

# Plano Fundamental y Fusiones

Mauro Jélvez

## Relación de Faber-Jackson para galaxias elípticas

La **Relación de Faber-Jackson** es una correlación observacional que conecta la luminosidad de una galaxia elíptica ( $L$ ) con la dispersión de velocidades estelares ( $\sigma$ ). Esta relación puede expresarse como:

$$L \propto \sigma^4$$

Donde:

- $L$ : Luminosidad de la galaxia.
- $\sigma$ : Dispersión de velocidad de las estrellas dentro de la galaxia.

### Ecuación logarítmica

En términos de magnitud absoluta ( $M_B$ ), la relación se presenta como:

$$\log(\sigma_0) = -0.1 M_B + \text{constante}$$

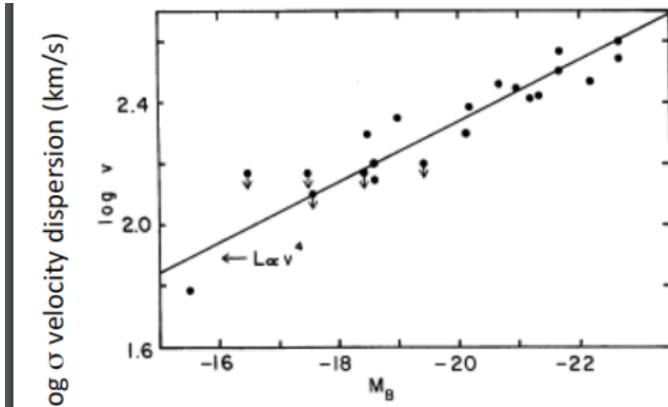


Fig. 1.

El gráfico muestra la correlación entre  $\log \sigma$  (dispersión de velocidades en km/s) en el eje  $y$  y  $M_B$  (magnitud absoluta) en el eje  $x$ . Los puntos representan datos observacionales y la línea recta ilustra la tendencia general de la relación  $L \propto \sigma^4$ .

### Usos principales de la relación

La Relación de Faber-Jackson es importante porque:

1. Es un **indicador de distancia**, ya que permite estimar distancias a galaxias elípticas midiendo su dispersión de velocidades.
2. Proporciona **información estructural** sobre las galaxias, ayudando a entender cómo están formadas.

## Comparación con la relación de Tully-Fisher

La Relación de Faber-Jackson es análoga a la relación de Tully-Fisher para galaxias espirales. Sin embargo, presenta algunas diferencias notables:

- Tiene **más dispersión** en los datos observacionales (alrededor de un 35% frente al 15% en Tully-Fisher).
- La dispersión está correlacionada con un **tercer parámetro desconocido**, lo que sugiere que la relación depende de más variables además de  $L$  y  $\sigma$ .

### Hacia una relación más precisa

Para reducir la dispersión observada en la relación, se puede incorporar un tercer parámetro relacionado con la estructura de la galaxia. Esto lleva al desarrollo del **Plano Fundamental**, que incluye:

- La dispersión de velocidad ( $\sigma$ ),
- El radio efectivo de la galaxia ( $R_e$ ),
- Y la luminosidad superficial promedio ( $\langle I \rangle$ ).

## El Plano Fundamental

La Relación de Tully-Fisher y la Relación de Faber-Jackson conectan la luminosidad de las galaxias con una propiedad cinemática. Sin embargo, en galaxias elípticas, se ha encontrado una relación más general que implica parámetros estructurales y cinemáticos de estas galaxias. Esta relación se conoce como el **Plano Fundamental**.

### Relaciones entre parámetros de galaxias elípticas

1. El radio efectivo ( $R_e$ ) de las galaxias elípticas normales está relacionado con el brillo superficial promedio dentro de este radio,  $\langle I \rangle_e$ , como:

$$R_e \propto \langle I \rangle_e^{-0.83} \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

donde:

- $R_e$ : Radio efectivo.
- $\langle I \rangle_e$ : Brillo superficial promedio dentro del radio efectivo.

2. La luminosidad total ( $L$ ) de una galaxia elíptica está relacionada con  $R_e$  y  $\langle I \rangle_e$  por:

$$L = 2\pi R_e^2 \langle I \rangle_e \quad (\text{Ecuación 3.22})$$

3. Combinando estas relaciones, se obtiene:

$$\langle I \rangle_e \propto L^{-1.5} \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

### Definición del Plano Fundamental

El Plano Fundamental conecta tres parámetros principales: el radio efectivo  $R_e$ , el brillo superficial promedio  $\langle I \rangle_e$ , y la dispersión de velocidad estelar  $\sigma_0$ . La relación tridimensional puede expresarse como:

$$R_e \propto \sigma_0^{1.4} \langle I \rangle_e^{-0.85} \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

### Forma logarítmica del Plano Fundamental

La forma logarítmica de esta relación se escribe como:

$$\log R_e = 0.34\mu_e + 1.4 \log \sigma_0 + \text{constante} \quad (\text{Ecuación 3.25})$$

donde:

- $\mu_e$ : Brillo superficial promedio en unidades de mag/arcsec<sup>2</sup>.

Esta ecuación define un plano en el espacio tridimensional de los parámetros  $\log R_e$ ,  $\log \sigma_0$ , y  $\mu_e$ . Diferentes proyecciones de este plano se pueden visualizar para entender mejor las propiedades de las galaxias elípticas.

### Conclusión

El Plano Fundamental proporciona una descripción más precisa y menos dispersa de las galaxias elípticas en comparación con las relaciones de Faber-Jackson o Tully-Fisher. Esto se debe a la inclusión de un tercer parámetro, el brillo superficial promedio  $\langle I \rangle_e$ , que permite describir de manera más completa la estructura y dinámica de estas galaxias.

### Relación Radio-Brillo Superficial para galaxias elípticas

La relación entre el radio efectivo ( $R_e$ ) y el brillo superficial promedio ( $\langle \mu \rangle_e$ ) dentro del radio efectivo en galaxias elípticas (E's) es un aspecto importante para entender su estructura y evolución. Esta relación fue estudiada por **Kormendy & Djorgovski (1989)**.

### Relación observacional

La relación puede expresarse como:

$$R \propto \langle I \rangle_e^{-0.85}$$

o, en términos logarítmicos:

$$\log R_e \propto -0.85 \langle \mu \rangle_e$$

donde:

- $R_e$ : Radio efectivo, medido en parsecs.
- $\langle \mu \rangle_e$ : Brillo superficial promedio dentro del radio efectivo, en magnitudes por arcosegundo cuadrado.

El gráfico 2 muestra cómo las galaxias con mayor brillo superficial promedio ( $\langle \mu \rangle_e$ ) tienen radios efectivos más pequeños. Esta tendencia es más prominente en galaxias elípticas de menor masa.

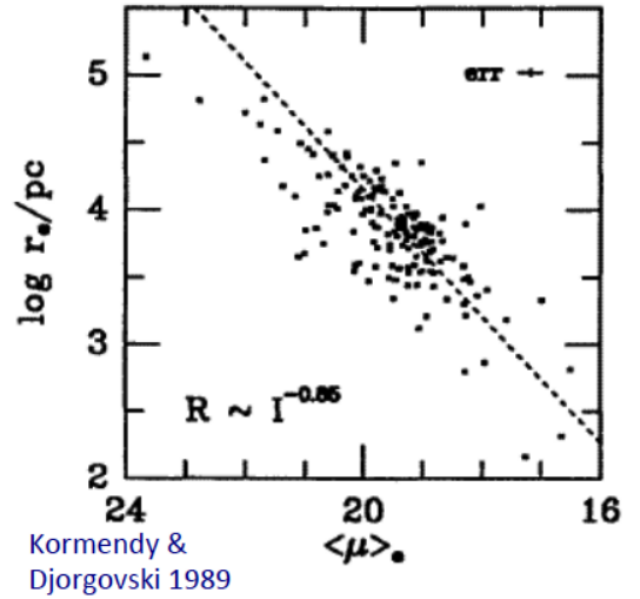


Fig. 2.

### Interpretación física

La posible interpretación de esta relación incluye:

- **Mayor disipación durante la formación:** Produce un mayor brillo superficial central y un radio efectivo ( $R_e$ ) más pequeño.
- **Disipación más importante en galaxias de menor masa:** Se asocia a fusiones húmedas (*wetter mergers*).
- **Disipación menos importante en galaxias de mayor masa:** Relacionada con fusiones secas (*drier mergers*).

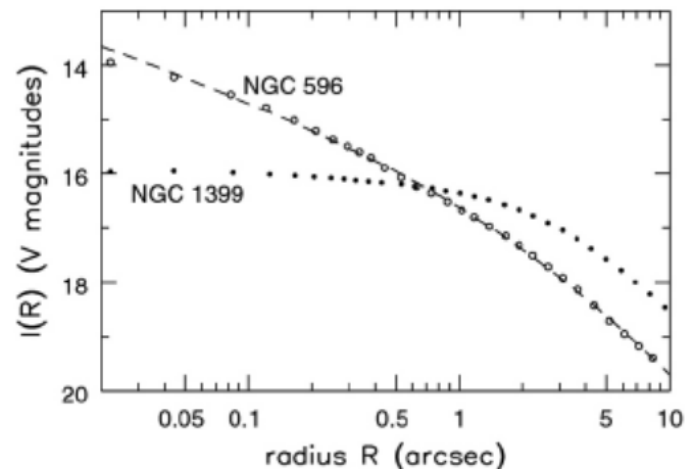


Fig. 3.

El gráfico compara perfiles de brillo superficial para dos galaxias elípticas:

- **NGC 596:** Galaxia de menor masa, con un perfil más inclinado y menor radio efectivo.
- **NGC 1399:** Galaxia de mayor masa, con un perfil más extendido y mayor radio efectivo.

## Conclusión

Esta relación indica que las propiedades estructurales de las galaxias elípticas están influenciadas por sus procesos de formación y evolución. Las galaxias de menor masa tienden a mostrar un efecto más fuerte de la disipación, mientras que en galaxias más masivas la disipación tiene un papel menos relevante.

## Relaciones de escalamiento de dos parámetros en galaxias elípticas

La imagen presentada describe las relaciones de escalamiento entre la distribución radial de la luz estelar en galaxias elípticas. Estas relaciones implican los siguientes parámetros:

- Luminosidad ( $L$ )
- Brillo superficial central ( $I_V(0)$ )
- Radio del núcleo ( $R_{\text{core}}$ )

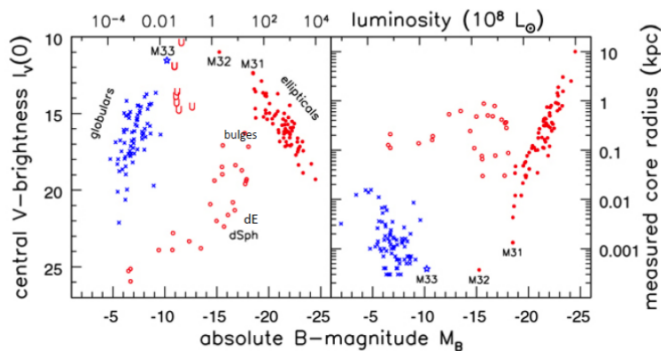


Fig. 4.

Panel izquierdo:  $I_V(0)$  vs. Magnitud absoluta ( $M_B$ )

El panel izquierdo muestra cómo el brillo superficial central ( $I_V(0)$ ) varía en función de la magnitud absoluta  $M_B$ . Los puntos están categorizados por tipos de objetos:

- **Puntos azules:** Cúmulos globulares.
- **Puntos rojos:** Galaxias elípticas, bulbos y galaxias enanas (dE y dSph).

Los ejes son los siguientes:

- **Eje X:** Magnitud absoluta  $M_B$  (de -25 a -5).
- **Eje Y:** Brillo superficial central  $I_V(0)$  (en magnitudes por segundo de arco cuadrado, rango de 25 a 10).

Panel derecho:  $R_{\text{core}}$  vs.  $M_B$

El panel derecho presenta cómo el radio del núcleo ( $R_{\text{core}}$ ) cambia con la magnitud absoluta  $M_B$ . Los puntos también están categorizados de manera similar al panel izquierdo:

- **Puntos azules:** Cúmulos globulares.
- **Puntos rojos:** Galaxias elípticas y bulbos.

Los ejes son los siguientes:

- **Eje X:** Magnitud absoluta  $M_B$  (de -25 a -5).
- **Eje Y:** Radio del núcleo  $R_{\text{core}}$  (en kpc, rango logarítmico de  $10^{-3}$  a  $10^1$ ).

## Definiciones clave

- El **radio del núcleo**  $R_{\text{core}}$  es donde el brillo superficial ( $S$ ) decae a la mitad de su valor central  $I_V(0)$ .
- Tanto  $R_{\text{core}}$  como  $I_V(0)$  dependen de la resolución, por lo que deben interpretarse con precaución.
- $R_{\text{core}}$  puede definirse tanto para perfiles de luz centrales tipo *cuspy* como para perfiles *core-like*.
- $R_{\text{core}}$  es una propiedad del centro de la galaxia, mientras que  $R_{\text{eff}}$  (radio efectivo) es una propiedad de la mayor parte de la galaxia.
- $R_{\text{eff}}$  es el radio que contiene la mitad de la luz total de la galaxia.

## Notas adicionales

- Se destacan las ubicaciones de objetos específicos, como M31, M32 y M33, dentro de los diagramas.
- Los globulares tienden a mostrar magnitudes absolutas más bajas y radios del núcleo más pequeños en comparación con galaxias elípticas.

## Proyecciones del plano fundamental para elípticas

Escalando relaciones entre  $L$ ,  $\sigma$ ,  $S$ ,  $B$ ,  $r_{\text{eff}}$

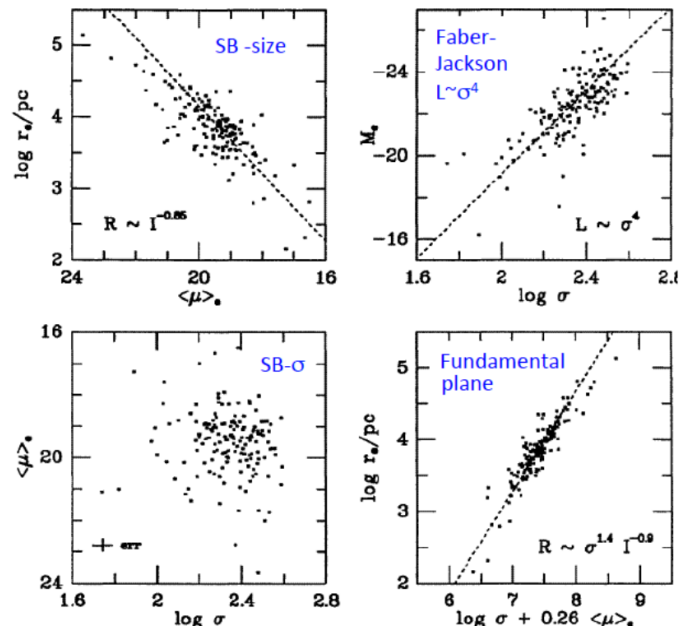


Fig. 5.

## Vista en 3D del plano fundamental

Plano fundamental para elípticas en un espacio  $L - \sigma - R_e$ . Los puntos muestran la región coloreada de E's real que muestra la superficie del "plano fundamental"

## Relaciones derivadas del teorema del virial y el plano fundamental

El documento describe cómo ciertas propiedades observables de galaxias, como su masa, radio efectivo y luminosidad, se relacionan a través de principios físicos fundamentales, particularmente el *teorema del virial*.

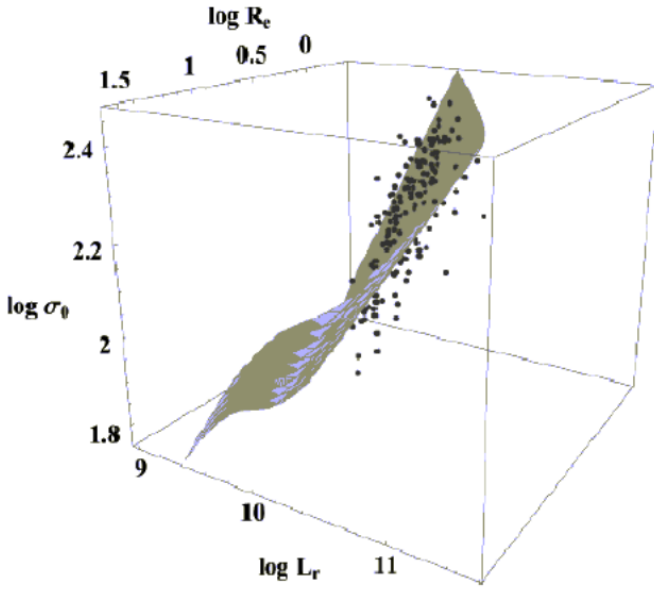


Fig. 6.

#### Ecuación de luminosidad

La luminosidad total de una galaxia dentro del radio efectivo  $R_e$  se expresa como:

$$L = 2\pi R_e^2 \langle I \rangle_e, \quad (3.22)$$

donde  $\langle I \rangle_e$  es el brillo superficial promedio dentro de  $R_e$ .

#### Relación entre masa, radio efectivo y dispersión de velocidad

A partir del *teorema del virial*, la masa dentro del radio efectivo  $R_e$  es proporcional a:

$$M \propto \sigma_0^2 R_e,$$

donde  $\sigma_0$  es la dispersión de velocidad estelar central. Combinando esto con la ecuación (??), se obtiene:

$$R_e \propto \frac{L}{M} \frac{\sigma_0^2}{\langle I \rangle_e}. \quad (3.26)$$

#### Concordancia con el plano fundamental

La ecuación (??) es consistente con el *plano fundamental* (FP) en la forma:

$$R_e \propto \sigma_0^{1.4} \langle I \rangle_e^{-0.85}. \quad (3.24)$$

Esto se cumple si:

$$\frac{L}{M} \frac{\sigma_0^2}{\langle I \rangle_e} \propto \frac{\sigma_0^{1.4}}{\langle I \rangle_e^{0.85}},$$

o, equivalentemente,

$$\frac{M}{L} \propto \frac{\sigma_0^{0.6}}{\langle I \rangle_e^{0.15}} \propto \frac{M^{0.3} R_e^{0.3}}{L^{0.15}}.$$

#### Implicaciones del FP

La relación fundamental del plano puede derivarse del *teorema del virial*, siempre que la razón entre masa y luminosidad ( $M/L$ ) de las galaxias varíe ligeramente con la masa, según:

$$\left(\frac{M}{L}\right) \propto M^{0.2} \quad \text{o} \quad \left(\frac{M}{L}\right) \propto L^{0.25}. \quad (3.27)$$

Esto implica que el *mass-to-light ratio* ( $M/L$ ) aumenta ligeramente con la masa. Este resultado es similar a la relación de Tully-Fisher y es crucial para estimaciones de distancias.

#### La Relación $D_n - \sigma$

##### Descripción de la relación $D_n - \sigma$

Otra relación de escalamiento importante para las galaxias elípticas es la relación  $D_n - \sigma$ . Esta relación tiene aplicaciones prácticas significativas en astronomía.

El parámetro  $D_n$  se define como el diámetro de una elipse dentro de la cual el brillo superficial promedio  $\langle I \rangle_n$  corresponde a un valor de 20.75 mag/arcsec<sup>2</sup> en la banda B.

##### Luminosidad dentro de $D_n$

Bajo el supuesto de que todas las galaxias elípticas tienen un perfil de brillo autosemejante:

$$I(R) = I_e f(R/R_e),$$

con  $f(1) = 1$ , la luminosidad dentro de  $D_n$  se puede expresar como:

$$\langle I \rangle_n \left(\frac{D_n}{2}\right)^2 = 2\pi I_e \int_0^{D_n/(2R_e)} x f(x) dx.$$

Esto se simplifica a:

$$D_n \propto R_e I_e^{-0.8}, \quad (3.28)$$

si se utiliza un perfil de de Vaucouleurs, donde  $f(x) \propto x^{-1.12}$  en el rango relevante de radios.

##### Relación con el plano fundamental

Sustituyendo  $R_e$  de acuerdo con la ecuación del plano fundamental:

$$R_e \propto \sigma_0^{1.4} \langle I \rangle_e^{-0.85},$$

se encuentra que:

$$D_n \propto \sigma_0^{1.4} \langle I \rangle_e^{0.05}. \quad (3.29)$$

##### Implicaciones de la relación $D_n - \sigma$

La ecuación (??) implica que  $D_n$  es casi independiente de  $\langle I \rangle_e$  y depende solo de la dispersión de velocidad central  $\sigma_0$ . Esto hace que  $D_n - \sigma$  sea una descripción más precisa para las galaxias elípticas que la relación de Faber-Jackson.

En contraste con el plano fundamental, esta relación involucra solo dos observables.

## Relación empírica normalizada

Empíricamente, las galaxias elípticas siguen la relación normalizada:

$$\frac{D_n}{\text{kpc}} = 2.05 \left( \frac{\sigma_0}{100 \text{ km/s}} \right)^{1.33}, \quad (3.30)$$

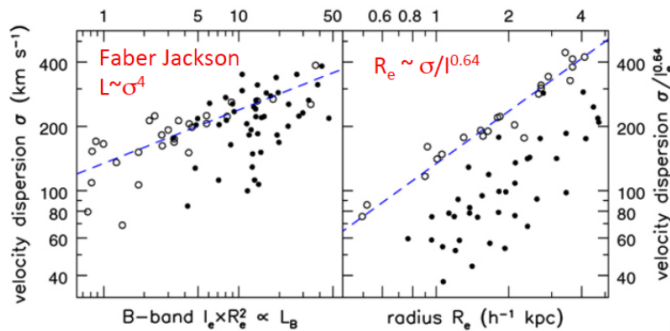
con una dispersión relativa alrededor de esta relación del 15%.

## Conclusiones desde el plano fundamental

- El plano fundamental es la afirmación de que E obedece el teorema de virial y que no existe otra restricción FUERTE en su estructura.
- En el primer orden, las relaciones M / L y las estructuras dinámicas de E's son muy similares (tanto para E disk y boxy)
- $M/L \approx 10\text{-}20$  consistente con ninguna materia oscura (dentro de  $R_e$ )
- Dispersión estrecha en FP y  $Mg_2 - \sigma$  relaciones colocan buenos límites en edades  $\approx 10\text{--}13$  Gyr y metalicidades  $z=2\text{--}4z_\odot$  para estrellas en E's
- Ninguna de las relaciones depende mucho del entorno: Las propiedades internas son bastante robustas

## Evolución de las elípticas en el plano fundamental

El plano fundamental de las galaxias elípticas describe relaciones empíricas que conectan propiedades observables como la luminosidad ( $L$ ), la dispersión de velocidad ( $\sigma$ ), el radio efectivo ( $R_e$ ) y la intensidad superficial promedio. Estas relaciones reflejan los procesos físicos que determinan la dinámica y la estructura de las galaxias elípticas.



**Fig. 7.** Relaciones empíricas de galaxias elípticas en el plano fundamental. Los círculos abiertos representan galaxias cercanas ( $z \sim 0$ ) del cúmulo de Coma, mientras que los círculos rellenos representan galaxias distantes ( $0.8 < z < 1.2$ ), más jóvenes.

- **Relación de Faber-Jackson:** Esta relación conecta la luminosidad ( $L$ ) de una galaxia con la dispersión de velocidad ( $\sigma$ ) de sus estrellas. Se observa que:

$$L \propto \sigma^4$$

Esto indica que las galaxias más luminosas tienen mayores dispersiones de velocidad, lo cual está relacionado con su mayor masa total.

- **Relación del radio efectivo:** La segunda relación conecta el radio efectivo ( $R_e$ ) con la dispersión de velocidad y la intensidad superficial promedio ( $I$ ):

$$R_e \propto \frac{\sigma}{I^{0.64}}$$

Aquí,  $I$  es proporcional a la luminosidad por unidad de área proyectada en el cielo.

## Gráfico izquierdo: Relación de Faber-Jackson

En el gráfico izquierdo se presenta la relación entre la dispersión de velocidad ( $\sigma$ , en km/s) y la luminosidad ( $L$ ), medida en la banda  $B$  como  $L_B \propto I_e \times R_e^2$ , donde  $I_e$  es la intensidad superficial promedio dentro de  $R_e$ . La línea azul indica la tendencia  $L \propto \sigma^4$ .

## Gráfico derecho: Relación del radio efectivo

El gráfico derecho muestra cómo el radio efectivo ( $R_e$ , en kpc) se relaciona con  $\sigma$  y la intensidad superficial promedio ( $I$ ). La tendencia indicada por la línea azul sigue la relación  $R_e \propto \sigma / I^{0.64}$ , lo cual refleja cómo la estructura de las galaxias está influenciada por su dinámica interna.

## Interpretación Física

Las relaciones del plano fundamental son consistentes con el equilibrio dinámico de las galaxias elípticas, que están dominadas por su componente estelar y la materia oscura. Estas relaciones también sugieren que las galaxias elípticas más masivas han experimentado procesos de formación y evolución diferentes a las galaxias menos masivas, incluyendo fusiones y acreción de materia.

## Evidencia de acreción y fusiones en E's

- Núcleos cinemáticamente distintos
- Los remanentes principales de fusión se asemejan a los de E
- “Shells” y ondulaciones y características externas de las mareas en las distribuciones estelares
- Polvo y gas perturbados
- Gran fracción ( $> 50\%$ ) de E's muestran evidencia de fusión / acreción (más en E de boxy que E de discy, pero también muchas E de disco)
- E continúan aumentando su masa con la edad
- Pequeña o ninguna subestructura dentro de la galaxia. (muchos tienen una subestructura débil pero importante que revela evidencia de fusiones)

## Definiciones de fusiones y acreciones:

- **Fusión grande:** Relación de masa  $\approx 1 : 1 - 3 : 1$
- **Fusión intermedia:** Relación de masa  $\approx 3 : 1 - 10 : 1$
- **Evento de fusión / acreción menor:** relación de masa  $> 10 : 1$

## Núcleo Cinemáticamente Desacoplado en la Galaxia Elíptica NGC 4365

La galaxia elíptica NGC 4365 es un ejemplo de una galaxia con un núcleo cinemáticamente desacoplado. Este tipo de estructuras representa regiones en el centro de la galaxia que giran ortogonalmente al resto del cuerpo principal. El análisis de NGC 4365, basado en observaciones espectroscópicas y morfológicas, revela detalles clave sobre su dinámica interna, su historia de formación y sus propiedades estelares.

## Características Principales

- El núcleo interior de  $7''$  ( $\sim 700$  pc) gira **ortogonalmente** al cuerpo principal de la galaxia.



- La región interior de 4'' muestra características **discoidales** (*discy*), mientras que la parte exterior tiene una morfología **boxy**.
- La relación entre la velocidad de rotación ( $v$ ) y la dispersión de velocidad ( $\sigma$ ) en el núcleo interno es:

$$\frac{v}{\sigma} \sim 1.3$$

indicando un comportamiento similar al de un disco.

- El núcleo cinemáticamente desacoplado contiene aproximadamente un **2% de la masa total** de la galaxia.
- La cúspide central es relativamente **poco profunda**.

#### Propiedades Globales de la Galaxia

- La galaxia NGC 4365 tiene una estructura **triaxial** en general.
- No presenta **cáscaras** (*shells*) u otras peculiaridades morfológicas visibles.
- No se detecta la presencia de **polvo** en la región central.
- La edad de la población estelar en la galaxia es de aproximadamente:

14 Gyr

tanto en el núcleo cinemáticamente desacoplado como en el cuerpo principal.

- La formación de esta galaxia probablemente involucró **fusiones antiguas**.

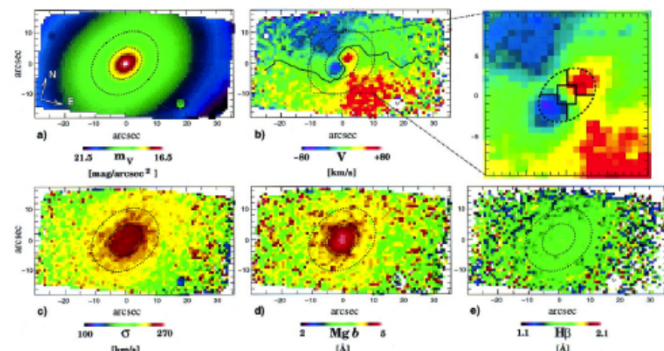


Fig. 8.

1. (a) Mapa de intensidad en la banda V, mostrando la distribución de brillo superficial.
2. (b) Mapa de velocidad radial, con gradientes que revelan la rotación ortogonal del núcleo.
3. (c) Mapa de dispersión de velocidad ( $\sigma$ ), que presenta variaciones significativas entre el núcleo y el cuerpo principal.
4. (d) Mapa de la línea espectral de Mg b, trazador de la población estelar antigua.
5. (e) Mapa de la línea espectral de H $\beta$ , indicador de episodios recientes de formación estelar.

Remanentes principales de fusión se asemejan a las de E

¿Porqué la región central parece más relajada que las otras partes?

Requiere varios tiempos dinámicos para relajarse, y el tiempo orbital (= tiempo dinámico) es mucho más largo en radios grandes.

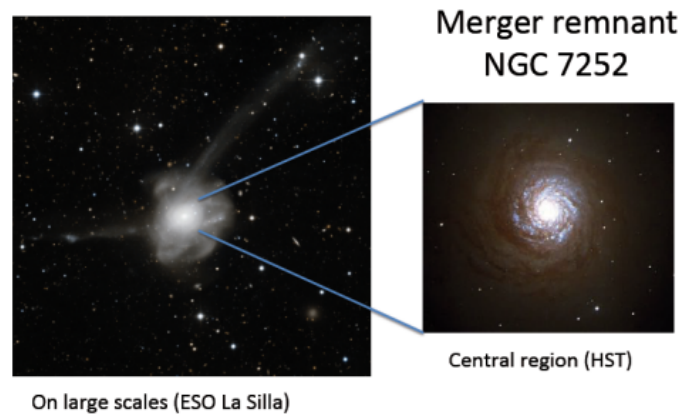


Fig. 9.

#### Comparación entre Galaxias Normales y Galaxias con Estrellas Contrarrotantes

El estudio de la cinemática estelar en galaxias permite analizar sus estructuras dinámicas y procesos de formación. Una característica interesante en algunas galaxias es la presencia de **estrellas contrarrotantes**, donde un subgrupo de estrellas gira en dirección opuesta al resto de la galaxia. Este fenómeno contrasta con la cinemática de una galaxia normal, donde todas las estrellas comparten una dirección de rotación coherente.

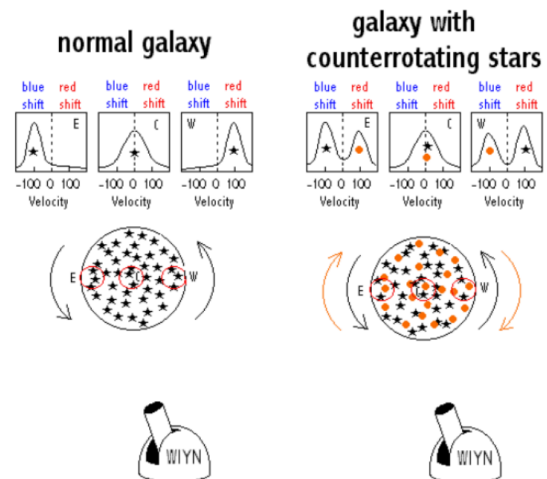


Fig. 10. Esquemas de rotación y curvas de velocidad para una galaxia normal (izquierda) y una galaxia con estrellas contrarrotantes (derecha).

#### Galaxia Normal

- En una galaxia normal, todas las estrellas rotan en la misma dirección alrededor del centro galáctico.
- Las curvas de velocidad radial muestran:
  - **Corrimiento al azul** (*blueshift*) en la región este (E), donde las estrellas se mueven hacia el observador.
  - **Corrimiento al rojo** (*redshift*) en la región oeste (W), donde las estrellas se alejan del observador.
  - Una velocidad promedio cercana a cero en la región central (C).
- El esquema de la galaxia muestra una rotación coherente en sentido antihorario.

### Galaxia con Estrellas Contrarrotantes

- En este caso, existe un subgrupo de estrellas (representadas en naranja) que gira en sentido opuesto al resto de las estrellas de la galaxia.
- Las curvas de velocidad radial tienen las siguientes características:
  - En la región este (E), se observa una combinación de estrellas con corrimiento al azul (rotación dominante) y al rojo (contrarrotación).
  - En la región oeste (W), ocurre lo inverso: predominan las estrellas con corrimiento al rojo, pero también hay una contribución de estrellas con corrimiento al azul.
  - La región central (C) muestra una superposición de ambas poblaciones, resultando en un perfil más ancho en la curva de velocidad.
- El esquema de la galaxia muestra las dos poblaciones estelares con direcciones de rotación opuestas.

### Cinemática y Observaciones

El fenómeno de estrellas contrarrotantes puede detectarse mediante observaciones espectroscópicas, como las realizadas con telescopios terrestres (representados en la imagen con el telescopio WIYN). Las diferencias en las curvas de velocidad radial son un indicador clave de la presencia de estas estructuras dinámicas.

### Implicaciones y Formación

La presencia de estrellas contrarrotantes sugiere procesos de formación complejos, como:

- **Fusiones galácticas:** La acumulación de material con diferentes momentos angulares.
- **Acreción de gas externo:** Gas proveniente del entorno que forma nuevas estrellas con dirección de rotación opuesta.

### Elípticas con "Shells"

La de la izquierda es la imagen regular y la de la derecha Imagen precedida para revelar subestructuras (la componente suave de la luz removida)



Fig. 11.

Shells se pueden formar como vía fusiones grandes (principales), tanto vía fusiones menores, mientras las estrellas son dinámicamente frías.

### Evidencias de fusiones en una fracción grande de elípticas cercanas

- Las regiones externas de muchas E muestran evidencias claras de fusiones.

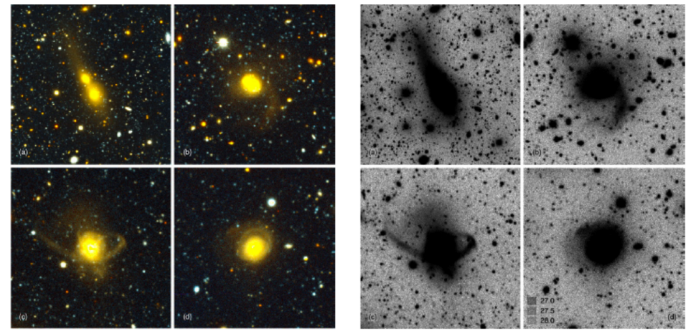


Fig. 12.

- Los brazos y shells de marea estrechos indican progenitores dinámicamente fríos (discos)
- Pero en muchas elípticas hay "grandes (anchos) flujos" de estrellas que indican progenitores dinámicamente calientes (bulbos o E's).

### "Shells" en E: propiedades observadas

- 20-50% de los E's brillantes muestran "shells" o "ondulaciones".
- La fotometría muestra una caída brusca de brillo superficial (SB) superpuesta en la disminución hacia el exterior en SB
- "Shells" a menudo débiles: de debe restar componentes de luz suave para que se puedan ver
- Bordes exteriores afilados y abrigantados (como hojas dobladas)
- En algunas galaxias, "shells" en sucesivos radios crecientes se alternan en lados opuestos de la galaxia
- "Shells" similares en color o ligeramente más azules que la galaxia subyacente

### "Shells" en E: formación

- Puede formarse a partir de una fusión mayor o menor, siempre que las estrellas estén dinámicamente frías
- Forma a través de material dinámico frío que avanza y retrocede en el potencial gravitacional de E
- Cuanto menor sea la dispersión de la velocidad de la galaxia que acreta, más nítidas serán los "shells"
- Mientras más suave y más estacionario es el potencial, más regulares son los "shells".

### Polvo y gas perturbados

≈50% de E's contienen polvo (y gas frío asociado) y la definición clásica de E: no hay polvo ... ¡Vaya!

Posibles orígenes:

- Sobran de la antigua formación de galaxias
- Derivada de la pérdida de masa de las estrellas
- Acrecentado de la fusión

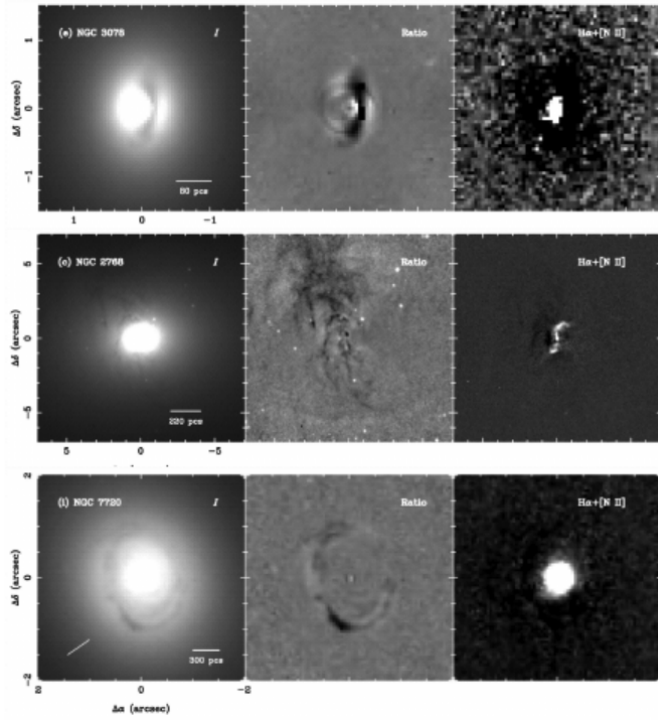
Si se deja de la antigua formación de galaxias o se origina de la pérdida de masa estelar, el polvo / gas y las estrellas deberían tener cinemática similar, el polvo / gas debería estar en el plano principal de la galaxia.

Si se acreta, puede tener una alineación o cinemática diferente (vector de momento angular diferente) o tener una distribución irregular.

Independientemente del origen, la formación de estrellas intensas o AGN puede alterar el gas y el polvo.

## Polvo en las elípticas

Desalineación morfológica y cinemática entre el polvo y el gas frente a las estrellas en muchas E, y la morfología irregular del polvo sugiere fuertemente el origen de la acreción en muchas E



**Fig. 13.**

La complejidad estructural de las E está oculta dentro del plano fundamental. A pesar de las irregularidades locales, las E siguen siendo:

- a) Obedecen el teorema de virial globalmente
- b) Tienen distribuciones de masa similares