

# Sistemas Estelares 2024

Masas de Galaxias

Prof. Gabriel Ferrero

# Determinación de masa de galaxias

La masa de las galaxias no es solamente una característica física de las mismas, sino que además tiene múltiples aplicaciones relacionadas con la dinámica, la cosmología, las teorías sobre el origen y evolución de las galaxias, etc. Veremos los siguientes métodos, que requieren conocer la distancia  $d$  a la galaxia:

1- **Teorema del Virial y dispersión de velocidades** aplicado al caso de *galaxias elípticas* (o en general esferoidales), donde dominan los movimientos dispersivos con respecto a los movimientos orbitales organizados.

2- **Curvas de rotación** aplicado al caso de *galaxias espirales* (o en general, de disco), donde dominan los movimientos orbitales organizados con respecto a los movimientos dispersivos (desordenados).

3- **Galaxias con halos que emiten en rayos-X** (con envolturas gaseosas a alta temperatura).

# Determinación de masa de galaxias

4- **Galaxias binarias**, son casos en que no es posible reconstruir las órbitas por los períodos sumamente largos, pero se pueden realizar estudios estadísticos. Se aplica más para estimar la relación masa-luminosidad de galaxias, y no para obtener las masas en sí.

5- **Cúmulos de galaxias**, se aplica una relación similar a la utilizada para cúmulos globulares ( también basada en la dinámica). Veremos este método en la próxima bolilla de “Cúmulos de galaxias”.

# 1. Teorema del Virial y dispersión de velocidades para galaxias elípticas

Asumiendo que una galaxia elíptica pueda considerarse como un sistema esférico, en estado estacionario y autogravitante, podemos aplicar el teorema del virial:

$$2 \langle T \rangle + \langle \Omega \rangle = 0$$

siendo  $\langle T \rangle$  la energía cinética total y  $\Omega$  la energía potencial promedio.

- La  $\langle T \rangle$  será la suma de las energías cinéticas individuales de las estrellas, se demuestra que

$$T = \frac{1}{2} M \sigma^2$$

donde  $M$  es la masa total de estrellas y  $\sigma$  la dispersión de velocidades.

La energía potencial no se puede calcular con datos observacionales, se pueden hacer algunas hipótesis e introducir modelos que representen a la galaxia, para obtener un valor aproximado de  $\Omega$ .

# 1. Teorema del Virial y dispersión de velocidades para galaxias elípticas

Las hipótesis son:

- 1) relación masa-luminosidad constante en toda la galaxia ( $M/L = \text{cte.}$ ), lo que implica la proporcionalidad de la distribución de masa y la distribución de brillo.
- 2) distribución de brillo proyectada en sistemas esferoidales que siga una ley de de Vaucouleurs.

A partir de dichos modelos se obtiene la expresión:

$$\Omega = -K \frac{G M^2}{r_e}$$

donde  $r_e$  es el radio efectivo y K una constante que se determina a partir de los modelos. Reemplazando esta expresión y la anterior en la ley del virial, se obtiene

$$M = \frac{r_e \sigma^2}{K G}$$

# 1. Teorema del Virial y dispersión de velocidades para galaxias elípticas

Esta última expresión es la que permitirá calcular la masa de una galaxia elíptica, dado que  $K$  y  $G$  son conocidos, el radio efectivo se obtiene del ajuste del perfil de brillo superficial (ley de de Vaucouleurs, en kpc pues conocemos la  $d$ ) y la dispersión de velocidades se determina a partir del ensanchamiento de las líneas en el espectro integrado de la galaxia elíptica.

Finalmente, se debe tener en cuenta que la dispersión de velocidades que está en la ecuación para calcular la masa se refiere al movimiento en 3D dentro de la galaxia (es una dispersión “espacial”) pero la que se mide de los espectros refleja únicamente la correspondiente a la dirección radial. Dado que asumimos que la distribución de velocidades es isótropa, la relación entre la dispersión espacial  $\sigma_e$  y la radial  $\sigma_r$  será:  $\sigma_e = \sqrt{3} \sigma_r$

Valores típicos de dispersión de velocidades y masas determinadas con este método:

- Galaxias elípticas gigantes:  $\sigma \sim 500$  km/s,  $M \sim 5 \times 10^{13} M_{\odot}$  (son galaxias elípticas en el centro de cúmulos)
- Galaxias elípticas enanas:  $\sigma \sim 80$  km/s,  $M \sim 10^9 M_{\odot}$

# 1. Teorema del Virial y dispersión de velocidades para galaxias elípticas

Problemas del método:

- la relación  $M/L$  no suele ser constante en toda la galaxia, sino que varía con el radio.
- la dispersión se calcula con espectros que en general toman la zona central de la galaxia, pero no las partes externas.

Aclaración: la masa involucrada en este caso es básicamente masa estelar. Se obtienen relaciones  $M/L \sim 10$ .

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

En el caso de la Vía Láctea, sabemos que las estrellas en los alrededores del Sol se mueven en órbitas aproximadamente circulares en torno al centro Galáctico, con velocidades de rotación del orden de 200 km/s mientras que los movimientos al azar son de 0 -10 km/s, por lo cual claramente el movimiento dominante es el de rotación. Yendo al caso general, las masas de las galaxias espirales se obtienen de su curva de rotación  $v(R)$ , que nos da la variación de su velocidad de rotación con el radio. Asumiendo que la mayor parte de la masa está en un bulbo cuasi-esférico, la masa dentro del radio  $R$ ,  $M(R)$ , se puede estimar a partir de la tercera ley de Kepler:

$$M(R) = Rv(R)^2 / G.$$

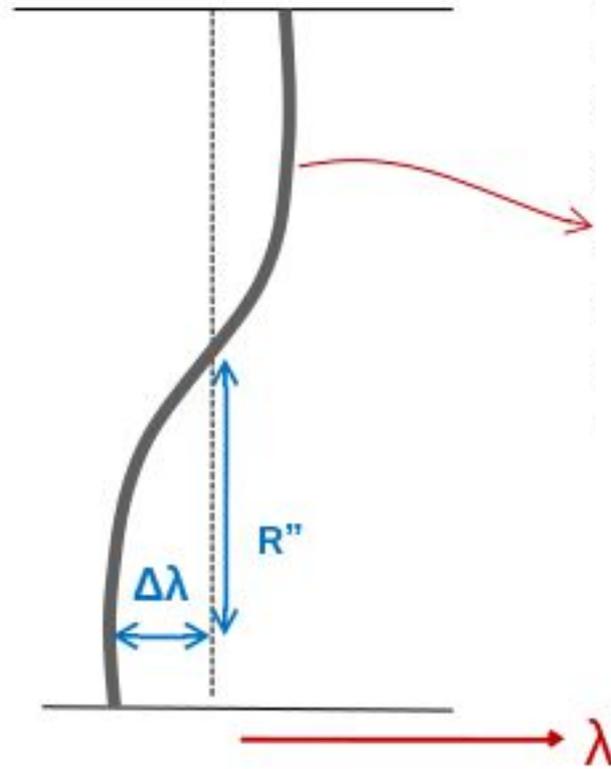
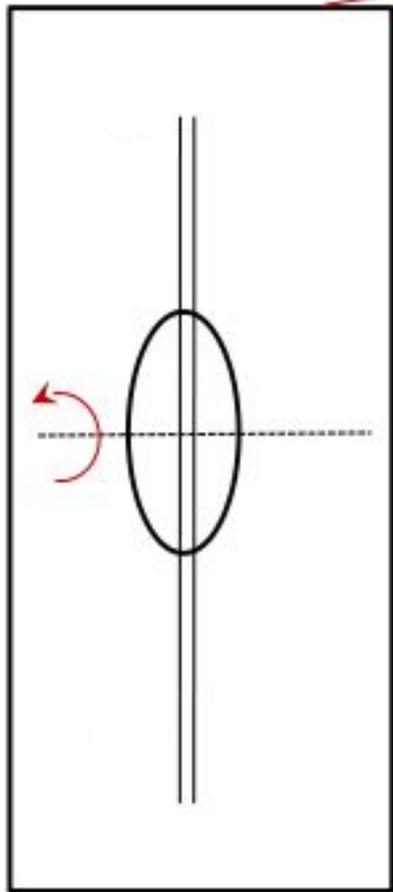
Este sería el caso más simple, considerando por ejemplo el movimiento de una estrella o una región HII, ubicada a una distancia  $R$  del centro y moviéndose con velocidad  $v(R)$ . Pero claramente la masa no está distribuida en forma esférica y puede haber más masa a mayores distancias que el  $R$  considerado. Así, solo obtendríamos una cota inferior de la masa total. Para obtener un valor más preciso es necesario considerar la curva de rotación de la galaxia.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Vimos cómo se puede obtener la curva de rotación de nuestra Galaxia, pero ¿cómo se obtiene la de otras galaxias? También se suelen combinar datos ópticos y de radio.

Supongamos el caso más simple, esto es una galaxia espiral vista de canto y **observamos líneas de emisión** provenientes de regiones HII (por ej., líneas de H y líneas prohibidas de elementos ionizados como ser [OII], [OIII], [NII], etc.) así como líneas de absorción de estrellas masivas (aunque son más difíciles de observar). Estas corresponden a las zonas internas de la galaxia. Las líneas aparecerán deformadas debido a la rotación del disco galáctico.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

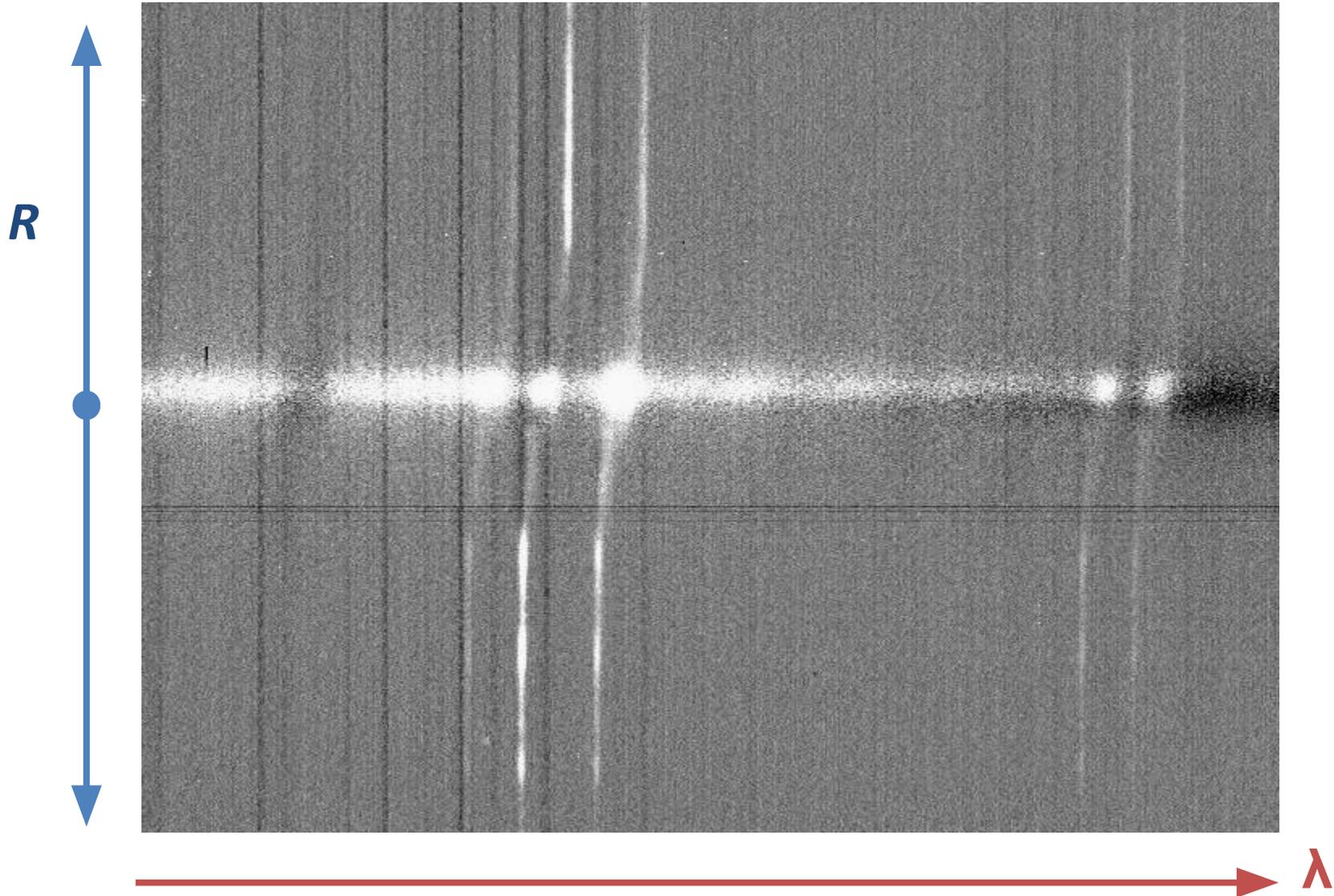


Ranura del espectrógrafo que contiene toda la galaxia, vista de canto, y que rota en torno a un eje que pasa por su centro. El espectro se dispersa en dirección perpendicular a la ranura. **La línea se deforma** hacia  $\lambda$  mayores por la parte del disco que “se aleja” y hacia  $\lambda$  menores la parte del disco que “se acerca” hacia nosotros (en el dibujo, la mitad superior e inferior, respectivamente). Conociendo la distancia  $d$  a la galaxia:

$$\Delta\lambda = \frac{V_{\text{rot}} \lambda_0}{c} \quad \text{y} \quad R[\text{kpc}] \propto R'' d$$

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Ejemplo de líneas “deformadas” del espectro de una galaxia espiral



## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Para completar la parte externa de la curva de rotación, a mayores radios galactocéntricos, se observa en radio con la línea de 21 cm del HI (las observaciones en radio se extienden mucho más que el disco en el óptico). También para la parte externa del disco se emplean objetos que no necesariamente comparten la rotación ni son coplanares, por ej: nebulosas planetarias, cúmulos globulares, galaxias satélites.

Más adelante veremos cómo se obtiene la curva de rotación en galaxias que no están de canto sino con inclinaciones intermedias, que es el caso más general. Veamos ahora qué aspecto tienen las curvas de rotación de galaxias espirales. Uno esperaría una dependencia proporcional a  $R^{-1/2}$  para el caso Kepleriano. Pero lo que se observa es que las curvas de rotación son planas (salvo la parte más central), al igual que en la Vía Láctea. No se puede justificar este comportamiento de las curvas de rotación con la masa “observable”. Hipótesis más aceptada: materia oscura (“dark matter”), materia que interactúa gravitatoriamente, pero no se puede observar. Se desconoce su composición.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

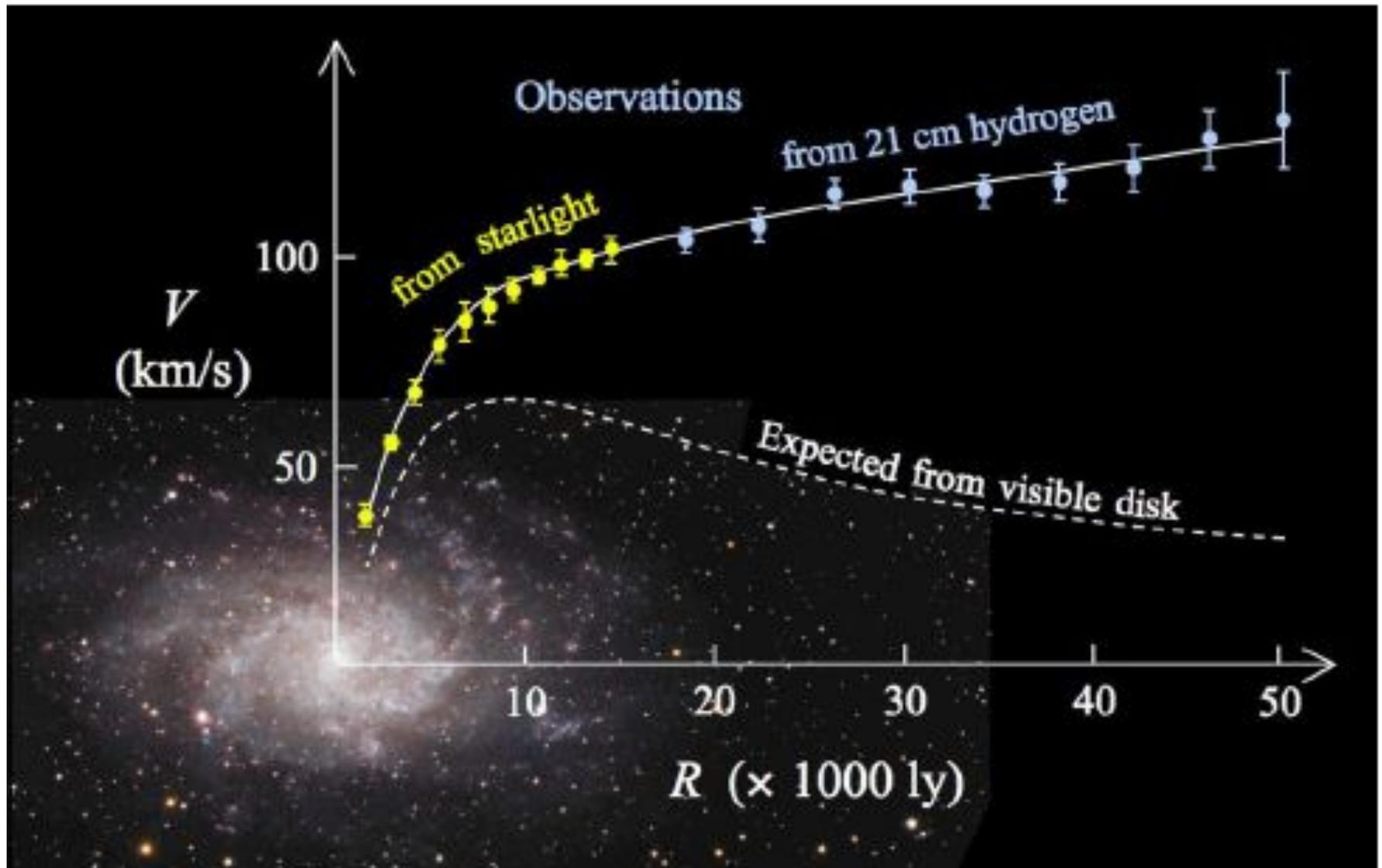
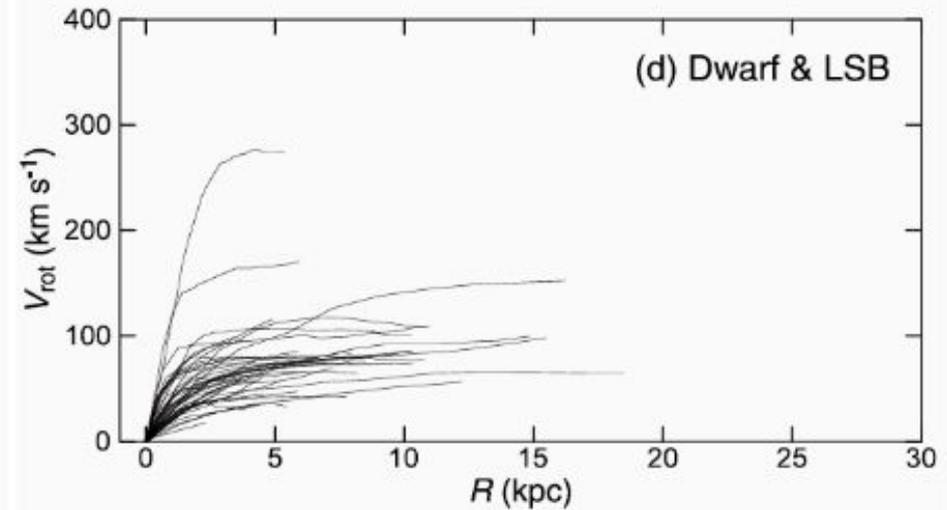
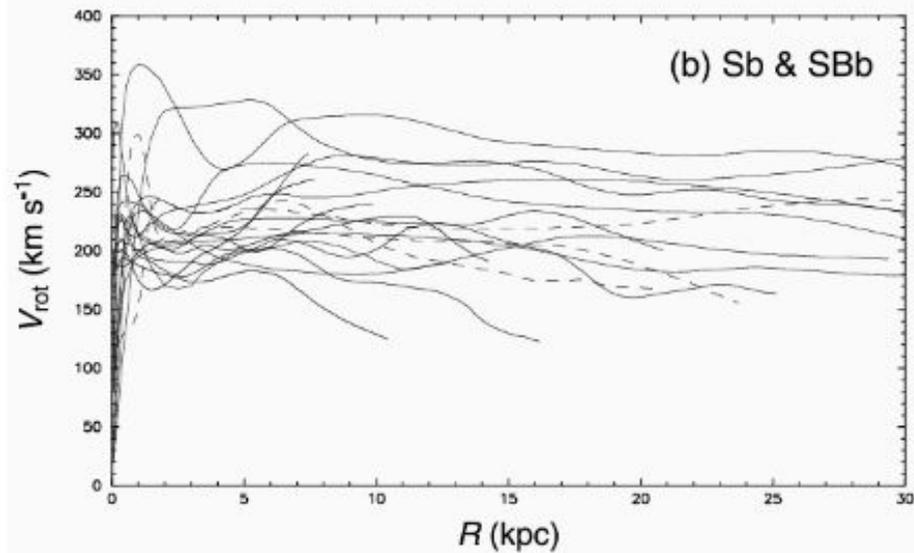
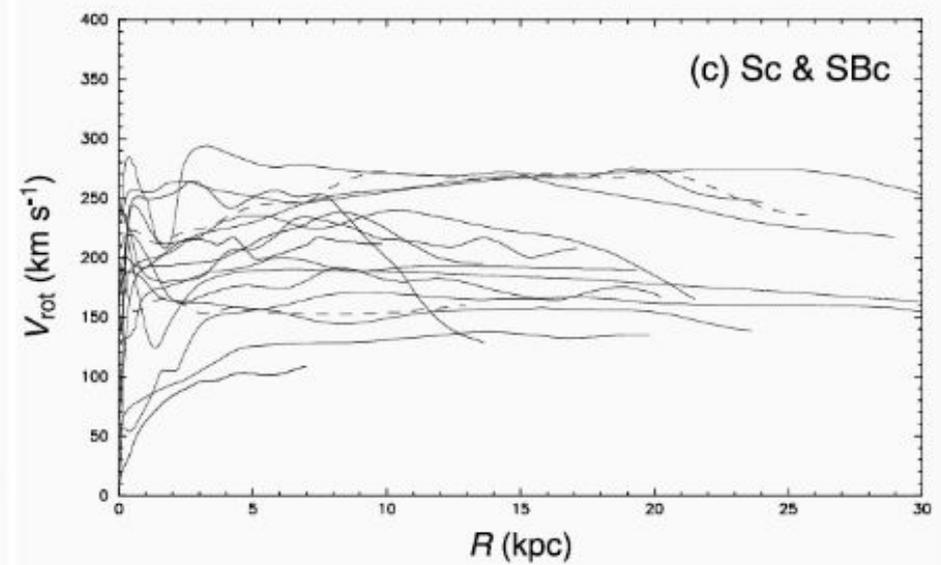
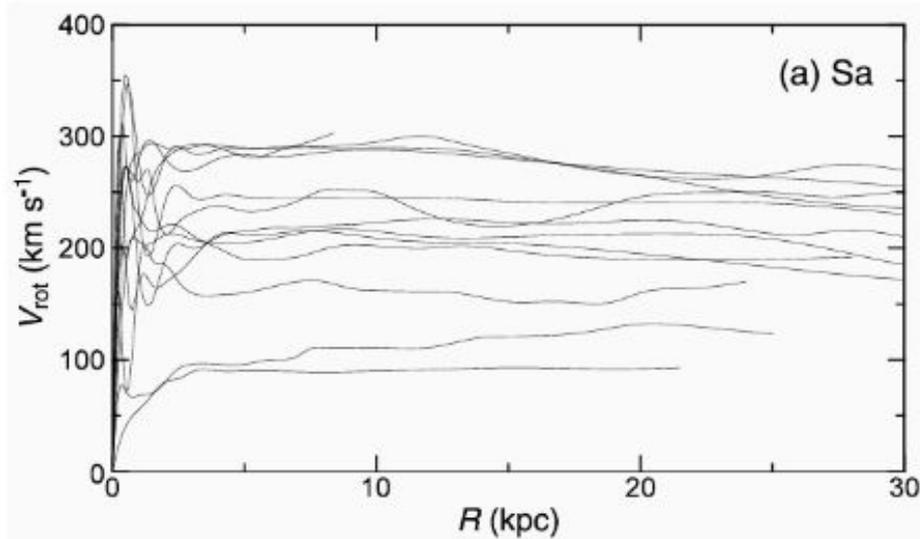


Fig. 1 The image of M33 and the corresponding rotation curve (Corbelli and Salucci 2000). What exactly does this large anomaly of the gravitational field indicate? The presence of (i) a (new) non-luminous massive component around the stellar disk or (ii) new physics of a (new) dark constituent?

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Curvas de rotación de galaxias espirales y enanas



## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

En los 1970s, Vera Rubin construyó curvas de velocidad radial de galaxias usando la emisión en  $H\alpha$  de las regiones HII y encontró que las velocidades de rotación no sólo no disminuían, sino que en algunos casos aumentaban con el radio galactocéntrico. Esto sólo podría ser explicado suponiendo que las estrellas están embebidas en un gran halo de materia que no vemos, o que la gravitación newtoniana no es válida para distancias grandes. Esta supuesta materia no visible, pero que causa efectos gravitacionales, que Vera Rubin descubrió, es la llamada “materia oscura”.

Los modelos cosmológicos más aceptados asumen que la mayor parte de la materia del Universo no emite radiación y es observable únicamente a través de sus efectos gravitatorios.

En esta teoría de la materia oscura fría (*Cold Dark Matter*, CDM), los primeros sistemas en colapsar y comenzar a formar estrellas eran muy pequeños, con masas similares a las de las galaxias enanas. Las galaxias más grandes se formaron después, cuando esos pequeños fragmentos se unieron en grandes acumulaciones. Esta idea se llama *modelo jerárquico*.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

En los 1970s, Vera Rubin construyó curvas de velocidad radial de galaxias usando la emisión en  $H\alpha$  de las regiones HII y encontró que las velocidades de rotación no sólo no disminuían, sino que en algunos casos aumentaban con el radio galactocéntrico. Esto sólo podría ser explicado suponiendo que las estrellas están embebidas en un gran halo de materia que no vemos, o que la gravitación newtoniana no es válida para distancias grandes. Esta supuesta materia no visible, pero que causa efectos gravitacionales, que Vera Rubin descubrió, es la llamada “materia oscura”.

Los modelos cosmológicos más aceptados asumen que la mayor parte de la materia del Universo no emite radiación y es observable únicamente a través de sus efectos gravitatorios.

En esta teoría de la materia oscura fría (*Cold Dark Matter*, CDM), los primeros sistemas en colapsar y comenzar a formar estrellas eran muy pequeños, con masas similares a las de las galaxias enanas. Las galaxias más grandes se formaron después, cuando esos pequeños fragmentos se unieron en grandes acumulaciones. Esta idea se llama *modelo jerárquico*.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Hay varias ideas propuestas acerca de la composición de la materia oscura fría. Una de ellas es la de:

- WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*). Entre las partículas hipotéticas que podrían tener las propiedades adecuadas para actuar como materia oscura están: neutralinos, axions, gravitinos.
- Si se considera materia bariónica, se ha propuesto que la materia oscura podría estar compuesta por *Massive Astrophysical Compact Halo Objects* (MACHOs). Se trataría de objetos con emisiones muy débiles pero compuestos por materia “normal”. Por ejemplo: enanas marrones, enanas blancas, planetas y agujeros negros.

También se ha propuesto que el problema podría resolverse con MOdified Newtonian Dynamics (MOND), modificando la 2a. ley de Newton para aceleraciones muy pequeñas. Esto puede explicar las curvas de rotación de las galaxias, pero no otras observaciones, como la dinámica de los cúmulos de galaxias y las lentes gravitacionales.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Una explicación de cómo obtener la curva de rotación en el caso de un disco con cierta inclinación puede verse en las diapositivas XXX a XXX.

Una vez que se cuenta con la curva de rotación, es necesario encontrar un camino para llegar a la determinación de la masa. Para ello, se tienen en cuenta las distintas componentes estructurales de una galaxia espiral (bulbo, disco, halo de materia oscura, en algunos casos también el gas) y se asume una ley de distribución de masa para cada componente. Esas distribuciones de masa incluyen a la velocidad, lo que nos da el nexo buscado.

Por el principio de superposición las masas se suman:

$$M_{\text{tot}} = M_{\text{disco}} + M_{\text{bulbo}} + M_{\text{gas}} + M_{\text{halo}}$$

y como las expresiones para la masa involucran a  $v^2$ :

$$v_{\text{tot}}^2 = v_{\text{disco}}^2 + v_{\text{bulbo}}^2 + v_{\text{gas}}^2 + v_{\text{halo}}^2$$

Para cuantificar las componentes de disco, bulbo y gas podemos tomar las distribuciones observadas y aplicar un factor Masa - Luminosidad para obtener modelos de distribución de masa.

## 2. Curvas de rotación para galaxias espirales

Si el cociente  $M/L$  no se conoce bien, se puede tratar como un parámetro libre cuando se ajustan los modelos a los datos.

Los parámetros de las componentes individuales (masas, radios de escala, etc.) se determinan en forma iterativa (por mínimos cuadrados, por ej.) . Se dan primero valores aproximados como condiciones iniciales y finalmente se ajustan todos los parámetros. Suponiendo en cada caso  $M/L = \text{cte.}$ , habrá proporcionalidad con la distribución de brillo proyectada, densidad de masa proyectada, etc. de cada una de ellas.

Por ejemplo se puede tomar para el bulbo una distribución de brillo de Vaucouleurs, para el disco una distribución exponencial y para el halo de materia oscura los perfiles de NFW (Navarro, Frenk y White 1996, 1997).

Así se obtiene:

Valores típicos de masa luminosa de galaxias espirales:  $10^8$  a  $10^{12} M_{\odot}$

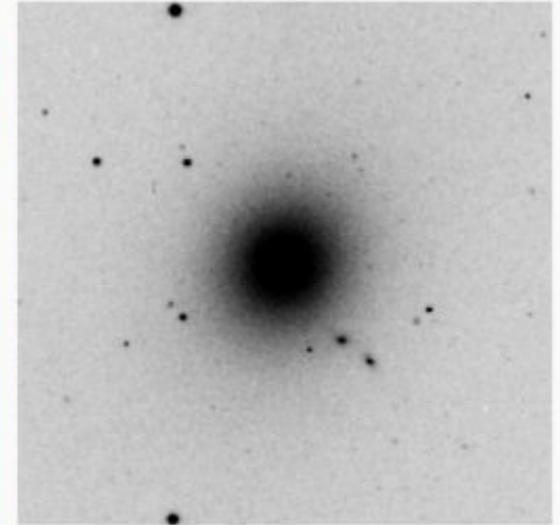
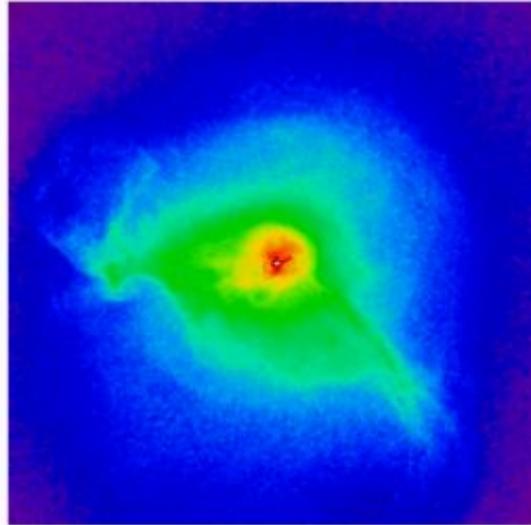
Masa total de la Vía Láctea (bulbo + disco + materia oscura):  $2 \times 10^{12} M_{\odot}$

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

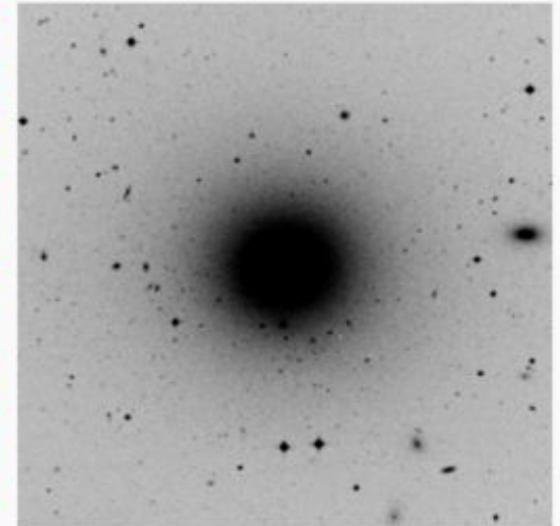
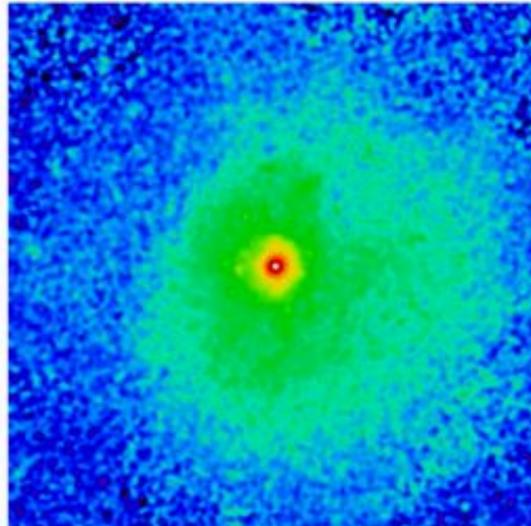
El estudio de sistemas extragalácticos en rayos-X tuvo un gran avance al construirse satélites que permitieron realizar observaciones fuera de la atmósfera (recordemos que la atmósfera terrestre es opaca en las longitudes de onda de los rayos-X). El primer paso importante fue el satélite Einstein, que funcionó entre 1978-1981, y tenía la capacidad de estudiar objetos extendidos. Mediante mapas de brillo superficial en X ( $\mu_x$ ), detectó la existencia de halos emisores de rayos-X (halos X) de galaxias que se extendían más que las imágenes correspondientes en el óptico, en galaxias elípticas masivas ubicadas en el centro de cúmulos de galaxias (por ejemplo, en la galaxia elíptica M87, la emisión en X es  $\sim 50$  arcmin, y en el óptico  $\sim 30$  arcmin).

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

Imágenes X  
(Chandra) e  
imágenes ópticas  
(DSS)  
de M87 y NGC1399



**Figure 1.** Central  $10' \times 10'$  ( $10' = 47$  kpc) region of the Chandra 0.6-2 keV (left) and DSS optical image (right) of M87. The galaxy appearance is very regular in the optical band, while the X-ray image is moderately disturbed. In these and other images throughout the paper, north is up and east is to the left.



**Figure 2.** Central  $10' \times 10'$  ( $10' = 58$  kpc) region of the Chandra 0.6-2 keV (left) and DSS optical image (right) of NGC1399. As for M87, the optical galaxy is very regular, while the X-ray image shows only moderate deviations from spherical symmetry and appears considerably less disturbed than M87.

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

Uno de los estudios más notables fue el de la galaxia M87, que domina la parte central del cúmulo de Virgo. Veamos estos trabajos:

Fabricant et al. 1980, ApJ 241, 552

Fabricant et al. 1983, ApJ 267, 535

El estudio de M87 se basa en dos tipos de datos obtenidos con el satélite Einstein:

1) mapa de brillo superficial  $\mu_x$ : medido en la banda de  $E = 0.2 - 4$  KeV (en rayos X se acostumbra dar el rango de energía de fotones en vez del rango en longitudes de onda).

Suponiendo simetría radial y restando la emisión del fondo o *background* (que puede deberse a la emisión del cúmulo en conjunto), se trazan anillos concéntricos y se construye el perfil de brillo superficial (en el mismo rango de KeV) transformando las unidades a  $\text{erg} / (\text{cm}^2 \text{ s arcmin}^2)$  versus distancia radial proyectada  $r_p$  [arcmin].

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

Mapa de contornos y perfil de brillo superficial X [ 0.2 a 4 KeV ]

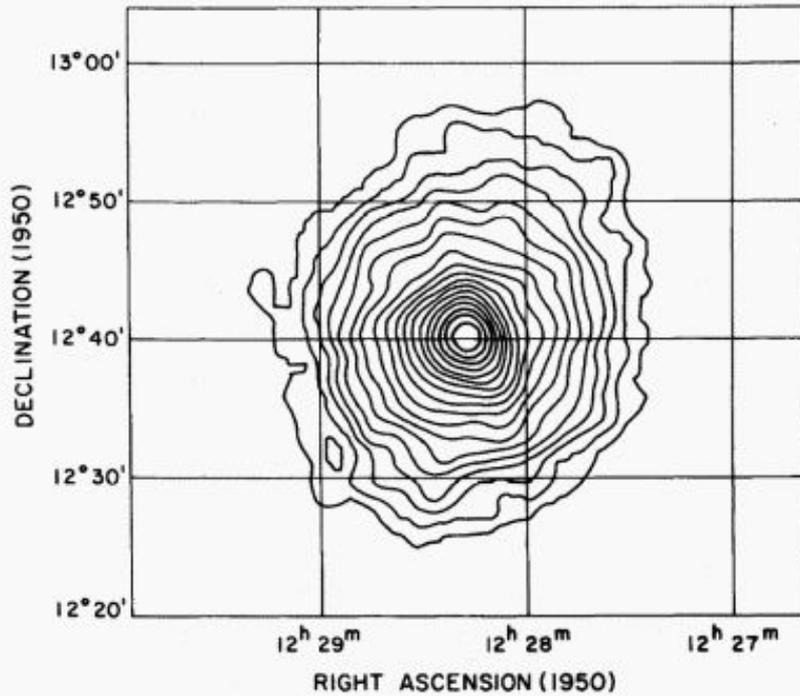


FIG. 2.—A 0.3–4.0 keV X-ray contour map made using data from the field centered on M87. Background has been subtracted, and a correction has been made for the vignetting of the telescope optics. The outermost contour is at a level of  $\sim 1.9 \times 10^{-13}$  ergs  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{arcmin}^{-2}$ , and the contour levels are separated by a factor of 1.2 in surface brightness. The data have been smoothed by convolution with a Gaussian function with  $\sigma = 45''$ . The outermost contour is slightly elliptical, with a ratio of major to minor axis of  $\leq 1.2$ . For an assumed distance to M87 of 15 Mpc, 1' corresponds to 4.4 kpc.

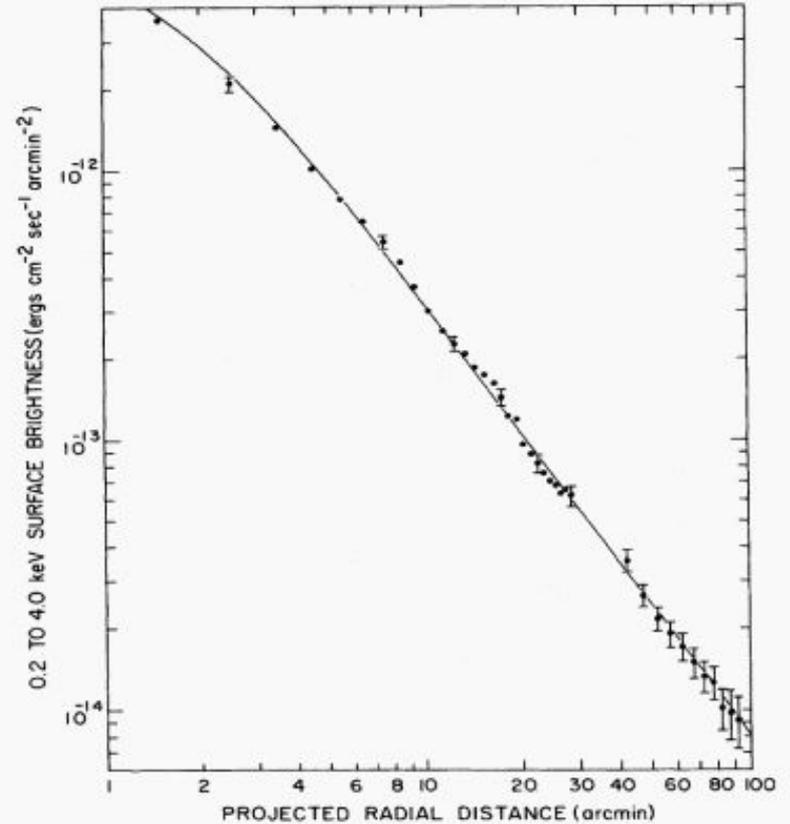
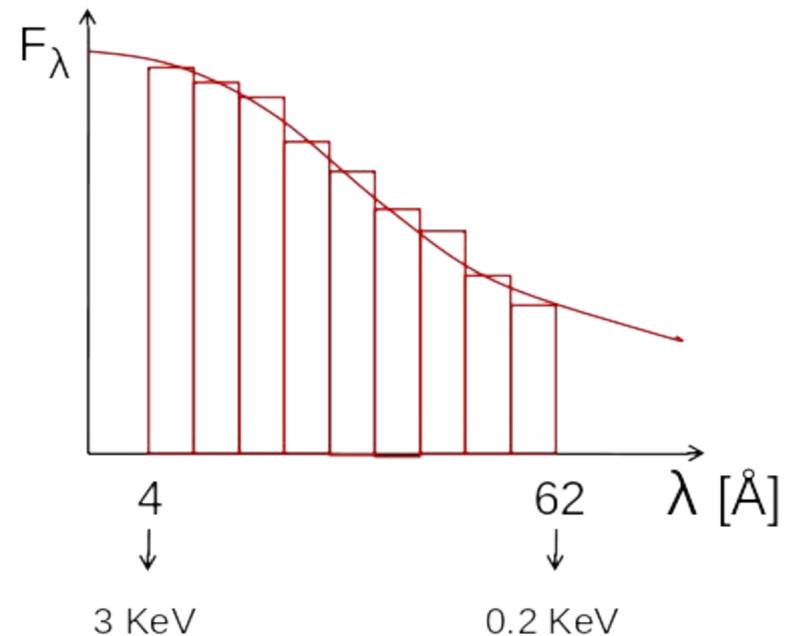


FIG. 3.—The 0.2–4.0 keV surface brightness profile of M87. Background has been subtracted, and a correction has been made for the vignetting of the telescope optics. The data within  $30'$  are from the field centered on M87. Beyond  $30'$ , the average surface brightness of the four adjacent fields is shown. The curve indicates  $S \propto [1 + (r/1.6)^2]^{-0.81}$ . For a distance to M87 of 15 Mpc, 1' corresponds to 4.4 kpc.

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

2) análisis espectral : se analiza la distribución de flujo en un rango de 0.2 - 3 keV, separándola en 9 rangos (o “canales”) de  $E$  (o de longitud de onda). El instrumento no es exactamente un espectrógrafo, pero lo que se obtiene es equivalente a un espectro en ese rango. Esto se hizo para 6 intervalos de distancia radial, desde  $r_p = 0$  hasta 27 arcmin. En resumen, se obtuvo una distribución de flujo para distintas distancias radiales (como anillos concéntricos). Para cada una de ellas se comparó con un modelo de espectro de un plasma en equilibrio y se calculó la  $T$  para cada distancia radial.

No se encontró un gradiente de  $T$  con la  $r_p$ , sino que la  $T$  permanece aproximadamente constante en el rango considerado. Así se concluyó que la emisión X se debía a un gas isoterma. (Hoy en día la  $T$  se obtiene directamente de espectros en X).



### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

¿Dónde se origina la emisión en rayos-X?

Gas muy caliente y difuso ( $T \sim 10^7$  °K) que se encuentra totalmente ionizado (plasma). Los fotones X se emiten cuando un electrón libre es deflelado por un ion, es radiación térmica libre-libre (“bremsstrahlung”) que da origen a un continuo de fotones. Sobre ese continuo suele haber líneas de emisión de elementos pesados (por ej. Fe).

La cantidad de colisiones que se producen (por unidad de tiempo y de volumen) va a ser proporcional a la densidad del plasma al cuadrado  $\rho_g^2$  pues depende de la densidad de iones y de la densidad de electrones, y ambas son proporcionales a la densidad del gas  $\rho_g$ .

Así, la emisividad del gas  $j_\nu$  (E/(unidad de volumen del emisor x unidad de tiempo x unidad de frecuencia) es proporcional a  $\rho_g^2$ .

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

¿Cómo obtenemos información sobre la masa de la galaxia?

Hipótesis:

- supongamos una nube de gas isoterma (según resulta de las observaciones)
- con simetría esférica (por la alta presión del gas caliente, el plasma se distribuye esféricamente en el pozo de potencial de la galaxia)
- y en equilibrio hidrostático (entre la fuerza gravitatoria que ejerce la masa total de la galaxia y la presión del gas que emite en rayos-X)

En esas condiciones, se puede deducir (ver diapositivas XX a XX) que la distribución de masa está dada por:

$$M(r) = - \frac{k T}{\mu m_H} \frac{d\rho_g}{dr} \frac{1}{\rho_g} r^2$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $\mu$  es el peso molecular medio (supuesto constante) y  $m_H$  la masa del átomo de H. La temperatura  $T$  se obtiene de los espectros.

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

Para calcular la densidad del gas y su gradiente (para cada dado  $r$ ) se recurre al perfil de brillo superficial X:

1. se de-proyecta la distribución de brillo sup  $\mu_x$  (pasando de 2D a 3D)
2. se considera, como vimos, que la emisividad de un plasma caliente (totalmente ionizado) es  $j_v$  proporcional a  $\rho_g^2$
3. se obtiene de este modo el perfil de densidad  $\rho_g$ , y con éste la densidad y su  $d\rho_g/dr$  para cualquier radio  $r$ .

Notemos que la masa  $M(r)$  que se obtiene en este caso, es toda la masa que actúa gravitatoriamente sobre el gas caliente, por lo tanto incluye tanto la masa bariónica (luminosa) como la materia oscura (no visible).

Para el caso de M87 se obtuvo una masa total dentro de un radio de 300 kpc:

$$M_{\text{tot}} (r < 300 \text{ kpc}) = 3 \text{ a } 6 \times 10^{13} M_{\odot}$$

donde la masa de gas caliente representa entre 10% y 20% de la masa luminosa en estas galaxias masivas. Con tales valores de masa se llega a una relación masa-luminosidad  $M_{\text{tot}} / L > 500 M_{\odot} / L_{\odot}$  !!!

Mientras que considerando sólo la materia luminosa en galaxias elípticas es aproximadamente:  $M_{\text{lum}} / L_B \sim 10 M_{\odot} / L_{\odot}$

### 3. Masa de galaxias con halos que emiten rayos-X

Este método también se aplica a galaxias elípticas normales. Para todas las elípticas es necesaria la materia oscura para explicar las observaciones. En general, se concluye que más del 90% de la masa total es materia oscura.

Este método de halos-X, junto a las curvas de rotación planas de galaxias espirales y la determinación de masa de cúmulos de galaxias, son tres pruebas que muestran que se requiere mucha más masa que la de estrellas y gas para explicar las observaciones.

[Con telescopios X más modernos, de mayor resolución y sensibilidad (por ej. Chandra, XMM) se han detectado pequeñas variaciones de la  $T$  que son tenidas en cuenta al calcular la masa.]

