

# Interacciones galácticas:

mecanismo primordial en la evolución de las galaxias





# Muchas preguntas

---

- ¿Qué hay detrás de estas hermosas imágenes?
- ¿Cuán frecuentes son?
- ¿Qué efecto producen?
- ¿Dónde/cuándo se originan?
- etc...



# Secuencia de Hubble: Irregulares tipo II

**Primeros estudios: Muchos ejemplos pueden ser encontrados en:**

**Atlas de Galaxias Peculiares de Arp (Arp 1966)**

**Catálogo de Vorontsov-Velyaminov (1968)**

**Arp & Madore (1987)**

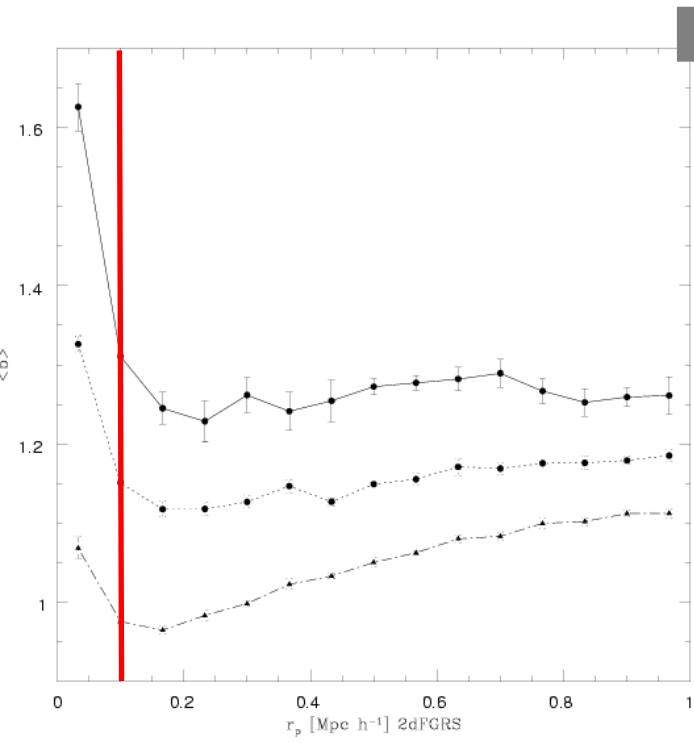
**Los trabajos de Toomre & Toomre (1972), en el área teórica, y los de Larson & Tinsley (1978) en el área observacional fueron los pioneros en este tópico.**

Varios estudios observacionales muestran que las fusiones e interacciones afectan la actividad de SF en el Universo Local (e.g. Larson & Tinsley 1978, Donzelli & Pastoriza 1997).

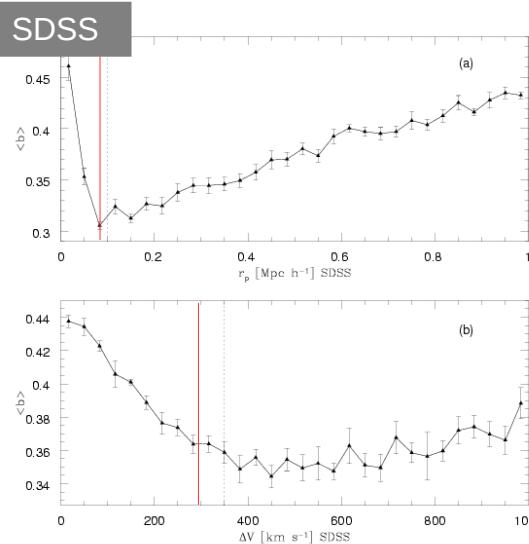
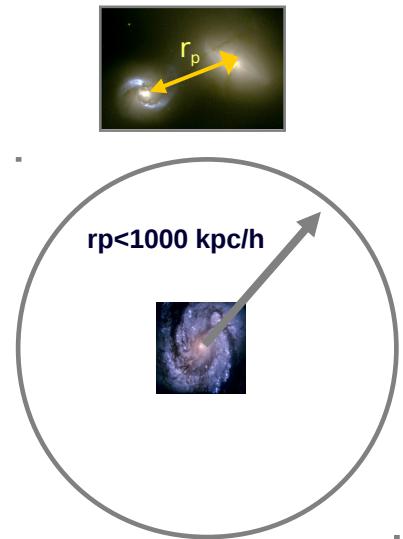
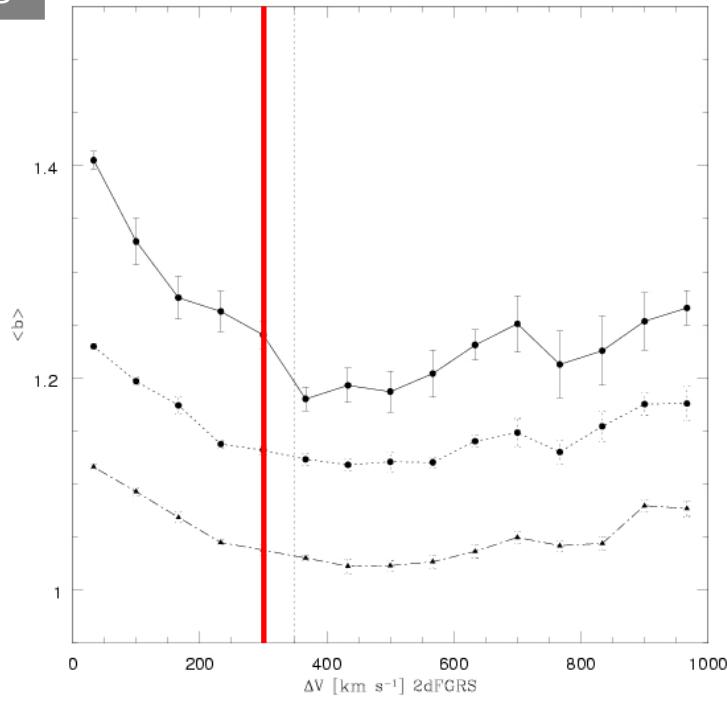
Aunque la relevancia de estos efectos en la historia de SF es ampliamente aceptada en la actualidad, aun muchas cuestiones no tienen respuestas. Por ej. algunos autores (e.g. Petrosian et al. 2002) encuentran muchos sistemas en interacción con débil actividad de formación estelar.

Barton et al. (2000) analizaron 500 galaxias pares en campo encontrando dependencia del ancho equivalente de H $\alpha$  con la distancia proyectada y la velocidad relativa.

# Selección de sistemas pares



2dFGRS



- Calculamos la SFR media de los vecinos dentro de  $r_p < 1$  Mpc y  $\Delta V < 1000$  km/s de cada galaxia.

**Los vecinos más cercanos experimentan una fuerte SFR.**

**Límite adecuado  
para seleccionar  
SISTEMAS PARES**

$\left. \begin{array}{l} \text{rp} < 100 \text{ kpc} \\ \Delta V < 350 \text{ km/s} \end{array} \right\}$ 
→  $\sim 4\%$  sistemas  
( $z < 0.1$ )

# Análisis de las Interacciones Galácticas

Diferentes tipos de Sistemas Pares

M  
T  
N

Co- y Contra-interacciones *tidales*

Sistemas Mayores y Menores

Ambiente de Densidad

Ambiente Local

Propiedades de sistemas pares en distintos ambientes

Ambiente Global

Pares/filamentos cósmicos

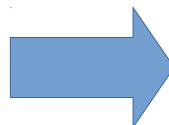
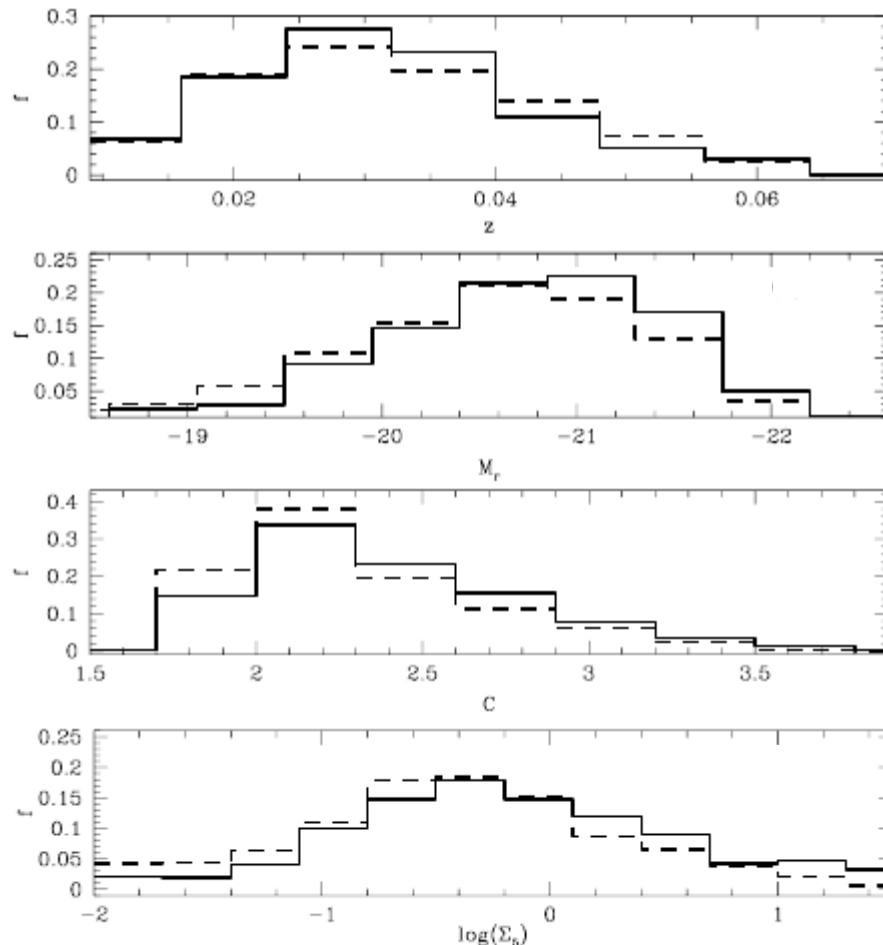
Actividad Nuclear

Efecto de las interacciones en galaxias AGN

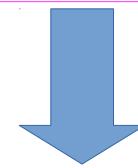
Muestras de Control

# Muestras de Control

Con el fin de proporcionar una adecuada cuantificación de los efectos de las interacciones sobre las propiedades de las galaxias, construimos muestras de control (Pérez et al. 2009).



Las muestras de control están compuestas por galaxias sin compañeras cercanas con similares distribuciones de  $z$ , luminosidad, morfología y entorno local que las muestras de galaxias pares.



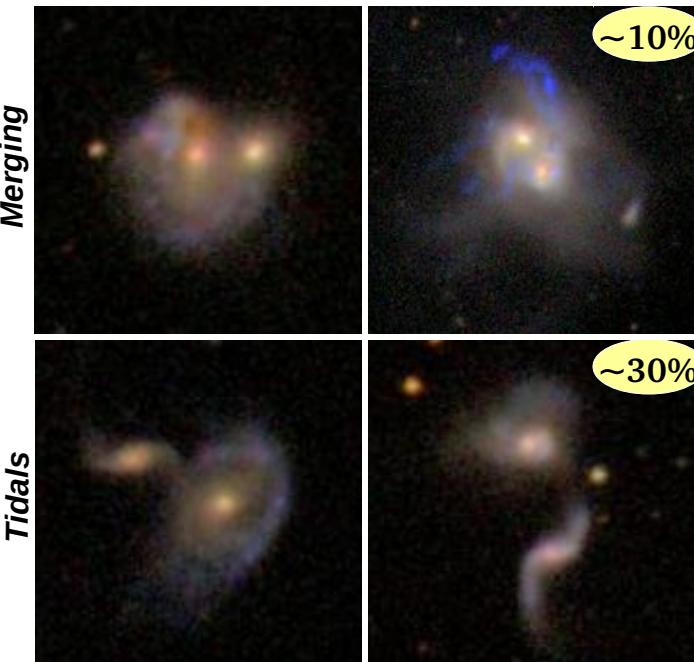
Cualquier diferencia entre las propiedades de las galaxias se asocia únicamente al proceso de interacción.



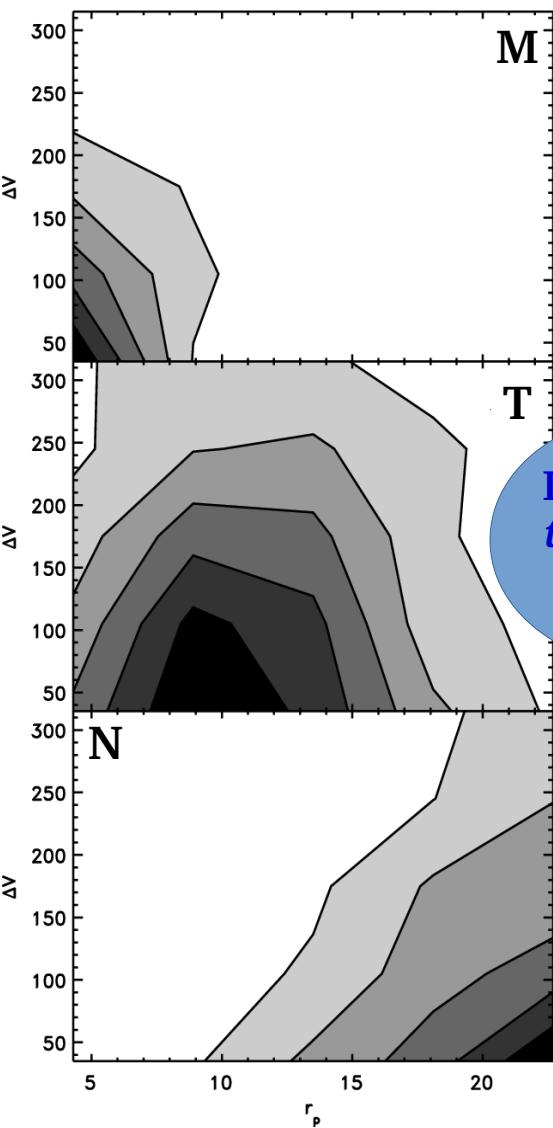
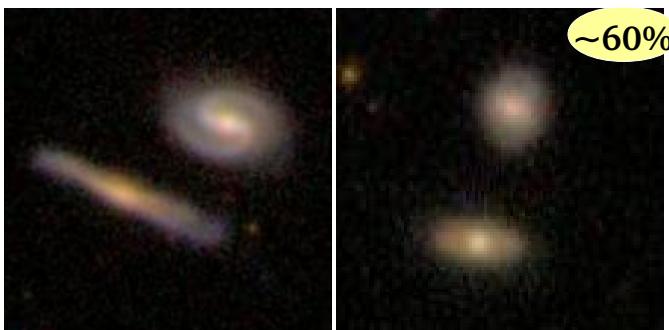
# Clasificación de Galaxias Pares

## Distorsionadas y No-distorsionadas

PARES DISTORSIONADOS

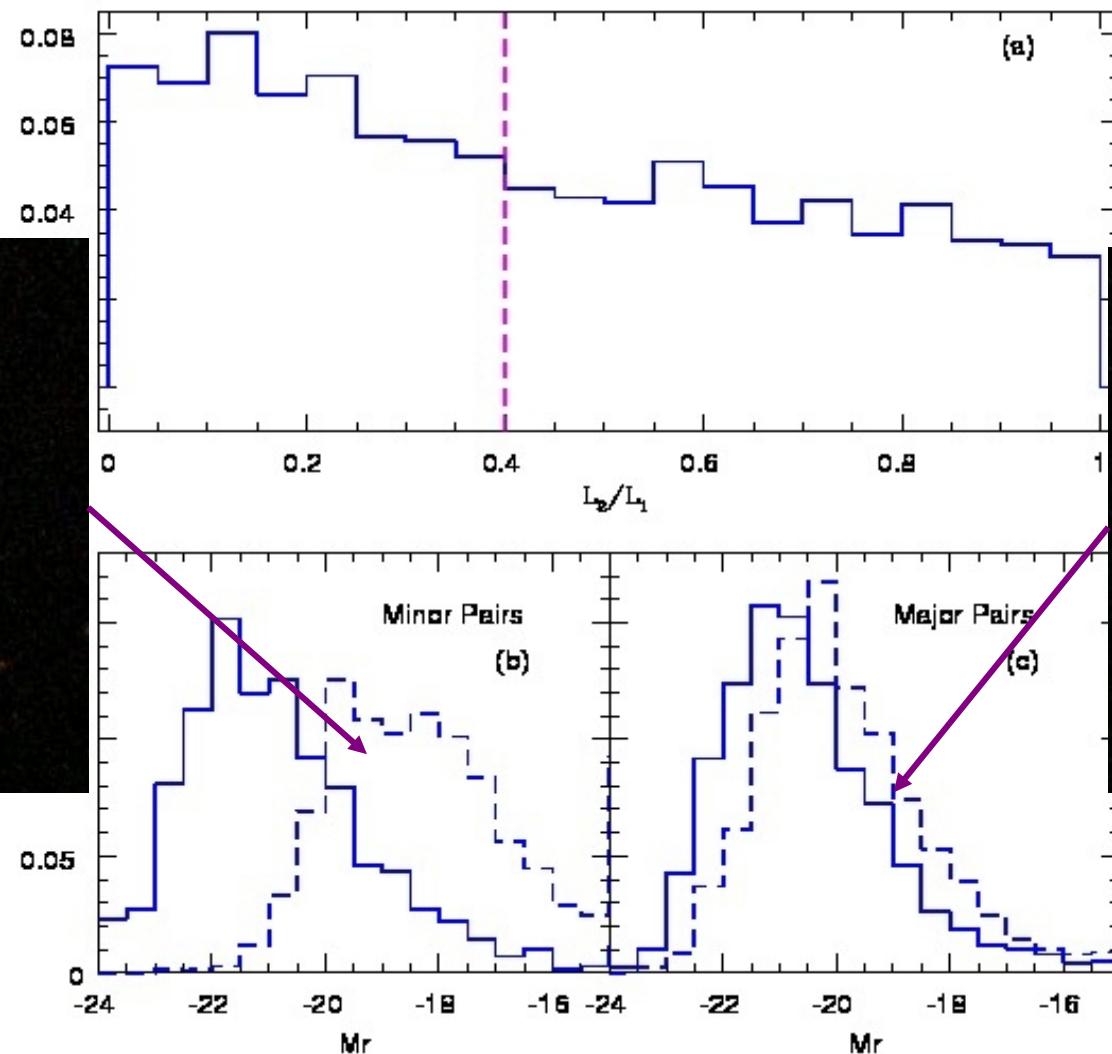


NO-DISTORSIONADOS



Interacciones Mayores y Menores

# Interacciones Mayores y Menores



Línea sólida= miembro más luminoso,  
Trazos= miembro menos luminoso

## FUSIONES MENORES



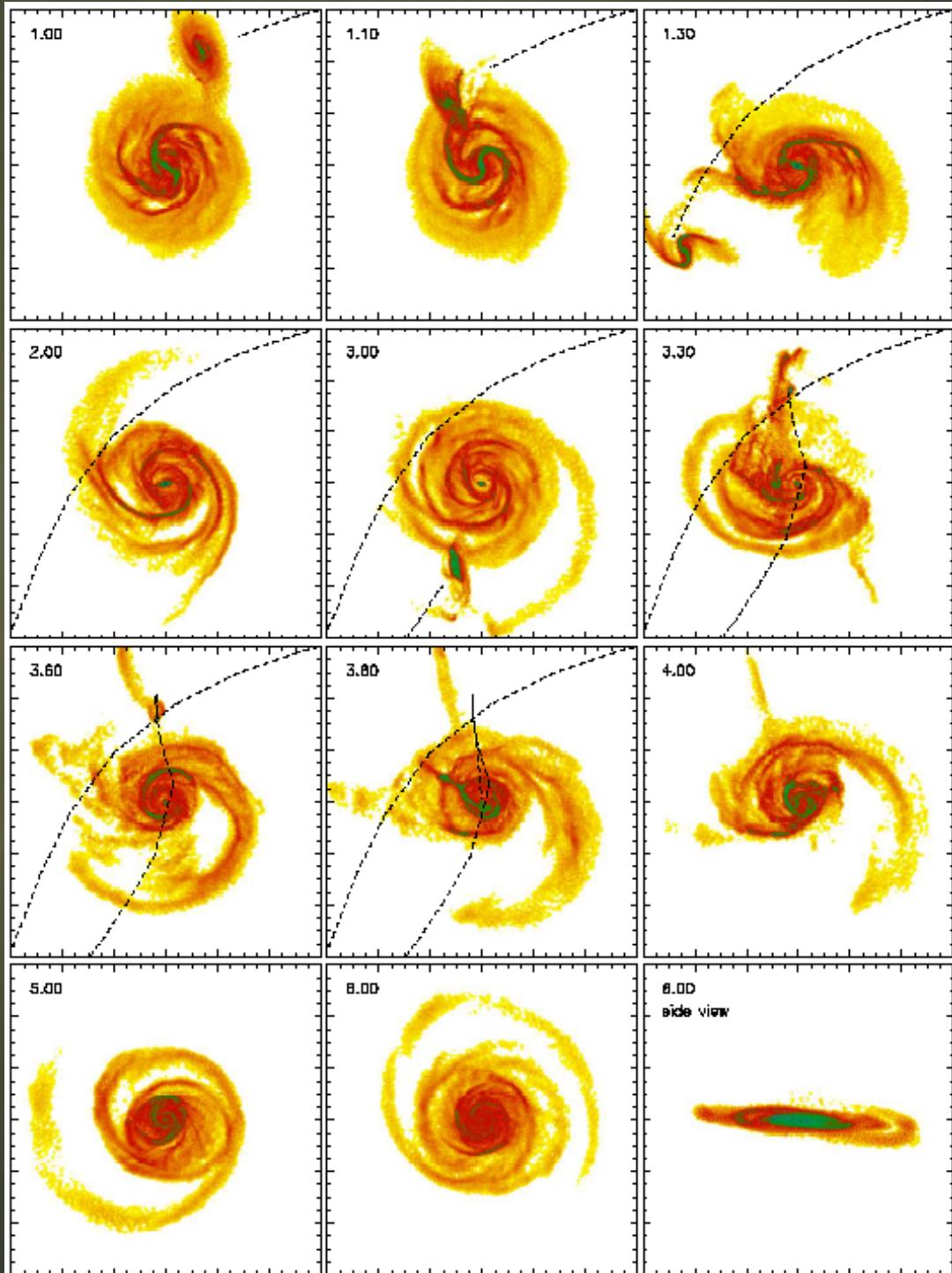
1 galaxia gigante y 1 galaxia satélite



- Tiende a engrosar el disco
- Contribuye al crecimiento del bulge.



La acreción de satélites puede producir un estallido SFR (Mihos & Hernquist 1994) y provocar una contra rotación en el disco.



## FUSIONES MENORES:

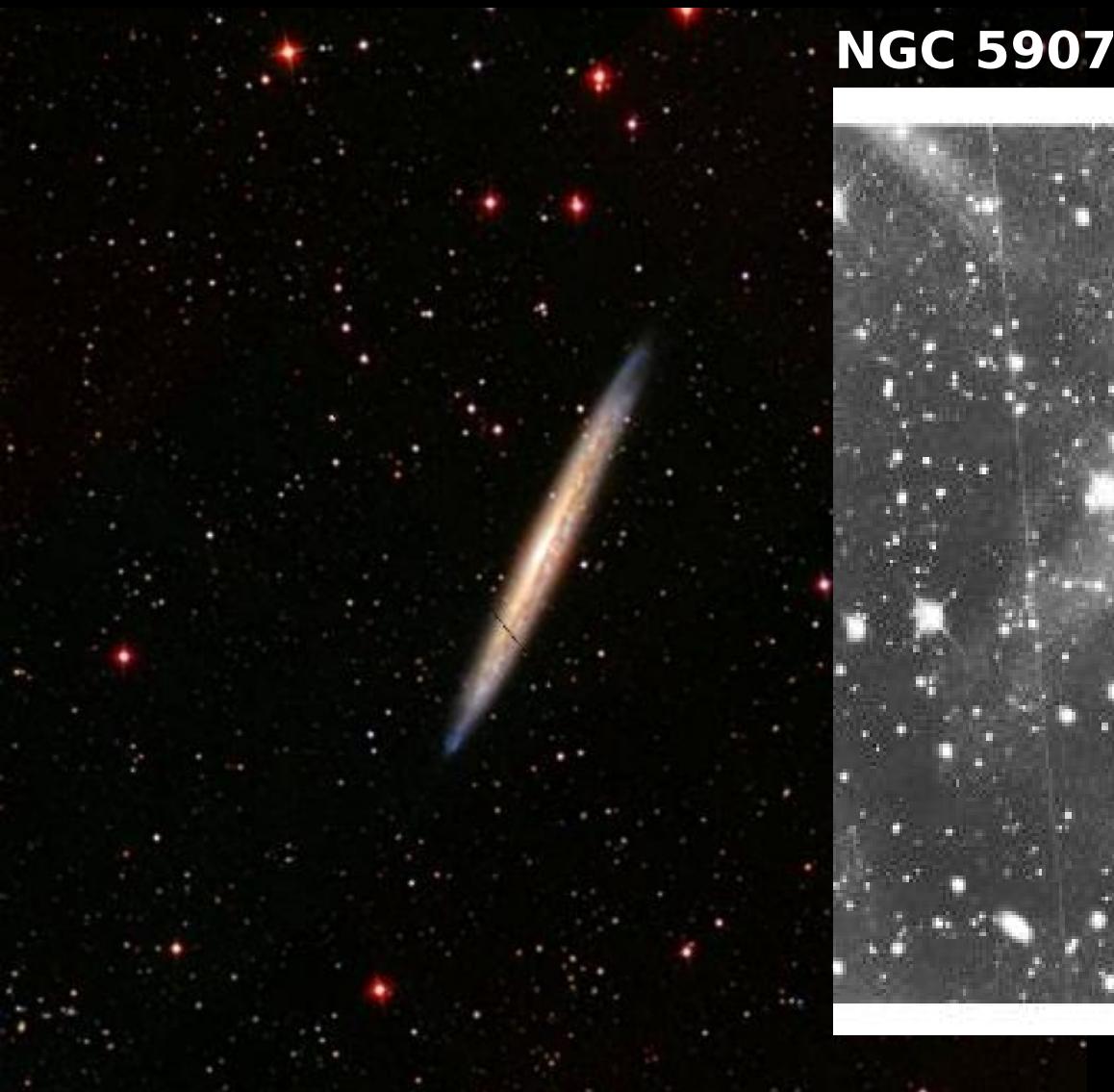
- Buscando *Tidal Streams*



NGC 5907

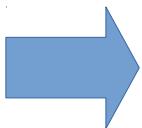
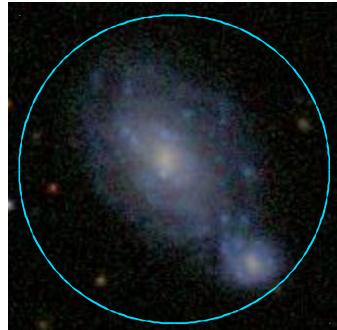
## FUSIONES MENORES:

- Buscando *Tidal Streams*

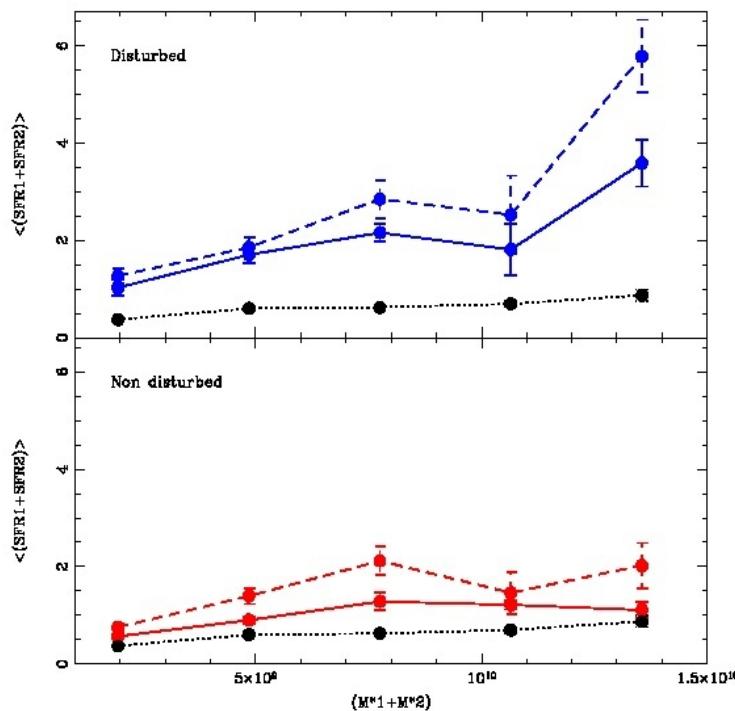


# Interacciones Mayores y Menores

eficiencia global de formación estelar

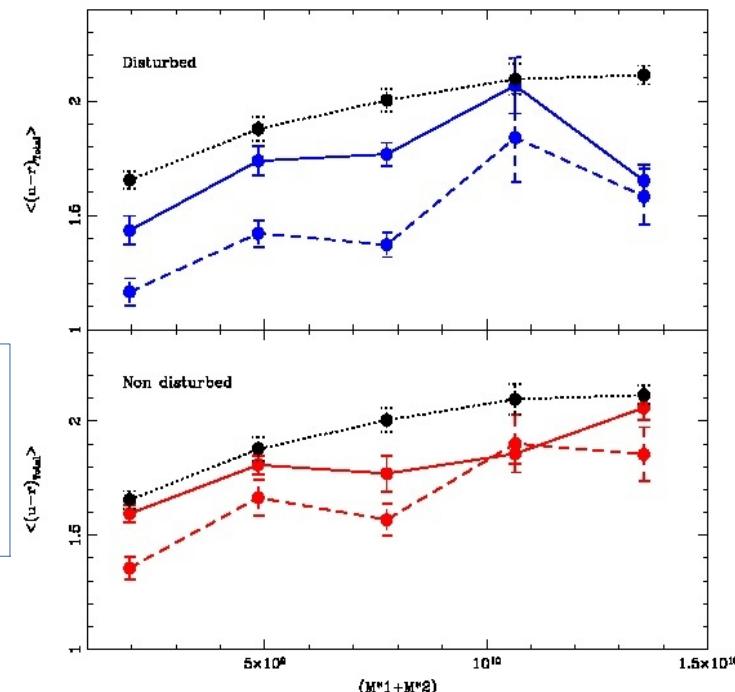


Pueden terminar como un solo objeto: analizamos el sistema par como un todo.



Interacciones mayores (—)  
Interacciones menores (—)  
Muestra Control (....)

Las interacciones mayores son más eficientes en la formación de nuevas estrellas. Es más significativo en pares D.



colores.

La eficiencia global de las diferentes clases de interacciones está asociada con el estallido de formación estelar, también reflejado en los colores.

# Interacciones tídicas: co- y contra-rotación



Sample	Classification	Number of pairs	Percentages
Spectroscopic	Co-rotating	171	65.4%
	Counter-rotating	85	34.3%
Total		256	100%
Spectro-photometric	Co-rotating	266	66.8%
	Counter-rotating	139	33.2%
Total		405	100%

- Los pares contra-rotantes tienen mayor tasa de formación estelar.
- Las galaxias que rotan en sentido contrario tienen colores más azules y una población estelar más joven respecto a las galaxias pares que tienen el mismo sentido de rotación.

El número de sistemas co-rotantes es  $\sim$  dos veces el número de pares contra-rotantes. Podría deberse a una evolución más rápida (contra-rotantes), además de posibles condiciones iniciales diferentes.

# Ambiente de Densidad Local

**¿Dónde esperamos encontrar mas frecuentemente fusiones e interacciones de galaxias ?**

**¿Cuál es el ambiente mas favorable?**

**1) Alta densidad: Cúmulos ricos, grupos compactos, galaxias pares.**



~ 1000 km/s  




~ 400 km/s  


**2) Baja velocidad relativa**

# Ambiente de Densidad Local

**¿Dónde esperamos encontrar mas frecuentemente fusiones e interacciones de galaxias ?**

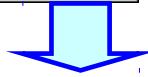
**¿Cuál es el ambiente mas favorable?**

**1) Alta densidad: Cúmulos ricos, grupos compactos, galaxias pares.**



~ 1000 km/s  




~ 400 km/s  


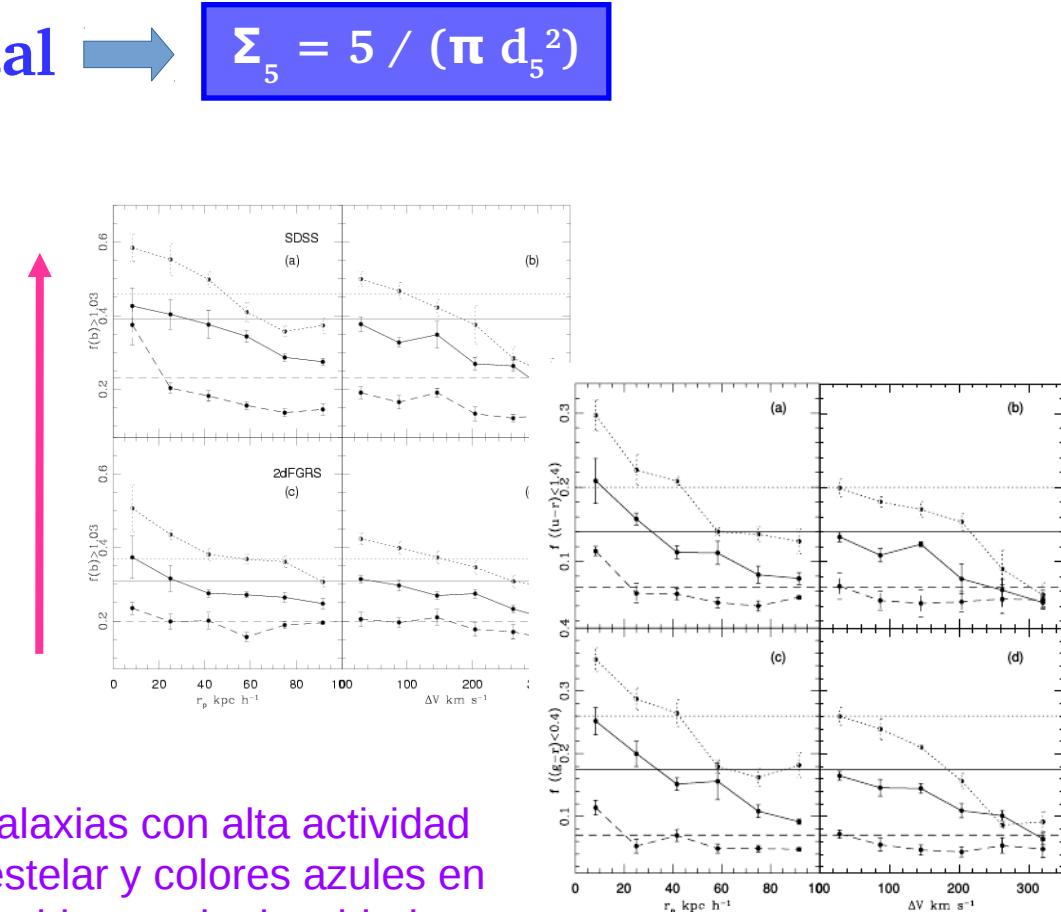
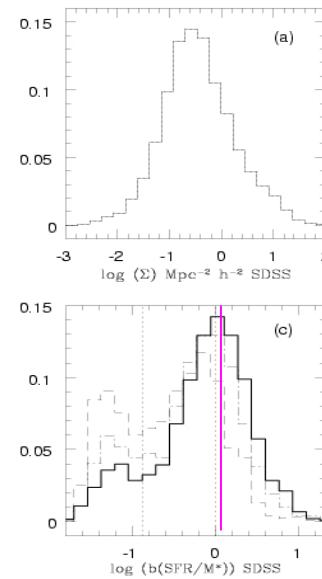
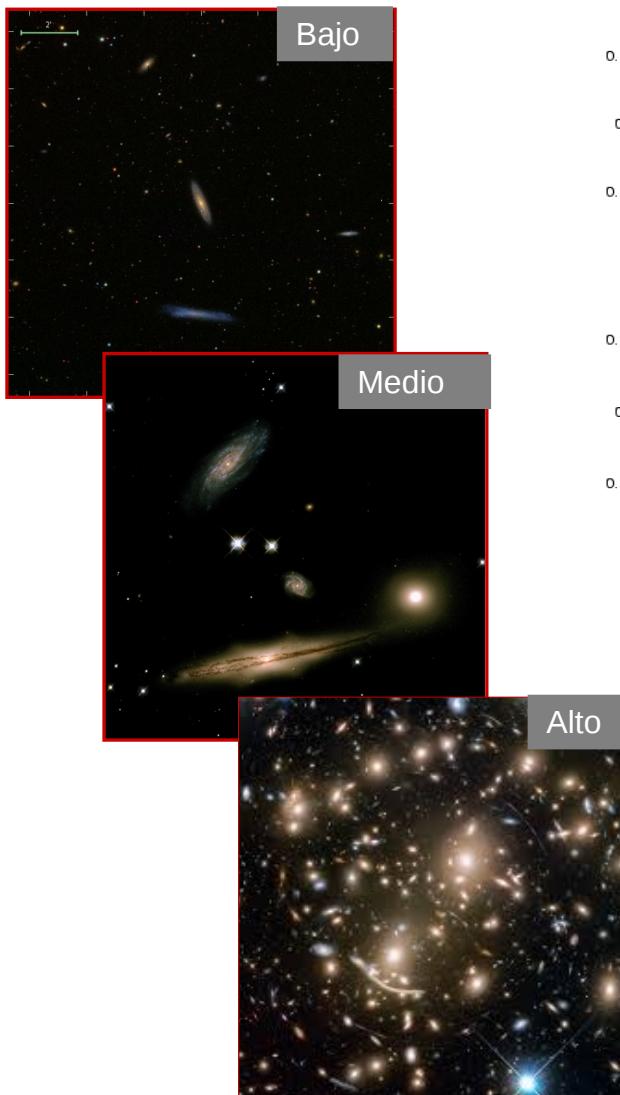
**2) Baja velocidad relativa**

# Ambiente de Densidad Local

efecto de las interacciones en diferentes ambientes

Parámetro de densidad local

$$\Sigma_5 = 5 / (\pi d_5^2)$$

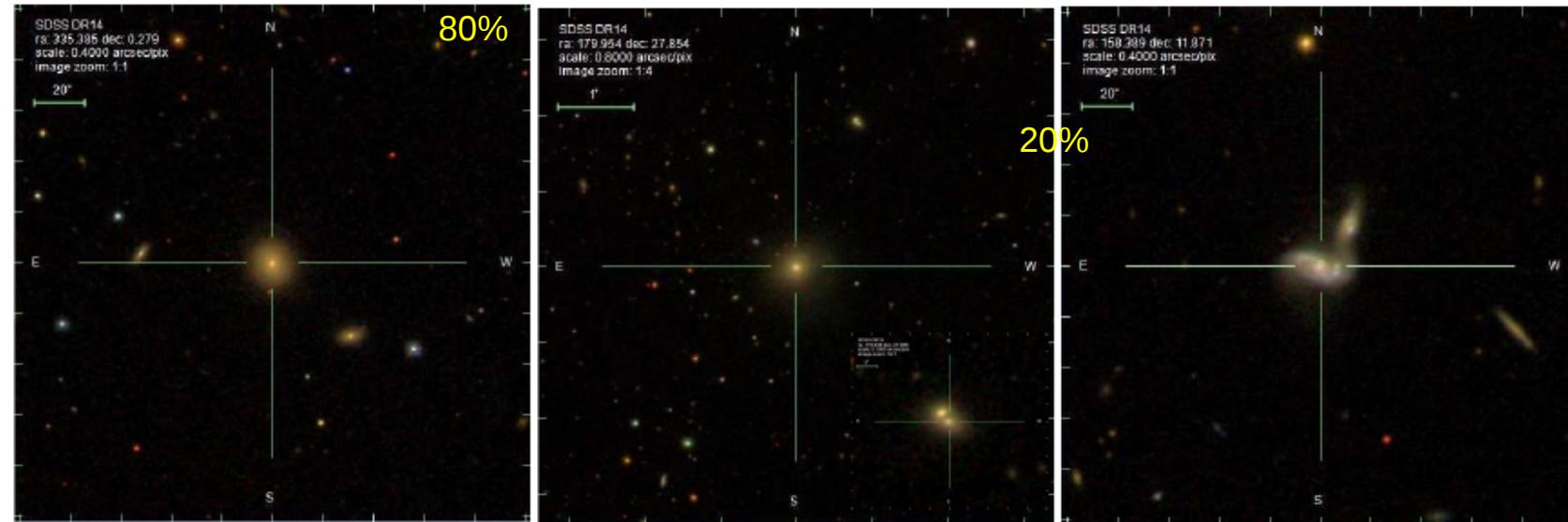


Fracción de galaxias con alta actividad de formación estelar y colores azules en diferentes ambientes de densidad.

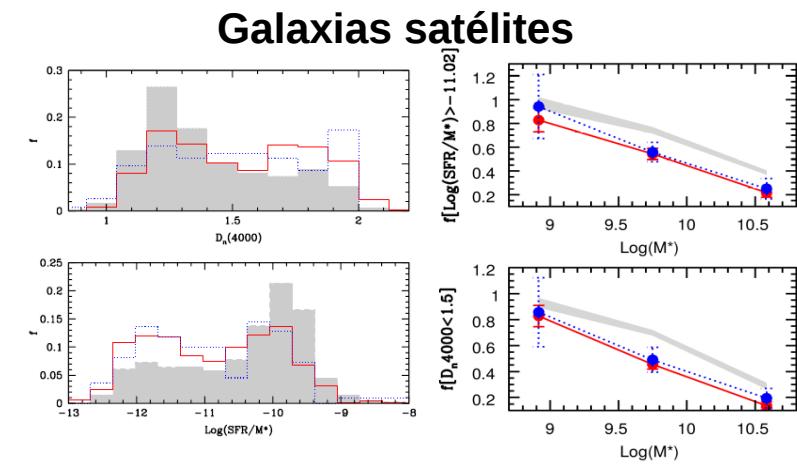
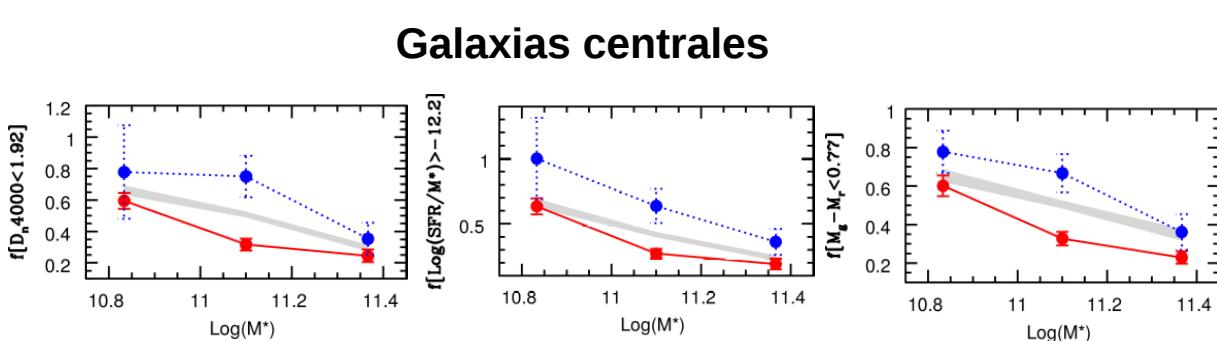
En diferentes ambientes de densidad local, las interacciones juegan un rol fundamental en modificar las propiedades de las galaxias.

# Galaxias satélites

## influencia de las interacciones



**Sistemas:**  
objeto central y dos satélites ( $r_p < 150$  kpc) y  $\Delta V < 500$  km/s), restringiendo a objetos de al menos 1.5 magnitudes más débiles que su galaxia central.



Las interacciones entre galaxias centrales y satélites tienen un efecto de envejecimiento en las satélites. Esto sugeriría que las satélites actúan como donantes de gas hacia la galaxia central, en la que si se observan signos de formación estelar cuando hay interacciones presentes.

# Galaxias satélites

## influencia de las interacciones

Banda R

Banda H $\alpha$

NGC 2718a

NGC 2718b

$rp = 25 \text{ kpc}$  y  $\Delta V = 89 \text{ km/s}$

NGC 2718b

NGC 2718a

NGC 4541b  
NGC 4541e

NGC 4541a

NGC 4541e

NGC 4541a

$rp = 20 \text{ kpc}$  y  $\Delta V = 54 \text{ km/s}$

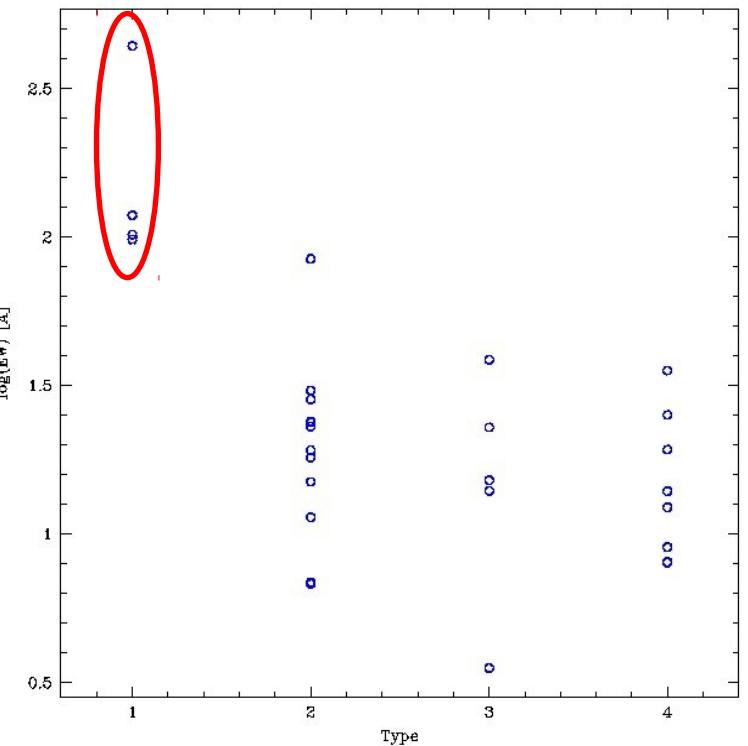
NGC 5965a1

NGC 5965a2

NGC 5965a2

NGC 5965a1

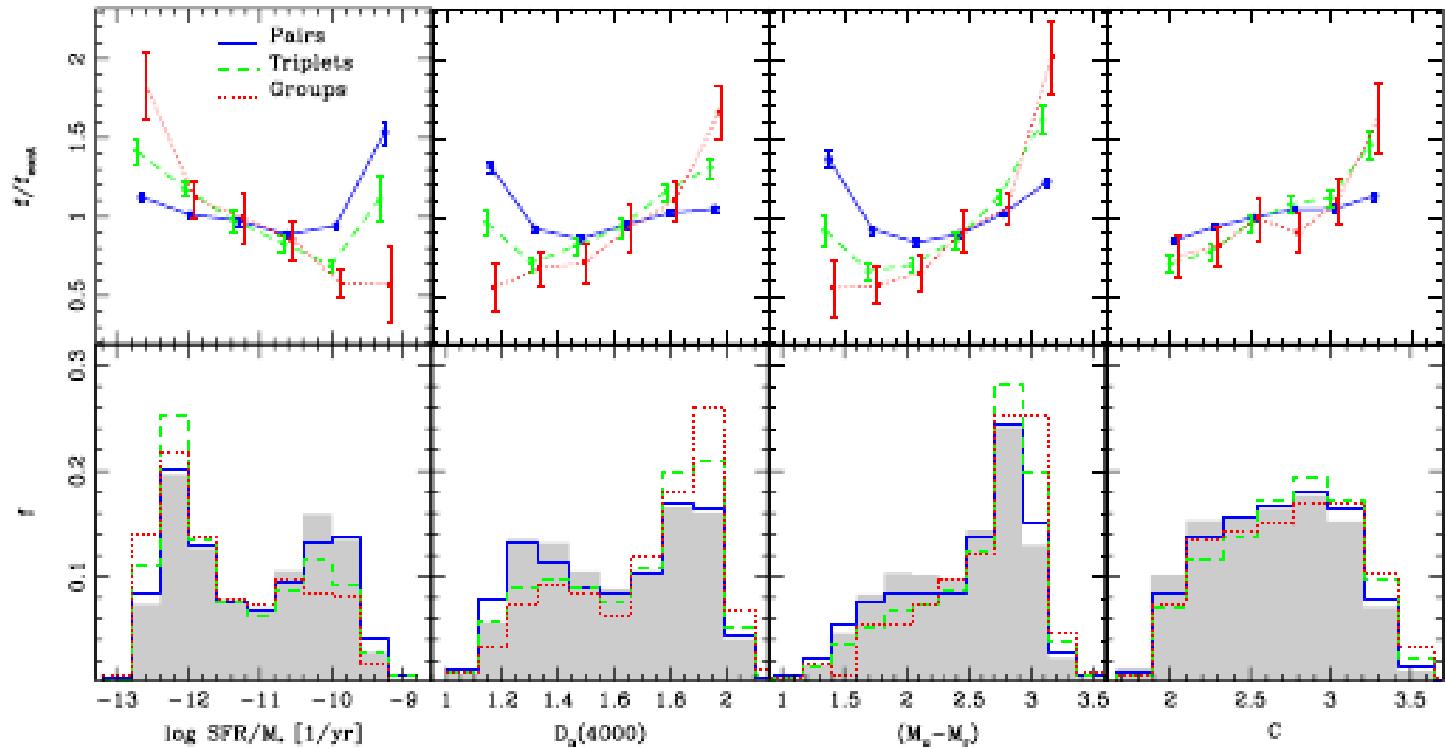
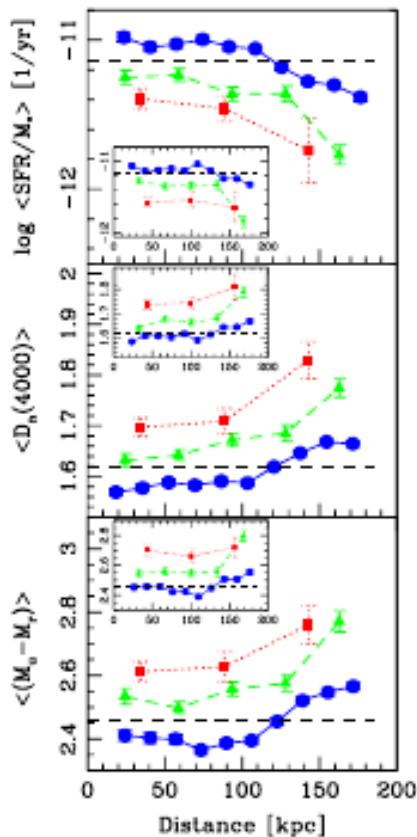
$rp = 2 \text{ kpc}$  y  $\Delta V = 72 \text{ km/s}$



# Naturaleza de los sistemas menores: el rol de las interacciones

Selección homogénea  
de sistemas menores  
( $r_p < 200\text{kpc}$  y  $\Delta V < 500\text{km/s}$ ):

- Pares
- Tripletes
- Grupos



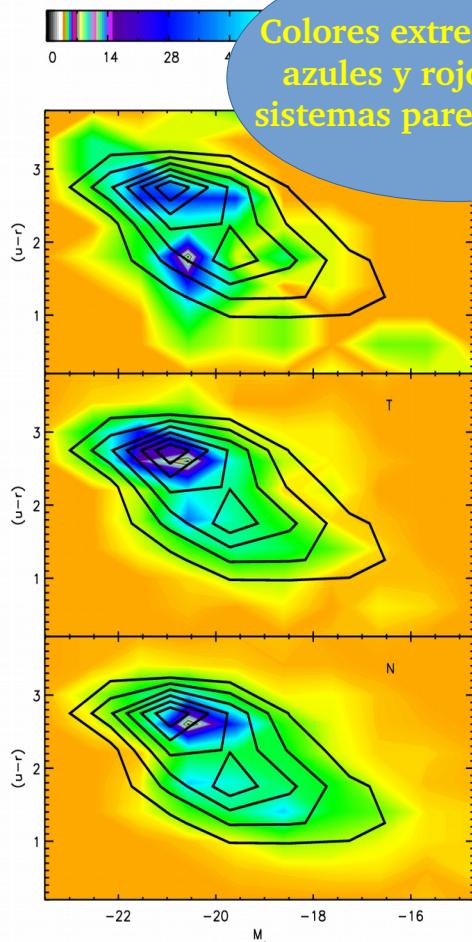
A medida que aumenta el número de miembros del sistema las galaxias se vuelven menos formadoras de estrellas, con poblaciones estelares más antiguas y rojas.

Este escenario indica que los **grupos de galaxias tienen una mayor probabilidad de interacciones repetidas** que los tripletes y pares, produciendo que los mecanismos de supresión de la formación de estrellas actúen de manera más eficiente.

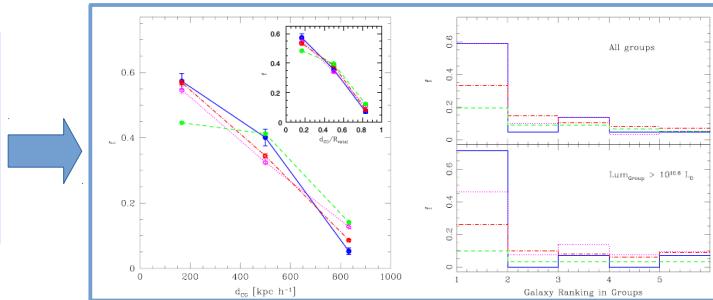
# Ambiente de Alta Densidad

## galaxias pares en grupos y cúmulos

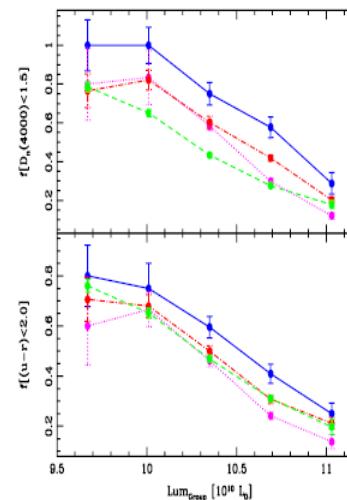
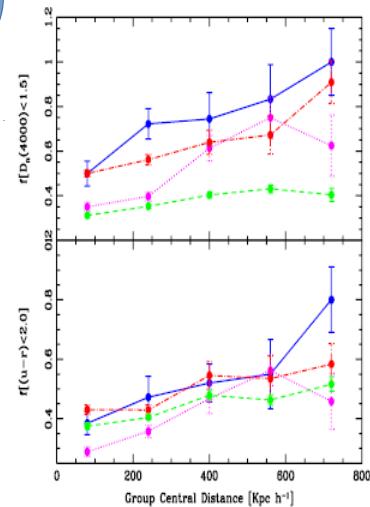
Identificamos sistemas pares que residen en grupos y cúmulos mediante la correlación entre el catálogo total de pares de galaxias con el catálogo de grupos de Zapata et al. (2009).



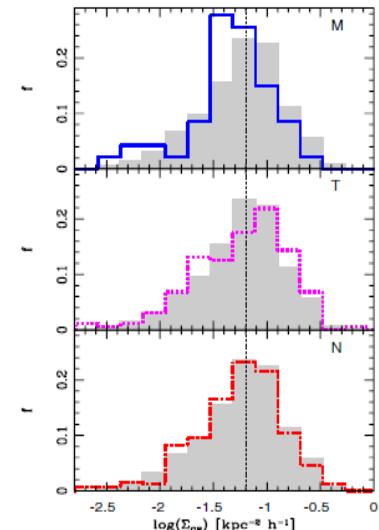
Colores extremadamente azules y rojos para los sistemas pares en fusión.



Las galaxias pares están más concentradas hacia los centros de los grupos.  
En general, las galaxias en pares D son las más brillantes del grupo.



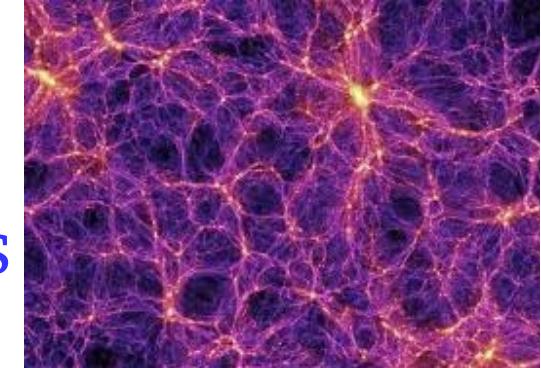
ENTORNO DE DENSIDAD GLOBAL



La fracción de colores azules y población estelar joven disminuye hacia el centro del grupo y hacia los cúmulos más luminosos.

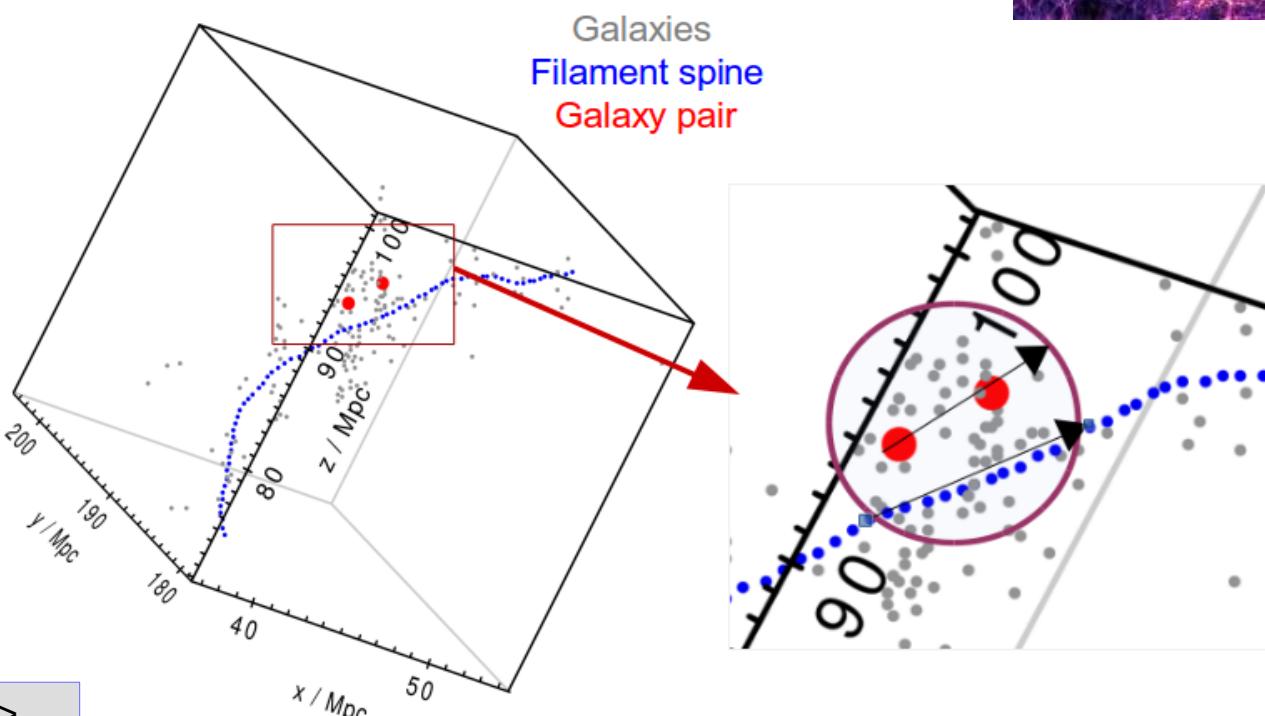
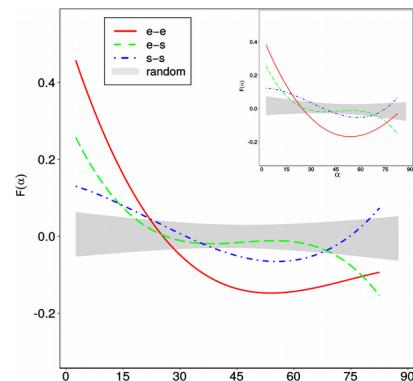
En entornos de alta densidad, las interacciones fuertes tienen un importante efecto sobre las propiedades de las galaxias.

# Ambiente Global



## orientación de galaxias pares con estructuras filamentarias

Alineación entre el eje que conecta el par de galaxias y el filamento cósmico anfitrión.

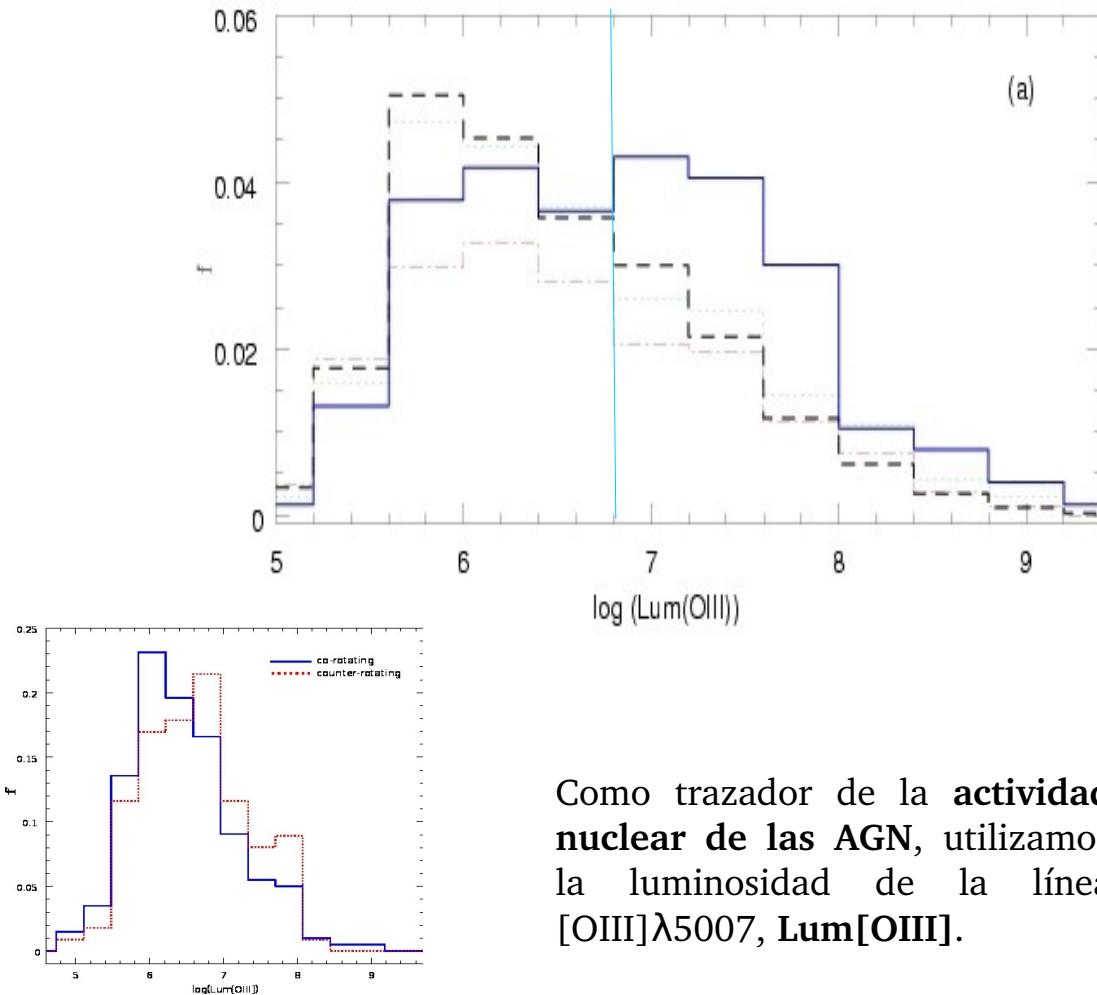


- Se observa una clara alineación entre los ejes del par y la columna de los filamentos.
  - Los pares compuestos por galaxias elípticas exhiben una alineación más fuerte, mostrando una mayor señal de alineación en pares más cercanos a 200 kpc de la columna del filamento.
- Estos hallazgos muestran que las estructuras a gran escala juegan un papel fundamental en la dirección de acreción galáctica, reflejada en sistemas pares que exhiben una alineación preferencial a lo largo de la dirección del filamento.

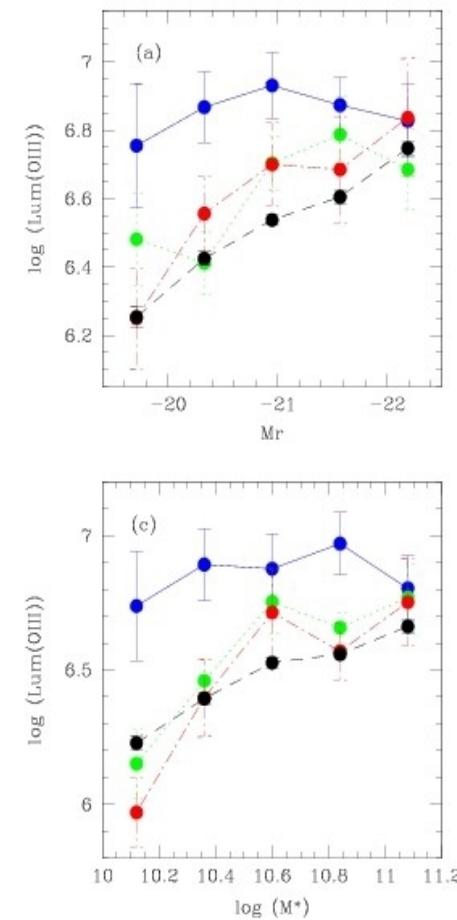
Pares en Vacíos Cósmicos → en progreso

# Galaxias de Núcleos Activos (AGN)

efecto de las interacciones en la actividad nuclear



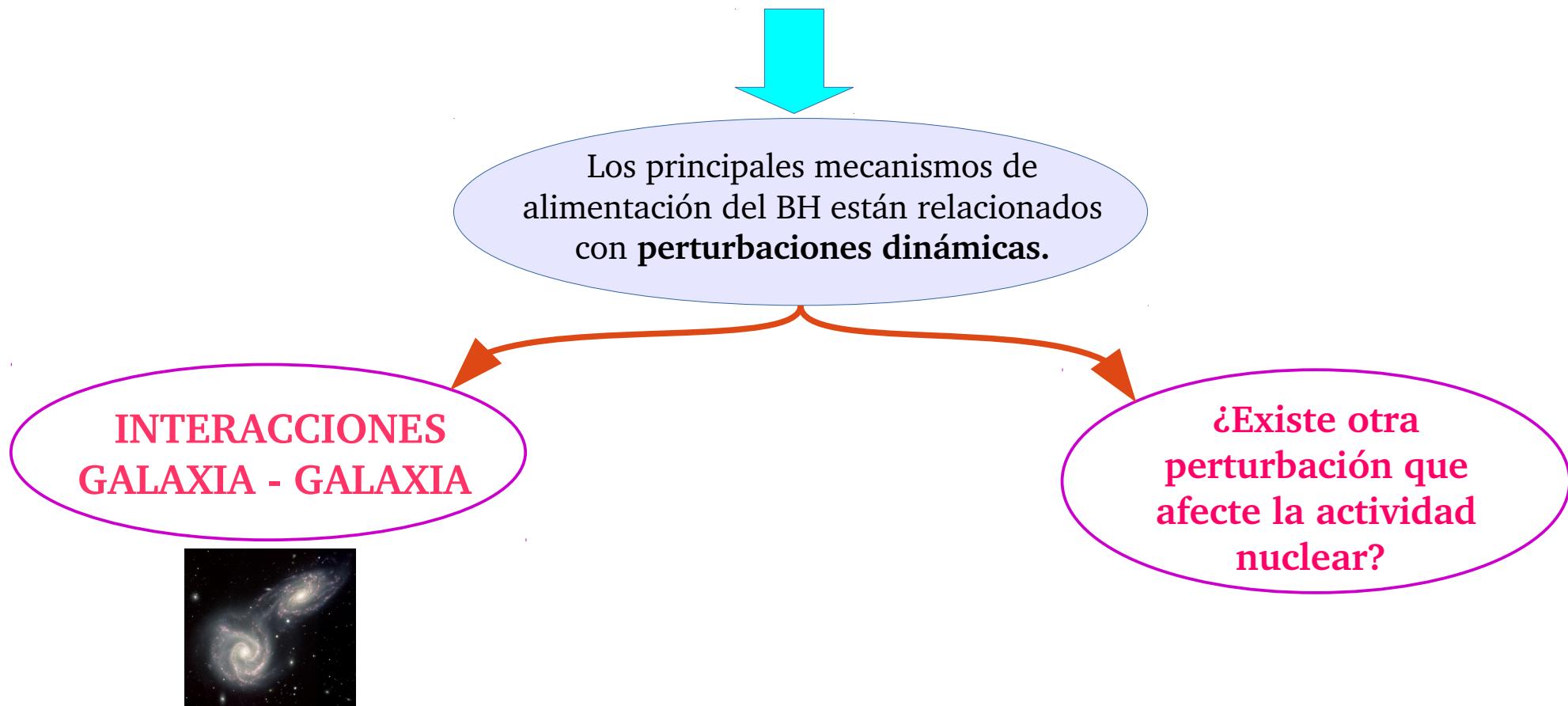
Como trazador de la **actividad nuclear de las AGN**, utilizamos la luminosidad de la línea [OIII] $\lambda 5007$ , Lum[OIII].



Lum[OIII] aumenta fuertemente en AGN en interacción con galaxias compañeras cercanas

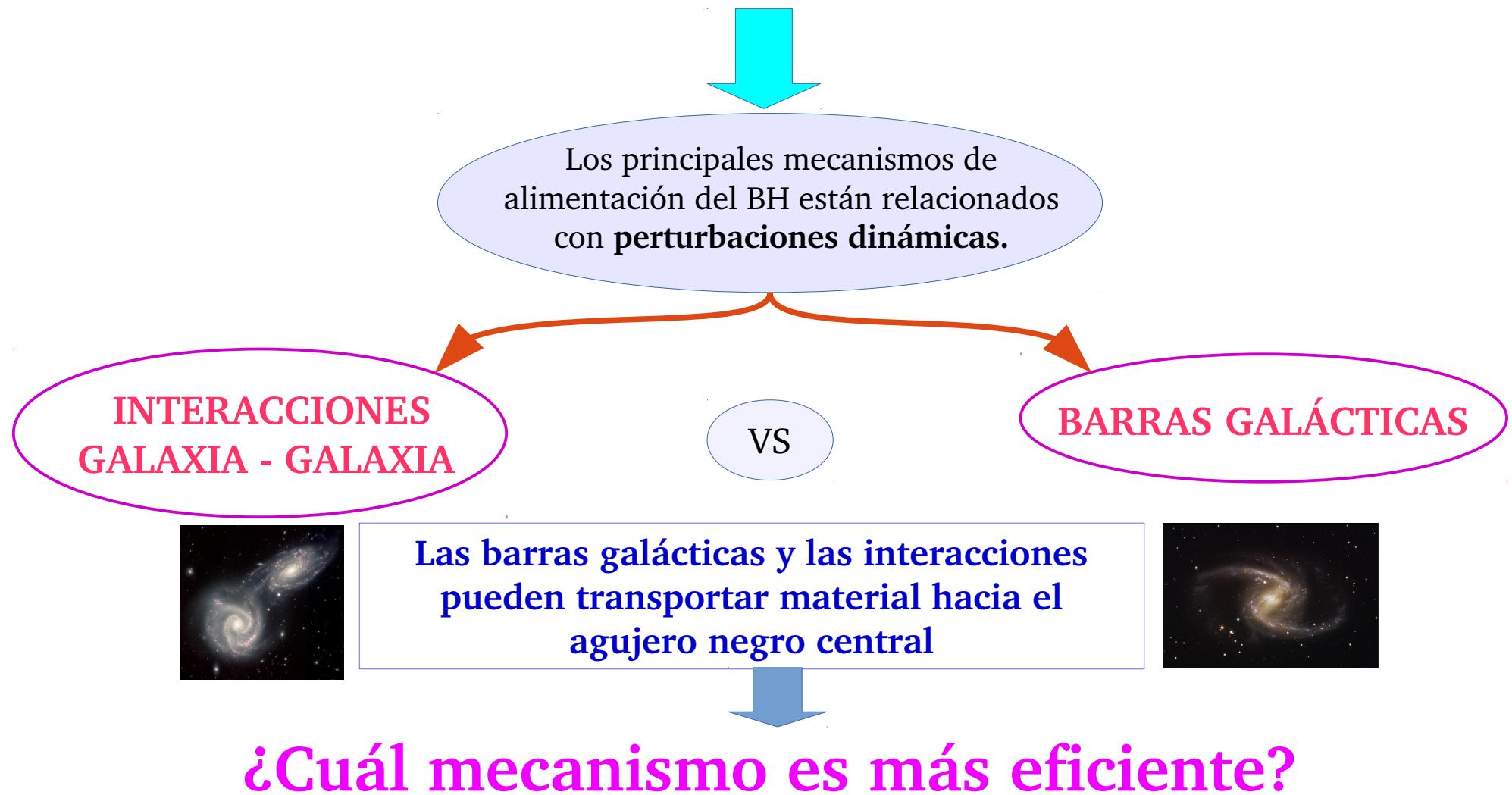
# Galaxias de Núcleos Activos (AGN)

La hipótesis más aceptada sobre el origen de las AGN propone que surgen a partir de la acumulación de material en el agujero negro central supermasivo (BH), lo que desencadena la actividad nuclear.



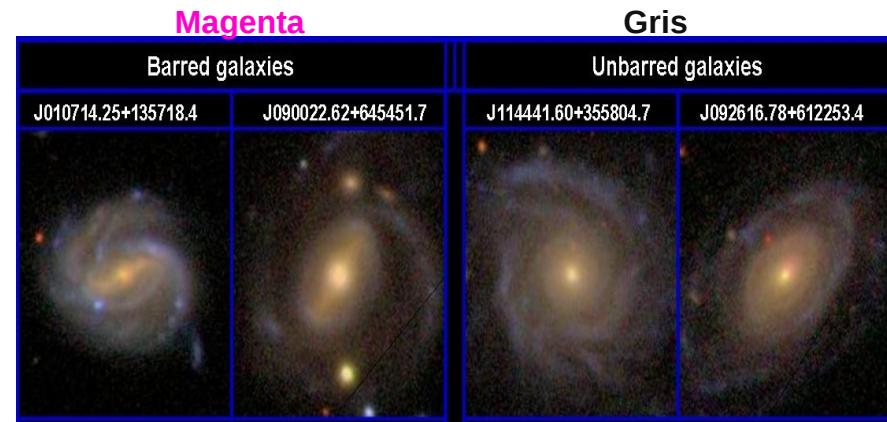
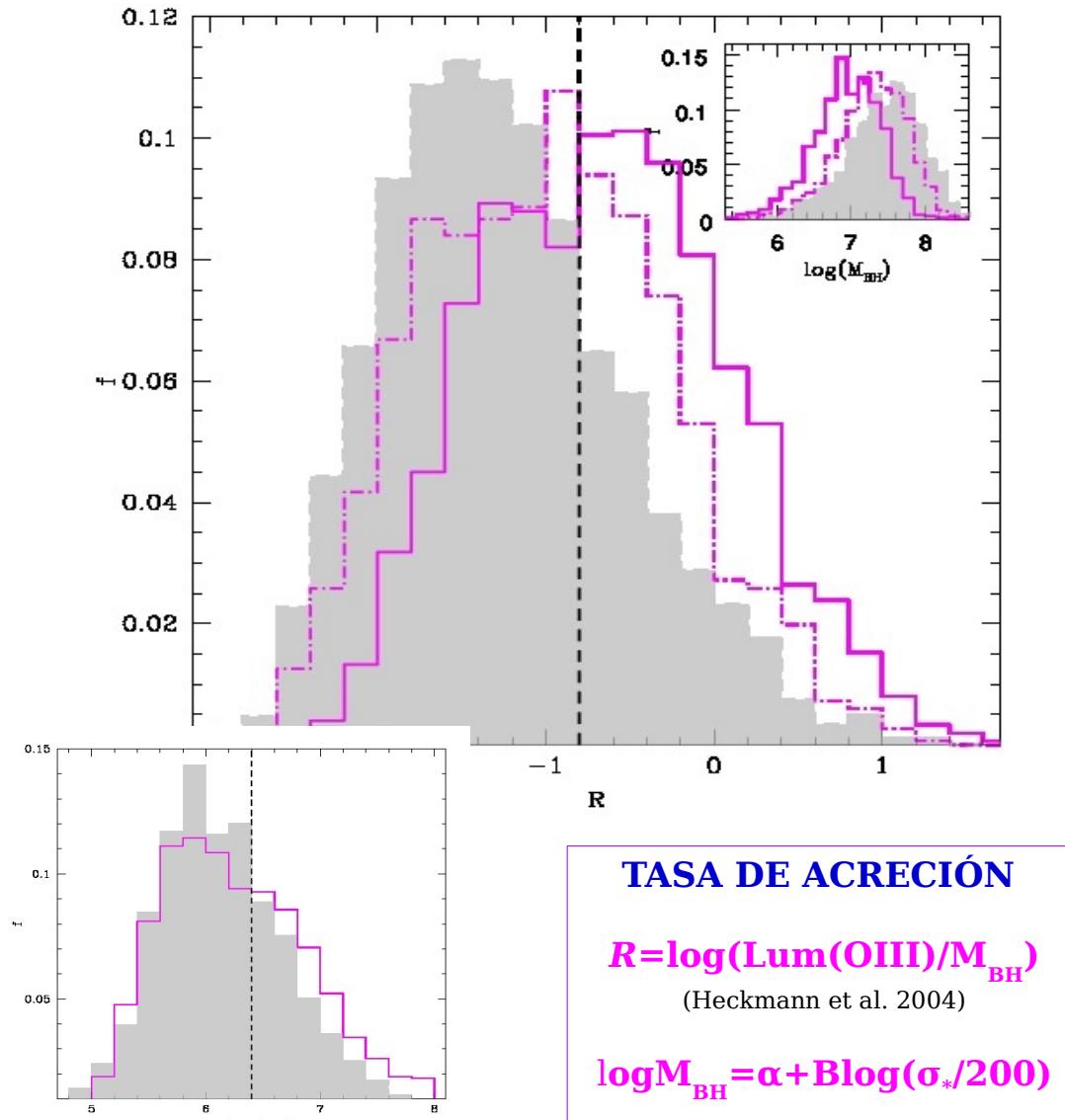
# Galaxias de Núcleos Activos (AGN)

La hipótesis más aceptada sobre el origen de las AGN propone que surgen a partir de la acumulación de material en el agujero negro central supermasivo (BH), lo que desencadena la actividad nuclear.



# Galaxias de Núcleos Activos (AGN)

## efecto de las barras en la actividad nuclear



Las AGN con barras muestran un exceso de objetos con altos valores de Lum[OIII] y R respecto a las galaxias AGN no barradas, lo que implica que las barras son un eficiente mecanismo para transportar material hacia el agujero negro central.

# Muestras

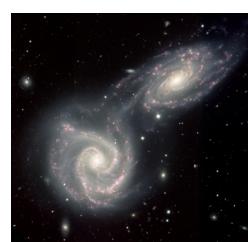
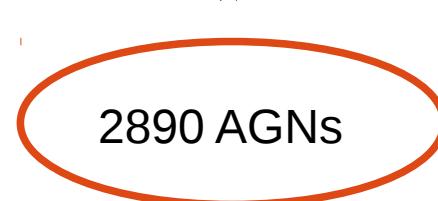
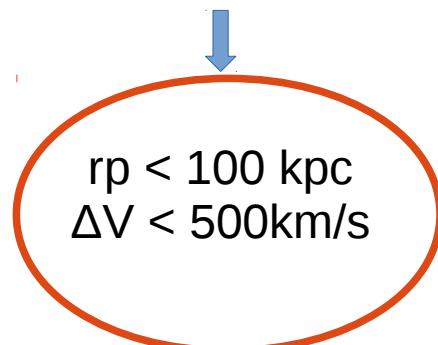
Este trabajo se basa en datos fotométricos y espectroscópicos seleccionados a partir de SDSS.

AGN SDSS → Diagramas **BPT** (Coldwell et al. 2014)

S, z < 0.1, b/a<0.4, mg<16.5

## AGN EN PARES

(Lambas et al. 2012, Mesa et al. 2014)



## AGN CON BARRAS

(Alonso et al. 2013, 2014)



## MUESTRA CONTROL

(Pérez et al. 2009)

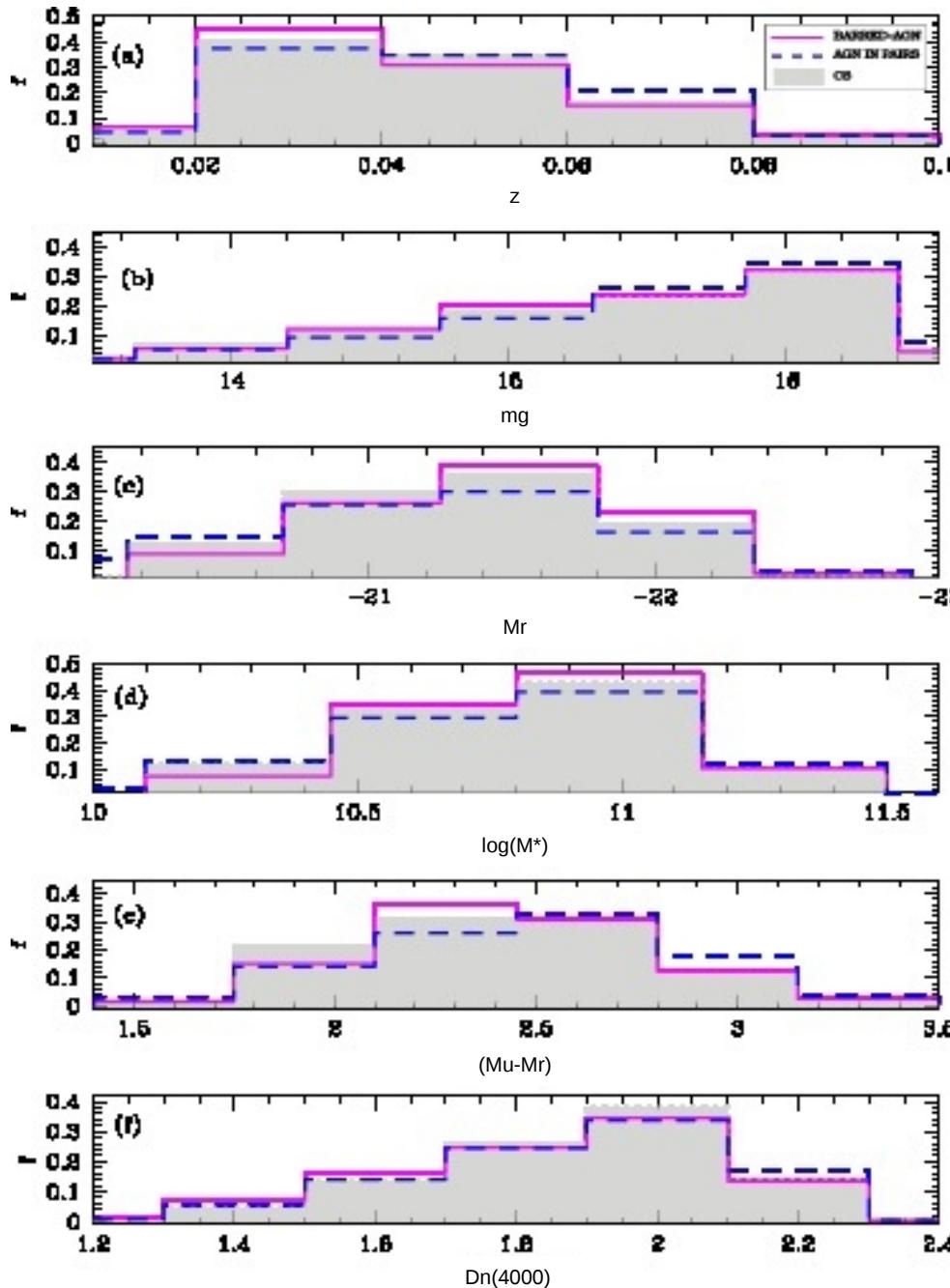


## Criterio de aislamiento

Sin galaxias vecinas en una región:

$rp < 500 \text{ kpc/h}$   
 $\Delta V < 1000 \text{ km/s}$

# Muestras



Similares distribuciones:

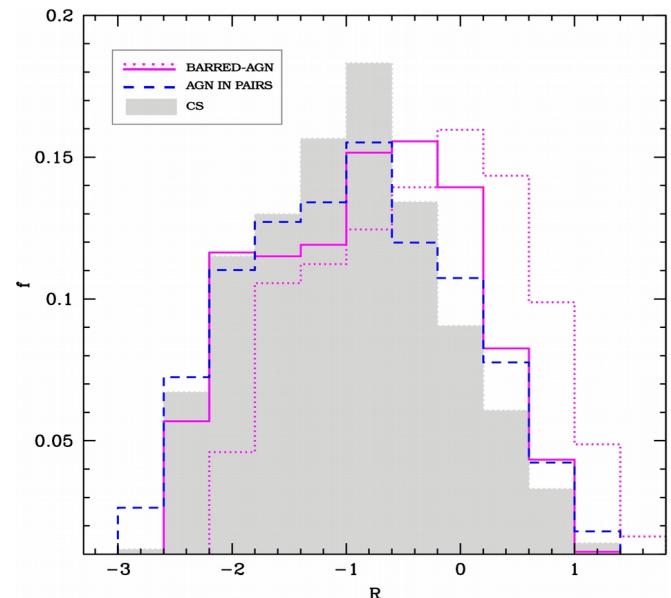
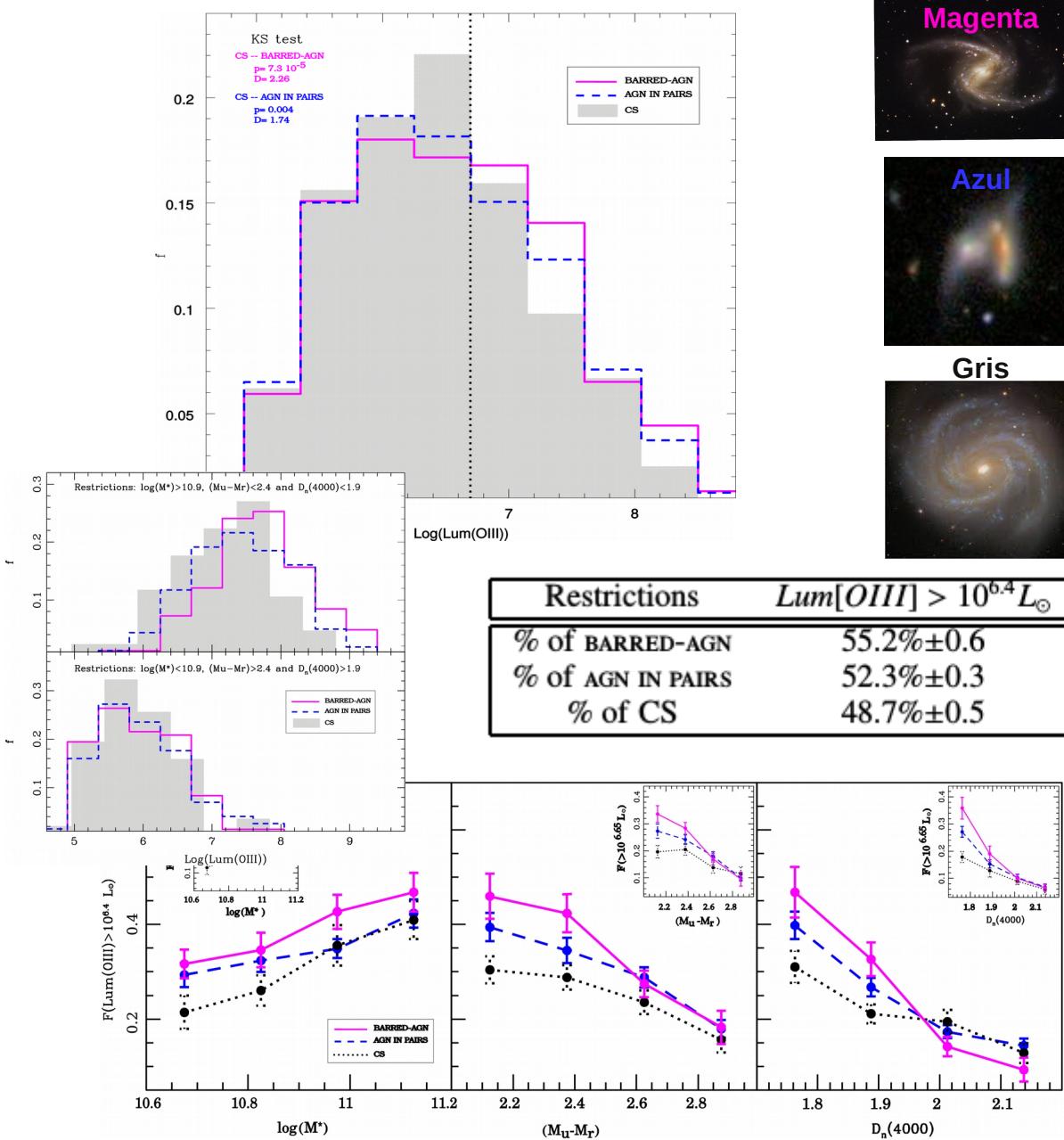
$z$   
 $mg$   
 $Mr$   
 $\log(M^*)$   
 $(Mu-Mr)$   
 $Dn(4000)$



Para realizar una adecuada comparación entre los efectos de las barras y de las fusiones/interacciones respecto al transporte de material hacia la región central de las galaxias activas, seleccionamos espirales AGN con propiedades similares en las tres muestras.

# Galaxias de Núcleos Activos (AGN)

## barras versus interacciones



Restrictions	$\text{Lum}[OIII] > 10^{6.4} L_\odot$	$\text{Lum}[OIII] > 10^{7.0} L_\odot$	$\mathcal{R} > -0.6$
% of BARRED-AGN	$55.2\% \pm 0.6$	$34.3\% \pm 1.1$	$43.3\% \pm 0.7$
% of AGN IN PAIRS	$52.3\% \pm 0.3$	$29.5\% \pm 0.7$	$37.2\% \pm 0.5$
% of CS	$48.7\% \pm 0.5$	$24.3\% \pm 0.8$	$33.5\% \pm 0.6$

- Las galaxias con barras exhiben valores más altos de  $\text{Lum}[OIII]$  y  $R$ , implicando que las AGN con barras presentan actividad nuclear y tasa de acreción más eficientes, respecto a las otras muestras.

Las AGN con anfitriones masivos, poblaciones azules y jóvenes muestran un notable exceso de eficiente actividad nuclear respecto a AGN de baja masa estelar, colores rojos y poblaciones estelares más antiguas.

# ¿Cuál mecanismo es más eficiente?

INTERACCIONES  
GALAXIA-GALAXIA



VS

BARRAS



## LAS BARRAS SON MAS EFICIENTES !!!

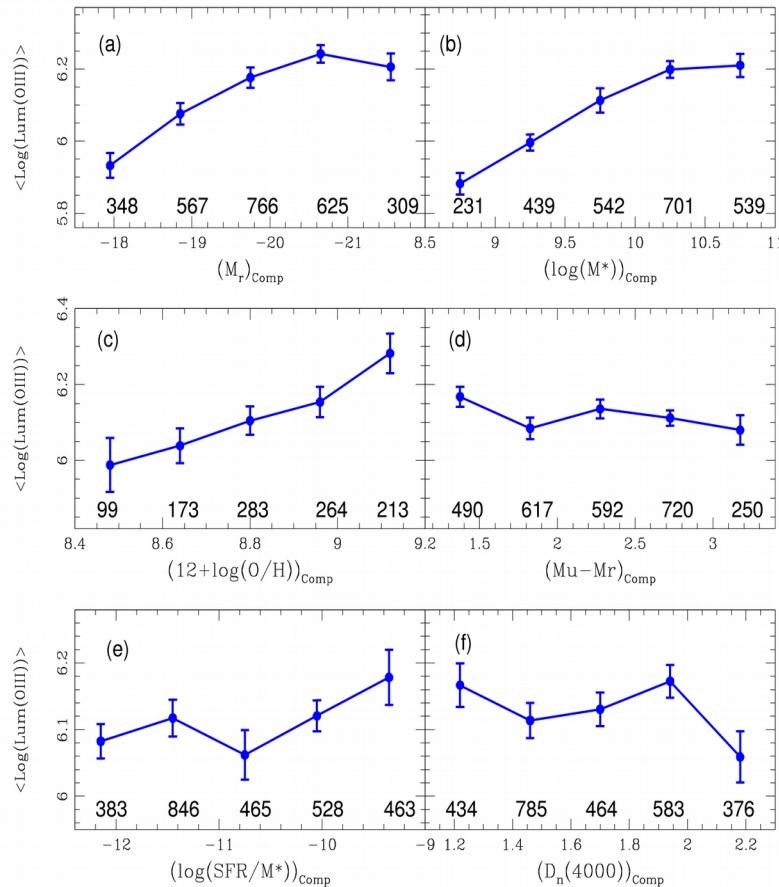
Las barras e interacciones ayudan al transporte de gas hacia los agujeros negros centrales.

El hecho de que las AGN en galaxias con barras exhiban un exceso de R y Lum[OIII] respecto a las AGN en sistemas pares muestra que las **perturbaciones de barras** pueden ser un mecanismo más eficiente para transportar material hacia las regiones centrales internas respecto a las inestabilidades radiales inducidas por **interacciones de galaxias**.

# Galaxias de Núcleos Activos (AGN)

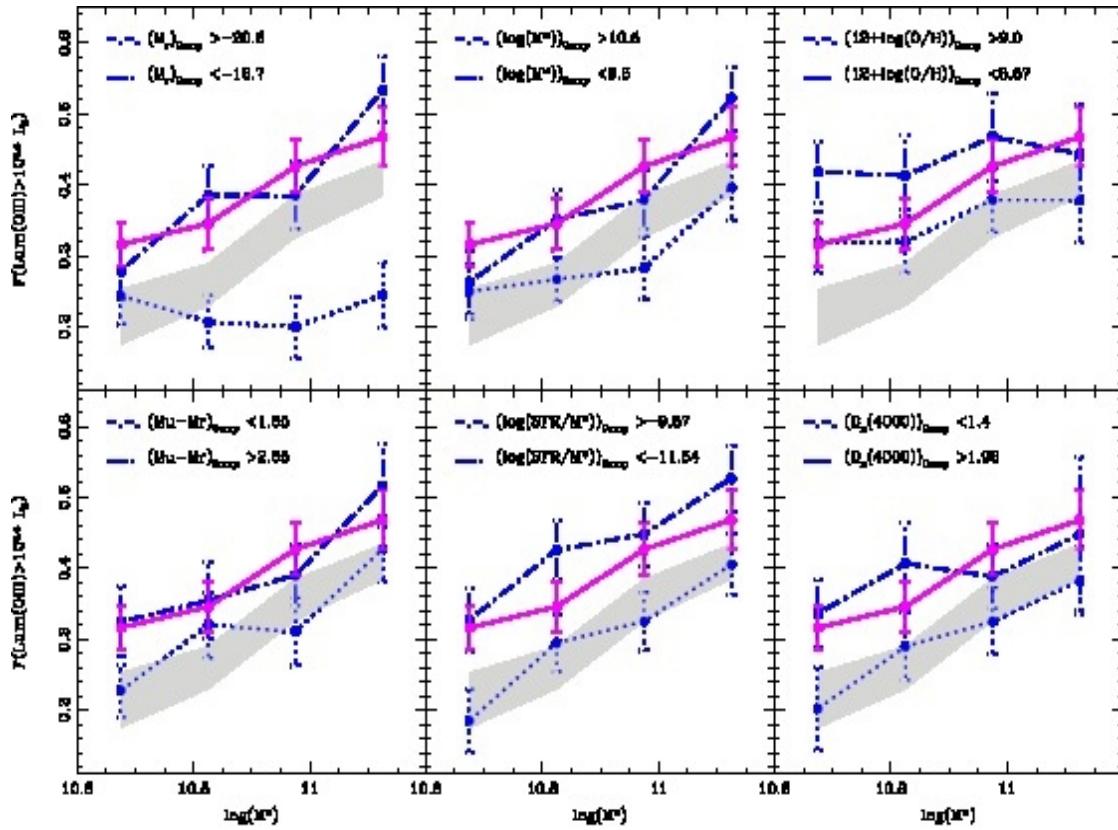
¿Las interacciones podrían tener el mismo efecto que las barras?

Hemos investigado el rol que desempeña la galaxia compañera sobre la actividad nuclear



Para las AGN en sistemas pares, la actividad nuclear depende notablemente de las propiedades de la galaxia compañera.

En un sistema par, la Lum[OIII] de una AGN presenta un notable incremento cuando la **galaxia compañera es más brillante y masiva, con mayor metalicidad, colores más azules, eficiente actividad de formación de estrellas y población estelar joven**.



AGN en sistemas pares con alta Lum[OIII]  
en función de  $\log(M^*)$ , considerando  
galaxias compañeras con diferentes  
propiedades.

Restrictions	$L[OIII] > 10^{6.4} L_\odot$	$L[OIII] > 10^{7.0} L_\odot$
$Q_1: (M_r)_{Comp} < -20.5$	$58.4\% \pm 1.1$	$34.8\% \pm 2.2$
$Q_4: (M_r)_{Comp} > -18.7$	$42.7\% \pm 0.9$	$20.4\% \pm 1.9$
$Q_1: (\log(O/H))_{Comp} < 9.5$	$47.5\% \pm 1.0$	$25.3\% \pm 1.6$
$Q_4: (\log(O/H))_{Comp} > 10.5$	$55.8\% \pm 1.2$	$33.5\% \pm 1.7$
$Q_1: (12+\log(O/H))_{Comp} < 8.67$	$51.0\% \pm 1.2$	$28.4\% \pm 2.6$
$Q_4: (12+\log(O/H))_{Comp} > 9.0$	$62.2\% \pm 1.3$	$38.7\% \pm 2.5$
$Q_1: ((M_u - M_r))_{Comp} < 1.65$	$55.9\% \pm 0.8$	$32.7\% \pm 2.7$
$Q_4: ((M_u - M_r))_{Comp} > 2.65$	$49.5\% \pm 0.9$	$27.9\% \pm 2.5$
$Q_1: (\log(SFR/M^*))_{Comp} < -11.54$	$50.7\% \pm 1.4$	$27.8\% \pm 2.4$
$Q_4: (\log(SFR/M^*))_{Comp} > -9.87$	$58.6\% \pm 1.2$	$35.2\% \pm 2.4$
$Q_1: (D_n(4000))_{Comp} < 1.4$	$54.5\% \pm 1.0$	$34.5\% \pm 1.8$
$Q_4: (D_n(4000))_{Comp} > 1.96$	$51.0\% \pm 0.9$	$28.1\% \pm 2.1$

Q1 y Q4 corresponden al primero y al cuarto quartil de las distribuciones de las propiedades de las galaxias compañeras.

## BARRAS E INTERACCIONES TIENEN SIMILAR EFICIENCIA !!!



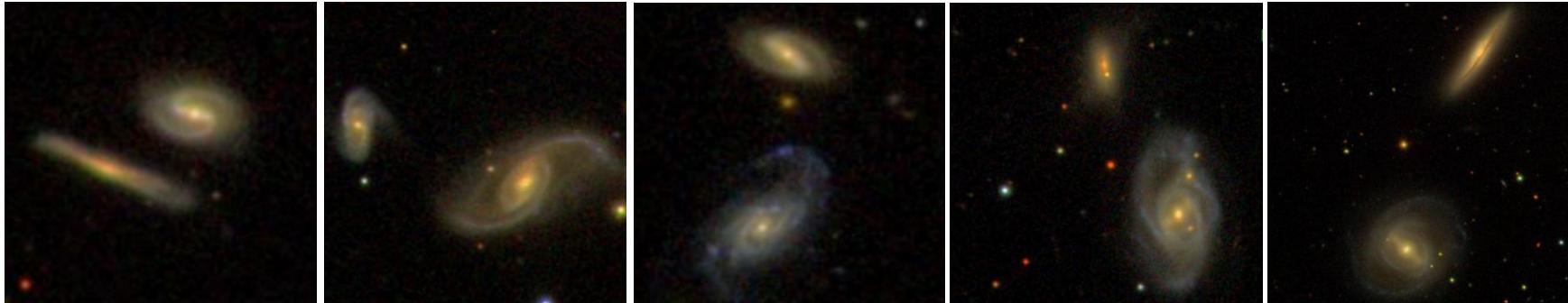
La eficiencia de las fusiones e interacciones en el transporte de material hacia las regiones internas de las galaxias también está fuertemente influenciada por las propiedades de la galaxia compañera.

Cuando la galaxia compañera tiende a ser masiva, luminosa y con alto contenido de gas, el efecto que producen las interacciones sobre la actividad nuclear, tiende a ser tan eficiente como el inducido por las barras galácticas.

Ambos mecanismos juntos (galaxias AGN con barras en sistemas pares) ???

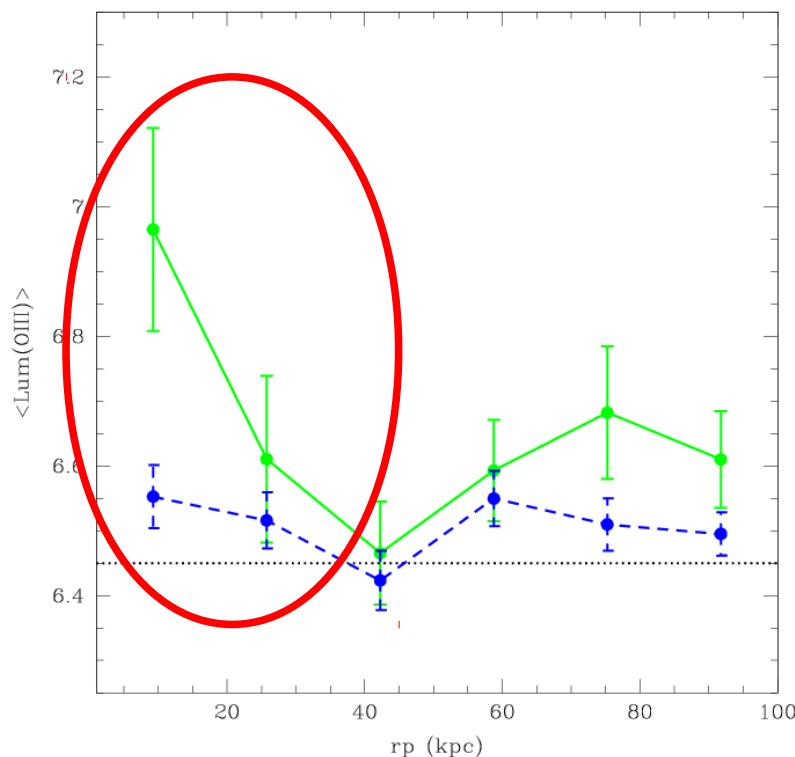
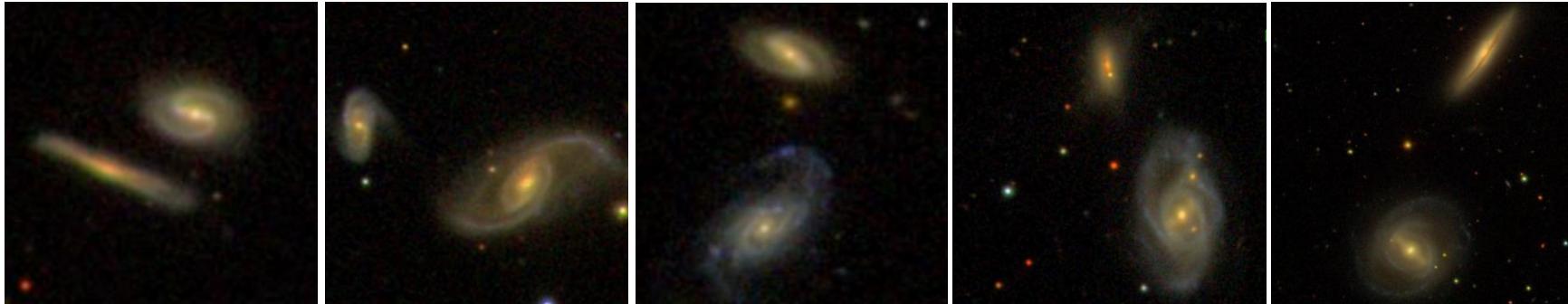
# Ambos mecanismos juntos:

galaxias AGN con barras en sistemas pares



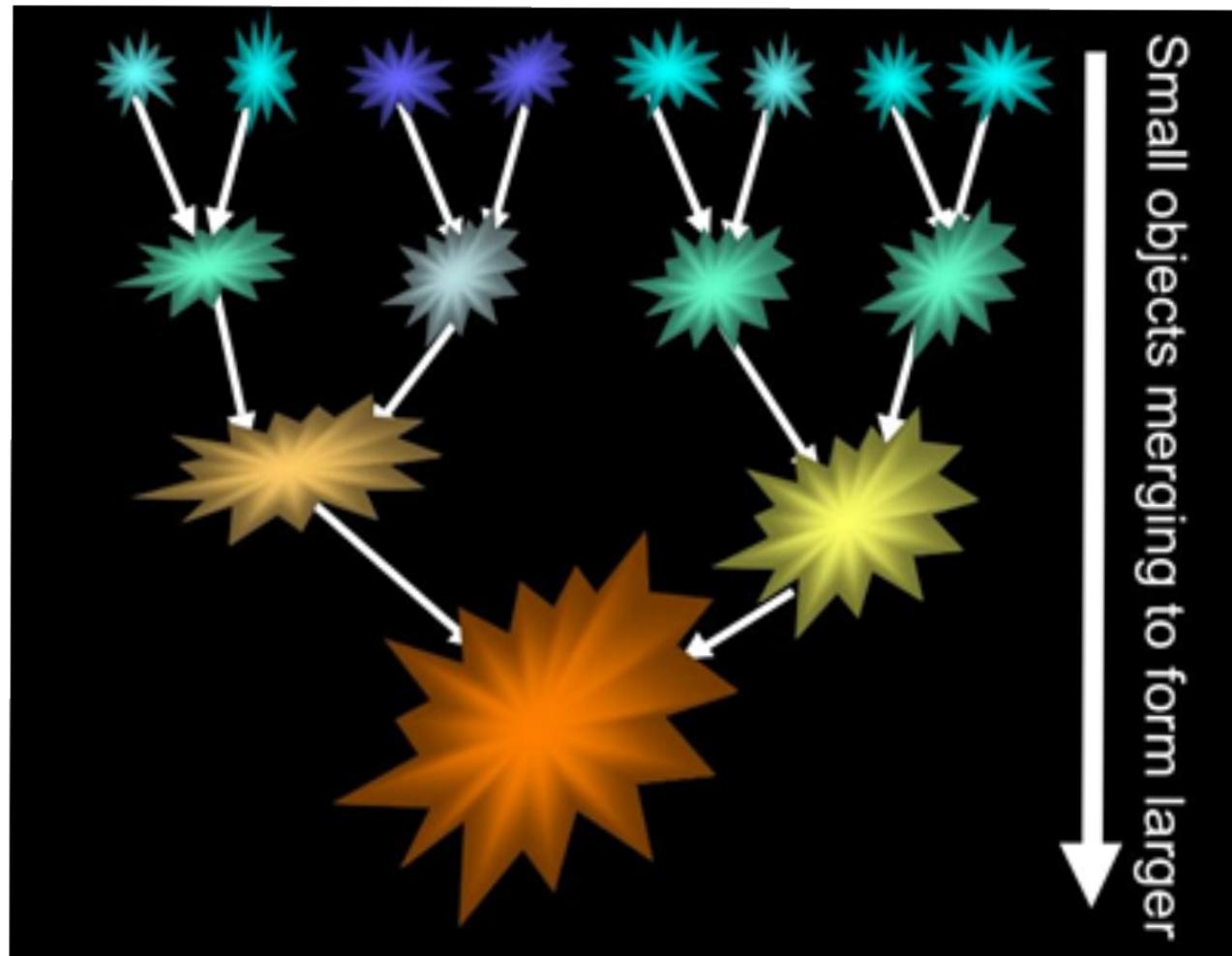
# Ambos mecanismos juntos:

galaxias AGN con barras en sistemas pares



La co-existencia de ambos mecanismos (barras + interacciones) se potencian, produciendo un incremento extra en la actividad nuclear central de los agujeros negros supermasivos.

# El Modelo Estándar de Formación de Estructura en el Universo predice:



Los primeros objetos corresponden a masas subgalácticas.

La agregación de objetos por acreción, merger, etc., generaron las estructuras que observamos hoy.

Las interacciones tienen un rol crucial en determinar propiedades fundamentales sobre la SFR, la evolución galáctica y cosmológica.

Las interacciones contribuyen claramente a la formación de las estructuras que observamos hoy en el Universo.

# Formación de estructuras: el rol de las interacciones

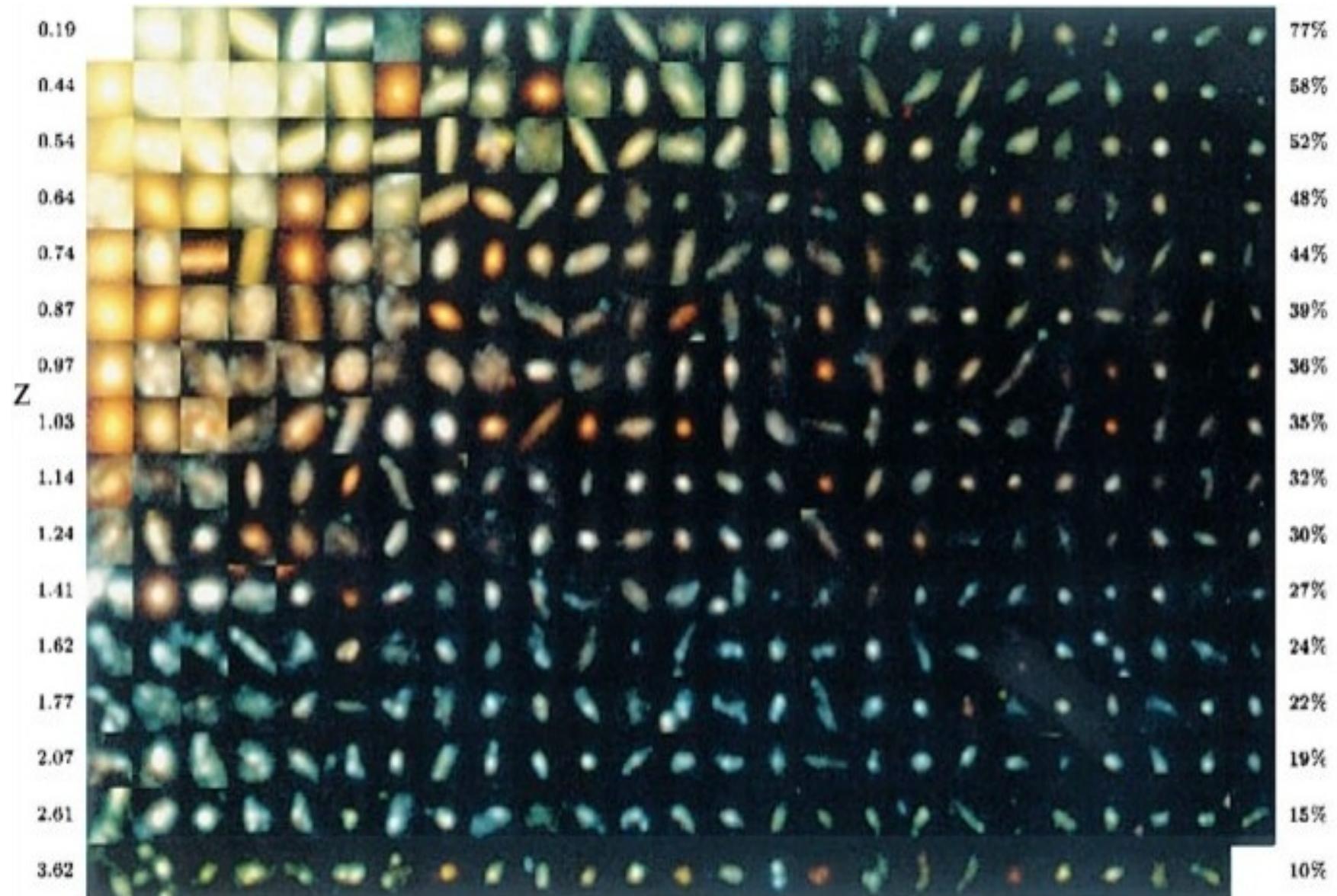
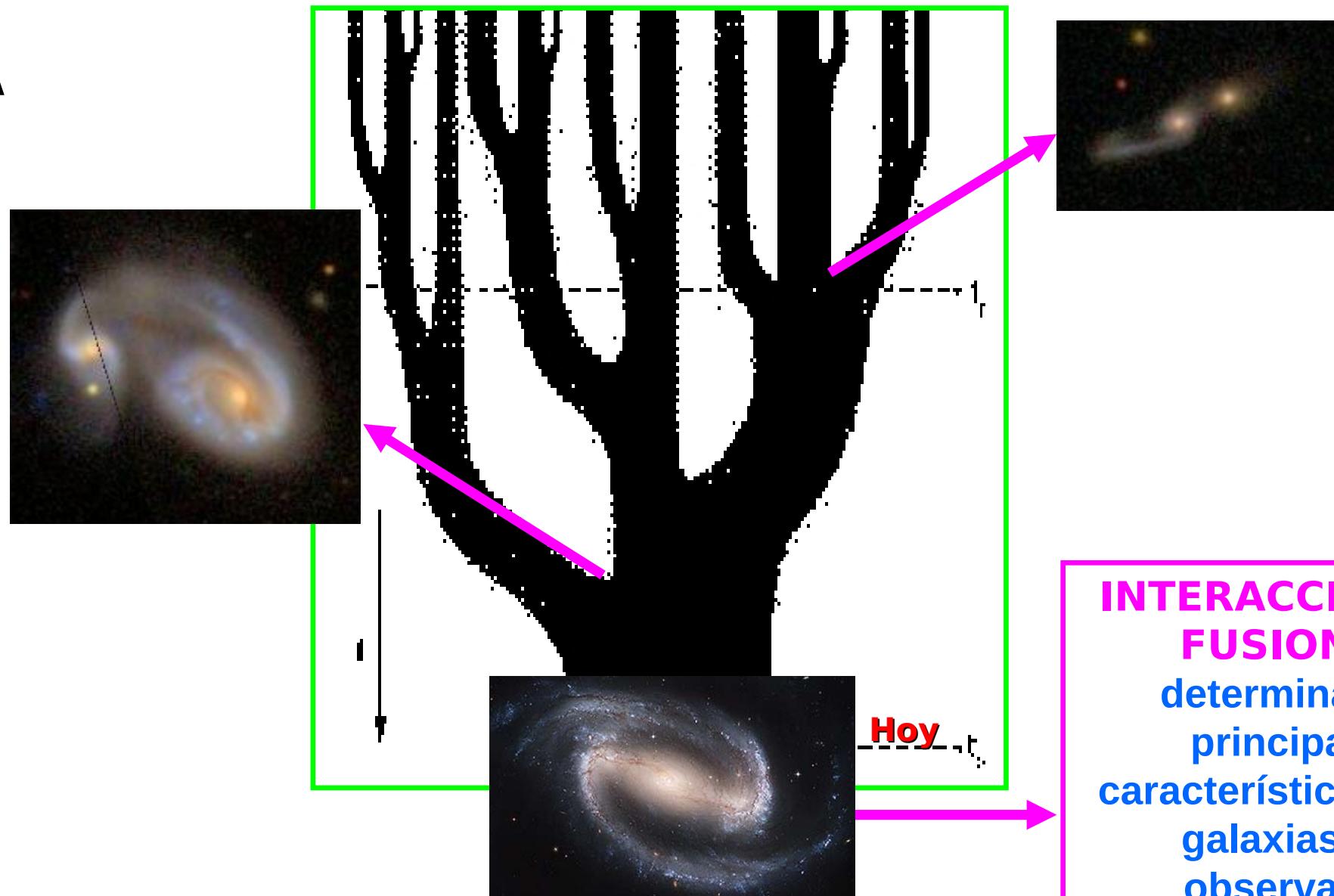


FIG. 3.—Hubble Deep Field photometric redshift sample. The sample is first sorted into redshift and divided into 16 redshift bins, each containing 25 galaxies. Within each redshift interval the galaxies are then ordered in terms of apparent magnitude (and therefore crudely in absolute magnitude). The progression down the page qualitatively reflects the process of galaxy evolution, although of course it does not correct for  $k$ -corrections and the redshift-dependent selection windows.

Todas las interacciones y fusiones que tienen las galaxias a lo largo de su vida están representadas en un esquema denominado  
**ÁRBOL DE FUSIÓN**



**INTERACCIONES y  
FUSIONES:**  
determinan las  
principales  
características de las  
galaxias que  
observamos

# Resumen

## Diferentes clases de sistemas pares

- La eficiencia global en la formación de nuevas generaciones de estrellas es notablemente más eficiente en pares mayores. Además, es más significativo en sistemas que presentan distorsiones morfológicas (M y T).
- El número de sistemas co-rotantes es ~ dos veces el número de pares contrarotantes.
- Los sistemas contra-rotantes presentan mayor tasa de formación de estrellas, colores más azules y poblaciones estelares más joven que los sistemas co-rotantes.

## Ambientes de Densidad

- En diferentes entornos de densidad ambiental, las interacciones juegan un rol fundamental en la modificación de las propiedades de las galaxias.
- En grupos y cúmulos de galaxias, las interacciones tienden a estar en la región central de los sistemas. En muchos casos son la galaxia más brillante.
- Se observa una significativa alineación entre los ejes del par y la columna de los filamentos. Esta tendencia es más importante en pares compuestos por dos galaxias elípticas.

## Actividad Nuclear

- Las interacciones impulsan los flujos de gas hacia las regiones más internas de las galaxias, produciendo un aumento en la actividad nuclear.
- Las barras galácticas presentan un transporte más efectivo del gas hacia las zonas centrales, en comparación con las interacciones.
- El efecto de las interacciones sobre la actividad nuclear central está notablemente influenciado por las propiedades de la galaxia compañera.

# Conclusiones

---

Las interacciones galácticas son un importante mecanismo que modifican las propiedades de las galaxias, por lo tanto tienen un rol fundamental en el desarrollo de las mismas y globalmente en la evolución del Universo.

---