

# Historia de nuestros conocimientos sobre galaxias

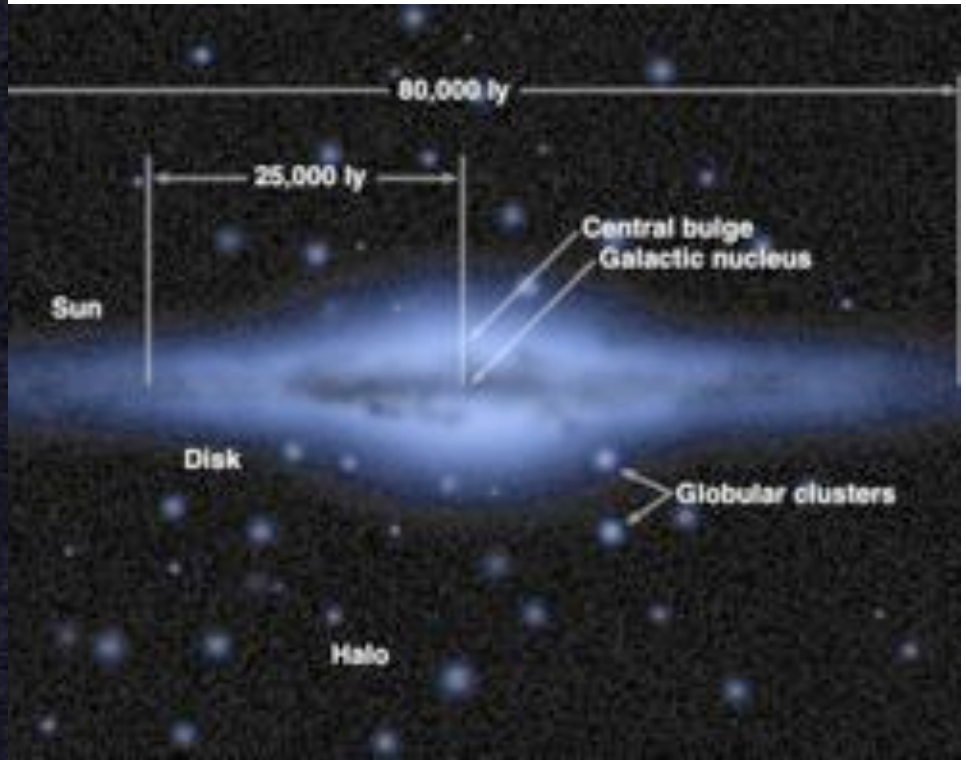
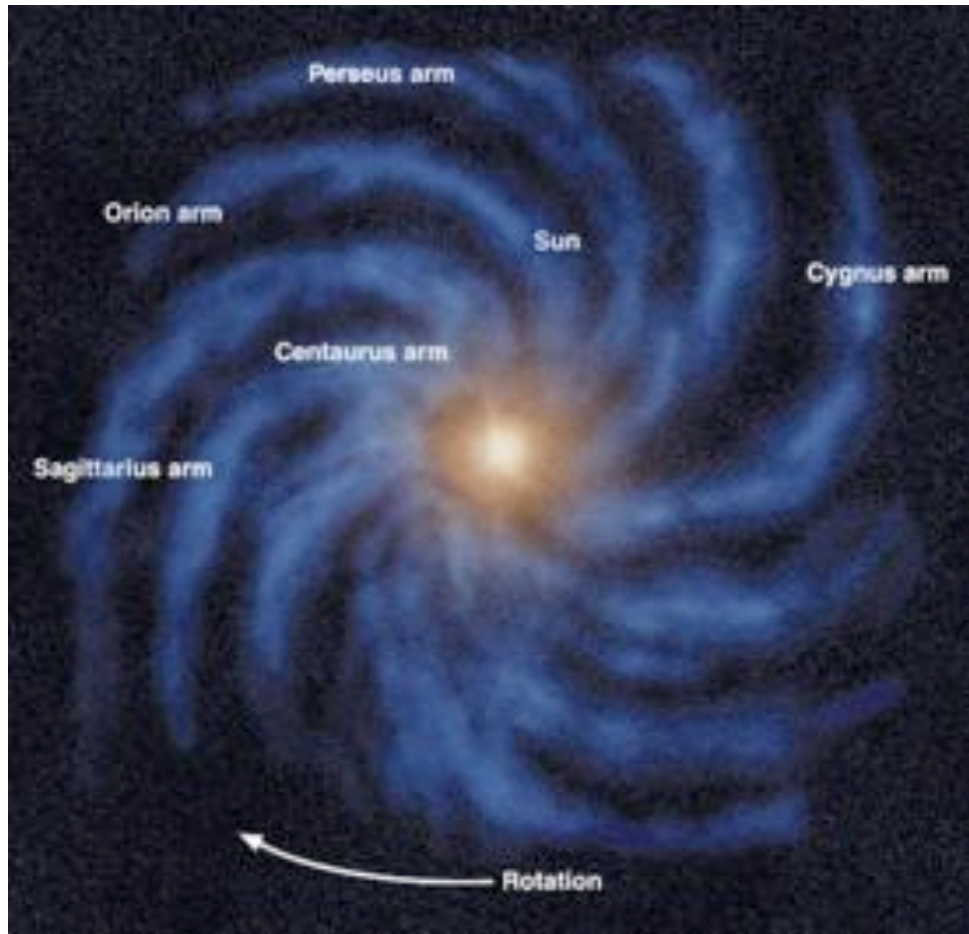
## 1. Nuestra galaxia: La Vía Láctea

- Estructura
- Formación estelar
- Centro Galáctico

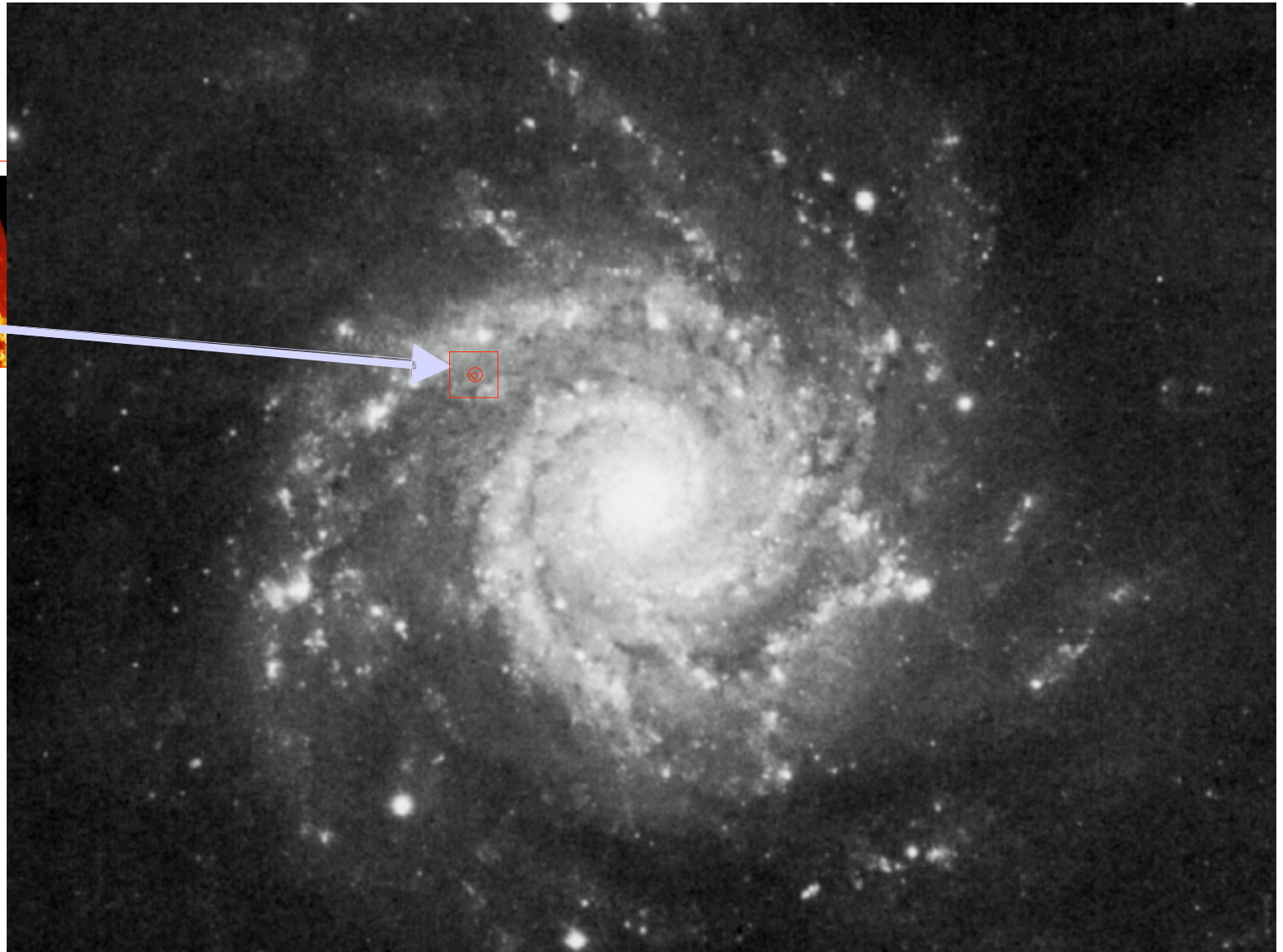
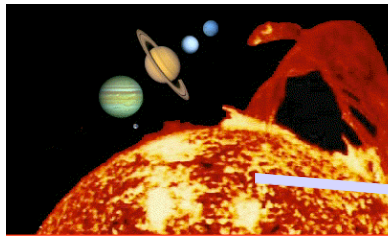
## 2. Galaxias

- Propiedades
  - Clasificación
  - Luminosidad y Tamaño
  - Masa y materia oscura
- Galaxias con Núcleo Activa
- Evolución
  - Entorno
  - Interacciones entre galaxias
  - Galaxias en el pasado

# 1. Nuestra galaxia: La Vía Lactea



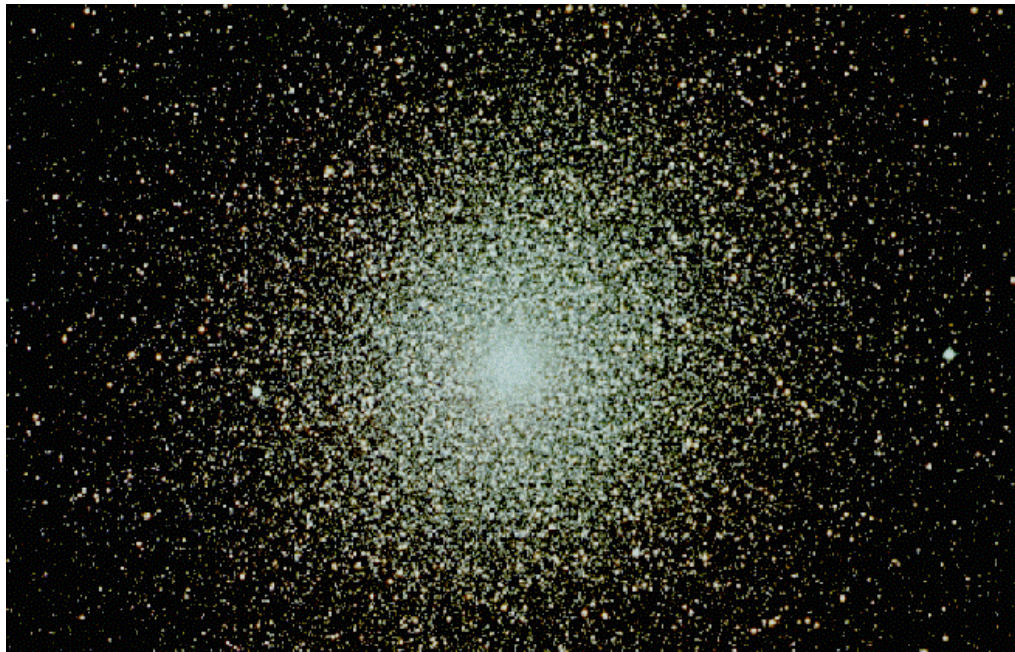
- La Vía Láctea es una galaxia espiral parecida a ésta
- Todas las estrellas (y el gas) están rotando alrededor del centro galáctico
- Duración de una rotación: unos 200 000 años (el sol ya ha dado 20000 vuelta durante su vida)



Diametro tipico:  
30 kpc  
(90 000 años luz)

# ¿De qué está formada una galaxia espiral?

Estrella viejas y jóvenes



Cúmulo globular



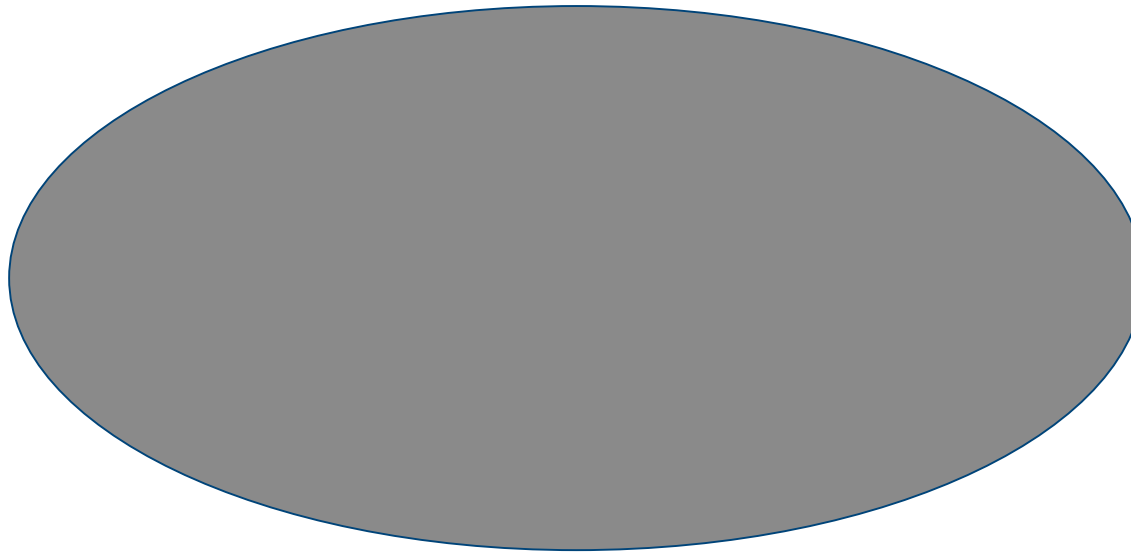
Cúmulo  
Abierto  
(Pléyades)

# Gas y polvo interestelar

- **Gas ionizado**
  - Alrededor de estrella jóvenes y masivas
- **Gas atómico**
  - Está en toda la galaxia
  - Más extendido que las estrellas
- **Gas molecular**
  - Concentrado en las zonas interiores de las galaxias
  - Indica sitios de nacimiento de estrellas
- **Polvo interestelar**
  - Presente en las zonas de formación estelar

...y campo magnético y rayos cósmicos

.....y materia oscura



- Su composición es desconocida
- Vemos los efectos de su gravitación
- El >90% del universo está hecho de materia oscura

## ¿Cómo sabemos que la Vía Láctea es así?

Es difícil saberlo porque:

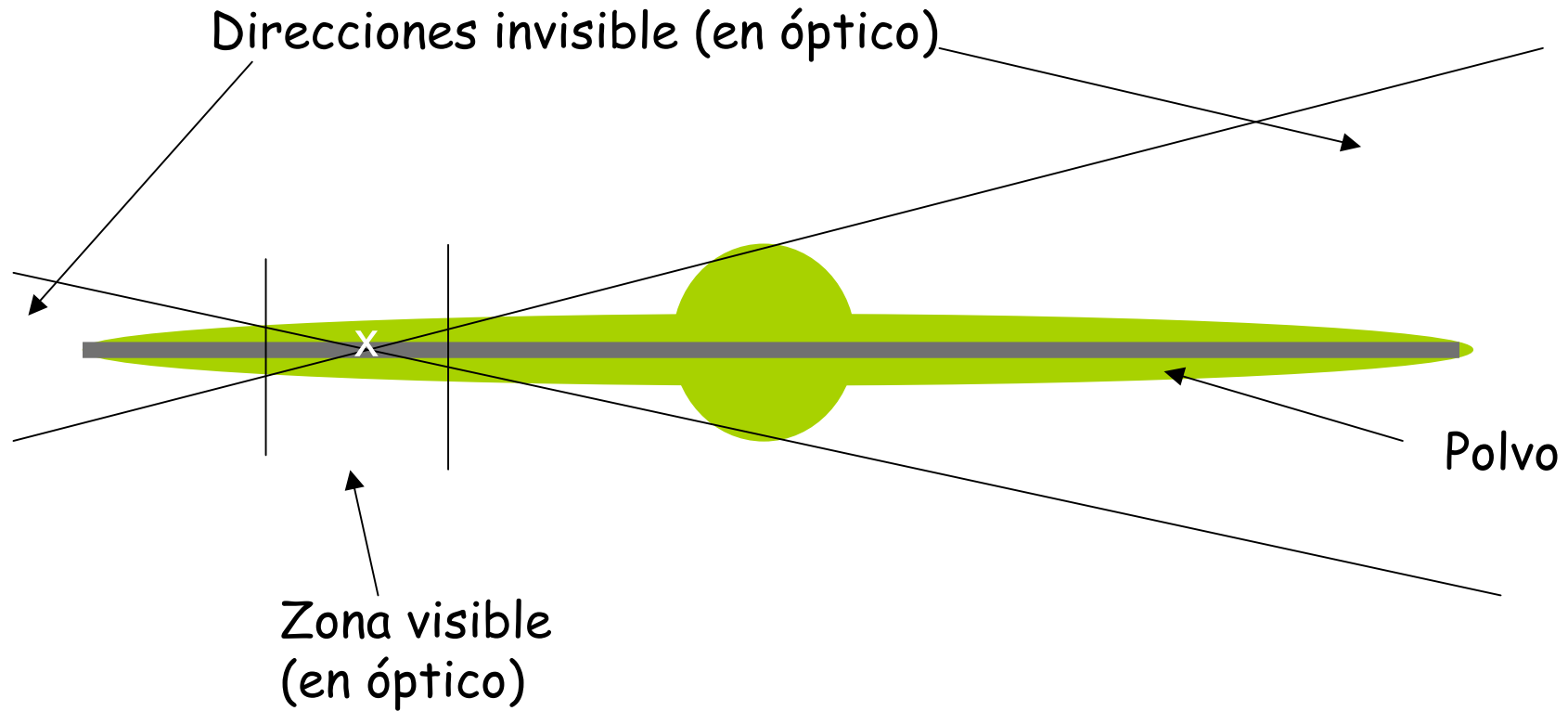
- El polvo interestelar nos impide una visión completa (como a un viajero en la niebla)
- Estamos dentro del disco - no podemos verlo “desde arriba”



Vista panorámica de la Vía Láctea

# Problema: Polvo interestelar

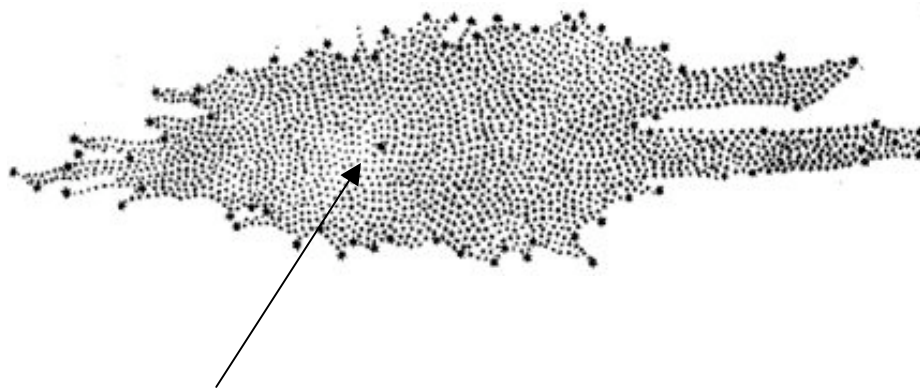
- Disco está lleno de polvo que impide la vista a lo largo de el





# Primeros intentos de averiguar la forma de la Vía Láctea

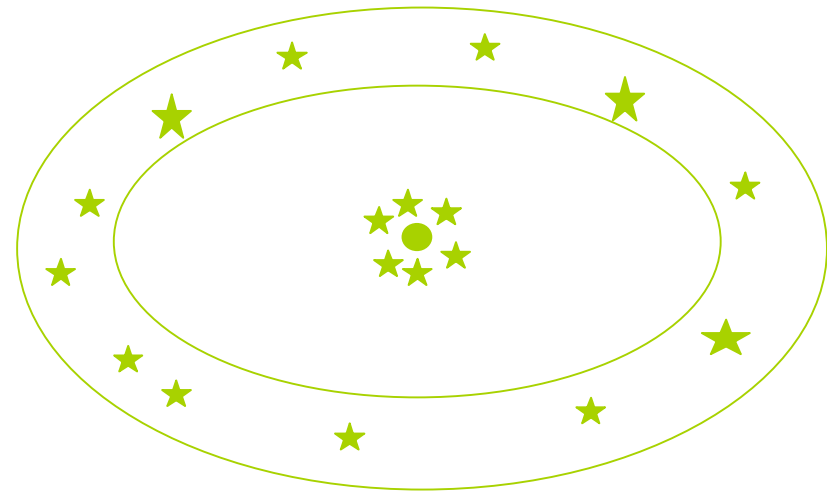
Herschel (1785): Estructura deducida a través de un cuento de estrellas. El Sol está en el centro.



Sol

Eddington (1912): "Stellar Movements and the Structure of the Universe":

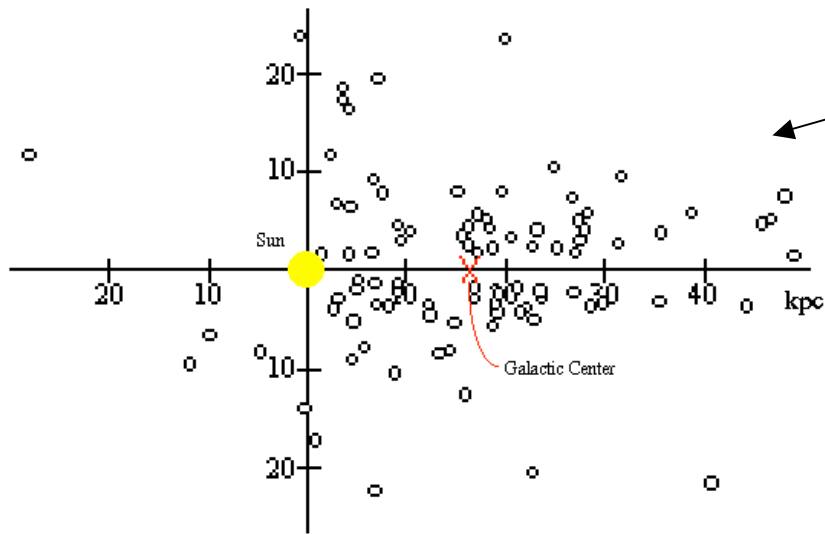
Cúmulo central con sol en el centro y alrededor torus con estrellas



Averiguar la forma de la Vía Láctea mirando la distribución de las estrellas es difícil (o imposible sin más información) - ¿porqué?

## 10 años después: Modelo correcto de Shapley

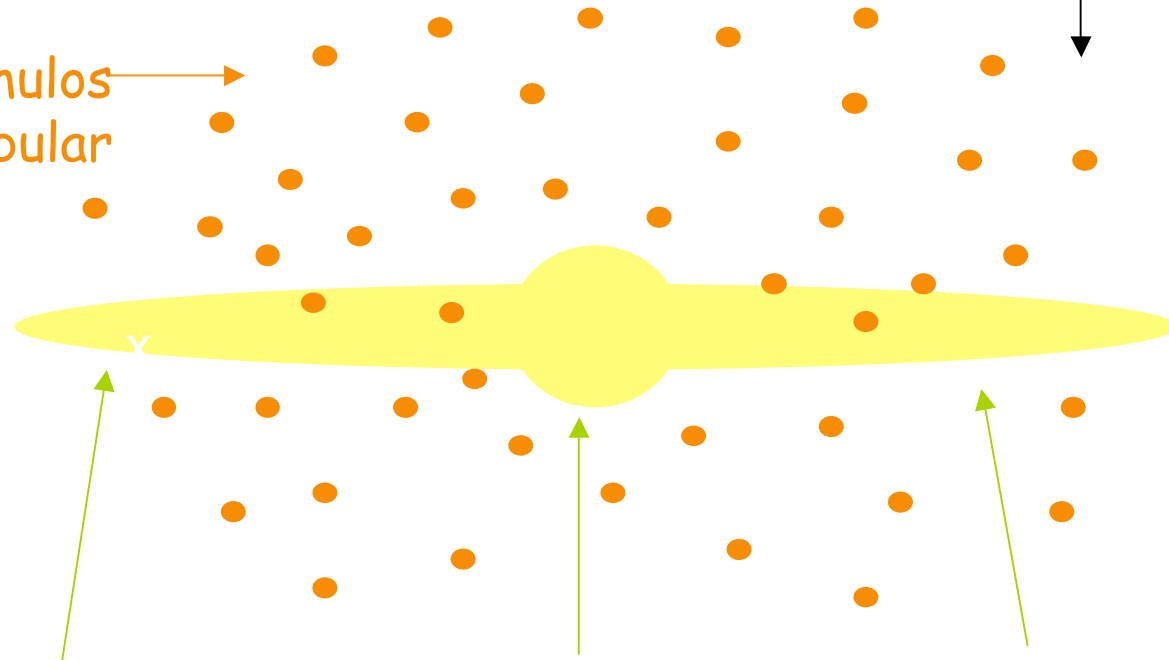
- Shapley usó la **distribución de cúmulos globulares** suponiendo que tienen una distribución approx. esférica (buena hipótesis). Ventajas: Son más luminosas que estrellas → puede medir la estructura de la Vía Láctea a distancias más grandes
- Tenía que determinar las distancias a los cúmulos. Lo hacía:
  - Con estrellas Cefeides. El calibró la relación periodo-luminosidad basándose en movimientos propios.
  - Para los cúmulos distantes donde no podía detectar estrellas Cefeides, suponía que su diámetro real era igual al diámetro medio encontrado para cúmulos cercanos (75 años luz).



Distribución de cúmulos globulares  
medido por Shapley → el Sol no  
está en el centro

Módulo de la Vía Láctea basado en las  
observaciones de Shapley

Cúmulos  
globular  
es

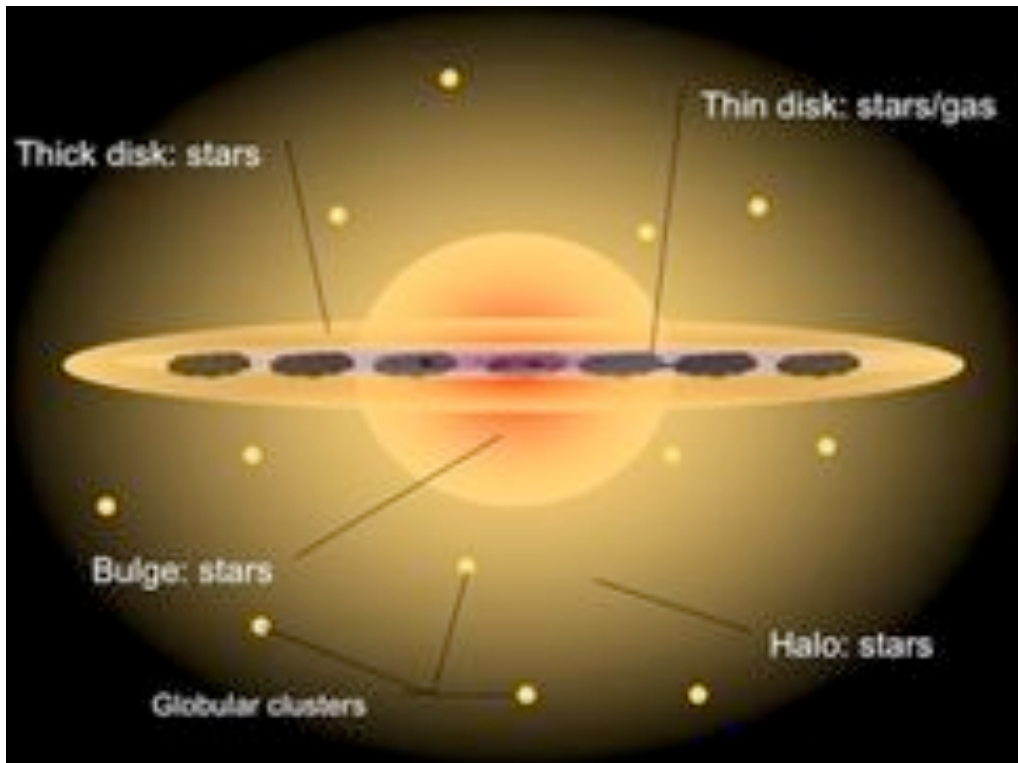


Posición del sol

Bulbo

Disco espiral

# Estructura de la Vía Láctea



- Gas y polvo, formación estelar reciente se limite al disco
- Las estrellas se distinguen:
- Populación I: en el disco, alta metalicidad (más jóvenes)
- Populación II: en el halo, baja metalicidad (más viejos)
- ¿Cómo se puede deducir de la metalicidad la edad de una estrella?

# Evolución química

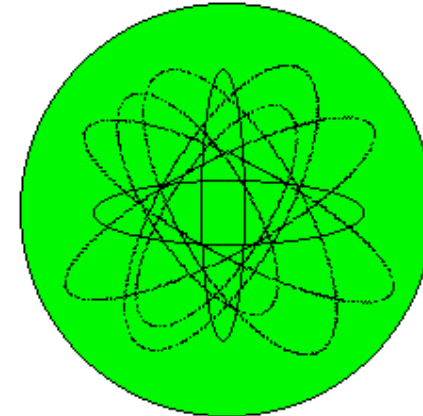
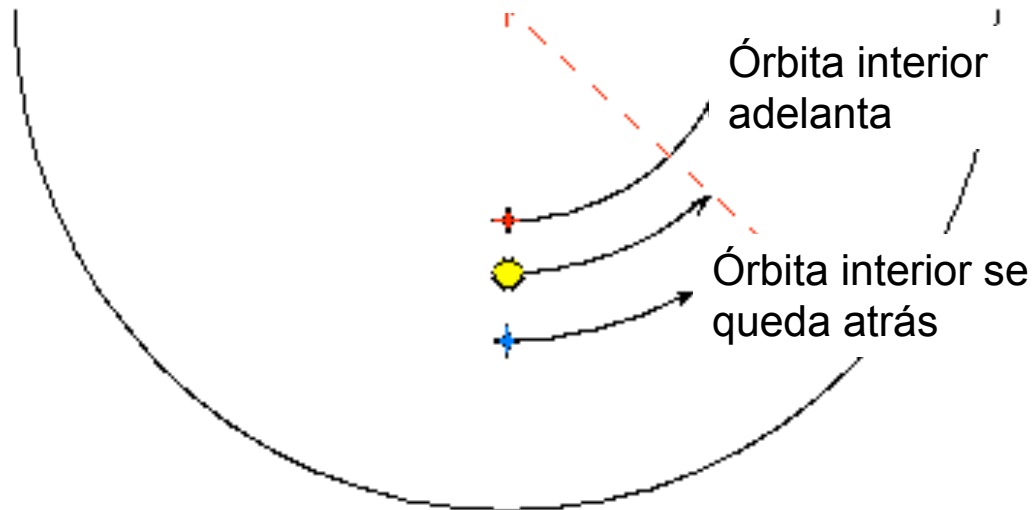
- Gas primordial consiste (sobre todo) de H y He
- Los demás elementos (metales): formado en estrellas, sobre todo supernovas
- Existe relación entre
  - la edad de una estrella y su metalicidad
    - más joven → más metales
  - el sitio de una estrella y su metalicidad
    - halo → baja metalicidad
    - disco → metalicidad más alta,
    - Metalicidad aumenta con distancia al centro galáctico

# Cinemática en el halo y el disco

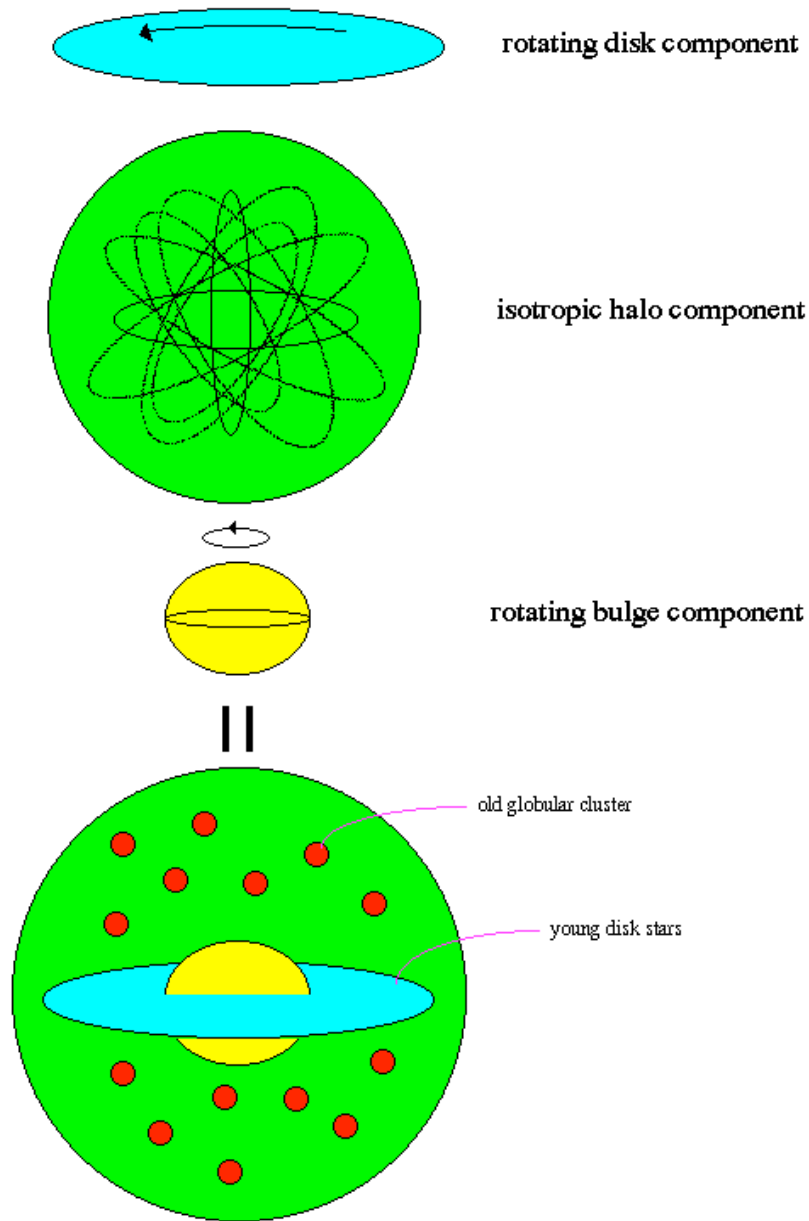
En el disco

En el halo: Movimientos en forma de elipse, orientado de forma aleatoria

Rotación diferencial



# Componentes de la Vía Láctea



Vía Láctea → Sistema dinámico de estrellas, constelaciones cambian con el tiempo

# Colisiones entre estrellas

Tantos movimientos aleatorios: ¿Cuándo choca el sol con otra estrella?

- Diámetro del sol: 2.3 segundos-luz
- Distancia a la próxima estrella: 2 años-luz
- Distancia entre estrellas: 30 millones su diámetro: no chocan

Hacer estimación mejor: Considerar choque si hay efecto gravitatorio notable

→ tiempo promedio para que choquen dos estrellas en la Vía Láctea  $\sim 10^{13}$  años

Edad del universo:  $1.3 \cdot 10^{10}$  años, unos mil veces menos

→ Sol no ha chocado todavía





1.

## Posible formación de la Vía Láctea

2.

1. De una nube esférica nacen las primeras estrellas y cúmulos estelares
2. La nube en rotación empieza a contraerse hacia el plano ecuatorial
3. Estrellas y cúmulos ya formados se quedan en el halo
4. Las nuevas generaciones de estrellas tienen una distribución más plana
5. Ahora hay un disco de la galaxias fino.

3.

4.

Parece convincente, pero.....en los años 1980 surgieron dudas, porque:

- Las estrellas con metalicidad más baja están en el bulbo, no en el halo
- No hay estrellas con metalicidad 0 (es decir, hecho de gas primordial)

5.

- .....

Hoy se piensa que este modelo no es correcto

# Formación estelar en galaxias

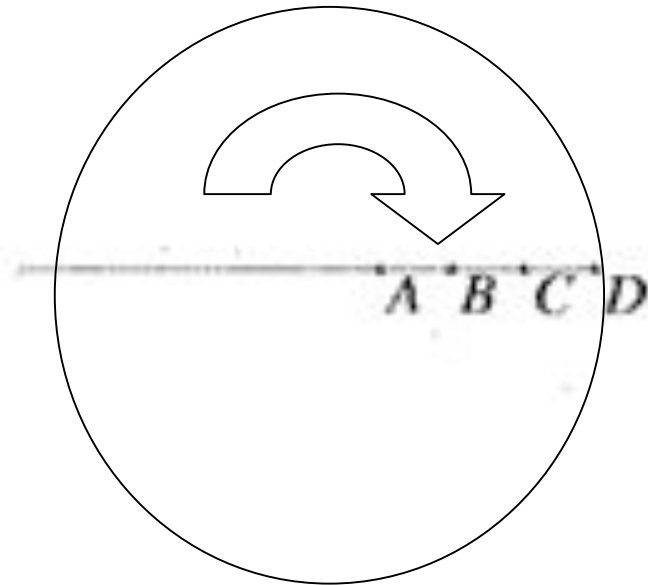


- Las estrellas se forman cuando nubes de gas colapsan, pero ¿qué provoca este colapso?
- Una causa: **Ondas espirales**
- Las ondas espirales son zonas de formación estelar activa, visible en:
  - Estrellas jóvenes
  - Gas ionizado
  - Gas molecular y polvo

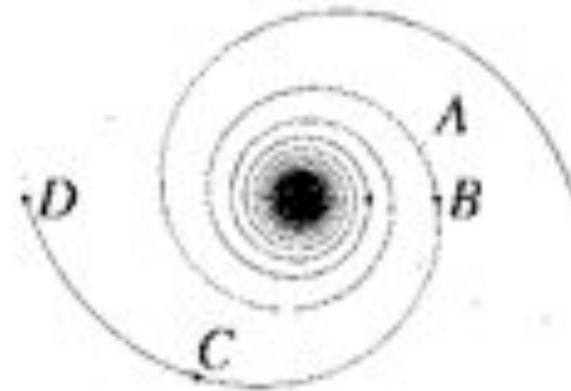
# ¿Qué son los brazos espirales?

- Podría ser que esta distribución se debe a la rotación diferencial?

Comienzo

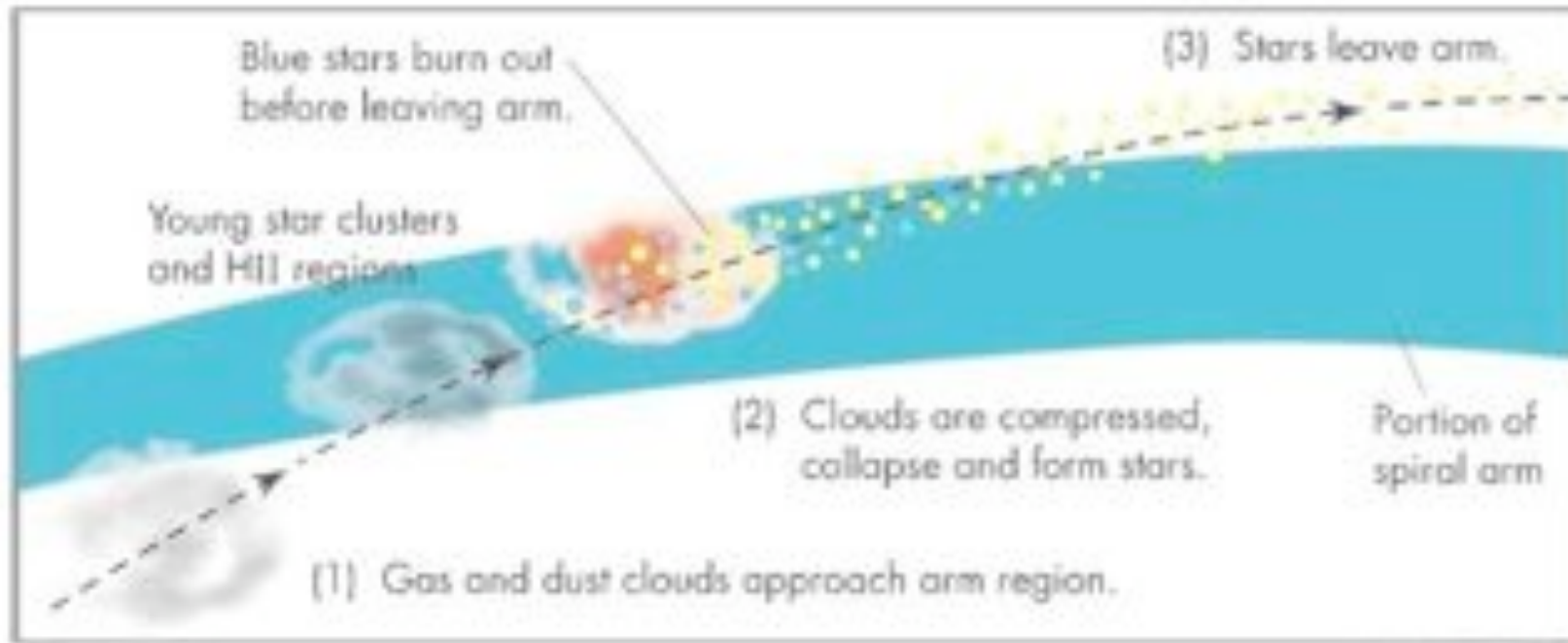


Después de varias vueltas



- **¡No!** Porque la rotación diferencial produciría una estructura mucho más envuelta.
- Los brazos espirales no pueden consistir del mismo material siempre

# Brazos espirales son ondas de densidad



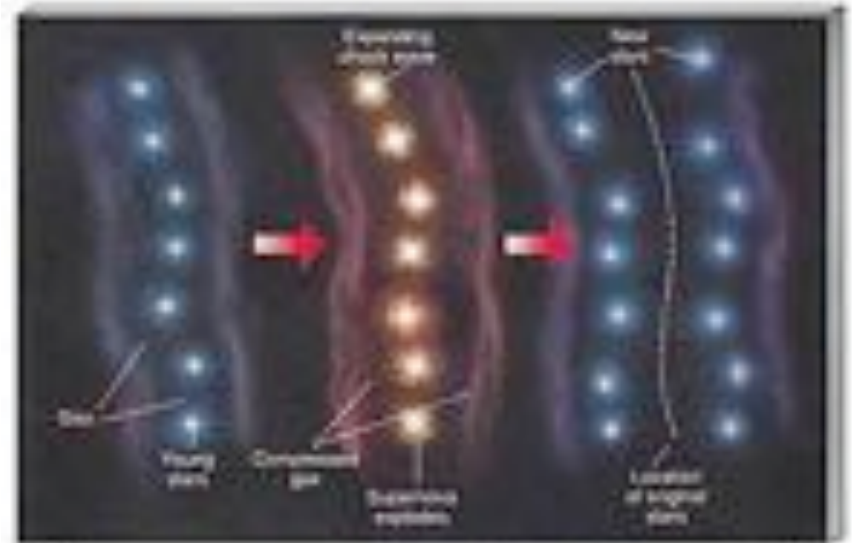
Traffic Jam Analogy



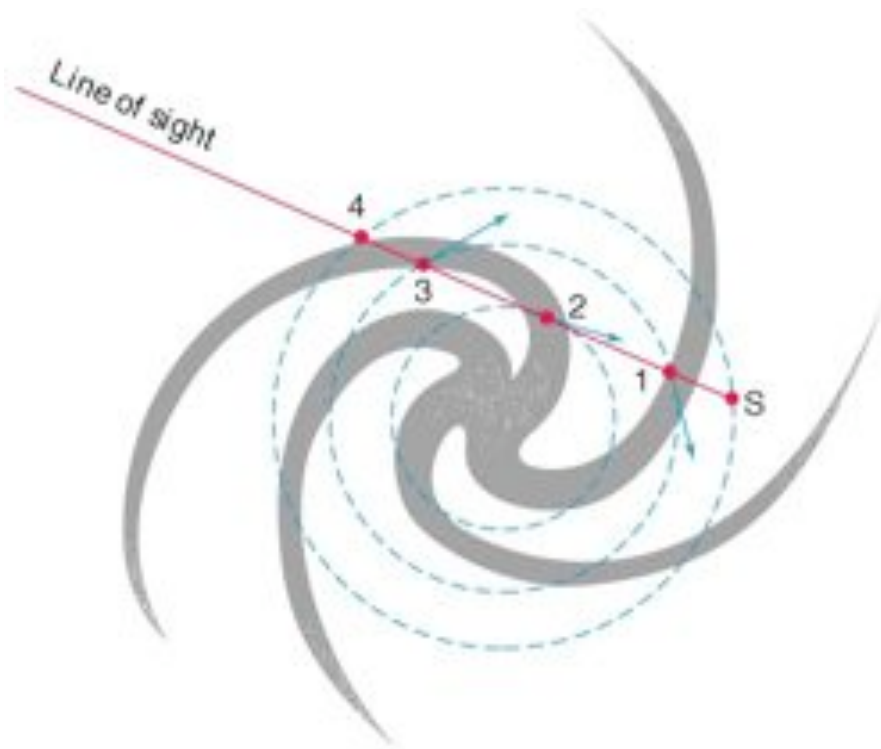
- Son zonas cambiantes de alta densidad de objetos cambiantes (como atasco de coches, ondas de sonido).
- En las zonas de densidad más alta:
  - Estrellas se quedan más tiempo
  - Gas se comprime → estrellas se forman

# Ondas espirales estochásticas

- La formación estelar en una zona provoca la compresión del gas en zonas adyacentes.
- Junto con la rotación diferencial se forman brazos espirales



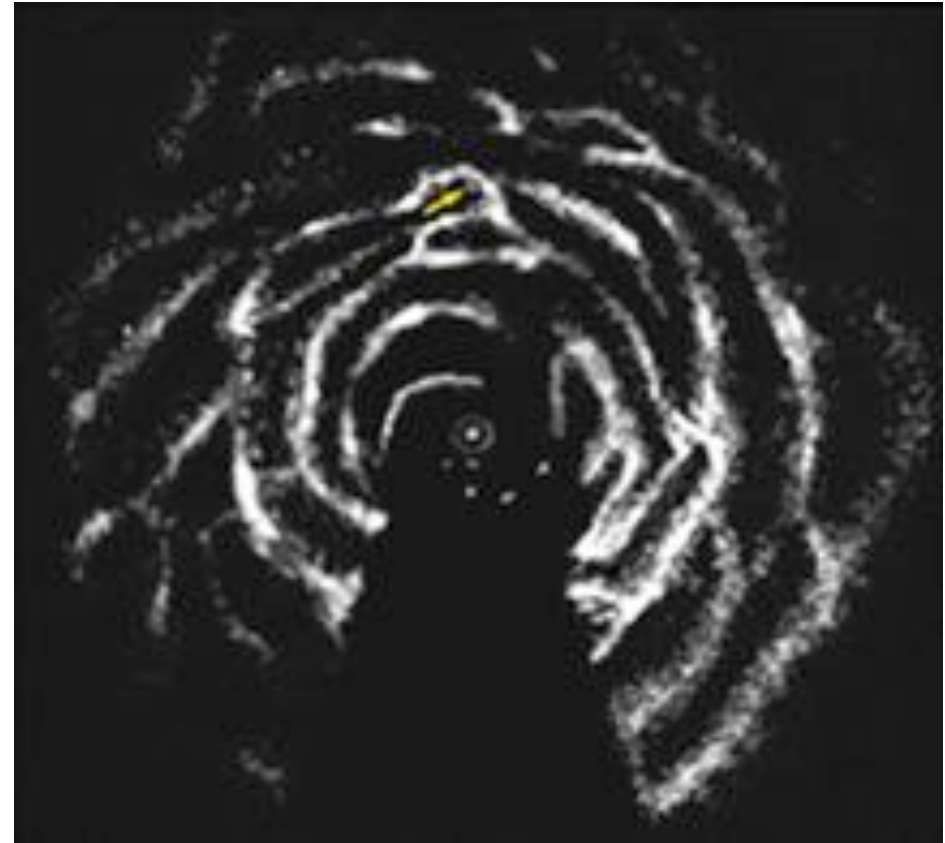
# Determinar la distribución de HI en la Vía Láctea



- Observando a lo largo de la línea se detecta emisión a diferentes longitudes de onda.
- A priori no se sabe de donde viene cada parte de la emisión
- Conociendo la curva de rotación se puede asociar cada velocidad con una distancia del centro galáctico, y, sabiendo la dirección de la observación, con su posición exacta en la Vía Láctea

# Distribución del gas atómico en la Vía Láctea

- Mapas de la verdadera distribución enseñan que gas no está distribuido homogéneamente pero en filamentos parecido a brazos espirales



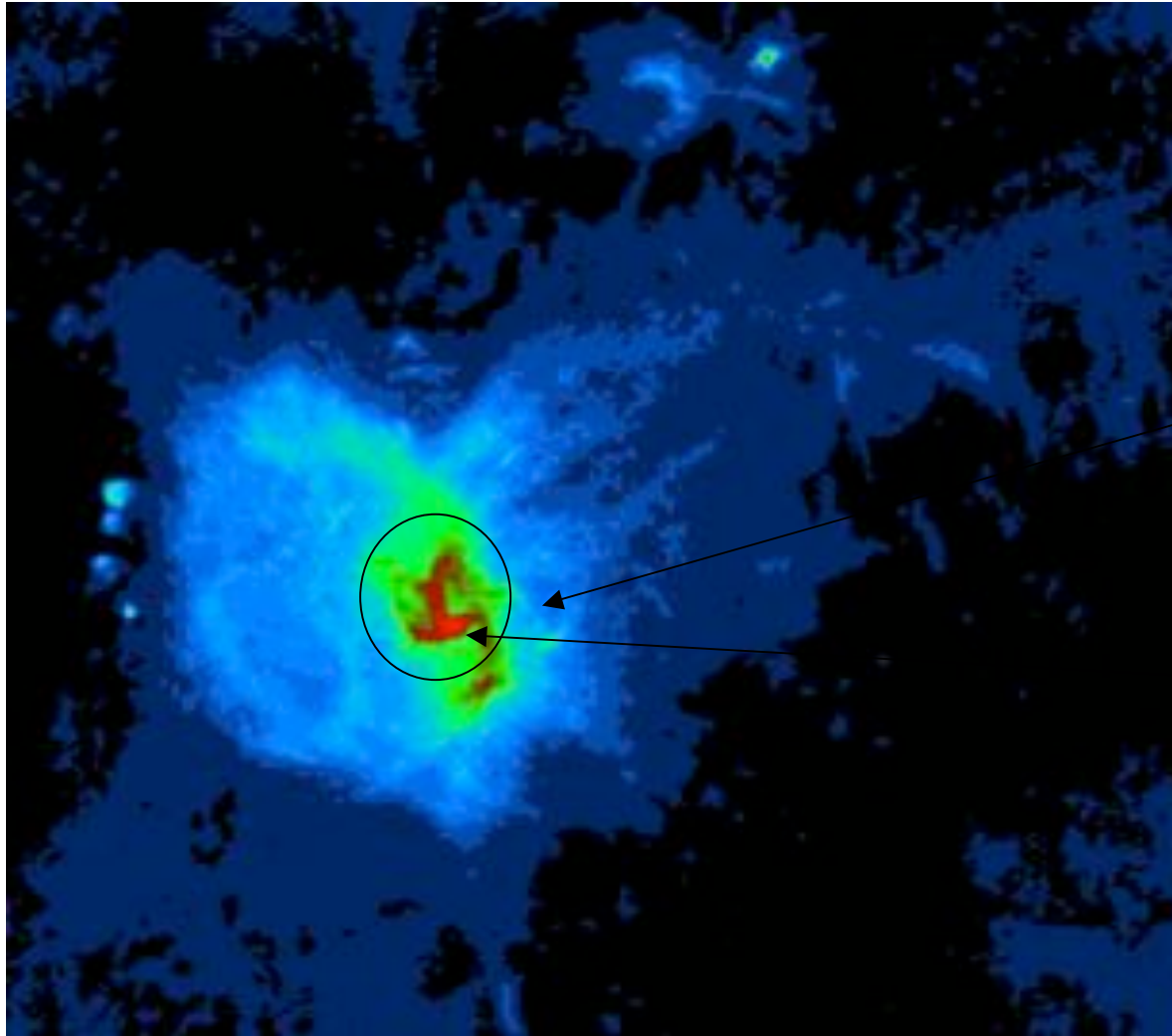
Mapa de HI de la Vía Láctea del barrido del grupo Leiden-Sydney (finalizado en 1958)

**Centro galáctico:** Observaciones infrarrojos necesarios para penetrar el polvo





# Imagen radio del centro galáctico



**Sagittarius A East:**  
Gas ionizado y polvo,  
Circulando rápidamente  
alrededor del centro

**Sagittarius A \*:**  
Brillante y compacta  
fuente de radio  
(centro de espiral)

¿Un agujero negro?

# Agujeros negros en los centros de galaxias

- Algunas galaxias ("Galaxias con un núcleo activo") tienen un agujero negro muy masivo en su centro que produce mucha emisión cuando materia se caye dentro.

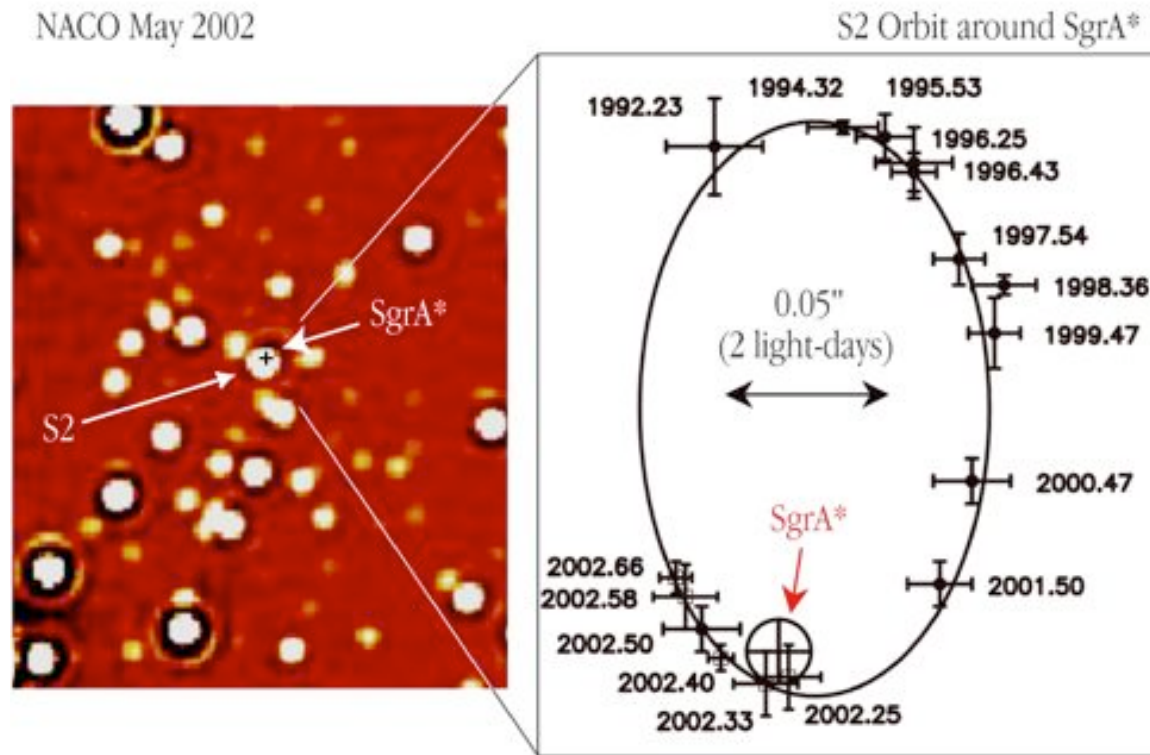
• Se sospecha que todas las galaxias podrían tener un agujero negro, menos activo y incluso "dormido" en su centro.

Visión artística de un agujero negro con materia alrededor en forma de disco



## Pesando el objeto en el centro galáctico:

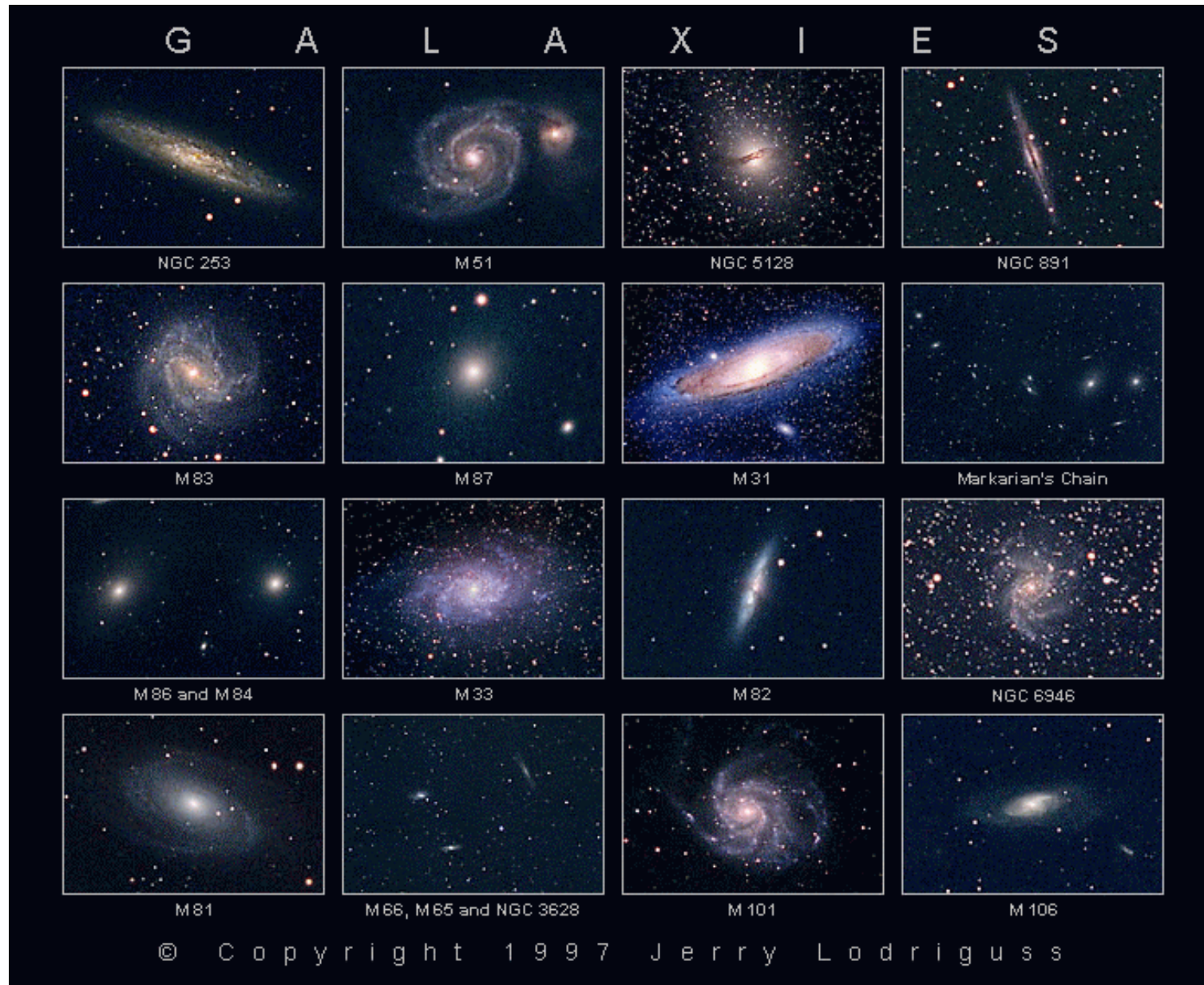
Observar movimientos de estrellas alrededor del centro galáctico con cámaras infrarrojo cercano (posible desde ~1990)



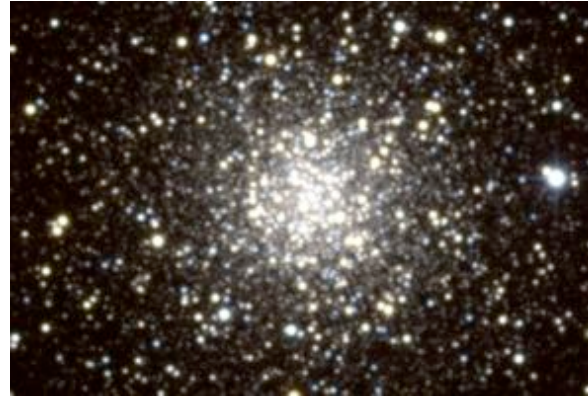
- Observaciones a lo largo de más de 10 años eran necesarios para obtener las órbitas de las estrellas.
- Interesa órbita lo más cercana posible al centro
- Masa del objeto central: 2.6 millones de  $M_{\text{sol}}$
- Tanta masa en poco espacio tiene que ser agujero negro.

The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

## 2. Galaxias



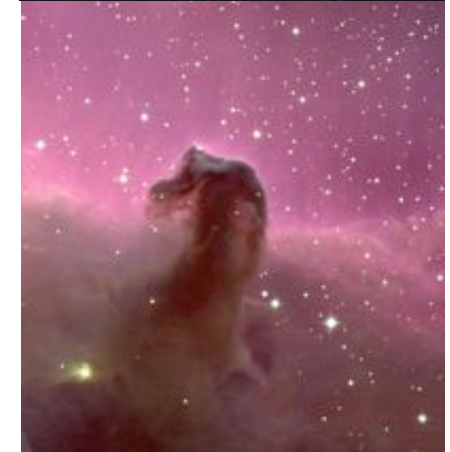
# Historia



Durante mucho tiempo se observaban "nebulosas".

Los catálogos de nebulosas contenían galaxias, nebulosas de emisión (regiones HII) y nebulosas de reflexión (nebulosas planetarias), cúmulos globulares y abiertos

- 1781: Catalogo de Charles Messier (Andromeda = M31)
- 1888: New General Catalog (Andromeda=NGC224)





Shapley

Curtis

## Discusión entre Shapley y Curtis

Que son las nebulosas espirales?  
Es correcta la hipótesis de Universos-Islas?

### Shapley:

Pensó que el tamaño tan grande que derivó para nuestra Galaxia lo hacía improbable que las espirales eran objetos parecidos

### Curtis:

Apoyaba la teoría de Universos-Islas

- En 1920 hubo un debate entre ellos ante la Academia Nacional de Ciencia en Washington
- Hoy sabemos: Shapley no tenía razón, aunque su argumentación era razonable.....

# Edwin Hubble



- 1923: Observó estrellas variables Cefeides en Andromeda → determinó la distancia → con esa distancias era comprobado que esta "nebulosa" era una sistema de estrellas ajena a nuestra Vía Láctea
- 1924: Midió las distancias a más galaxias con estrella variables Cefeides y determinó la ley de Hubble
- Hizo la primera clasificación de las galaxias.

Clasificación:

Galaxias elípticas  
y esferoidales



Tienen poco gas y ya  
no forman estrellas  
(así solamente tienen  
estrellas viejas).





# Galaxias espirales

- Tienen disco con brazo espirales.
- Contienen gas y forman activamente estrellas



# Espirales barradas



Más de la mitad de las galaxias  
contienen una barra

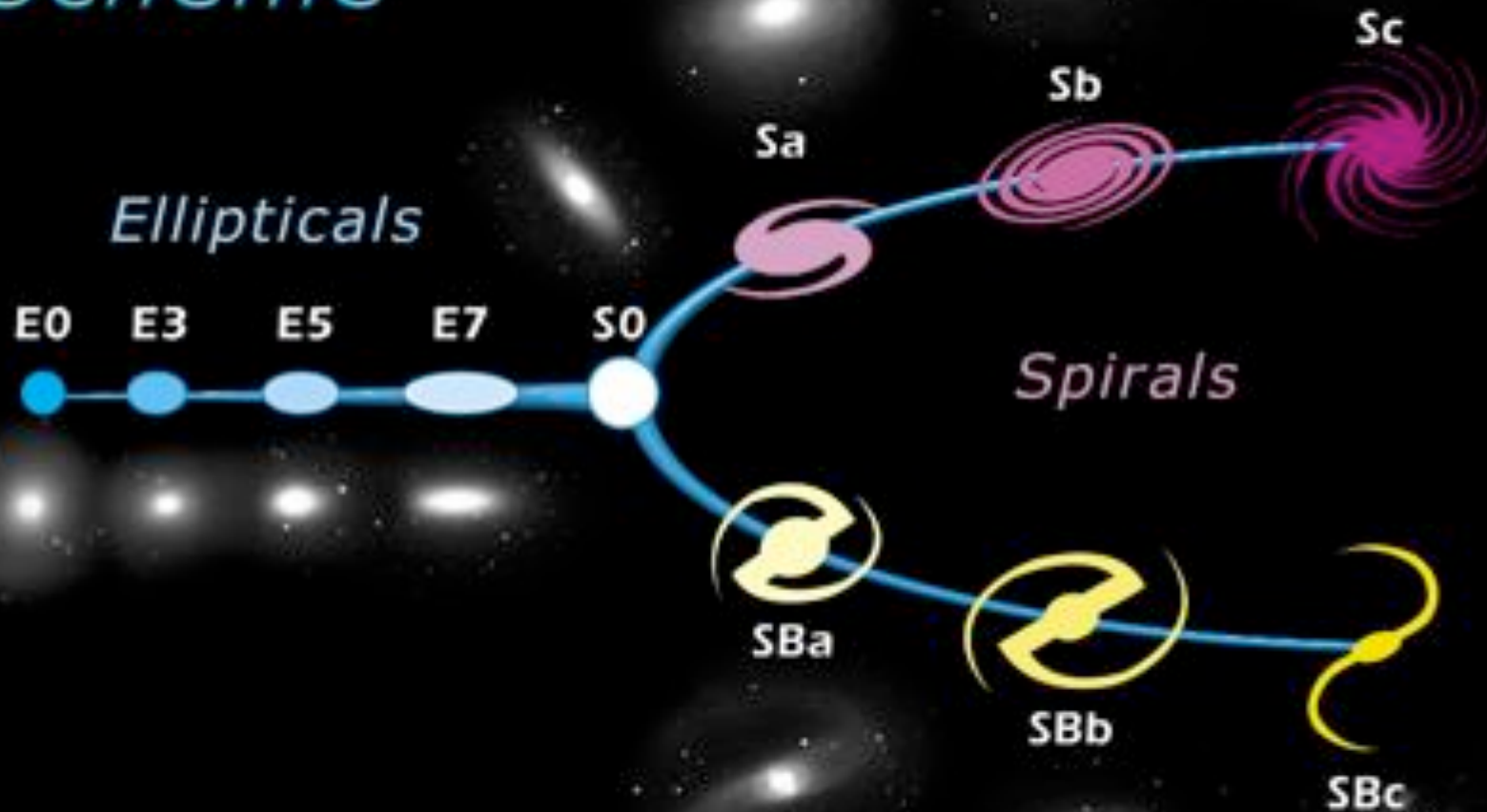
# Galaxias irregulares

Son pequeños, normalmente clasificados como “enanas”

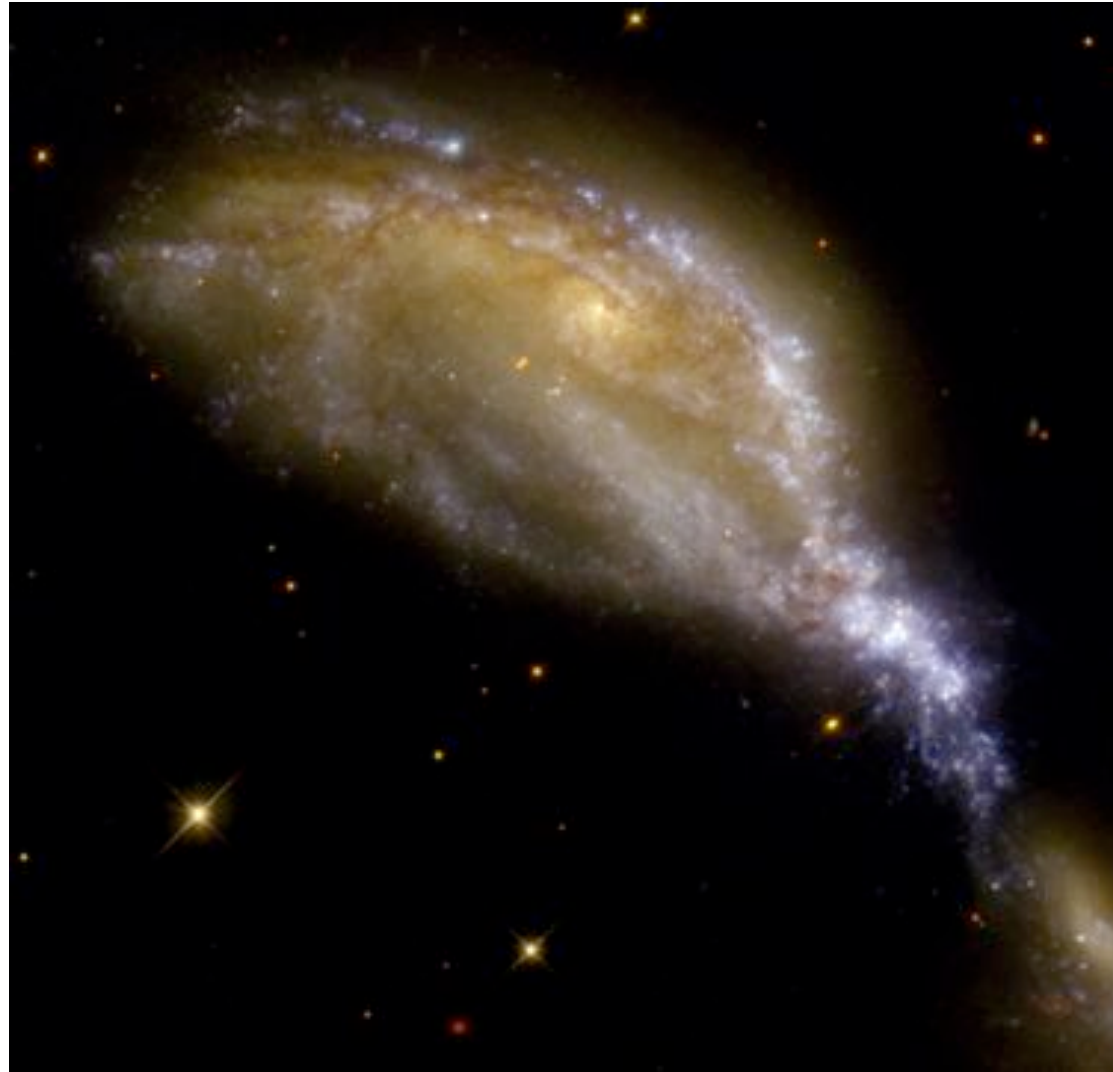


Nuestros vecinos:  
Las Nubes de Magallanes

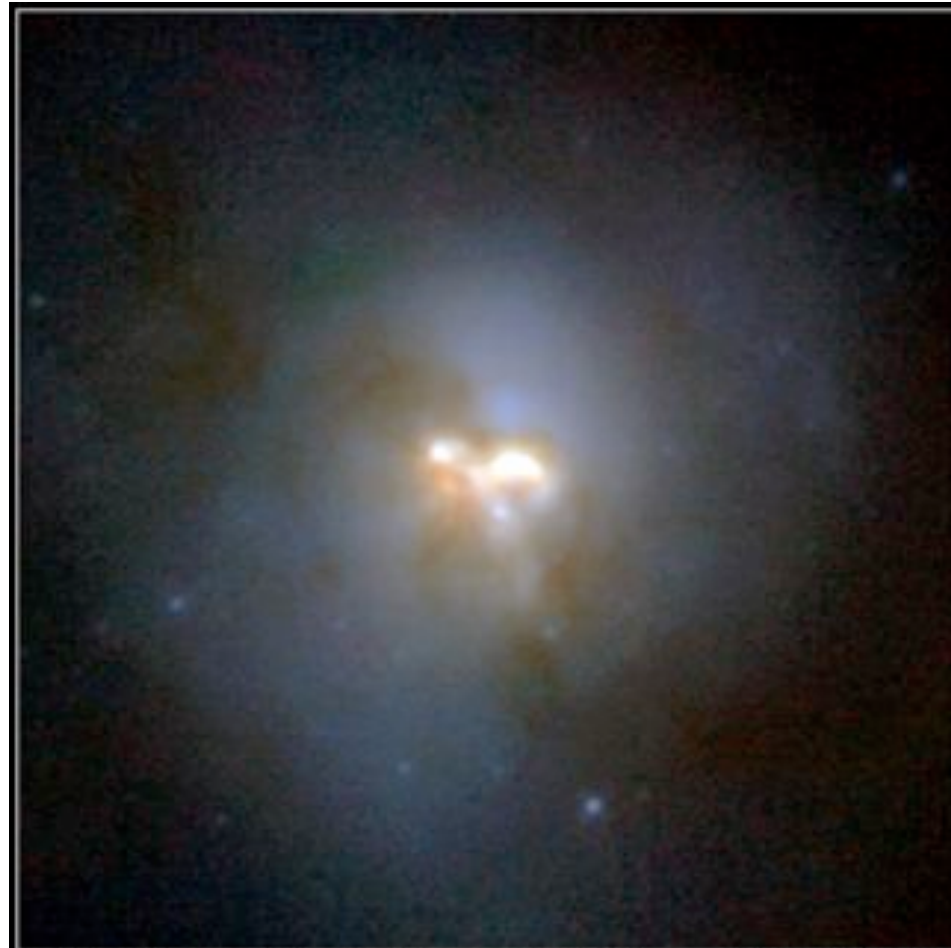
# Edwin Hubble's Classification Scheme



# Galaxias peculiares: Interacción



# Galaxias peculiares: Brote de formación estelar



**Ultraluminous Infrared Galaxy Arp 220** HST • NICMOS

PRC97-17 • ST ScI OPO • June 9, 1997

R. Thompson (University of Arizona),

N. Scoville (California Institute of Technology) and NASA

# Algunas preguntas

- ¿Cómo se han formado las galaxias?
- ¿Porqué existen los diferentes tipos de Hubble? ¿Son creados diferentemente?
- ¿Puede una galaxia cambiar de tipo y cómo?
- ¿Cómo eran las galaxias del universo joven? ¿Igual que las de hoy?
- ¿Qué regula la formación estelar? ¿Qué provoca los brotes de formación estelar?
- ¿Más preguntas....?

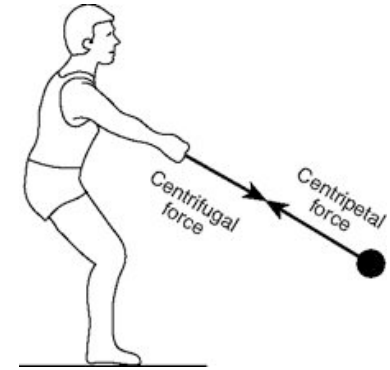
# Tamaños y luminosidades de galaxias

- Las galaxias elípticas cubren un gran rango de tamaños (y luminosidades):
  - Galaxias **elípticas gigantes** pueden ser hasta 5 veces más grandes que la Vía Láctea (VL). Son las galaxias más grandes que existen.
  - Galaxias **elípticas enanas** tienen hasta el 1% del diámetro de la VL.
- Entre las galaxias espirales, la VL es relativamente grande. Las galaxias espirales más grandes pueden tener hasta 4 veces el tamaño
- Las galaxias **más luminosas** tienen hasta 1000 veces la luminosidad de VL, los menos luminosas (galaxias enanas) unos 1000 veces menos





## Pesando las galaxias: Curva de rotación y materia oscura

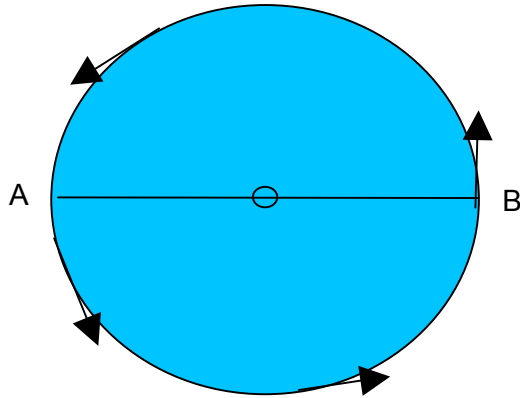


- La **velocidad de rotación de una estrella** o nube de gas a una distancia  $R$  del centro de masas de galaxia produce una **fuerza centrífuga**
- Ésta debe de ser igual que la **fuerza de gravitación** ejercitada por la masa interior de este radio  $M(<R)$ .
- Conociendo  $V(r)$  podemos **calcular la distribución de masa  $M = M(r)$** . Esta masa se llama la **masa dinámica**.

- Necesitamos medir la velocidad de rotación en función a la distancia del centro

- Para observar la rotación es necesario que las galaxias estén de perfil (o al menos no *de cara*).

No podemos determinar la  $V_{rot}$



**Disco rotando visto desde arriba**

(ángulo de inclinación 0 deg)  
No hay componente de velocidad en la línea de visión entre galaxia y observador

Radiación corrido al azul

Radiación corrido al rojo



**Disco rotando visto de perfil**

(ángulo de inclinación 90 deg)

La velocidad de rotación tiene componentes no nulas en la línea de visión del observador.



Galaxias vista de perfil



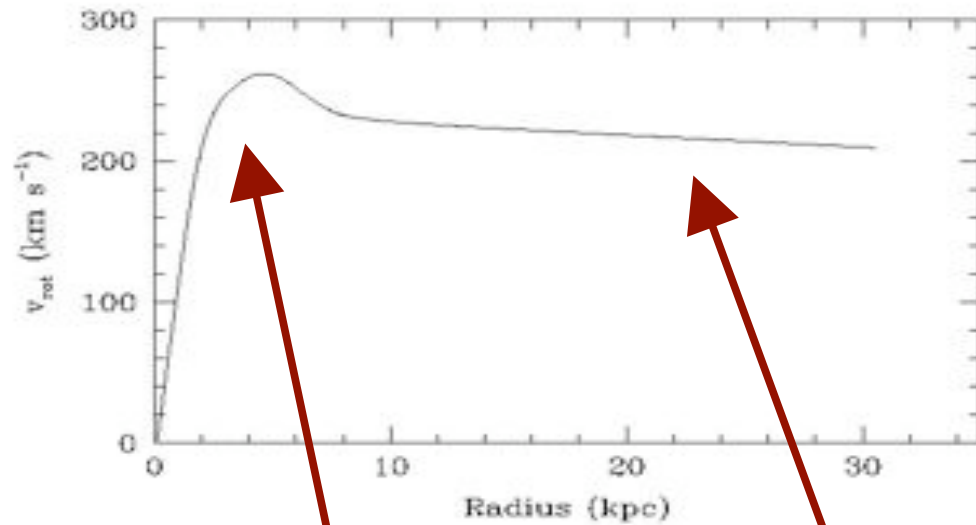
Galaxia vista de cara

Curvas de rotación se pueden observar en galaxias vistas de perfil

# Importancia de HI

- Hace falta observar una línea para determinar la velocidad. Podrían ser :
  - Líneas de absorción de estrellas
  - Líneas de emisión del gas
  - Línea del gas molecular o hidrógeno (línea a 21 cm)
- La emisión de hidrógeno tiene muchas ventajas:
  - HI es la componente de una galaxia con la extensión radial máxima (máxima distancia del centro) → permite estudiar zonas en las afueras de las galaxias y masa dinámica global de galaxias
  - Emisión de HI es más fácil de detectar en las zonas exteriores.
  - Desde que la sensibilidad de los detectores (final de los 1970s) es suficiente, existen muchos datos dando las curvas de rotación en galaxias

## Típica curva de rotación observada

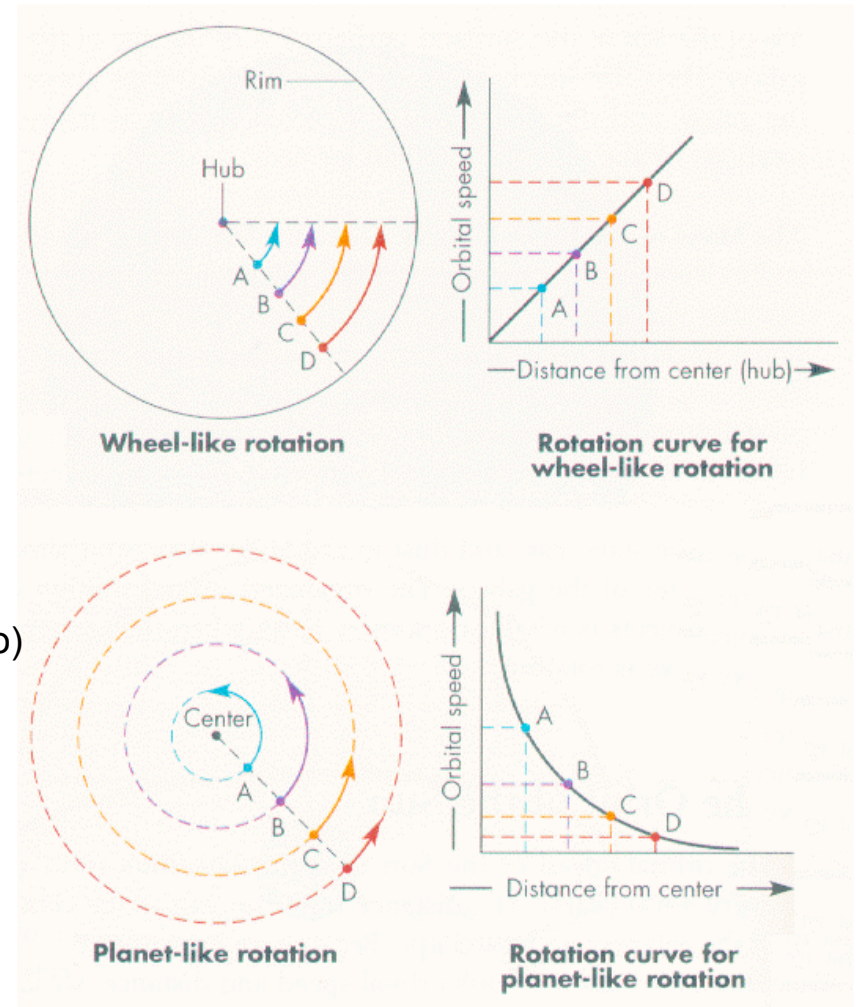


$v_{\text{rot}} \sim \text{constante}$   
(velocidad angular decrece con radio)

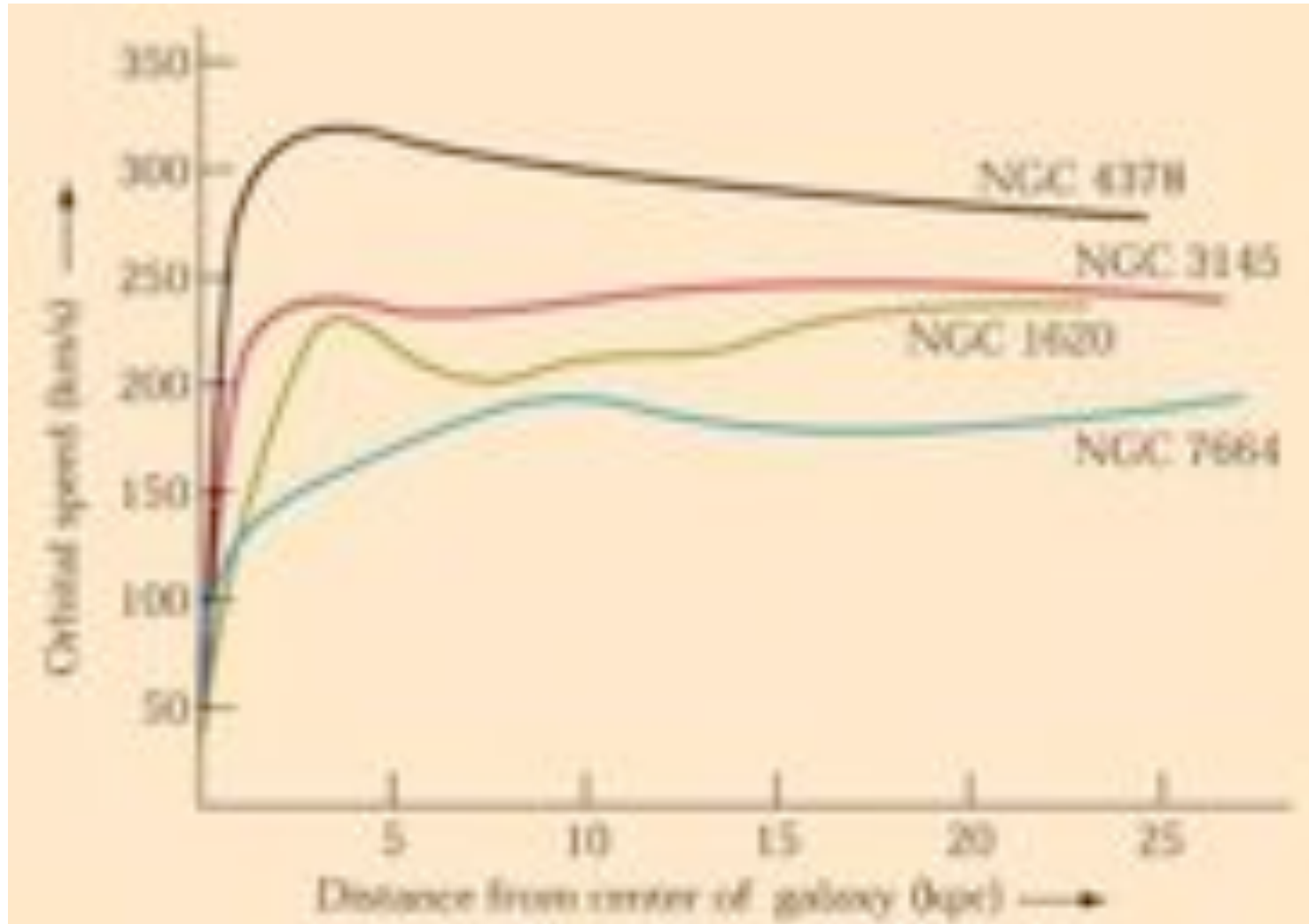
Rotación de sólido rígido

( $v_{\text{rot}}$  proporcional a R; velocidad angular constante)

## Curvas de rotación teóricas



Más ejemplos:



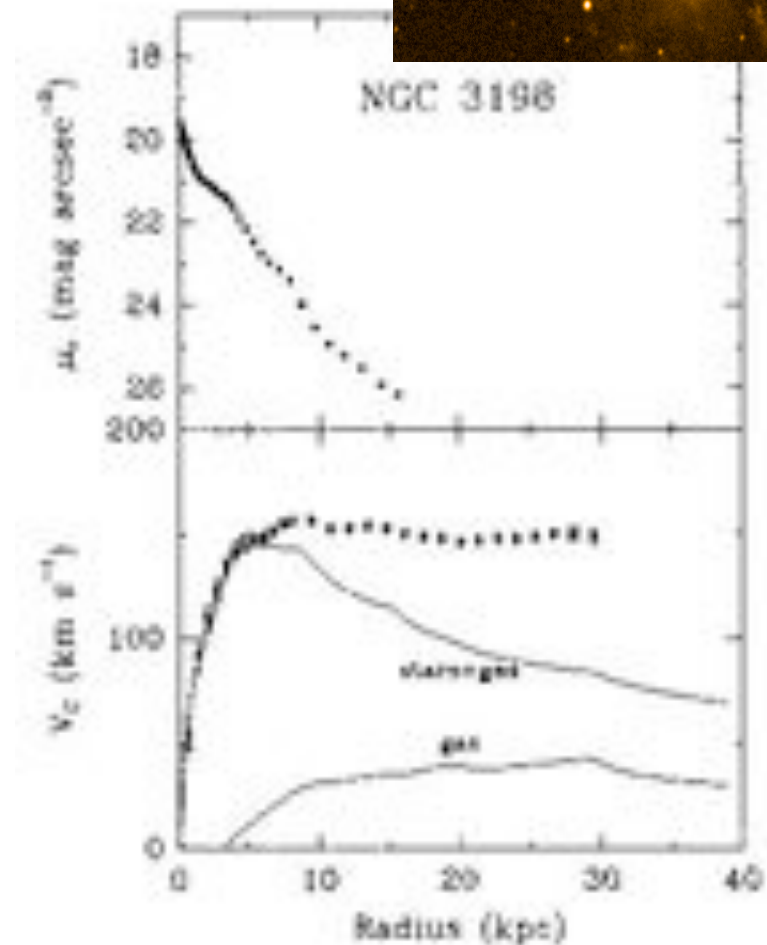
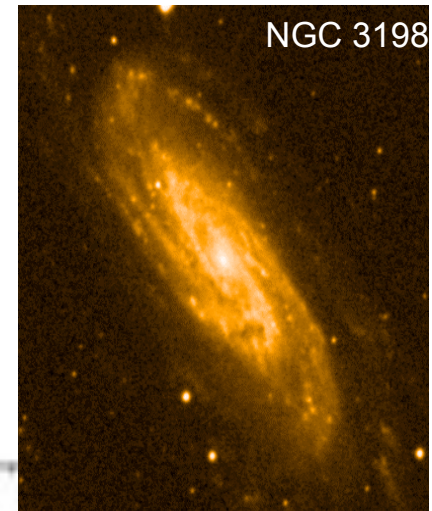
Interpretación:

Tiene que haber masa que no vemos -  
masa oscura

Esta discrepancia entre masa visible y masa dinámica es un fenómeno común en galaxias espirales.

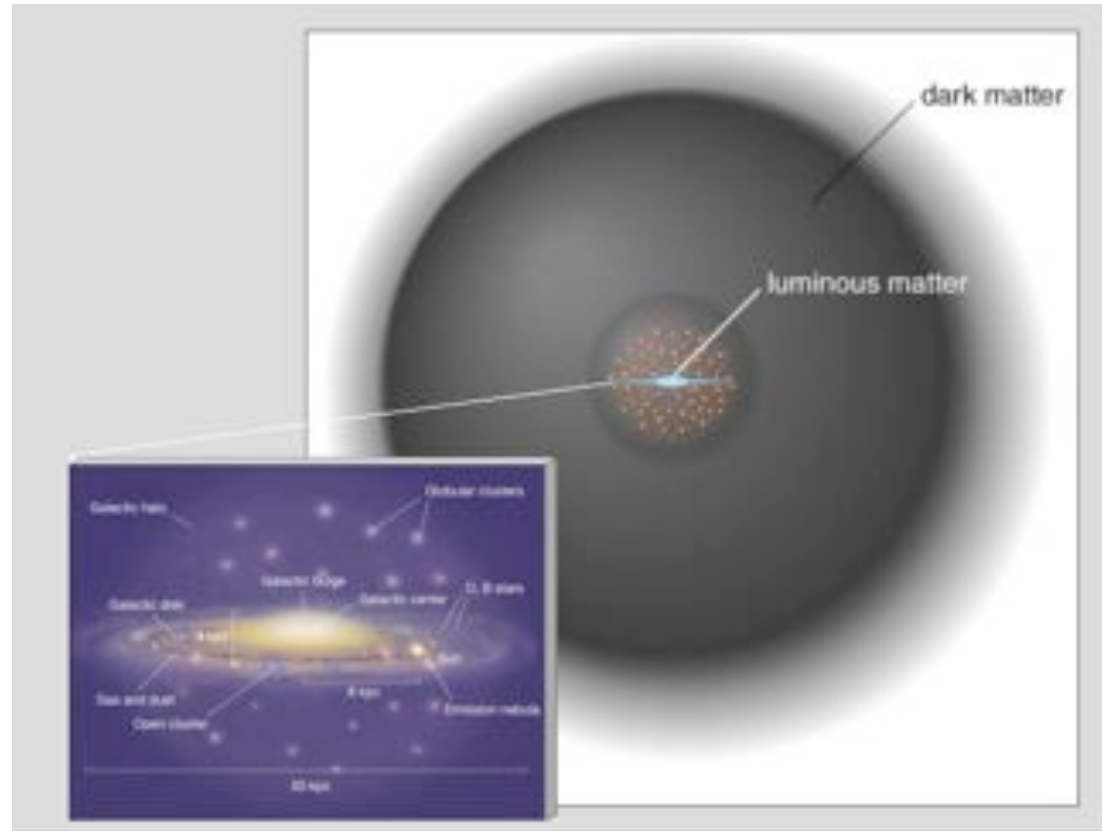
Freeman, en el 1970, fue el primero en interpretar las curvas de rotación de espirales como evidencia de la existencia de materia oscura.

Pero Zwicky, en el 1937, había ya encontrado que la materia visible en cúmulos no era suficiente para explicar movimientos de galaxias → propuso materia oscura



## ¿ Cuánta materia oscura hay y cómo se distribuye ?

.Se suele suponer que la materia oscura está contenida en una componente de la galaxia llamada **halo**, con simetría esférica.



. Típicamente, se necesita  $\sim 10$  veces más materia oscura que materia luminosa para explicar las curvas de rotación



. Existen otras explicaciones alternativas a la hipótesis de materia oscura:

.**MOND (Modified Newtonian Dynamics)**: La dinámica newtoniana necesita modificación para poder aplicarla a distancias tan grandes (desarrollada en 1983, Milgrom)

.**Hipótesis magnética**: La curva de rotación se puede explicar por la acción de campos magnéticos en el disco (Nelson, 1988; Battaner et al. 1992).

Pero: La existencia de la materia oscura es también necesario en los modelos cosmológicos

# Candidatos para la materia oscura

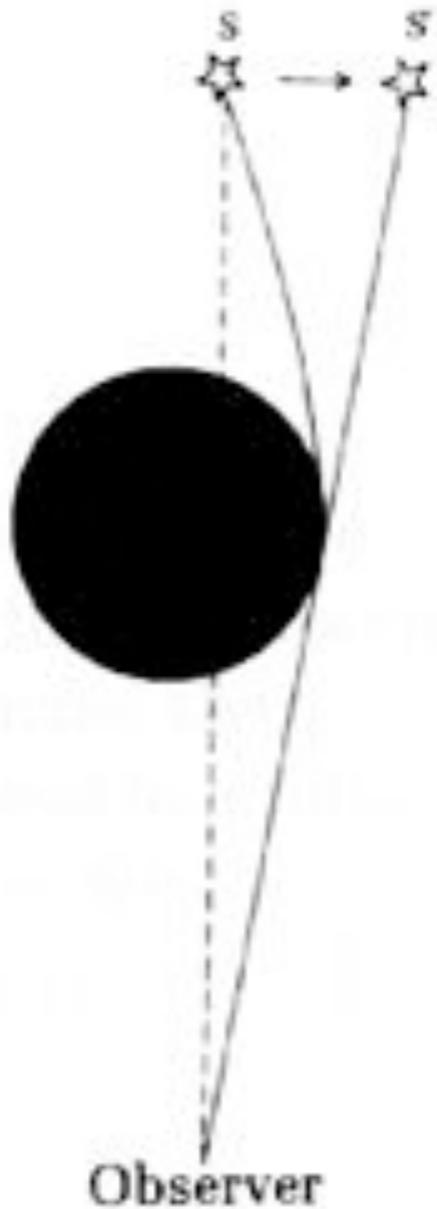
Bariones (= materia "normal"): (por razones cosmológicas solo pueden contribuir <10% a la materia oscura):

- Agujeros negros
- Estrella neutrones aisladas
- Enanas marrones
- Grandes Jupiters
- Grandes piedras
- Gas molecular muy frío

Otros partículas elementales

- Neutrinos (tiene masa, pero ya está descartado)
- Partículas elementales desconocidos
- .....

# Buscando la materia oscura (bariónica)



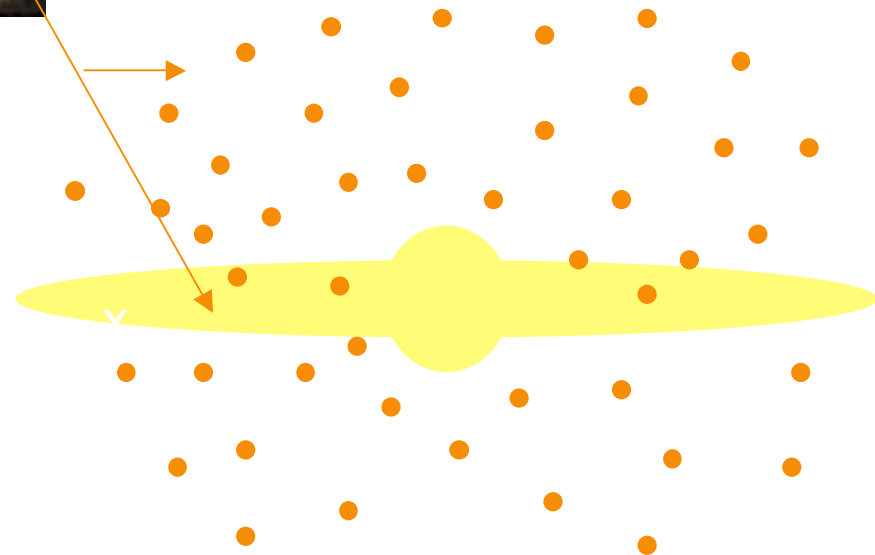
Se puede intentar buscar objetos en nuestro halo a través del efecto relativista de la deflexión de la luz por masa

# Busqueda por MACHOs (Massive Astrophysical Compact Halo object)



- MACHOs se mueven en el halo de la Vía Láctea

- Emisión de estrella aumenta de forma característica cuando pasa cerca de MACHO



→ Se han detectado algunos eventos, pero no suficientes para explicar la cantidad de materia oscura necesario

# Candidatos más prometedores

- Teorías de partículas predicen muchos posibles candidatos !
  - Tienen que ser estables
- WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle)
  - Solo interacción débil
  - Neutrinos no funcionan, porque no tienen masa y son "calientes". Por eso no producen la correcta estructura de la distribución de galaxias a gran escala.
- Más prometedores: Partículas predichos por la teoría de la supersimetría
  - Predice partículas compañeras supersimétricas con gran masa. El más prometedor: neutralino
- Se espera que se detecta una partícula candidato con el nuevo acelerador LHC en el CERN en Ginebra

# Galaxias con núcleo activo

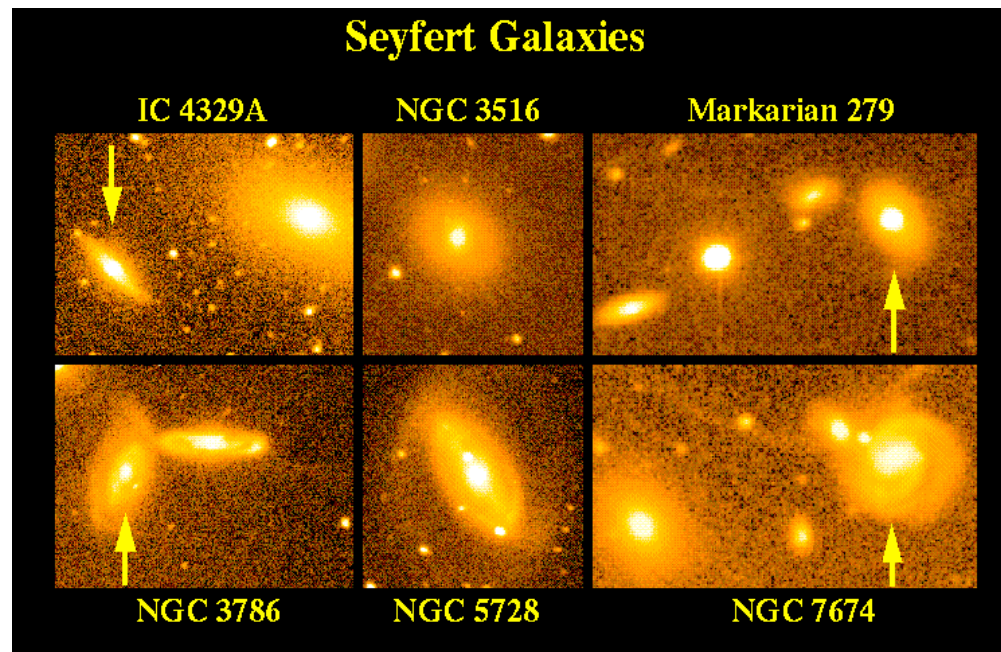
## Primeras observaciones en visible

- 1909: Líneas de emisión peculiares en NGC 1068 (*E.A. Fath, Ph.D.*)
- 1943: Carl Seyfert inicia un estudio sistemático de galaxias con núcleos de apariencia estelar

Anchura líneas  $\rightarrow$  Efecto Doppler  $\rightarrow v \sim 8500$  km/s !!!!

Había líneas anchas y estrechas

Pero estos trabajo no estimularon el estudio de los AGNs.



# Observaciones en radio

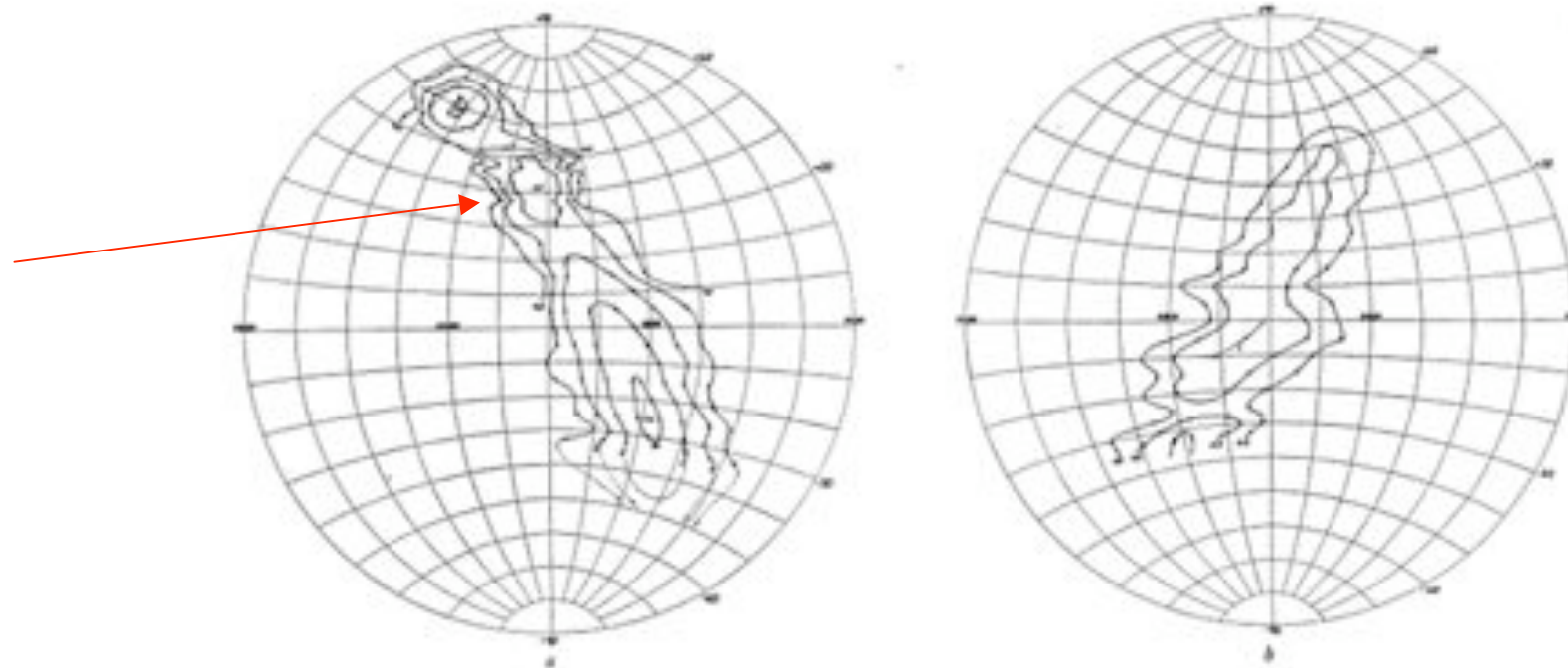


FIG. 4.—Constant intensity lines in terms of  $10^{-18}$  watt/sq. cm./cbr. deg./M.C. band

*Grote Reber 1944, ApJ 100, p.279: mapa del cielo realizado a  $\lambda = 1.87$  m.*

*La intensidad indica la cantidad de materia entre nosotros y el borde de la Vía Láctea.*

1940: En el primer mapa de radio continuo del cielo, Grote Reber encuentra una fuente puntual: Cygnus A

# "Radioestrellas" ←

Ojo: Es sólo el nombre se daba → hoy sabemos que no son estrellas

En los 1940: Observación de las primeras fuentes luminosas en radio. Eran (para la mala resolución angular) aparentemente puntuales → ¿estrellas raras?

1951: Precisa posición de Cygnus A medido por Graham Smith

1954: Baade y Minkowski identifican ópticamente

- Cygnus A → fuente extragaláctico
- Cas A → Remanente de Supernova

En los 1960: detección de muchas fuentes luminosas en radio, asociadas con galaxias débiles.

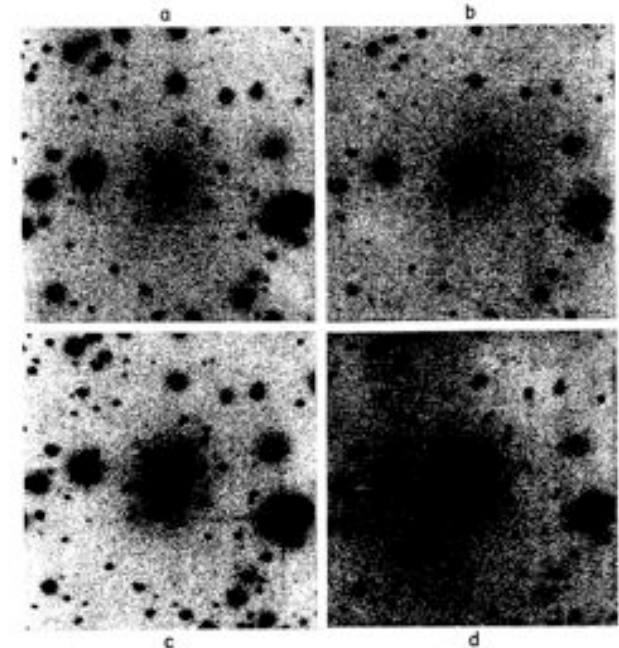


Figura tomada del artículo original de Baade y Minkowski de 1954 en la que identifican Cyg A con una galaxia.

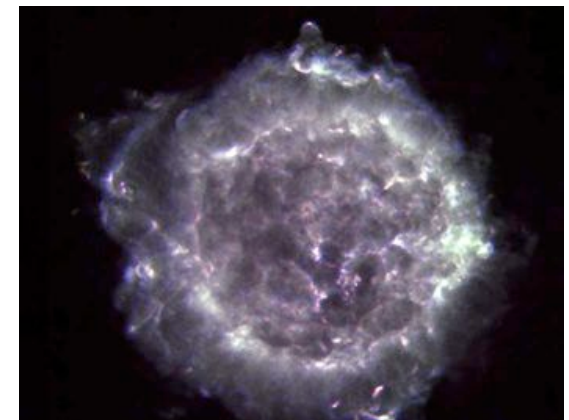


Imagen VLA de Cas A, a 6cm



# Descubrimiento de los cuásares

•1963: M. Schmidt identificó 3C273 con una aparente estrella, pero con líneas anchas de emisión → no era una estrella normal

Encontró 4 líneas correspondientes a la serie de Balmer:  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$  y  $H\epsilon$ , y  $MgII$ , pero con  $z=0.16$

El valor de  $z$  fue confirmado por  $H\alpha$  en infrarrojo.

•Una identificación similar de líneas daba  $z=0.37$  para 3C48.

→ **Quasi-stellar object ó QSO ó cuásar**

1965: A. Sandage descubre cuásares no asociados con fuentes radio

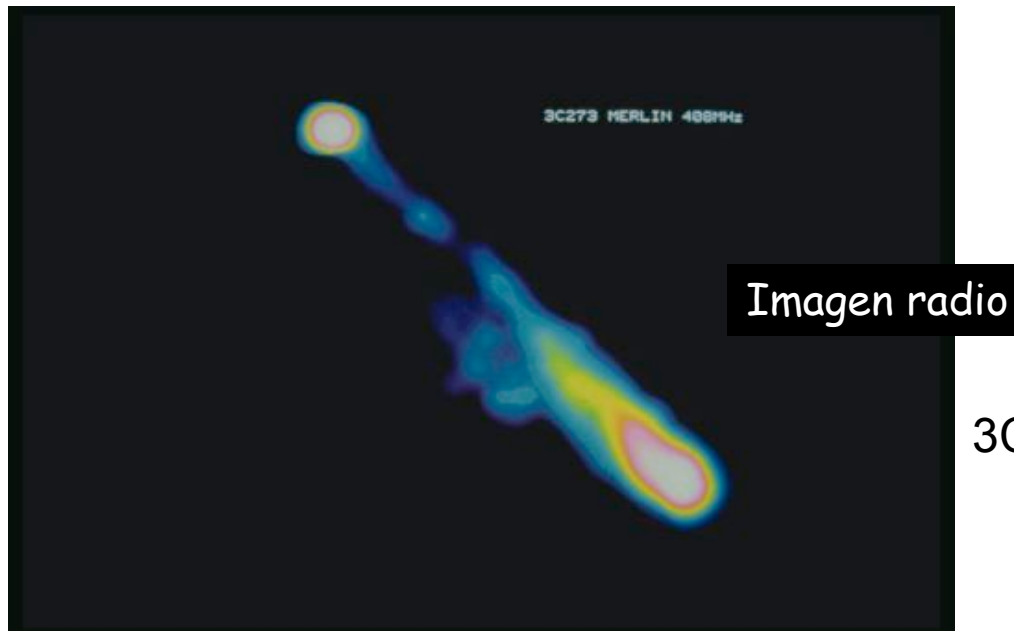
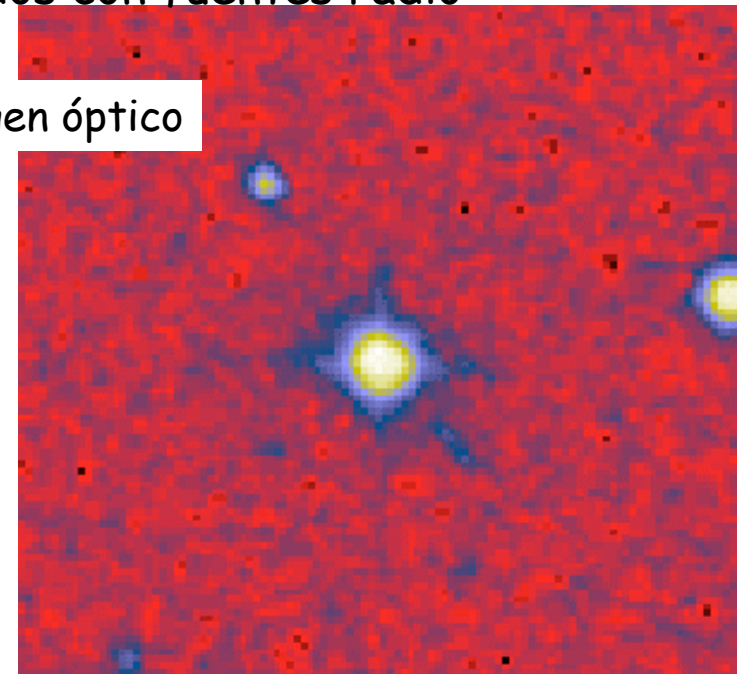


Imagen óptico



# Algunas propiedades de las "galaxias activas"

Todos los objetos (galaxias Seyferts, cuasares, y también radiogalaxias, si se puede detectar emisión en otras longitudes de onda) tienen en común:

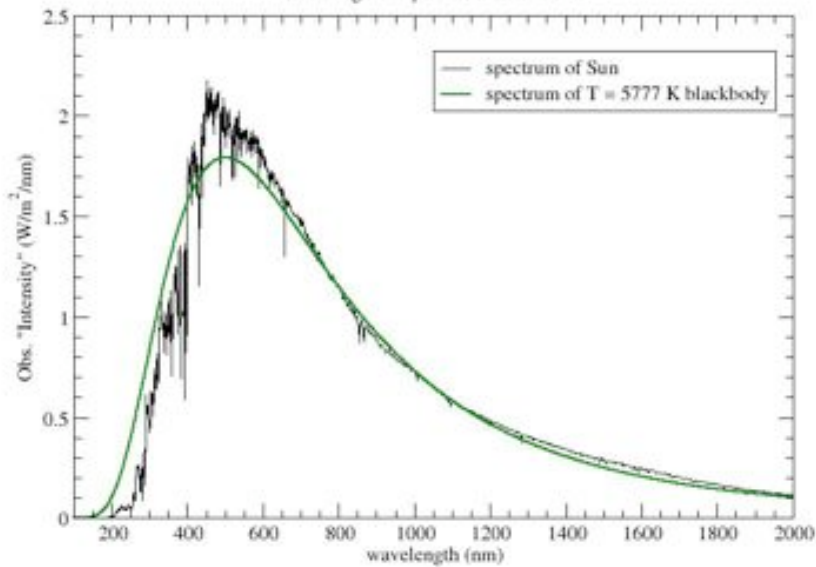
Líneas en espectro:

- Alto corrimiento a rojo → (normalmente) gran distancia:
  - Cuasares son los **objetos más lejanos en el universo**
  - Su emisión corresponde a energías enormes, hasta 10 - 1000 veces una galaxia como la nuestra
- Anchura de las líneas anchas o muy ancha en comparación con galaxias normales

Emisión continuo:

- Mucha emisión en el IR, UV y rayos X (exceso en estas longitudes de onda con respecto a galaxias normales)
- Variabilidad de la emisión
- Hay algunos con emisión fuerte en radio

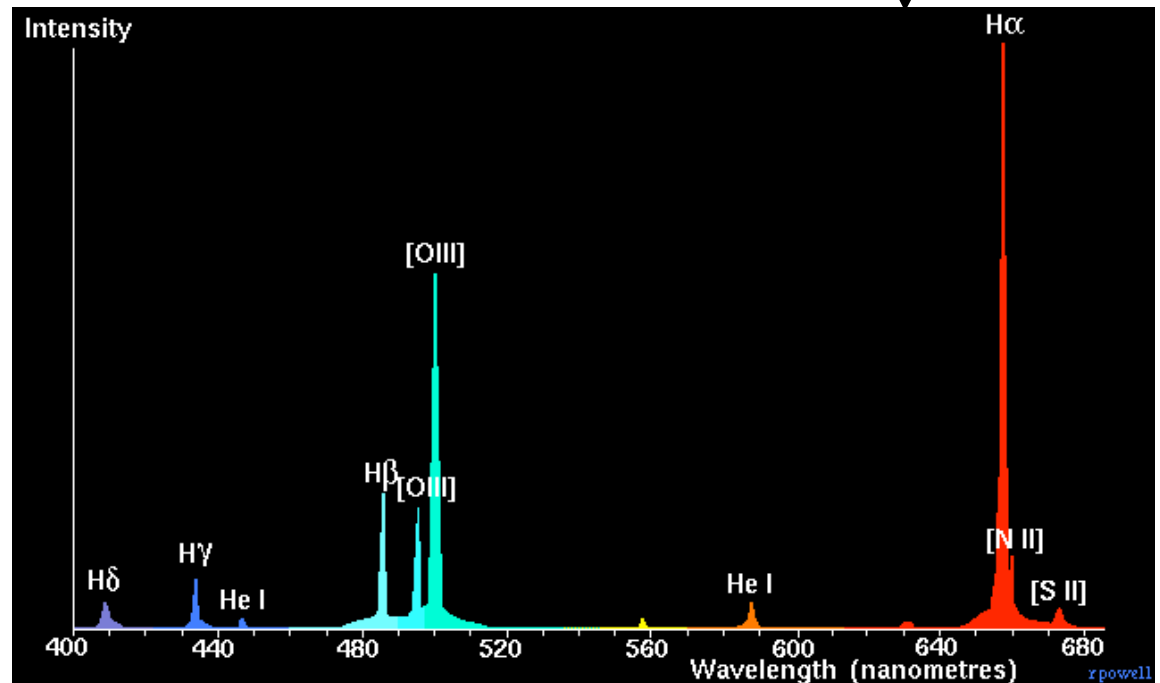
Sun's Spectrum vs. Thermal Radiator  
of a single temperature  $T = 5777$  K



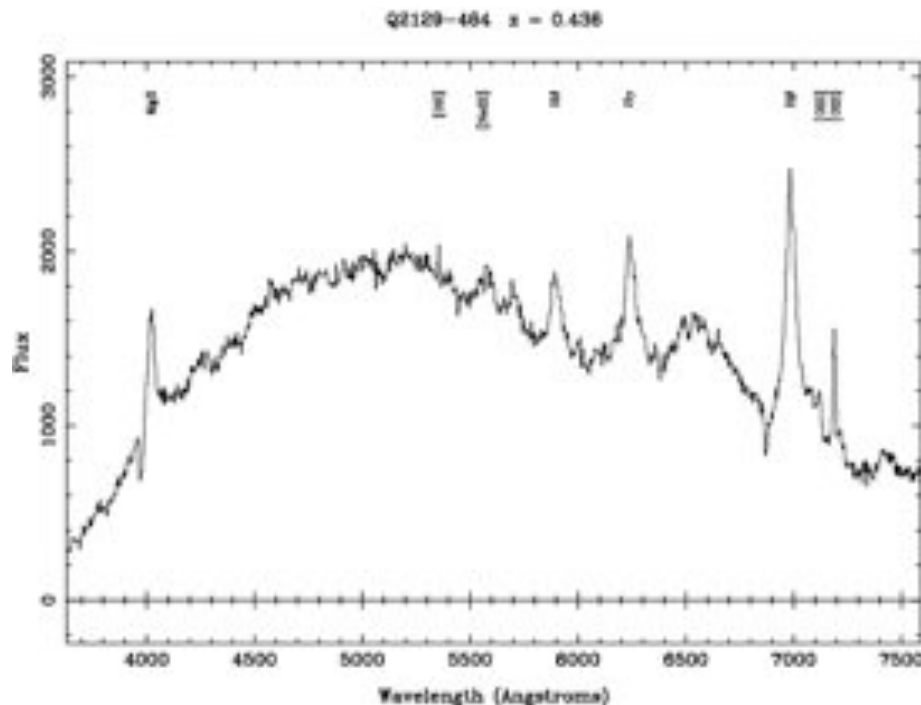
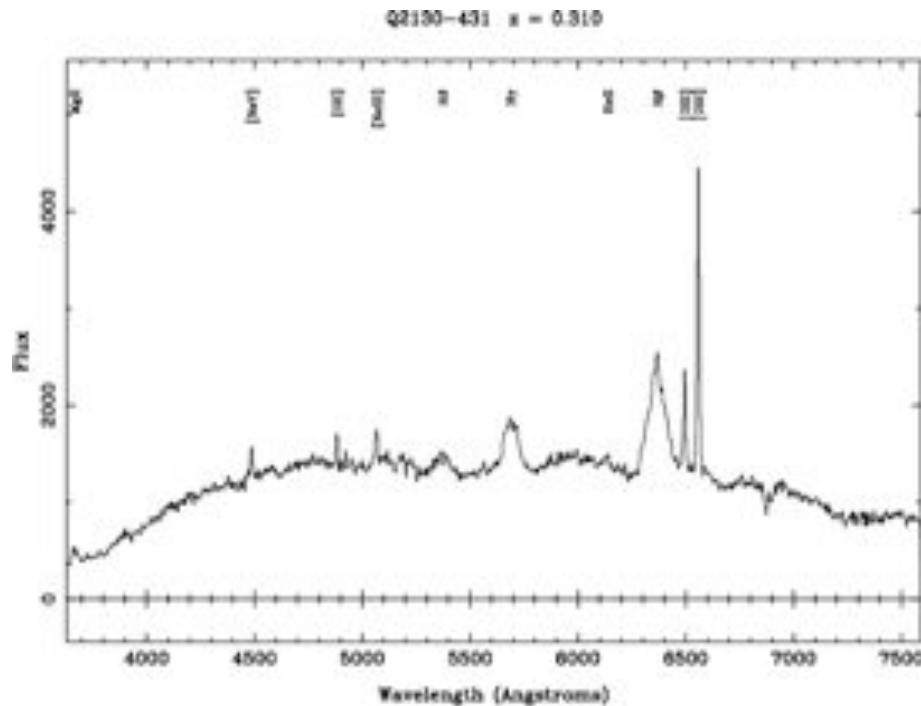
¿Qué podemos aprender de los espectros?

Espectro de una región de gas ionizado:  
Líneas de emisión estrechos

Espectro del Sol: Emisión continua y líneas de absorción (porque la atmósfera del Sol es más frío que la superficie)

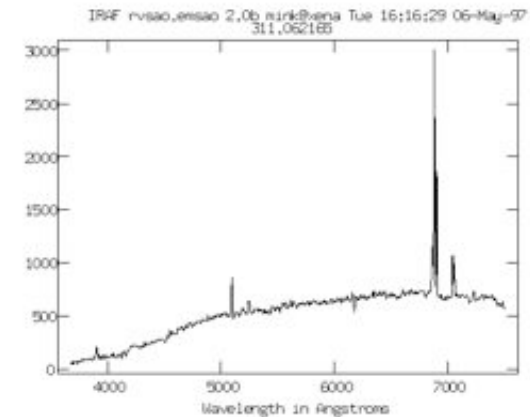






## Espectro de una galaxia activa → líneas muy anchas

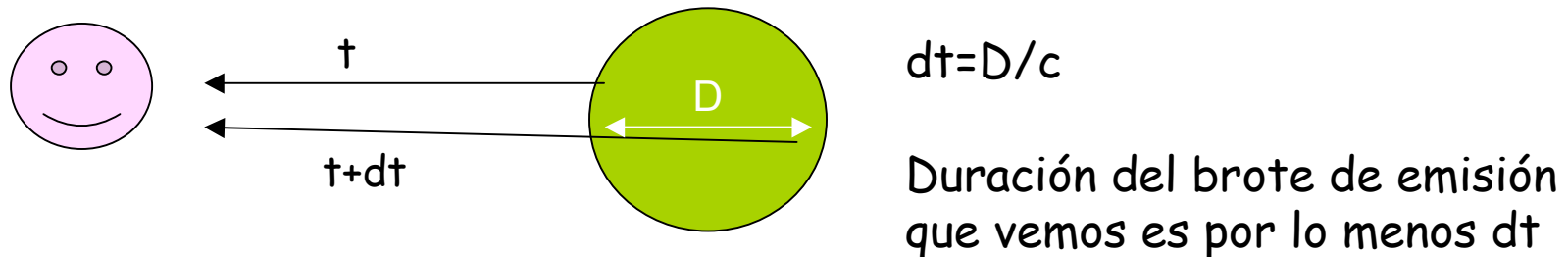
- Anchamiento debido al efecto Doppler → alta velocidad del gas (varios 1000 km/s) → alta temperatura
- Se distinguen dos tipos de líneas:
  - \*Líneas anchas
  - \*Líneas estrechas (que son más estrechas que las otras, pero todavía más anchas que en galaxias con solamente formación estelar)



Para comparar: galaxia con formación estelar

# Variabilidad de la emisión

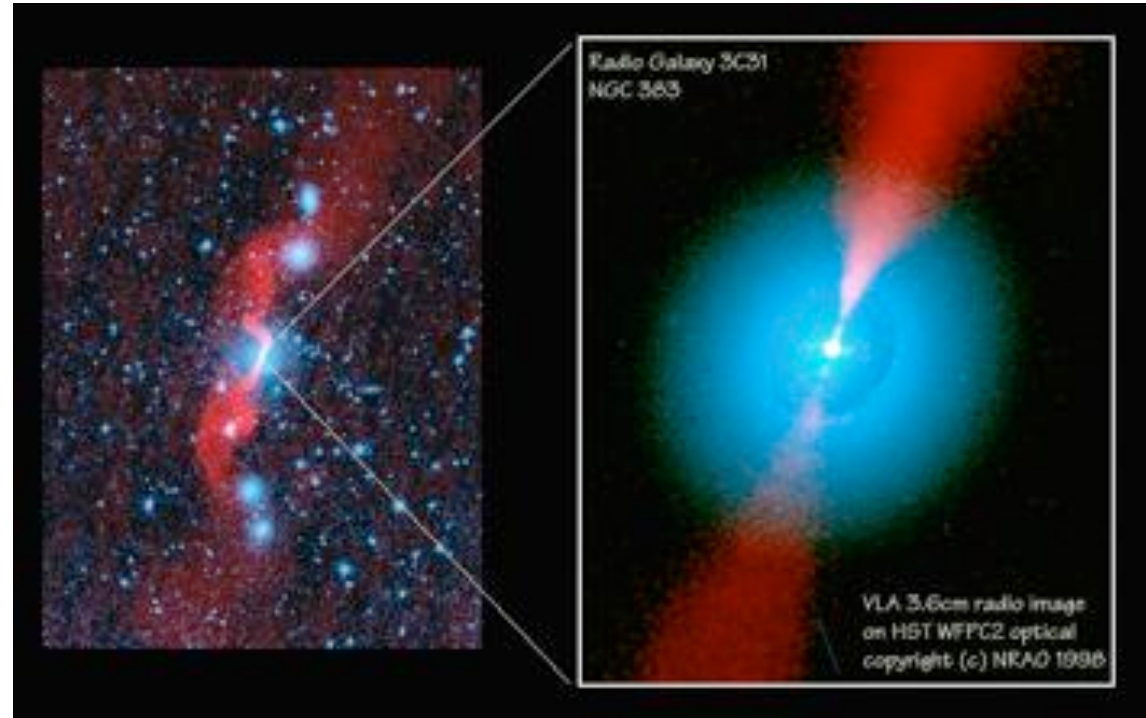
- Variabilidad de su emisión en corto tiempo (días o menos) → Fuente de la emisión tiene que ser muy compacto (días-luz; la Vía Láctea: diámetro 80 000 años-luz → 30 million veces más)



→ Luminosidad  $\sim 1000$  veces luminosidad de la Vía Láctea en un tamaño mucho más pequeños que la distancia entre las estrellas en la vecindad del sol

# ¿Qué es una radiogalaxia?

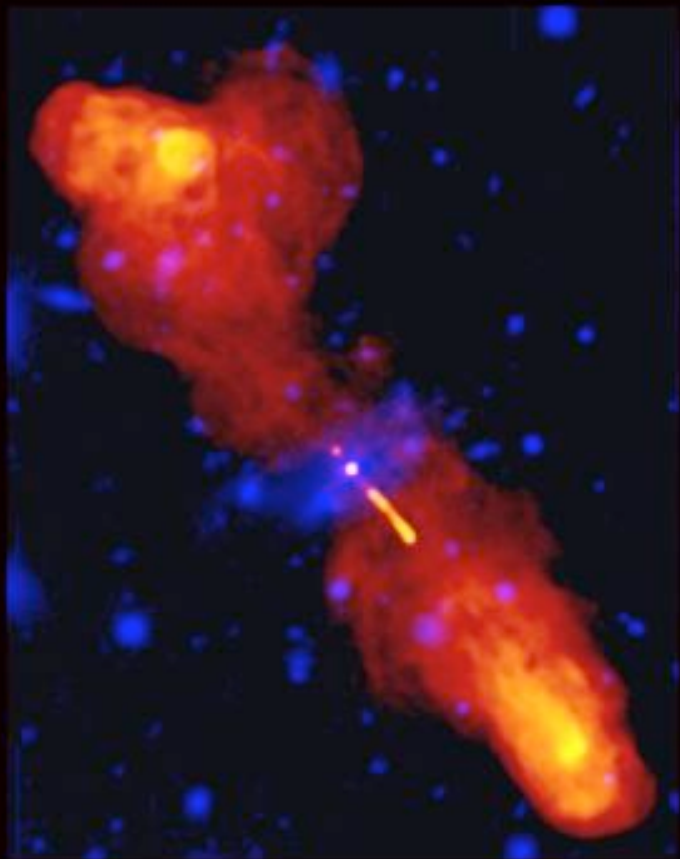
- Mientras que la emisión óptica está normalmente restringida a la región poblada de estrellas, en radio se observan regiones de dimensiones mucho mayores en este tipo de galaxias.



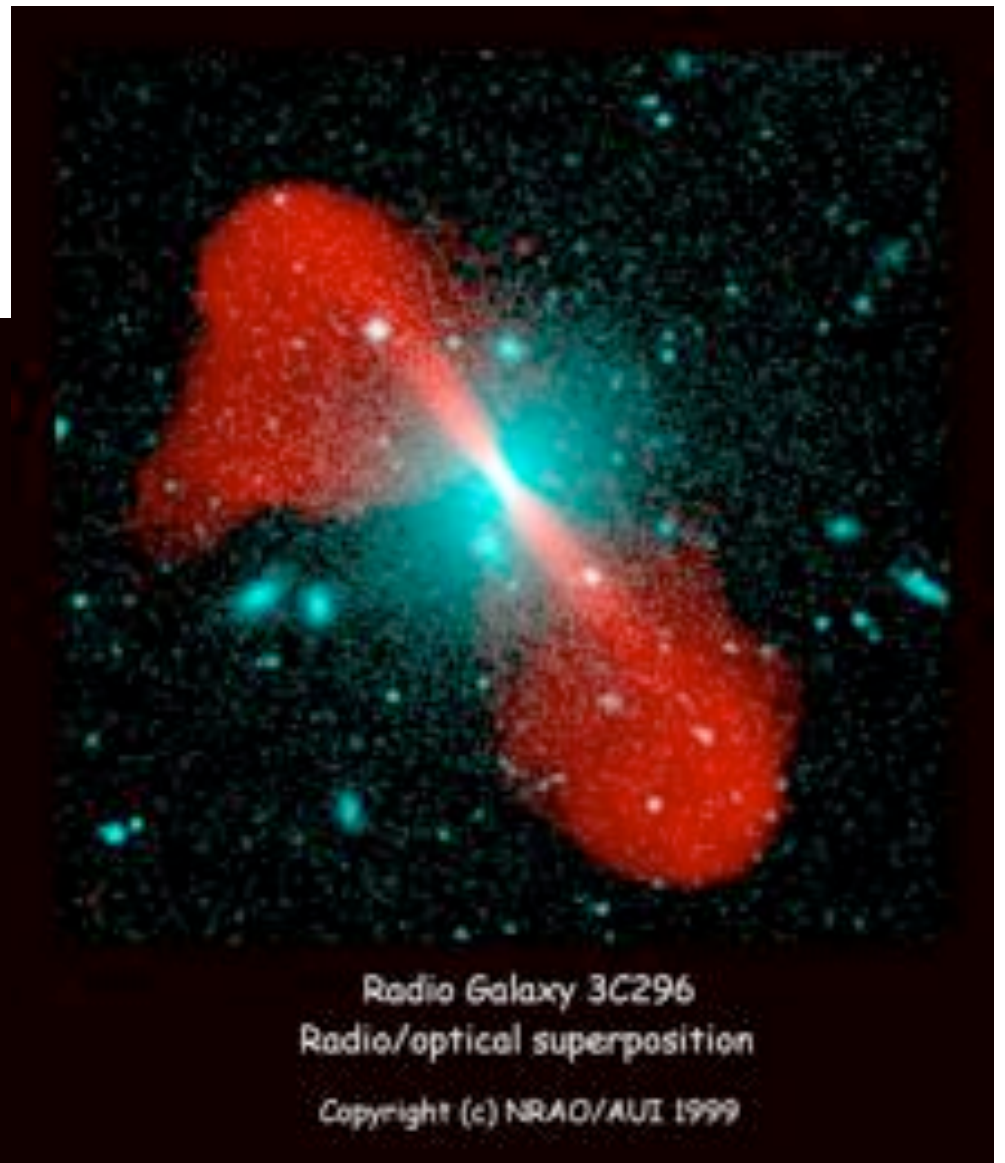
*M87, contrapartida óptica de Virgo A (radiogalaxia)*

- La contrapartida óptica de las radiogalaxias son galaxias elípticas, aunque no todas las galaxias elípticas son radiogalaxias.

Radio Galaxy 3C219  
Radio/optical Superposition



Copyright (c) NRAO/AUI 1999



Radio Galaxy 3C296  
Radio/optical superposition

Copyright (c) NRAO/AUI 1999



# Componentes de radiogalaxias: Chorros

Los chorros están formados por campos magnéticos y por partículas (fundamentalmente electrones) que viajan a velocidades próximas a la de la luz. La combinación de partículas relativistas y campos magnéticos en los chorros produce un tipo particular de radiación electromagnética: la **radiación sincrotrón**.

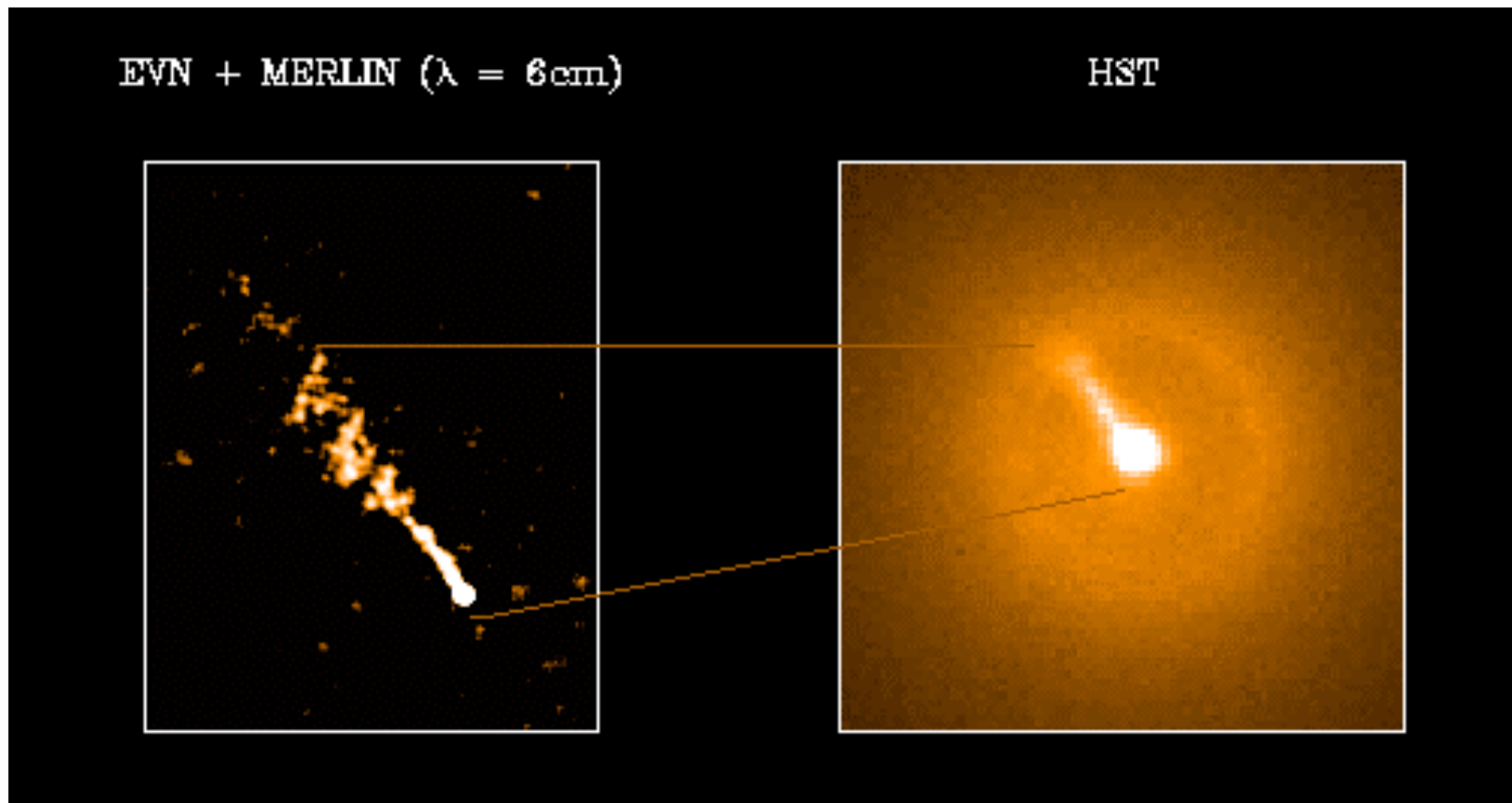
- Emisión colimada
- Muy intensa
- Polarizada
- Espectro continuo

Transportan el material del núcleo a los lóbulos



# Chorros en óptico y rayos x

La radiación sincrotrón en astrofísica no es algo exclusivo de las ondas de radio. Se observan chorros extragalácticos con emisión sincrotrón óptica y en rayos X.



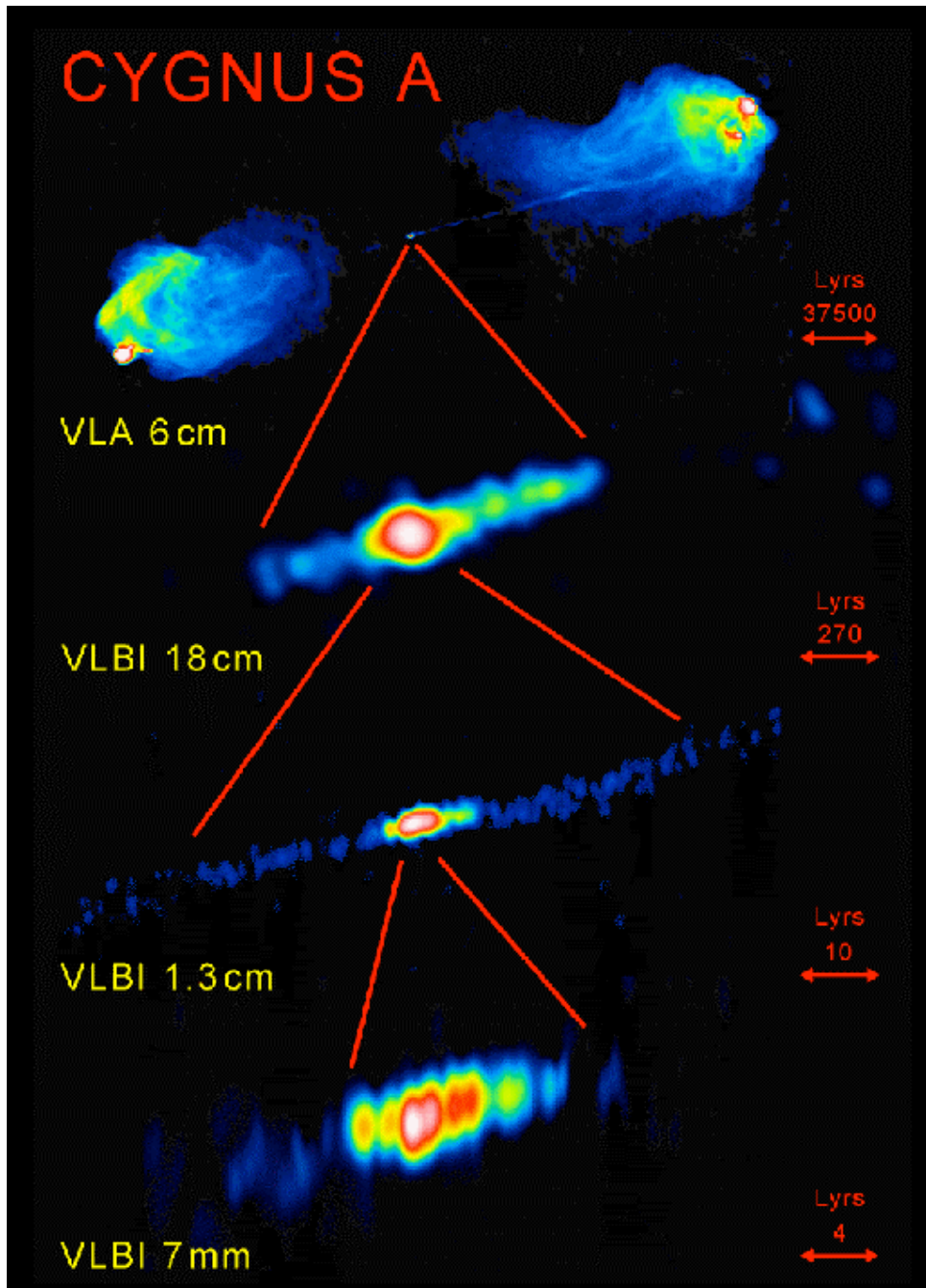
# Lóbulos y puntos calientes

Cuando el material de los chorros choca contra el medio interestelar alrededor, se producen choques, que acelerarán partículas (electrones y protones):

Puntos calientes

Desde aquí, partículas van perdiendo energía y se difunden produciendo los lóbulos

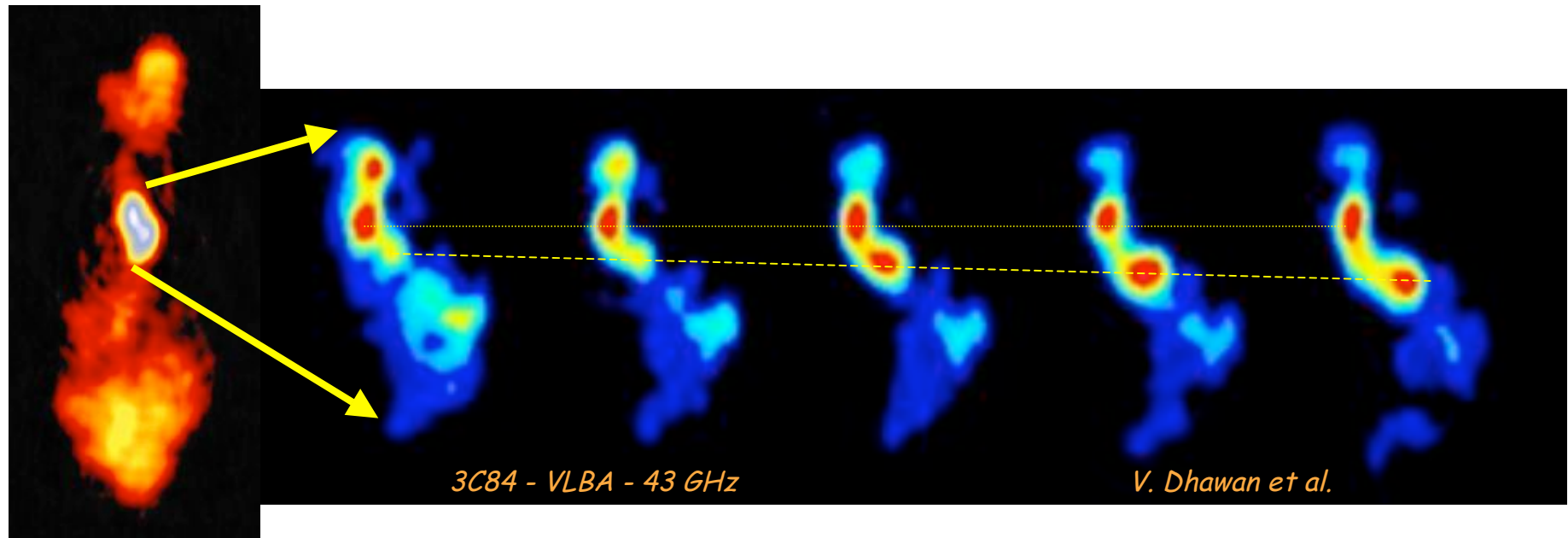




Observaciones con VLBI permiten observar detalles del núcleo

# Chorros relativistas

Uno de los fenómenos más espectaculares observados en los chorros extragalácticos, y que ratifica el carácter relativista de los mismos es el movimiento superlumínico: componentes que viajan a lo largo del chorro con **velocidades aparentes superiores a la de la luz**.



# La fuente de energía

## Modelos propuestos:

- Reacción en cadena de supernovas *(Burbidge 1961)*
- Cúmulos estelares muy densos *(Spitzer & Saslaw, 1966)*
- Accumulación de púlsares *(Arons, Kulsrud & Ostriker, 1975)*
- Formación estelar violenta *(Terlevich & Melnick, 1985)*
- Estrellas supermasivas *(Hoyle & Fowler, 1963)*
  - $10^8 M_{\odot}$
  - Campo magnético toroidal
  - Disco de gas
  - Necesidad de concentraciones de masa hasta límites relativistas
- Acrecimiento hacia un agujero negro supermasivo *(Salpeter 1964; Zeldovich 1964)*
  - ~5% masa cayente → energía
  - Pero esta idea no recibió mucha atención...

## Hoy: Modelo estandar: Agujero negro

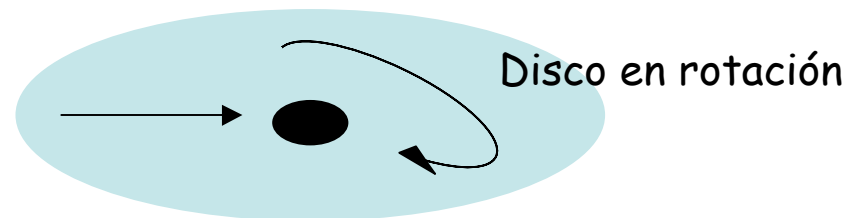
Importante argumento para cambiar de idea: Descubrimiento de los pulsares en 1967  
→ Estrellas colapsadas existen!!

# Energía liberado en agujero negro

- Masa cayéndose en agujero negro puede liberar hasta 42% de la energía correspondiente a su masa
- (para comparar: nucleosíntesis: solo 0.07%)

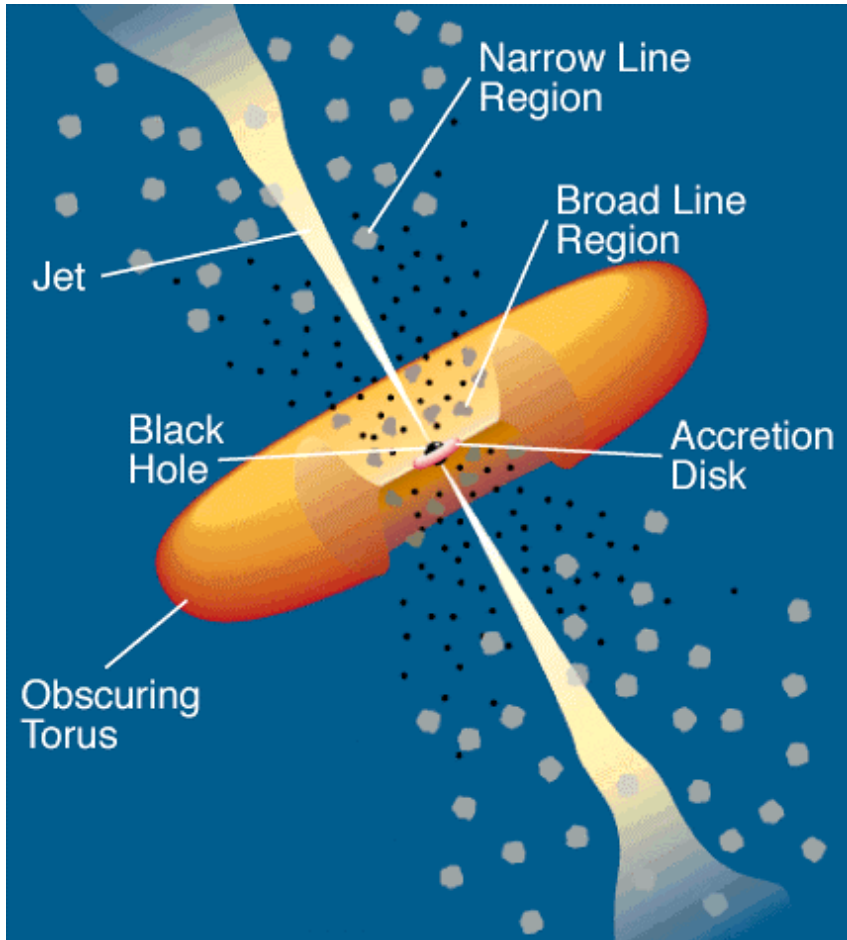
Proceso:

- Momentum angular  $\rightarrow$  caída directa imposible
- Sólo caída paralela a la rotación es posible sin impedimento  $\rightarrow$  Se forma disco de acrecimiento
- Materia se mueve hacia dentro perdiendo momentum angular y energía vía viscosidad



Materia se mueve hacia dentro

# Modelo unificado



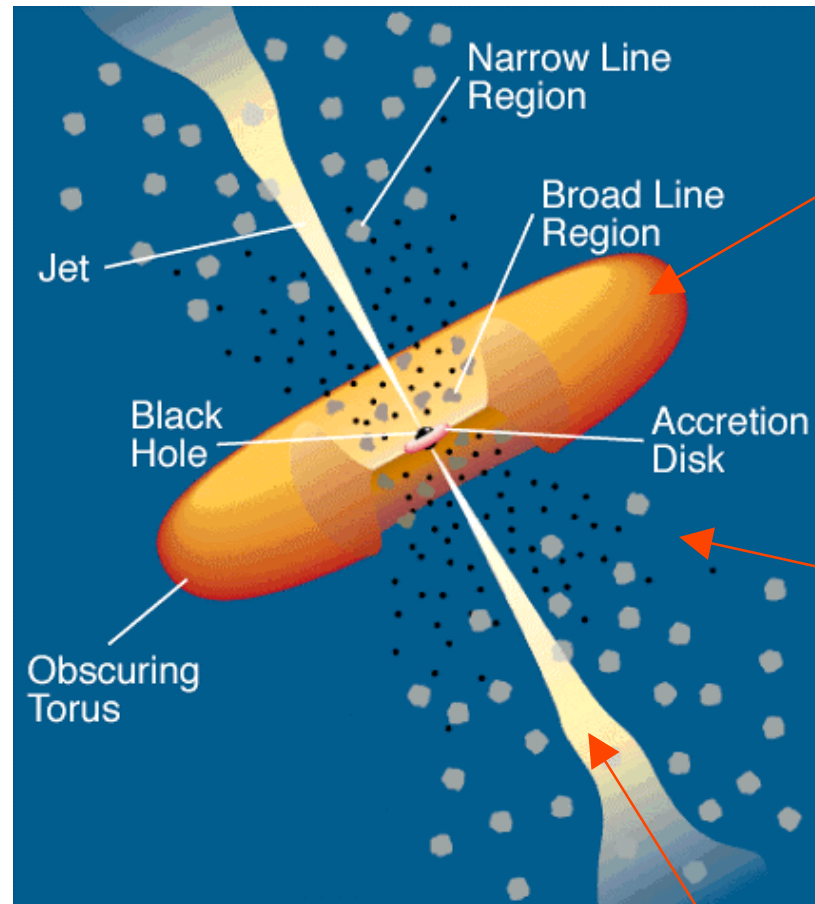
- Agujero negro ..... 0.2 a.u.
- Disco de acrecimiento ..... 10 - 200 a.u.
- Región líneas anchas ..... 0.02 - 0.2 a.l.
- Radio interior del toroide ..... 0.1 a.l.
- Región líneas estrechas ..... 1 - 100 a.l.
- Chorros ..... 0.1 a.l. - 1 Mpc

La orientación del eje principal del AGN con respecto al observador es un aspecto clave de este modelo.



# Modelo unificado

Algunos núcleos activos tienen emisión radio, otros no.



No vemos líneas anchas (gran rango de movimientos)

Vemos líneas anchas y estrechas

Vemos líneas anchas y estrechas, Domina el núcleo y chorro

# Resumen de galaxias con núcleo activo (AGN)

- Propiedades destacadas:
  - Altas luminosidades desde una zona pequeña
  - Líneas de emisión anchas
  - Variabilidad temporal
  - Algunos tienen emisión fuerte en radio con chorros (entonces se llaman radiogalaxias)
- Hay un modelo unificado que puede explicar:
  - Qué tipo de líneas vemos (líneas más estrechas o más anchas)
  - Si predomina la emisión del núcleo o no
- Lo que no sabemos todavía completamente:
  - ¿Por qué algunos AGN tienen emisión en radio importante y otros no?
  - ¿Qué determina si un AGN es potente o débil?
  - ¿Qué provoca la actividad nuclear en una galaxia?
  - ¿Por qué hay tantas diferencias en la forma y el tamaño de los chorros en radio?

# Interacciones entre galaxias

Las Nubes de Magellanes grandes



UKS 17

Las Nubes de Magellanes Pequeñas



Vecinos de la Vía Láctea



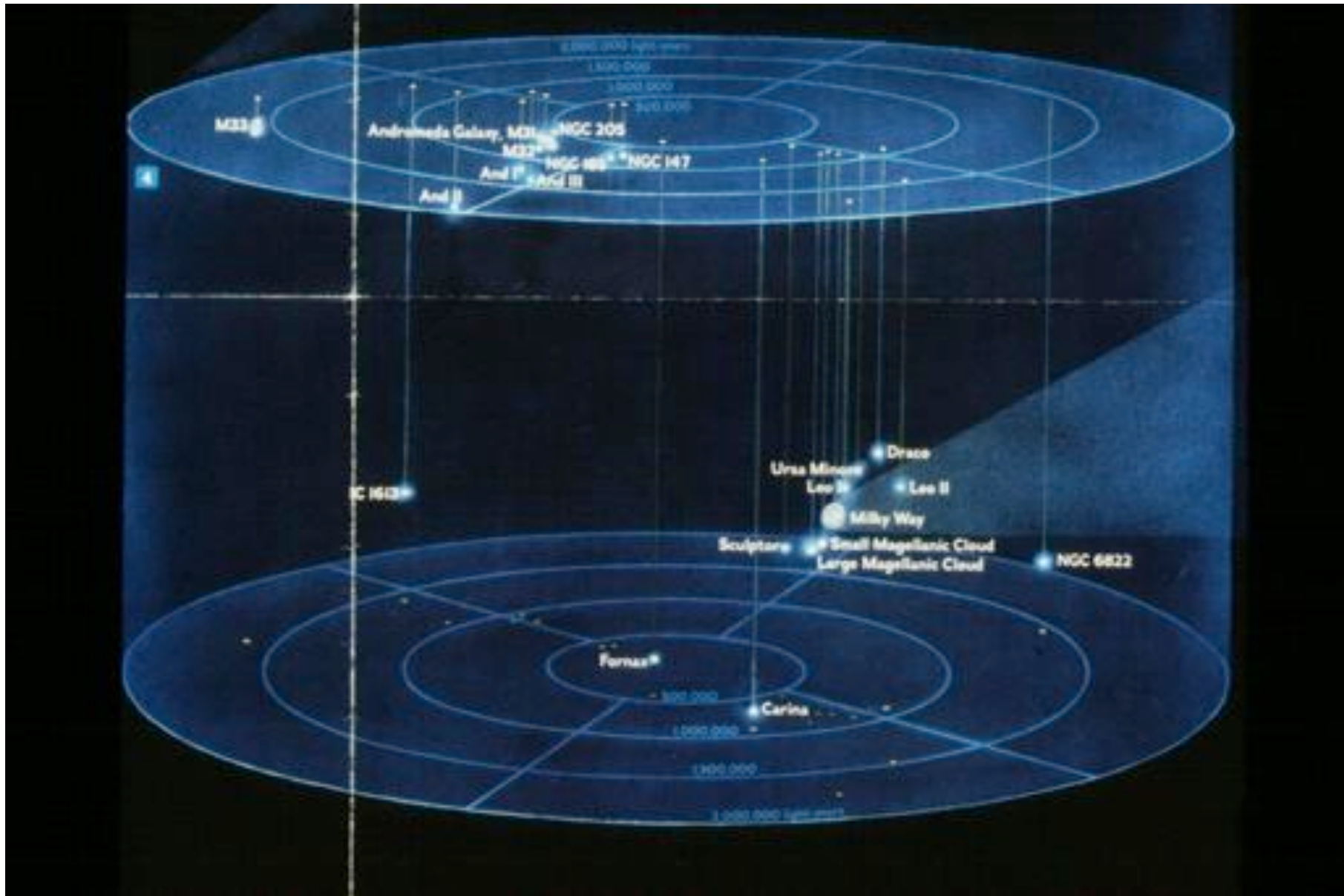
La galaxia espiral  
Andromeda  
(M31)



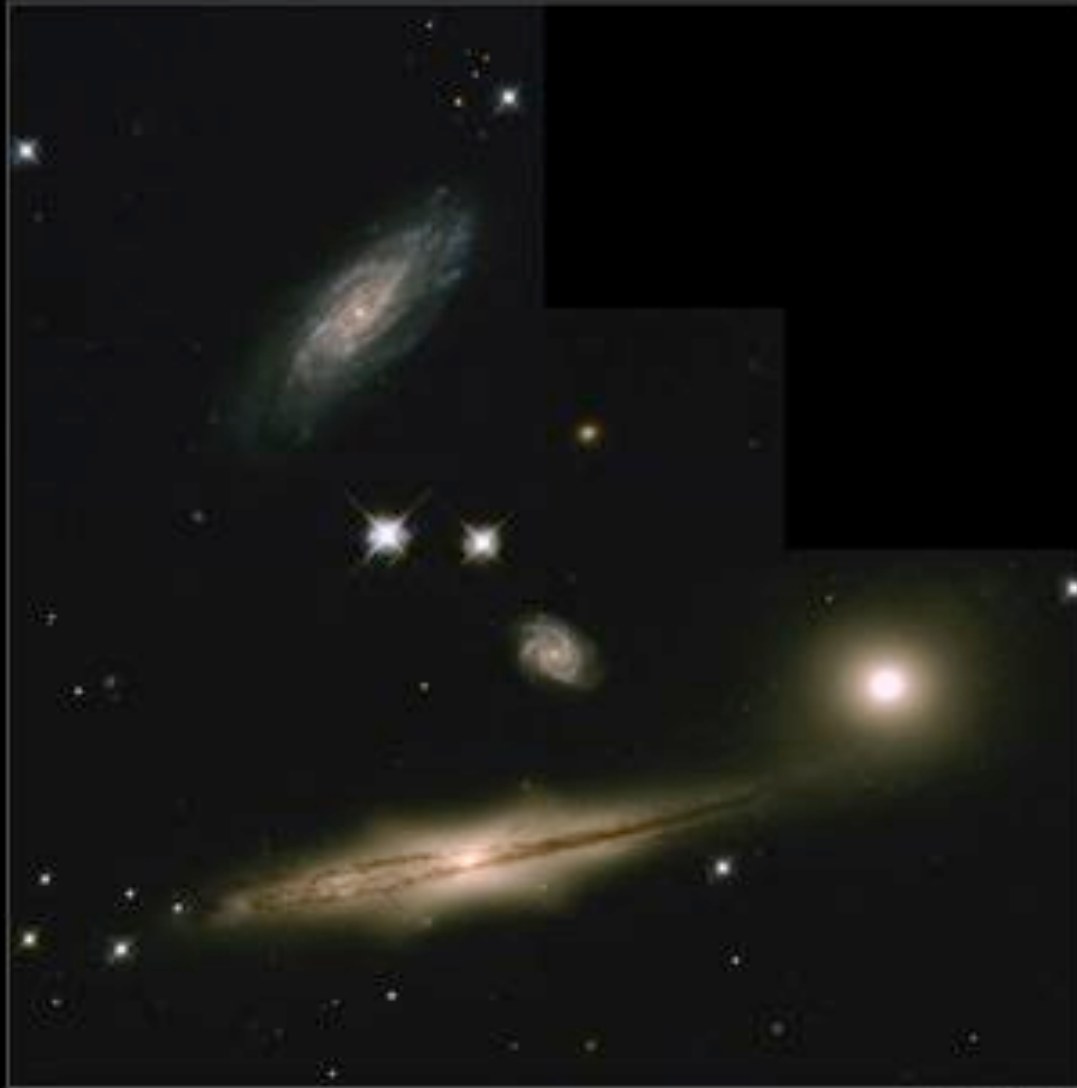
M33 (Triangulum)

M33 © IAC/RGO/Malin  
Photo from Isaac Newton Telescope plates by David Malin

# Entorno de la Vía Láctea: Grupo local



Hickson Compact Group 87



Hubble  
Heritage

PRC99-31 • Space Telescope Science Institute • Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

## Grupos de galaxias:

Hasta una decena de miembros

(En la imagen se aprecian también los diferentes tamaños que pueden tener las galaxias espirales.)

# Cúmulos de galaxias

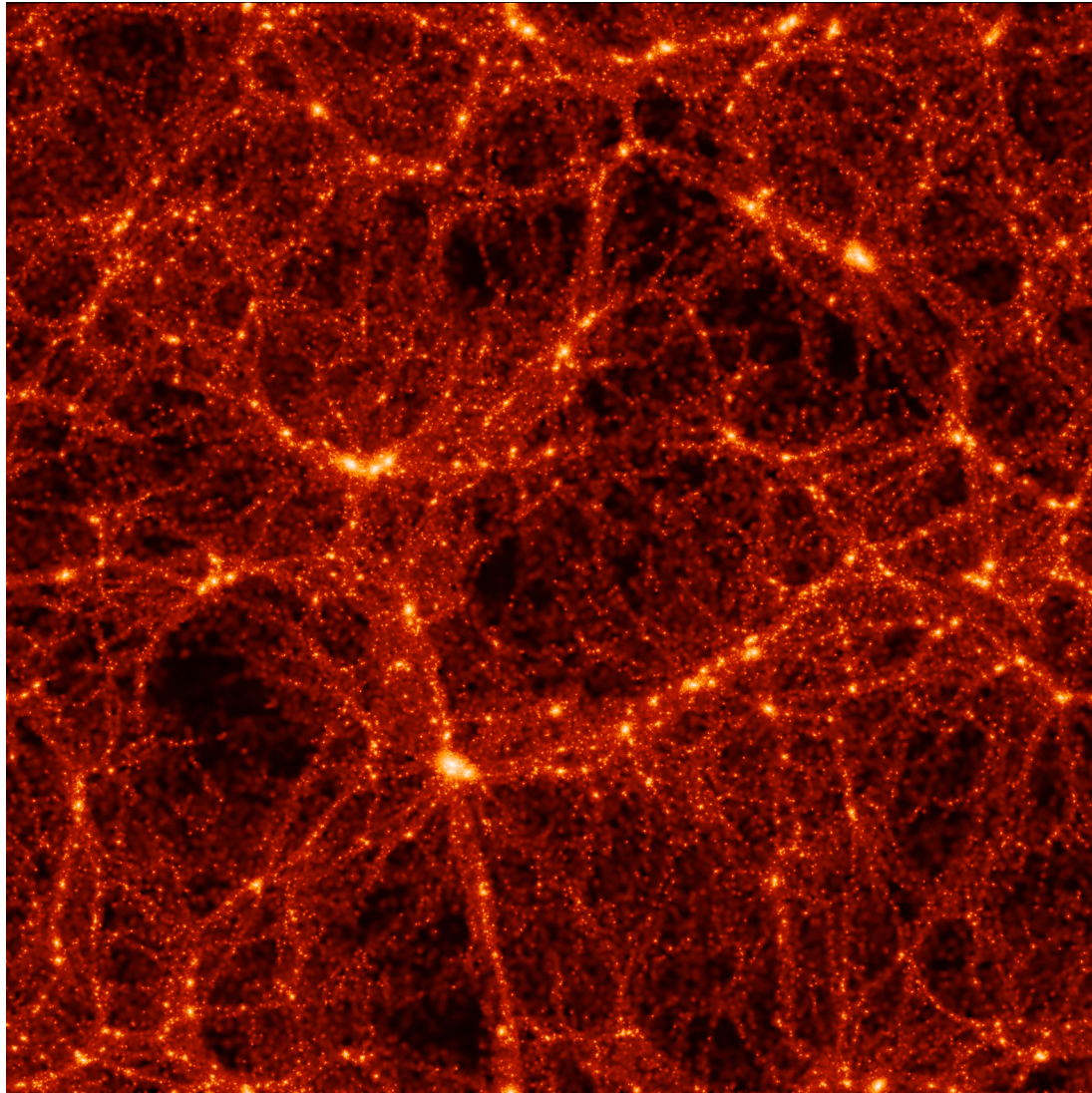


Unos cientos a  
miles de  
miembros

Cúmulo de Coma



# Gran estructura en la distribución de galaxias



Hay:

- Filamentos
- Zonas con pocas galaxias

Imagen creado en una simulación

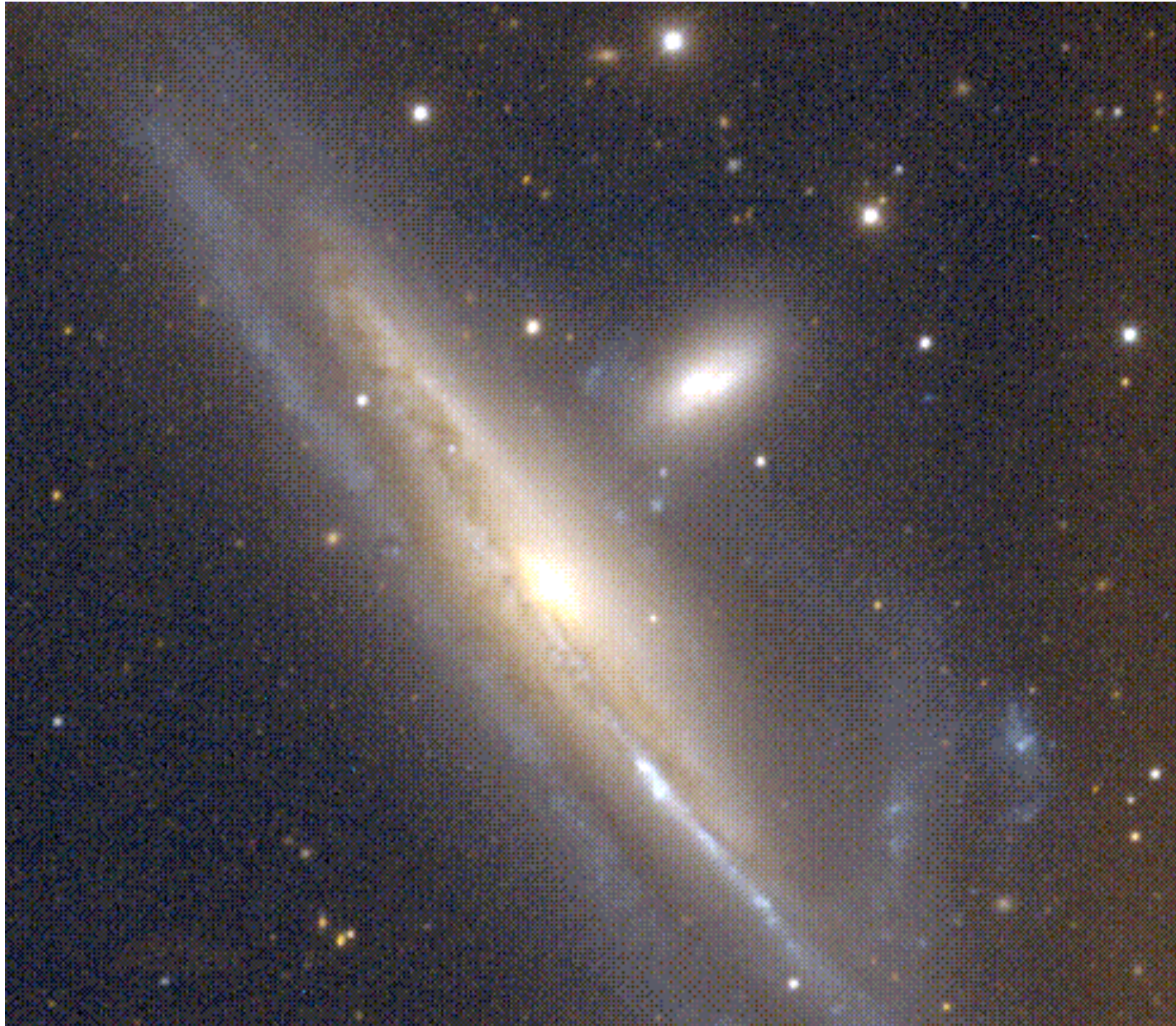
## → Las galaxias viven en agrupaciones

- Diámetro del sol: 2.3 segundos-luz
- Distancia a la próxima estrella: 2 años-luz
  
- Diámetro de la Vía Láctea: 100.000 años-luz
- Distancia a las Nubes de Magallanes: 200.000 años-luz
- Distancia a la galaxia de Andrómeda: 3 millones años-luz

Distancia entre estrellas: 30 millones su diámetro: no chocan

Distancia entre galaxias: 30 veces su diámetro: pueden chocar

# Interacción menor



NGC 1531

# Interacción mayor

Galaxies NGC 2207 and IC 2163



Hubble  
Heritage



M51: Galaxia Whirlpool

Formación de nuevas  
galaxias enanas



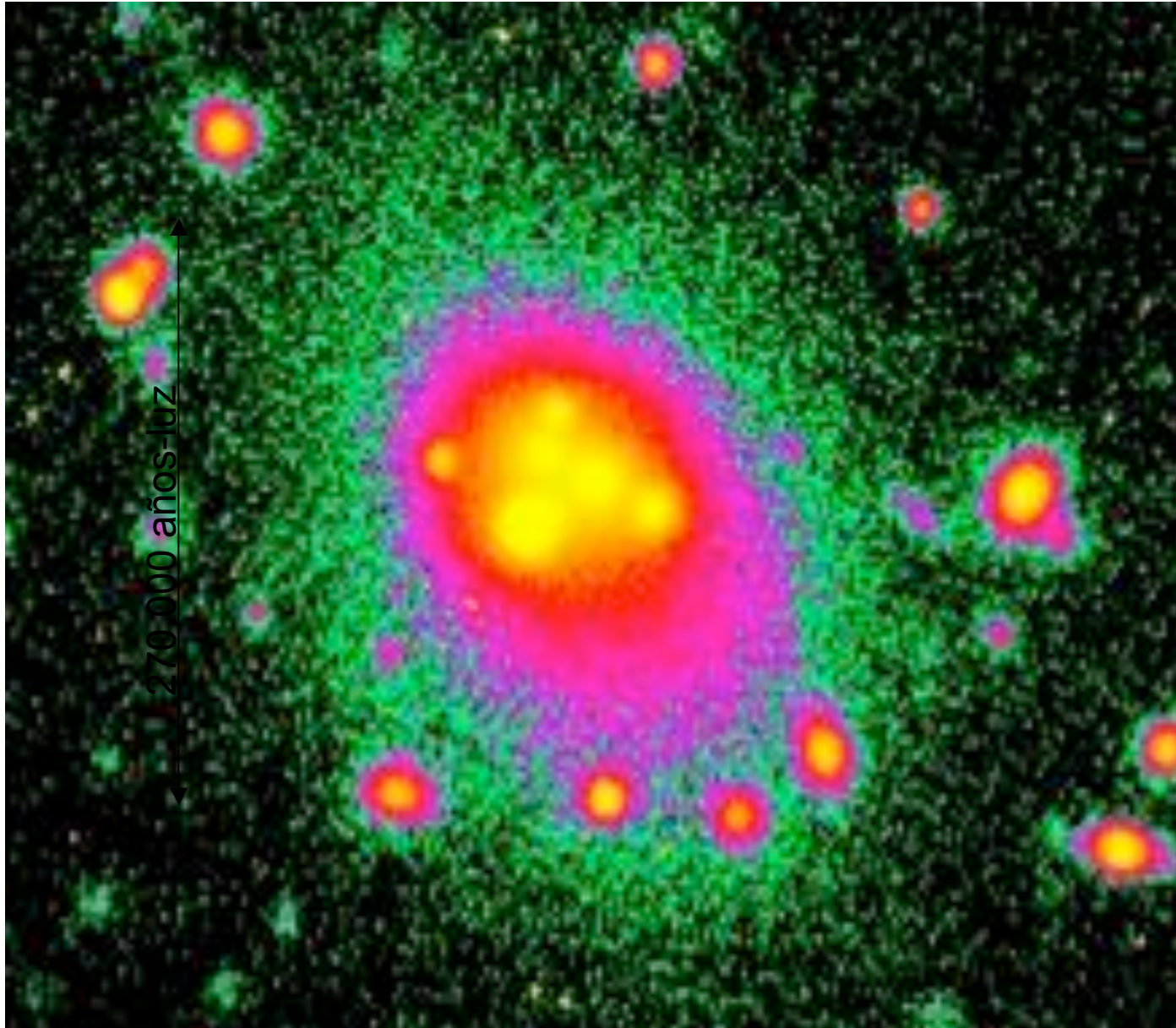
Colas y puentes de gas y  
estrellas



## Final de muchas colisiones: Fusión



# Canibalismo en cúmulos de galaxias



Galaxia central en  
Abell 3827

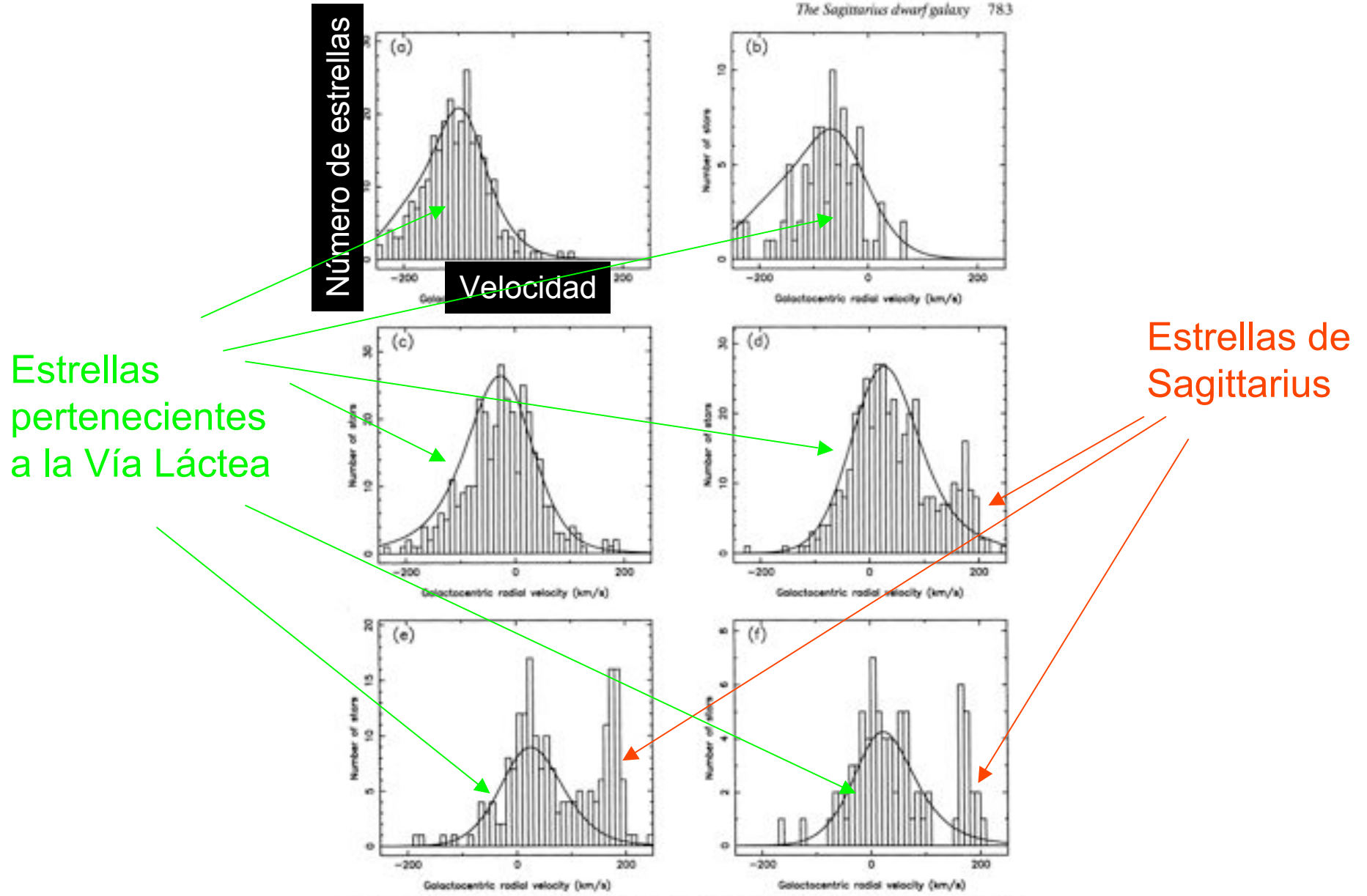


# Canibalismo en la Vía Láctea: La galaxia enana Sagittarius



- Distancia: 24 kpc  
( $\approx$  diametro de la Vía Láctea)

-Extensión en el cielo:  
10 grados  
(Tamaño de la luna:  
medio grado)



Número de estrellas

Velocidad

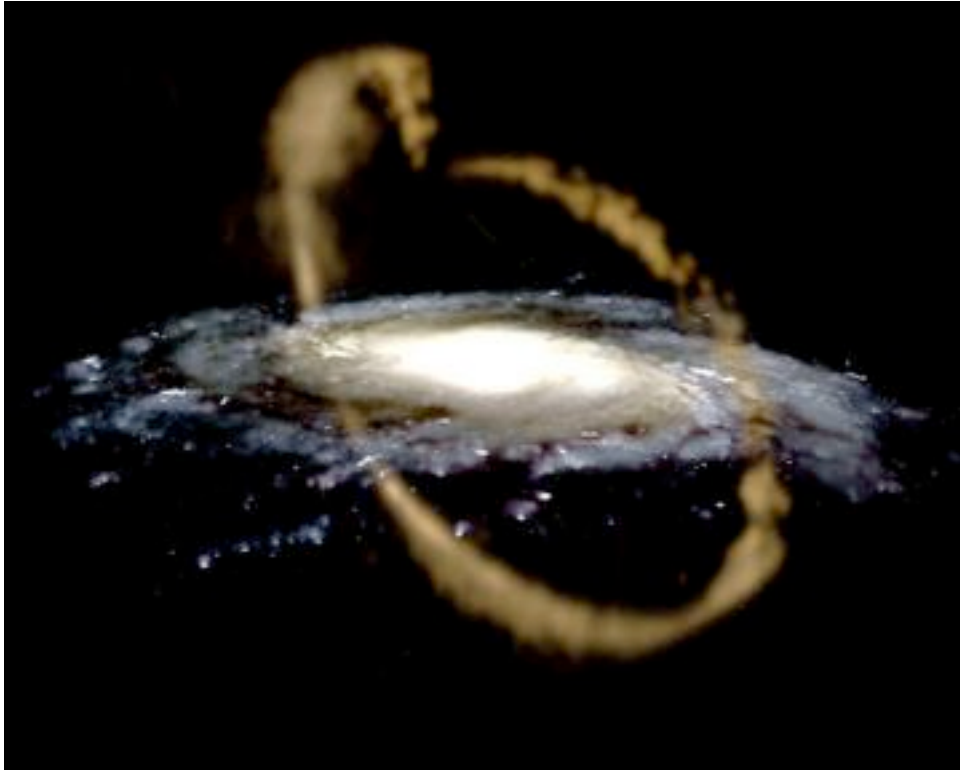
Estrellas pertenecientes a la Vía Láctea

Estrellas de Sagittarius

Figure 1. Comparison between the expected velocity distribution and the data. The lines of sight are: (a)  $l = -15^\circ$ ,  $b = -12^\circ$ , (b)  $l = -15^\circ$ ,  $b = -12^\circ$ , (c)  $l = -5^\circ$ ,  $b = -12^\circ$ , (d)  $l = 5^\circ$ ,  $b = -12^\circ$ , (e)  $l = 5^\circ$ ,  $b = -15^\circ$  and (f)  $l = 5^\circ$ ,  $b = -20^\circ$ . The unknown feature is observed in (d), (e) and (f), centred at a velocity of  $172 \text{ km s}^{-1}$ .

# "Tidal streams"

Colas de marea de estrellas alrededor de galaxias: Testigos de canibalismo en el pasado



Dibujo de la apariencia probable de la cola creada por la galaxia Sagitarius alrededor de nuestra Galaxias



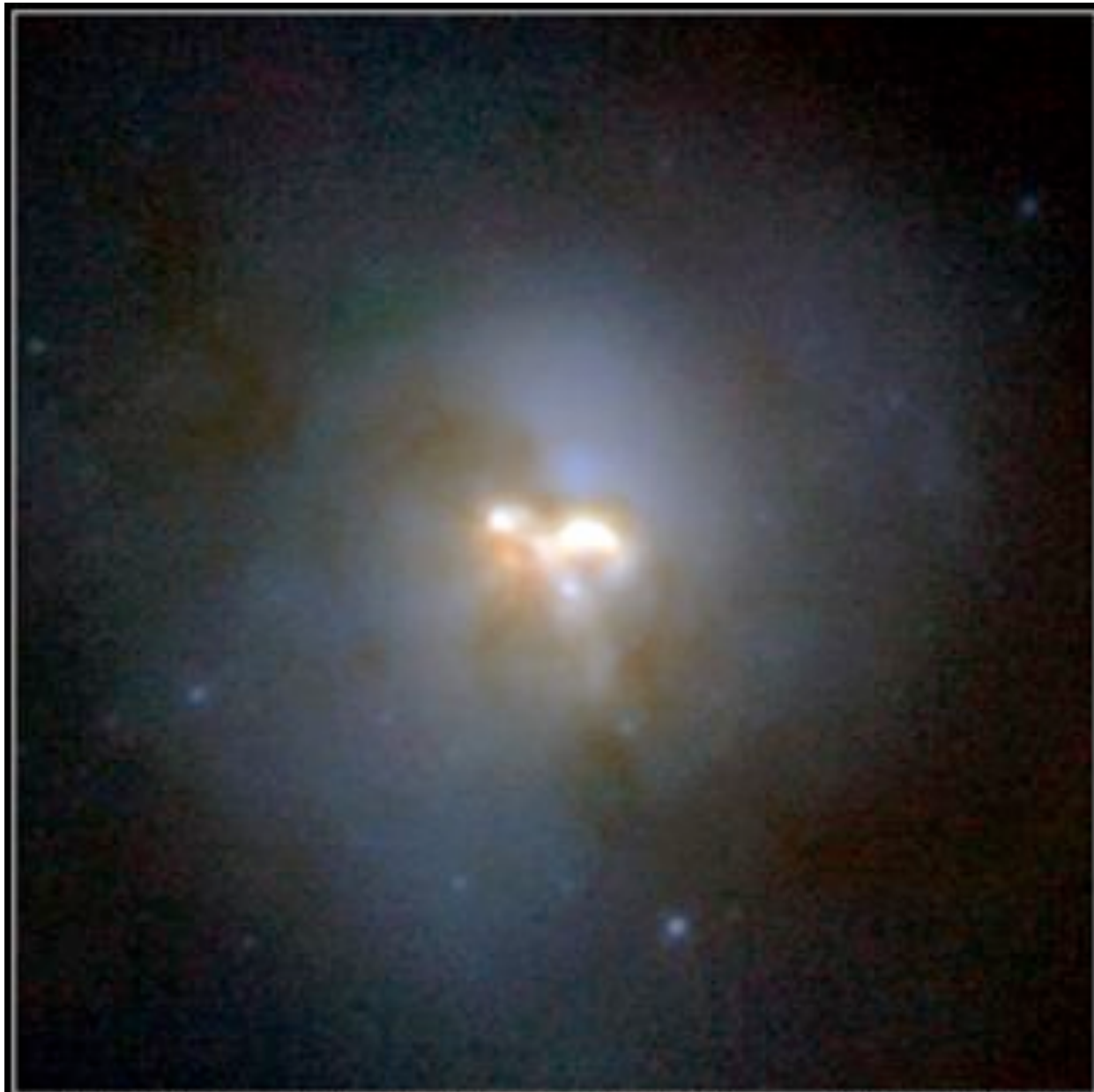
Cola de estrellas alrededor de NGC 5907

# Galaxias peculiares

Con frecuencia son  
peculiaris debido a una  
interaccion



Galaxia con anillo polar  
NGC 4650a



Galaxias con **brote extremo de formación estelar**:  
Observaciones en el infrarrojo demuestran que tienen núcleo dobles y triples  
→ ¡Son remantes de fusiones!

**Ultraluminous Infrared Galaxy Arp 220** HST • NICMOS

PRC97-17 • ST ScI OPO • June 9, 1997

R. Thompson (University of Arizona),

N. Scoville (California Institute of Technology) and NASA

Hoag's Object

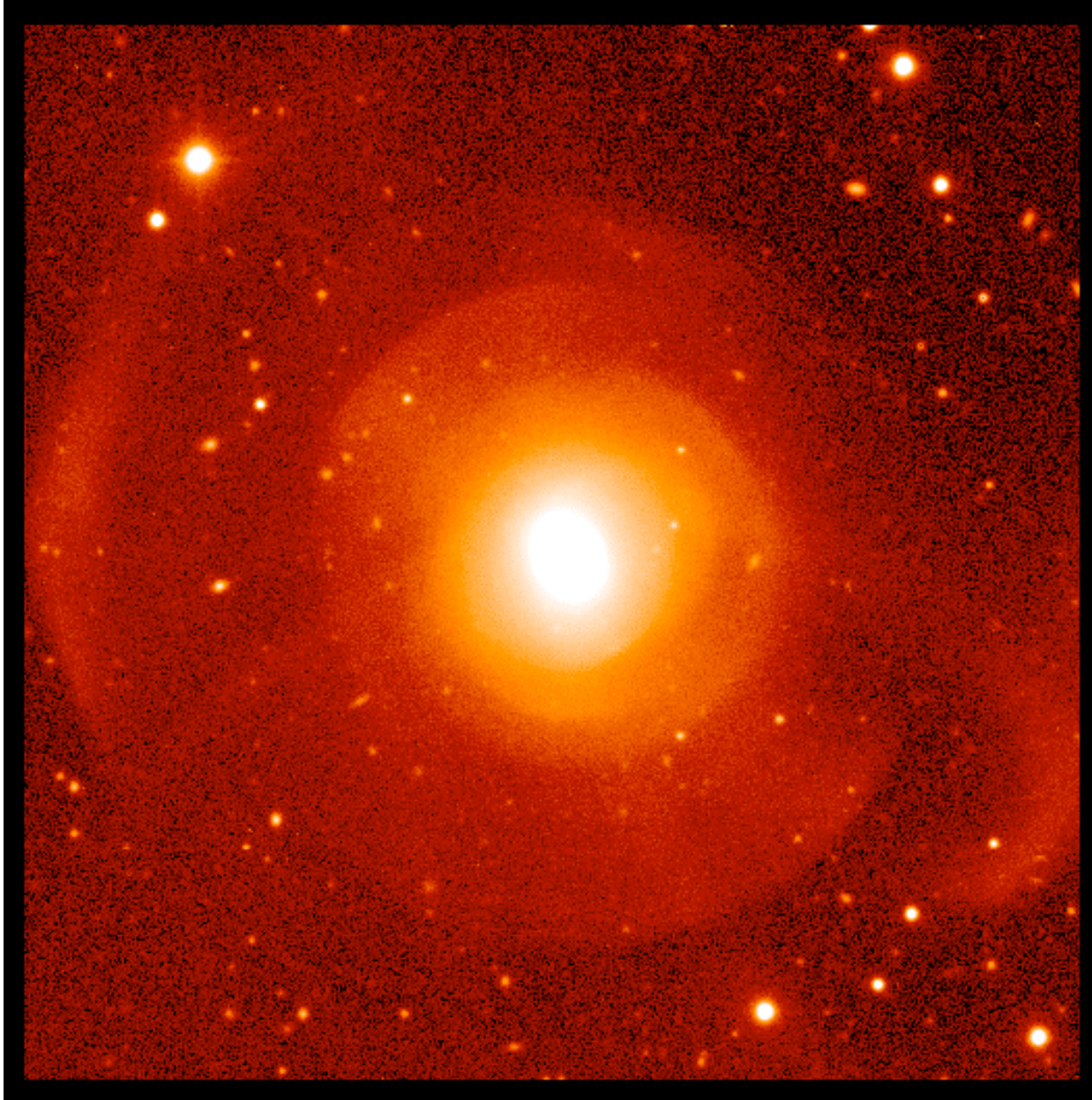


Galaxia-Anillo

Hubble  
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)  
Hubble Space Telescope WFC2 • STScI-PRC02-21

# Conchas en galaxias elípticas

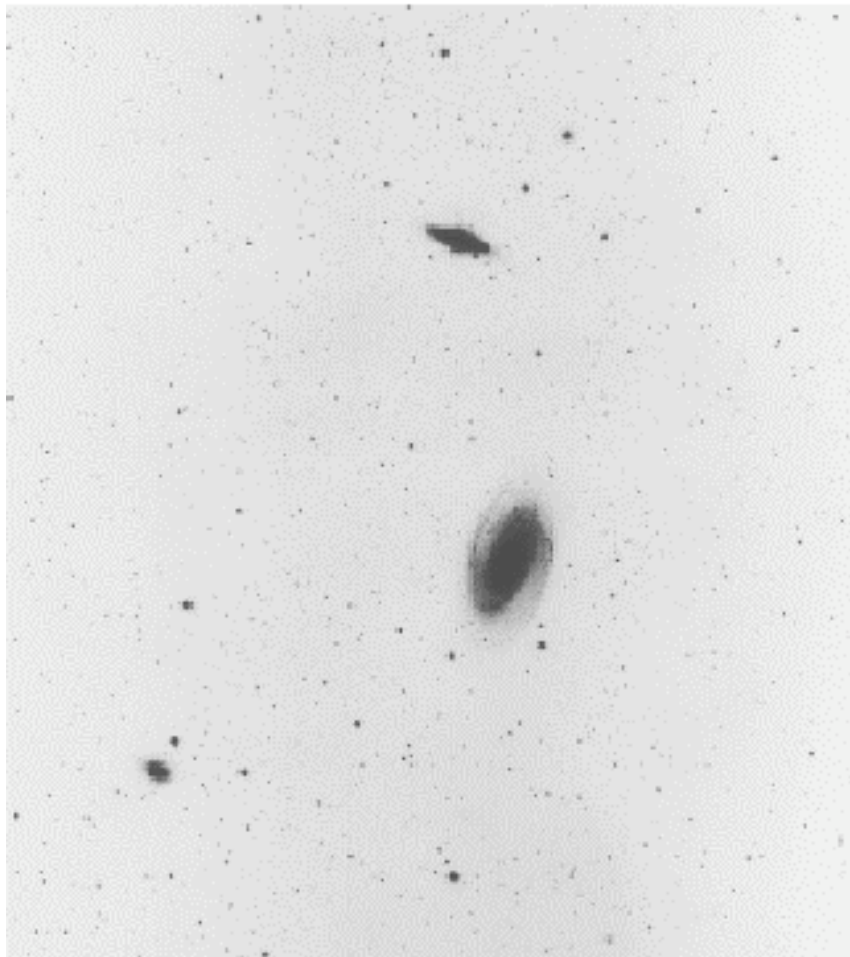


Arp 227

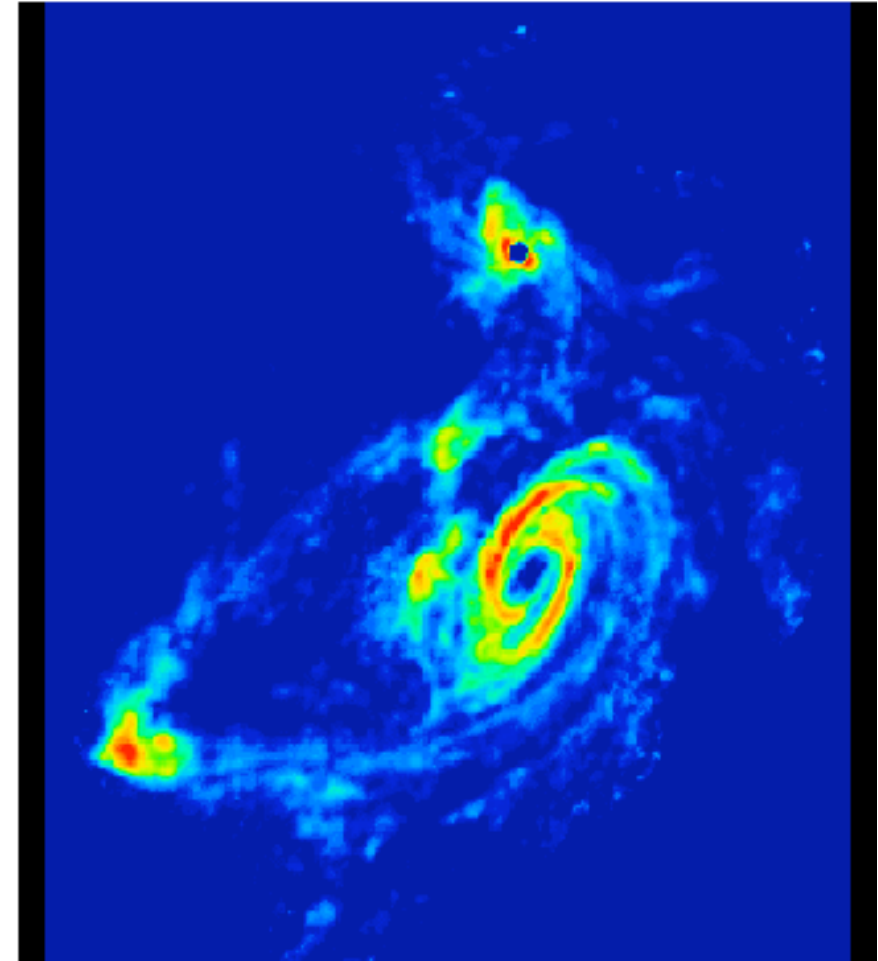
# Gas atómico es sensible indicador de interacción

## TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



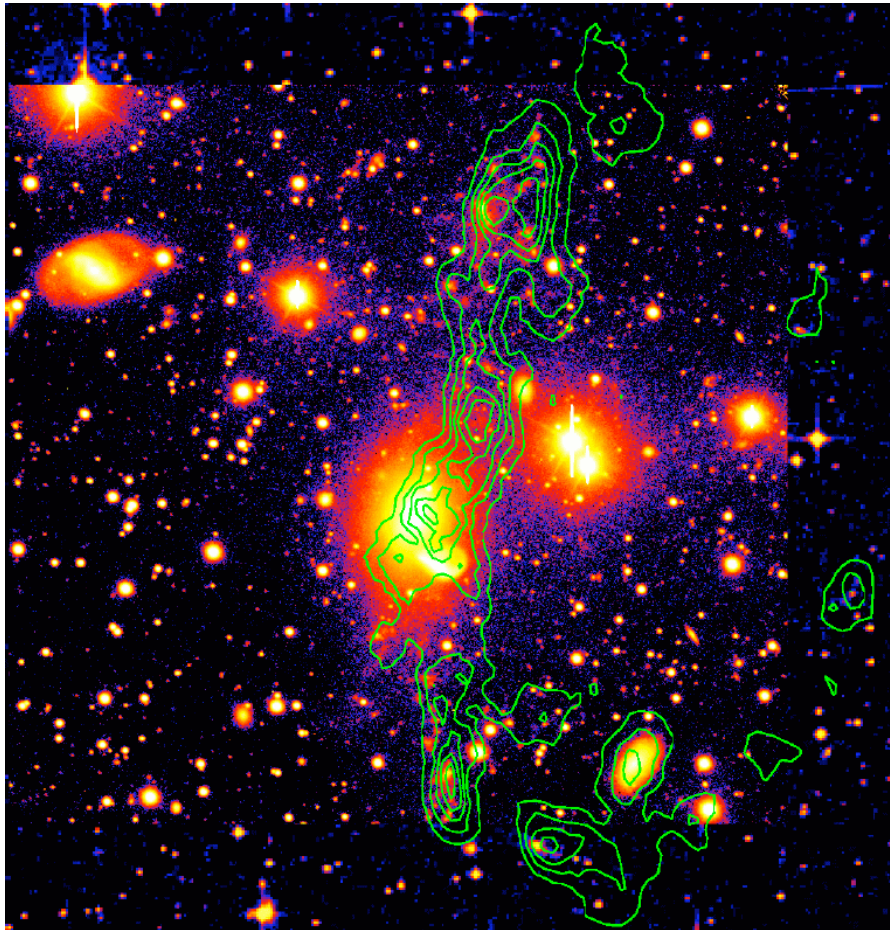
21cm HI Distribution



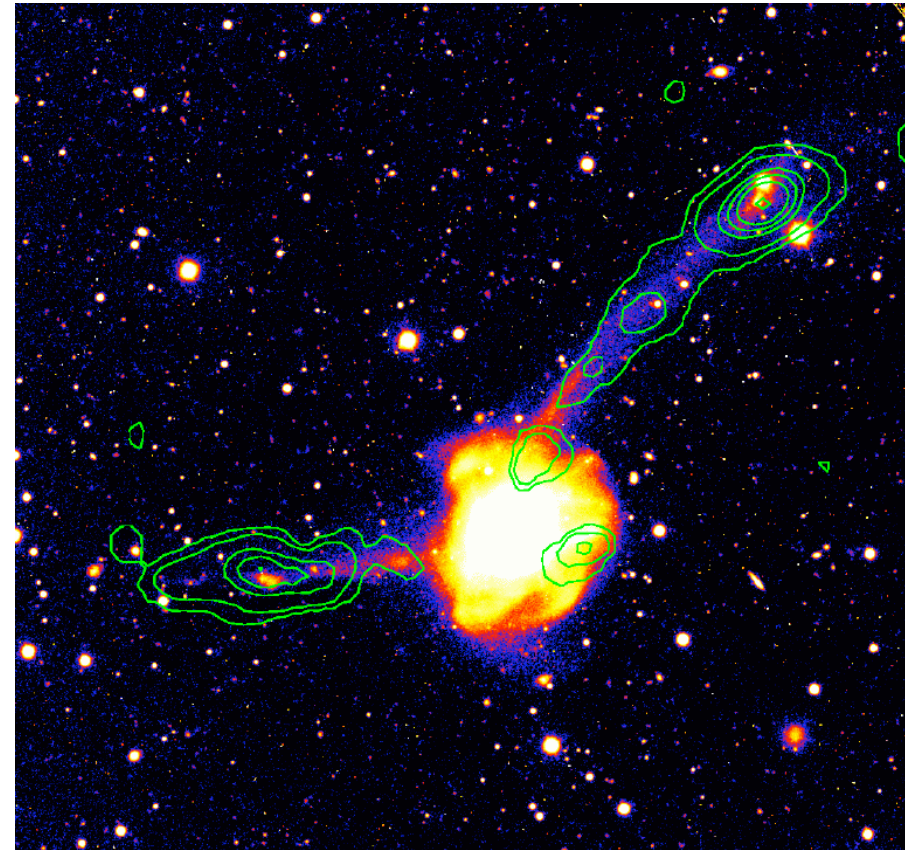


# Distribución de gas en colisiones

Hidrogeno atómico: A las zonas externas

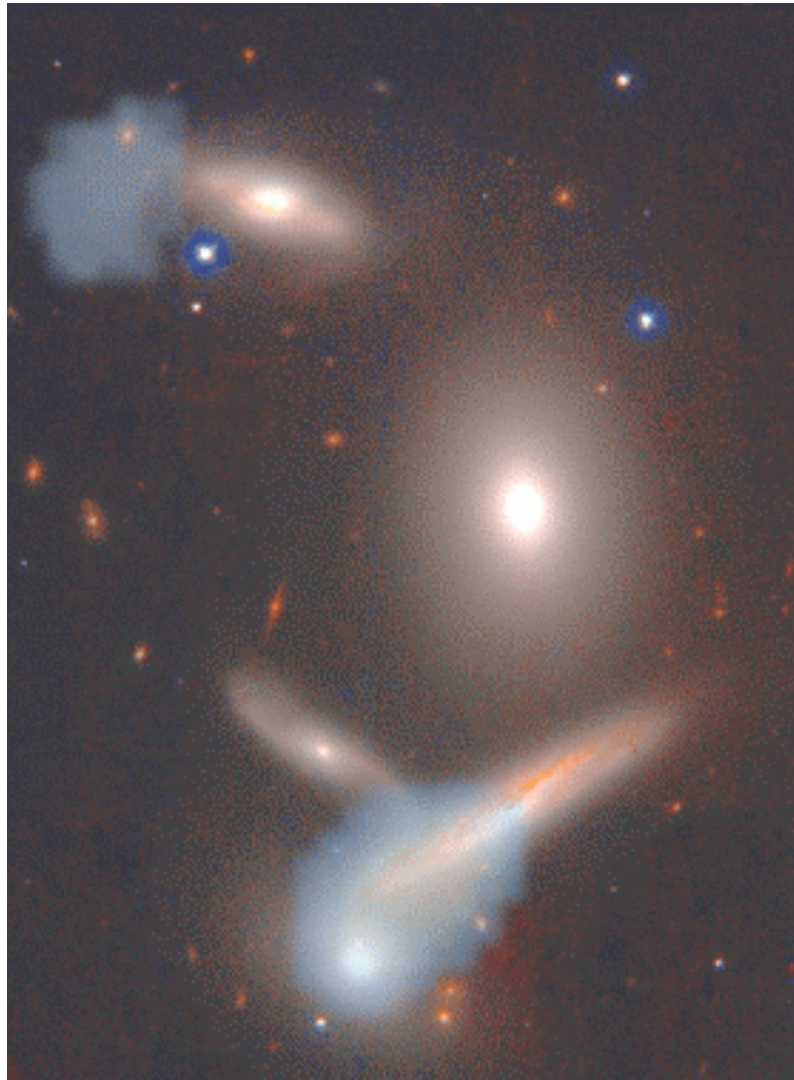


NGC 5291

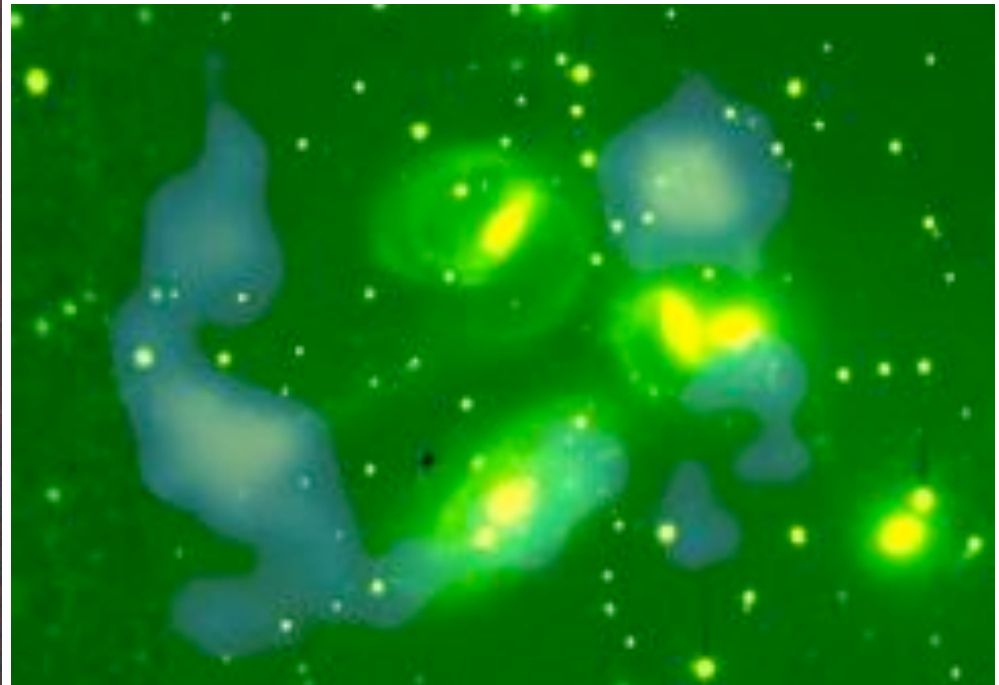


NGC 7252

# Hidrogeno atómico en grupos

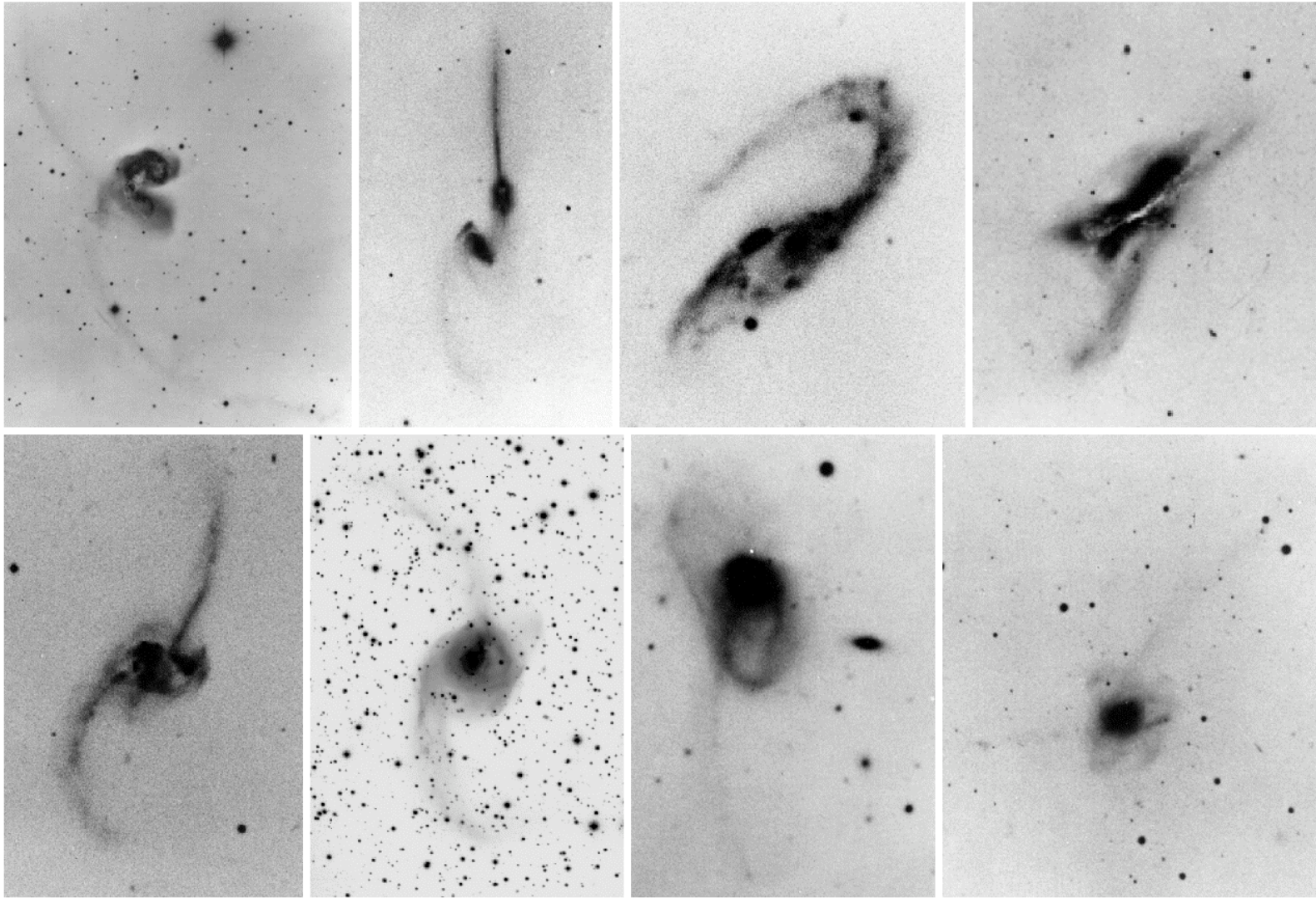


- Grupos compactos de Hickson 40 y 92
- Poco hidrogeno atómico y fuera de las galaxias



De L. Verdes-Montenegro, IAA

# Comprender las interacciones: Clasificar

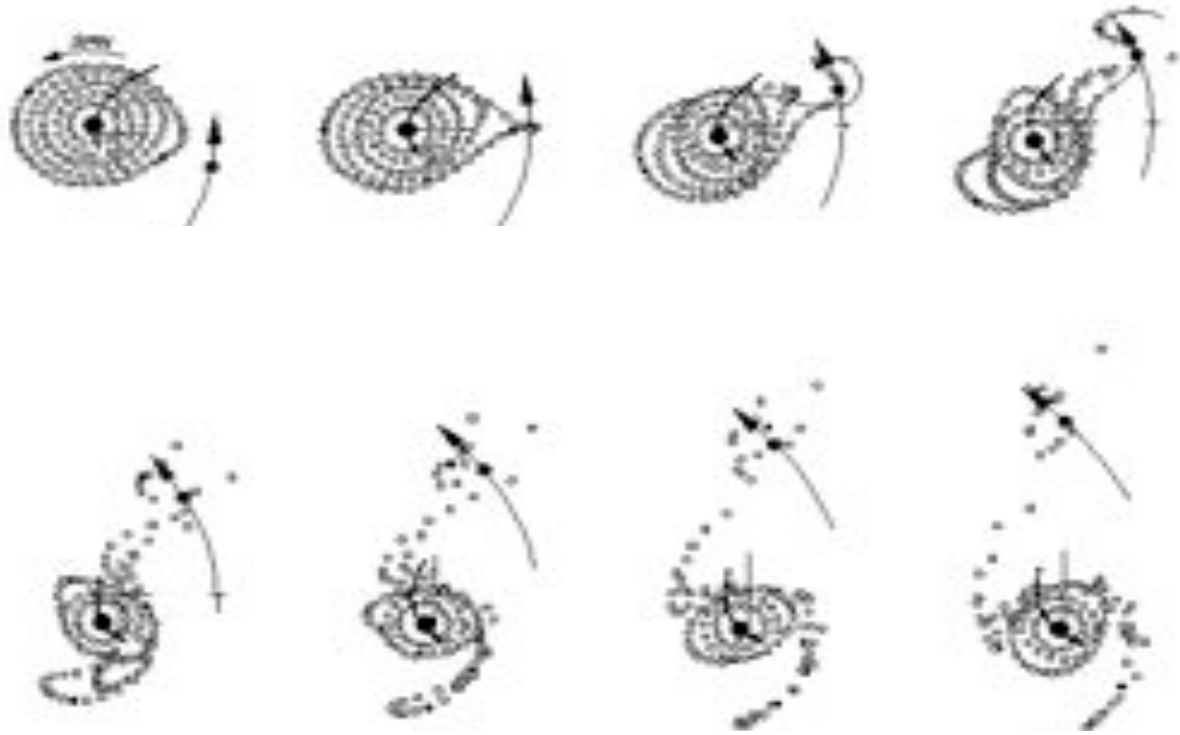


Secuencia propuesto por Toomre (1977)

## Comprender las colisiones: Simulaciones numéricas

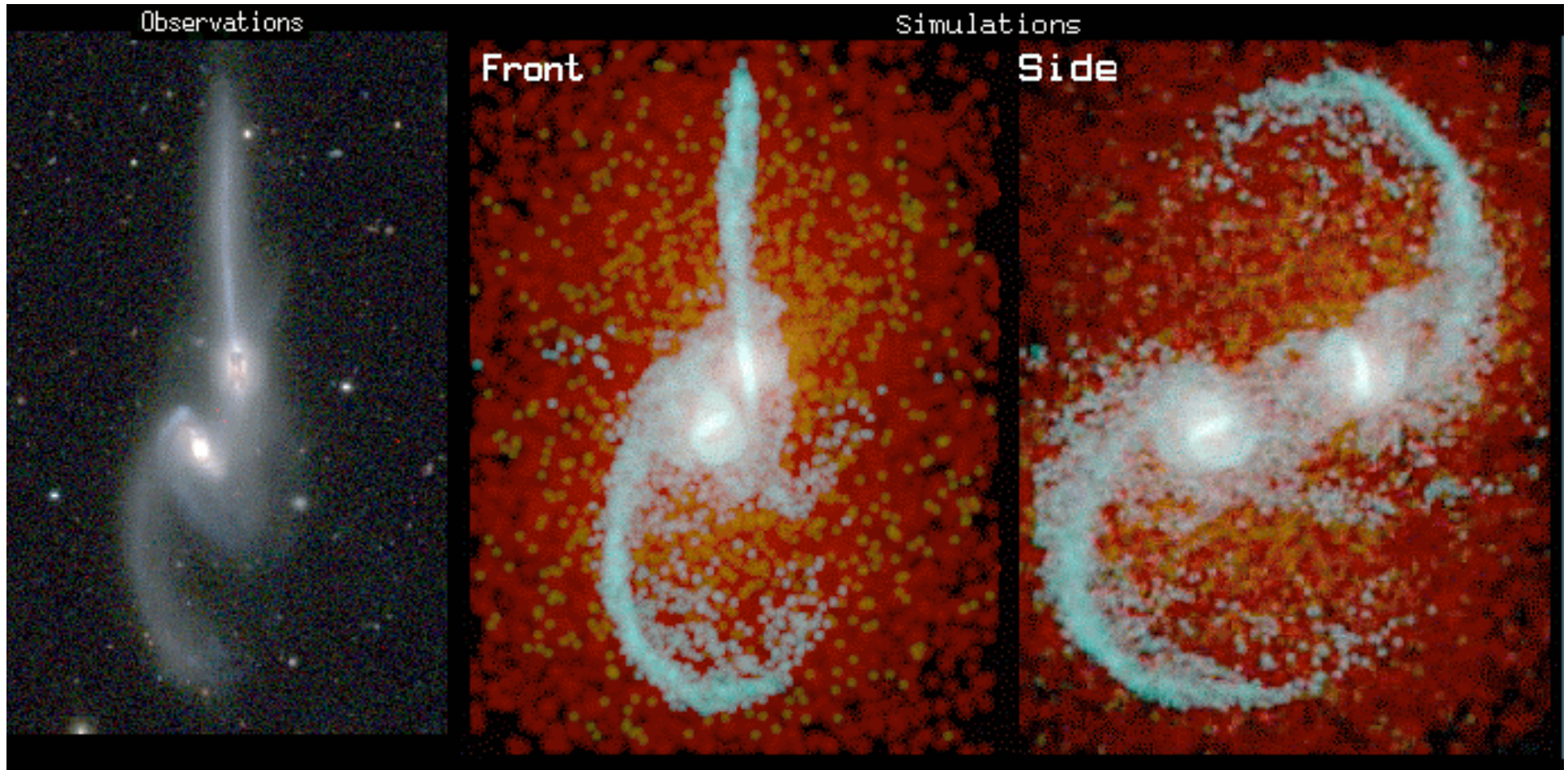
- Necesidad de ordenadores potentes
- Modelos consisten de:
  - Modelo para galaxias: estrellas, gas y materia oscura.
  - Interacción gravitatoria entre las numerosas partes
- Los modelos son complejos.....

1972: Toomre & Toomre demostraron que las colas y puentes se pueden formar solamente con gravitación



Duración de una interacción: unos 1.000 millones de años

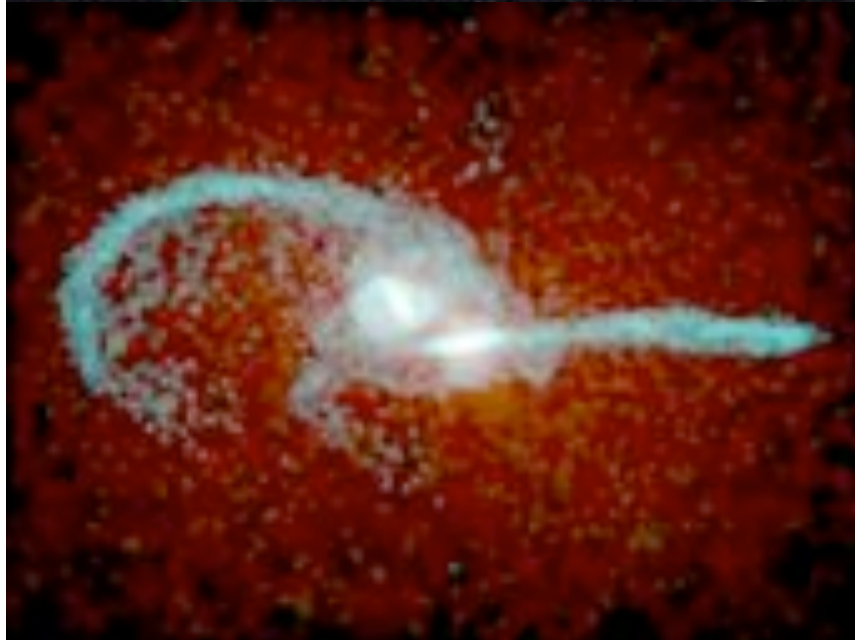
# Descripción de un sistema real: NGC 4676



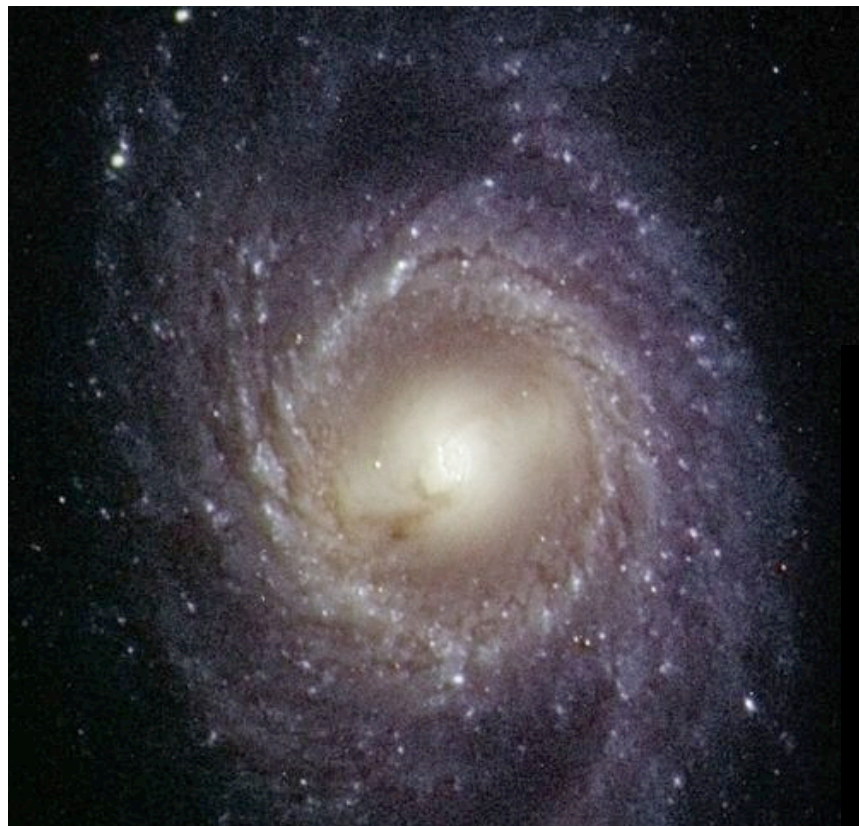
## Descripción de un sistema real: NGC 4676



Simulaciones de J. Barnes



# Producción de barras



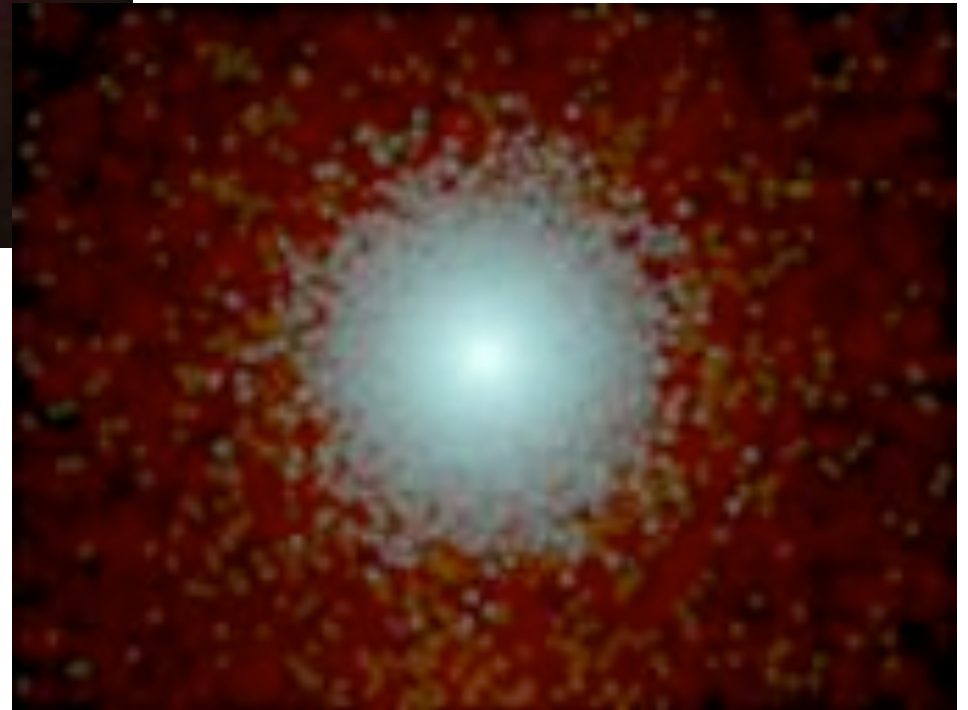
M95



# Ondas espirales



M51: *Galaxia Whirlpool*

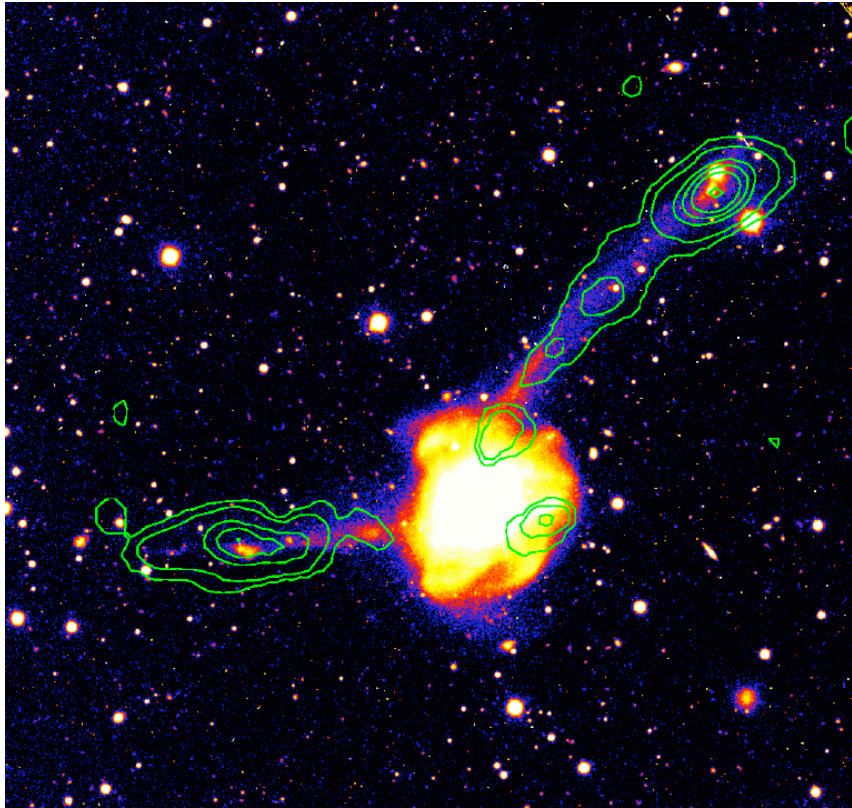




# Conclusiones de las simulaciones

- Se puede explicar las **colas de marea** y los **puentes de materia**
- Algunos sistemas se pueden modelar bien, otros todavía no
- Interacción puede producir **barras y ondas espirales**
- Interacciones pueden aumentar la tasa de formación estelar y provocar **brotos de formación estelar**
- En cada encuentro las galaxias pierden energía orbital y ganan energía interna → el estado final es frecuentemente la **fusión de galaxias**

# ¿Cuál es el origen de las galaxias elípticas?



Remanente de fusión NGC 7252 y elíptica M105: ¡ muy parecidos !

## Parece plausible, pero.....

- Las estrellas en los centros de las elípticas están demasiado densas
- El número de cúmulos globulares de estrellas en las galaxias elípticas es demasiado alto

# Galaxias ultraluminosas han demostrado que:

- La fusión provoca un brote de formación estelar
- La **densidad del gas** en el centro de una galaxias ultraluminosas = densidad de estrella en los centros de elípticas
- Se forman **grandes cúmulos estelares jóvenes** que pueden evolucionar en cúmulos globulares
- Dinámica de estrellas en el starburst es aleatorio

→ ULIRGs son elípticas en formación

→ (Algunas) elípticas son el resultado de fusiones

# Cúmulos de galaxias

- Hay una fracción más alta de galaxias elípticas en cúmulos en comparación con "el campo"
- Las galaxias tienen deficiencia en gas (en comparación con galaxias fuera de cúmulos)
- Existe gas caliente intracúmulos

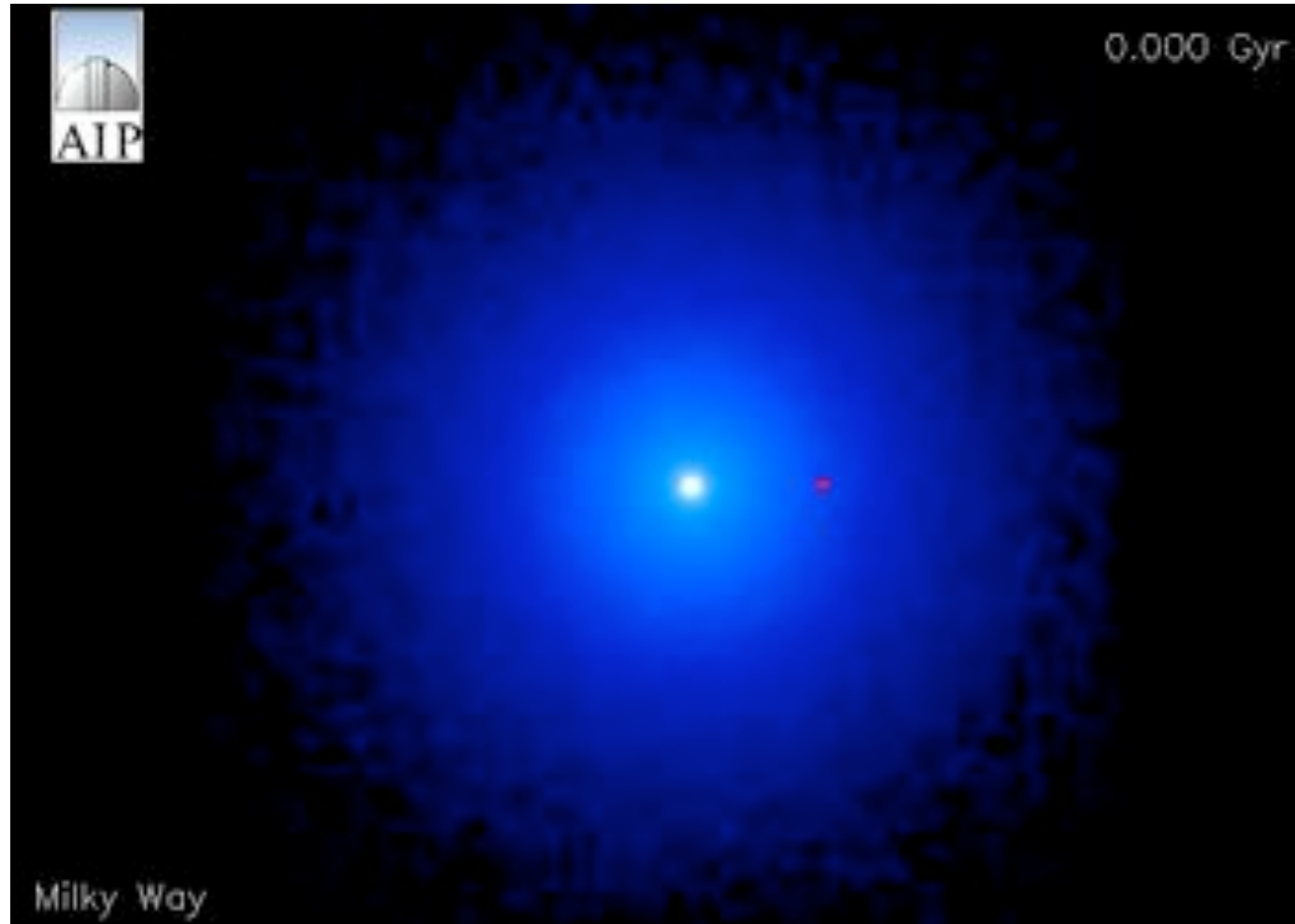
Pérdida de gas por:

- Efecto gravitatorio del cúmulo
- Movimiento a través del gas caliente (fricción)

→ Entorno afecta a propiedades de galaxias  
→ Indicio de cambios de tipo de Hubble

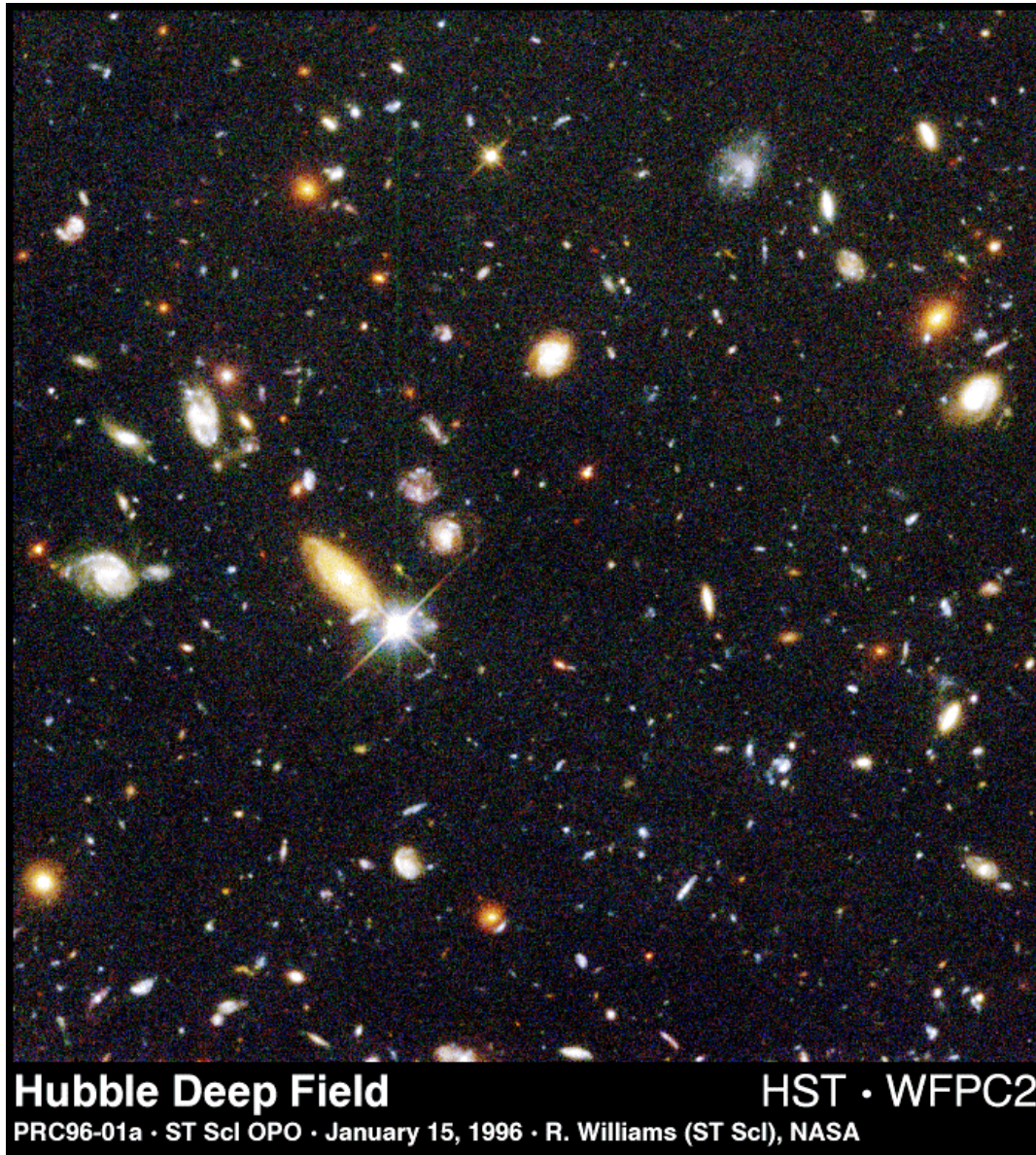


# Futuro de la Vía Láctea: Colisión con la galaxia Andromeda



Simulación por M. Steinmetz

# Galaxias en el pasado



Observaciones profundas del satélite Hubble:

Galaxias distantes son

- más azules
- pequeñas
- de forma más irregular que las espirales y elípticas de hoy.

→ Galaxias han cambiado

→ Formación estelar era más alto

→ Colisiones eran importantes

# Age of the Universe

Today: 14 Billion Years

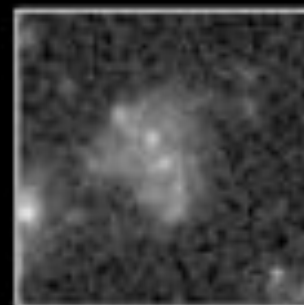
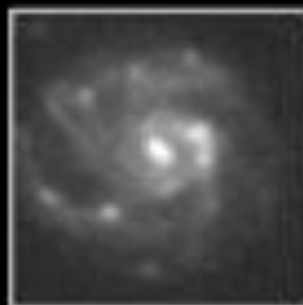
9 Billion Years

5 Billion Years

2 Billion Years



Elliptical



Spiral

## Galaxies: Snapshots in Time

## HST · WFPC2





# Papel de las colisiones en la evolución galáctica

- Redistribuye gas: Puede parar la FE debido a falta de gas en grupos y cúmulos
- Importante provocador de FE
- Influye morfología (produce barras y ondas espirales)
- Produce galaxias enanas (importante cosmológicamente?)
- Importante a lo largo de la vida del universo

# Algunas preguntas: ¿Respuestas?

- ¿Porqué existen los diferentes tipos de Hubble? ¿Son creados diferentemente?
- ¿Puede una galaxia cambiar de tipo y cómo?
- ¿Cómo eran las galaxias del universo joven? ¿Igual que las de hoy?
- ¿Qué provoca la presencia de un núcleo activo?
- ¿Qué regula la formación estelar? ¿Qué provoca los brotes de formación estelar?

# Algunas preguntas y algunas respuestas

- ¿Porqué existen los diferentes tipos de Hubble? ¿Son creados diferentemente?
  - Algunos no (algunas elípticas), ¿algunos sí? ¿otras elípticas?
  - Interacciones juegan un papel importante, ¿pero cómo exactamente?
- ¿Puede una galaxia cambiar de tipo y cómo?
  - Si: algunos elípticos son el resultado de la fusión de galaxias
  - ¿Otras formas? Cuál es el resultado de seguidos interacciones menores?

# Algunas preguntas y algunas respuestas

- **¿Qué provoca la presencia de un núcleo activo?**
  - No se sabe con exactitud
  - Hace falta mucho combustible. Interacción con flujos de gas hacia dentro (y starburst) sería buen mecanismo.
- **¿Cómo eran las galaxias del universo joven? ¿Igual que las de hoy?**
  - No, más irregulares, tasa de FE más alto
  - ¿Como eran al formarse?
  - ¿Cual ha sido la historia de la FE y porqué?
- **¿Qué provoca y regula la formación estelar?**
  - Interacciones
  - Brazos espirales
  - Casualidad (p.e. perturbaciones pequeñas)?
  - Otros?