

Propiedades de Galaxias

Mauro Jélvez

Propiedades de las Galaxias Espirales

Si comparamos galaxias espirales de la misma luminosidad, observamos una tendencia en sus propiedades a lo largo de la secuencia morfológica de tipo $Sc \rightarrow Sb \rightarrow Sa$. A medida que avanzamos hacia tipos más tempranos (Sa), las galaxias:

- Son cada vez más masivas, especialmente en términos de masa estelar.
- Presentan una mayor velocidad máxima de rotación.
- Tienen una menor fracción de gas y polvo interestelar.
- Poseen una mayor cantidad de estrellas rojas, es decir, estrellas más viejas.

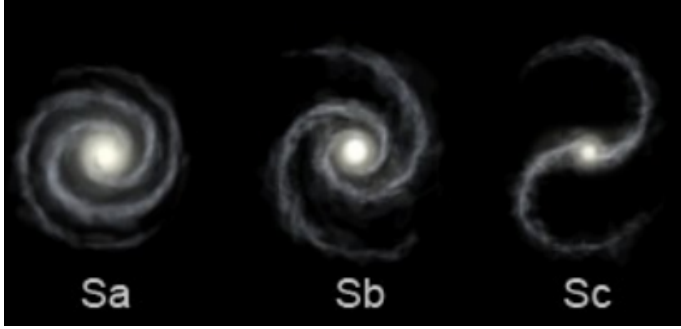


Fig. 1.

Propiedades de Galaxias Espirales Tardías e Irregulares (Tabla 25.2)

- **Magnitud Absoluta** (M_B): Más débil que las espirales tempranas. Im/Ir son las menos luminosas (-13 a -18).
- **Masa** (M): Entre 10^8 y $10^{10} M_\odot$.
- **Diámetro típico**: 0.5 – 50 kpc.
- **Relación masa-luminosidad** (M/L_B): Alrededor de 1 para ambos tipos.
- **Rango de velocidad de rotación**: Sd/Sm tienen hasta 120 km/s, Irregulares mucho menos.
- **Color** ($B - V$): Más azul que las tempranas (0.47 en Sd/Sm, 0.37 en Ir).
- **Fracción de gas**: Mucho mayor, especialmente en Irregulares (hasta 0.9).
- **Proporción** M_{H_2}/M_{HI} : Muy baja, menor que 0.1 .
- **Número específico de cúmulos globulares**: Bajo (0.5 en ambos casos).

Propiedades de Galaxias Espirales Tempranas (Tabla 25.1)

- **Magnitud Absoluta** (M_B): Las galaxias Sa, Sb y Sc tienen un rango similar de magnitudes, entre -16 y -23 .
- **Masa Estelar** (M): Todas se encuentran entre 10^9 y $10^{12} M_\odot$.

TABLE 25.2 Characteristics of Late Spiral and Irregular Galaxies.

	Sd/Sm	Im/Ir
M_B	-15 to -20	-13 to -18
$M (M_\odot)$	10^8 – 10^{10}	10^8 – 10^{10}
Diameter (D_{25} , kpc)	0.5 – 50	0.5 – 50
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	~ 1	~ 1
V_{\max} range (km s $^{-1}$)	80 – 120	50 – 70
$\langle B - V \rangle$	0.47	0.37
$\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle$	0.25 (Scd)	0.5 – 0.9
$\langle M_{H_2}/M_{HI} \rangle$	0.03 – 0.3	~ 0
$\langle S_N \rangle$	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2

Fig. 2.

- **Relación bulbo-total** ($L_{\text{bulge}}/L_{\text{total}}$): Aumenta hacia tipos tempranos: 0.05 (Sc) a 0.3 (Sa).
- **Diámetro típico**: 5 – 100 kpc para todos los tipos.
- **Relación masa-luminosidad** (M/L_B): Aumenta hacia tipos tempranos: 2.6 (Sc) a 6.2 (Sa).
- **Velocidad máxima de rotación** ($\langle V_{\max} \rangle$): Disminuye hacia Sc (Sa: 299 km/s, Sc: 175 km/s).
- **Ángulo de inclinación de brazos (pitch angle)**: Aumenta hacia tipos tardíos (Sa: $\sim 6^\circ$, Sc: $\sim 18^\circ$).
- **Color promedio** ($B - V$): Sa son más rojas (0.75) comparado con Sc (0.52).
- **Fracción de gas**: Sa tiene poco gas (0.04), mientras que Sc tiene más (0.16).
- **Relación de gas molecular e hidrógeno neutro** ($\langle M_{H_2}/M_{HI} \rangle$): Disminuye hacia tipos tardíos.
- **Número específico de cúmulos globulares** ($\langle S_N \rangle$): Mayor en tipos tempranos (Sa/Sb: 1.2 , Sc: 0.5).

TABLE 25.1 Characteristics of Early Spiral Galaxies.

	Sa	Sb	Sc
M_B	-17 to -23	-17 to -23	-16 to -22
$M (M_\odot)$	10^9 – 10^{12}	10^9 – 10^{12}	10^9 – 10^{12}
$\langle L_{\text{bulge}}/L_{\text{total}} \rangle_B$	0.3	0.13	0.05
Diameter (D_{25} , kpc)	5 – 100	5 – 100	5 – 100
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	6.2 ± 0.6	4.5 ± 0.4	2.6 ± 0.2
$\langle V_{\max} \rangle$ (km s $^{-1}$)	299	222	175
V_{\max} range (km s $^{-1}$)	163 – 367	144 – 330	99 – 304
pitch angle	$\sim 6^\circ$	$\sim 12^\circ$	$\sim 18^\circ$
$\langle B - V \rangle$	0.75	0.64	0.52
$\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle$	0.04	0.08	0.16
$\langle M_{H_2}/M_{HI} \rangle$	2.2 ± 0.6 (Sab)	1.8 ± 0.3	0.73 ± 0.13
$\langle S_N \rangle$	1.2 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.5 ± 0.2

Fig. 3.

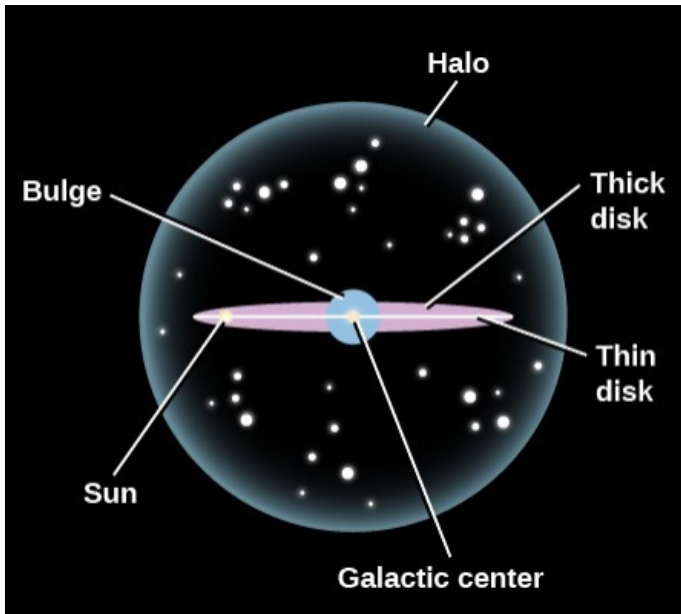


Fig. 4.

Componentes Generales Galaxias Espirales

Bulbo

- Densidad central de estrellas (Pob. II: rojas, viejas y bajo contenido en metales), distribución esferoidal, dominado por dispersión de velocidad
- En las Sc o SBc los bulbos son más azules (Estrellas de Pob. I)
- Muchos bulbos contienen agujeros negros supermasivos

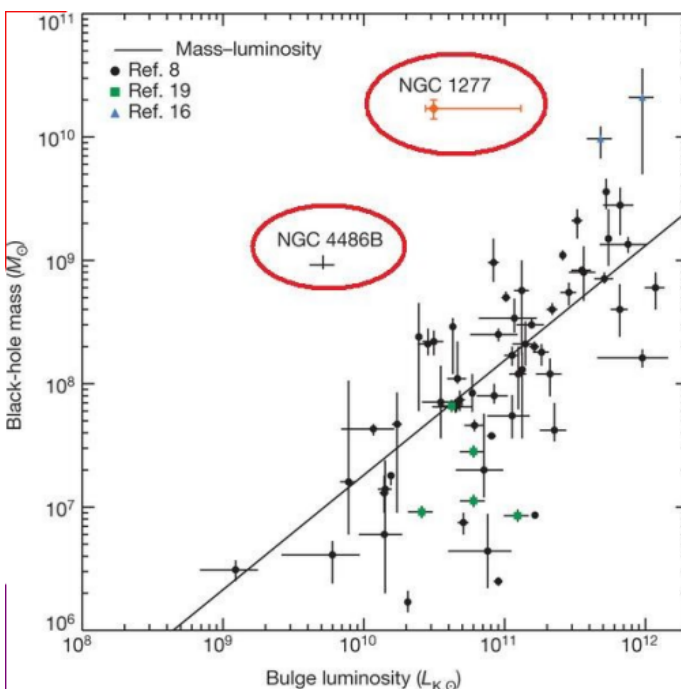


Fig. 5.

El gráfico muestra la relación entre la **luminosidad del bulbo galáctico** ($L_{K,\odot}$) y la **masa del agujero negro central** (M_{\bullet}), ambos en escala logarítmica.

- Los puntos representan observaciones de diferentes galaxias.
- La línea negra muestra una relación empírica típica: a mayor luminosidad del bulbo, mayor masa del agujero negro.
- Las galaxias NGC 1277 y NGC 4486B, encerradas en círculos rojos, están muy por encima de la tendencia general, lo que indica que poseen agujeros negros supermasivos **excepcionalmente masivos** para la luminosidad de sus bulbos.

Este gráfico apoya la idea de que:

Muchos bulbos galácticos albergan agujeros negros supermasivos, y existe una correlación entre la masa del agujero negro y las propiedades del bulbo, como su luminosidad.

Disco

- Estructura plana dominada por rotación, compuesto por estrellas (Pob I, jóvenes y ricas en metales), gas y polvo
- Contienen brazos espirales donde se forman nuevas estrellas, por lo que se ven azules
- Los discos con brazos espirales representan el componente más característica de este tipo de galaxias

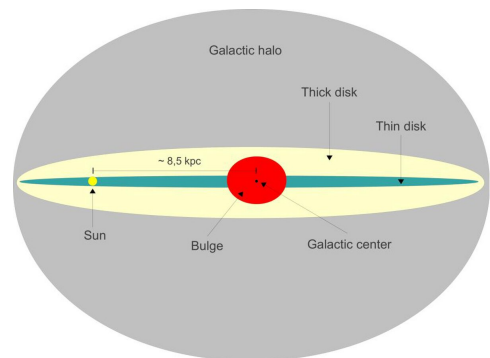


Fig. 6.

Halo

El **halo galáctico** es una región esférica que envuelve el disco y el bulbo de las galaxias espirales. Se caracteriza por contener:

- Estrellas de **Población II**: viejas, con bajo contenido en metales (baja metalicidad).
- Cúmulos globulares.
- Materia oscura (no visible en la imagen, pero inferida por efectos gravitacionales).

Estas estrellas se distribuyen de manera difusa en un volumen mucho mayor que el del disco, como se muestra en la Fig. 7:

Interpretación: Se cree que muchas de estas estrellas fueron adquiridas a través de **eventos de canibalismo galáctico**, es decir, la fusión con galaxias más pequeñas que fueron absorbidas por la galaxia principal a lo largo del tiempo cósmico.

Este proceso ha contribuido a enriquecer el halo con estrellas de distintas procedencias, revelando la historia de interacción y crecimiento jerárquico de las galaxias.

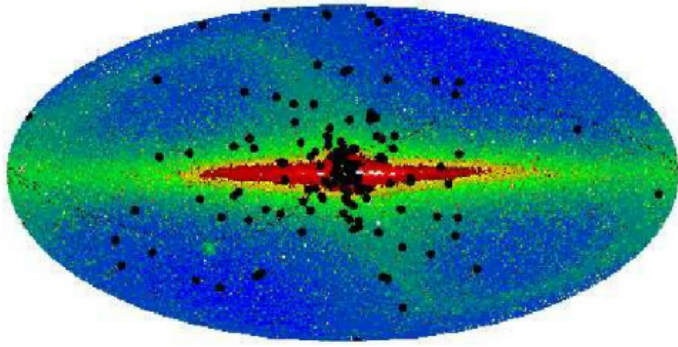


Fig. 7.

Cúmulos Globulares

Los **cúmulos globulares** son sistemas estelares esféricos, muy densos, que contienen entre 10^4 y 10^6 estrellas, todas unidas gravitacionalmente. Son uno de los objetos más antiguos del universo y se encuentran principalmente en el **halo galáctico**.

- Están compuestos por **estrellas de Población II**: viejas, frías y con baja metalicidad.
- La mayoría de los cúmulos globulares se formaron en las primeras etapas del universo, por lo que su estudio permite entender la evolución temprana de las galaxias.
- Se distribuyen en forma esférica alrededor del centro galáctico, extendiéndose hasta decenas de kilopársecs del núcleo.
- En la Vía Láctea, se conocen más de 150 cúmulos globulares.

Los cúmulos globulares también son utilizados como **trazadores del potencial gravitacional** de la galaxia, ya que sus órbitas permiten estudiar la distribución de materia, incluyendo materia oscura.

Su distribución y características respaldan la idea de que las galaxias han crecido mediante la fusión de sistemas más pequeños, algunos de los cuales dejaron sus cúmulos globulares como vestigios.

Razón Masa/Luminosidad en galaxias espirales

La relación masa-luminosidad (M/L) es un parámetro fundamental para caracterizar galaxias, ya que permite inferir su contenido de masa estelar a partir de su luminosidad observada. En el caso de las galaxias espirales clasificadas según la secuencia de Hubble, esta razón muestra una clara dependencia con el tipo morfológico.

- El rango típico de masas para galaxias se encuentra entre 10^9 y $10^{12} M_{\odot}$.
- Aunque las galaxias del tipo **Sa** son apenas más masivas que las de tipo **Sb** y **Sc**, su relación M/L en la banda B (M/L_B) varía de forma significativa:

$$M/L_B = 6.2 \quad \text{para galaxias Sa}$$

$$M/L_B = 4.5 \quad \text{para galaxias Sb}$$

$$M/L_B = 2.6 \quad \text{para galaxias Sc}$$

Esta variación puede explicarse considerando la fracción de estrellas de secuencia principal presentes en cada tipo. Las galaxias tipo **Sc** tienden a tener una mayor proporción de estrellas jóvenes y calientes, las cuales presentan razones M/L más bajas. Esto implica que:

- Las galaxias **Sc** deberían presentar un color más azul debido a su población estelar más joven.
- En contraste, las galaxias **Sa** contienen una población estelar más evolucionada, con predominancia de estrellas de baja masa y mayor edad, lo que incrementa su M/L .

La figura también incluye la respuesta espectral de los filtros del sistema fotométrico Johnson-Cousins (U, B, V, R, I), lo cual es relevante para interpretar los colores observados de las galaxias y derivar sus propiedades estelares.

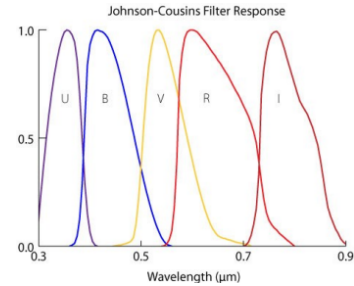


Fig. 8.

Color de las galaxias espirales y su relación con la población estelar

En la Figura 9, se presenta una secuencia de imágenes de galaxias espirales clasificadas morfológicamente en función del esquema de Hubble extendido. Las denominaciones corresponden a: SA (espirales puras), SAB (espirales con barra débil) y SB (espirales barradas), seguidas por las letras a–m, que reflejan el grado de apertura de los brazos espirales y el tamaño del bulbo central. A medida que se avanza desde los tipos tempranos (a) hacia los tardíos (m), se observan cambios significativos tanto en la morfología como en el color de las galaxias.

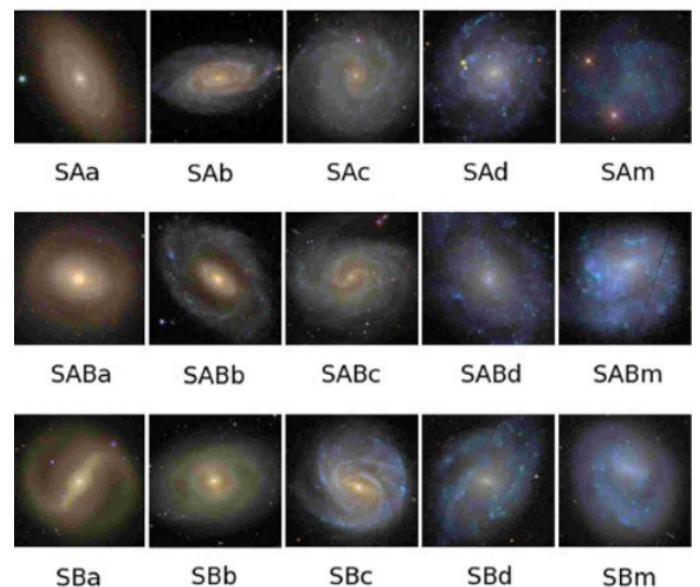


Fig. 9. Secuencia morfológica de galaxias espirales según su clasificación Hubble extendida. Se aprecia un gradiente de color desde tonos rojizos en los tipos tempranos (a) hacia tonos azulados en los tipos tardíos (m). La flecha azul indica un aumento en la presencia de estrellas jóvenes y masivas de secuencia principal.

El color observado en las galaxias espirales es un indicador directo de la población estelar dominante. Las galaxias espirales de tipo temprano (SAa, SAb, SBa) presentan colores rojizos, lo cual indica una población estelar envejecida, compuesta predominantemente por estrellas de baja masa, evolucionadas, y una baja tasa de formación estelar actual. En contraste, las galaxias espirales de tipo tardío (SA_m, SAB_m, SB_m) muestran tonos azulados más intensos, asociados con una alta tasa de formación estelar y la presencia significativa de estrellas jóvenes, masivas y calientes (tipos espectrales O y B) que dominan el flujo luminoso en el óptico y ultravioleta.

Este gradiente de color puede interpretarse como una manifestación directa del ciclo de formación estelar en las galaxias. Las galaxias de tipo tardío suelen tener una mayor proporción de gas frío disponible para la formación de nuevas estrellas, mientras que las de tipo temprano han agotado gran parte de su contenido gaseoso o han visto su proceso de formación estelar suprimido, posiblemente debido a procesos dinámicos o ambientales.

La flecha en la parte inferior de la figura resume esta tendencia: hacia la derecha, el número de estrellas jóvenes, masivas y azules aumenta, reflejando un cambio sistemático en la composición estelar y en la actividad de formación estelar de las galaxias espirales a lo largo de la secuencia morfológica.

Gradientes de color en galaxias espirales

Las galaxias espirales presentan gradientes de color radiales, donde el color se vuelve progresivamente más azul a mayores radios. Este comportamiento se interpreta como evidencia de una población estelar más joven y con mayor formación estelar hacia el disco externo.

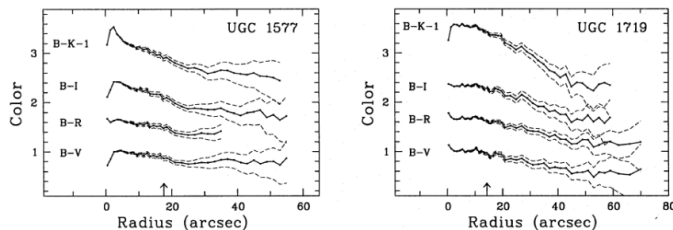


Fig. 10.

- El color se mide como diferencia de magnitudes en distintos filtros del sistema Johnson-Cousins: $(B - V)$, $(B - R)$, $(B - I)$, $(B - K)$.
- Observaciones de galaxias como UGC 1577 y UGC 1719 muestran cómo estos índices de color disminuyen con el radio.
- Esto implica una mayor proporción de estrellas jóvenes y calientes en las regiones exteriores.
- La pendiente del gradiente varía con el tipo morfológico: galaxias de tipo tardío (Sc, Scd) tienden a tener gradientes más pronunciados.

Interpretación física:

- Los bulbos dominan la luz en bandas rojas/infrarrojas (I, K), por lo que en el centro las galaxias son más rojas.
- Los discos externos tienen una mayor contribución en bandas azules (B), asociadas a formación estelar reciente.

- El gradiente refleja una evolución "adentro hacia afuera", con formación estelar que persiste en los discos externos.

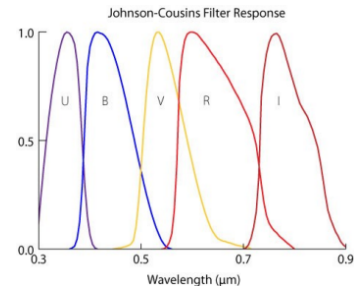


Fig. 11.

Respuesta de filtros Johnson-Cousins:

- U: $\sim 0.35 \mu\text{m}$, B: $\sim 0.45 \mu\text{m}$, V: $\sim 0.55 \mu\text{m}$, R: $\sim 0.65 \mu\text{m}$, I: $\sim 0.80 \mu\text{m}$.
- Los colores como $(B - V)$ o $(B - R)$ permiten distinguir entre poblaciones estelares jóvenes (azules) y viejas (rojas).

Los gradientes de color son una herramienta clave para estudiar la historia de formación estelar y la evolución secular en galaxias espirales.

Brazos espirales

Los brazos espirales de las galaxias espirales pueden clasificarse según su dirección relativa de curvatura respecto a la rotación galáctica:

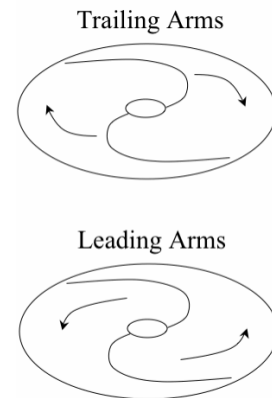


Fig. 12.

- **Trailing arms (brazos posteriores):**
 - Se curvan en sentido opuesto a la rotación de la galaxia.
 - Son los más comunes: la gran mayoría de los brazos observados son de este tipo.
 - Se espera que estos brazos sean más estables y prominentes.
 - Su detección precisa requiere conocer el sentido de rotación y la inclinación del disco, lo cual puede ser difícil de medir.
- **Leading arms (brazos delanteros):**
 - Se curvan en el mismo sentido que la rotación galáctica.

- Son extremadamente raros y suelen atribuirse a interacciones gravitacionales con otras galaxias.
- Se cree que son menos fuertes o duraderos que los *trailing*.

Nota: Determinar si los brazos son *leading* o *trailing* requiere conocer:

- El sentido de rotación de la galaxia (medido con velocidades radiales).
- La orientación del disco (inclinación).
- El sentido del enrollamiento de los brazos.

Tipos y Propiedades

Los brazos espirales son estructuras dinámicas y regiones clave de formación estelar en galaxias espirales. Según su morfología, se clasifican en tres categorías principales:

- **Grand-design** (10%): Brazos bien definidos, simétricos y prominentes. Ejemplos clásicos incluyen galaxias como M51.
- **Múltiples brazos** (60%): Estructuras más numerosas y menos simétricas, comunes en galaxias tipo Sc.
- **Floculentas** (30%): Brazos fragmentados y poco definidos, típicos de galaxias con alta turbulencia o interacciones recientes.



Fig. 13.

Relación con la Formación Estelar

Los brazos espirales son regiones activas donde se concentran:

- **Gas y polvo interestelar**, que colapsan para formar nuevas estrellas.
- **Regiones HII**, que marcan la presencia de estrellas jóvenes y masivas (tipos O y B).
- **Estrellas azules**, dominantes en el flujo luminoso debido a su alta temperatura.

Visibilidad en Diferentes Bandas

Su contraste es mayor en longitudes de onda **azules** (banda B) que en **rojas** (banda R o I), ya que:

- Las estrellas jóvenes y calientes emiten fuertemente en el azul/UV.
- El polvo interestelar, aunque abundante, es más transparente en el óptico que en el infrarrojo.

Nota: Esta distribución morfológica (10%–60%–30%) refleja la diversidad de entornos dinámicos en galaxias espirales, posiblemente vinculada a interacciones gravitacionales o a la masa del disco.

Naturaleza Dinámica de los Brazos Espirales

¿Son estructuras físicas rígidas?

Los brazos espirales **no** se comportan como objetos sólidos, como evidencia el estudio de las curvas de rotación galácticas:

- **En un cuerpo sólido** (ej. un disco rígido), la velocidad de rotación (v) aumentaría linealmente con el radio (r) ($v \propto r$), siguiendo la relación $v = \omega r$ (donde ω es la velocidad angular constante).
- **En galaxias espirales**, las curvas de rotación observadas son **planas** ($v \approx$ constante) a grandes radios, lo que contradice el modelo de sólido rígido. Esto se debe a:
 - La influencia dominante de la **materia oscura** en el halo galáctico.
 - La distribución no uniforme de la masa estelar y gaseosa en el disco.

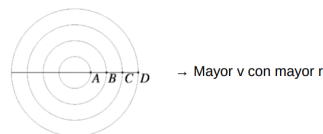


Fig. 14.

Implicaciones para los Brazos Espirales

Esta dinámica explica por qué los brazos:

- Son **ondas de densidad** (patrones cuasi-estacionarios) en lugar de estructuras materiales permanentes.
- Exhiben un **enrollamiento diferencial**: las regiones internas rotan más rápido que las externas (rotación no rígida).
- Mantienen su estructura a pesar de la **cizalla** generada por la rotación galáctica, gracias a mecanismos como:
 - Interacciones gravitacionales con galaxias vecinas.
 - Auto-refuerzo de las ondas de densidad.

Relación con la formación estelar Aunque no son "objetos físicos" en el sentido tradicional, los brazos:

- Actúan como **zonas de compresión** del gas interestelar, desencadenando formación estelar (de ahí su visibilidad en el azul).
- Su persistencia morfológica (en tipos *grand-design*) sugiere procesos de retroalimentación entre la dinámica del disco y la evolución estelar.

El Problema del Enrollamiento y la Naturaleza de los Brazos Espirales

El Dilema Dinámico

Si los brazos espirales fueran estructuras físicas rígidas, la rotación diferencial del disco galáctico los destruiría en escalas de tiempo cósmicas cortas:

- **Curva de rotación plana:** En galaxias espirales, $v(r) \approx \text{constante}$ implica que la velocidad angular ($\omega = v/r$) disminuye con el radio. Esto causa:
 - **Enrollamiento rápido:** Estrellas internas (r pequeño, ω alto) orbitan más rápido que las externas (r grande, ω bajo).
 - **Tiempo característico:** $\sim 500\,000$ años (para un brazo inicialmente recto en una galaxia como la Vía Láctea).
- **Paradoja observacional:** Los brazos persisten por miles de millones de años (ej. en galaxias *grand-design*), contradiciendo este escenario.

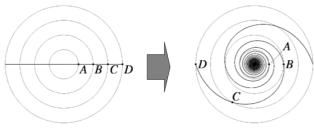


Fig. 15.

Solución: Los Brazos como Ondas de Densidad

La teoría de **ondas de densidad espirales** (Lin & Shu, 1964) resuelve el problema:

- **Naturaleza no material:** Los brazos son patrones de compresión (picos de densidad) que se propagan en el disco, *no* son agrupaciones fijas de estrellas o gas.
- **Velocidad de patrón (Ω_p):** Los brazos rotan como un todo con una velocidad angular constante, independiente de $\omega(r)$. Esto evita el enrollamiento.
- **Mecanismo de sostenimiento:**
 - Las estrellas y el gas entran/salen del brazo, pero el patrón persiste.
 - La gravedad auto-refuerza la onda (retroalimentación positiva).

Evidencia Observacional

- **Edades estelares:** Las estrellas jóvenes (azules) se concentran en los brazos, mientras que las más viejas se distribuyen uniformemente (consistente con el paso del patrón de densidad).
- **Simulaciones numéricas:** Reproducen brazos persistentes al incluir ondas de densidad y materia oscura.

Conclusión Los brazos espirales son **patrones cuasi-estacionarios** generados por dinámicas colectivas en el disco, no estructuras materiales. Su estudio revela:

- La importancia de la **materia oscura** en la curva de rotación.
- El rol de la **auto-gravitación** del disco en la formación de estructuras.
- La conexión entre **dinámica galáctica** y **formación estelar** (regiones HII, gradientes de color).

Teoría de Ondas de Densidad de Lindblad

El Modelo Propuesto

Bertil Lindblad postuló que los brazos espirales son **ondas de densidad** estacionarias en el disco galáctico, donde:

- Existen regiones con **mayor densidad estelar y gaseosa** que se propagan como un patrón espiral.
- La velocidad del patrón (Ω_p) es constante, independiente del radio (r).

Dinámica Estelar en el Patrón Espiral

- **Regiones internas ($r < r_{CR}$):**
 - Las estrellas orbitan más rápido que el patrón ($\omega(r) > \Omega_p$).
 - Las estrellas "*adelantan*" a los brazos, entrando y saliendo de las zonas de alta densidad.
- **Regiones externas ($r > r_{CR}$):**
 - Las estrellas orbitan más lento que el patrón ($\omega(r) < \Omega_p$).
 - Los brazos "*adelantan*" a las estrellas, generando compresión del gas.
- **Radio de corrotación (r_{CR}):** Radio donde $\omega(r) = \Omega_p$ (las estrellas y el patrón rotan sincronizados).

Implicaciones Observables

- **Formación estelar:** La compresión del gas en los brazos desencadena nacimiento de estrellas (explica la presencia de regiones HII y estrellas azules).
- **Asimetrías:** Las interacciones gravitacionales pueden distorsionar el patrón, produciendo brazos *leading/trailing* (visto en tu sección anterior).
- **Persistencia:** El patrón se mantiene estable pese a la rotación diferencial (resuelve el problema del enrollamiento).

Relación con Otros Modelos Esta teoría complementa:

- El rol de la **materia oscura** en la curva de rotación plana (necesaria para mantener Ω_p constante).
- Los **gradientes de color** (azul \rightarrow rojo) asociados a la edad estelar en diferentes radios.

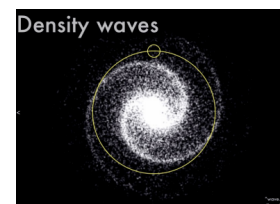


Fig. 16.

Interacción Estelar con las Ondas de Densidad

Dinámica de Estrellas en el Campo de la Onda

Cuando las estrellas se aproximan a una onda de densidad espiral, experimentan:

- **Aumento de velocidad:** Al entrar en la región de mayor densidad, el potencial gravitatorio se intensifica, acelerando las estrellas ($\Delta v > 0$).

- **Disminución de velocidad:** Al salir de la onda, el potencial decrece, causando desaceleración ($\Delta v < 0$).
- **Efecto neto:** Las estrellas pasan más tiempo en las zonas de alta densidad que en ausencia de la onda (residencia prolongada $\sim 2\times$ mayor).

Consecuencias para la Formación Estelar

Este comportamiento dinámico explica:

- **Concentración de gas:** El tiempo extendido en los brazos permite que el gas interestelar:
 - Se comprima por inestabilidades gravitatorias.
 - Alcance densidades críticas para el colapso (ley de Jeans).
- **Retroalimentación:** Las estrellas masivas formadas en los brazos ionizan el gas circundante (creando regiones HII), reforzando la visibilidad del patrón.

Evidencia Observacional

- **Asimetrías en curvas de velocidad:** Mediciones de espectroscopía revelan perturbaciones locales en $v(r)$ cerca de brazos.
- **Edades estelares:** Cúmulos jóvenes se alinean con los picos de densidad (visible en filtros UV/azules).

Diagrama Conceptual La Figura 16 ilustra este proceso:

1. Estrella/gas se aproxima al brazo (aceleración).
2. Máxima compresión en el pico de densidad.
3. Salida del brazo (desaceleración).
4. Formación de estrellas en regiones HII.

Relación con la Teoría de Lindblad Este mecanismo:

- Refuerza la idea de ondas *cuasi-estacionarias*.
- Explica por qué los brazos son "trampas de formación estelar" sin ser estructuras materiales.

Modelo de Formación Estelar Auto-Propagada (SSPSF)

Origen y Base Teórica

El modelo **SSPSF** (*Stochastic Self-Propagating Star Formation*), propuesto inicialmente por Mueller & Arnett (1976) y desarrollado por Gerola & Seiden (1978), sugiere que:

- La formación estelar en galaxias espirales es un proceso **auto-sostenido y estocástico**.
- Se propaga a través de **ondas de choque** generadas por:
 - Vientos estelares de estrellas masivas (tipo O/B).
 - Explosiones de supernovas (tipos II/Ib/Ic).

Mecanismo de Propagación

- **Retroalimentación energética:** Las estrellas jóvenes inyectan energía cinética en el ISM (*Interstellar Medium*), comprimiendo el gas circundante.
- **Desencadenamiento secuencial:**
 - La compresión induce colapso gravitatorio en nubes vecinas.

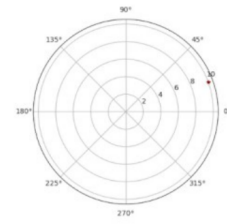


Fig. 17.

- Nuevas estrellas se forman, repitiendo el ciclo (tiempo característico $\sim 10^6 - 10^7$ años).
- **Patrones espirales:** La rotación diferencial del disco estira estas regiones de formación estelar, generando estructuras espirales *transitorias*.

Diferencias con el Modelo de Ondas de Densidad

Aspecto	SSPSF	Ondas de Densidad
Origen	Estocástico	Gravitatorio
Duración	Transitorio ($\sim 10^8$ años)	Persistente ($\sim 10^9$ años)
Estructura	Brazos fragmentados	Brazos coherentes
Ejemplo	Galaxias flocculentas	Galaxias grand-design

Limitaciones y Complementariedad

- **Problema:** No explica la persistencia de brazos en escalas cosmológicas.
- **Sinergia:** En galaxias reales, ambos mecanismos pueden coexistir:
 - Ondas de densidad proveen el "esqueleto" a gran escala.
 - SSPSF genera formación estelar localizada.

Relación con Observaciones El modelo SSPSF predice:

- **Correlación espacial** entre cúmulos jóvenes y restos de supernovas.
- **Asimetrías** en la distribución de gas (visible en mapas de HI/CO).

Galaxias Lenticulares (Tipo S0)

Características Generales

Las galaxias lenticulares (S0) son sistemas **intermedios** entre las espirales (Sa-Sd) y las elípticas (E), destacando:

- **Morfología:** Disco prominente **sin brazos espirales** visibles, con componente de bulbo central (similar a espirales tempranas).
- **Población estelar:** Dominada por estrellas viejas (Población II), con bajo contenido de gas interestelar ($< 1\%$ de la masa total).
- **Formación estelar:** Mínima o ausente, evidenciada por colores rojizos ($B - V \sim 0.9$) y falta de regiones HII.

Clasificación Hubble Extendida

La secuencia S0 se subdivide según la estructura del disco y bulbo:

Tipo	Descripción
S0 ⁻	Disco tenue, bulbo dominante (cercano a E7)
S0 ^o	Equilibrio entre disco y bulbo
S0 ⁺	Disco prominente, bulbo pequeño (transición a Sa)
S0/a	Presencia incipiente de brazos espirales

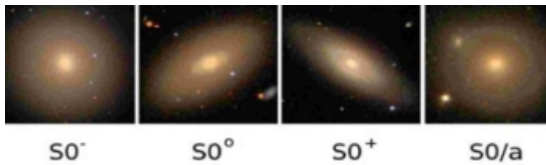


Fig. 18.

Comparación con Espirales (SA/SAB/SB)

- **Estructura:**
 - S0 carecen de brazos, mientras que espirales muestran desde brazos bien definidos (SAa) hasta flocculentos (SA_m).
 - El bulbo en S0 es similar al de espirales tempranas (SA/SBa).
- **Dinámica:**
 - Ambas tienen rotación dominante en el disco, pero S0 muestran menor cizalla por falta de estructura espiral.

Origen y Evolución

Se proponen dos escenarios principales:

- **Agotamiento de gas:** Espirales tempranas (Sa) que consumieron su gas por formación estelar o interacciones.
- **Interacciones gravitacionales:** Fusiones menores que destruyen brazos pero preservan el disco.

Ejemplos Notables

- **NGC 3115:** Prototipo de S0^o con disco delgado y sin formación estelar.
- **NGC 5866:** Disco de polvo prominente pero sin brazos espirales.

Galaxias Elípticas: Clasificación y Propiedades

Tipos Principales y Características

Las galaxias elípticas exhiben una diversidad morfológica y física, clasificadas según su masa, luminosidad y entorno:

- **Galaxias cD:**
 - **Tamaño:** Las más masivas ($10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$), con halos extendidos (~ 1 Mpc).
 - **Entorno:** Dominan centros de cúmulos galácticos (ej. M87 en Virgo).
 - **Origen:** Resultado de canibalismo galáctico (fusiones múltiples).
- **Elípticas normales (E0-E7):**
 - **Perfil radial:** Siguen la ley de Sérsic ($n > 4$), con alta concentración central.
 - **Población estelar:** Estrellas viejas (Población II), bajo gas ($< 0.1\%$).
 - **Ejemplo:** NGC 3379 (E1).



Fig. 19. Galaxia CD



Fig. 20. Elípticas normales

- **Elípticas enanas (dE):**
 - **Luminosidad:** $M_B > -18$ (10-100 veces menos luminosas que Es normales).
 - **Morfología:** Menos concentradas que las Es.

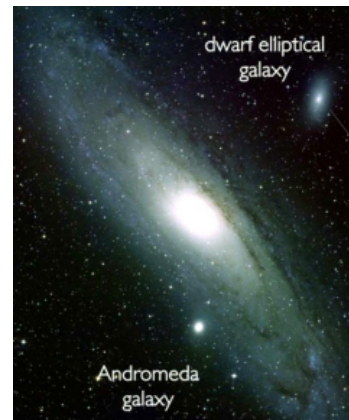


Fig. 21. Elipitica enana

- **Enanas esferoidales (dSph):**
 - **Luminosidad:** $M_B > -14$ (ej. Leo I, Sculptor).
 - **Materia oscura:** Dominan su masa ($M/L \sim 100$).
- **Enanas compactas azules (BCD):**
 - **Color:** $(B - V) < 0.4$ (formación estelar reciente).
 - **Tamaño:** ~ 1 kpc, pero con alta densidad estelar.

Relación con la Secuencia de Hubble

- **Estructura:** Ausencia de disco y componentes rotacionales (vs. lenticulares/espirales).
- **Historia evolutiva:**



Fig. 22. Enanas esferoidales

- Elípticas masivas (cD/Es) se forman por fusiones (jerárquico).
- Enanas (dE/dSph) pueden ser "sobrevivientes" de procesos de disrupción tidal.

Propiedades Físicas Clave

Tipo	Masa (M_{\odot})	($B - V$)	Gas
cD	$10^{12} - 10^{13}$	0.9	Trazas
E normal	$10^9 - 10^{12}$	0.8-0.9	~ 0
dE	$10^7 - 10^9$	0.7	~ 0
dSph	$10^6 - 10^7$	0.5	~ 0
BCD	$10^8 - 10^9$	0.3	10%

Excepciones Notables

- **BCD:** Aunque son elípticas, su color azul y gas las asemejan a irregulares.
- **dSph:** Algunas muestran formación estelar residual (ej. Carina dSph).

Galaxias Elípticas Gigantes: Función de Luminosidad

Clasificación por Luminosidad

Las galaxias elípticas se dividen en tres categorías según su luminosidad (L) relativa a L^* (luminosidad característica del universo):

- **Gigantes (E o cD):**
 - $L \gg L^*$ (típicamente $L \sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$).
 - Ejemplo: M87 (cD en el cúmulo de Virgo), con $L \approx 5L^*$.
 - Dominan centros de cúmulos; halos extendidos (> 100 kpc).
- **Luminosas (E normales):**
 - $L \sim L^*$ ($0.5L^* < L < 2L^*$).
 - Ejemplo: NGC 3379 (E1), con $L \approx L^*$.
 - Perfiles de Sérsic con $n \geq 4$.
- **Pequeñas (E enanas):**
 - $L < L^*$ ($0.1L^* < L < 0.5L^*$).
 - Ejemplo: M32 (E2 satélite de Andrómeda), con $L \approx 0.2L^*$.
 - Menos concentradas que las gigantes.

Función de Luminosidad

La distribución de luminosidades sigue una **función de Schechter**:

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^{\alpha} e^{-L/L^*} dL,$$

donde:

- $L^* = 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ (rodillade la función, similar a la Vía Láctea).
- $\alpha \approx -1.2$ para elípticas (exceso de galaxias débiles).

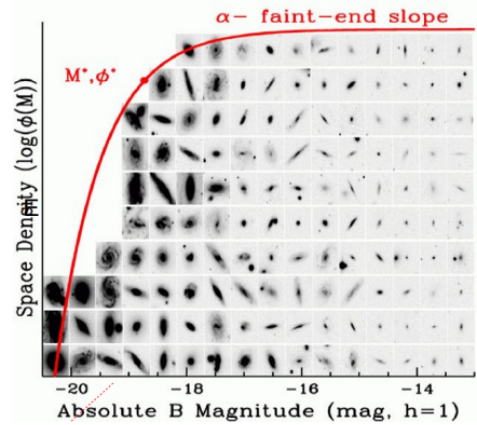


Fig. 23.

- **Densidad espacial vs. Magnitud absoluta (M_B):**
 - Eje X: Magnitud absoluta en banda B ($M_B, h = 1$).
 - Eje Y: Densidad numérica $\log(\phi(M))$ (galaxias $\text{Mpc}^{-3} \text{mag}^{-1}$).
 - La rodilla ($M^* \approx -21$ mag) marca L^* .
 - Pendiente pronunciada para $M_B > M^*$ (abundancia de enanas).

Implicaciones Físicas

- **Jerarquía de masas:** Las cD son producto de fusiones múltiples (canibalismo galáctico).
- **Sesión observacional:** El exceso de enanas sugiere que muchas son fallidas (su formación fue truncada).

Ejemplo Observacional

- **M32:** Elíptica compacta con:
 - $M_B \approx -16.5$ mag.
 - Perfil de luz central muy concentrado (cúspide estelar).

Galaxias Elípticas Enanas: Características y Clasificación

Tipos y Propiedades Distintivas

Las galaxias elípticas enanas (dE/dSph) representan la población de baja luminosidad del universo temprano, con características únicas:

- **Enanas Elípticas (dE):**

- **Luminosidad:** $L < 0.1L^*$ ($M_B > -16$). **Morfología:** Perfiles de luz más extendidos que las elípticas gigantes (ley de Sérsic con $n \sim 1 - 2$). **Ejemplo:** NGC 205 (satélite de M31).
- **Enanas Esferoidales (dSph):**
 - **Luminosidad:** $L < 0.001L^*$ ($M_B > -14$). **Materia oscura:** Dominan su masa ($M/L \sim 100$). **Ejemplo:** Draco dSph (satélite de la Vía Láctea).

Diferencias con Elípticas Gigantes

Característica	dE/dSph	Elípticas Gigantes (E/cD)
Luminosidad	$< 0.1L^*$	$> L^*$
Perfil de luz	Similar a discos ($n \sim 1 - 2$)	Altamente concentrado ($n \geq 4$)
Contenido de gas	Trazas (algunas dE)	Casi nulo
Entorno	Cúmulos/grupos	Centros de cúmulos

Fig. 24.

Controversia Clasificatoria

- **Problema:** Sus propiedades difieren radicalmente de las elípticas clásicas:
 - Distribuciones estelares similares a discos (no esferoidales).
 - Presencia residual de gas en algunas dE.
- **Propuesta:** Reclasificarlas como "enanas de tipo temprano" (ETD), evitando asociarlas con elípticas verdaderas.

Origen Evolutivo

- **Escenario 1:** Remanentes de galaxias espirales enanas truncadas por interacciones tidal (ej. con la Vía Láctea).
- **Escenario 2:** Fósiles de la época de reionización, donde la formación estelar fue suprimida tempranamente.

Ejemplos Clave

- **Sextans dSph:** Baja metalicidad ($[Fe/H] \sim -2$), típica de sistemas antiguos.
- **Leo I dE:** Muestra formación estelar reciente (~ 1 Gyr), desafiando modelos simples.

Implicaciones Cosmológicas

- Las dSph son laboratorios para estudiar materia oscura (ej. perfiles de densidad).
- Su abundancia sugiere que son bloques de construcción de galaxias más masivas.

Brillo Superficial en Sistemas Estelares: Galaxias Elípticas, Bulbos y Cúmulos Globulares

Relación entre Brillo Superficial y Luminosidad

El gráfico compara el **brillo superficial central** (μ_0) con la **magnitud absoluta en banda B** (M_B) para distintos sistemas estelares:

- **Galaxias Elípticas (E):**
 - Alta luminosidad ($M_B < -18$) y brillo superficial elevado ($\mu_0 < 18$ mag/arcsec²).

- Siguen la relación $\mu_0 \propto M_B$ (ley de Kormendy).
- **Bulbos Galácticos:**
 - Intermedios en luminosidad ($-18 < M_B < -14$).
 - Brillo superficial similar al de elípticas enanas (dE).
- **Cúmulos Globulares (GCs):**
 - Baja luminosidad ($M_B > -10$) pero alto brillo superficial ($\mu_0 \sim 16 - 18$ mag/arcsec²).
 - Se agrupan en la región inferior derecha del gráfico.

Interpretación Física

- **Ley de Escala:** La correlación $\mu_0 - M_B$ refleja diferencias en:
 - Concentración estelar (perfiles de Sérsic: $n = 1$ para GCs, $n \geq 4$ para Es).
 - Historia de formación (ej. fusiones para Es vs. colapso monolítico para GCs).
- **Excepciones:**
 - Galaxias dE y bulbos pueden superponerse en propiedades.
 - Cúmulos **ultracompactos** (UCDs) llenan el espacio entre GCs y dE.

Ecuaciones Clave

- **Perfil de Sérsic:**

$$I(r) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1/n} \right]$$

donde n es el índice de concentración.

- **Brillo superficial central** (μ_0):

$$\mu_0 = -2.5 \log(I_0) + \text{cte}$$

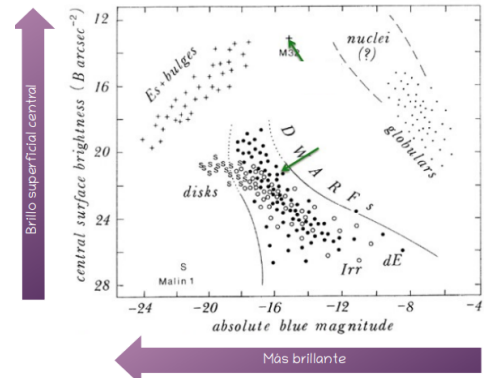


Fig. 25.

Diagrama Conceptual

Sistema	Rango M_B	Rango μ_0 (mag/arcsec ²)
Elípticas (E)	-24 a -15	14 a 22
Bulbos	-18 a -14	16 a 20
Cúmulos Globulares	-10 a -7	16 a 18

Implicaciones

- La posición en el gráfico $\mu_0 - M_B$ revela el mecanismo de formación:
 - Es y bulbos: Dinámicas colectivas (fusiones).
 - GCs: Colapso gravitacional aislado.

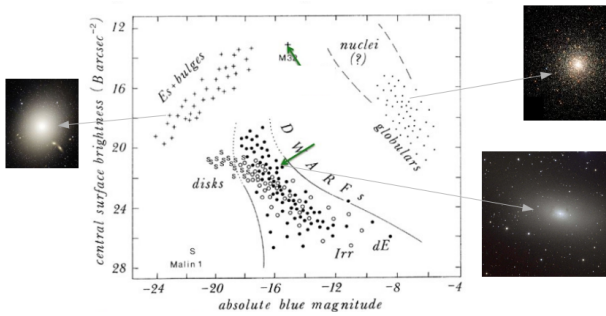


Fig. 26.

La Forma Tridimensional de las Galaxias Elípticas

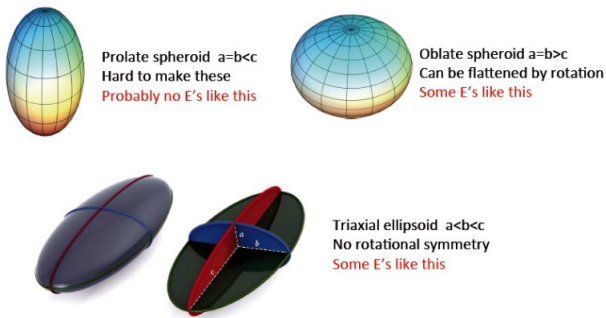


Fig. 27.

Tipos de Elipsoides de Isodensidad

Las galaxias elípticas pueden clasificarse según sus formas 3D, definidas por sus semiejes (a, b, c):

- **Esferoide Prolato** ($a = b < c$):
 - Forma alargada (similar a un balón de rugby).
 - **Problema dinámico:** Difícil de estabilizar sin rotación interna compleja.
 - **Evidencia observacional:** Raramente observado en el universo local (ej. posibles candidatos en núcleos de cúmulos).
- **Esferoide Oblato** ($a = b > c$):
 - Forma achatada (como un disco grueso). **Mecanismo de formación:** Aplanamiento por rotación ($v_{\text{rot}}/\sigma \geq 0.7$).
 - Ejemplos:** Galaxias E4-E7 (ej. NGC 4697).
- **Elipsoide Triaxial** ($a < b < c$):
 - Sin simetría de rotación (tres ejes distintos). **Origen:** Interacciones gravitacionales o merger múltiples. **Ejemplos:** Muchas elípticas intermedias (E2-E5, ej. M32).

Técnicas de Determinación de Forma

- **Fotometría de profundidad:** Análisis de isoterms en múltiples ángulos.
- **Cinemática interna:** Mapeo de campos de velocidad (ej. diagramas $(v/\sigma, \epsilon)$).
- **Modelado N-body:** Simulaciones que reproducen perfiles de luz y dispersión de velocidades.

Implicaciones Físicas

Forma	Proceso Dominante	Fracción Observada
Prolato	Merger polar	< 5%
Oblato	Rotación	~ 30% (E4-E7)
Triaxial	Mergers no alineados	~ 65% (E0-E3)

Excepciones Notables

- **Elípticas ultracompactas:** Formas esféricas (ej. M60-UCD1) por stripping tidal.
- **Galaxias con shells:** Estructuras triaxiales con subcomponentes (ej. NGC 3923).

Relación con la Secuencia de Hubble

- Las elípticas **E0** (esféricas) suelen ser triaxiales con $a \approx b \approx c$.
- Las **E7** (muy achatadas) son predominantemente oblatas.

Morfología Detallada de Galaxias Elípticas: Componentes Disky y Boxy

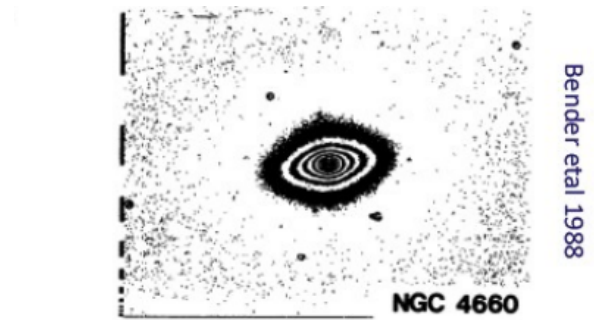


FIGURE 6. — R-image of NGC 4660, an elliptical galaxy with a disk-component in the isophotes ($a(4)/a \sim +0.03$).

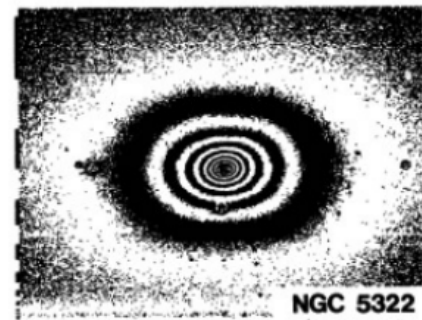


FIGURE 7. — R-image of NGC 5322, an elliptical galaxy with box-shaped isophotes ($a(4)/a \sim -0.01$).

Fig. 28.

Desviaciones de las Isofotas Elípticas

El 80% de las galaxias elípticas presentan anomalías en sus isofotas, revelando estructuras subyacentes:

- **Elípticas Disky (D):**
 - **Características:**
 - Isofotas con exceso de luz a lo largo del eje mayor ($a_4/a > 0$).

- Presencia de **discos estelares embebidos** (1-5% de la masa total).
- Perfiles de brillo intermedios entre elípticas puras y S0.

Origen: Remanentes de fusiones húmedas con preservación de momento angular. **Ejemplo:** NGC 4660 ($a_4/a \sim +0.03$), mostrado en la Figura 6.

– Elípticas Boxy (B):

– Características:

- Isofotas con déficit de luz en los ejes ($a_4/a < 0$), creando forma de "caja".
- Órbitas estelares caóticas (órbitas de caja) sin rotación neta.
- Triaxialidad marcada ($a \neq b \neq c$).

Origen: Fusiones secas con baja relación gas/estrellas.

Ejemplo: NGC 5322 ($a_4/a \sim -0.01$), mostrado en la Figura 7.

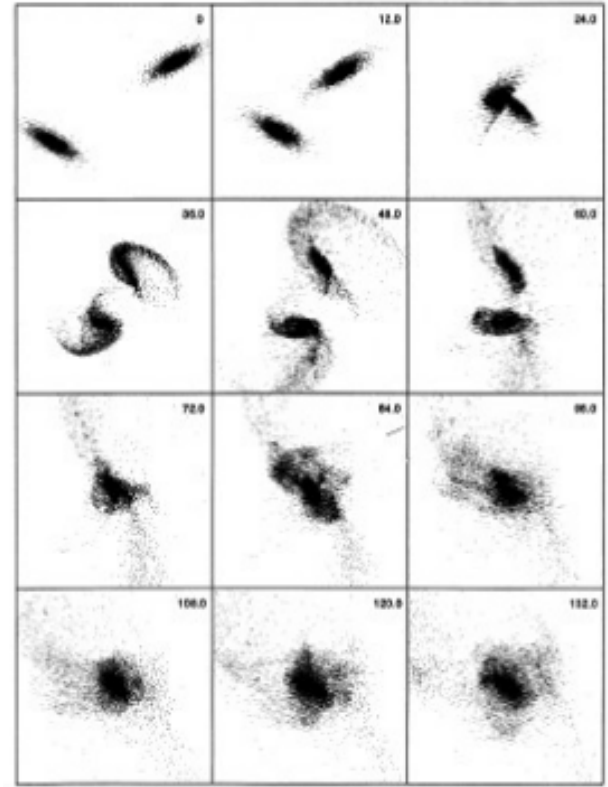


Fig. 29.

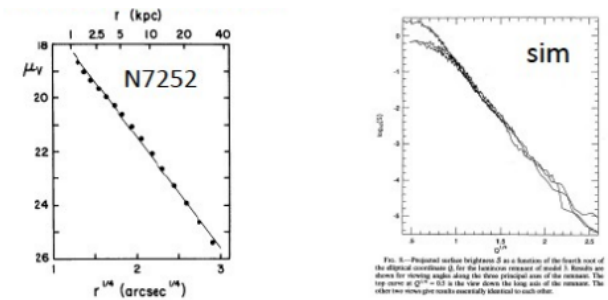


Fig. 30.

Evidencia observacional:

- NGC 7252 muestra una morfología perturbada, con colas de marea, resultado típico de una fusión reciente.
- El perfil radial de brillo superficial sigue una ley de tipo $r^{1/4}$, característica de galaxias elípticas.
- Esta coincidencia entre observación y simulación refuerza la hipótesis de que las elípticas pueden formarse a partir de fusiones mayores.

Galaxias Elípticas: Características Generales y Paradojas

Propiedades Fundamentales

Las galaxias elípticas (E) representan los sistemas estelares más masivos y antiguos del universo, con las siguientes características:

– Escalas extremas:

- Las galaxias más grandes conocidas (ej. cD como IC 1101, diámetro ~ 2 Mpc).

Parámetros Cuantitativos Clave

– Coeficiente a_4/a :

- $a_4/a > 0$: Exceso de luz (disky).
- $a_4/a < 0$: Déficit de luz (boxy).

– Relación con cinemática:

- Galaxias diskly: Alta rotación ($v/\sigma > 0.6$).
- Galaxias boxy: Soporte por dispersión ($v/\sigma < 0.4$).

Implicaciones para la Clasificación Hubble

Tipo	Forma Dominante	Ejemplo
E-D (Disky)	Oblato con disco	NGC 4660
E-B (Boxy)	Triaxial	NGC 5322
E-puro	Esferoidal	M87

Importancia Cosmológica

- Las elípticas **diskly** sugieren formación reciente (últimos 5 Gyr).
- Las **boxy** indican merger antiguos (> 10 Gyr).

Técnicas de Estudio

- **Fotometría de alta resolución:** Análisis de Fourier de isofotas (a_4, b_4).
- **Espectroscopía integrada:** Mapeo de v/σ para confirmar rotación.
- **Simulaciones:** Reproducción de mergers con diferentes ratios gas/estrellas.

¿Cómo se forman las Elípticas?

Una de las teorías más aceptadas sobre la formación de galaxias elípticas propone que son el resultado de la fusión de dos galaxias espirales de masas similares. Un caso representativo es el remanente de fusión **NGC 7252**, que muestra características estructurales consistentes con simulaciones numéricas de fusiones mayores (*major mergers*). **Simulaciones de Hernquist (1992):**

- Se simulan fusiones entre dos discos de masa similar.
- El sistema resultante evoluciona hacia una configuración morfológicamente indistinguible de una galaxia elíptica.
- Se reproducen estructuras observadas como colas de marea y núcleos compactos.

- Masas entre 10^9 y $10^{13} M_{\odot}$.
- **Población estelar:**
 - Estrellas viejas (Población II, > 10 Gyr) con alta metalicidad ($Z \sim Z_{\odot}$ en centros).
 - Ausencia de formación estelar reciente (colores rojos, $(B - V) \sim 0.9$).
- **Medio interestelar:**
 - Carencia de gas frío ($M_{\text{HI}} < 10^7 M_{\odot}$) y polvo (extinción $A_V < 0.1$ mag).
 - Plasma caliente ($T \sim 10^7$ K) detectado en rayos X en E masivas.
- **Estructura interna:**
 - Perfiles de luz suaves (ley de Sérsic con $n \geq 4$) sin subestructuras.
 - Isofotas casi perfectamente elípticas (índice de forma $1 - b/a \leq 0.3$).
- **Dinámica:**
 - Dominada por dispersión de velocidades ($v/\sigma < 0.4$).
 - Baja rotación global (excepto en E disk).

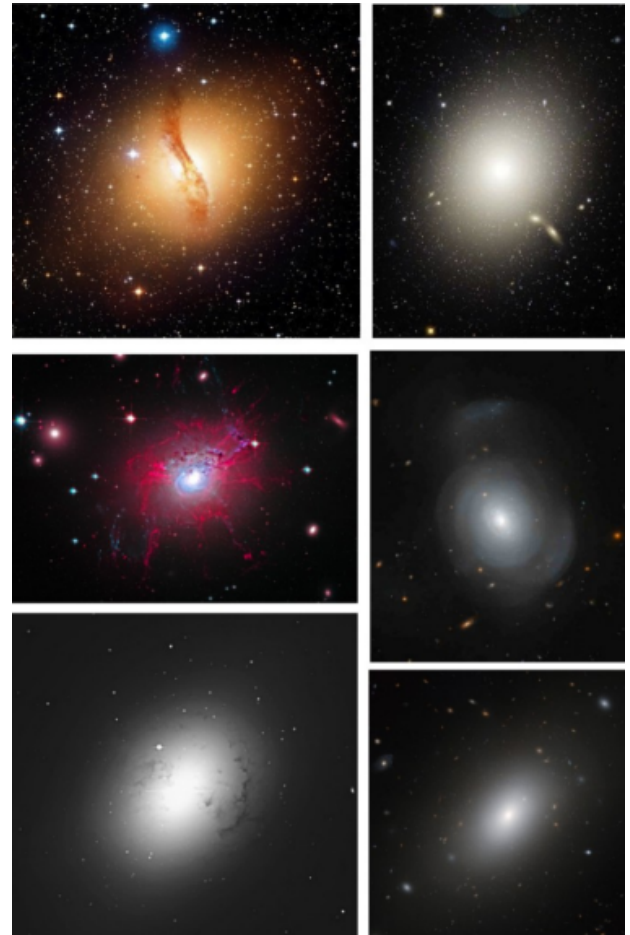


Fig. 31.

La Paradoja de la Complejidad

A pesar de su aparente simplicidad, las elípticas exhiben **diversidad oculta**:

- **Variación en escalas:**
 - Desde enanas compactas (dE) hasta gigantes (cD).
 - Diferencias en perfiles de luz centrales (cúspides vs. núcleos).
- **Subpoblaciones:**
 - Elípticas *disky* (rotación) vs. *boxy* (órbitas de caja).
 - Presencia de discos débiles (E/S0 transicionales).
- **Historia evolutiva:**
 - Algunas muestran *shells* o halos estelares (restos de fusiones).
 - Otras contienen AGN activos (ej. M87).

Ejemplos Representativos

Galaxia	Tipo	Característica Única
M87 (NGC 4486)	E0/cD	Jet de AGN, halo de GCs ($\sim 12,000$)
NGC 5128 (Cen A)	E0p	Disco de polvo (relicto de fusión)
M32 (NGC 221)	E2	Compañera compacta de Andrómeda

Implicaciones Cosmológicas

- **Fósiles jerárquicos:** Registran la historia de fusiones del universo.
- **Pruebas de materia oscura:** Perfiles de velocidad en dSph.