

# Morfología de Galaxias en Cúmulos Ricos: Implicaciones para la Formación y Evolución de Galaxias. <sup>1</sup>

*Alan Dressler*

*Hale Observatory<sup>2</sup>, Carnegie Institution of Washington*

---

<sup>1</sup>Artículo original *Galaxy Morphology in Rich Clusters: Implications for the Formation and Evolution of Galaxies*, escrito por Alan Dressler, 1980, *The Astrophysical Journal*, Volúmen 236, página 351.

**Traducción al Español por José Antonio García Barreto, Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), México, D.F. Junio 2009**

<sup>2</sup>Los Observatorios Hale son operados conjuntamente por la Institución Carnegie de Washington y el Instituto Tecnológico de California

## 0. RESUMEN

Se presenta un estudio de la población relativa de galaxias en 55 cúmulos ricos en conjunto con una discusión de las implicaciones para la formación y/ó evolución de diferentes tipos morfológicos. Una bien definida relación se ha encontrado entre la densidad local de galaxias y el tipo de galaxia, la cual, en concordancia con estudios previos, indica una población que incrementa para galaxias elípticas (E) y galaxias tipo S0 pero disminuye para galaxias de disco (S) con respecto al aumento de densidad.

Se presentan tres líneas de evidencia las cuales contradicen la interpretación de que estos gradientes en población resulta de la producción de galaxias tipo S0 cuando las galaxias (de disco) espirales pierden su gas en su disco debido el efecto del medio intergaláctico (MIG). (1) La relación entre densidad y tipo morfológico es una función muy débil de la densidad de tal manera que un porcentaje significativo de galaxias S0 existen en regiones donde la densidad de gas y temperatura son muy bajas para quitar en forma efectiva el gas de las galaxias de disco por los procesos de evaporación ó por presión hidromecánica. (2) La relación entre la densidad y el tipo morfológico es prácticamente idéntica en cúmulos irregulares de baja concentración que presumiblemente no estan en estado relajado y en cúmulos con alta concentración y regulares que se piensa que ya estan en estado relajado, a pesar de que se esperaría que la producción de S0 por la remoción de gas de galaxias de disco debería ser importante en ellos. (3) Los bulbos y los cocientes de bulbo/disco de galaxias S0 son sistemáticamente más grandes que aquéllos de galaxias de disco en todos los regímenes de densidad. Dado que los bulbos están muy compactos no deberían ser afectados por la remoción de gas, la diferencia entre las distribuciones de bulbos y los cocientes de bulbo/disco en todos los regímenes de densidad es inconsistente con la idea de que la mayoría de las galaxias S0 son el resultado de el proceso de remoción de gas de galaxias de disco por los procesos de presión hidromecánica ó evaporación.

Como una alternativa a la hipótesis de remoción de gas en galaxias de disco, se sugiere que la relación entre la densidad local y el tipo morfológico refleja la gran escala de tiempo asociada con la formación de las componentes de disco de las galaxias. Si esta escala de tiempo es comparable a, ó mayor que, varios miles de millones de años, un incremento en la densidad local de galaxias podría disminuir ó aún más detener el crecimiento de la componente de disco. Esto podría, en forma general, explicar el gran número de galaxias elípticas y el predominio de galaxias de disco en regiones con baja densidad.

Los datos también indican una tendencia de incremento de densidad de la componente esferoidal con el respectivo aumento de la densidad local. Esto podría

interpretarse como evidencia para: (1) la relativa formación tardía de galaxias, (2) el proceso de choques de galaxias y su consecuente unificación, (3) un mecanismo de formación que es altamente sensible a la densidad, ó (4) un acoplamiento entre las perturbaciones de alta frecuencia (galaxias) con las de baja frecuencia (cúmulos) en el universo temprano.

## 1. INTRODUCCION

Estudios morfológicos de galaxias no son de ninguna manera un substituto de la física en el estudio de fenómenos naturales, pero muy frecuentemente proveén los fundamentos de grandes teorías y pueden ser herramientas muy poderosas para la evaluación de hipótesis. La astronomía extragaláctica ha visto el desarrollo de muchos, algunas veces muy complejos, sistemas de clasificación de los tipos de galaxias, pero hasta el moento, sólo se pueden hacer rudimentarias conexiones entre estas formas y el proceso de formación de galaxias. El propósito de este artículo es el presentar nuevas observaciones de cúmulos de galaxias las cuales podrían probar ser útiles en el desarrollo de teorías de formación y evolución de galaxias como lo fueron los estudios de cúmulos estelares en la comprensión de la evolución estelar.

Básico a todos los sistemas de clasificación de tipos de galaxias es el reconocimiento de dos componentes fundamentales de la estructura de una galaxia: una componente mas ó menos apalanda formando el disco de estrellas (con gas y polvo) y otra componente generalmente esferoidal. La mayoría de las galaxias poseen ambas estructuras (por ejemplo: Sandage 1961), pero hay mucho ejemplos de galaxias sin un disco prominente (elípticas) y sin una componente esferoidal distinguible (algunas galaxias de disco y [quiás] irregulares del tipo de las Nubes de Magallanes). Suponiendo que estas dos componentes reflejan diferentes mecanismos de formación, su importancia relativa debe ser fundamental. Entre las galaxias de disco existe la dicotomía entre aquellas ricas en gas y polvo y su formación estelar prominente (espirales e irregulares) y aquellas en las cuales esta actividad es casi nula (galaxias S0). Esta diferencia puede solamente ser considerada fundamental si no existe una conexión evolutiva substancial entre las galaxias de disco (espirales) y las S0.

El contraste entre las poblaciones de baja densidad, denominadas de campo, que son principalmente galaxias de disco, y las regiones más densas de cúmulos de galaxias compuestas principalmente por galaxias S0 y elípticas, es bien conocida (ver, Hubble y Humason 1931, Morgan 1961, Abell, 1965, Oelmer 1974). Este contraste ha sido comunmente interpretado como evidancia del origen común de todas las galaxias asociado con la subsecuente evolución de un tipo a otro, por ejemplo, la creación de una S0 después

de la remoción del gas de una galaxia de disco (ver Gunn y Gott 1972). La alternativa es que las mayores diferencias son ya sea innatas en el proceso de formación ó que reflejen la evolución en una época relativamente temprana. (ver Sandage, Freeman y Stokes 1970, Gott y Thuan 1976). El presente trabajo provee nueva evidencia observacional que sirve como herramienta para asentar la validez de estas alternativas super simplificadas con el propósito de proveer restricciones empíricas para teorías de formación y evolución de galaxias.

## 2. LOS DATOS

Una compilación completa y la descripción de los datos en este estudio se puede encontrar en Dressler (1980).

En resumen, placas fotográficas de 55 cúmulos ricos de galaxias fueron obtenidas usando el telescopio de 2.5m de las Campanas y en menor medida el telescopio de 4m en Kitt Peak y el telescopio de 1.5m en Palomar. La mayoría de los cúmulos fueron estudiados en placas du Pont (en el 2.5m) de 50×50 cm con una escala de placa de 10".0 mm<sup>-1</sup> y un área de 2.1 deg<sup>2</sup>. La gra escala de placa y el menor contraste de la emulsión 103a-O ofrecen un mejoramiento substancial sobre trabajos previos usando telescopios tipo Schmidt y provee una exacta clasificación hasta un corrimiento al rojo de  $z \sim 0.06$ .

Los 55 cúmulos fueron seleccionados en base a (1) corrimiento al rojo ( $z \leq 0.06$ ), (2) membresía de galaxias ( $N_{geq50}$ ), y (3) el requisito de que están dentro de un área de solamente algunos grados cuadrados en el cielo. El corrimiento al rojo de cada cúmulo, si no se conocía con anterioridad, fué determinado de espectros de por lo menos dos galaxias en el cúmulo. Los cúmulos en la muestra estan listados en la Tabla 1.

El análisis de los datos consistió en la determinación de (1) posiciones, (2) magnitudes aproximadas totales y del bulbo, (3) tipos morfológicos, y (4) elipticidades de cada una de las casi 6,000 galaxias disrtibuidas entre los 55 cúmulos, tal y como se describe en detalle en Dressler (1980). En el presente trabajo sólo se utiliza el esquema de clasificación de galaxias más sencillo. Tres tipos son considerados - elípticas, S0, y de disco + irregulares, como se definen en Dressler (1980).

Adicionalmente a los cúmulos del programa, 15 placas fotográficas equivalentes a las placas de los cúmulos, pero tomadas en posiciones en la bóveda celeste al azar, fueron obtenidas para determinar las cuentas de las contribuciones de galaxias en el campo. El valor medio de 8 galaxias por grado cuadrado se obtuvo hasta el límite de magnitud de  $m_v = 16.5$  en concordancia con trabajos anteriores (Oelmer 1974, Rainey y Abell 1977). Por el otro lado, la muestra del campo, la cual es probablemente una combinación de

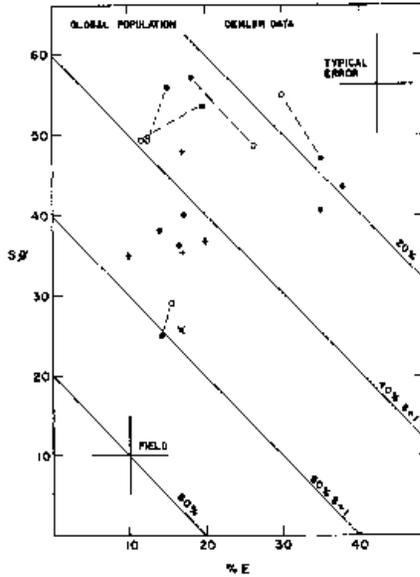


Fig. 1.— Poblaciones Globales de varios estudios: ● datos de Oelmer (1974), ○ representan la comparación de el presente trabajo y los cúmulos en común con Oelmer, + datos de Melnick y Sargent (1977), × cúmulos de Virgo, Sandage y Tammann (1979).

galaxias aisladas y grupos de baja densidad, se encontró con valores de 50% de disco + irregulares, 35% S0 y 15% elípticas, los cuales son marcadamente diferentes de los valores de  $\sim 80\%$  S+I,  $\sim 10\%$  S0, y  $\sim 10\%$  E encontrados en estudios de galaxias de campo cercanas (Sandage y Tammann 1979, Burstein 1979a). A pesar de todo, la razón de esta discrepancia está bien entendida. Mientras que la función de luminosidad cae rápidamente para galaxias más brillantes que  $M^*$ , estas galaxias pueden estar a grandes distancias y aún así satisfacer el límite de magnitud para la muestra presente,  $m_v \leq 16.5$ . Debido al gran incremento de volumen, una fracción significativa ( $\sim 50\%$ ) de las galaxias contadas como de campo tienen corrimientos al rojo entre  $0.06 \leq z \leq 0.12$ . Las galaxias en este intervalo de corrimiento al rojo no pueden ser clasificadas con certeza. Debido a que muchas galaxias de disco distantes aparecen similares a las galaxias S0, no es de sorprenderse que la población relativa de galaxias de disco (S) contadas aquí sea substancialmente menor que el valor verdadero. Las proporciones de galaxias S+I, S0, y E son 63/24/13 para  $m_v \leq 15.5$  y 70/18/12 para  $m_v \leq 14.5$ . Estos cocientes son consistentes con la interpretación dada anteriormente. Enn este trabajo se adoptan los cocientes 80/10/10 para las galaxias en el campo, sin embargo, los cocientes 50/35/15 se utilizan para corregir el material fotográfico de este trabajo para tomar en cuenta las galaxias en el campo dado que es la impresión visual y no la verdadera población relativa

la que importa en este estudio.

### 3. POBLACIONES GLOBALES

Oelmer (1974) realizó los primeros intentos serios para cuantificar el contenido morfológico de los cúmulos de galaxias. Utilizando las placas Schmidt de Palomar, Oelmer clasificó galaxias más brillantes de 10 de su muestra de cúmulos cuyas distancias eran suficientemente cercanas ( $z \leq 0.04$ ).

Clasificando hasta 3 magnitudes más débiles que la galaxia más brillante miembro del cúmulo sobre una gran área del cúmulo, Oelmer derivó lo que aquí se refiere a la población global. Los datos de Oelmer están graficados en la Figura 1 como el porcentaje de galaxias elípticas versus el porcentaje de S0. Oelmer notó que estos cúmulos estaban en tres agrupaciones representativas a las que denominó ricas en espirales, pobres en espirales y cD. La dimensión de la barra de incertidumbre debido a la estadística de Poisson inmediatamente sugiere, sin embargo, que el agrupamiento es accidental. En la Figura 1 también se grafican las determinaciones de los mismos porcentajes derivados del presente estudio para aquellos cúmulos en común con el trabajo de Oelmer. La concordancia es buena considerando las diferencias en intervalo de magnitud y área que se cubre y especialmente considerando las dificultades que dice Oelmer que encontró al trabajar con material con una escala tan pequeña de placa.

Para ver si los subgrupos sugeridos por Oelmer son reales, el mismo diagrama se muestra en la Figura 2 para 24 cúmulos en el presente trabajo cuya membresía excede  $N \geq 100$ , de tal manera que los cocientes de población son mejor determinados. Se han hecho correcciones por la contaminación de galaxias de campo pero en todos los casos esta corrección no es mayor que un tanto por ciento. Es interesante notar que la región cubierta por los puntos en el diagrama concuerda bien con el intervalo encontrado por el estudio de Oelmer. Sin embargo, no son evidentes las agrupaciones discretas. En vista de los errores estadísticos esperados, sería difícil de reconocer alguna subagrupación en tan pequeña área (sólo 20% del espacio disponible) aun si existiese. A pesar de que las incertidumbres asociadas son mas grandes para los puntos adicionales, el mismo espacio otra vez parecer ser llenado y no hay concentraciones altas ó gradientes. Debido a que *no hay evidencia de tipos discretos de cúmulos*, estos grupos deben simplemente ser considerados, como intentó Oelmer, como fronteras de un intervalo continuo de población mixta de cúmulos.

## 4. GRADIENTES DE POBLACION

### 4.1. Una Relación entre la Densidad Local y la Población

Desde que se ha establecido con éxito que los gradientes de población existen (ver Melnick y Sargent 1977, MS), el concepto de población global es de valor cuestionable. Mientras que se puede concluir que (1) las variaciones en la población de cúmulos está considerablemente restringida comparada con los intervalos totales posibles y (2) estas poblaciones totales son *en todos los casos diferentes de las poblaciones en el campo*, las proporciones exactas de varios tipos de galaxias son sensitivas en algún grado en qué tan afuera en un cúmulo uno cuenta. Esto a su vez dá lugar al problema de determinar los límites exteriores de un cúmulo y debido a que las incertidumbres por las contribuciones del campo, esto nunca está bien definido. Aún más, algunos cúmulos parecen estar dentro de una envolvente de galaxias que conectan varios cúmulos (gregory y Thompson 1977). ¿ Se deben de considerar parte del cúmulo ó nó?

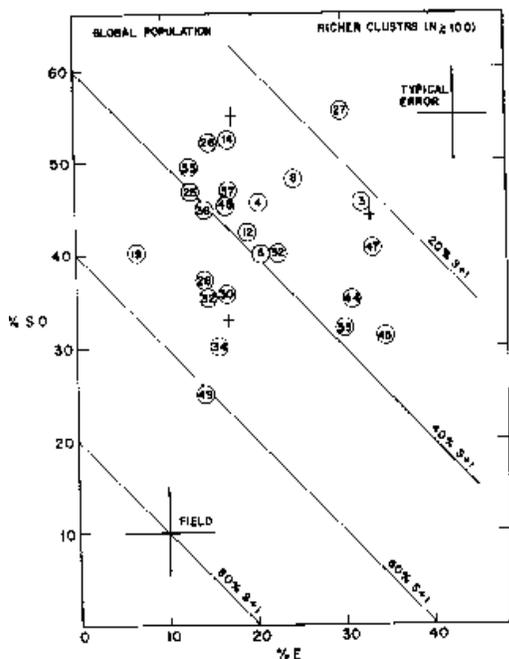


Fig. 2.— Poblaciones Globales para los cúmulos ricos ( $N \geq 100$ ) en este estudio mostrando la ausencia de grandes gradientes ó acumulamientos en subgrupos discretos.

Una alternativa obvia es el estudiar el gradiente de población y no la población completa ó integrada. MS han estudiado el cambio en poblaciones de cúmulos como una

función del radio desde el centro del cúmulo y encuentran un incremento general en la proporción de espirales y un correspondiente decremento en la proporción de galaxias S0 al incrementar la distancia. A pesar de que el radio parece una opción natural como una variable independiente para cúmulos regulares que son simétricos y tienen centro bien definidos, no es una buena opción para la mayoría de los cúmulos que tienen una morfología irregular. Los centros de estos cúmulos están pobremente definidos y en la mayoría de los casos la distribución de galaxias aparece caótica y en grumos. Los grumos de alta densidad dispersos en todas estas distribuciones son similares a los centros densos de cúmulos regulares, por ejemplo ricos en galaxias S0 y elípticas y pobres en galaxias de disco. Esto motivó una diferente estrategia en la cual la densidad local es utilizada como un parámetro independiente. Dado que la densidad es una función suave del radio en cúmulos regulares, estas dos estrategias van a diferir muy poco. Sin embargo, en el caso de cúmulos irregulares, el método aquí presentado puede comprobar mejor si los mismos cambios de población con respecto a la densidad ocurren como en los cúmulos regulares.

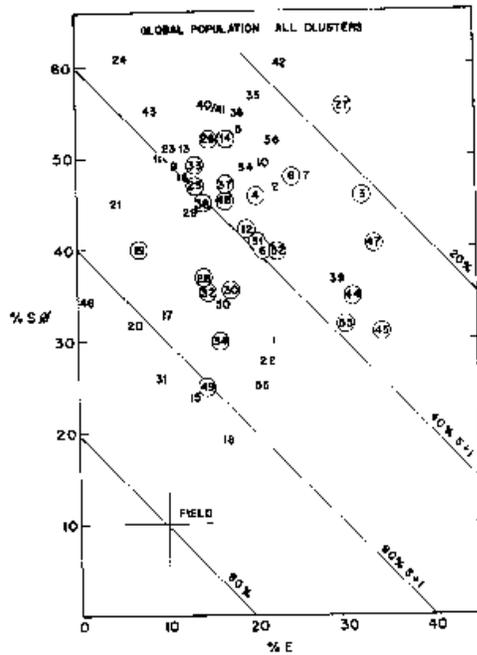


Fig. 3.— Poblaciones Globales para todos los cúmulos en la muestra.

Con esto en mente, un programa de computadora se desarrolló de tal manera que encontrase los 10 vecinos más cercanos (en proyección en la bóveda celeste) para cada una de las  $\sim 6,000$  galaxias en la muestra, y después de calcular el área involucrada y corrigiendo por la densidad de galaxias de campo, calculó la densidad superficial de

galaxias por cada megaparsec cuadrado. Una corrección se hizo tomando en cuenta los diferentes límites de magnitud alcanzado a diferentes corrimientos al rojo, como se describe en Dressler (1980), de tal manera que la densidad final calculada refleja el número de galaxias en el intervalo  $M_v \leq -20.4$  ( $H_0=50$ ) en todos los casos. Las galaxias fueron entonces clasificadas por tipo (de Hubble) de tal forma de tener tres distribuciones numéricas separadas como una función de la densidad local guardada. Esto es, fué posible determinar qué fracción de galaxias a una densidad local dada eran espirales + irregulares, S0 ó elípticas.

En la Figura 4 se muestra la relación extremadamente bien comportada que resulta cuando los datos de todas las galaxias en los 55 cúmulos se combinan. Existe una excelente correlación entre la densidad local y la población relativa de los diferentes tipos de galaxias, que es cualitativamente similar a lo discutido por Oelmer (1977). La proporción relativa de S+I decrece monótonicamente al incrementar la densidad, y por consiguiente, las proporciones de galaxias S0 y E incrementan. Aún más, las proporciones de galaxias de campo, a la densidad proyectada estimada del campo, son extrapolaciones muy razonables de estas relaciones. La Figura 4 también muestra las estimaciones de la verdadera densidad espacial a estas densidades proyectadas, lo que demuestra que las poblaciones cambian muy suavemente con respecto a la densidad en más de cinco ordenes de magnitud, de  $10^{-2}$  a  $10^3$  galaxias  $\text{Mpc}^{-3}$ .

La ventaja que ofrece el uso de la densidad en vez del radio como una variable independiente en el estudio de gradientes de poblaciones está ilustrada en la Figura 5. Los gradientes de densidad en seis cúmulos moderadamente irregulares han sido determinados como una función de la densidad superficial y como función de la distancia radial desde el centroide de la distribución de galaxias. Los gradientes destacan con mayor facilidad cuando se utiliza la densidad como una variable independiente, lo cual indica que los realces de la densidad local representan asociaciones físicas y que las poblaciones son una fuerte función de las condiciones local más que de las condiciones globales.

Los datos de la Figura 4 y los diagramas subsecuentes no han sido corregidos por contaminación de las galaxias de campo, las cuales constituyen un fracción de la población que oscila entre 40% a valores de  $\log \rho_{\text{proy}} = 0.0$  hasta un valor de menos de 5% para valores de  $\log \rho_{\text{proy}} = 2.0$ . Utilizando las proporciones *observadas* 50/35/15 para S+I,S0,E, como se discutió en §II, es fácil de mostrar que el campo introduce un error despreciable en la determinación de las proporciones en cada densidad. Las densidades mismas han sido corregidas para reflejar la densidad local de la región después de tomar en cuenta las de campo.

Es interesante notar que los datos de Oelmer se ajustan bien a la relación en la

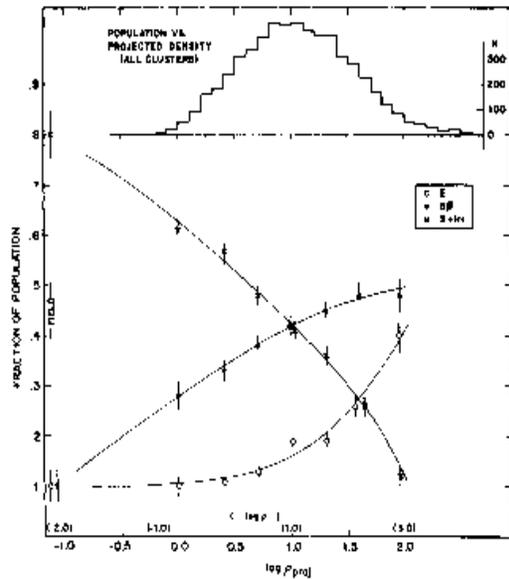


Fig. 4.— La fracción de galaxias E, S0 y S+I como función del logaritmo de la densidad proyectada, en galaxias  $\text{Mpc}^{-2}$ . Los datos mostrados son para todos los cúmulos en la muestra y los del campo también. También se muestra una escala estimada de la verdadera densidad en galaxias  $\text{Mpc}^{-3}$ . El diagrama en la parte superior muestra la distribución numérica de las galaxias agrupadas en los casilleros de la densidad proyectada.

Figura 4. Las poblaciones representativas *ricas en espirales*, *pobres en espirales*, y *cD* están muy cercanas a las proporciones a densidades proyectadas de 0.5, 1.5 y 1.8 respectivamente.

El análisis de cúmulos individuales indica que la relación entre la población y densidad se mantiene para cúmulos individuales así como para, en promedio, de cúmulo a cúmulo. Como se mostrará después, esta relación que se mantiene para cúmulos de diferente morfología (por ejemplo, regulares ó irregulares, concentrados ó difusos) es claramente básica para entender las poblaciones en los cúmulos.

## 4.2. Discusión

Fueron Spitzer y Baade (1951) los primeros en sugerir que las galaxias S0 en cúmulos eran el resultado de la remoción de gas de las galaxias de disco por el mecanismo de colisiones de galaxias. Otros dos mecanismos de remoción de gas, presión hidromecánica

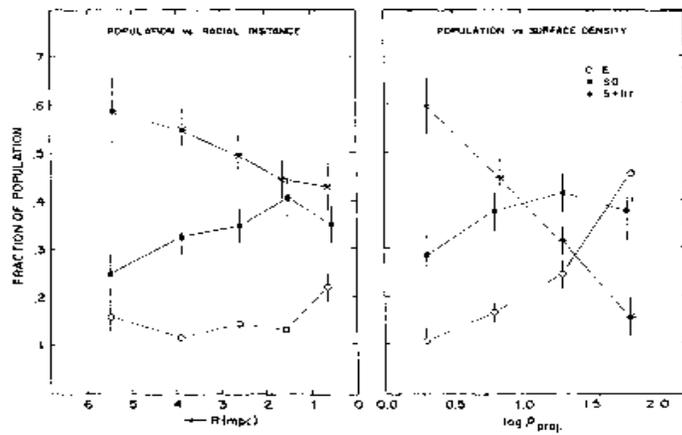


Fig. 5.— Los gradientes de población en cúmulos irregulares (A754, A993, A1736, A1983, 0326-53,0559-40) como función de la distancia radial desde el centroide del cúmulo y también como función de la densidad superficial local mostrando la ventaja de la densidad como el parámetro libre.

(Gunn y Gott 1972) y evaporación de gas (ver Cowie y Songaila 1977), son más comunmente citados como explicaciones de la gran representación de galaxias S0 en cúmulos ricos de galaxias en relación al campo (ejem. Bierman y Tinsley 1975, van den Bergh 1976, Oelmer 1977, Melnick y Sargent 1977, Bahcall 1977a, Tyler y Vidal 1978, Butcher y Oelmer 1978, Sullivan y Johnson 1978, Gallaghyer 1978, Bierman y Shapiro 1979, Strom y Strom 1979). Debido a la popularidad de los mecanismos de remoción de gas por presión hidromecánica y evaporación como productores de S0, mucha de la siguiente discusión se dedicará a comprobar estas hipótesis utilizando los presentes datos. Es importante enfatizar que lo que es probado es la producción de galaxias S0 via la remoción de gas de los disco de galaxias espirales por medio de interacciones con el medio *externo* intergaláctico MIG, el cual será referido como *mecanismo de remoción* en contraposición a, por ejemplo, el consumo de gas debido al proceso de formación estelar.

Una revisión de los procesos de remoción de gas la ha escrito Gisler (1979). Estos mecanismos dependen fuertemente de la densidad y, en el caso de evaporación, de la temperatura del medio intergaláctico el cual es el responsable de la supuesta remoción de gas de las galaxias de disco. Por lo tanto, deben de ser mucho más importantes en regiones de alta densidad tales como las regiones centrales densas formadas durante el colapso de un cúmulo y su consecuente virialización.

La imagen tradicionalmente adoptada de colapso de un cúmulo está descrita en estudios tales como el de Peebles (1970). Originalmente un cúmulo ligado

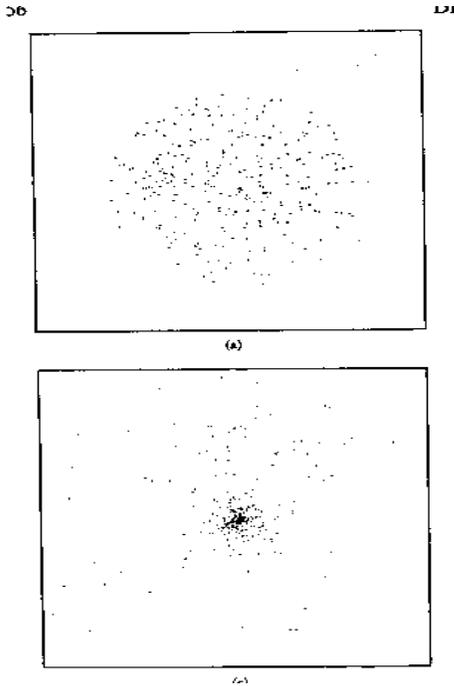


Fig. 6.— El modelo de colapso de Peebles (1970) para el cúmulo de Coma mostrando las fases de (a) contracción, y (c) equilibrio post-virialización.

gravitacionalmente es una región extendida donde la densidad promedio en algún tiempo tiene un valor mayor que la densidad crítica  $\rho_{crit}$ , la densidad crítica necesaria para que la energía total de la región sea negativa. Tal región está destinada a separarse de la expansión general de Hubble y colapsarse subsecuentemente. En el entendido de que el exceso de densidad es uniforme, el cúmulo colapsa esencialmente en caída libre con la densidad aumentando monótonicamente con el tiempo hasta que la densidad llega a ser suficientemente alta y ocurre la virialización (relajación violenta) (ver Lynden-Bell 1967). La densidad central se estabiliza en este punto, y subsecuentemente el sistema está caracterizado por una región central densa y una envolvente de baja densidad. La Figura 6, reproducida de Peebles (1970) ilustra estas tres fases. El modelo es super simple en el sentido de que el exceso original de densidad no es probablemente uniforme, de tal manera que uno espera un intervalo de densidades (subcondensaciones) en el sistema que se contrae y la continúa caída de material hacia un cúmulo previamente relajado.

Butcher y Oelmer han identificado cúmulos irregulares en el estado de contracción y cúmulos regulares particularmente aquellos con una alta concentración de galaxias en la etapa de post-virialización. Ellos continúan argumentando que es durante el desarrollo

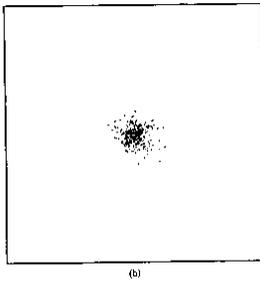


Fig. 6.— El modelo de colapso de Peebles (1970) para el cúmulo de Coma mostrando las fases de (b) relajación violenta.

de la región central con alta densidad cuando en las galaxias de disco ocurre el proceso de remoción de su gas para formar galaxias S0 dando como resultado el bajo número de galaxias de disco en cúmulos regulares comparado con el número en cúmulos irregulares donde su región central tiene una menor densidad de galaxias.

Para comprobar esta interpretación, los 10 cúmulos con las más altas densidades centrales y los 10 cúmulos con las más bajas densidades centrales han sido seleccionados por el criterio de concentración utilizado por Butcher y Oelmer (1978). Ejemplos de cada tipo se muestran en la Figura 7. Si el gas se ha removido de las galaxias de disco en las regiones centrales con alta densidad de los cúmulos ricos, uno hubiera esperado ver una diferencia substancial en los gradientes de población de los dos tipos. Específicamente, los cúmulos de alta densidad central no deberían de mostrar ninguna galaxia de disco, y no debería de haber ningún gradiente significativo en los cúmulos de baja densidad central que son los que supuestamente están en la etapa de pre-relajación.

Las Figuras 8 y 9 grafican la relación entre la población y la densidad para estos dos subgrupos. ¡No hay ninguna diferencia significativa entre las relaciones definidas en los dos grupos y aquella para toda la muestra (Fig. 4)! *La relación entre la población y la densidad local parece ser válida sin tener en cuenta el tipo de cúmulo involucrado.* Este resultado contradice la interpretación de que las galaxias de disco han perdido su gas para formar galaxias S0 en los cúmulos de alta densidad central. En particular, hay una gran abundancia de galaxias S0 en muchos cúmulos irregulares, y en ninguna región de cualquier cúmulo la población de galaxias de disco es tan alta ó la fracción de galaxias S0 es tan baja como en el campo. Si la idea de remoción de gas se desea conservar, entonces se debería argumentar que el proceso es común aún en regiones donde la densidad espacial de galaxias, y presumiblemente del gas, es  $10^2 - 10^3$  veces menor que en las regiones de alta densidad de los cúmulos regulares. Esto es improbable, considerando la fuerte dependencia de la densidad de ambas hipótesis, la presión hidro-mecánica

y la evaporación y es completamente insostenible en el muy remoto evento de que el gas es relativamente frío y más ó menos moviéndose , junto con el flujo de Hubble, con las galaxias en la etapa anterior a la de relajación. El hecho de que la relación población/densidad es tan similar en estos diferentes tipos de cúmulos implica, por el contrario, que las poblaciones en los cúmulos son esencialmente independientes de la historia global dinámica del cúmulo.

MS han también atribuido los gradientes de población, que ellos encontraron en los cúmulos con una alta emisión de Rayos X, a la remoción de gas de galaxias de disco por el mecanismo de presión hidromecánica por el gas caliente del cúmulo. La presente muestra de cúmulos incluye ocho con alta emisión de Rayos X ( $L_x \geq 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ ) que ha sido combinada para formar otro diagrama de población densidad (Fig. 10). Otra vez, se encuentra válida la misma relación básica entre la población relativa y la densidad local. Parece haber un exceso de galaxias S0 y una falta de galaxias de disco en comparación a la relación promedio. Esto puede ser la contribución del mecanismo de remoción de gas ó evaporación de gas, pero el efecto es demasiado pequeño como para comprobarse y claramente es sólo una perturbación en las tendencias normales. De cualquier manera, es aparente que MS pudieron haber encontrado gradientes similares en cúmulos que son 10 - 100 menos luminosos en Rayos X. El hecho de que solamente ocho de los 55 cúmulos en la muestra son muy luminosos en Rayos X es buena evidencia de que la densidad de gas y temperatura varía considerablemente de cúmulo a cúmulo. Dado que la proporción de galaxias de disco y el flujo de Rayos X son ambas funciones de la densidad del cúmulo, no es de sorprenderse que una correlación parezca existir entre la emisión de Rayos X y el contenido de galaxias de disco, como bien la encontró Bahcall (1977b) y Tyler y Vidal (1978). La relación, sin embargo, *no* es aparentemente el resultado del gas que emite los Rayos X y que es responsable de la remoción del gas de las galaxias de disco. Por el contrario es la alta densidad de galaxias, que también notó Bahcall (1977a), la que aparentemente es la causa común de ambos efectos.

### 4.3. Evolución de Cúmulos

Si la interpretación de Butcher y Oelmer de que los cúmulos irregulares y regulares ejemplifican las etapas de pre y post-virialización en la evolución de los cúmulos es correcta uno debería de ver distribuciones muy distintas de densidad en estos tipos, como se vé ilustrado en la Figura 6. Los cúmulos relajados debieron haber tenido un gran intervalo de densidades, mientras que los cúmulos no relajados, contrayéndose hacia una densidad más-ó-menos uniforme deberían de presentar un intervalo menor de densidades. La distribución de número de galaxias en función de la densidad vista en la parte superior

de las Figuras 7 y 8 apoyan esta interpretación. Los cúmulos de baja densidad central tienen un intervalo menor comparados con los cúmulos de alta densidad central, aunque esto es difícilmente sorprendente dado que el criterio de concentración es el responsable de esta selección.

Los anchos de las distribuciones individuales son en cada caso similares a la distribución combinada. Por ejemplo, los cúmulos de alta concentración no tienen un gran intervalo de densidades porque muchos de los cúmulos con menor pero diferente intervalos de densidad son sumados todos juntos. La distribución en cúmulos individuales es muy ancha y los valores medios muestran relativamente poca variación.

Suponiendo, por lo tanto, que la interpretación de Butcher y Oelmer del estado dinámico de un cúmulo es correcta, uno puede hacer dos comentarios interesantes. Uno es que la mayoría de los cúmulos, como se puede apreciar en la parte superior de la Figura 4, son del tipo de baja densidad central ó baja concentración. Por consiguiente la mayoría de los cúmulos deben estar en la etapa de contracción, aunque en vista de la relativa alta densidad que han alcanzado algunos de ellos, están a una fracción del tiempo de Hubble para alcanzar la etapa de virialización. A primera vista parece una interpretación insostenible que tantos cúmulos se hayan observados *en la jetapa!* de colapso. Debería enfatizarse, sin embargo, que hay un prejuicio fuerte para seleccionar solamente cúmulos relativamente avanzados en su evolución y ahora con alta densidad central y para ignorar cúmulos *jóvenes* que hay en día tienen un exceso de densidad solamente de un factor de 2 ó 3 sobre el campo y ocupan comparativamente grandes regiones del cielo. No ha habido, hasta este momento, un estudio como el catálogo de Abell de estructuras como estas y su reconocimiento no es para nada trivial. Como en el caso de los extremos débiles de las funciones de luminosidad, el extraer objetos débiles del ruido es difícil pero sería importante para estudiar el espectro de perturbaciones de las dimensiones de cúmulos en el universo temprano.

El segundo punto concierne el estado evolutivo de los cúmulos que emiten rayos X. El histograma de densidad versus número (la parte superior de la Fig. 10) revela que este subconjunto incluye, en promedio, los más densos de los cúmulos estudiados (ver también Bahcall 1977a). Volviendo a ver los modelos de Peebles es muy tentador el identificar esos cúmulos como aquellos que están muy cerca del tiempo de virialización cuando la densidad promedio es muy alta. En ese punto, el pozo de campo gravitacional es muy profundo, el número de galaxias y probablemente la densidad de gases alta y el calentamiento del gas intercúmulo se maximiza. El número tan pequeño de cúmulos que emiten fuertemente en Rayos X en esta muestra es consistente con el hecho de que la etapa de virialización dure una pequeña fracción, aunque no es despreciable, del tiempo de Hubble. En esta interpretación uno pondría la Figura 10 entre las Figuras 8 y 9.

Un cúmulo en evolución tendría una frecuencia de distribución de galaxias con respecto a la densidad como la mostrada en la Figura 8, el máximo se movería suavemente hacia mayor densidad central hasta alcanzar el máximo de densidad en la etapa de virialización. Un cúmulo que emite Rayos X estaría cerca ó en esta etapa. Cuando el cúmulo tiene menor densidad central otra vez (ver Fig. 9) con un halo de baja densidad, su pozo de potencial gravitacional será, en promedio, un poco menos profundo de tal manera que el flujo de Rayos X disminuirá. Ya sea que un cúmulo permanezca siendo un emisor muy luminoso de Rayos X ó nó podrá depender de cuánto del cúmulo permanece con alta densidad central. El cúmulo de Coma, por ejemplo, permanecerá siendo una fuente emisora luminosa de Rayos X porque su densidad global es inusualmente alta.

Dos aspectos indican que este modelo de perturbaciones uniformes iniciales colapsando en forma coherente como nubes con la misma densidad es super simplificado. Uno es que aún los cúmulos que se están contrayendo muestran un intervalo de densidades más grandes de las que se esperaría por el efecto de proyección azarosa de una distribución *uniforma*. Segundo, los gradientes de población existen aún en cúmulos presumiblemente en etapas de relajación a pesar de que tales gradientes se borrarán en la etapa de virialización. Ambos aspectos sugieren que hay un *intervalo* de densidades en la perturbación original. Dado que la temperatura de colapso es proporcional al inverso de la raíz cuadrada de la densidad,  $T \propto \rho^{-1}$ , estas diferencias de densidad tempranas crecen al mismo tiempo que el cúmulo colapsa previniendo así que el cúmulo se virialice rápidamente. Así, un cúmulo muy evolucionado como el de Coma puede tener una caída continua de galaxias y material que puede venir de un regiones con menores reales de densidad. El estudio de Strom y Strom (1978c) sobre la distancia a la cual se encuentran las galaxias elípticas del centro y halo de cúmulos ricos puede ser interpretado como evidencia de que muchas de estas galaxias en las partes externas no han participado en la fase de colapso con alta densidad central.

Si la historia reciente de un cúmulo no afecta su población relativa de tipos morfológicos, específicamente si las espirales no se convierten en galaxias S0 a través del mecanismo de remoción de gas en las regiones centrales de cúmulos densos, ¿qué es lo que se debería de tomar en cuenta para la relación presentada aquí entre la población y la densidad local? Una posibilidad puede encontrarse en el modelo del colapso de un cúmulo discutido en los párrafos anteriores. Dado que las diferencias de densidad en los cúmulos crece monotónicamente con el tiempo desde el inicio del colapso hasta la etapa de virialización entonces la densidad local está unequivocamente relacionada con la perturbación inicial y su evolución. Esto es, las regiones densas hoy han sido siempre más densas que sus regiones a su alrededor. Así, si hay una relación entre el tipo de galaxia formada y la densidad en el momento de la formación ó su temprana evolución, esta relación se retendrá y será especialmente obvia si la mayoría de los cúmulos no se

han virializado. La consecuencia de esto para la relación entre la población y la densidad local es explorada en § VI.

#### 4.4. Epílogo

Existe una bien definida relación entre la densidad local de galaxias en una región del espacio y la representación de diferentes tipos morfológicos. Esta relación se extiende desde el campo con muy baja densidad hasta las regiones muy densas centrales de los cúmulos, esta abarca unos cinco ordenes de magnitud en densidad espacial. Esto combinado con la existencia de galaxias S0 en grandes números en regiones donde la densidad del gas y la temperatura son presumiblemente muy bajas para afectar los mecanismos de remoción de gas de los discos de galaxias, presión hidromecánica ó evaporación, se toma como argumento en favor de la hipótesis de que la mayoría de las galaxias S0 no son creadas por ese proceso. La similitud de las relaciones entre población y densidad en cúmulos irregulares y regulares, los cuales según Butcher y Oelmer, son identificados como las etapas de pre y post virialización apoya aún más el punto de vista de que la población de cúmulos son en gran parte independientes de subsecuente evolución de los cúmulos. Distribuciones de densidad en los cúmulos estudiados implican que  $\sim 20\% - 30\%$  han alcanzado la fase de relajación violenta y sugieren que los cúmulos con gran emisión de Rayos X podrían ser aquéllos más cercanos en tiempo a esta fase.

### 5. MAS EVIDENCIA DE QUE LAS GALAXIAS S0 NO SON GALAXIAS DE DISCO CON REMOCION DE SU GAS

La secuencia de Hubble, desde las galaxias de disco más tardías hasta las galaxias elípticas, es una secuencia de un continuo incremento del dominio de la componente esferoidal ó bulbo en referencia al brillo del disco. Mientras que Hubble (1936) consideró a las galaxias S0 como una transición entre las galaxias de disco y las galaxias elípticas, la producción de galaxias S0 por el proceso de remoción de gas de galaxias de disco las colocaría en una rama paralela a aquélla de las galaxias de disco.

Faber y Gallagher (1976), Sandage y Visvanathan (1978), y Burstein (1979b) sugieren que las galaxias S0 de campo tienen un menor cociente de luminosidad de disco/bulbo (de aquí en adelante se referirá como D/B) que las galaxias de disco del campo y hacen énfasis en el punto de que este resultado vá en contra a la hipótesis de que la mayoría de las galaxias S0 son el resultado de la remoción de gas de galaxias de disco.

Para probar este efecto en cúmulos ricos en los cuales los procesos de remoción de gas como el de la presión hidromecánica y el de evaporación se espera que sean los más efectivos, la contribución de luz se ha estimado en cada una de las galaxias de disco, como se describe en Dressler (1980). Los luz de los bulbos a un cierto nivel de brillo superficial fueron comparados con la luz de una secuencia de galaxias elípticas en los cúmulos de Coma y Hercules seleccionados de la fotometría amablemente donada por Oelmer (1978). En efecto, una región dada para la isofota del bulbo se determinó utilizando aproximadamente una escala logarítmica de 0 - 13. Suponiendo que la componente esferoidal en las galaxias de disco son como las galaxias elípticas hasta un nivel mucho más débil, uno puede estimar el brillo total de estas componentes. (O, aún si ésta suposición es incorrecta, las galaxias de disco y S0 se pueden estudiar en una manera consistente.)

La Figura 11 muestra una comparación de la distribución del bulbo, *dimensión* tal y como se determinó de la escala de comparación para los diferentes tipos morfológicos en 22 cúmulos con  $0.035 \leq z \leq 0.055$ . Dado que las partes internas de los bulbos no se verá afectada ó alteradas por el proceso de remoción de gas de las galaxias de disco, las distribuciones de bulbo de las galaxias de disco y las de las galaxias S0 deberían de ser muy similares si las galaxias S0 descienden de galaxias de disco típicas después del proceso de remoción de su gas. Claramente los datos muestran que no son similares dado que las galaxias S0 tienen sistemáticamente bulbos más grandes. Aún en loa cúmulos que emiten grandes cantidades de Rayos X, donde uno esperaría que los procesos de remoción de gas fueran importantes, hay una gran diferencia entre la distribución de bulbos entre las galaxias de disco y las galaxias S0 (Fig. 11).

Bierman y Shapiro (1979) han argumentado que después del proceso de remoción de gas, los discos de galaxias espirales *engordan* como una respuesta a la pérdida de masa en la forma de gas, añadiendo luminosidad a la componente esferoidal. De hecho, el contenido de gas de una galaxia de disco promedio es menor que el 10% por masa (Roberts 1975), lo cual indica que el efecto será, en el mejor de los casos, muy pequeño y debería de ser mínimo en una región donde el brillo superficial del disco es pequeño comparada con el brillo superficial del bulbo. Dado que la comparación hecha aquí está realizada en una región donde le bulbo claramente domina en ambas, las galaxias de disco y las galaxias S0, cualquier contribución adicional causada por la alteración del disco puede ser despreciada. La gran diferencia entre las distribuciones de bulbos parece ser un buen argumento muy en contra de la hipótesis del mecanismo de remoción de gas ó el mecanismo de evaporación de gas, sin embargo, existe un contra argumento que hay que considerar. Si los discos de las galaxias espirales se desvanecen una cantidad arbitraria, debido a la falta de formación estelar, por ejemplo, las pequeñas galaxias de disco con bulbo podrían salirse de esta muestra limitada en magnitud, y explicarían la falta de

galaxias S0 con pequeños bulbos. Para checar esta posibilidad el siguiente experimento se realizó. Para cada galaxia de disco se estudiaron dos componentes, una de disco y una del bulbo utilizando las magnitudes estimadas para el bulbo y toda la galaxia. El disco se hizo más débil 1 magnitud y después 2 magnitudes, la magnitud total de la galaxia se recalculó y se eliminó la galaxia de la muestra si tenía una magnitud menor que la magnitud límite  $m_v = 16.5$ . La Figura 12 muestra la comparación de los bulbos de las galaxias S0 y las galaxias de disco después de hacer más débil los disco por 0, 1 y 2 magnitudes. (La distribución de galaxias de disco se ha renormalizado de tal manera que el lado brillante, donde se garantiza que la muestra es completa ya que los bulbos mismos son más brillantes que  $m_v = 16.5$ , se ajusta a la distribución de las galaxias S0.)

Es obvio que al menos hacer más débil el disco por 2 magnitudes, es decir, 85% menos luminosidad, es requerido para que las dos distribuciones concuerden. Si se requiere que las galaxias de disco sean más débiles (más de dos magnitudes) para hacer que sea imposible detectar galaxias S0 con pequeño bulbo, uno esperaría una diferencia obvia en las funciones de luminosidad de las galaxias de disco y las galaxias S0. Por el contrario, las funciones de luminosidad de los tipos, mostrada en la Figura 13, son prácticamente *idénticas*, un resultado consistente con el trabajo de otros autores (por ejemplo, Tammann, Yahil y Sandage 1979). Más evidencia en contra de hacer más débiles a las galaxias de disco para formar S0 se puede observar al notar que la función de luminosidad de la cúmulo rico en galaxias de disco Hércules es cirtualmente idéntico al cúmulo Coma rico en galaxias S0 (Oelmer 1974). Si las galaxias de disco necesitan ser tan débiles para aparecer como S0, entonces ningún cúmulo rico en galaxias de disco en la época presente podría evolucionar a un cúmulo como el de Coma.

La extinción interna en las galaxias de disco e irregulares, la cual puede llegar a ser en promedio entre 0.5 y 1.0 mag en el azul, dependiendo de la inclinación, no ha sido considerada. Su efecto es cancelado en la discusión anterior ya que el incluir la extinción movería la función de luminosidad de las galaxias de disco hacia mayores luminosidades pero también incrementarían, en el mismo orden, la cantidad necesaria para hacer las galaxias de disco más débiles para explicar las diferencias en las distribuciones de bulbo. Se debe de tener en mente, sin embargo, que la función real de luminosidad de las galaxias de disco es más brillante que la de las galaxias S0.

Consecuentemente, parecería que uno pudiera argumentar fuertemente, como en § IV, que la mayoría de las galaxias S0 no son galaxias de disco después del proceso de remoción de su gas ya que las galaxias S0 tienen sistemáticamente bulbos más grandes y más grandes cocientes D/B. Para explicar esta diferencia, uno debería admitir que las galaxias de disco deben ser más débiles pero esto se descarta en base a las funciones de luminosidad.

Los argumentos anteriores no eliminan la posibilidad de que las galaxias de disco pudiesen sufrir efectos debido al ambiente que resulta en un patrón espiral anémico (van den Bergh 1976) ó una falta de gas comparada con las galaxias de disco en el campo (Sullivan y Johnson 1978). Tampoco los datos presentes contradicen la idea de que las galaxias S0, en algún momento en su vida, fueron galaxias de disco. Estos sistemas con bulbos grandes bien pudieron ser galaxias de disco tempranas cuando el proceso de formación estelar se llevaba a cabo en sus discos. Aquí sólo se argumenta que la abundancia de galaxias S0 en regiones de baja densidad de gas y la diferencia en las distribuciones de bulbos de las galaxias S0 y las galaxias de disco en cúmulos en la época presente indican que los mecanismos de remoción de gas no es el factor primordial en la formación ó evolución de la mayoría de las galaxias S0.

La Figura 14 muestra los valores medios y las incertidumbres de la distribución de las magnitudes para las galaxias de disco y las S0 en función de la densidad local, presentada en la misma manera que en la Figura 4. Es claro que la diferencia de la distribución de bulbos no es función de la densidad, como se esperaría si, por ejemplo, los mecanismos de remoción de gas fueran el mecanismo principal de la producción en las regiones de alta densidad, sino que debe haber otro mecanismo (por ejemplo, formación) responsable de las galaxias S0 en el campo y en los ambientes de cúmulos de baja densidad. Las dimensiones de los bulbos de galaxias de disco y de S0 (y sus luminosidades) parecen incrementarse lentamente al incrementar la densidad, pero la diferencia entre las dos distribuciones se mantiene.

De forma similar, las estimaciones del cociente D/B se calculados con estos datos muestran una gran diferencia entre las galaxias de disco y las galaxias S0 (Fig. 15). Esto está de acuerdo con el trabajo de Burstein (1979b) quien ha encontrado que las galaxias S0 del campo tienen un cociente D/B menor que las galaxias de disco en el campo. Gisler (1979) ha predicho que en cúmulos ricos, donde los mecanismos de remoción de gas por presión hidromecánica ó por evaporación se espera que sean más efectivos que en el campo, los cociente D/B para los dos tipos deberían ser iguales si la fase de remoción de gas se ha completado. El además argumenta, sin embargo, que las galaxias con una alta tasa de formación estelar, tal como indican los cocientes D/B en galaxias de tipos de Hubble Sc, deberían de ser más resistentes al mecanismo de remoción de gas, y por lo tanto, en regiones donde no a todas las galaxias de disco se les ha removido el gas, los grandes bulbos de las galaxias de disco tipo Sa serán las progenitoras de las galaxias S0. Pero la Figura 15 muestra, por el contrario, que la diferencia en el cociente D/B para los dos tipos se *mantiene* como una función de densidad. Aún más, en vez de que la distribución del cociente D/B para galaxias S0 se moviese hacia valores mayores en la región de alta densidad en la cual el proceso de remoción de gas se presume que se ha completado (indicado por el menor porcentaje de galaxias de disco), ambos cocientes

D/B de espirales y S0 disminuyen.

Se debe considerar la posibilidad de que los gradientes en las Figuras 14 y 15 son debido al efecto de selección como resultado de un límite de magnitud similar el descrito anteriormente. Esto es, si los discos han sido eliminados ó disminuidos por los encuentros de marea en las regiones de alta densidad, esos sistemas que caén debajo del límite de magnitud estarían fuera de la muestra. Los sistemas con cocientes altos D/B serían de forma obvia los más afectados produciendo la impresión de que los cocientes D/B están disminuyendo al incrementar la densidad de galaxias. Tales procesos de marea han sido discutidos en forma amplia por Strom y Strom (1978a, 1978b). Sin embargo, otra vez se requiere forzar que los discos sean más débiles por 2 magnitudes para explicar el intervalo total en los bulbos ó los cocientes D/B como función de la densidad para las galaxias de disco. (Esto se puede fácilmente apreciar comparando sólo el cambio total en la distribución de galaxias de disco con la diferencia, en promedio, entre las distribuciones de galaxias de disco y galaxias S0. La distribución de galaxias S0, como se muestra en la Figura 12, requiere de que se force que los discos sean más débiles 2 magnitudes.) Pero de la misma manera como antes, las funciones de luminosidad para las regiones de baja y alta luminosidad son prácticamente idénticas indicando que no ha ocurrido ningún proceso de debilitamiento de la luminosidad del disco (Fig. 16). Si acaso, las galaxias de disco y S0 en las regiones de alta densidad son un poco más brillantes que sus contrapartes en las regiones de baja densidad. Aparentemente entonces, el gradiente es real, es decir, la mayor dimensión de los bulbos y los menores cocientes D/B son favorecidos en regiones de alta densidad de galaxias. De la igualdad de las funciones de luminosidad parece que la luminosidad total es equivalente, pero más luminosidad está asociada en la componente esferoidal en vez del disco en regiones de alta densidad de galaxias.

## 6. INTERPRETACION

La conclusión principal de la discusión en § IV y § V es que la mayoría de las galaxias S0 no son el producto de la remoción de gas de los discos de las galaxias espirales por el proceso de presión hidromecánica ni por el proceso de evaporación. La existencia de galaxias S0 en regiones de baja densidad de gas, la baja sensibilidad de la relación población/densidad a la historia de los cúmulos (por ejemplo, relajación), y la diferencia entre los bulbos de galaxias de disco y las galaxias S0 y las distgribuciones de los cocientes D/B proveén mayor evidencia para esta conclusión.

Puesto en términos simples, la Figura 4 demuestra que los sistemas dominados por su parte esferoidal son favorecidosde mayor manera en las regiones de lata densidad de

galaxias y que las galaxias de disco e irregulares, galaxias con formación estelar activa, son predominantes solamente en regiones de baja densidad. La Figura 15 demuestra que aún en la clase de galaxias de disco, la tendencia es la de tener un cociente mayor  $D/B$  en regiones de baja densidad.

Gott (1977) argumenta que al tiempo de la formación de una galaxia ( $z \sim 20 - 30$ ), un excedente de densidad que vá a dar lugar a un cúmulo de galaxias tiene una muy pequeña amplitud, quizás un orden de magnitud menor que la amplitud de protogalaxias individuales. Por lo tanto, si las galaxias se formaron en tiempos tempranos y rápidamente ( $T_{colapso} \leq 10^9$  años) no pueden conocer, mientras se van formando, en qué clase de ambiente van eventualmente a residir, ejemplo, en un cúmulo rico ó en el campo de baja densidad. En este escenario las perturbaciones de las dimensiones de los cúmulos se hacen más importantes mucho después ( $z \leq 10$ ) y por lo tanto no debe haber ninguna relación entre la densidad local de galaxias y el tipo morfológico.

La componente de disco de las galaxias espirales, por otro lado, se ha sugerido que tienen un tiempo de formación mucho más largo ( $T_{colapso} \geq 2 \times 10^9$  años) que bien puede ser comparable a la edad del universo (Larson 1977, Gott 1977). Hay evidencia observacional que apoya esta idea de que una fracción substancial de la formación estelar en la componente de disco es relativamente reciente (Demarque and McClure 1977, Hardy 1976). Despueés de varios miles de millones de años, las perturbaciones de cúmulos han crecido considerablemente. La Figura 1 de Aarseth, Gott y Turner (1979) demuestra gráficamente que tan temprano como  $2 \times 10^9$  años después del supuesto tiempo de la formación de una galaxia ( $z = 30$ ), las variaciones de densidad de gran escala son grandes ( $\Delta\rho/\rho \geq 1$ ).

La discusión nos lleva a una explicación parcial de la relación de galaxias con respecto a su densidad/morfología/tipo. Si la formación de la componente de disco es un proceso lento, que toma, digamos, muchos miles de millones de años, entonces este proceso será interrumpido por interacciones entre galaxias, el cual incrementará en frecuencia mientras se incrementa la densidad local. En solo unos miles de millones de años la densidad local de galaxias en algunas regiones será substancialmente mayor que el promedio. Los encuentros de marea tenderán a desmotivar el desarrollo subsecuente del disco, y de hecho, el gas se calentará al tiempo que grupos pequeños se virializan, quizás deteniendo el proceso por completo (Gunn y Gott 1972). Los discos delgados en galaxias espirales asociados con los procesos de formación estelar podrían depender fuertemente en la caída de material intercúmulo y por lo tanto podrían haberse formado en escalas de tiempo aún mayores a partir de material de baja densidad. Así un cúmulo como Coma que colapsó en unos 5 a 7 miles de millones de años, quizás nunca haya incluido galaxias de disco completamente desarrolladas, y el subsecuente desarrollo de galaxias de disco

podría haber sido nulificado cuando el gas remanente se calentó a  $T \sim 10^8$  K durante la virialización.

Una idea similar ha sido discutida en detalle por Larson, Tinsley y Caldwell (1979). Ellos sugieren que la acreción de una envoltura rica en gas alrededor de una galaxia de disco reemplaza la pérdida de gas por el proceso de formación estelar en el disco, permitiendo a una galaxia de disco el continuar la formación de estrellas mucho más allá de los típicos 1 a 7 mil millones de años que dan los resultados de tasas de consumo de gas. Ellos especulan aún más que las galaxias S0 son espirales que han perdido sus envolturas ricas en gas y han consumido lo que les queda de gas en el proceso de formación de estrellas. Encuentros de marea y colisiones entre galaxias muy bien pueden desprender este gas y así contribuir al incremento de galaxias S0 en regiones de alta densidad de galaxias.

Mientras que estas ideas han sido exitosas al explicar los gradientes de población encontrados en este estudio, ellas no lo han sido para explicar los datos de la Figura 14 los cuales indican que (1) los bulbos de galaxias S0 son sistemáticamente más grandes que sus contrapartes de galaxias de disco, y (2) los sistemas con bulbos más grandes son más comunes en regiones más densas.

En lo concerniente al primer punto, estos datos muestran que las galaxias S0 no son sólo sistemas con un cociente menor D/B el cual podría explicarse por la formación incompleta del disco. Ellos son, en promedio, sistemas con bulbos absolutamente más grandes. Es por eso necesario el explicar porqué a una densidad local *dada*, las galaxias de disco con los bulbos más grandes parecen ser galaxias S0 en vez de galaxias de disco. Uno puede especular que la tasa de formación inicial de estrellas ó la eficiencia es mayor en sistemas donde la componente esferoidal domina, como es por ejemplo, en las galaxias elípticas. Eso es, si todo lo demás es igual, existe la posibilidad de haber menor cantidad de material como para continuar el proceso de formación de estrellas en el disco de una galaxia con una gran componente esferoidal. Los sistemas con grandes bulbos podrían generar choques más fuertes (Roberts, Roberts y Shu 1975) resultando en una más rápida pérdida del gas restante. El hecho de que Sc - Sb - Sa sea una secuencia donde incrementa la dimensión del bulbo y donde decrece el porcentaje de gas y polvo, es una evidencia de esta interpretación. Adicionalmente, galaxias con bulbos más grandes pueden tener, hasta cierto punto, un propio proceso de remoción de gas como resultado de vientos galácticos (Matthews y Baker 1971, Bregman 1978) tal y como fué sugerido por Faber y Gallagher (1976). El punto principal, sin embargo, es que las galaxias S0 deben de ser interpretadas como un miembro adicional a la secuencia de las galaxias de disco, lo que implica un decremento del cociente D/B y de contenido de gas cuando uno se mueve hacia tipo de Hubble más tempranos.

El segundo efecto, si se confirma con fotometría detallada, provee un gran reto a los puntos de vistas tradicionales. Esta es la observación de que las componentes esferoidales son aparentemente más grandes en regiones de alta densidad de galaxias, más luminosas, y supuestamente más masivos por un factor de 2. Si la formación de la componente esferoidal es temprana y rápida, debería de haber poca conexión entre la densidad de una región en el presente y la luminosidad del bulbo. Existen, sin embargo, al menos cuatro posibles maneras de que esto ocurra.

(1) Las galaxias se podrían formar después ( $z \leq 10$ ) cuando los excesos de densidad que van a formar cúmulos son más evolucionados. La mayor densidad en regiones que van a formar cúmulos densos podrían favorecer la formación de sistemas con bulbos más grandes en vez de la formación de galaxias de disco (ver por ejemplo Gott y Thuan 1976).

(2) Las estructuras básicas de sistemas esferoidales se podrían formar más temprano, pero la fusión puede ser importante por miles de millones de años, tiempo durante el cual sistemas más grandes se crean en regiones de alta densidad de galaxias (ver por ejemplo Toomre y Toomre 1972, Larson y Tinsley 1978). Dado que la densidad global de galaxias es mayor en épocas tempranas comparada con la actual, colisiones inelásticas por el proceso de fricción dinámica podría haber dado lugar a la creación de componentes esferoidales mucho mayores. El hecho de que las galaxias elípticas en la muestra presente no parezcan mostrar ninguna de las características de grandes bulbos al incrementar la densidad (Fig. 14), puede ser un argumento en contra de esta interpretación, sugiriendo en vez de eso, que la masa total se conserva de algún modo pero distribuida diferentemente entre el disco y el bulbo como una función de la densidad local.

(3) En épocas tempranas ( $z \geq 10$ ), la diferencia en densidad entre un protocúmulo y regiones en el protocampo es muy pequeña. Pero Gunn (1979) ha indicado que en este punto el universo está muy cercano a casi  $\rho_{crit}$ , la densidad necesaria para cerrarlo, de tal manera que diferencias pequeñas de densidad pueden traducirse en grandes diferencias en la cantidad de material ligado a una protogalaxia dada. Por lo tanto las componentes esferoidales formándose en una región protocúmulo son capaces de adquirir factores de 2 ó más masa que sus contrapartes en el campo.

(4) Las fluctuaciones de baja frecuencia (cúmulos) y las de alta frecuencia (galaxias) en el espectro inicial de perturbaciones podrían estar correlacionadas. La suposición super simplificada que se hace frecuentemente es que las fases de diferentes frecuencia de componentes del espectro de perturbaciones en el universo temprano no están correlacionadas ó "desfasadas" (Peebles 1974). Si el espectro de perturbaciones iniciales *no* está desfasado, entonces una región en la cual una perturbación con gran amplitud pero de baja frecuencia se encuentra destinada al colapso relativamente rápido para

formar un cúmulo denso, podría estar dominado por perturbaciones de gran amplitud y de alta frecuencia a la vez. Entre mayor sea la amplitud, las perturbaciones de alta frecuencia crecerán para ser galaxias más concentradas favoreciendo en este proceso la producción de galaxias elípticas y sistemas de bajo  $D/B$  en general. (esta sugerencia ha sido hecha por Gott y Thuan sin ninguna referencia explícita al hecho de que la idea de desfaseamiento ha sido abandonado.) Si tal acoplamiento existe entre las diferentes frecuencias, esto podría ayudar en explicar la tendencia general de población versus densidad local encontrada en este estudio, por ejemplo de que los sistemas de baja concentración (galaxias de disco e irregulares) son solamente comunes en regiones de baja densidad de galaxias.

Considerando nuestra total ignorancia sobre la naturaleza del espectro inicial de perturbaciones evidenciado por el hecho de que las perturbaciones requeridas para formar galaxias son ordenes de magnitud más grandes de lo que se espera de un universo temprano, uno difícilmente puede despreciar la posibilidad de que el espectro de perturbaciones no está desfasado.

El momento angular ha sido ignorado en la discusión anterior, pero pudiera jugar un papel crucial en la diferenciación de las galaxias. Aparentemente, las galaxias elípticas son rotadores lentos en comparación con las componentes esferoidales de las galaxias de disco, aunque son muy similares tanto en estructura y población estelar. Es por lo tanto, muy *improbable* que las galaxias de disco sean simplemente galaxias elípticas cuya evolución continuó sin ser perturbada por un período de tiempo más largo, permitiendo con esto la construcción de un disco prominente. La rotación de los bulbos de las galaxias de disco sugiere que se formaron de manera diferente que las galaxias elípticas lo cual añade una constricción muy retardadora a los modelos del origen del momento angular de una galaxia. Como originalmente se estipuló por Sandage, Freeman y Stokes (1970), el momento angular podría ser una de las llaves para entender la formación de galaxias, su diferenciación y su evolución.

## 7. CONCLUSION

Una relación bien definida existe cubriendo cinco ordenes de magnitud en densidad entre la densidad local de galaxias y las proporciones de diferentes tipos morfológicos. La relación es consistente con todos los trabajos previos sobre la población en cúmulos de galaxias.

Varios argumentos se han dado *en contra* la interpretación de que la razón básica para los gradientes de población sea la presión hidromecánica removiendo el gas ó el

proceso de evaporación de gas de galaxias de disco para formar galaxias S0.

(1) La relación población/densidad es continua y monótonica desde el campo de baja densidad hasta los mismos centros de cúmulos ricos. Por lo tanto grandes cantidades ( $\geq 30\%$  de galaxias S0 se encuentran en regiones de comparativamente baja densidad,  $10^2 - 10^3$  menos densas que las regiones donde los procesos que dependen de la densidad como el de remoción de gas se piensa que son importantes.

(2) La relación población/densidad es esencialmente la misma en todos los tipos de cúmulos. Específicamente esto parece excluir la posibilidad de que las galaxias S0 sea el producto principal del proceso de remoción de gas de galaxias de disco en las regiones densas de cúmulos colapsados.

(3) Los bulbos de galaxias S0 son sistemáticamente más grandes (brillantes) que aquellos de galaxias de disco. Así mismo, los cocientes D/B de galaxias de disco son mucho mayores que aquellos de galaxias S0. El forzar que los discos sean más débiles en galaxias de disco no es suficiente para explicar esta diferencia, lo cual es inconsistente con la noción de que las galaxias S0 sean galaxias de disco después de que se ha removido su gas.

Alternativamente, los gradientes de población se podrían explicar en el contexto de mayores tiempos de formación de discos en comparación con los tiempos de formación de las componentes esferoidales. Si a los discos les toma al menos varios miles de millones de años para formarse completamente, entonces la densidad de una región local puede empezar a jugar un papel en el sentido de que las interacciones y la virialización pueden detener por completo la formación del disco y la reposición de gas. En esta hipótesis los sistemas con los discos más prominentes, las galaxias de disco, requieren una gran fracción del tiempo de Hubble para adquirir, presumiblemente a través de acreción de gas intercúmulo, el material asociado con la estructura galáctica y la época presente de formación estelar. Ellas serían por lo tanto predominantes en áreas de baja densidad donde las interacciones son despreciables y la fase de virialización ocurre en un tiempo muy lejano.

Finalmente existe la sugerencia en los datos de que la componente esferoidal son más masivas en regiones de alta densidad quizás sacrificando de la masa del disco. Esto puede ser el resultado de (1) la formación tardía de galaxias, (2) fusión de galaxias, (3) un mecanismo de formación que es altamente sensible a la densidad, (4) el acoplamiento de perturbaciones de baja y alta frecuencia en el universo temprano. Este incremento en la luminosidad de las componentes esferoidales con el incremento de la densidad local pudiera tener consecuencias mucho más importantes para la formación de galaxias y la historia del universo temprano. Un estudio detallado basado en la fotometría es esencial

para confirmar este efecto.

Es un gusto agradecer a Dave Burstein, Sandra Faber, Jim Gunn, Allan Sandage, Leonard Searle, Jim Rose, Steve Shectman y Steve Strom por muchas útiles discusiones y valiosas contribuciones.

### References

- Aarseth, S. J., Gott, J. R., & Turner, E. L. 1979, *ApJ*, 228, 664.
- Abell, G. O. 1965, *ARA&A*, 3, 1.
- Bahcall, N. A. 1977a, *ApJ*, 217, L19.
- Bahcall, N. A. 1977b, *ApJ*, 218, L 93.
- Bierman, P., & Shapiro, S. L. 1979, *ApJ*, 230, L33.
- Bierman, P., & Tinsley, B. M. 1975, *A&A*, 41, 441.
- Bregman, J. N. 1978, *ApJ*, 224, 768.
- Burstein, D. 1979a, private communication.
- Burstein, D. 1979b, *ApJ*, 234, 435.
- Butcher, H. R., & Oelmer, A. 1978, *ApJ*, 226, 559.
- Cowie, L. L. & Songalia, A. 1977, *Nature*, 226, 501.
- Demarque, P., & McClure, R. D. 1977, *ApJ*, 213, 716.
- Dressler, A. 1980, *ApJS*, 42, 565.
- Faber, S. M. & Gallagher, J. S. 1976, *ApJ*, 204, 365.
- Gallagher, J. S. 1978, *ApJ*, 223, 386.
- Gisler, G. R. 1979, *ApJ*, 228, 385.
- Gott, J. R. 1975, *ApJ*, 201, 296.

- Gott, J. R. 1977, *ARA&A*, 15, 235.
- Gott, J. R., & Thuan, T. X. 1976 *ApJ*, 204, 649.
- Gregory, S. A., & Thompson, L. A. 1977, *ApJ*213, 345.
- Gunn, J. E. 1977, *ApJ*, 218, 592.
- Gunn, J. E. 1979, private communication.
- Gunn, J. E., & Gott, J. R. 1972, *ApJ*, 176,1.
- Hardy, E. 1977, *ApJ*, 211, 718.
- Hubble, E. 1936 *The Realm of the Nebula* (New Haven: Yale University Press).
- Hubble, E., & Humason, M. L. 1931, *ApJ*, 74, 43.
- Larson, R. B. 1972, *Nature*, 236, 31.
- Larson, R. B. 1976, *MNRAS*, 176, 31.
- Larson, R. B. 1977, in *Chemical and Dynamical Evolution of the Galaxy, IAU Colloq.* 45, p. 3.
- Larson, R. B., & Tinsley, B. M. 1978, *MNRAS*, 186, 503.
- Larson, R. B., Tinsley, B. M., & Caldwell, C. N. 1979, *ApJ*, 237, 692.
- Lynden-Bell, D. 1967, *MNRAS*, 136, 101.
- Melnick, J., & Sargent, W. L. W. 1977, *ApJ*, 215, 401 (MS).
- Morgan 1961, W. W. 1961, *Proc. Nat. Acad. Sci*, 47, 905.
- Oelmer, A. 1974, *ApJ*, 194, 1.
- Oelmer, A. 1977, *Highlights of Astronomy*, 4, 253.
- Oelmer, A. 1978, private communication.
- Peebles, P. J. E. 1970, *AJ*, 75, 13

Peebles, P. J. E. 1974, ApJ, 189, L51.

Rainey, G. W., & Abell, G. O. 1977, ApJ, 213, 327.

Roberts, M. S. 1975, in *Galaxies and the Universe*, ed. A. Sandage, M. Sandage, & J. Kristian (Chicago: University of Chicago Press), p 309.

Roberts, W. W., Roberts, M. S., & Shu, F. H. 1975, ApJ, 196, 381

Sandage, A. R. 1961, *The Hubble Atlas* (Washington, D.C.: Carnegie, Institution of Washington).

Sandage, A. R., Freeman, K. C., & Stokes, N. R. 1970, ApJ, 160, 831.

Sandage, A. R., & Tammann, G. A. 1981, *Revised Shapley Ames Catalog*, (Washington D. C.: Carnegie Institution of Washington), publication 635.

Sandage, A. R. & Visvanathan, N. 1978, ApJ, 225, 742.

Spitzer, L., & Baade, W. 1951, ApJ, 113, 413.

Strom, K. M. & Strom, S. E. 1978a, AJ, 83, 732.

Strom, K. M. & Strom, S. E. 1978b, AJ, 83, 1293.

Strom, K. M. & Strom, S. E. 1978c, ApJ, 225, L93.

Strom, K. M. & Strom, S. E. 1979, *Sci. Am.* April, pp 72-82.

Sullivan, W. T., & Johnson, P. E. 1978, ApJ, 225, 751.

Tammann, G. A., Yahil, A., & Sandage, A. 1979, ApJ, 234, 775.

Toomre, A. & Toomre, J. 1972, ApJ, 178, 623.

Tyler, D., & Vidal, N. 1978, MNRAS, 182, 33p.

van den Bergh, S. 1976, ApJ, 206, 883.

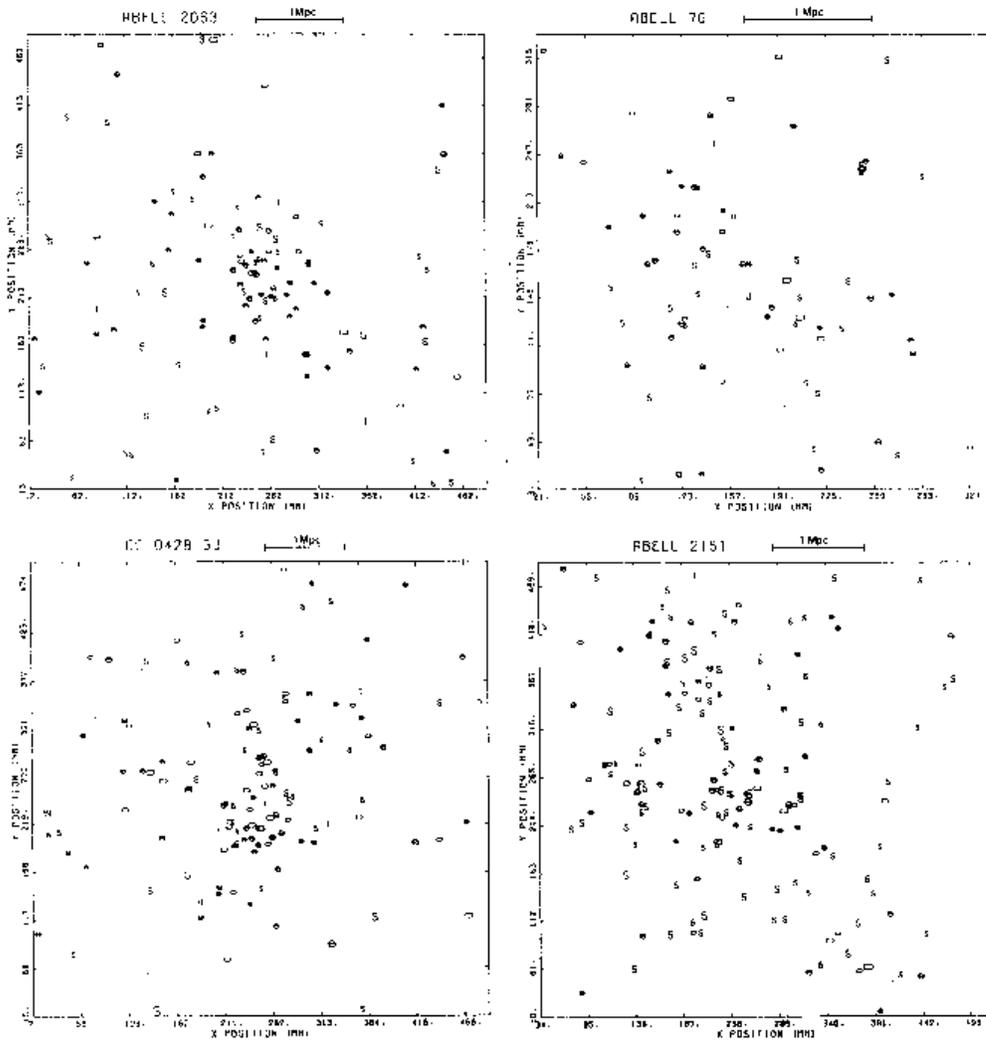


Fig. 7.— Mapas de cuatro cúmulos de la muestra representando la alta densidad central, cúmulos regulares (*izquierda*), y baja densidad central, cúmulos irregulares (*derecha*).

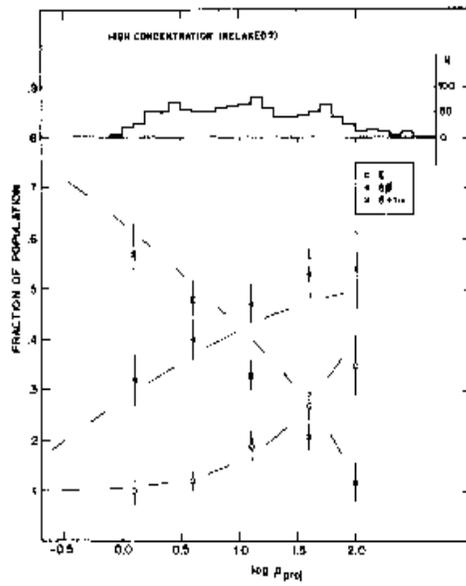


Fig. 8.— Cúmulos de alta densidad central (A151, A539, A957, A1656, A1913, A2040, A2063, 0247-31, 0428+53, 1842-63).

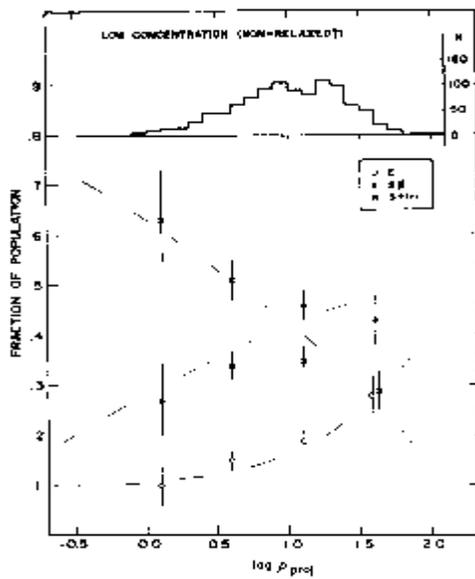


Fig. 9.— Cuatro cúmulos de baja densidad central (A76, A119, A168, A978, A979, A1674, A1736, A2151, 0030-50).

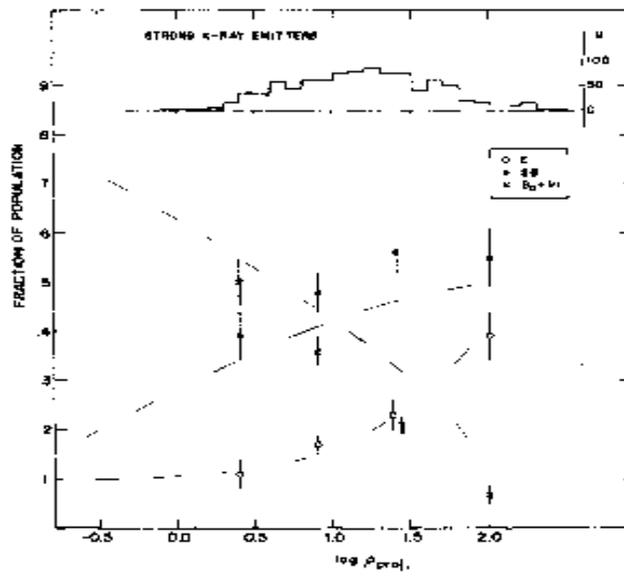


Fig. 10.— Cúmulos luminosos de Rayos X ( $L_x \geq 10^{44} \text{ erg ss}^{-1}$ ) (A119, A496, A539, A754, A1656, A2256, A2589, 2345-28).

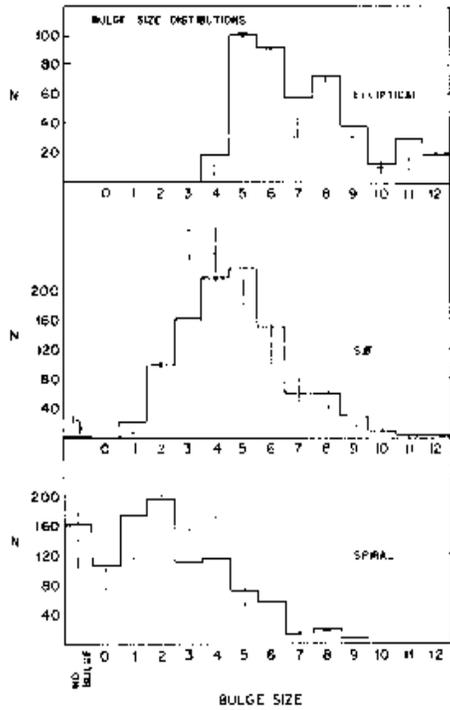


Fig. 11.— Distribuciones de número (*histogramas con línea continua*) de las dimensiones de bulbos para diferentes tipos morfológicos de 22 cúmulos entre  $0.035 \leq z \leq 0.055$ . También se muestra la distribución renormalizada (*puntos con barras de error*) de un subconjunto de los 22 cúmulos que son grandes emisores de Rayos X (A119, A496, A754).

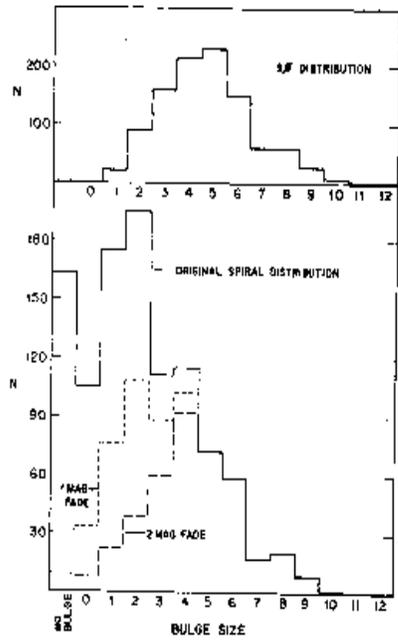


Fig. 12.— La distribución de bulbos de galaxias de disco renormalizada comparada con la distribución de S0, mostrando el efecto de incompletés si los discos de las galaxias espirales se fuerzan a ser más débiles por 1 ó 2 magnitudes.

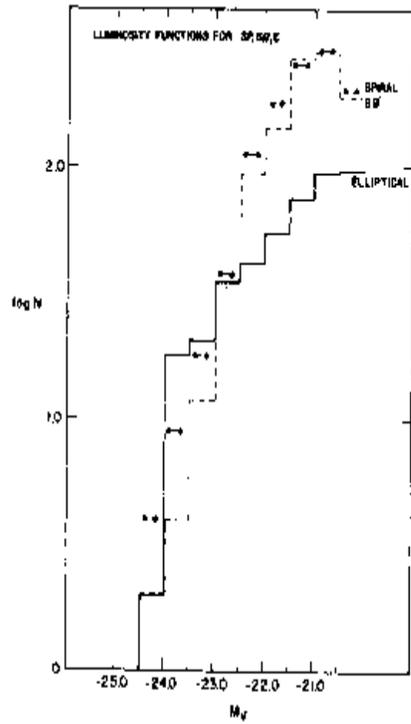


Fig. 13.— Las funciones de luminosidad de las galaxias tratadas en las Figs. 10 y 11.

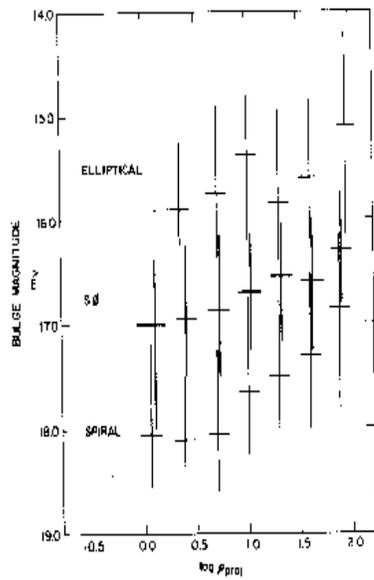


Fig. 14.— Las magnitudes de los bulbos se muestran como función de la densidad local proyectada (ver Fig. 4 y su texto). También se muestran los valores *medios* y *las incertidumbres* para la distribución agrupada en números de la magnitud de los bulbos.

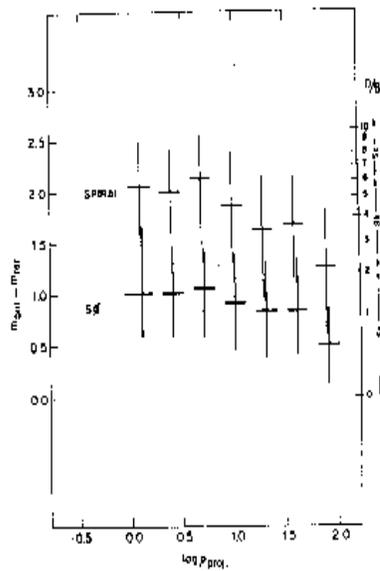


Fig. 15.— Se muestra la diferencia  $m_{bulbo} - M_{total}$  y el cociente estimado, D/B, como función de la densidad local proyectada. Se muestran también los valores *medios* y *las incertidumbres*.

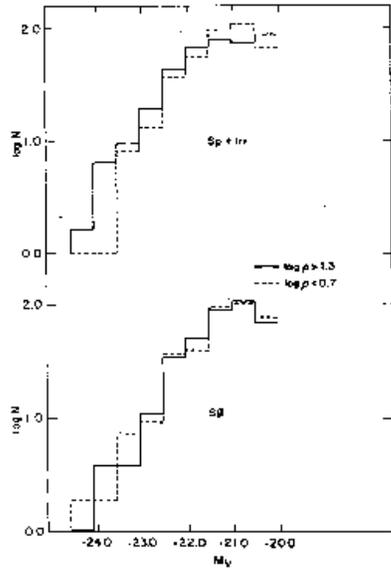


Fig. 16.— Se muestra la diferencia  $m_{bulbo} - M_{total}$  y el cociente estimado, D/B, como función de la densidad local proyectada. Se muestran también los valores *medios* y *las incertidumbres*.

Table 1: Tabla 1 Cúmulos en la Muestra

No.	Nombre	$z^a$	Tel <sup>b</sup>	N
1	A14	0.064	M	79
2	A76	0.038	D	73
3	A119	0.042	D	118
4	A151	0.053	D	105
5	A154	0.066	M	80
6	A168	0.045	M	106
7	A194	0.018	D	75
8	A376	0.047	M	120
9	A400	0.023	D	92
10	A496	0.036	D	85
11	A539	0.028	D	99
12	A548 <sup>c</sup>	0.040	D	235
13	A592	0.062	D	61
14	A754	0.054	D	150
15	A838	0.051	D	62
16	A957	0.044	D	84
17	A978	0.053	D	69
18	A979	0.055	D	87
19	A993	0.053	D	103
20	A1069	0.063	D	48
21	A1139	0.038	D	64
22	A1142	0.036	D	60
23	A1185	0.035	P	44
24	A1377	0.051	P	52
25	A1631	0.048	D	139
26	A1644	0.049	D	145

Table 1: Tabla 1 Cúmulos en la Muestra

No.	Nombre	$z^a$	Tel <sup>b</sup>	N
27	A1656	0.023	D	247
28	A1736	0.048	D	170
29	A1913	0.053	D	88
30	A1983	0.046	D	124
31	A1991	0.059	D	61
32	A2040	0.045	D	111
33	A2063	0.034	D	115
34	A2151	0.036	D	157
35	A2256	0.060	M	88
36	A2589	0.042	M	72
37	A2634	0.031	M	132
38	A2657	0.041	M	84
39	0003-50	0.035	D	80
40	0107-46 <sup>d</sup>	0.023	D	111
41	0103-47 <sup>d</sup>	0.023	D	111
42	0247-31	0.021	D	48
43	0317-54	0.055	D	66
44	0326-53	0.058	D	164
45	0329-52	0.057	D	196
46	0410-62	0.017	D	67
47	0428-53	0.041	D	132
48	0559-40	0.049	D	116
49	0608-33	0.035	D	125
50	0622-64	0.027	D	98
51	1842-63	0.015	D	55
52	2048-52	0.046	D	233
53	2103-39	0.052	D	113
54	2345-28	0.027	D	95
55	2349-28	0.028	D	68
56	Centauro	0.011	D	75

Notes.-<sup>a</sup> Las referencias de los corrimientos el rojo están dados en Dressler (1980). <sup>b</sup> D = du Pont 2.5m, M = Mayall 4m, P = Palomar 1.5m. <sup>c</sup> Posiblemente dos cúmulos. <sup>d</sup> Un cúmulo.