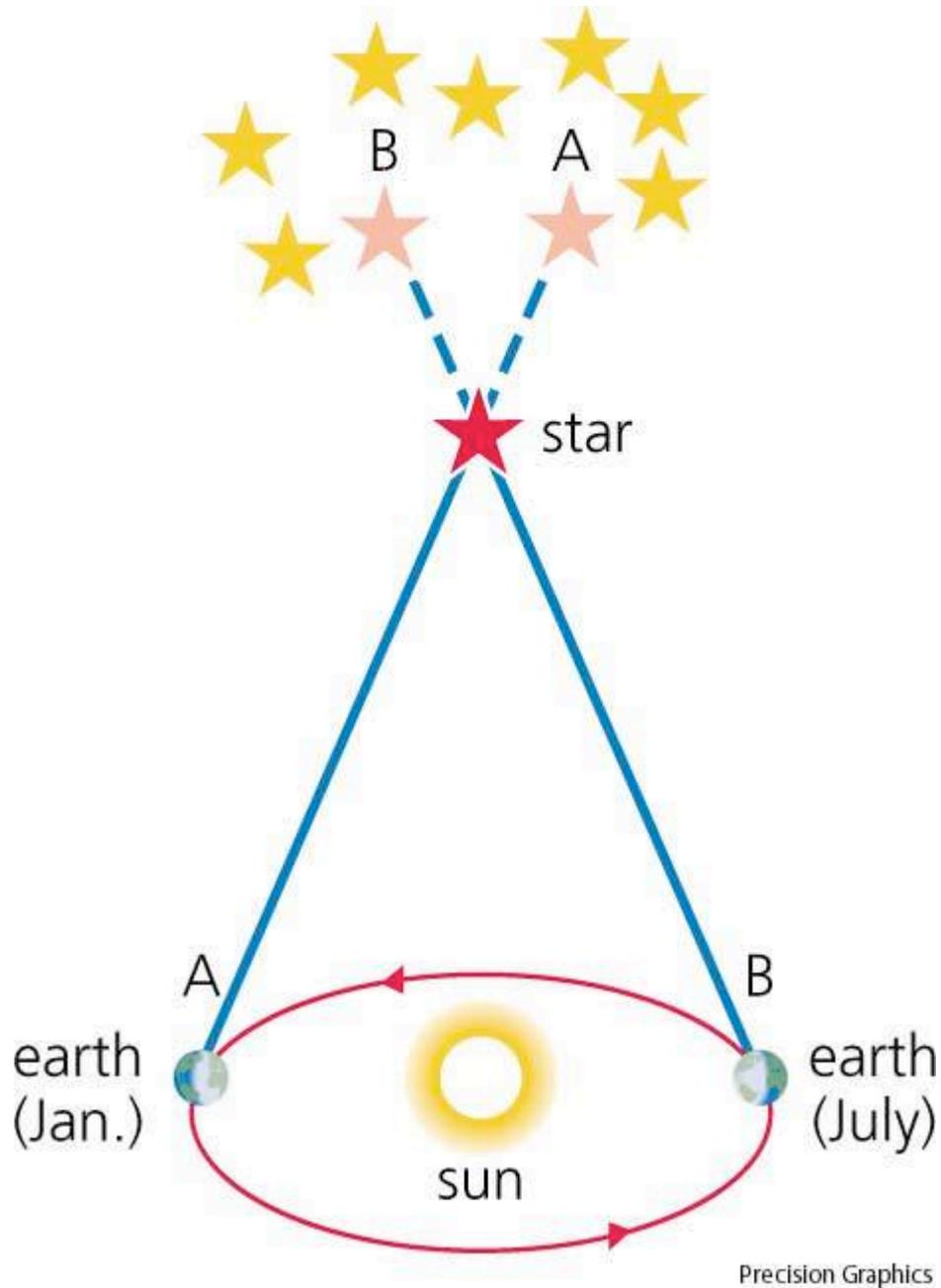
- Debido al efecto de marea de los demás miembros del sistema solar, sobre todo sol y luna.
- Periodo: 26.000 años
- El equinoccio vernal se desplaza a los largo de la eclíptica en 50.26 segundos de arco por años



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



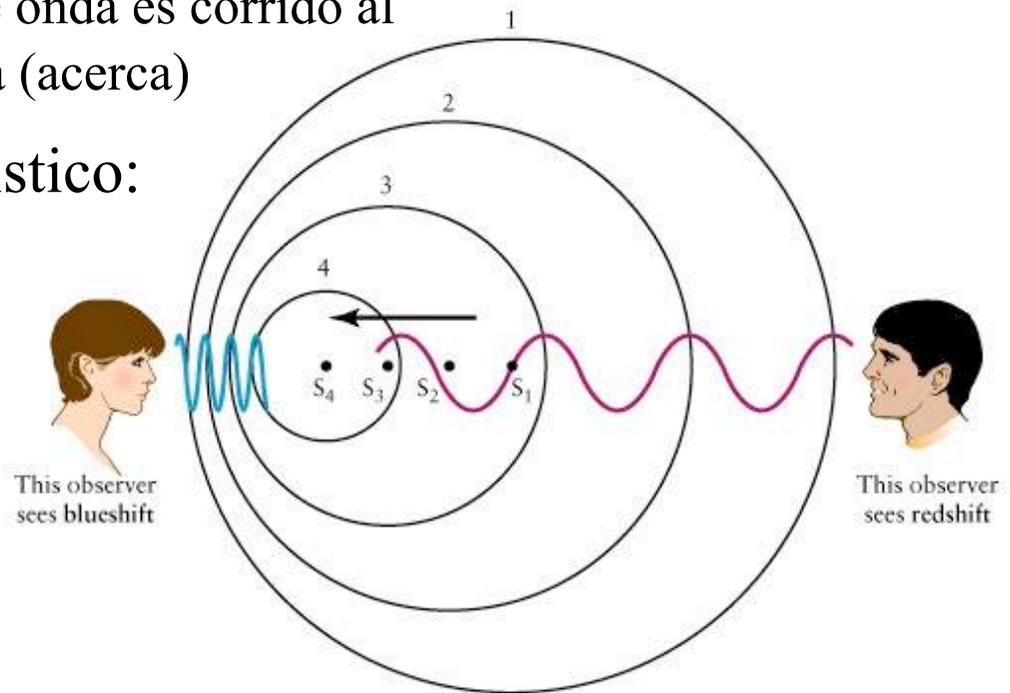
Existe paralaje diurno y paralaje anual.

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:

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



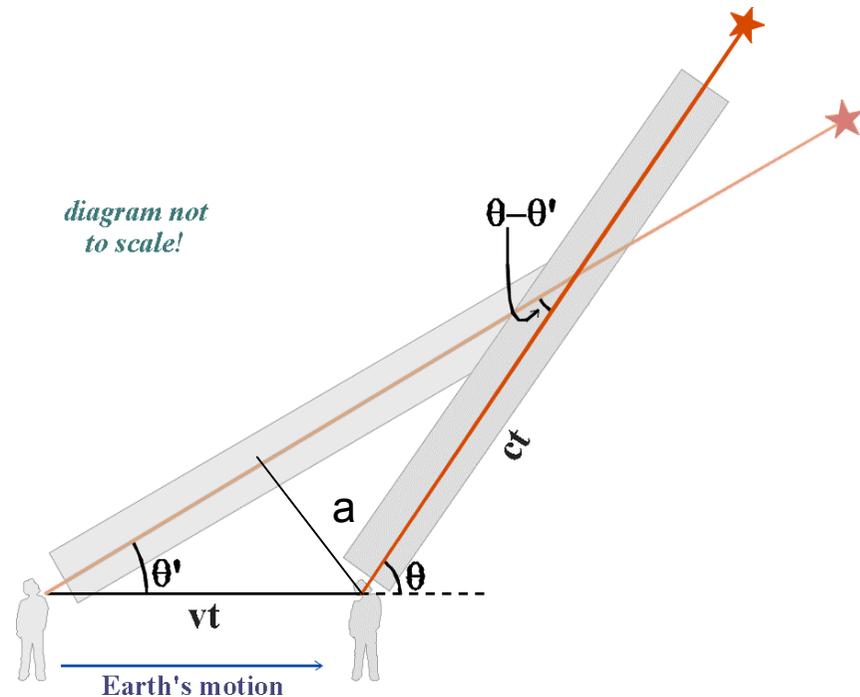
Otras alteraciones: aberración

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 pequeños → no es aconsejable observar objetos por debajo de 10-20 grados.

