



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y
FOTOMÉTRICAS EN SISTEMAS TRIPLES DE
GALAXIAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C O

P R E S E N T A :

HUGO MÉNDEZ HERNÁNDEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DR: HÉCTOR MANUEL HERNÁNDEZ TOLEDO
MAYO 2010**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Propiedades Estructurales y Fotométricas en Sistemas Triples

Hugo Méndez Hernández

Hoja de Datos del Jurado:

1. Datos del alumno
Méndez
Hernández
Hugo
13 15 92 02
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
401047831
2. Datos del tutor
Dr.
Héctor Manuel
Hernández
Toledo
3. Datos del sinodal 1
Dr
Deborah
Dultzin Kessler
4. Datos del sinodal 2
Dr
Juan Carlos
Alonso Huitrón
5. Datos del sinodal 3
Fis. René
Ortega
Alvarado
6. Datos del sinodal 4
Dr.
Octavio
Valenzuela Tijerino.
7. Datos del trabajo escrito
Galaxias en Sistemas Triples
122 p
2010

A:

Laura

Hugo

Rodrigo

Por su incondicionalidad de siempre.

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ciencias

Al Instituto de Astronomía.

A Héctor por todo su apoyo y sobre todo por su amistad.

A los miembros del jurado revisores de ésta tesis.

A cada uno de ustedes que han estado ahí cuando más los he necesitado.

¿Quién soy?
Soy la torre de números anotada en una libreta
soy la Vía Láctea

¿Quién soy?
Soy el sueño de Dios en las jeringas
estoy hecho de cristales que el viento sopla
soy el futuro muerto en el pozo de los sueños

¿Quién soy?
Soy un alacrán de flores y me llamo colibrí
soy la lengua

Precaución
¿Quién soy?
Soy el Café de la Realidad que no despierta

¿Quién soy?
¿Quién soy?
agujero eléctrico en tu corazón
Soy un muerto mordéndote la entraña Tratando de escapar

Yaxkin Melchy

1 INTRODUCCIÓN	1
2 PROBLEMA DE LOS TRES CUERPOS	5
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS GALAXIAS	13
5 CLASIFICACIÓN DE LAS GALAXIAS	17
6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	20
7 FOTOMETRÍA	24
8 EVALUACIÓN MORFOLÓGICA	26
9 EVIDENCIA DE SIGNOS DE INTERACCIÓN	30
10 INFORMACIÓN PREVIA EN NED E HyperLeda	31
11 RESULTADOS	35
12 DISCUSIÓN & CONCLUSIONES	55
13 APENDICES	
A1 SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LOS TRES CUERPOS	64
A2 MOSAICOS	78
14 BIBLIOGRAFÍA	128

1. INTRODUCCIÓN

Las asociaciones de galaxias en grupos, con un pequeño número de integrantes son muy numerosas y constituyen una fracción significativa de la masa del universo. Es importante estudiarlas para poder entender la formación y la evolución de grupos más ricos y la estructura del universo a gran escala. Un ejemplo de ellos son los sistemas triples, fundamentales para entender asociaciones más complejas. Sin embargo no han recibido la atención que se merecen.

Los sistemas triples de galaxias son un tipo especial de grupos de galaxias cuyo número de miembros es el más bajo, lo cual es uno de los principales atractivos para su estudio, pues pueden ayudar a comprender la complejidad de la dinámica y la evolución de grupos más ricos. Karachentseva, Karachentsev & Shcherbanovskii (1979), fueron los primeros en compilar catálogos sistemáticos de tripletes usando métodos en dos dimensiones que toman en cuenta cantidades observables. Posteriormente esta lista fue expandida al hemisferio sur usando un criterio de selección similar. Estos grupos de galaxias fueron agrupados en los catálogos KTG¹ (Karachentseva 1979) y KTS² (Karachentseva 2000).

Estas y otras muestras han sido utilizadas como la base observacional para el estudio de las propiedades estadísticas y dinámicas en sistemas triples de galaxias por un lado y su formación y evolución desde el punto de vista de simulaciones numéricas por otro.

Muchos estudios utilizan la dinámica tratando de explicar algunas propiedades observacionales de los sistemas triples, desde considerar a las galaxias individuales como partículas (que incluyen la fricción dinámica de Chandrasekhar) hasta estudios que tratan a las galaxias como cuerpos autogravitantes. Aceves (2001) realizó un conjunto de experimentos numéricos sobre la dinámica de los sistemas triples usando un modelo de galaxia autogravitante y enfocándose en cantidades globales que pueden ser directamente comparables con las observaciones. En su estudio concluye que los KTG son probablemente los casos más extremos de sistemas triples, los cuales empezaron con configuraciones iniciales difusas, llegando a sus propiedades dinámicas actuales por medio de procesos de colapsos gravitacionales, capaces de sobrevivir sufriendo el menor número de casos de fusión de galaxias (mergers) permaneciendo muy cerca del equilibrio virial.

Los sistemas triples de galaxias ofrecen la oportunidad de estudiar la influencia directa del ambiente sobre las propiedades morfológicas de

¹ Por sus siglas en inglés Karachentseva Triplet Galaxies

² Por sus siglas en inglés Karachentseva Triplet Southern

cada miembro de un sistema triple dado. En esta tesis, llevamos a cabo la evaluación morfológica detallada de una muestra de 54 galaxias observadas utilizando un esquema de procesamiento de imágenes que permite resaltar los detalles morfológicos en las imágenes. Identificamos a las galaxias interactuantes a partir de:

- ❖ Encontrar los signos típicos de las interacciones gravitacionales
- ❖ A partir de un análisis de la distribución global de la luz con tres parámetros (CAS³) que la caracterizan: la concentración (C), la asimetría (A) y la grumosidad (S).

Utilizando información reciente de la literatura y con los resultados del análisis morfológico llevamos a cabo la evaluación del estado dinámico de los sistemas triples observados. Presentamos el método utilizado para identificar la estructura de barra en las galaxias de disco observadas y compararemos los resultados encontrados con otros resultados, correspondientes a galaxias en otros ambientes.

Más recientemente, con el acceso a diferentes bases de datos (NED⁴, HyperLeda⁵, 2dF Galaxy Redshift Survey (Colles 201), SDSS⁶ (Stoughton 2002) etc.) y con la ayuda de los catálogos generados por medio de simulaciones numéricas de alta resolución (Millenium Diaz-Gimenez et al 2008), es posible compilar nuevos catálogos de sistemas triples y continuar la investigación en volúmenes representativos, como es el caso del Supercúmulo Local y su vecindad cercana (Makarov & Karachentsev 2008). Hasta hace relativamente poco tiempo los sistemas tripletes eran excluidos de los catastros bidimensionales puesto que, se pensaba que representan una colección de galaxias de campo no relacionadas entre sí. (Valtoneen, Flin (2000)). Sin embargo, un aspecto fundamental en el estudio de los sistemas triples en el que rara vez se ha enfatizado, (quizás en parte debido a la falta de datos homogéneos y profundos) es la importancia de la alta densidad como la causa de las transformaciones morfológicas de sus galaxias miembros.

Es bien conocido que la morfología de las galaxias depende críticamente del medio ambiente local impuesto por las galaxias vecinas más cercanas además de la densidad y luminosidad a gran escala (Park 2008). En esta tesis presentamos los resultados de las observaciones fotométricas a una muestra de 54 galaxias, aparentemente asociadas en sistemas triples localizadas en el hemisferio norte pertenecientes al catálogo de galaxias aisladas en sistemas triples denominado KTG (Karachentseva 1979).

Se aplicaron una serie de procedimientos uniformes en la reducción y análisis de las imágenes observadas, en la región óptica del espectro

³ Por sus nombres en inglés Concentration (C), Asimmetry (A) y Clumpiness (S)

⁴ Por sus siglas en inglés NASA Extragalactic Database

⁵ Por sus siglas en inglés Lyon Extragalactic Database

⁶ Por sus siglas en inglés Sloan Digital Sky Survey

en los filtros B, V, R e I del sistema fotométrico Johnson Cousins con el telescopio de 1.5 m del Observatorio Astronómico Nacional (OAN, SPM). Se obtuvo un conjunto homogéneo de datos fotométricos y morfológicos que cubren un amplio intervalo de luminosidades, brillos superficiales, tipos morfológicos y colores. Hemos usado la relativa simplicidad ambiental y cercanía de estos tripletes, para lograr una mejor interpretación de su estructura así como de sus propiedades morfológicas y fotométricas. Para completar el análisis, se obtuvo información adicional de sus propiedades dinámicas, así como imágenes en las longitudes de onda del cercano infrarrojo (provenientes de la base de datos 2MASS y Spitzer⁷) y en algunos casos imágenes de color RGB (obtenidas de la base de datos SDSS). Con estas observaciones, determinaremos la fracción de galaxias en tripletes cuyas morfologías y propiedades fotométricas pudieran haber sido modificadas por procesos dinámicos en los grupos. También, se llevo a cabo una comparación con muestras de galaxias en ambientes aislados (Hernández-Toledo et al 2007, Hernández-Toledo et al 2008) y galaxias en grupos compactos (Mendes de Oliveira 1994) para una mejor interpretación del estado dinámico y propiedades morfológicas de las galaxias en sistemas triples

Comparamos los valores CAS obtenidos con aquellos para galaxias aisladas, esperando que aquellas presuntas componentes fuertemente interactuantes que forman parte de sistemas físicos muestren valores para la asimetría muy por encima de los valores típicos para galaxias aisladas.

La presente tesis está estructurada de la siguiente manera:

- ❖ Capítulo 2.- Presenta un panorama general del problema físico de los tres cuerpos, así como su relación con problemas astrofísicos. Se describe el criterio de selección utilizado en el catálogo de galaxias en sistemas triples
- ❖ Capítulo 3.- Presenta el planteamiento del problema a tratar en esta tesis
- ❖ Capítulos 4, 5.- Presentan algunas características generales de las galaxias así como algunos sistemas de clasificación de estas.
- ❖ Capítulo 6.- Presenta las técnicas utilizadas para la reducción de los datos fotométricos así como una comparación de nuestros resultados contra aquellos encontrados en la literatura.
- ❖ Capítulos 7, 8 y 9.- Presenta los métodos de procesamiento de imágenes utilizadas para el análisis de la fotometría, la evaluación morfológica, así como la evidencia de los signos de interacción de estas galaxias
- ❖ Capítulo 10.- Presenta la información recabada de la literatura para nuestra muestra de galaxias.
- ❖ Capítulo 11.- Muestra nuestros resultados fotométricos, morfológicos, evidencias de interacción, una evaluación sobre el estado dinámico de los sistemas triples a partir de los parámetros dinámicos y una evaluación morfológica alternativa a partir de la distribución global de luz emitida en diferentes frecuencias ópticas y que permiten identificar a las galaxias más fuertemente interactuantes a partir de los parámetros CAS.

⁷ Imágenes provenientes del telescopio espacial Spitzer, correspondientes a longitudes de onda en rayos X.

- ❖ Capítulo 12.- Resume y discute los resultados obtenidos y presenta las conclusiones del presente trabajo.

§ 2 PROBLEMA DE LOS TRES CUERPOS

El movimiento de un sistema de dos cuerpos que siente la influencia de una fuerza en dirección de la línea que conecta a los centros de masa de ambos cuerpos, es un problema físico de suma importancia. Esto puede ser ejemplificado en un sinnúmero de cuerpos celestes como: planetas (en el caso de los sistemas planetarios), estrellas (cuando se trata de cúmulos estelares), galaxias (en el caso de cúmulos de galaxias), o cúmulos de galaxias (para simulaciones cosmológicas), así como en interacciones nucleares de dos cuerpos tales como la dispersión de partículas α por el núcleo. Incluso en tiempos de la pre-mecánica cuántica el átomo de hidrógeno era descrito en términos de un problema clásico de dos cuerpos bajo la acción de una fuerza central.

El problema de dos cuerpos interactuando gravitacionalmente es bien conocido, así como su solución. Sin embargo, cuando nos referimos a problemas con un número mayor de integrantes ($n > 2$) las cosas se complican y dejan de tener soluciones triviales. Por tanto un sistema con tres integrantes ($n = 3$), es el sistema de frontera que divide a un problema netamente analítico, de uno numérico que depende directamente de sus condiciones iniciales y que por tanto, puede ser un sistema caótico.

El movimiento de sistemas de tres cuerpos o cuatro, bajo la acción de su atracción gravitacional, ha sido estudiado desde los tiempos de Newton. Sin embargo su entendimiento total no ha mostrado un gran progreso debido a la complicación natural de sus soluciones, sus orbitas en la mayoría de los casos no pudieron ser calculadas sino hasta la aparición de las primeras computadoras aplicando herramientas numéricas apropiadas. No obstante, la solución del problema de n cuerpos involucra dinámica caótica.

El caos hace que el problema se vuelva poco familiar y difícil en algunos casos, aunque en otros simplifica el tratamiento del mismo. Actualmente el problema es reconocido como una herramienta estándar en algunas áreas como la astronomía y la astrofísica, tales como el sistema solar, mientras que en otras áreas aun es nueva y poco conocida.

2.1 PROBLEMA DE LOS 3 CUERPOS EN LA ASTROFÍSICA

El movimiento de dos cuerpos que se encuentran bajo la acción de una fuerza central y que no están sujetas a fuerzas externas es soluble analíticamente. Si la fuerza de interacción no está definida términos de potencias, entonces las ecuaciones de movimiento no pueden ser expresadas en términos de funciones simples, pero el movimiento siempre puede ser expresado en términos de una integral que puede

ser resuelta. La adición de un tercer cuerpo al sistema, conduce al problema a una serie de términos finitos en funciones elementales sin solución, es decir que el problema de movimiento de tres cuerpos, en movimiento interaccionando gravitacionalmente, no tiene solución analítica conocida. A pesar de esto, algunos aspectos pueden ser sujetos de análisis. Por ejemplo, si las condiciones iniciales son tales que los vectores de velocidad de los tres cuerpos yacen en el plano definidos por ellos, por ende su movimiento queda constreñido al mismo plano.

El **problema restringido de tres cuerpos**, toma en cuenta el caso en el que la masa del tercer objeto, en cuestión, es despreciable en comparación con los dos objetos iniciales, los cuales se mueven en orbitas circulares alrededor del centro de masa de los mismos, es decir, el tercer objeto no perturba el movimiento de los objetos iniciales con masas mayores. Es por eso que se desean conocer los aspectos en los cuales el problema permanece estable, es decir queremos saber cuáles son los puntos de equilibrio en los cuales el tercer cuerpo permanece en equilibrio con los otros dos cuerpos. La ecuación i' describe la condición de equilibrio del sistema. Es decir dados dos cuerpos de masas M_1 y M_2 bajo orbitas circulares alrededor de su centro de masa, se coloca un tercer objeto de masa m en posición de equilibrio moviéndose alrededor del origen con velocidad angular ω . La masa M_1 ejerce una fuerza F_1 en m en el punto $P(x, y)$ y M_2 una fuerza F_2 (ver figura 1). Si m está en equilibrio con respecto a M_1 y M_2 obtenemos:

$$mr\omega^2 e_r + F_1 + F_2 = 0 \quad (i')$$

Resolviendo la ecuación i' , se obtienen 5 puntos de equilibrio (ver figura 2). De los cuales 3 de ellos se encuentran colineales a los cuerpos de masas M_1 y M_2 (puntos de equilibrio inestables) y dos de ellos forman triángulos equiláteros con el tercer cuerpo (puntos de equilibrio estables). Para ver la solución detallada del problema restringido de tres cuerpos, vea el Apéndice 1.

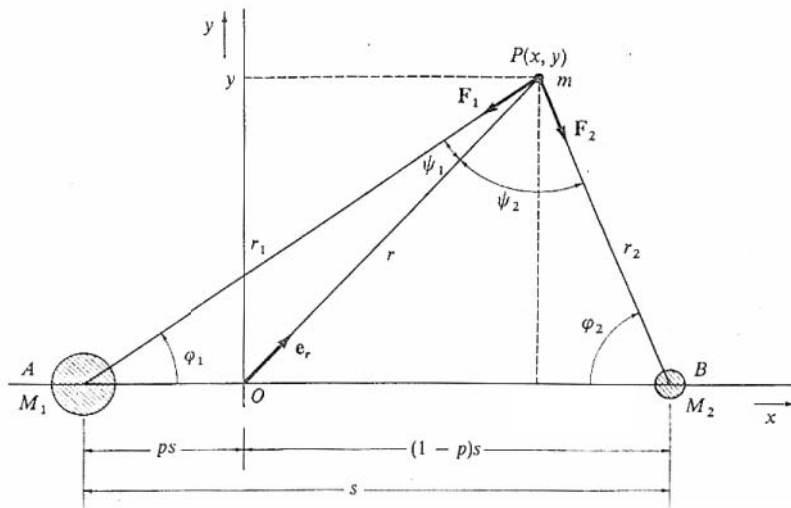


Figura 1. Diagrama esquemático de la posición del tercer cuerpo de masa m y de los cuerpos de masa M_1 y M_2 moviéndose bajo atracción gravitacional en órbitas circulares.

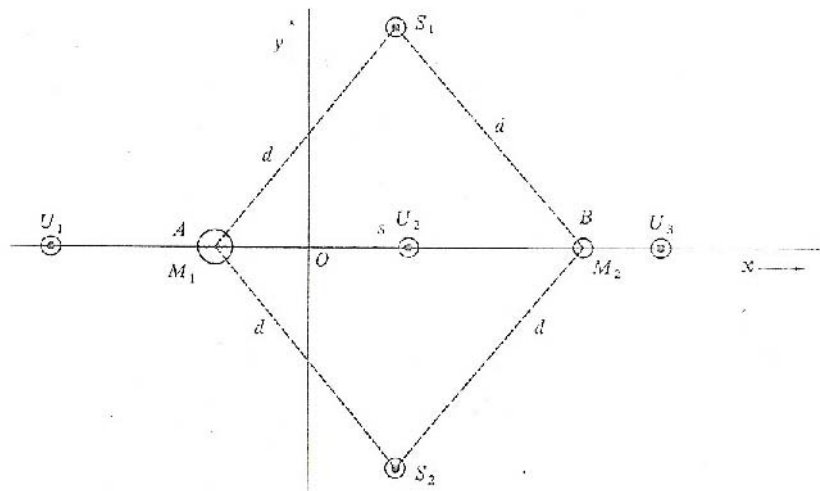


Figura 2. Se pueden observar los 5 puntos de equilibrio, de los cuales 3 de ellos se encuentran colineales a los cuerpos de masas M_1 y M_2 (puntos de equilibrio inestables) y dos de ellos forman triángulos equiláteros con el tercer cuerpo (puntos de equilibrio estables).

2.2 PANORAMA ACTUAL DE LOS SISTEMAS TRIPLES DE GALAXIAS

En 1979 Karachentseva generó un catálogo de 85 sistemas de galaxias triples, a partir de placas fotográficas de Monte Palomar. Éstos, fueron organizados de acuerdo a su configuración aparente proyectada en el cielo en tres categorías: L, T y D⁸ (ver figura 3). Más tarde Agekian y Anosova (1967), propusieron un espacio de configuraciones en el cual se puede representar cualquier triángulo (ver figura 4) asociado a cualquier configuración de los sistemas triples. El lado AB es el lado más largo del triángulo normalizado a la unidad, DB es el segmento de

⁸ Por sus nombres en inglés Line, Triplet y Double.

un círculo con radio AB centrado en A y CD es normal a AB , con 5 espacios de configuración A, D, H, M, L ⁹.

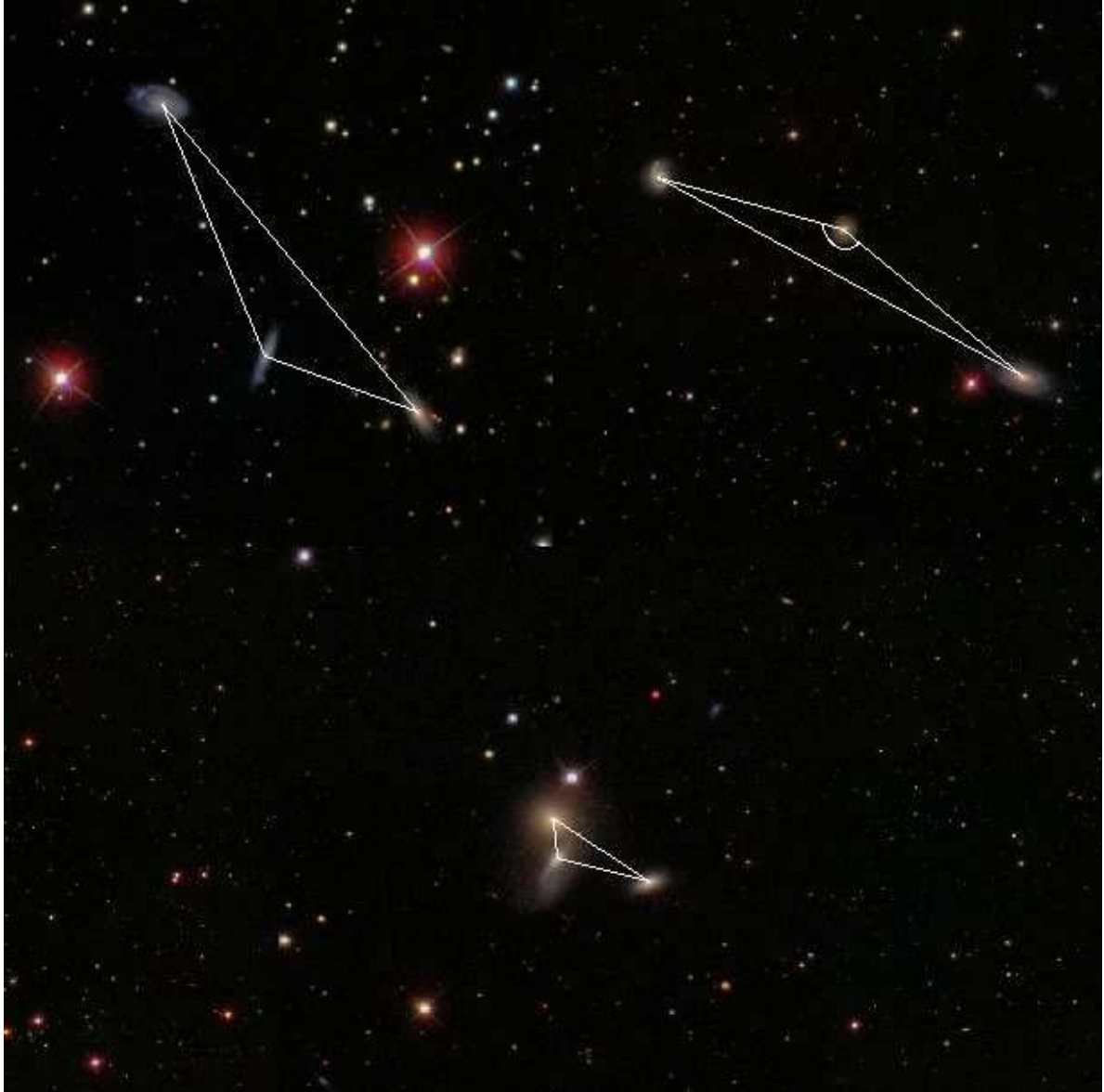
Posteriormente, Anosova (1993) estudia las configuraciones de los sistemas triples, bajo modelos estadísticos, en los que compara valores matemáticos esperados para una configuración observacional dada y estudia la distribución aleatoria de las configuraciones de los tripletes en ese espacio, tomando en cuenta algunas posibles transiciones entre las zonas. A pesar de que existen ciertos problemas en su modelo como efectos de proyección y tomar en cuenta solo algunos parámetros que pudieran afectar las configuraciones, obtiene una distribución para los sistemas triples similares a los sistemas triples observados. En este nuevo espacio de configuraciones, es posible dividir los sistemas triples como tripletes físicos confiables, tripletes físicos probables, tripletes ópticos probables y tripletes ópticos confiables, solo a partir de su velocidad radial.

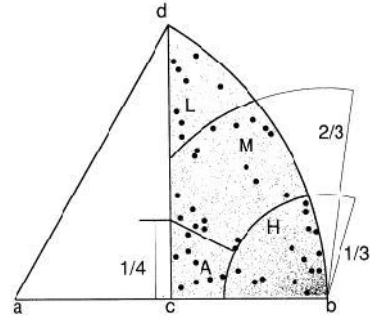
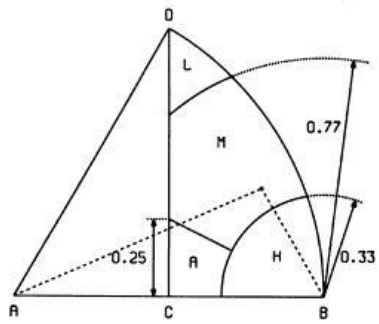
De los 84 sistemas triples del catálogo KTG obtiene 58 sistemas físicos y 25 sistemas ópticos. Además, dichos sistemas tienden a ser no jerárquicos sino más bien a tener una configuración de triángulos equiláteros. A pesar de lo anterior, no existe hasta la fecha un estudio observacional sistemático que permita comprobar o refutar dichas predicciones.

En trabajos posteriores como Chernin, (1990) se estableció un exceso de masa real sobre la masa lumínica por un factor de 4, evidenciando la presencia de materia oscura en estos sistemas. Lo cual a pesar de no ser contundente, podría ser una de las razones por las cuales existe una inconsistencia entre los modelos teóricos, para el sistema de tres cuerpos y las observaciones para los mismos sistemas Chernin (1993) como el exceso de masa o bien el exceso de ciertas configuraciones de los Tripletes.

A su vez Zheng (1993) llevó a cabo simulaciones con $n=5$ galaxias y proponiendo evolucionen hacia un sistema triple, obtiene el mismo déficit de sistemas jerárquicos en la distribución del diagrama AA (ver figura 4). Sin embargo obtiene un 28% de galaxias tempranas producto de fusiones, el cual aumenta a un tercio cuando se toman las simulaciones con sistemas iniciales $n=4$. Hasta este momento hay una falta de sistemas jerárquicos en la distribución de las configuraciones de los sistemas, una presencia de materia oscura primordial en la evolución de los sistemas. Sin embargo, Aceves (2001) encuentra una posible causa y es que los sistemas jerárquicos evolucionan de manera tan rápida que ya se han fusionado (mergers) y estos han dejado de ser sistemas triples para convertirse en sistemas binarios.

⁹ Por sus nombres en inglés Allagment, Hierarchical, Middle y Lagrangian.





10

$$a_1 \quad a_i \quad a_1$$

$$\frac{x_{13}}{x_{1i}} \quad x \quad \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix}$$

configuración doble la separación entre dos componentes es menor a la separación de cualquiera de ellas dos y la tercera por un factor de tres (ver ecuación iii). En una configuración de línea, la separación entre dos componentes y la tercera es similar (ver ecuación iv) Finalmente en una configuración de triángulo sus separaciones relativas difieren por un factor no mayor a dos (ver ecuación v).

$$\frac{X_{BC}}{X_{AC}} < \frac{1}{3} \quad (iii)$$

$$X_{AC} \approx X_{BC} \quad (iv)$$

$$X_{AB} \approx X_{BC} \approx X_{AC} \quad (v)$$

Algunas propiedades del catálogo:

- ❖ 84 sistemas triples en total
- ❖ Sus componentes son identificadas con las letras a, b y c en función de su ascensión recta. La componente a tendrá la menor ascensión recta mientras que la c tendrá la mayor.
- ❖ La distribución original por tipos morfológicos es: Galaxias tempranas (E-S0) 24%, galaxias tardías (Sa-Im) 76%
- ❖ La distribución original de distribuciones aparentes en el cielo de los 84 tripletes en las diferentes configuraciones es: 38% doble, 13% lineal y 49% triangular.

§ 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde los trabajos pioneros de Holmberg (1940), Aladin (1960), Toomre (1972), hemos aprendido mucho sobre los efectos que las interacciones gravitacionales producen en la estructura y morfología de las galaxias elípticas y de disco. Actualmente, podemos identificar un buen número de estructuras morfológicas asociadas con la interacción gravitacional, lo cual permite distinguir la asociación física de las galaxias en una agrupación.

A partir de un conjunto de observaciones ópticas profundas y homogéneas en las bandas fotométricas B, V, R e I en un subconjunto de 54 galaxias del catalogo de galaxias en sistemas triples (Karachentseva 1979), identificamos los signos de interacción y comprobamos la asociación física de estas galaxias en sistemas triples. Por diversas razones, los sistemas triples de galaxias no han sido estudiados en detalle observacionalmente, es por eso que el objetivo de esta tesis, es demostrar a partir de observaciones fotométricas y de las perturbaciones morfológicas que en ellas se pueden apreciar, que los sistemas triples pueden formar asociaciones físicas reales y que su estudio, por tanto ofrece una oportunidad única para extender en detalle los efectos de las interacciones galaxias-galaxia, así como los efectos dinámicos globales que produce las interacciones entre más de dos galaxias.

§ 4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS GALAXIAS

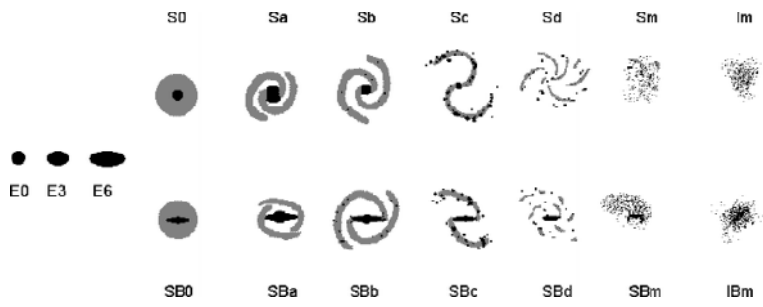
El universo contiene luz proveniente de estrellas, ondas de radio, fotones de altas energía, emisión remanente de fondo en microondas, además de contar con materia oscura y materia ordinaria. La mayor parte de la materia detectable se encuentra localizada dentro de las galaxias. Las galaxias se pueden localizar en diversos ambientes: de manera aislada, formando grupos de galaxias (como el Quinteto de Stefan), en cúmulos y en súper cúmulos. Tal como lo hace nuestra galaxia; la Vía Láctea forma parte de un grupo local del cual forman parte tres galaxias principales: Andrómeda, La Vía Láctea y la Galaxia del Triángulo, las cuales a su vez tienen a galaxias más pequeñas orbitando a su alrededor. Este Cúmulo Local a su vez se encuentra interaccionando con otros cúmulos como el Cúmulo de Virgo, los cuales aunados a otros cúmulos forman parte del Súper Cúmulo Local.

La mayoría de las galaxias se formaron en el primer billón de años después del Big Bang y otras se forman a partir de las colisiones existentes entre ellas. Las galaxias están formadas por estrellas que permanecen unidas gracias a la interacción gravitacional. Éstas, se encuentran separadas entre sí, de tal forma que la mayor parte del espacio dentro de una galaxia está vacío alternado por espacios llenos de Hidrógeno en forma gaseosa, polvo y otros componentes. El ambiente juega un papel importante en su formación pues determina la estructura de las galaxias.

Messier fue de los pioneros en la observación de galaxias y produjo un catálogo de los 103 objetos nebulosos más brillantes en el firmamento, en 1780, donde la mayor parte de ellos se sabe que son galaxias. En 1781, Herschel, realizó observaciones de unas 2000 galaxias que años más tarde se convertirán en el General Catalogue of Galaxies. En 1845 Lord Rosse distingue el primer patrón de una galaxia al observar a M45 como una galaxia espiral, hasta ese momento las galaxias eran observadas como manchones difusos. Gracias al uso de placas fotográficas en los observatorios se logran hacer mejores observaciones logrando estructuras más definidas, lo cual permitió a E. Hubble, proponer un sistema de clasificación que distingue las formas básicas de las galaxias: elípticas, lenticulares, espirales e irregulares.

4.1 GALAXIAS ELÍPTICAS

Debido a la proyección de los objetos celestes, estas parecieran ser óvalos aplanados en un plano de dos dimensiones y una buena aproximación a su forma aplanada sería la de una elipse con dos



formadas por estrellas de poca masa muy viejas, por lo que su color es rojo. Las galaxias lenticulares al carecer de estructura espiral se cree que son galaxias en estados de transición, debido a transformaciones morfológicas que han sufrido muy probablemente por interacciones con el medio ambiente que le rodea, como en el caso de los cúmulos ricos de galaxias.

4.3 GALAXIAS ESPIRALES

Las galaxias espirales a diferencia de las elípticas, son planas y presentan estructura de disco. Éstas están formadas por estrellas viejas, aunque también contienen gran cantidad de estrellas jóvenes debido al hidrógeno, polvo y nubes moleculares que permiten el nacimiento de nuevas estrellas. Estas regiones generalmente se encuentran en las zonas de los brazos y se pueden observar como pequeños manchones o regiones grumosas dentro de ellos.

Una primera clasificación, de estas galaxias, fue propuesta por Hubble (1926); donde clasifica a las galaxias espirales en Sa, Sb y Sc, tomando para ello tres parámetros:

- ❖ El tamaño del bulbo con relación al disco.
- ❖ Lo apretado de los brazos.
- ❖ La resolución de estrellas y regiones HII en el disco.

Años más tarde Gerard de Vaucouleurs hace una ampliación de la clasificación anterior agregando los tipos Sd y Sm y añadiendo, también, los tipos intermedios entre cada uno de ellos Sab, Sbc; Scd, Sdm.

Así pues, una galaxia Sa procesa el gas contenido más rápidamente por lo que tiene una menor formación estelar. Su disco, rico en metales es más rojo y sus brazos son más pequeños y pegados a la región central. Una forma de medir el enrollamiento de los brazos es mediante el ángulo de enrollamiento (*pitch angle*); una galaxia Sa, tendrá un ángulo de enrollamiento 5° , mientras que el ángulo de enrollamiento para una galaxia del tipo Sc será de 20° . Otras características de estas galaxias son la presencia de barras y anillos.

Las barras son un aglomerado de estrellas en la región central que se mueven como cuerpo sólido manteniendo su forma mientras orbita; en caso de haber presencia de una barra esta se indicará con una letra B en su clasificación. Aun, cuando, no se sabe con exactitud el origen de las barras, se presume que éstas pueden ser favorecidas debido a perturbaciones dentro de las galaxias, (las cuales llevan a su formación), ésta depende directamente de su relación con el disco y con el bulbo, pues algunas propiedades de las barras, como su tamaño, dependen de su interacción con éstos. A pesar de lo anterior, estas estructuras también dependen del medio ambiente global, en el cual está inmersa la galaxia huésped, pues recientemente se ha observado

que la fracción de barras aumenta en ambientes más densos. Los anillos son otro tipo de estructura que se puede encontrar en galaxias de disco. Éstos, pueden ser internos o externos, los internos se encuentran en la región central, encerrando al bulbo y los externos se encuentran encerrando a toda la galaxia, por fuera de los brazos. Se cree que el origen de los anillos es debido a resonancias internas en las órbitas de las barras, las cuales llevan a la creación de anillos internos, externos y polares.

§ 5 CLASIFICACIÓN DE LAS GALAXIAS

La clasificación clásica morfológica es útil puesto que logra, en cierto modo, distinguir galaxias físicamente diferentes. (Kormendy 1982)

El objetivo de un morfologista de galaxias, es reconocer el arquetipo al cual pertenece una galaxia y organizar estos arquetipos de galaxias en un esquema simple, que eventualmente pueda ser interpretado en términos de evolución galáctica. (van den Bergh).

La clasificación de las galaxias a primera aproximación, se reduce a conjuntar galaxias que tengan ciertas características comunes. Así, las primeras clasificaciones básicas que se hicieron, tan solo distinguían, la forma general de éstas, como elípticas, esferoidales, espirales, e irregulares.

5.1 DE VACOULEURS

Esta reclasificación, propuesta por Gerard de Vacouleurs (ver tabla 1) es un mejoramiento de la clasificación de Hubble. Esta tiene 3 características principales: amplía la clasificación general al agregar a las galaxias lenticulares entre las E y Sa, añade clasificaciones para las galaxias espirales tardías: Sd, Sm e Im. Dentro de las galaxias barradas, añade la nomenclatura AB que se refiere a estructuras aparentes de barra, para las galaxias espirales. Por último, añade nomenclaturas para características que pudieran aparecer en las galaxias espirales, tales como: r (anillos), rs (anillos aparentes) y s (brazos espirales puros). Además, agrega un parámetro T que está relacionado con el color integrado de las galaxias.

Hubble	E	E/S0	S0	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	ScIr	Ir
de Vacouleurs	E	L	L	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Scd	Sdm	Im
T	5	3	2	0	1	2	3	4	6	8	10

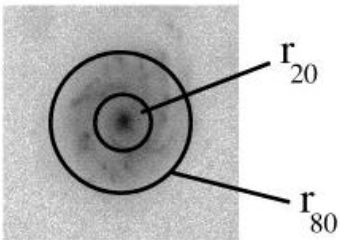
Tabla1. Clasificaciones morfológicas.

5.2 CAS

En 2003 Conselice propuso una clasificación morfológica alternativa de las galaxias a partir de parámetros físicos y no solo a partir de la forma óptica aparente. Estos parámetros son la Concentración (C), la Asimetría (A) y la Grumosidad (S). A partir de este trabajo y de una muestra de galaxias localizadas, en diferentes ambientes, encuentra valores típicos de los parámetros CAS como función de los tipos morfológicos existentes.

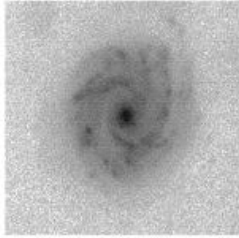
Tipo	C(R)	A(R)	S(R)
Elípticas	4.4 ± 0.3	0.02 ± 0.02	0.00 ± 0.04
Discos tempranos (SaSb)	3.9 ± 0.5	0.07 ± 0.04	0.08 ± 0.08
Discos Tardíos (ScSd)	3.1 ± 0.4	0.15 ± 0.06	0.29 ± 0.13
Irregulares	2.9 ± 0.3	0.17 ± 0.10	0.40 ± 0.20
Discos Edge on	3.7 ± 0.6	0.17 ± 0.11	0.45 ± 0.20
ULIRGs	3.5 ± 0.7	0.32 ± 0.19	0.50 ± 0.40
Starbursts	2.7 ± 0.2	0.53 ± 0.22	0.74 ± 0.25
Elípticas enanas	2.5 ± 0.3	0.02 ± 0.03	0.00 ± 0.06

$$C = 5 \log \left(\frac{r_{80}}{r_{20}} \right)$$

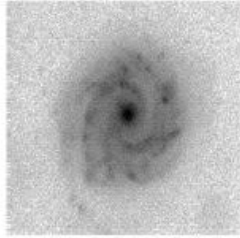


$$C = 5 \log \left(\frac{r_{80}}{r_{20}} \right)$$

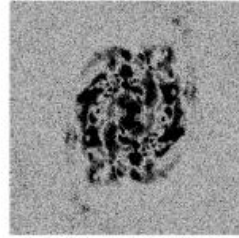
$$A = \frac{\text{abs}(I-R)}{I}$$



I



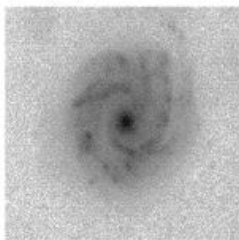
R



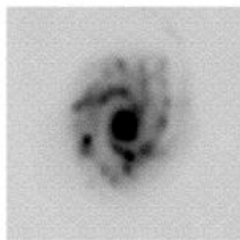
abs(I-R)

$$A = \frac{\text{abs}(I-R)}{I}$$

$$S = \frac{I-B}{I}$$



I



B



I-B

$$S = \frac{I-B}{I}$$

§ 6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Las observaciones utilizadas para este trabajo fueron adquiridas en Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, en el telescopio óptico de 1.5m de diámetro. Se utilizó un CCD Site1 sensible en la región óptica del espectro electromagnético (0.309-703 nm) con 1024 x 1024 pixeles leídos en un formato 2x2 dando un campo total de 4.3' a una escala de 0.51''/pixel.

Las imágenes CCD obtenidas del telescopio fueron procesadas en la plataforma computacional IRAF¹¹. Las imágenes fueron corregidas por *bias*, *flat* y *overscan* siguiendo procedimientos estándares.

6.1 CALIBRACIÓN FOTOMÉTRICA

Las mediciones fotométricas, en cada una de nuestras imágenes, consideraron factores que las pudieran afectar, tales como: la óptica del telescopio, filtros utilizados y eficiencia del detector. Por tanto se debe hacer una transformación a un sistema estándar de magnitudes fotométricas.

Lo anterior se realiza mediante la calibración con estrellas estándares. Esto se logra observando un campo de estrellas como los señalados por Landolt (1992) a diferentes alturas sobre el horizonte. Puesto que las magnitudes de dichas estrellas estándares son bien conocidas, se tiene una buena comparación de nuestras magnitudes observadas.

Las estrellas se midieron de tal forma que el radio de apertura correspondiera a tres veces su ancho a potencia media, logrando que todo el flujo de una estrella dada, esté contenido en esa apertura, obteniendo así una magnitud instrumental m_λ .

La magnitud anterior habrá que corregirla por efectos de absorción de la atmósfera de tal forma que:

$$M_{A\lambda_1} = m_{\lambda_1} - \chi_{\lambda_1} K_{\lambda_1} \quad (ix)$$

Donde:

- ❖ χ es la masa de aire, definida como $\chi = \sec z$ - la altura de la estrella; con $z=90^\circ$. La altura de la estrella definida respecto al horizonte del observador.
- ❖ K_λ es el coeficiente de extinción, el cual incluye los efectos de absorción y dispersión de la atmosfera. Éste, se calcula a partir de observaciones de estrellas a diferentes masas de aire y en diferentes filtros.

Para hacer la transformación de las magnitudes instrumental a un sistema de magnitudes estándares, hay que aplicar las ecuaciones (x, xi) de transformación

¹¹ Por sus siglas en inglés Image Reduction and Analysis Facility

$$M_{\lambda_1} = \alpha_{\lambda_1} + \beta_{\lambda_1}(M_{A\lambda_1} - M_{A\lambda_2}) + M_{A\lambda_1} \quad (x)$$

$$M_{A\lambda_1} = m_{\lambda_1} - \chi_{\lambda_1} \kappa_{\lambda_1} \quad (xi)$$

Donde:

- ❖ M_{λ_1} Magnitud instrumental transformada al sistema de magnitudes estándares.
- ❖ $M_{A\lambda_1}$ Magnitud instrumental corregida por efectos de extinción.
- ❖ $(M_{A\lambda_1} - M_{A\lambda_2})$ Color
- ❖ β_{λ_1} Término de color
- ❖ α_{λ_1} Punto cero de la transformación.

Las ecuaciones x y xi son transformaciones que incluyen los cuatro filtros B, V, R, e I, sin embargo en nuestra temporada de observación hay otras combinaciones posibles en los filtros (BVR, BRI, VRI, B) cuyos coeficientes de transformación resultan diferentes pero que se obtienen de manera análoga.

6.2 MAGNITUDES TOTALES APARENTES

Para obtener las magnitudes de cada una de nuestras galaxias, es necesario corregir las imágenes por rayos cósmicos y editar de ellas las estrellas que pudieran contaminar nuestras mediciones. Las mediciones se realizaron en el ambiente IRAF utilizando diferentes rutinas específicas dentro del paquete. Hay que hacer notar que debido a la naturaleza propia de nuestras galaxias, la luz correspondiente a éstas puede estar contaminada por la luz de otra galaxia en su cercanía, por lo que no se puede proceder de la misma forma de medición como en el caso de galaxias más aisladas.

Para ello se utilizan rutinas como *polymark* que permiten dibujar contornos que definen cuidadosamente los límites de la galaxia en cuestión, con la intención de tomar sólo en cuenta, el flujo correspondiente a la galaxia medida y no tomar dentro de dicha medición flujo proveniente de su compañera más cercana. Una vez hecho esto, con la ayuda del contorno antes hecho y utilizando ahora la rutina *polyphot*, se mide el flujo contenido dentro de esta "apertura". Esta apertura se desplazó ligeramente alrededor del centro aproximadamente diez veces obteniendo un promedio de dichas mediciones. Los valores de las magnitudes totales aparentes obtenidos para nuestra muestra de 54 galaxias pueden apreciarse en la tabla 3.

6.3 ERRORES ASOCIADOS

Las magnitudes totales tienen errores asociadas al cálculo de la magnitud instrumental, efectos atmosféricos, errores por la transformación al sistema estándar y la contribución del cielo en la estimación de las magnitudes totales de las galaxias.

$$M_{\lambda_1} = \alpha_{\lambda_1} + \beta_{\lambda_1}(M_{A\lambda_1} - M_{A\lambda_2}) + M_{A\lambda_1} \quad (xi)$$

Es decir el error asociado es:

$$\delta M_{\lambda_1} = \delta \alpha_{\lambda_1} + \delta \beta_{\lambda_1} (M_{A\lambda_1} - M_{A\lambda_2}) + \beta_{\lambda_1} (\delta M_{A\lambda_1} - \delta M_{A\lambda_2}) + \delta M_{A\lambda_1} \quad (xiii)$$

Donde:

- ❖ M_{λ_1} Magnitud instrumental transformada al sistema de magnitudes estándares.
- ❖ $\delta M_{A\lambda_1}$ Error asociado a la magnitud instrumental corregida por efectos extinción.
- ❖ $(M_{A\lambda_1} - M_{A\lambda_2})$ Término de color
- ❖ $\delta \beta_{\lambda_1}$ Error asociado al término de color
- ❖ $\delta \alpha_{\lambda_1}$ Error asociado al punto cero de la transformación
- ❖ $\delta M_{A\lambda_1} - \delta M_{A\lambda_2}$ Error asociado al término de color

De esta forma, encontramos que los valores típicos de los errores asociados a cada uno de los filtros B, V, R, I son 0.11, 0.11, 0.11 y 0.12 respectivamente. Recordando que para las combinaciones diferentes de filtros se hacen los cálculos de manera análoga y escribiendo la correspondiente ecuación de transformación. Una vez calculado el error asociado, tanto a las ecuaciones de transformación como a las correcciones por la atmósfera, falta calcular el término asociado a la contribución del cielo. Estos errores se calculan por filtro, midiendo para una galaxia dada a aperturas diferentes la diferencia en magnitudes. Esta diferencia se debe a la contribución del cielo. Los errores debidos a la contribución del cielo son: 0.037 0.038 0.054 0.073 para B, V, R, e I respectivamente.

$$\delta M_{T\lambda} = \sqrt{\delta M_{A\lambda}^2 + \delta \text{cielo}_\lambda^2} \quad (xiii)$$

Aplicando la ecuación xiii y haciendo los cálculos correspondientes encontramos que los errores típicos por filtro son: 0.04, 0.04, 0.07 y 0.07.

KTG	B	V	R	I	B-V	B-R	B-I
KTG02a ^c	14.82	13.56	13.12	12.08	1.26	1.70	2.73
KTG02b ^c	14.16	13.94	13.05	11.95	0.23	1.11	2.22
KTG03a	14.16	13.94	13.05	11.95	0.23	1.11	2.22
KTG03b	13.87	12.88	12.28	11.50	0.98	1.58	2.36
KTG03c	14.80	13.83	13.20	12.43	0.97	1.61	2.37
KTG04a	15.49	14.58	13.96	13.13	0.92	1.53	2.36
KTG04b ^c		14.30	13.71	12.80			
KTG04c ^c		13.90	13.34	12.50			
KTG05c		13.65	13.19	13.00			
KTG06a	12.85	11.86	11.42	10.56	0.99	1.43	2.29
KTG09b	15.41	14.65			0.77		
KTG09c	14.20	13.11	12.47	11.52	1.09	1.73	2.68
KTG10a	15.61	14.79	14.23	13.58	0.82	1.39	2.03
KTG10b	14.87	13.86	13.20		1.00	1.66	
KTG12a	17.46	16.76	16.25		0.70	1.21	
KTG12b	16.00	15.49	14.78	14.12	0.51	1.23	1.88
KTG12c	15.05	14.22	13.55	12.57	0.83	1.50	2.48
KTG13a	14.88	14.19	13.52	12.36	0.69	1.36	2.52
KTG13b	15.49	14.78	13.81	12.96	0.71	1.67	1.53
KTG14a	14.83	13.89	13.27	12.31	0.94	1.55	2.51
KTG14b	15.33	14.41	13.81	13.64	0.92	1.52	1.70
KTG14c	15.83	15.04	14.44	14.30	0.80	1.39	1.54
KTG15a	15.54	14.96	14.45	14.34	0.58	1.09	1.20
KTG15b	15.32	14.78	14.30	13.52	0.54	1.03	1.80
KTG15c	15.64	14.65	14.00	12.94	0.99	1.64	2.70
KTG17a	15.25	14.56	14.01	13.23	0.69	1.24	2.02
KTG18ab ^c	16.01	15.14	14.54	13.85	0.87	1.47	2.16
KTG17b	13.38	12.54	11.99	11.37	0.84	1.39	2.01
KTG20a	16.54	15.87	15.46	15.11	0.64	1.04	1.39
KTG20b	15.17	14.26	13.77	13.00	0.91	1.39	2.16
KTG20c	16.27	15.67	15.16	14.47	0.60	1.11	1.80
KTG21a	15.61	15.06	14.55	13.97	0.55	1.06	1.65
KTG21bc ^c	13.45						
KTG24a	14.32						
KTG24b	13.74	13.06	12.57	12.44	0.68	1.18	1.31
KTG29a	15.45	14.86	14.43	14.08	0.59	1.02	1.36
KTG29b	16.01	15.24	14.73	13.85	0.76	1.28	2.15
KTG29c	15.06	14.14	13.55	12.82	0.93	1.52	2.25
KTG33a	15.28	14.60	14.01	13.35	0.68	1.27	1.93
KTG35a	10.56	9.76	9.12	8.18	0.81	1.44	2.39
KTG35b	14.98	14.04	13.39	12.61	0.94	1.59	2.36
KTG35c	15.72	14.86	14.38	13.45	0.85	1.34	2.27
KTG36a	15.45	14.31	13.72	13.01	1.14	1.73	2.44
KTG36b	15.33	14.64	14.17	13.58	0.69	1.16	1.75
KTG36c	15.29	14.31	13.68	12.97	0.98	1.61	2.32
KTG37b	16.33	15.55	15.11	14.58	0.77	1.21	1.75
KTG37c	16.57	15.74	14.83		0.83	1.74	
KTG38a	16.09	15.05	13.37		1.04	2.72	
KTG38b	14.56	14.10	13.71	13.14	0.46	0.85	1.43
KTG38c	14.06	13.61	13.21	12.77	0.45	0.85	1.28
KTG39b	15.44	14.91	14.48	14.45	0.53	0.96	0.99
KTG39c	13.50						
	12.81						

Tabla 3. Magnitudes totales aparentes e índices de color

^c Fotometría calculada contaminada por galaxia contigua

§ 7 FOTOMETRÍA

MAGNITUDES ABSOLUTAS

Una vez hechas las mediciones y obtenidas las magnitudes fotométricas observadas, realizamos una última corrección para obtener magnitudes absolutas, esto es hacer una transformación a magnitudes fotométricas absolutas. En el caso de las galaxias espirales se debe de realizar una corrección por extinción. La extinción interna depende de la escala de la galaxia y de su inclinación por lo que tenemos que: A_i [mag] = $k \log(a/b)$, donde a y b son los semiejes mayor y menor de la galaxia respectivamente y k es un coeficiente dependiente de las bandas de observación. Lo anterior debido a que se ha visto que la cantidad de polvo en una galaxia, depende directamente de su tamaño (Giovanelli et al. 1995; Wang & Heckman 1996; Tully et al. 1998). Tully (1998) obtiene empíricamente, valores para las bandas B, R, I y K, como función de la velocidad circular máxima de la galaxia. De los valores reportados (Tully & Pierce 2000) se hacen correlaciones lineales, de estos coeficientes, con las magnitudes correspondientes que no han sido corregidas por extinción interna.

$$M_B$$
 [mag] = -6.30 - 0.40 M_V , M_B < -16.7 (xv).

$$M_V$$
 [mag] = -4.67 - 0.29 M_V , M_V < -17.5 (xv).

$$M_R$$
 [mag] = -4.20 - 0.26 M_B , M_R < -17.7 (xvi)

$$M_I$$
 [mag] = -3.40 - 0.20 M_I , M_I < -18.0 (xvii).

Para magnitudes mayores que los límites establecidos por las ecuaciones anteriores, se asume que k es igual a cero, es decir, no hay corrección por extinción. Para la banda V los coeficientes fueron obtenidos mediante una interpolación de las bandas B, V, R, e I. Una vez corregida por extinción interna, se utiliza la siguiente ecuación xi para calcular la magnitud absoluta por banda de observación. La tabla 3 muestra los valores obtenidos correspondientes a las magnitudes totales aparentes de nuestra muestra de 54 galaxias.

KTG	B-V	B-R	B-I	B	V	R	I
KTG02a ^C	1.18	1.57	2.54	-19.98	-21.16	-21.55	-22.52
KTG02b ^C	-0.06	0.80	1.76	-21.31	-21.25	-22.11	-23.06
KTG03a	-0.06	0.80	1.76	-21.31	-21.25	-22.11	-23.06
KTG03b	0.92	1.49	2.23	-20.56	-21.49	-22.05	-22.79
KTG03c	0.92	1.51	2.24	-19.49	-20.41	-21.00	-21.73
KTG04a	0.86	1.43	2.22	-19.06	-19.92	-20.50	-21.29
KTG04b ^C					-20.89	-21.43	-22.18
KTG04c ^C					-21.48	-21.98	-22.62
KTG05c					-21.49	-21.90	-21.90
KTG06a	0.96	1.37	2.21	-19.92	-20.88	-21.30	-22.13
KTG09b	0.68	-20.28	-20.96				
KTG09c	0.80	1.37	2.07	-20.75	-21.55	-22.12	-22.82
KTG10a	0.57	1.05	1.50	-20.90	-21.47	-21.95	-22.40
KTG10b	0.69	1.18		-21.06	-21.75	-22.23	
KTG12a	0.31	0.67		-18.56	-18.87	-19.23	
KTG12b	0.35	1.01	1.55	-19.47	-19.82	-20.49	-21.02
KTG12c	0.60	1.21	2.02	-20.78	-21.38	-21.99	-22.79
KTG13a	0.59	1.19	2.28	-20.37	-20.96	-21.56	-22.65
KTG13b	0.57	1.48	2.23	-21.79	-22.36	-23.27	-24.02
KTG14a	0.77	1.32	2.15	-20.55	-21.32	-21.87	-22.70
KTG14b	0.78	1.35	1.38	-20.05	-20.84	-21.40	-21.43
KTG14c	0.61	1.18	1.11	-19.81	-20.42	-20.99	-20.92
KTG15a	0.35	0.83	0.72	-20.10	-20.46	-20.93	-20.83
KTG15b	0.46	0.90	1.61	-20.22	-20.67	-21.11	-21.83
KTG15c	0.92	1.52	2.54	-19.82	-20.74	-21.34	-22.35
KTG17a	0.59	1.10	1.80	-20.25	-20.84	-21.35	-22.06
KTG17b	0.71	1.30	1.84	-20.12	-20.83	-21.42	-21.96
KTG18ab ^C	0.57	0.97	1.19	-17.80	-18.38	-18.77	-18.99
KTG20a	0.80	1.34	1.93	20.96	21.77	-22.89	-22.30
KTG20b	0.79	1.25	1.91	-19.34	-20.13	-20.59	-21.24
KTG20c	0.53	1.01	1.64	-21.74	-22.27	-22.75	-23.38
KTG21a	0.22	0.75	1.06	-19.55	-19.78	-20.31	-20.62
KTG21bc ^C				-20.81			
KTG24a				-19.95			
KTG24b	0.62	1.08	1.16	-20.84	-21.46	-21.93	-22.01
KTG29a	0.50	0.90	1.17	-19.98	-20.48	-20.88	-21.15
KTG29b	0.64	1.14	1.91	-19.41	-20.06	-20.55	-21.33
KTG29c	0.88	1.45	2.15	-20.01	-20.89	-21.45	-22.15
KTG33a	0.52	1.10	1.63	-20.29	-20.81	-21.38	-21.91
KTG35a	0.78	1.40	2.33	-20.21	-20.99	-21.61	-22.53
KTG35b	0.75	1.41	1.99	-20.89	-21.64	-22.29	-22.88
KTG35c	0.68	1.14	1.94	-21.17	-21.85	-22.31	-23.11
KTG36a	1.12	1.70	2.39	-20.70	-21.82	-22.40	-23.09
KTG36b	0.59	1.03	1.55	-20.16	-20.75	-21.19	-21.71
KTG36c	0.75	1.37	1.84	-20.97	-21.72	-22.33	-22.80
KTG37b	0.73	1.14	1.65	-18.96	-19.69	-20.11	-20.61
KTG37c	0.78	1.62		-21.20	-21.97	-22.82	
KTG38a	0.86	2.35		-19.78	-20.64	-22.13	
KTG38b	0.29	0.66	1.11	-20.38	-20.66	-21.04	-21.49
KTG38c	0.23	0.60	0.87	-21.10	-21.33	-21.70	-21.97
KTG39b	0.41	0.82	0.72	-19.44	-19.85	-20.27	-20.16
KTG39c				-20.29			
				-21.62			

Tabla 4. Magnitudes totales absolutas corregidas e índices de color

^C Fotometría calculada contaminada por galaxia contigua

§ 8 EVALUACIÓN MORFOLÓGICA

Para evaluar el tipo morfológico de las 54 galaxias; se produjeron hasta tres mosaicos de imágenes donde se aplicaron diferentes métodos de procesamiento de imágenes: un mosaico global que incluye una vista panorámica del sistema triple y mosaicos individuales por cada una de las galaxias observadas en el sistema (ver figuras 9, 10 y 11). El primero con la finalidad de obtener una imagen global del sistema en cuestión, incluye una imagen en escala de grises obtenida en SPM de 4.2' ó 7.2', según el telescopio utilizado, una imagen con un campo más amplio obtenida de los registros digitalizados del Observatorio de Monte Palomar para revisar el aislamiento del sistema y finalmente imágenes RGB individuales tomadas de la base de datos SDSS, en caso de que existieran. El segundo mosaico contiene información más detallada de cada una de las galaxias: una imagen logarítmica en el filtro R para ver detalles difusos, una imagen con un filtro *gaussiano* en la banda R para observar estructuras de formación estelar (éstas técnicas de filtraje (Sofue 1993), permiten la sustracción de fondo difuso en un modo conveniente que permite discutir diversos detalles morfológicos), una imagen de color B-I, para ver la distribución espacial del polvo y regiones de formación estelar (grises claros corresponden a colores azules, mientras que grises más oscuros corresponden a colores rojos) y una imagen infrarroja compuesta por la suma de los filtros J, H y K tomadas de la base de datos 2MASS a la cual también se le aplicó un filtro *gaussiano*. Como muestra de ello la figuras 7, 8 y 9 muestran los mosaicos correspondientes del sistema KTG15. Además, se llevó a cabo un análisis isofotal con el programa ELLIPSE dentro de la plataforma IRAF, lo cual permite obtener parámetros geométricos de cada una de ellas en las bandas R e infrarrojas (JHK). Con esta información es posible graficar el perfil de elipticidad (ϵ) y el de ángulo de posición (PA). Para galaxias cuyo tipo morfológico pudieran estar en la región de transición entre los tipos E, S0 y Sa se calculó el perfil diferencial de brillo superficial y se añadieron los términos A_4 y B_4 , de la descomposición de las isofotas en los términos de Fourier, los cuales ayudaron a discernir la forma de las isofotas y por ende una mejor clasificación.

Todas las imágenes en los mosaicos, están orientadas astronómicamente, éstas fueron editadas por estrellas que se encuentran al frente y al fondo de los objetos astronómicos (estrellas de campo). Además de las imágenes ópticas, las imágenes infrarrojas fueron de gran ayuda en mostrar detalles centrales que no son vistos en las imágenes ópticas, como el caso de las barras y brazos. Estas imágenes (ópticas e infrarrojas) fueron colocadas aproximadamente a la misma escala en cada uno de nuestros mosaicos. Los parámetros geométricos ayudaron a identificar la presencia de barras, esto puede ser ratificado por los parámetros geométricos (ϵ , PA) cuando hay un máximo en la elipticidad y está presente una meseta en el ángulo de posición para los mismos radios (Wozniak et al. 1995).

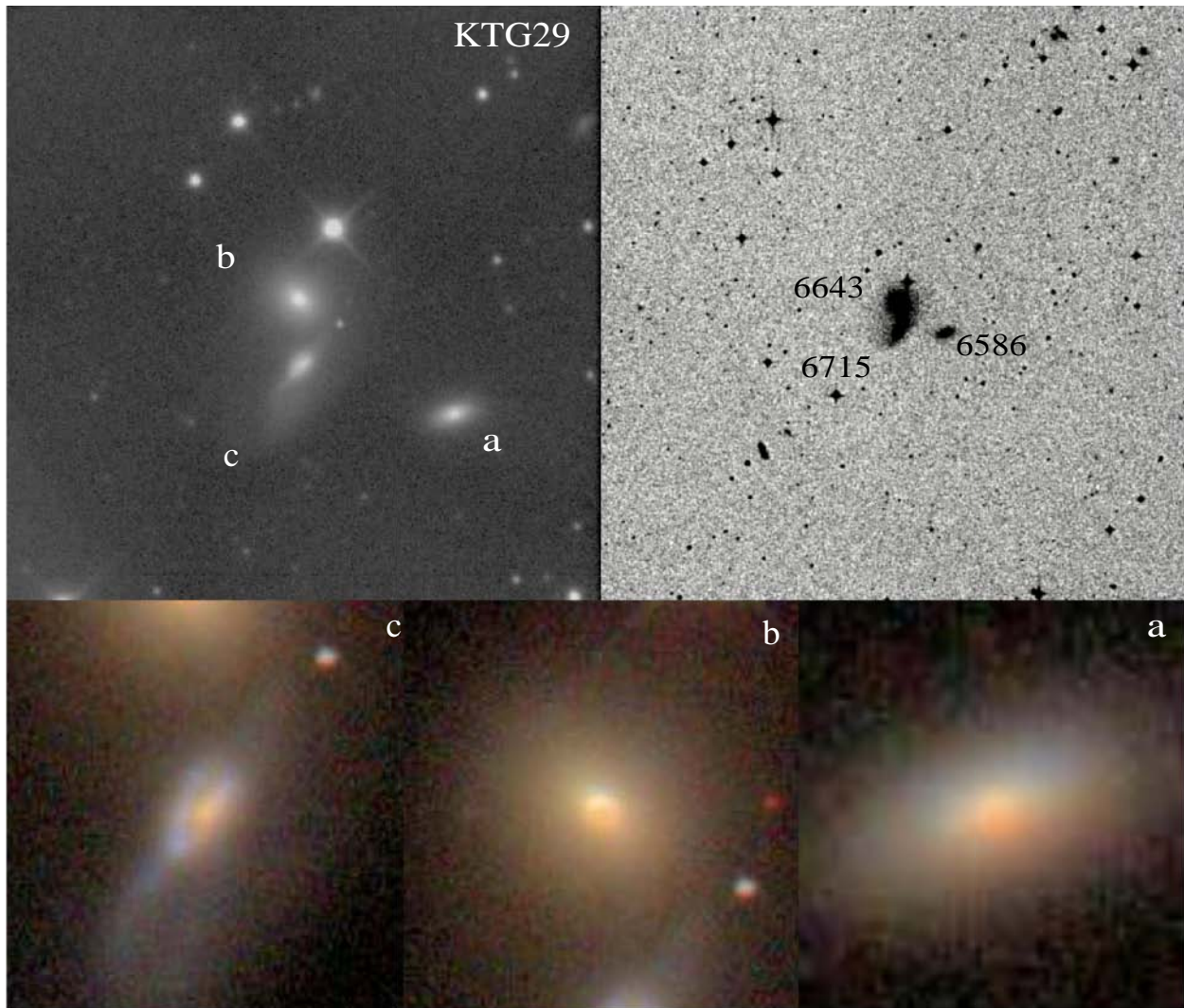


Figura 9. Mosaico 1del sistema KTG29 en el cual incluye una imagen global del sistema (SPM) de $4.2' \times 4.2'$, una imagen digitalizada de Monte Palomar de $15' \times 15'$, e imágenes individuales de cada una de las galaxias obtenidas de la base de datos SDSS.

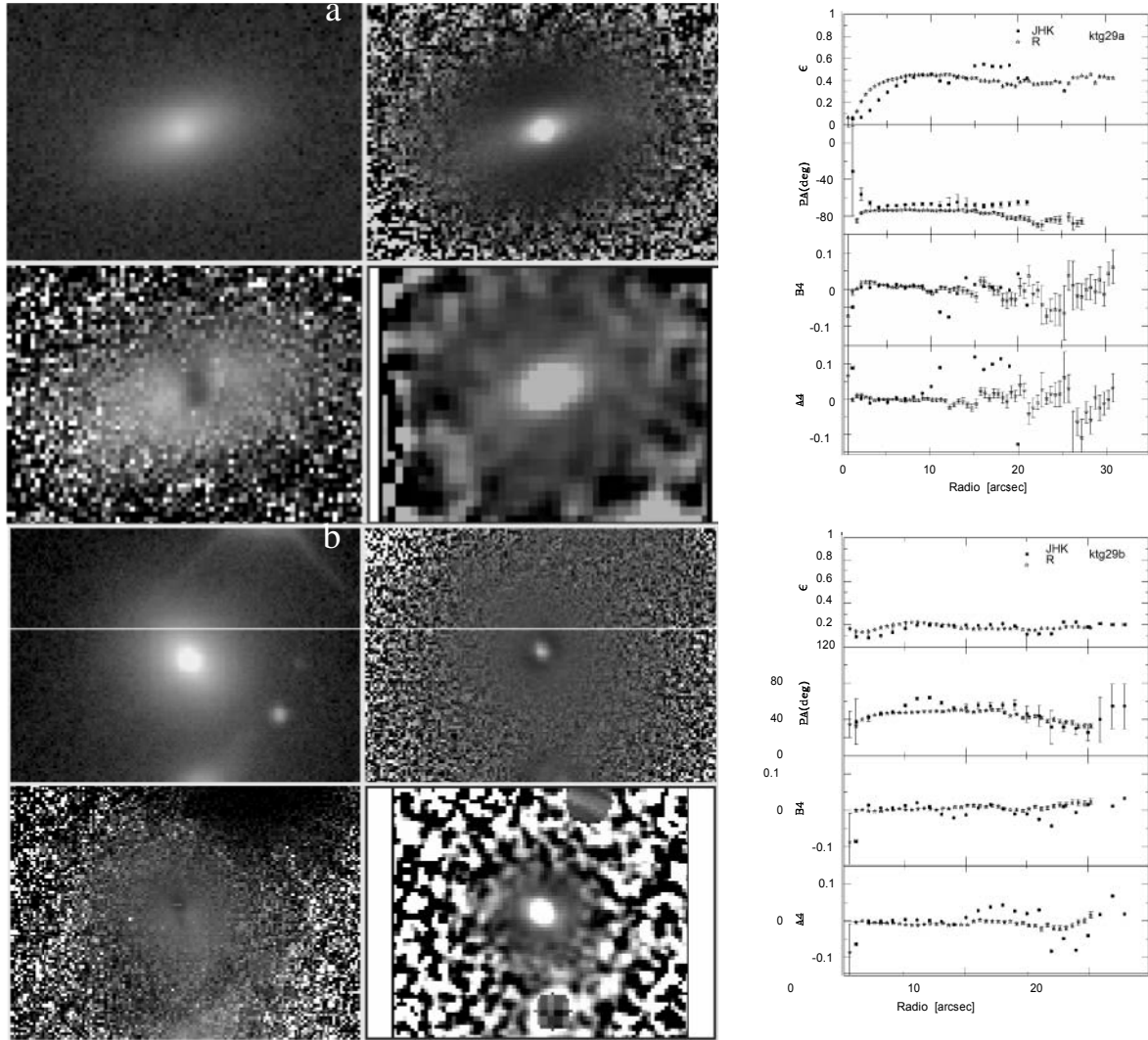


Figura 10. Mosaico que incluye información detallada de cada una de las componentes del sistema. Imagen logarítmica en la banda R, imagen bajo un filtro gaussiano en la banda R, imagen color B-I, e imagen infrarroja compuesta JHK bajo un filtro gaussiano, así como parámetros geométricos (ϵ , P.A.) Los diámetros mayores de las galaxias KTG29a y KTG29b son 0.56 arc min y 0.8 arc min respectivamente.

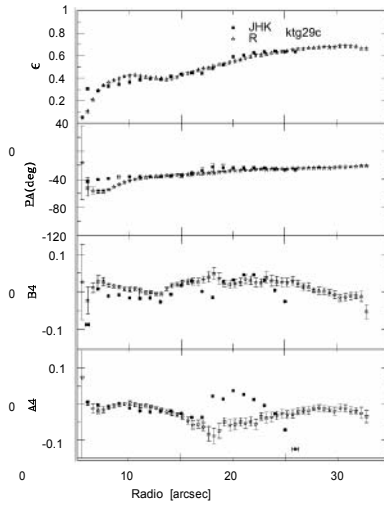
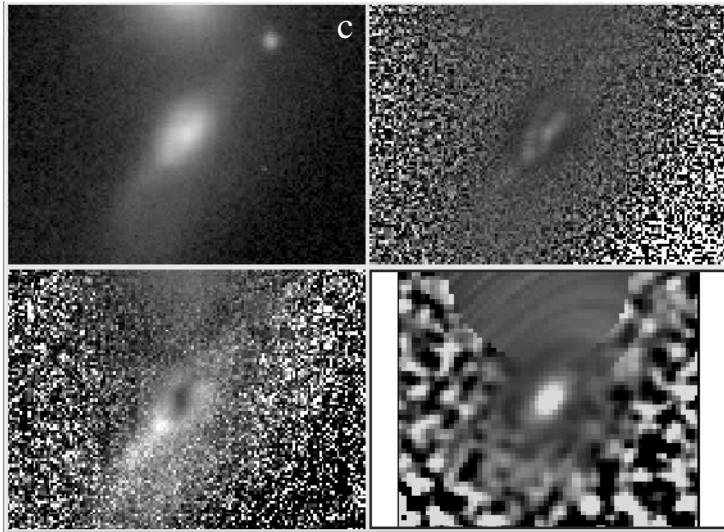


Figura 11. Mosaico que incluye información detallada de cada una de las componentes del sistema. Imagen logarítmica en la banda R, imagen bajo un filtro gaussiano en la banda R, imagen color B-I, e imagen infrarroja compuesta JHK bajo un filtro gaussiano, así como parámetros geométricos (ϵ , P.A.). El diámetro mayor de KTG29c es 1.30 arc min.

§ 9 EVIDENCIA DE SIGNOS DE INTERACCIÓN

Dentro de la evaluación morfológica, hay algunas evidencias que pueden ser indicio de interacción entre las galaxias. Es por eso que queremos identificar aquellas perturbaciones morfológicas, que muestren evidencias de que las galaxias en sistemas triples están en interacción, es decir formando una asociación física. Algunas evidencias que repercuten en la morfología de la galaxia y que son asociados a interacciones son:

- ❖ **Galaxias tempranas:**
 - **Colas y abanicos, anillos polares, cascarones, presencia de discos azules en la región central, nudos azules y una presencia excesiva de polvo.**
 - **Estado de interacción más avanzado (*mergers*), núcleos dobles, colas de mareas y transformaciones morfológicas prominentes**
- ❖ **Galaxias tardías:**
 - **Presencia de puentes difusos, extensiones, distorsiones, morfología altamente perturbada y asimetrías.**
 - **Estado de interacción más avanzado (*mergers*): Núcleos dobles, líneas de polvo y colas de marea prominentes.**

Estas evidencias tienen un periodo de vida corto, especialmente en los tripletes físicos donde las mismas fuerzas de marea que las crean tienden a borrar estas características. Por esta razón, las evidencias deben considerarse tan solo como una primera aproximación de signos de interacción, en la frecuencia de interacciones entre galaxias en sistemas triples. Para complementar nuestra búsqueda, hemos revisado la literatura sobre posibles signos de interacción para aclarar aún más este aspecto. La tabla 9 presenta un resumen de los signos de interacción encontrados en nuestra muestra de galaxias.

§ 10 INFORMACIÓN PREVIA EN NED E HyperLeda

10.1 FOTOMETRÍA

La información fotométrica encontrada en las bases de datos (ver tabla 6) para nuestros sistemas triples es escasa. Solo se encontraron valores de las magnitudes aparentes correspondientes a la banda B provenientes en la mayoría de los casos de registros fotográficos, los cuales presentan errores típicos mayores a 0.5 magnitudes y en algunos casos se halló información fotométrica para la banda I (HyperLeda), estos corresponden a valores fotométricos correspondientes al sistema de Mathewson (1992), lo cual hace difícil realizar una comparación directa contra nuestras magnitudes observadas si no conocemos como transformar las magnitudes. A su vez, se actualizó la información correspondiente a las velocidades radiales reportadas por Karachentseva (1988), con los valores obtenidos de la base de datos HyperLeda. Con esta información y suponiendo una velocidad de escape típica en sistemas triples de 1000 km s^{-1} ¹², podemos ver que algunas galaxias no forman parte de un sistema triple dado (*outliers*) y no forman un sistema físico real. Esto sucede cuando la diferencia de velocidades radiales entre ésta y sus compañeras es mayor a 1000 km/s. Entre estos sistemas encontramos a: KTG5, KTG6, KTG9, KTG10, KTG13, KTG17, KTG20, KTG24, KTG35, KTG37. Sin embargo, dadas las diferencias radiales se encontró que muy probablemente (excepto KTG24, cuyas galaxias muestran diferencias en velocidades radiales muy altas) forman sistemas binarios. En lo que resta de esta tesis, solo consideraremos aquellas galaxias cuyas velocidades, con respecto a sus compañeras, cumplan la condición de no exceder la velocidad de escape, por lo que discutiremos los resultados correspondientes a una muestra final de 34 galaxias formando sistemas triples y 12 galaxias formando pares cercanos.

¹² Éste límite se puede justificar de dos maneras diferentes:

- ❖ Empírico.- Midiendo las dispersiones de velocidades de sistemas triples (o grupos pequeños) y haciendo un histograma. Dicho histograma tendrá una distribución logarítmica normal, a la cual se le puede calcular una dispersión (σ). Si la velocidad de una galaxia es mayor a 2σ , se dice que ésta no es parte del sistema.
- ❖ Físico.- Dada una masa $M = m 10^{12} M_{\text{solares}}$ distribuida homogéneamente en un radio de $R = r 200 \text{ kpc}$ entonces la energía potencial en el centro de dicha distribución es $U = \frac{3GM}{2R}$. Para escapar desde el centro se requiere $V_e = \sqrt{2U} \sim 250 \sqrt{\frac{m}{r}}$ kms^{-1} . Si $M = 10^3 M_{\text{solares}}$ ($m=10$) dentro de 1 Mpc ($r=5$), la velocidad de escape resultante es $V_e \sim 360 \text{ kms}^{-1}$. El valor de 1000 kms^{-1} corresponde a $\sim 3V_e$, lo cual establece un margen muy cómodo para asegurar que velocidades mayores a este valor corresponden a galaxias no asociadas físicamente. Hay que hacer notar que si $M = 10^{12}$ ($m=1$) y un radio de 200 kpc ($r=1$) (valores conocidos para la Vía Láctea) se obtiene el mismo valor en orden de magnitud. Además dicha velocidad es tres dimensional, así que suponiendo isotropía ($V_{3D} = \sqrt{3}V_{2D}$), el límite observable debería ser menor, es decir alrededor de 500 kms^{-1} , lo cual es aun más restrictivo, reduciendo considerablemente el número de sistemas físicamente asociados.

10.2 MORFOLOGÍA

La información morfológica recabada de la literatura previa a la reevaluación morfológica de este trabajo, indica que las galaxias en sistemas triples tiene la siguiente distribución por tipos morfológicos: en el intervalo (Sa-Sm) 62% en el intervalo (E, S0, E/S0) 38% y 0% para las galaxias en transición del tipo S0a. Ahora bien, dividiendo las galaxias espirales en espirales tempranas y tardías. Las galaxias espirales tempranas (S0a, Sa, Sab, Sb) contabilizan un 66%, mientras que la fracción de galaxias espirales tardías (Sbc, Sc, Scd, Sd, Sdm, Im) un 33%.

La información con respecto a la presencia de barras para estas 34 galaxias en tripletes es de 4 barras confirmadas (SB) y 1 barra aparente (SAB), acumulando un total de 15%. La fracción de barras (SAB+SB) en galaxias espirales tempranas (S0, S0a, Sa, Sab) es de 60%, mientras que en espirales tardías (Sbc-Sm) es del 40%. Finalmente la información respecto a la presencia de estructura en forma de anillos (internos, externos y aparentes) antes de nuestra reevaluación morfológica es de 1 galaxia equivalente al 3%.

10.3 PARÁMETROS DINÁMICOS

De acuerdo al criterio estadístico de Anosova (1987), para distinguir tripletes físicos de aquellos que son meramente ópticos (Zheng et al 1993), cerca de 45 tripletes de 83 en el catálogo de Karacehntseva et al (1979) son probablemente físicos, referidos como Tripletes-K o tripletes compactos. Otros tripletes de otros catálogos, tales como Huchra y Geller (1982) y Maia, da Costa y Latham (1989) (ver Trofimov & Chenrin 1995) muestran parámetros dinámicos con un radio armónico medio un orden de magnitud mayor que el de los Tripletes K, por tanto se les llama Tripletes W. Los parámetros dinámicos¹³, principalmente el radio armónico R_H , la velocidad de dispersión σ , el tiempo dimensional de cruce $H_{0\tau}$ y la masa viral M_V para los Tripletes K y W se muestran en la tala 5 (Aceves 2002). Las expresiones usadas para estimar los parámetros dinámicos de nuestros tripletes son: (e.g. Heisler, Tremaine & Bahcal 1985; Nolthenius & White 1987)

¹³ Los parámetros dinámicos están definidos por las ecuaciones xiii, xiv, xv y xvi donde:

- ❖ V = Velocidad de recesión del triplete
- ❖ σ = dispersión de velocidades 1D en km/s
- ❖ R_H = radio armónico en Kpc
- ❖ $H_{0\tau}$ = tiempo de cruce adimensional = $H_{0\tau}$ siendo H_0 la constante de Hubble y τ el tiempo de cruce definido por la ecuación xx. Se ha tomado $H_0=75$ km/s/Mpc.
- ❖ M_V = la masa viral del sistema, definida por la ecuación xvi donde N es el numero de galaxias ($N=3$), V_i es la velocidad de la i -ésima galaxia en la dirección de la línea de visión con respecto al centroide de velocidades y R_{ij} la separación proyectada entra la galaxia i -ésima y j -ésima. El resultado esta dado en masas solares

$$\frac{1}{R_H} = \frac{2}{N(N-1)} \frac{2}{\pi} \sum_{i < j} \frac{1}{R_{ij}} \quad (xiii)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum (V_i - \langle V \rangle)^2 \quad (xix)$$

$$\tau_c = \frac{2R_H}{\sqrt{3} \sigma} \quad (xv)$$

$$M_V = \frac{6}{G} R_H \sigma^2 \quad (xvi)$$

Donde:

- ❖ V_i es la velocidad medida en la línea de visión de la galaxia componente del sistema triple
- ❖ R_{ij} es la separación proyectada en el cielo
- ❖ $N = 3$.
- ❖ H_0 es la constante de Hubble $70 \text{ kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$

Los valores promedio obtenidos aquí son comparados contra los valores para los Tripletes K y los Tripletes W mostrados en la tabla 5. Empezando con una submuestra de Tripletes K, los parámetros dinámicos estimados para nuestra muestra final de 13 Tripletes, no son entonces muy diferentes de los valores para los Tripletes K, excepto probablemente para el tiempo de cruce dimensional, donde se observa un factor de 2, lo cual podría indicar que los encuentros entre las galaxia miembros de estos 13 tripletes, ocurren con una menor frecuencia.

Población	R_H	σ	$H_0 T$	M_V
Tripletes K	65.7	120.0	0.041	1.71E+12
Tripletes W	653.5	105.3	0.531	9.46E+12
Tripletes Este trabajo	41.8	114	.0785	1.10E+12

Tabla 5. Media de los parámetros dinámicos para los KTG

KTG	Id	HT	HT	B mag	B mag	V _{Rad}
		LEDA	NED	LEDA	NED	km /s
KTG2a	NGC 0317A	S0	S0	14.95	15 ^F	5436.1
KTG2b	NGC 0317B	SBbc	Sb	13.72	13.8 ^F	5499.4
KTG3a	NGC0392	E-SO	S0-	13.69	13.68	4795.4
KTG3b	NGC0394	S0	S0	14.77	14.8 ^P	4510.8
KTG3c	NGC0397	S0	E	15.75	15.7 ^P	5085.3
KTG4a	PGC 001048	Sab	Sb	15.27	15.1 ^P	5525.9
KTG4b	UGC813	S?	Sb	15.04	15.0 ^P	5453.5
KTG4c	UGC816	Sb	Sc	14.47	14.6 ^P	5502.7
KTG5c	NGC0474	S0	(R)Sa(s)	12.38	12.37	2341.9
KTG6a	PGC 004998	S?	S0	15.3	15.2 ^P	8034.2
KTG9b	NGC1029	S0-a	S0a	14.18	14.1 ^P	3575.2
KTG9c	NGC1028	SABb	Sa	15.36	15.3 ^P	8583.6
KTG10a	IC1900	S0	S0	14.96	15 ^P	5754.2
KTG10b	IC1901	E?	Sa	15.43	15.6 ^P	5392
KTG12a	PGC 019569	S?	E	16.16	15.7 ^P	6461
KTG12b	UGC03532	SBb	SBsb	15.09	15.3 ^P	6425.6
KTG12c	UGC03535	Sa	E	14.61	14.7 ^P	6416.3
KTG13a	UGC03673	SABc	SABcd	15.68	15.7 ^P	15413
KTG13b	PGC 020178	Sb	Sb	14.97	14.7 ^P	5902.2
KTG14a	PGC 020279	S?	S0	15.41	15.2 ^P	6267.7
KTG14b	PGC020288	Sa	Sa AGN	16.04	16 ^F	6384.5
KTG14c	PGC020291	Sab	Sa	15.29	16 ^F	6238.9
KTG15a	CGCG146-033	Sb	Sc	15.26	15.2 ^P	7599.2
KTG15b	CGCG146-034	E?	E	15.72	15.7 ^P	7515.4
KTG15c	CGCG146-036	Sc	Sb	15.53	15.4 ^P	7286
KTG17a	CGCG147-052	S?	Sa	15.47	15.5 ^P	8417.2
KTG17b	CGCG147-053	Sc	Sc(f)	16.14	15.6 ^P	4163
KTG18a	PGC093091	Sbc	SbSy2	18.91	13.6 ^F	4837.8
KTG18b	2MASXJ07440911+2914506	Sb	Sa	13.52	13.58 ^B	4855.8
KTG20a	CGCG118-067	Sab	Sa	15.09	15.2 ^P	4244.9
KTG20b	CGCG118-068	Sc	S0	16.11	15.6 ^P	24448.6 ^{VR}
KTG20c	UGC04257	Sc	Sd	15.28	15.4 ^P	4229.6
KTG21a	UGC04349	Sc	SB(s)c	15.04	15.1	4260.5
KTG21b	PGC023413	Sb	Sc	15.31	16.7 ^F	4372
KTG21c	PGC023411	Sb	Sa	14.87	15.2 ^F	4280
KTG24a	NGC2861	SBbc	SB(r)bc	13.8	14 ^P	5102.7
KTG24b	CGCG006-040	SBb	Sc	15.42	15.4 ^P	7177.3
KTG29a	PGC030755	S0-a	S0 AGN	15.97	15.4 ^P	6586.3 ^{VR}
KTG29b	PGC030762	E-SO	E	15.1	14.499 ^B	6643.3
KTG29c	PGC030761	S	Sa(f) HII	14.9	15.262 ^{BC}	6715.1
KTG33a	NGC3379	E	E1 LINER	10.23	10.24	950.4
KTG35a	NGC3534	Sb	Sb	14.99	15.4 ^P	6704
KTG35b	PGC033782	Sb	Sb	15.62	15.6 ^P	11514.9
KTG35c	CGCG155-076	E	S0	15.21	15.6 ^P	11431.5 ^{VR}
KTG36a	2MASXJ11204655+0028145	S?	E	14.85	14.919 ^B	7243.4
KTG36b	2MASXJ11204801+0028075	E?	Sb(f)	14.78	14.782 ^B	7299.9
KTG36c	2MASXJ11204901+0027335	S?	E	15.98	15.983 ^B	7362.3
KTG37b	CGCG039-188	S?	E	16.36	16.3 ^B	22552
KTG37c	CGCG039-190	E?	Sa	15.6	15.3 ^P	6340.3
KTG38a	PGC036723	SABb	SAB(rs)bpec	14.97	15.32 ^P	5069.7
KTG38b	PGC036733	SBb	SB(s)bpec HII	14.35	14.39 ^P	5161.5
KTG38c	PGC036742	SBc	SB(s)cpec	15.94	15.92 ^P	5278.1
KTG39b	NGC3994	Sc	SA(r)cpec HIISbrst	13.35	13.7 ^P	3117.6
KTG39c	NGC3995	SABm	Sampec	12.68	12.7	3437.4

Tabla 6. Información relevante de la muestra de galaxias observadas encontradas en la literatura

^N NED.

^L HyperLeda.

^P Magnitud fotográfica en la banda B.

^B Magnitud g SDSS.

^{GC} Magnitud gc SDSS.

^F Magnitud fotoeléctrica en la banda B.

^{VR} HyperLeda reporta un exceso en la velocidad radial en comparación con Karachentseva (1988).

§ 11 RESULTADOS

11.1 FOTOMETRÍA

Como ya se mencionó en la sección anterior, se carece de información fotométrica suficiente proveniente de la literatura. Esto enfatiza la importancia de este trabajo para aportar a la comunidad astronómica fotometría de apertura nueva en las cuatro bandas de observación para las 54 galaxias observadas.

A continuación, se ilustra en la figura 12 una comparación de los valores de magnitud aparente total, en la banda B, para cada galaxia componente de un sistema triple dado, obtenidas en este trabajo y en la literatura, principalmente provenientes de base de datos extragalácticas como NED e HyperLeda. Las galaxias aparecen etiquetadas por componentes por su nomenclatura del catálogo KTG, la componente (a) se presenta en la esquina superior izquierda, la componente (b) en la esquina superior derecha y la componente (c) en la parte inferior. A pesar de carecer de información fotométrica suficiente en la literatura, la figura 12 no muestra ninguna tendencia sistemática, sugiriendo que nuestras magnitudes totales estimadas para el filtro B, son consistentes. La dispersión RMS de nuestros valores fotométricos graficados en la figura 12 es 0.07 del orden del error asociado a la magnitud total en el filtro B estimado.

Los valores estimados de las magnitudes aparentes y sus respectivos colores, pueden ser vistos en la tabla 3 donde: la columna 1 muestra la identificación según el catálogo KTG, la columna 2 a la 5 las magnitudes observadas aparentes integradas para los filtros B, V, R, e I respectivamente. Las columnas 6 a la 8 muestran los valores de los colores B-V, B-R y B-I.

En cuanto a los colores corregidos y las magnitudes totales absolutas de nuestra muestra de galaxias, éstos se presentan en la tabla 4: la columna 1 corresponde a el número de identificación del catálogo KTG, las columnas 2 a 4 los colores corregidos B-V, B-R y B-I y las columnas 5 a 8, muestran las magnitudes absolutas para los filtros B, V, R, e I respectivamente. Los valores de la extinción galáctica fueron obtenidos de la base de datos NED y fueron estimados con los mapas de la distribución de polvo dados en Schlegel et al (1998). Nuestros resultados indican que las galaxias de los sistemas triples observados, cubren un amplio intervalo de luminosidades y colores. No se encontraron galaxias con $M_B < -17m$ y los intervalos observados para el color B-V, obtenidos, son 0.22–1.18 valor similar a lo reportado en otras muestras de galaxias interactuantes en pares (Balderas et al 2003 2005).

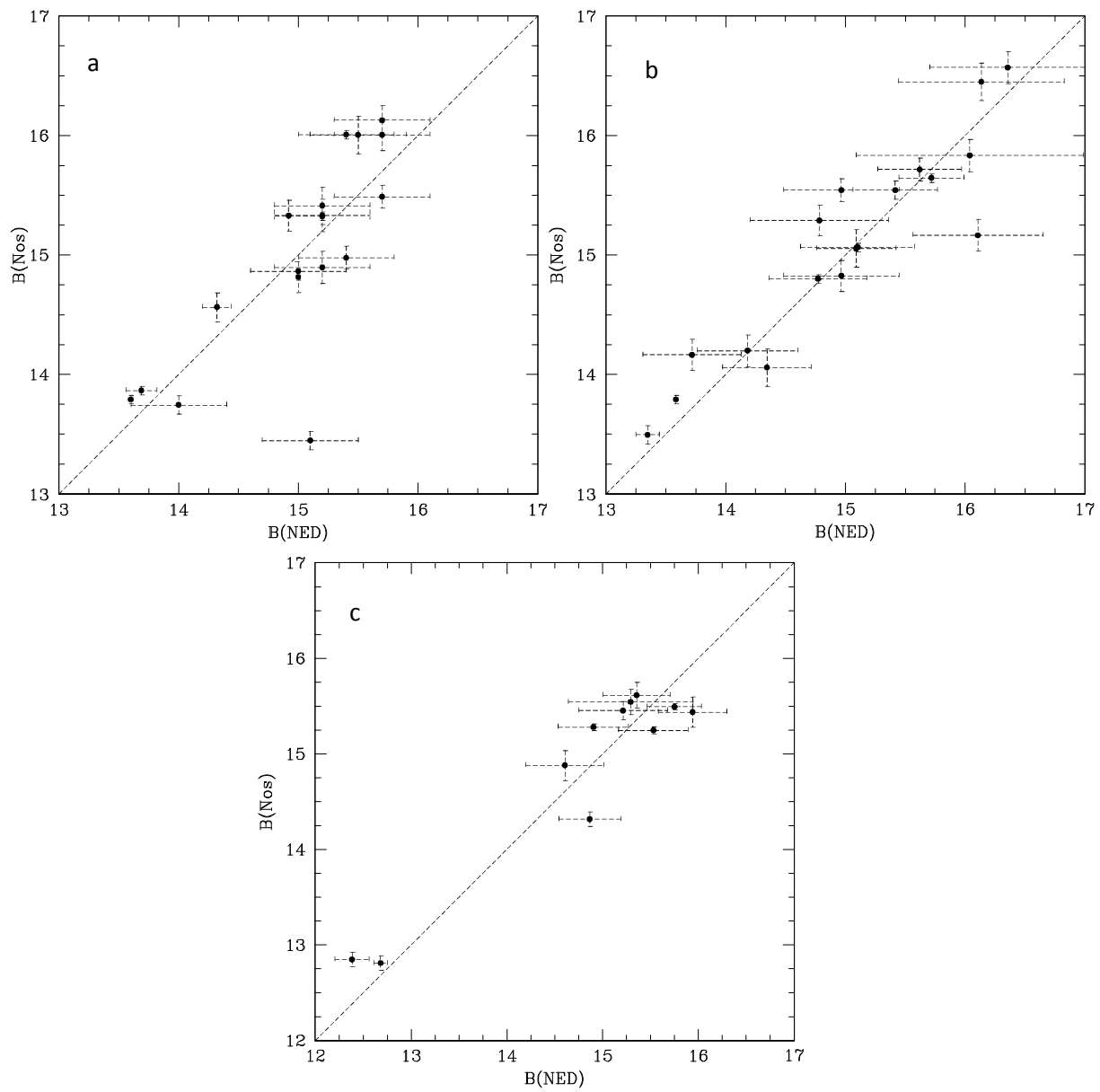


Figura 12. Magnitudes absolutas por componentes en la banda fotométrica B. Donde se comparan los resultados de las magnitudes obtenidas contra los valores reportados por la base de datos NED.

Una vez obtenidas las magnitudes absolutas para nuestros sistemas triples, hicimos una comparación directa contra las magnitudes absolutas de una muestra de galaxias aisladas. Esta muestra de galaxias aisladas, está compuesta por galaxias a las cuales se les han aplicado las mismas técnicas de reducción de imágenes, aquí descritas para obtener su información fotométrica (Hernández-Toledo 2006, Hernández-Toledo 2007, Hernández-Toledo 2008). Lo anterior se puede ver en forma de histogramas (ver figuras 13, 14 y 15), para cada una de las bandas ópticas BVRI. Hemos encontrado que el promedio de las magnitudes absolutas de los galaxias en triples (KTG), es similar a la muestra de galaxias aisladas CIG para las galaxias aisladas E-S0 y S0a-Sb, no así para el caso de las galaxias espirales tardías, donde, el promedio de las magnitudes absolutas de las galaxias en triples (KTG) es aproximadamente media magnitud, más brillante, que su contraparte de galaxias aisladas. Esto puede ser el resultado de la interacción existente entre las galaxias, la cual se aprecia de manera más clara para espirales tardías.

La prueba Kolmogorov-Smirnov indica que la diferencia mayor absoluta es significativa, con un valor de 0.015 y ésta se encuentra en las galaxias con tipos morfológicos espirales tardíos (Sbc-Im).

11.2 MORFOLOGÍA

Aunque llevamos a cabo una evaluación morfológica para las 54 galaxias observadas, la tabla 7 muestra los resultados de nuestra reevaluación morfológica para 34 galaxias en tripletes. Como comparación se muestra el contenido morfológico de una muestra representativa de 550 galaxias aisladas, del catálogo CIG¹⁴, en común con el catálogo SDSS (Hernández-Toledo et al. 2008), así como el contenido morfológico de una muestra de galaxias, en grupos compactos (HCG's¹⁵ Mendes de Oliveira y Hickson 1994). Esta tabla muestra en la columna 1 el tipo morfológico, las columnas 2, 3 y 4 las fracciones correspondientes para las galaxias CIG, los tripletes KTG y los grupos compactos de galaxias HCG's respectivamente. Nuestros resultados indican que la distribución morfológica es la siguiente: galaxias espirales (Sa-Sm) 68%, galaxias tempranas (E, S0, E/S0) 23%, galaxias en transición S0a 9%. Si dividimos a las galaxias espirales entre tempranas y tardías obtenemos para las galaxias espirales tempranas (S0a-Sb) 26%, galaxias espirales tardías (Sbc-Sm) (50%), lo cual indica que nuestros tripletes son ricos en espirales tardíos, aunque hay una fracción importante de tipos morfológicos tempranos. La figura 16 muestra esta comparación en forma de histograma (panel superior) y en forma de distribución acumulada (panel inferior). Hay que hacer notar que el número de galaxias espirales, aquí estudiadas no es estadísticamente significativo por lo que las comparaciones, hechas deben de tomarse con cautela.

¹⁴ Por sus siglas en inglés Catalog of Isolated Galaxies (CIG), Karachentseva (1973)

¹⁵ Por sus siglas en inglés Hickson Compact Groups

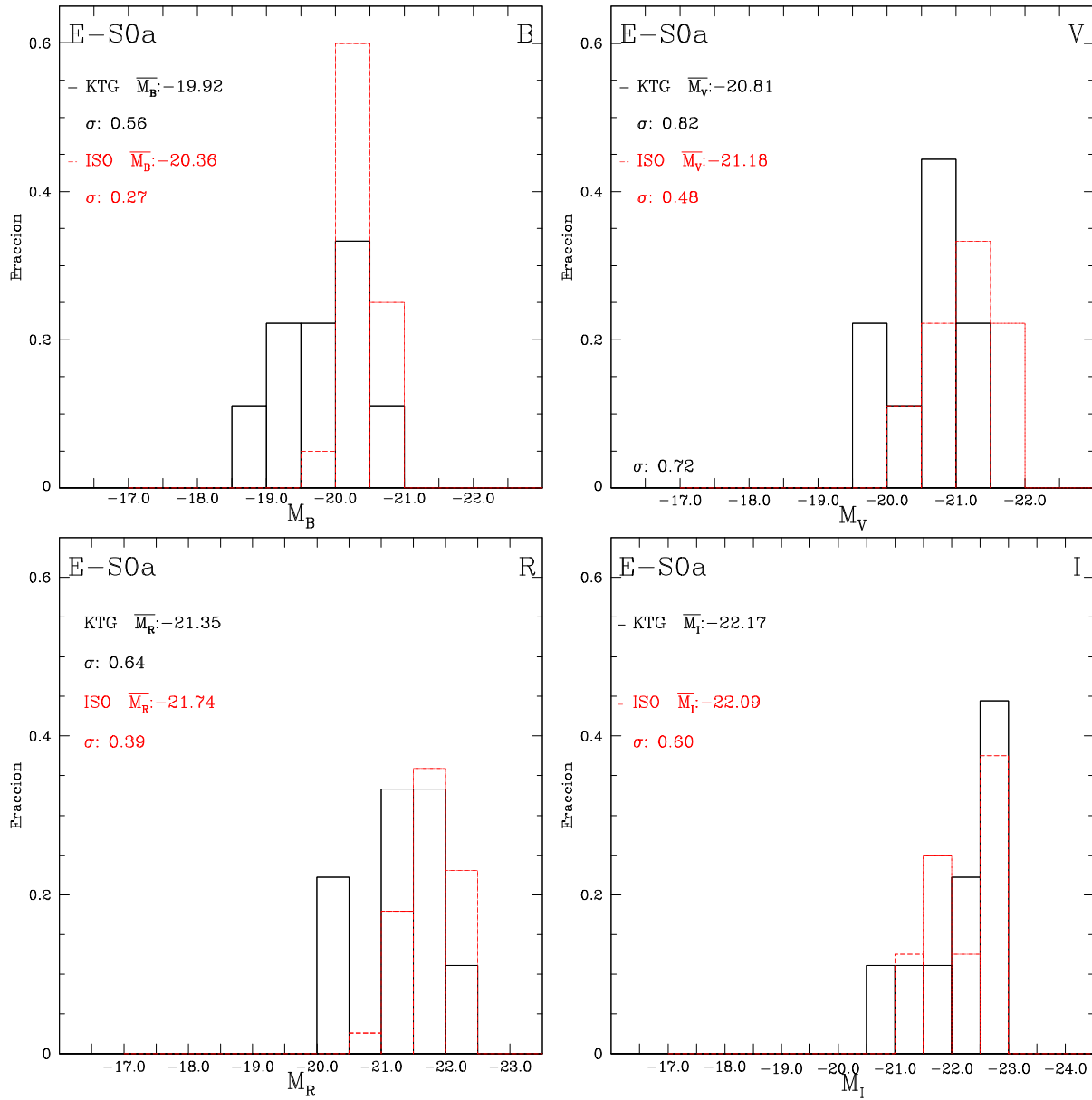


Figura 13. Histograma de galaxias aisladas del catálogo CIG y galaxias en sistemas triples del catálogo KTG para galaxias tempranas E-S0.

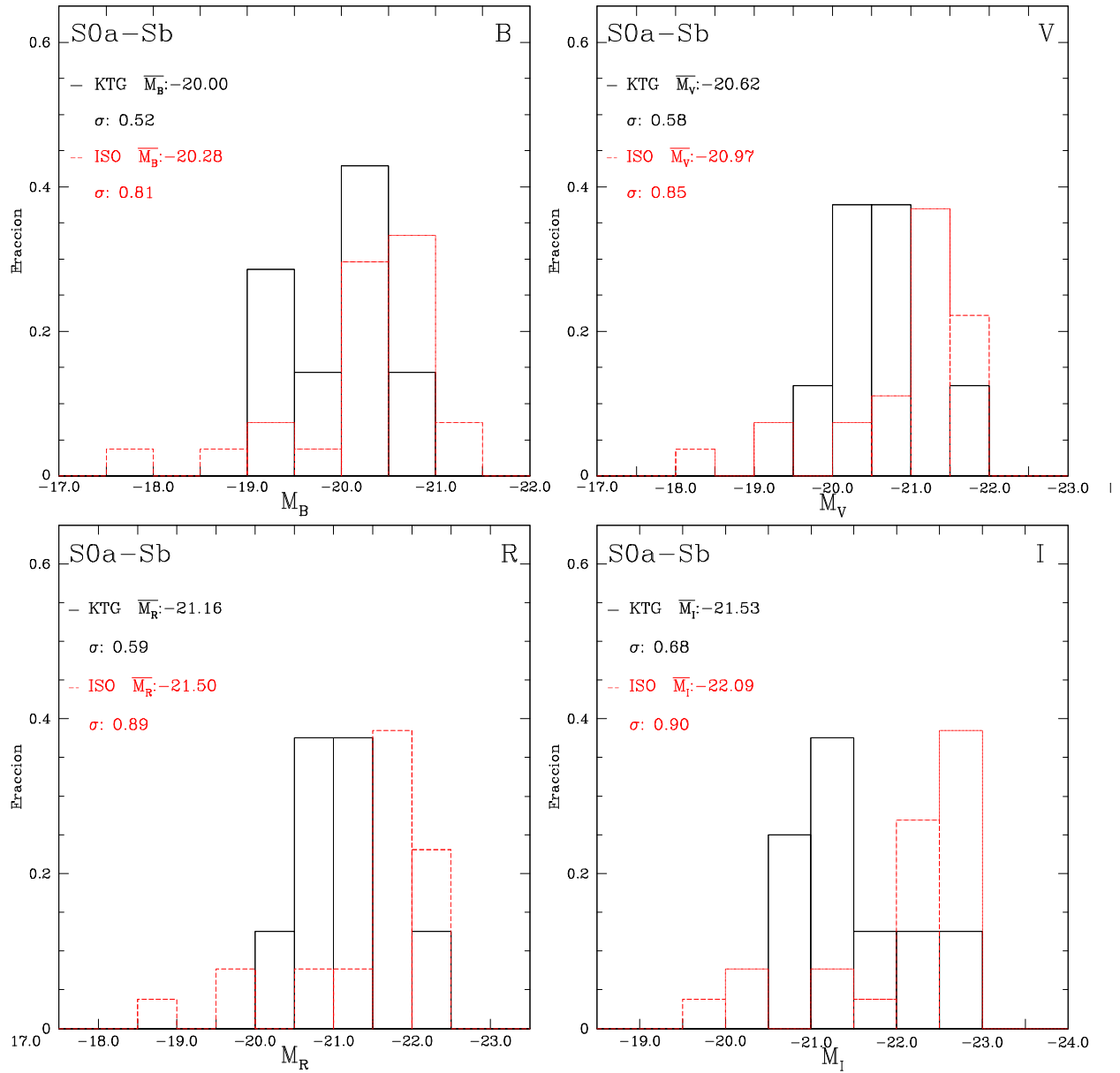


Figura 14. Histograma de galaxias aisladas del catálogo CIG y galaxias en sistemas triples del catálogo KTG para galaxias espirales tempranas S0a-Sb.

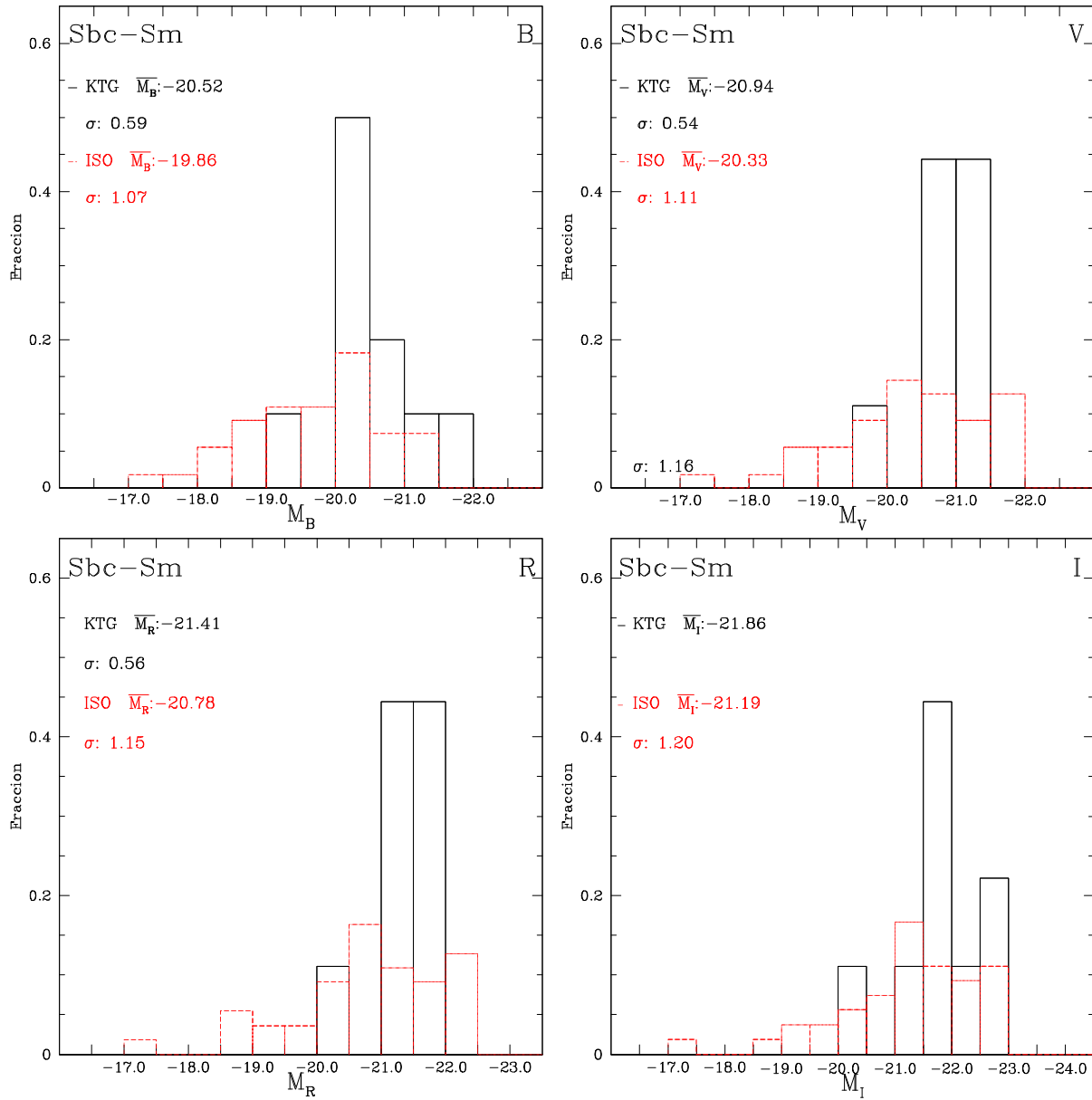


Figura 15. Histograma de galaxias aisladas del catálogo CIG y galaxias en sistemas triples del catálogo KTG para galaxias espirales tardías Sbc-Sm.

Type	CIG n/539	KTG n/34	HCGs n/210
E	0.035	0.029	0.257
E/S0	0.000	0.059	0.000
S0	0.050	0.147	0.190
S0/a	0.000	0.088	0.024
Sa	0.065	0.059	0.043
Sab	0.078	0.059	0.043
Sb	0.128	0.059	0.052
Sbc	0.169	0.147	0.057
Sc	0.299	0.323	0.124
Scd	0.082	0.000	0.033
Sd	0.052	0.000	0.062
Sdm	0.013	0.029	0.019
Sm	0.017	0.000	0.014
Im	0.009	0.000	0.081

Tabla 7. Distribución morfológica para las galaxias aisladas (CIG), tripletes (KTG) y grupos compactos de Hickson (HCG's)

A pesar de que tuvimos cuidado en no sesgar el contenido morfológico, de nuestras observaciones de nuestra muestra, los resultados en la tabla 7 indican una ausencia de galaxias elípticas genuinas. El hecho que la fracción de galaxias elípticas sea similar a la fracción, en galaxias aisladas, refuerza el hecho de la ausencia de galaxias elípticas en ambientes aislados como el de los tripletes. También, encontramos un exceso de galaxias S0 en los tripletes cuando se comparan contra las galaxias aisladas y este exceso es similar al encontrado en grupos más ricos (HCG's). Interesantemente encontramos un déficit de galaxias espirales del tipo Sb, en las galaxias KTG y HCG's, comparado contra la población de galaxias aisladas. También encontramos un exceso de galaxias Sc en las galaxias KTG cuando se comparan contra HCG's. De hecho la fracción de espirales (Sa-Im) en estas muestras, es tal que el 90%, 67% y 52% son los valores correspondientes para CIG, KTG y HCG's.

11.3 EVIDENCIAS DE INTERACCIÓN

Después de nuestra reevaluación morfológica se encontraron 4 barras confirmadas (SB) y 8 aparentes (SAB) sumando un 35%. La fracción total de barras (Sa-Sb) en tipos espirales tempranos es del 34% mientras que en espirales tardíos (Sbc-Im) es del 66%. La detección de barras aumentó en un factor de 2 con respecto a lo previamente publicado, cuya contribución mayor provenía de espirales tardías. Nótese que nuestro método de detección de barras es una combinación de una reevaluación óptica de los mosaicos de imágenes y un criterio isofotal (Wozniak et al 1995), aplicado a las imágenes en R y JHK cosumadas. Como comparación la fracción de barras en galaxias aisladas es de 60-70%, repartidas en galaxias tempranas (E, E/S0 y S0) 5%, galaxias espirales (S0a-Sm) 70% (Hernández-Toledo et al 2008).

Sabemos también que la fracción de barras para Virgo (Giordano et al. 2010) es de 24%, 50%, 45%, 55%, 45%, 36% 57%, 62%, 39%, 32% y 29% correspondiente para los tipos morfológicos: S0, S0a, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc y Sds; mientras que para Coma (Marinova et al. 2010) es de 47%, 43% y 11%, para las galaxias del tipo S0, S0-Sab y Sb-Sm respectivamente. Finalmente encontramos que la fracción de anillos

(internos, externos y aparentes) es aproximadamente del 20%, todos, en tipos espirales tardíos.

La tabla 8, presenta un resumen de nuestra reevaluación en cuanto a signos de interacción encontrados en nuestra muestra de galaxias en sistemas triples. A pesar de analizar toda la muestra original de 54 galaxias, solo consideramos una muestra de 34 galaxias en tripletes verdaderos.

Para estas 34 galaxias en 13 tripletes, 19 (56%) de ellas muestran signos claros de interacción, 6 (17%) galaxias con mergers en proceso y 9 (27%) no muestran signos de interacción claros. Como comparación, se han tomado los reportes correspondientes a grupos compactos HCG's, donde el 43% de las galaxias, muestra evidencias de interacción.

Para nuestros 13 sistemas triples, al menos 11 de ellos tienen una componente con signos de interacción. De 9 sistemas triples en los cuales observamos sus tres componentes 4 sistemas (44%) tienen las tres componentes mostrando signos de interacción, 3 tripletes (33%) con dos de sus miembros mostrando evidencias y solo un triplete (11%) tiene un solo miembro con evidencias de signos de interacción y solo un triplete en el cual se sospecha que hay evidencias de signos de interacción, es decir se encontraron 25 galaxias con signos de interacción, las cuales representan un 73% de las muestra. Estas fracciones son consistentes con grupos compactos (HCG's, Mendes Oliveira 1994), donde un 70% muestra signos de interacción. Hemos encontrado que 9, de los 13 sistemas triples reales, muestran una estructura jerárquica es decir: dos de los miembros del triplete muestran una asociación cercana en forma de pares.

Grado de Interacción	n/34	E-S0	S0a-Sb	Sbc-Sm
(M,PM)	0.176	-	1	5
(I)	0.559	2	6	11
(NI,SI)	0.265	1	2	1

Tabla8. Galaxias que muestran signos de interacción

La fracción de galaxias individuales mostrando evidencias de interacción es también del orden de las galaxias en una muestra de galaxias en grupos compactos en el hemisferio sur SCG's¹⁶ (Pompei 2007). Este resultado provee evidencia de que una fracción significativa, de los tripletes observados, son sistemas físicos. Nuestros resultados apuntan a la existencia de una población significativa de tripletes (completa estadísticamente) donde las interacciones y sus efectos en las propiedades de las galaxias (principalmente su morfología y propiedades estructurales) son más simples de interpretar que en sistemas con un mayor número de integrantes.

¹⁶ Por sus siglas en inglés Southern Compact Groups

PARÁMETROS DINÁMICOS

Después de evaluar el estado dinámico de los verdaderos sistemas triples observados, hemos procedido a explorar alguna tendencia entre los parámetros dinámicos y las propiedades morfológicas y fotométricas entre las que mencionamos: fracción de galaxias tardías, brillo de la galaxia más brillante por sistema, número de galaxias interactuantes, magnitudes absolutas y colores de, nuestra muestra de galaxias. Las figuras 17, 18 19 y 20 muestran gráficas del tiempo de cruce, el radio armónico, la velocidad de dispersión y la masa virial en función de las magnitudes absolutas, en las bandas fotométricas B y R así como del color B-R. Estas graficas se presentan por tipo morfológico (E; círculos abiertos, E/S0 y S0; círculos abiertos cruzados, S0a-Sb; triángulos abiertos, galaxias con inclinaciones $i > 80$ del tipo S0a-Sb; triángulos rellenos, Sbc-Sm/Irr; cuadrados abiertos, con $i > 80$ Sbc-Sm/Irr; triángulos rellenos). La galaxia más brillante del sistema está indicada con el mismo símbolo, pero en color rojo, en caso de que hubiera alguna relación con esto. Sin embargo, no se encontró ninguna relación significativa entre parámetros dinámicos y propiedades fotométricas en estos sistemas triples.

CAS

Los parámetros CAS constituyen un método alternativo de clasificación morfológica. Hemos hecho los cálculos de cada uno de estos parámetros para nuestros sistemas triples y los hemos comparado con valores representativos, para galaxias de diferente naturaleza. La tabla 10 muestra los parámetros CAS con sus errores asociados para nuestras 54 galaxias triples. La figura 21 muestra el diagrama principal CAS por tipos morfológicos. Hay que hacer notar que también se han graficado los valores típicos de los parámetros CAS para una muestra de galaxias aisladas tempranas, espirales tempranas y espirales tardías (Hernández-Toledo 2007, 2008), así como para galaxias en pares interactuantes del tipo temprano (E-S0), espiral temprano (S0a-Sb), espiral tardío (Sbc-Sm) (Hernández-Toledo et al. 2005), así como para ULIRGS¹⁷ y *starbursts* (Conselice 2003).

Como puede observarse del diagrama CAS, hay al menos diez galaxias las cuales exceden el valor promedio de la zona característica de acuerdo a su tipo morfológico. Tal es el caso de galaxias espirales como lo son KTG14b y KTG14c, KTG18a, KTG29c etc. o bien como galaxias elípticas perturbadas como lo es el caso de KTG29b. Hay algunas otras galaxias que a pesar de parecer interactuantes visualmente, en este diagrama aparecen fuera de su zona característica, por lo cual se sospecha que están en posible interacción.

Por esta razón, hemos llevado a cabo una reevaluación del grado de interacción que presentan dos diagramas diferentes. Donde se grafico (ver 22 y 23) el parámetro de la asimetría contra el parámetro sigma que representa la dispersión de un ajuste hecho a una muestra de galaxias aisladas (Hernández 2006, Hernández 2007). Nuestros resultados indican que estableciendo el criterio (ver figuras 21 y 22) $\sigma > 2$ y $A > 0.05$, 0.35 (para el caso de galaxias tempranas (E, E/S0 y S0) y galaxias espirales

17 Por sus siglas en inglés ultra luminous infrared galaxy

(Sa-Sm)), podemos identificar las misma galaxias que exceden los valores promedio en el diagrama principal CAS. Sin embargo, encontramos otras galaxias candidatas, a sufrir interacciones, no tan intensas en la región $0 < \sigma < 2$ y $A > 0.05, 0.35$, lo cual ilustra que un criterio como el que hemos establecido en el espacio de parámetros CAS es una herramienta muy útil para identificar galaxias de moderada a fuertemente interactuantes en el universo local. Hacemos notar que este criterio puede extenderse para identificar galaxias interactuantes que se encuentran a corrimientos al rojo (*redshifts*) altos ($0 < Z < 2$).

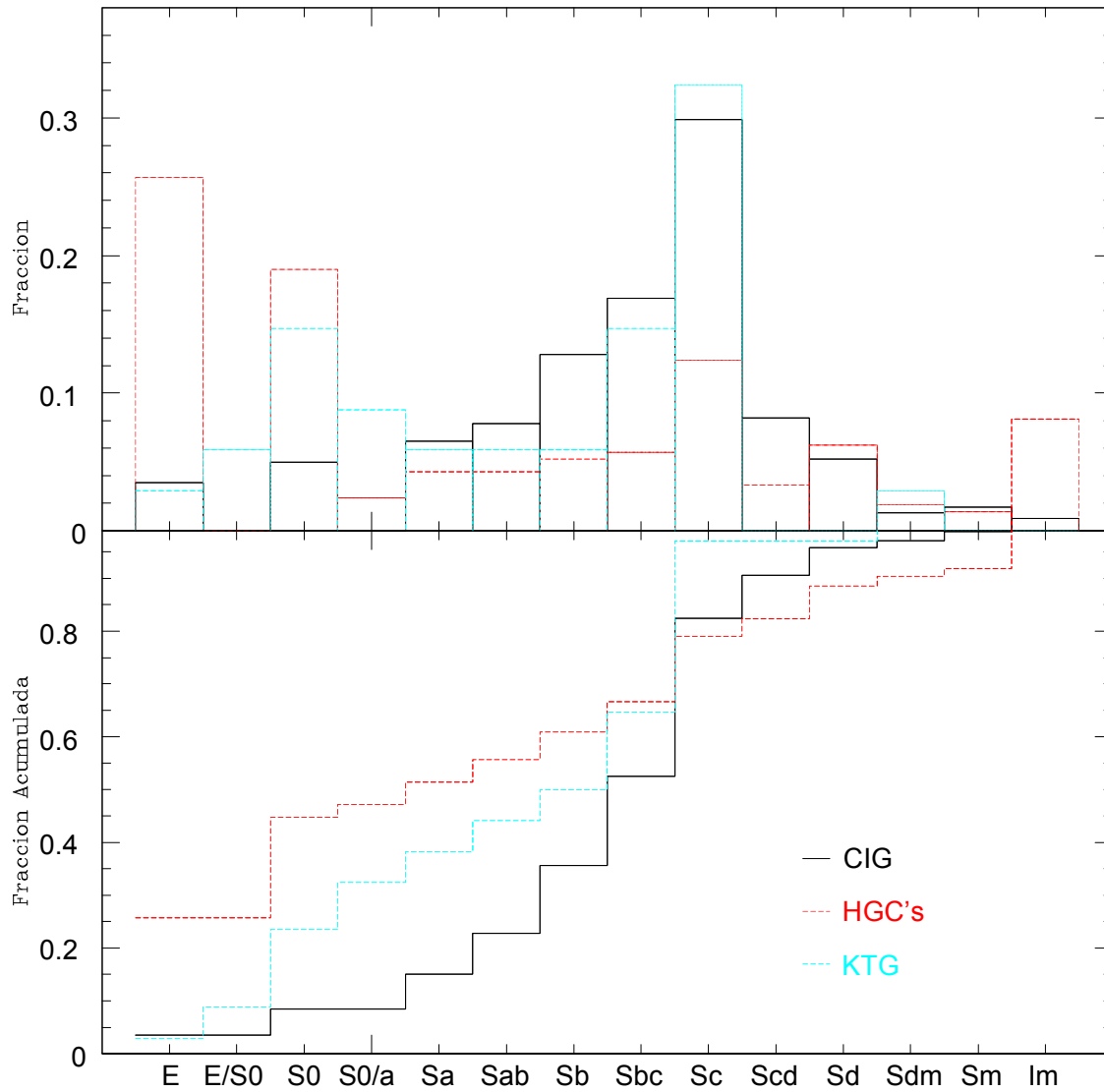


Figura 16. Histograma y fracciones acumuladas para la muestra de galaxias aisladas (CIG), galaxias en grupos compactos (HGC's) y galaxias en sistemas triples.

KTG	HT NED	HT Este Trabajo	Barras	g	Comentarios	T, P, O
KTG2a	S0	SAB0a	B	0.17	Envolvente (PM) (2)	Triplete
KTG2b	Sb	SABbc	B	0.54	Cola de Marea, puente (PM) (2)	Triplete
KTG3a	S0-	SAB0	B	0.22	Giro Isofotal (SI) (3)	Triplete
KTG3b	S0	S0	-	-	Giro Isofotal (SI) (3)	Triplete
KTG3c	E	S0	-	-	Giro Isofotal (SI) (3)	Triplete
KTG4a	Sb	Sb	-	-	Nested Leading-trailing arms (I) (3)	Triplete
KTG4b	Sb	Sc	-	-	Galaxia Taffy, puente de radio(I) (3)	Triplete
KTG4c	Sc	Sc	-	-	Galaxia Taffy, puente de radio(I) (3)	Triplete
KTG5c	(R)Sa(s)	E/S0	-	-	Cascarones (I) (2)	Par
KTG6a	S0	S0a	-	-	(NI)	Par
KTG9b	S0a	S0a	-	-	Brazos de Marea (I)	Par
KTG9c	Sa	SBb	B	0.28	Brazos de Marea (SI)	Outlier
KTG10a	S0	SABa	B	0.16	(NI)	Par
KTG10b	Sa	S0a	-	-	(NI)	Par
KTG12a	E	SABab	B	0.33	Brazo en Forma de Abanico (I) (3)	Triplete
KTG12b	SBsb	SB(r)bc	B	0.61	Eyebird (SI) (3)	Triplete
KTG12c	E	SAB0	B	0.28	Abanico, Cascarones (I) (3)	Triplete
KTG13a	SABcd	SAB(rs)bc	B/R	0.19	Eyebird (SI)	Outlier
KTG13b	Sb	SAB(r)bc	B	0.34	Brazos de Marea (I)	Par
KTG14a	S0	Sa	-	-	Brazos de Marea (I) (3)	Triplete
KTG14b	SaAGN	Sa	-	-	Brazos de Marea, puente (I) (3)	Triplete
KTG14c	Sa	Sb	-	-	Brazos de Marea, puente (I) (3)	Triplete
KTG15a	Sc	(R)S(rs)c	R	-	Asimetría (I) (3)	Triplete
KTG15b	E	S0	-	-	Giro Isofotal (SI) (3)	Triplete
KTG15c	Sb	Sbc	-	-	Asimetría (I) (3)	Triplete
KTG17a	Sa	Sa	-	-	(NI)	Outlier
KTG17b	Sc(f)	Sc	-	-	(NI)	Par
KTG18a	SbSy2	Sc	R	-	Brazo en Forma de Abanico (M) (2)	Triplete
KTG18b	Sa	SB(r)bc	B	0.50	Brazos de Marea (M) (2)	Triplete
KTG20a	Sa	Sab	-	-	(NI)	Par
KTG20b	Sd	Sc(r)	R	-		Outlier
KTG20c	S0	SABd	B/R	0.24	Warp (SI) (1)	Par
KTG21a	SB(s)c	S(r)c	-	-	Eyebird, Marea (I) (3)	Triplete
KTG21b	Sc	Sc	-	-	(PM) (3)	Triplete
KTG21c	Sa	Sbc pec	-	-	(PM) (3)	Triplete
KTG24a	SB(r)bc	SBbc(r)	B/R	0.21		Outlier
KTG24b	Sc	SBc	B	0.39		Outlier
KTG29a	S0AGN	S0a	-	-	Giro Isofotal (SI) (3)	Triplete
KTG29b	E	E	-	-	Perturbada (I) (3)	Triplete
KTG29c	Sa(f)HII	Sc	-	-	Brazos de Marea (I) (3)	Triplete
KTG33a	E1LINER	E/S0	-	-	(NI)	Triplete
KTG35a	Sb	SABc	B	0.76		Outlier
KTG35b	Sb	Sbc(r)	R	-	Brazos de Marea (I) (2)	Par
KTG35c	S0	S0	-	-	Giro Isofotal (PI) (2)	Par
KTG36a	E	S0a	-	-	Brazos de Marea (I) (3)	Triplete
KTG36b	Sb(f)	Sab	-	-	Warp (SI) (3)	Triplete
KTG36c	E	E/S0	-	-	Twisting (SI) (3)	Triplete
KTG37b	E	E	-	-	Twisting (SI)	Outlier
KTG37c	Sa	Sb	-	-	Warp (SI) (1)	Par
KTG38a	SAB(rs)b)pec	SBc(rs)	B/R	0.64	Puente, Marea (I) (3) (I) (3)	Triplete
KTG38b	SB(s)b)pecHII	SBc(r)	B/R	0.56	Puente, (I) (3)	Triplete
KTG38c	SB(s)c)pec	SABc(r)	B/R	0.28	Brazos de Marea (I) (3)	Triplete
KTG39b	SA(r)c)pec HII Sbrst LINER	SABc	B	0.03	Marea, Perturbada (I) (3)	Triplete
KTG39c	Sampec Wolf-Rayet	SABdm	B	0.6	Marea, Perturbada (I) (3)	Triplete

Tabla 9. Clasificación morfológica final.

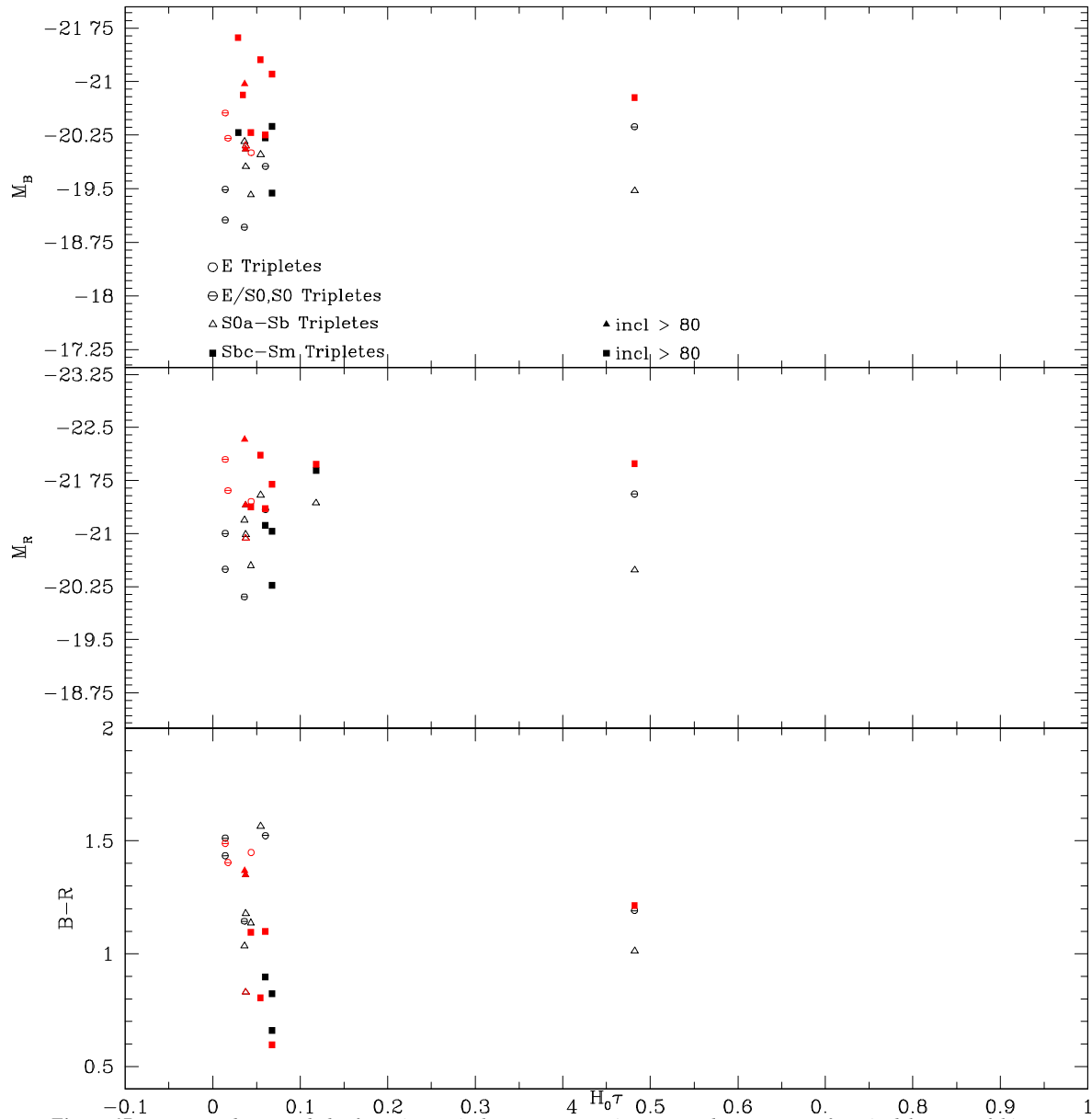


Figura 17. Diagrama de propiedades fotométricas (color $B-R$, M_B y M_R) vs tiempo de cruce como función del tipo morfológico.

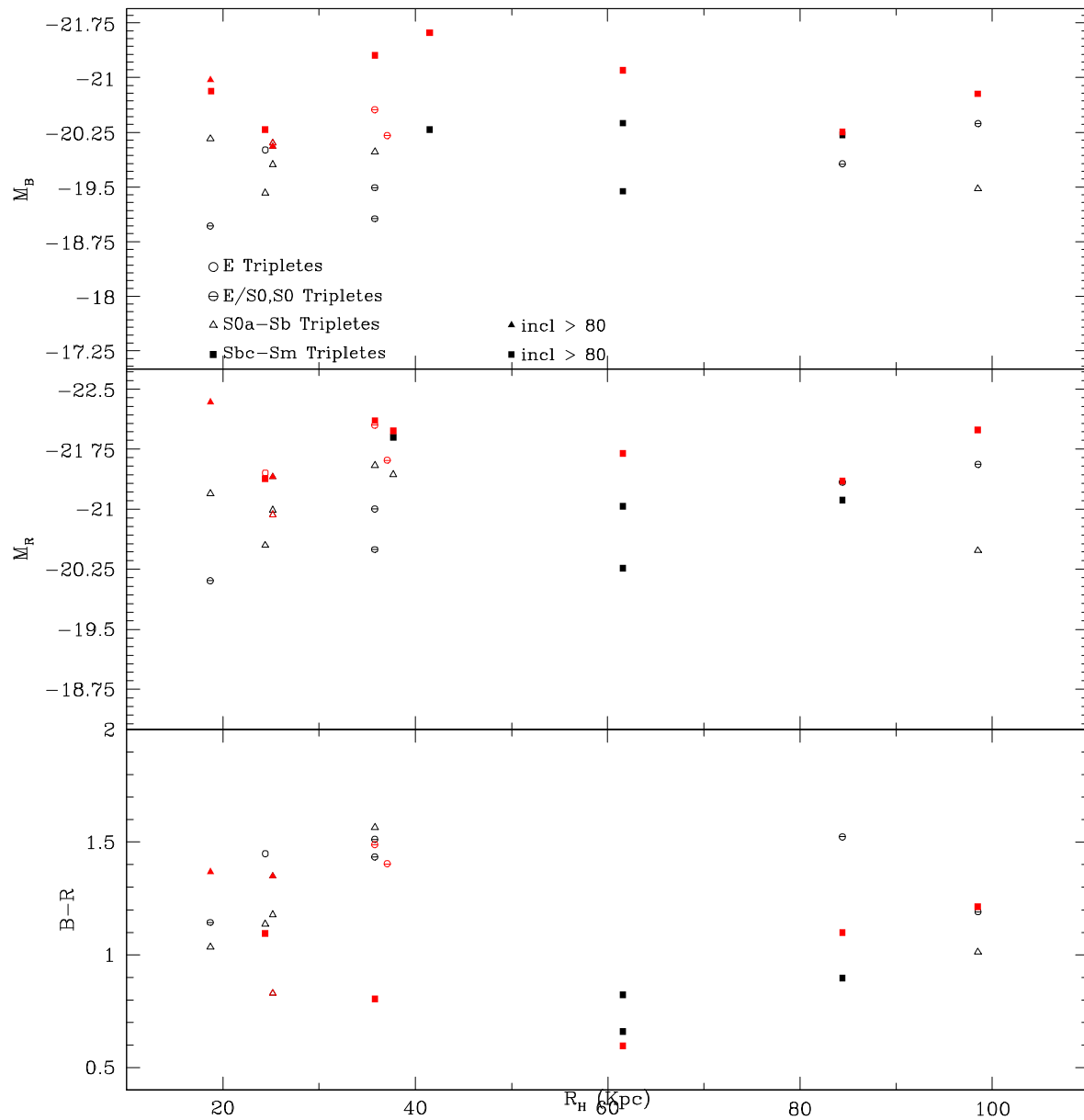


Figura 18. Diagrama de propiedades fotométricas (color $B-R$, M_B y M_R) vs radio armónico como función del tipo morfológico.

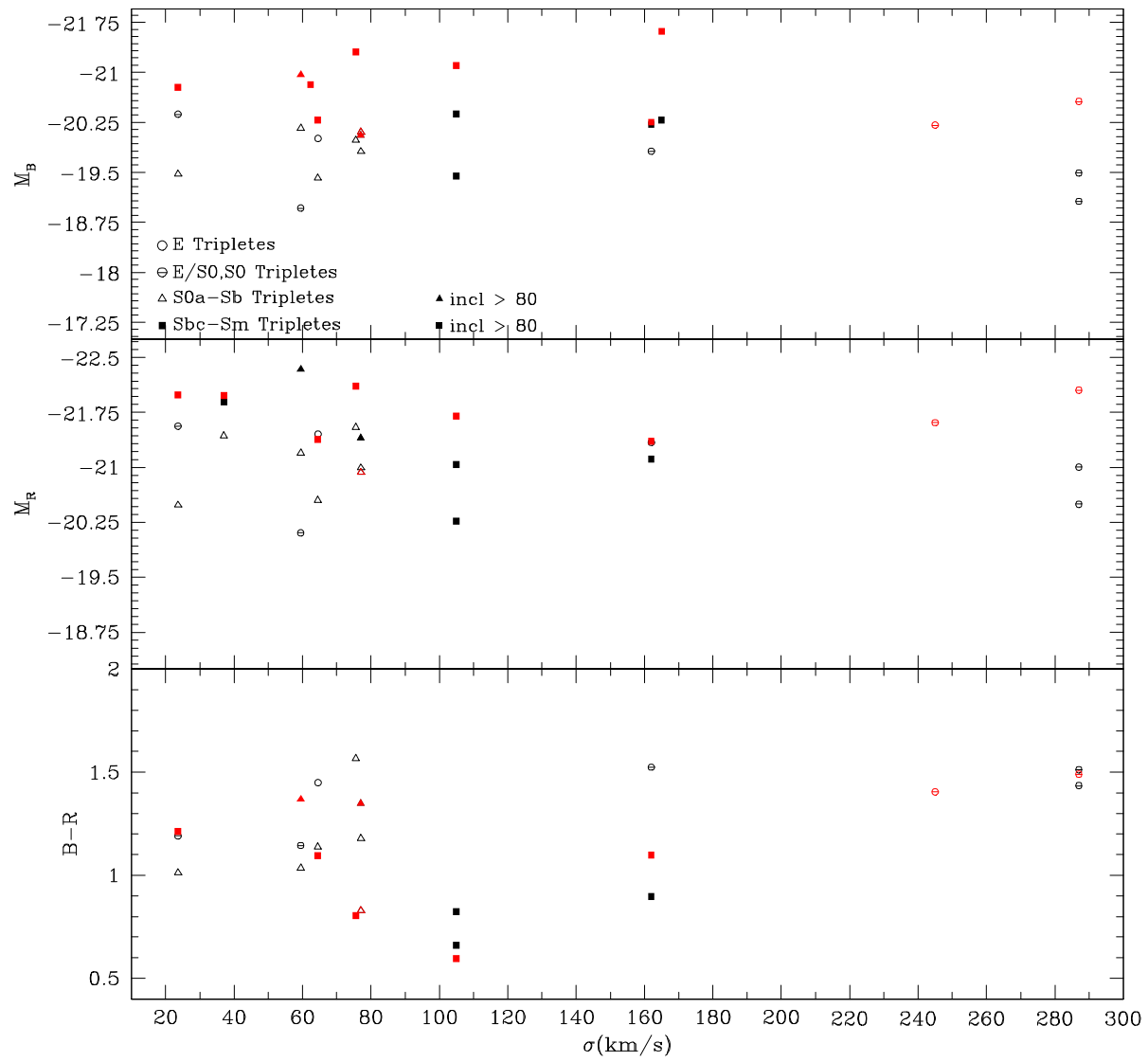


Figura 19. Diagrama de propiedades fotométricas (color $B-R$, M_B y M_R) vs velocidad de dispersión como función del tipo morfológico.

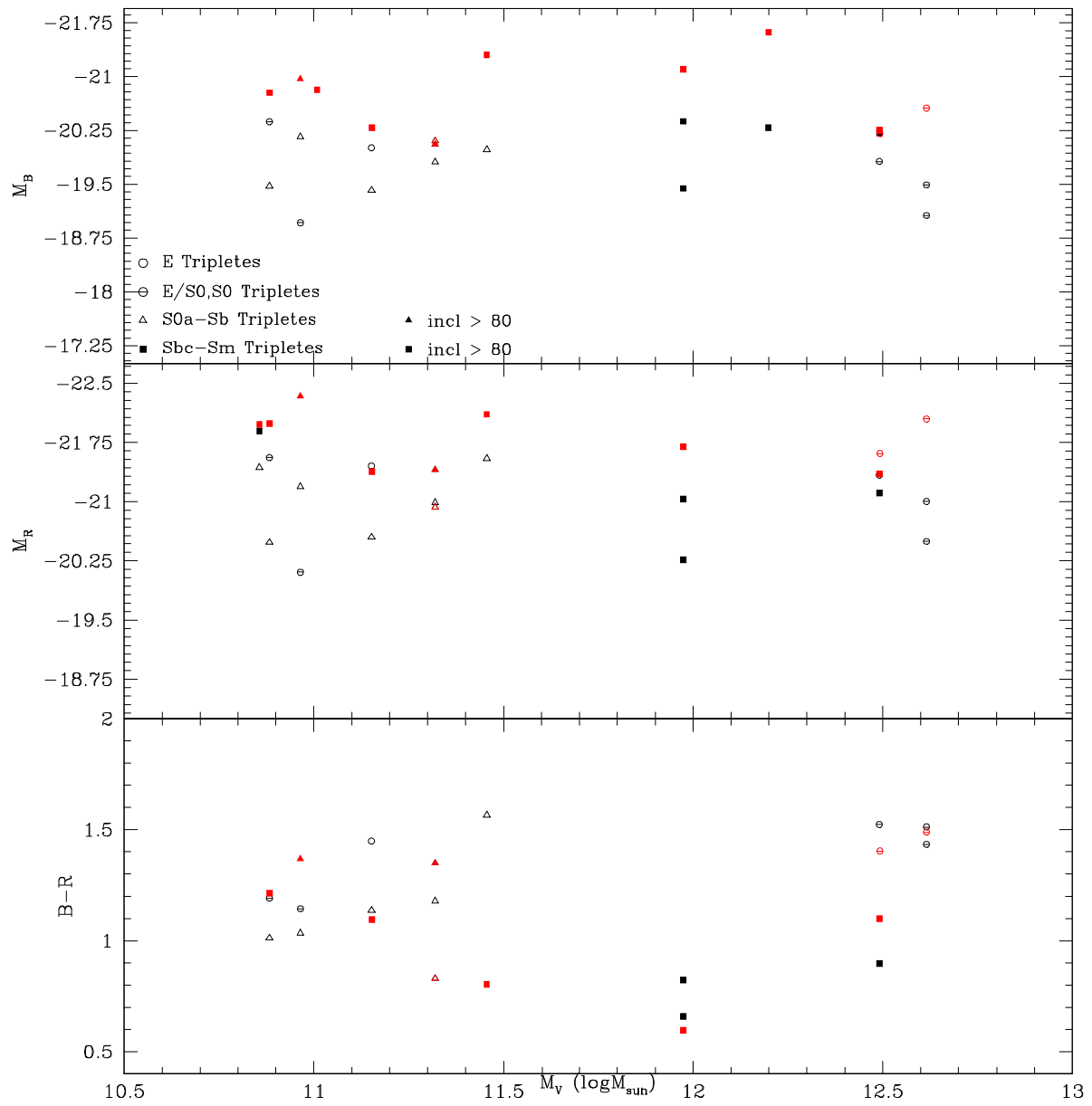


Figura 20. Diagrama de propiedades fotométricas (color $B-R$, M_B y M_R) vs masa virial como función del tipo morfológico.

KTG		C	δC	A	δA	S	δS
KTG1	A	3.81	0.06	0.64	0.02	0.32	0.00
KTG2	B	3.15	0.05	0.71	0.02	0.60	0.02
KTG3	A	4.43	0.21	0.02	0.00	0.04	0.00
KTG3	B	3.64	0.34	0.03	0.00	0.13	0.00
KTG3	C	3.92	0.35	0.03	0.01	0.18	0.01
KTG4	A	3.65	0.32	0.02	0.00	0.15	0.01
KTG4	B	2.91	0.15	0.58	0.00	1.06	0.02
KTG4	C	3.57	0.14	0.25	0.01	0.37	0.01
KTG5	C	4.63	0.17	0.01	0.01	0.05	0.00
KTG6	A						
KTG9	B	3.92	0.25	-0.05	0.01	0.25	0.01
KTG9	C	2.57	0.20	0.05	0.07	0.36	0.02
KTG10	A	4.29	0.22	0.05	0.01	0.03	0.00
KTG10	B	3.79	0.40	0.04	0.00	0.26	0.01
KTG12	A	3.21	0.25	0.12	0.01	0.28	0.02
KTG12	B	3.81	0.18	0.18	0.01	0.53	0.01
KTG12	C	4.02	0.29	0.06	0.00	0.14	0.00
KTG13	A	3.57	0.12	0.53	0.01	1.14	0.03
KTG13	B	3.96	0.18	0.28	0.01	0.81	0.01
KTG14	A	4.05	0.33	0.01	0.00	0.30	0.01
KTG14	B	4.01	0.11	0.82	0.02	1.12	0.03
KTG14	C	3.73	0.11	0.76	0.02	1.03	0.03
KTG15	A	2.74	0.12	0.19	0.03	0.15	0.02
KTG15	B	3.94	0.30	0.03	0.01	0.14	0.01
KTG15	C	3.06	0.16	0.22	0.02	0.21	0.02
KTG17	A	4.10	0.19	0.95	0.00	0.75	0.00
KTG17	B	4.10	0.32	0.23	0.25	0.26	0.31
KTG18	A	2.13	0.04	1.18	0.01	0.86	0.02
KTG18	B	3.90	0.09	0.26	0.01	0.28	0.01
KTG20	A	4.59	0.23	0.18	0.01	-0.02	0.00
KTG20	B	3.36	0.11	0.15	0.06	0.41	0.03
KTG20	C	2.95	0.20	0.11	0.03	0.05	0.01
KTG21	A						
KTG21	B						
KTG21	C						
KTG24	A	3.34	0.12	0.10	0.01	-0.02	0.00
KTG24	B	3.62	0.19	0.08	0.02	0.02	0.01
KTG29	A	3.15	0.37	0.09	0.01	0.10	0.00
KTG29	B	4.85	0.18	0.59	0.01	0.34	0.01
KTG29	C	2.86	0.08	1.19	0.02	1.09	0.02
KTG33	A	4.49	0.08	0.00	0.00	0.05	0.00
KTG35	A	3.37	0.11	0.28	0.02	0.51	0.02
KTG35	B	3.85	0.25	0.13	0.02	0.04	0.01
KTG35	C	3.72	0.27	0.00	0.01	0.04	0.00
KTG36	A	3.40	0.52	0.06	0.00	0.11	0.00
KTG36	B	4.38	0.29	0.23	0.01	0.13	0.01
KTG36	C	3.26	0.55	0.07	0.00	0.13	0.01
KTG37	B						
KTG37	C						
KTG38	A	2.94	0.15	0.37	0.01	0.25	0.01
KTG38	B	3.10	0.22	0.18	0.01	0.26	0.01
KTG38	C	3.46	0.19	0.06	0.30	0.14	0.01
KTG39	B						
KTG39	C						

Tabla 10. Valores CAS en a banda fotométrica R para muestra de 54 galaxias

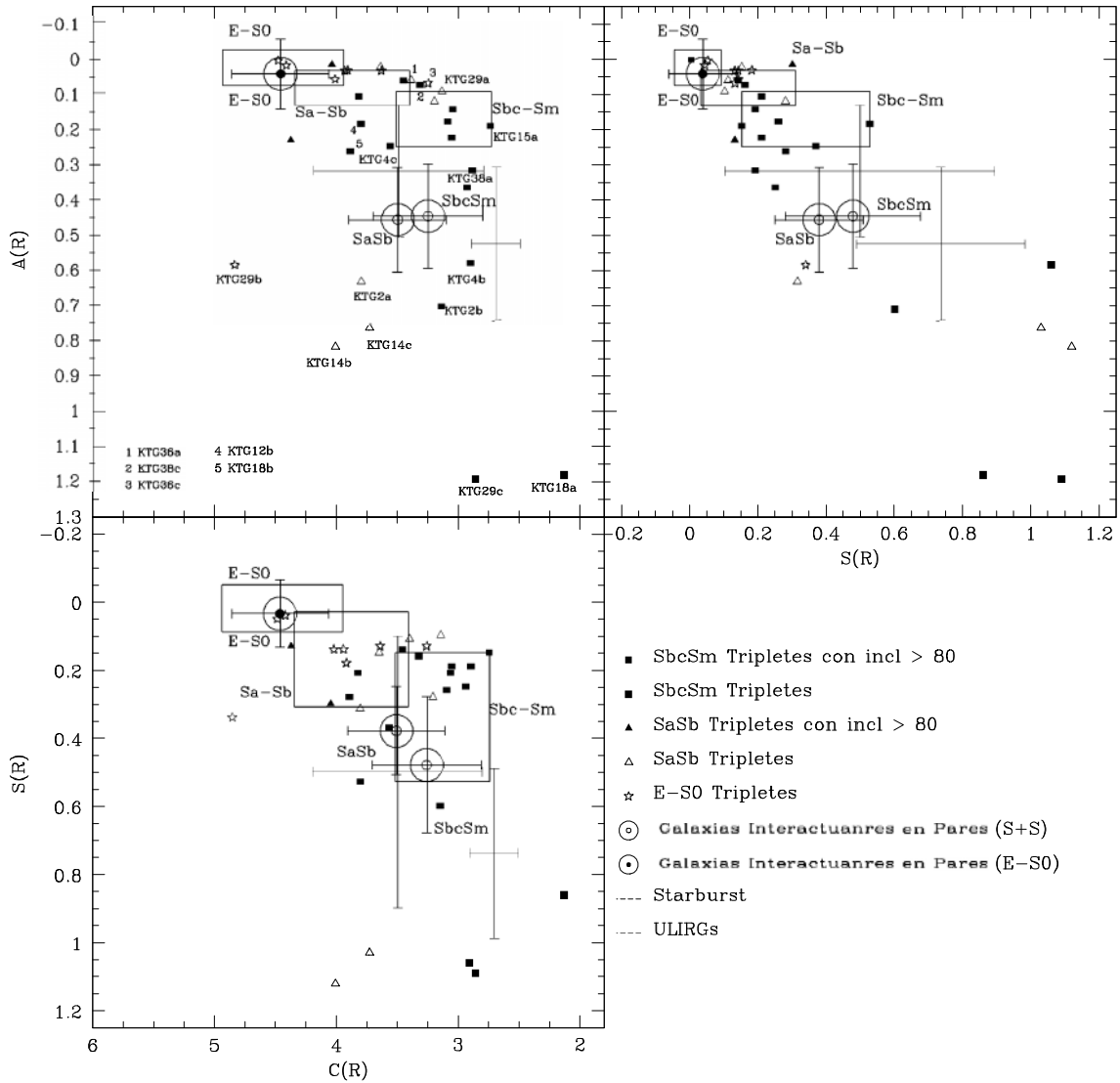


Figura 21. Diagrama CAS donde s muestran los valores promedio para las galaxias aisladas (rectángulos) por tipos morfológicos: E-S0, Sa-Sb, Sbc-Sm. También se muestran los valores típicos obtenidos para galaxias en pares interactuantes (E-S0 y S+S), así como para Starburst y ULIRGs.

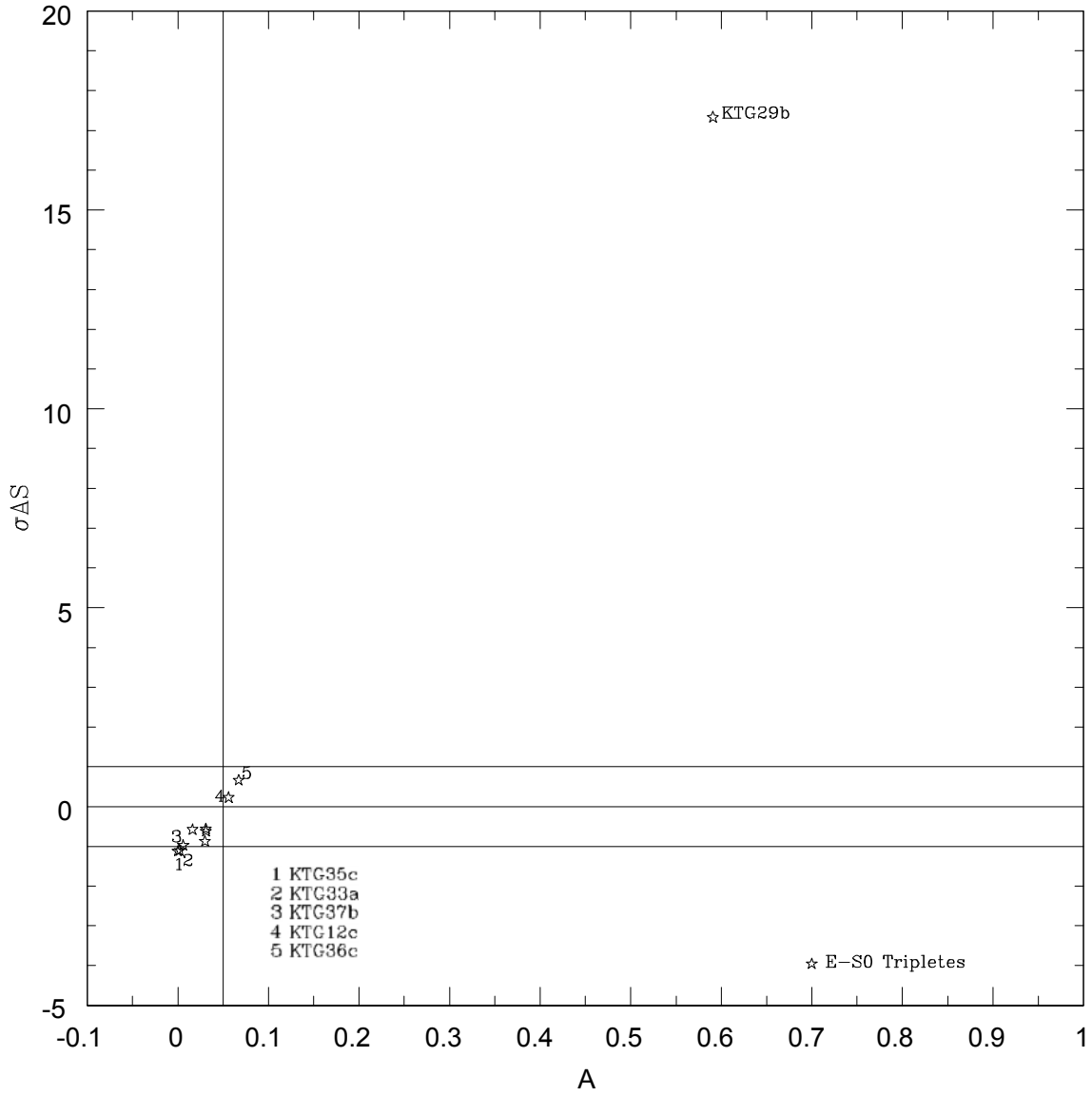


Figura 22. Diagrama A vs σ_{AS} para galaxias E, E/S0 y S0. De acuerdo a Hernández-Toledo et al (2005) este diagrama permite distinguir a las galaxias más deformadas debido a su interacción.

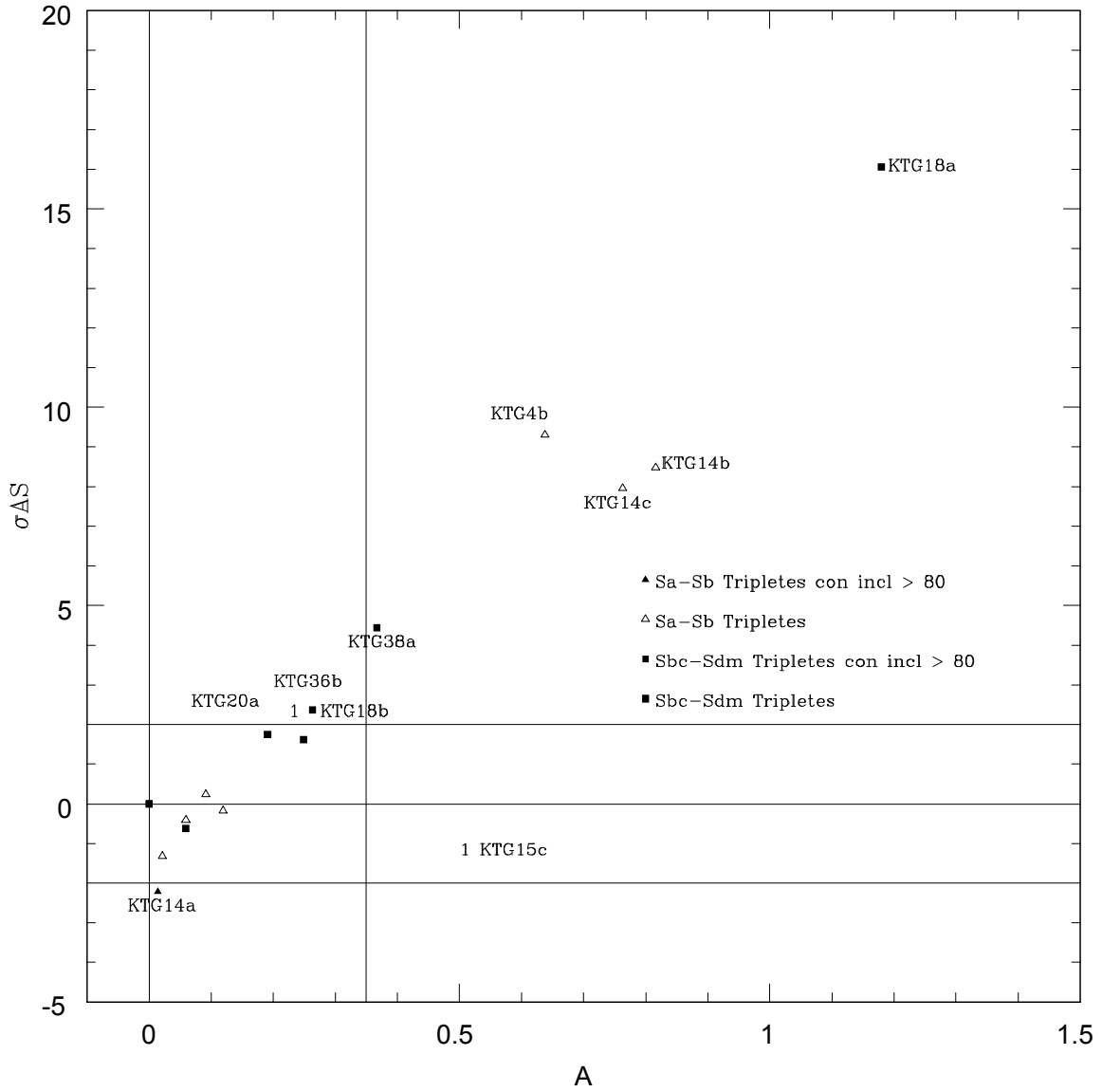


Figura 23. Diagrama A vs σ_{AS} para galaxias Sa-Sb y Sbc-Sm. De acuerdo a Hernández-Toledo et al (2005) este diagrama permite distinguir a las galaxias mas deformadas debido a su interacción.

§ 12 DISCUSIÓN & CONCLUSIONES

12.1 MORFOLOGÍA EN TRIPLETES

Se ha estimado la fotometría (magnitudes aparentes, colores y magnitudes absolutas), así como una reevaluación morfológica de una muestra de 54 galaxias aparentemente asociadas en sistemas triples. Después de actualizar sus velocidades radiales y aplicando el criterio de selección de velocidades radiales ($\Delta V < 1000 \text{ kms}^{-1}$) hemos reducido el número de galaxias a 34, agrupadas en 13 sistemas triples y 12 galaxias formando sistemas de pares cercanos.

Nuestra evaluación morfológica en tripletes indica; que el 68% de ellos corresponde a los tipos morfológicos Sa-Sm, el 23% corresponde a tipos morfológicos E, S0 y transiciones E/S0 y un 9% se identificaron con el tipo morfológico S0a. La fracción de galaxias correspondientes a los tipos morfológicos espirales tempranos (S0a-Sb) contabilizan el 26% de la muestra, mientras que las galaxias del tipo morfológico de espirales tardías (Sbc-Sm) contiene un 50% de la muestra, indicando que nuestros sistemas triples son ricos en galaxias del tipo morfológico de espirales tardíos.

A pesar de que el número de tripletes, utilizado en este estudio no es estadísticamente significativo, hemos utilizado a primer orden de comparación, el contenido morfológico de una muestra de galaxias aisladas correspondientes al catálogo CIG y una muestra de grupos compactos HCG's. A partir de estas muestras se puede apreciar un aparente exceso de galaxias del tipo morfológico S0 en los tripletes. Este exceso, también es apreciado al comparar la muestra de HCG's con la muestra de galaxias aisladas. Las fracción de galaxias espirales en estas muestras son: 90%, 67% 52% para las muestras de CIG, KTG y HCG's respectivamente.

Ha quedado bien establecido, en la literatura reciente, que existe una transformación morfológica de las galaxias de disco que residen en ambientes como los cúmulos ricos. (Dressler 1980, Dressler et al 1997). Moore, et al (1996) notó que los cúmulos de galaxias cercanos está repletos de galaxias elípticas rojas y galaxias de disco S0, mientras que cúmulos más jóvenes (aquellos a *redshifts* (z) mayores) contienen poblaciones sustanciales de galaxias espirales azules, con morfologías particulares. Moore et al (1996) propuso que múltiples encuentros a altas velocidades, entre galaxias, conducen a *starbusts* y evoluciones morfológicas rápidas en un cúmulo de galaxias dado. El "hostigamiento" (del inglés *harassment*) entre galaxias además de conllevar efectos colisionales, tales como *mergers* y canibalismo significa el involucramiento de mareas y encuentros a altas velocidades. En contraste, nuestro análisis indica que las interacciones parecieran ser eficientes para estos tripletes con bajas velocidades de dispersión.

De nuestra reevaluación morfológica estimamos que la frecuencia de estructuras de barras, en nuestros tripletes es del 35%. De esta fracción,

el 33% corresponde a galaxias de tipos morfológicos (S0, S0a, Sa, Sab y Sb), mientras que los tipos espirales tardíos (Sbc-lm) acumulan un 66%, lo cual indica que estas barras se encuentran localizadas principalmente en galaxias espirales tardías.

Barazza et al (2008) estudió la presencia a gran escala de barras en el universo local de una muestra de galaxias pertenecientes a la base de datos SDSS, donde aparentemente no se aplicó ningún criterio de selección en cuanto al medio ambiente, encontrando una fracción en la banda R de 48-52 % de barras. Sin embargo, si se contempla la razón B/D (bulbo disco) la fracción de barras puede aumentar a un 70% para galaxias de disco tardías. En este trabajo hemos encontrado barras con una variedad de tamaños y formas, desde aparentemente fuertes hasta barras pequeñas confinadas a las regiones centrales de las galaxias.

La fracción de barras para las galaxias aisladas (66-70% Hernández-Toledo 2008, 2010), así como lo reportado por Barazza et al (2008), comparadas con la fracción observada en tripletes, sugiere que las interacciones y los efectos globales del medio ambiente, en los tripletes pudieran ser no cruciales para la formación de barras, no obstante llama nuestra atención el hecho de que en tripletes, así como en galaxias aisladas, la fracción de barras en galaxias espirales tardías es aproximadamente comparable. Si esto no es un efecto de selección debido a lo pequeño de nuestra muestra, esto implica la evidencia del papel de dos escenarios en competencia, por un lado discos fríos dinámicos que pueden formar una variedad de barras, (con poblaciones ricas en galaxias espirales tardías) y por otro lado la presión que ejerce el medio ambiente en los tripletes bajo la acción de torques gravitacionales para inhibir la formación de barras.

La mayoría de los anillos observados en nuestra muestra de galaxias son del tipo que circundan al final de las barras y anillos elongados a lo largo del ángulo de posición de las barras. Anillos externos como internos fueron detectados, contabilizando un 20% de anillos en nuestra muestra.

12.2 SIGNOS DE INTERACCIÓN Y MORFOLOGÍA

Nuestro análisis de fotometría superficial en dos dimensiones, en las bandas B, V, R, e I en combinación con las imágenes procesadas, fueron usadas para buscar evidencias relacionadas con interacciones gravitacionales y procesos de fusión de galaxias (*mergers*). De las 34 galaxias distribuidas en 13 tripletes, 19 (56%) muestran una variedad de evidencias morfológicas de signos de interacción, 6 más de ellas (17%) están involucradas en procesos avanzados de fusión (*mergers*) y solamente 9 galaxias no muestran signos claros de interacción (ver tabla 8).

En 11 tripletes, al menos una componente de cada sistema triple muestra signos de interacción, en 9 de ellos notamos que dos miembros forman pares cercanos en una estructura jerárquica en estos tripletes. Estos resultados son similares a los reportados para objetos individuales en SCG's (Pompei et al. 2007) y no son muy diferentes a lo reportado para grupos compactos (Mendes de Oliveira and Hickson 1994). Nuestras

observaciones sugieren que una variedad de mecanismos están jugando un papel importante, los cuales se ven reflejados en las evidencias de interacción observadas en nuestros tripletes ya antes mencionados, así como en su contenido morfológico. Hemos encontrado galaxias en sistemas triples que parecen convivir con un halo común en un proceso avanzado de fusión. Los tripletes en los que fue más fácil detectar estas evidencias de interacción fueron las galaxias espirales. Las observaciones de deformaciones de marea, así como la morfología peculiar de las galaxias, sugieren encuentros recientes.

Las simulaciones de N-cuerpos indican que el tiempo de vida de los puentes y las colas de marea son de alrededor de 10^8 años (Toomre & Toomre 1972; Barnes & Hernquist 1992). Además la presencia de largas colas de mareas, nos da una idea las razones de masa de las galaxias involucradas. La presencia de *warps* en algunas de nuestras galaxias, indica deformaciones en los discos externos, sugiriendo una fuerte interacción entre los componentes de esos tripletes. Un análisis detallado de la relación entre los parámetros de los *warps* y las propiedades de las galaxias ha revelado que los *warps fuertes* son principalmente causados por interacciones de marea, puesto que los *warps débiles* son formados por una variedad de mecanismos, entre los cuales están incluidos la acreción de gas.

Un perturbador puede deformar la distribución de las estrellas en una galaxia dada por fuerzas de marea y la deformación en el campo gravitacional resultante, puede afectar tanto a las estrellas como el movimiento del gas, que traen como resultado las asimetrías resultantes, observadas en algunas de nuestras galaxias en tripletes. Para las pocas galaxias elípticas observadas también hemos buscado signos de interacción relacionados con las interacciones gravitacionales y procesos de fusión (*mergers*). Dentro de estas características están incluidas giros fuertes en las isofotas, la presencia de cascarones, abanicos y estructuras nucleares elongadas (Schweizer 1998).

Hemos detectado varios sistemas, con cascarones, que pudieran estar asociados con eventos de acreción. Los cascarones se considera que pueden ser generados a través de proceso de fusión (*mergers*), entre galaxias de diferentes masas (razones de masa típicos 1/101/100; Dupraz & Combes (1986); Hernquist & Quinn (1987 a, b)). Otros Mecanismos como (*cross-fuelling*) acreciones pequeñas pueden también estar presentes en acción. Toda la evidencia ya señalada sugiere:

- ❖ La mayoría de nuestros tripletes están evolucionando en ambientes de baja densidad a través de procesos de acreción e interacciones en curso a gran escala.
- ❖ Elementos valiosos acerca de la formación del triplete, así como de su evolución.
- ❖ Una fracción significativa de los tripletes observados son tripletes físicos y por extrapolación que una población significativa de los tripletes deben estar presentes en muestras estadísticamente completas de este tipo de objetos.

Por lo anterior es entonces crucial hacer observaciones de muestras más completas de tripletes.

12.3 LOS EFECTOS DE LAS INTERACCIONES EN LAS PROPIEDADES FOTOMÉTRICAS GLOBALES.

El paso a seguir es probar que las propiedades fotométricas de las galaxias miembros de tripletes están influenciadas por interacciones. Para dicho propósito, usamos una muestra de control de galaxias aisladas previamente observadas en las bandas B, V, R, I con las mismas herramientas observacionales utilizadas en nuestra muestra de Tripletes.

Nuestra muestra de galaxias aisladas fué segregada por tipos morfológicos y está compuesta por 680 galaxias tempranas (E, S0 E/S0, Hernández-Toledo 2006) y 80 galaxias espirales (S0a-Sm/Irr Hernández-Toledo 2007, Hernández-Toledo 2008). Las figuras 13 14 y 15 muestran una comparación de las distribuciones de las magnitudes absolutas para los tripletes y las galaxias aisladas, divididas de nuevo por tipos morfológicos: tempranas (E, E/S0, S0), intermedias (S0a-Sb) y tardías (Sbc-Sm/Irr). Los promedios de las distribuciones de las magnitudes absolutas para las bandas B, V, R e I son presentadas, así como su dispersión (σ) correspondiente.

Las distribuciones de magnitudes absolutas revelan que los tipos tempranos y los intermedios, muestran un promedio similar a los promedios de las galaxias aisladas. Mientras que en el caso de los tipos tardíos los promedios en la banda fotométrica B se muestran 0.5 magnitudes más brillantes que en las galaxias aisladas.

A pesar de que el número de galaxias involucradas es pobre, realizamos una prueba *T-Student*. La tabla 11 muestra que el exceso en luminosidad azul es significativo y está presente en las galaxias tardías. Esto es interpretado como un signo de emisión estimulada, producto de formación estelar inducida por interacciones en las galaxias espirales tardías, similar a lo observado en las componentes tardías en pares (E/S0 + S Hernández-Toledo 1999, 2001). Este resultado puede considerarse como otra evidencia independiente, a favor de la asociación física de estas galaxias en verdaderos sistemas triples.

Muestras	Dif Max Abs	Significancia
CIG vs KTG	0.14	99.88
CIG vs HGC's	0.21	90.48
KTG vs HGC's	0.21	90.48

Tabla 11. Resultados de la prueba T-Student

La tabla 12 muestra un resumen de la comparación de la emisión global en la banda fotométrica B por tipos morfológicos. La columna 1 muestra el intervalo de tipos morfológicos, la columna 2 la magnitud absoluta en el azul (B) y su correspondiente σ , la columna 3 muestra su correspondiente magnitud absoluta en el azul B y su correspondiente sigma para la muestra de tripletes.

Tipo Morf.	CIG ^{H-T}	KTG	p
E-S0	-20.30 ± 0.27	-19.90 ± 0.56	0.02
S0a-Sb	-20.28 ± 0.81	-20.00 ± 0.52	0.29
Sbc-Sm	-19.86 ± 1.07	-20.52 ± 0.60	0.016

Tabla 12. Valor medio de la magnitudes en el filtro B por tipo morfológico para las galaxias aisladas (CIG), Tripletes(KTG) y grupos compactos de Hickson (HCG's).

^{H-T} Hernández-Toledo et al. 2009

La figura 24 muestra un diagrama color magnitud (M_R vs (B-V), (B-R) y (B-I) ambas magnitudes corregidas por extinción) por tipos morfológicos. Como comparación hemos incluido los valores correspondientes para la muestra de galaxias aisladas. Los tripletes muestran una dispersión mayor en colores que las aisladas, consistente con una variedad más amplia de tasas de formación estelar en tripletes (Kennicutt 1998).

PARÁMETROS DINÁMICOS

No se encontró alguna tendencia significativa entre los parámetros graficados. Sin embargo todos los diagramas muestran una clara segregación de las galaxias en dos regiones, con la mayoría de los tripletes ocupando las regiones de valores más bajos de los parámetros dinámicos. Para el tiempo de cruce todos los tripletes, excepto KTG 12 se encuentran en el rango $H_0 < 0.1$, para el radio armónico todas excepto (KTG12, KTG15 y KTG38), se encuentran en el rango $R_H < 40$ Kpc, mientras que en el caso de la masa virial y de la velocidad de dispersión todas las galaxias excepto (KTG3, KTG15, KTG33, KTG38 KTG39), están en el rango $\log M_v < 12$ y $v < 100$ kms⁻¹.

Hemos notado que los efectos del criterio de selección están presentes en nuestra muestra, puesto que hemos requerido que la mayoría de nuestros tripletes quepan físicamente en el tamaño de nuestro CCD (4.2), lo que significa la presencia de tripletes meramente compactos.

Los parámetros dinámicos estimados para nuestros 13 tripletes, no son estadísticamente diferentes de los valores de los Tripletes K. A pesar de que introducimos un sesgo en la forma de seleccionar nuestros tripletes ajustando su configuración aparente al tamaño del CCD, notamos que la mayoría de los tripletes en ésta muestra tienen parámetros dinámicos con valores bajos $H_0 < 0.1$, $R_H < 40$ kpc, $\log M_v < 12$ y $v < 100$ kms⁻¹. Hemos encontrado que los tripletes muestran características morfológicas similares a los grupos compactos CC's (Mendes de Oliveira & Hickson 1994; Pompei et al. 2007).

Nuestros tripletes constituyen estructuras con dispersión de velocidades bajas y son ricos en espirales en ambientes de baja densidad. En contraste, los grupos más ricos tienen una dispersión de velocidades mayores, con pocos miembros que contengan mucho gas y que generalmente son estructuras embebidas. Nuestros resultados, a pesar de tener un número estadístico pequeño, dan evidencia en favor de que los KTG y los CG's, a pesar de compartir una escala similar, corresponden a sistemas de galaxias diferentes. Los sistemas triples verdaderos están asociados más bien con estructuras de campo.

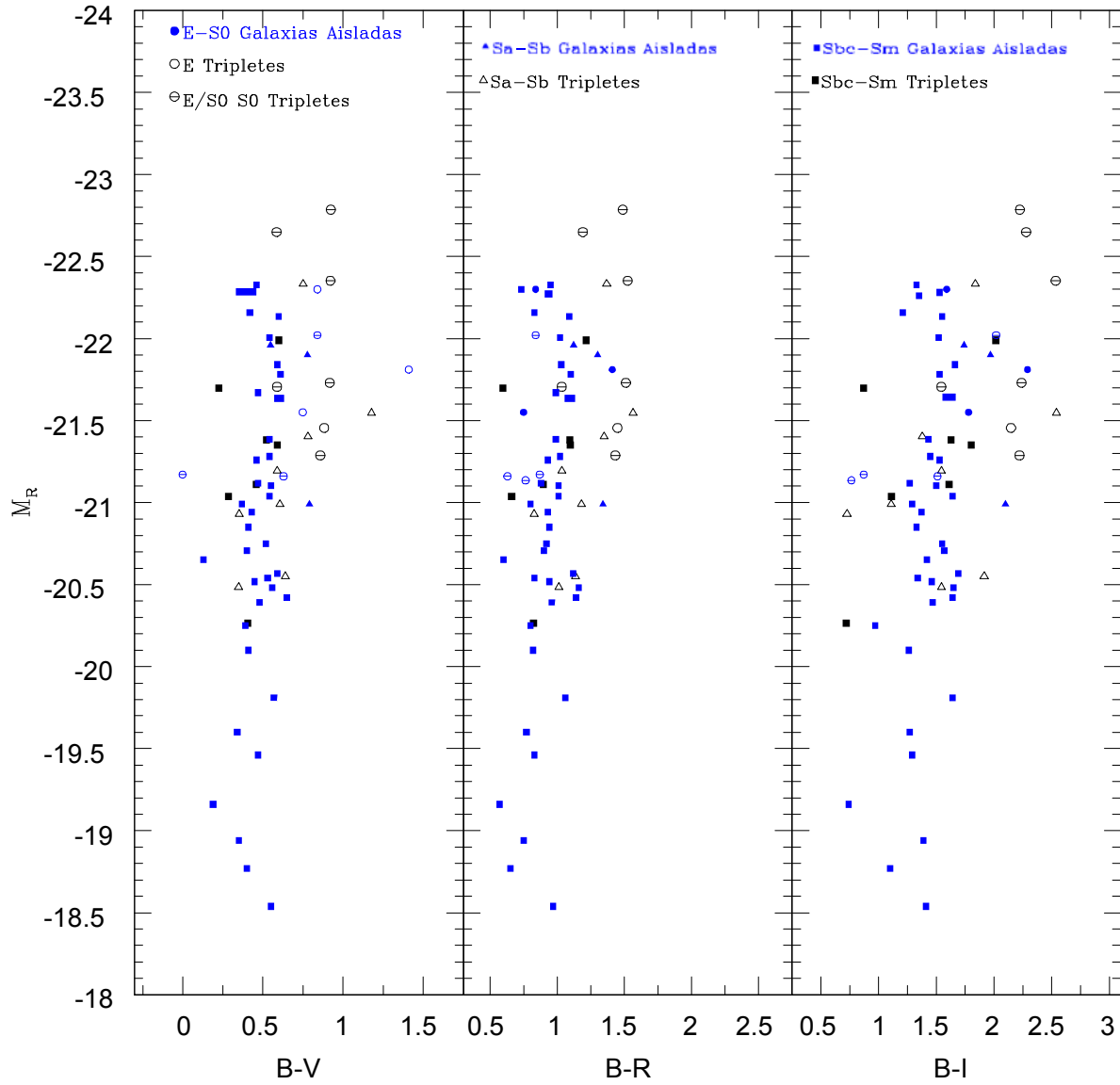


Figura 24. Diagrama color magnitud para una muestra de galaxias aisladas (CIG) y una muestra de galaxias en sistemas triples (KTG) por tipos morfológicos.

12.5 LA INCIDENCIA DE NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS EN LOS TRIPLETES

Los tripletes muestran varios niveles de actividad, desde baja formación estelar a características *Wolf-Rayet*, lo cual indica que la formación estelar vigorosa está en proceso. Los tripletes, también son buenos candidatos a investigar posibles conexiones entre interacciones de galaxias y AGN. La incidencia de AGN en nuestra muestra de 13 tripletes es de: 37% para galaxias tempranas (E, E/S0 y S0) 66% para galaxias espirales tempranas (S0a-Sb) y 12% para galaxias espirales tardías (Sbc-Sm).

12.6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Tradicionalmente, el estudio de las asociaciones de galaxias se ha enfocado en los cúmulos ricos de galaxias. Sin embargo, estos cúmulos representan las asociaciones extremas de galaxias. Por el contrario asociaciones pobres, o grupos pobres, son menos masivos pero más numerosos y constituyen una fracción significativa de masa en el universo.

Este trabajo contribuye con el entendimiento de la naturaleza de las galaxias en el orden jerárquico más bajo de asociaciones de galaxias: los sistemas tripletes, los cuales han sido raramente estudiados por sus propiedades morfológicas y fotométricas en nuestro universo local.

Hemos presentado el resultado de nuestra fotometría BVRI CCD para un conjunto de 54 galaxias presuntamente asociadas en tripletes aislados pertenecientes al catálogo KTG (Karachentseva 1979). Aportamos nuevas estimaciones de los parámetros fotométricos (magnitudes aparentes y absolutas y colores. Hemos evaluado y analizado la morfología de de cada una de estas galaxias (ver tabla 9).

La reevaluación morfológica de estas galaxias se llevó a cabo con un énfasis especial en estructuras tales como barras, anillos y perturbaciones de varios tipos asociados a la interacción entre galaxias.

Después de haber actualizado los valores de las velocidades radiales (ver última columna de la tabla 6), con la información disponible en las bases de datos ya mencionadas, nuestra muestra original de 54 galaxias se redujo a una muestra de 34 galaxias agrupadas en 13 Tripletes. Lo anterior tomando como criterio de selección que la diferencia de velocidades radiales entre componentes, no fuera mayor a 1000 kms^{-1} . Esto según la velocidad de escape con masa igual a 10^{12} masas solares. Los resultados relevantes obtenidos son los siguientes.

- ❖ Hemos reportado nueva fotometría CCD homogénea en los filtros fotométricos B, V, R e I, con estas observaciones obtuvimos del sistema Johnson-Cousins magnitudes, colores así como magnitudes absolutas para las 54 galaxias observadas en el telescopio de 1.5 m OAN SPM.
- ❖ Hemos encontrado un exceso de galaxias del tipo morfológico S0-S0a en tripletes en comparación con una muestra de galaxias aisladas. Este exceso es compartido por la muestra de galaxias en grupos compactos (HCG's Mendes de Oliveira Hickson 1994). Sugieren la existencia de

- procesos de transformación de galaxias espirales en galaxias del tipo S0 en el ambiente de estos tripletes.
- ❖ Después de depurar la muestra original, se encontraron 13 sistemas triples y 12 galaxias en pares cercanos. Los tripletes están compuestos principalmente por galaxias espirales tardías.
 - ❖ La fracción de barras encontrada por intervalos morfológicos es: 34% para tipos espirales tempranos (Sa-Sb) y 66% para los tipos espirales tardíos (Sbc-Sm).
 - ❖ Galaxias barradas en estos tripletes son más frecuentes en las galaxias espirales tardías.
 - ❖ Galaxias espirales tardías muestran un exceso global de luminosidad en la banda fotométrica B de aproximadamente 0.5 magnitudes, cuando se compararon contra la muestra de galaxias aisladas, lo cual aporta evidencia de la existencia de formación estelar inducida en estas galaxias y apunta a la existencia de una población significativa de tripletes físicos en muestras de tripletes más completas.
 - ❖ Las galaxias en sistema triples muestran una dispersión, mayor en el diagrama magnitud-color (figura 23) que las galaxias aisladas, lo cual es consistente con historias de formación estelar más amplias en estas galaxias, muy probablemente producidas por las interacciones entre estas galaxias.
 - ❖ El análisis de las imágenes ópticas y en el infrarrojo cercano ha permitido detectar peculiaridades morfológicas generalmente relacionadas con interacciones gravitacionales y procesos de fusión entre galaxias. Estas características incluyen cambios fuertes en la orientación de las isofotas, la presencia cascarones, discos nucleares, colas de marea y puentes entre otros.
 - ❖ 24 de las 34 galaxias en tripletes muestran que las evidencias morfológicas están generalmente asociadas a interacciones. Esta fracción es comparable con lo reportado para otras muestras de grupos de galaxias en el sur, tales como SCGs (Pompei et al. 2007), así como lo reportado para HCG's por Mendes de Oliveira y Hickson, dando evidencias independientes de poblaciones significativas de tripletes físicos en muestras más completas.
 - ❖ Los tripletes estudiados en el presente trabajo son estructuras con velocidades de dispersión bajas así como tiempos de cruce pequeños, donde las interacciones son un mecanismo eficiente para producir peculiaridades morfológicas asociadas con interacciones, lo cual se aprecia notablemente en las galaxias espirales tardías (Sbc-Sm).
 - ❖ Los parámetros CAS reportados para nuestra muestra de galaxias en tripletes, muestran por un lado diferencias significativas respecto de las galaxias aisladas CIG y por otro lado semejanzas con los valores reportados para galaxias interactuantes en pares. A primera aproximación la asimetría es un buen indicador de interacción entre galaxias cuando éstas son fuertes.
 - ❖ No se encontró ninguna correlación aparente entre los parámetros dinámicos y las propiedades fotométricas. Está pendiente la búsqueda de relaciones entre los parámetros CAS y los parámetros dinámicos.
 - ❖ Construir muestras bien observadas de tripletes aislados, con información fotométrica detallada es de gran relevancia, pues provee, una buena base de datos para comparar contra las predicciones de modelos de formación de galaxias en diversos ambientes. Esta muestra

puede ser comparada contra otras en otros ambientes y a altos corrimientos al rojo (*redshifts*).

- ❖ Este trabajo es el primero de una serie donde se busca evidencia de interacciones entre las galaxias en tripletes así como la caracterización de sus propiedades fotométricas. Como trabajo a futuro se proyecta realizar el análisis de los perfiles diferenciales de brillo superficial de las galaxias, así como las observaciones en 21 cm que se tienen de ellas.

§ APÉNDICE 1

PROBLEMA DE LOS TRES CUERPOS

El problema de los tres cuerpos restringido está compuesto por dos cuerpos de masas M_1 y M_2 similares bajo un campo gravitacional, moviéndose en orbitas circulares y un tercer cuerpo de masa menor m , el cual actuara como partícula de prueba para saber en que puntos este tercer cuerpo estará en equilibrio con los otros dos cuerpos. Es por eso que primero plantearemos y resolveremos el problema de dos cuerpos moviéndose bajo un campo gravitacional.

Dados dos cuerpos de masa m_1 y m_2 a una distancia r entre dos cuerpos (ver figura A.1) definimos

$$r = |r_1 - r_2| \quad (A.i)$$

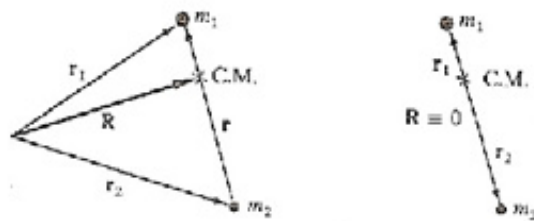


Figura A1. Figura de posiciones relativas entre los cuerpos de masas m_1 y m_2

Con r_1 y r_2 las posiciones de ambos cuerpos y R la distancia al centro de masa del sistema. Si el centro de coordenadas está en el centro de masa $R=0$. Si nos restringimos a sistemas en los cuales no hay fricción, entonces la energía solo depende de la posición definida por r . De esta forma podemos definir la lagrangiana del sistema:

$$L = \frac{1}{2}m_1|\dot{r}_1|^2 + \frac{1}{2}m_2|\dot{r}_2|^2 - U(r) \quad (A.ii)$$

Ahora bien simplificando el origen de coordenadas, escogemos el centro de masa como el origen de coordenadas de tal forma que $R=0$. Lo cual implica que:

$$m_1r_1 + m_2r_2 = 0 \quad (A.iii)$$

La ecuación A.iii combinada con la ecuación A.i da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$r_1 = \frac{m_2}{m_1+m_2} r \quad (A.iv)$$

$$r_2 = -\frac{m_1}{m_1+m_2} r \quad (A.v)$$

Las cuales podemos sustituir en la ecuación de la lagrangiana antes escrita, utilizando a μ como la masa reducida.

$$L = \frac{1}{2} \mu |\dot{r}|^2 - U(r) \quad (A.vi)$$

Con:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (A.vii)$$

De esta forma se redujo el movimiento de dos cuerpos a un problema de un solo cuerpo, donde solo hace falta el movimiento de la partícula de masa μ en un campo central descrito por la función $U(r)$.

Puesto que el potencial solo depende de la posición r (distancia de la partícula al centro de fuerza) el problema tiene simetría esférica; por lo cual entonces sabemos que el momento angular L se conserva, es decir:

$$L = \vec{r} \times \vec{p} = cte \quad (A.viii)$$

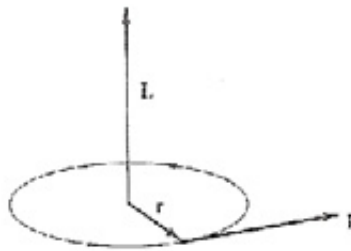


Figura A.2. Ubicación de los vectores r , p y L .

Los vectores de posición (r) y de momento lineal (p) yacen en un plano perpendicular al momento angular L fijo en el espacio (ver figura A.2). Por lo que el problema se reduce a un problema en dos dimensiones (ver figura A.1) donde podemos reescribir su lagrangiana:

$$L = \frac{1}{2}\mu(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - U(r) \quad (\text{A.ix})$$

El momento angular L es cíclico en θ por lo que el conjugado del momento angular en la coordenada θ es:

$$\dot{P}_\theta = \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \quad (\text{A.x})$$

o

$$P_\theta = \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = \mu r^2 \dot{\theta} = cte \quad (\text{A.xi})$$

La simetría del sistema nos permite integrar una de las ecuaciones de movimiento. La cantidad P_θ esta da por una primera integral del movimiento de la partícula cuyo valor es constante y el cual definimos l es decir:

$$l = \mu r^2 \dot{\theta} = cte \quad (\text{A.xii})$$

El hecho de que l sea constante tiene una interpretación geométrica simple: (ver figura A3) el radio vector del camino $r(t)$ barre un área

$$\frac{1}{2} r^2 d\theta \quad (\text{A.xiii})$$

En un intervalo de tiempo dt

$$dA = \frac{1}{2} r^2 d\theta \quad (\text{A.xiv})$$

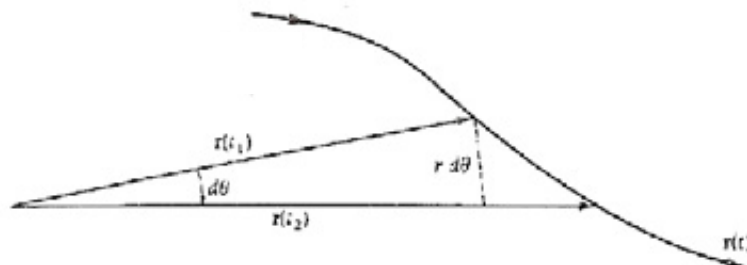


Figura A.3. Área barrida por unidad de tiempo.

Ahora bien si dividimos el término anterior obtenemos:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \dot{\theta} = \frac{l}{2\mu} = cte \quad (A.xv)$$

La ecuación anterior define a velocidad areolar conocida como la segunda ley de Kepler, la cual muestra un resultado general del movimiento de una partícula bajo un campo central.

Puesto que se considero un sistema no disipativo la energía E se conserva.

$$T + U = cte \quad (A.xvi)$$

$$E = \frac{1}{2}\mu(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) + U(r) \quad (A.xvii)$$

O bien:

$$E = \frac{1}{2}\mu\dot{r}^2 + \frac{1}{2}\frac{l^2}{\mu r^2} + U(r) \quad (A.xviii)$$

Ahora bien si conocemos $U(r)$ la ecuación anterior describe completamente el sistema y la integración de la ecuación anterior da la solución general del problema en función de los términos E y l . Resolviendo obtenemos

$$\dot{r} = \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2}{\mu}(E - U) - \frac{l^2}{\mu^2 r^2}} \quad (A.xix)$$

Reescribiendo la Ecuacion en términos de la coordenada θ :

$$d\theta = \frac{d\theta}{dt} \frac{dt}{dr} dr = \frac{\dot{\theta}}{\dot{r}} dr \quad (A.xx)$$

$$r^2 \dot{\theta} = \frac{l}{\mu r^2} \quad (A.xxi)$$

Obtenemos:

$$\theta(r) = \int \frac{\frac{l}{r^2}}{\sqrt{2\mu(E - U) - \frac{l^2}{\mu r^2}}} \quad (A.xxii)$$

Puesto que l es constante, la derivada temporal de θ no puede cambiar el signo y $\theta(t)$ crece monótonicamente con el tiempo.

Hemos reducido la solución del problema a la evaluación de una integral, sin embargo la solución actual pueda ser obtenida para términos específicos de la fuerza F . Si $F(r) \propto r^n$ la solución puede ser expresada en términos de n ; donde valores de $n=1, -2, -3$ implican orbitas circulares. El caso $n=1$ es el oscilador armónico, $n=-2 \propto r^{-2}$ es el caso de una fuerza que depende del inverso de la fuerza al cuadrado

Ahora bien la velocidad radial de una partícula moviéndose en un campo de fuerza central está dada

$$E - U - \frac{l^2}{2\mu r^2} = 0 \quad (\text{A.xxiii})$$

La ecuación anterior tiene dos valores conocidos como puntos de retorno (*turning points*) dados por los valores de las raíces de la ecuación r_M y r_m , lo cual significa que el movimiento está confinado a moverse entre estas dos soluciones

$$r_M \leq r \leq r_m \quad (\text{A.xxiv})$$

Si el cambio de r en función del tiempo es nulo para todo t , el valor de r es constante y el movimiento se dará en orbitas circulares (ver figura A.4).

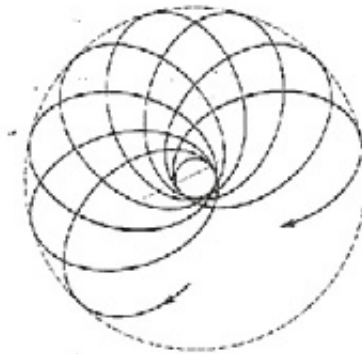


Figura A.4. Orbitas circulares.

Si el movimiento de una partícula bajo un potencial $U(r)$ es periódico la orbita es cerrada (es decir después de un tiempo dado entre los radios máximos y mínimos el objeto volverá a recorrer la misma trayectoria). Si esto no sucediera la órbita descrita será abierta.

Calculando el cambio de θ en función de r , es decir un tránsito completo de r variando desde r_m hasta r_M . Puesto que el movimiento es simétrico en el tiempo, el cambio angular de un ciclo completo es igual al doble del viaje de r_m a r_M

$$\Delta\theta = 2 \int \frac{\frac{l^2}{r^2}}{\sqrt{2\mu(E-U-\frac{l^2}{2\mu r^2})}} dr \quad (\text{A.xxv})$$

La trayectoria será cerrada si $\Delta\theta$ es una fracción racional de 2π es decir si $\Delta\theta = 2\pi ab^{-1}$ con a, b números enteros. O lo que es lo mismo después de b periodos la partícula habrá completado a revoluciones y habrá regresado al origen.

El segundo término del denominador de la ecuación anterior tiene unidades de energía, la cual podemos reescribir:

$$\frac{l^2}{2\mu r^2} = \frac{1}{2} \mu r^2 \dot{\theta}^2 \quad (\text{A.xxvi})$$

Interpretando a este término como la energía potencial centrífuga como:

$$U_c = \frac{l^2}{2\mu r^2} \quad (\text{A.xxvii})$$

De donde la fuerza asociada a dicho potencial es la fuerza centrífuga, dada por:

$$F_c = -\frac{\partial U_c}{\partial r} = \frac{l^2}{\mu r^3} = \mu r \dot{\theta}^2 \quad (\text{A.xxviii})$$

Recordemos que la fuerza anterior no es propiamente una fuerza, sino más bien una fuerza ficticia debido a marcos de referencia no inerciales. Por tanto el potencial efectivo esta dado de la siguiente forma:

$$V(r) = U(r) + \frac{l^2}{2\mu r^2} \quad (\text{A.xxix})$$

Donde $V(r)$ es un potencial efectivo el cual combina a $U(r)$ con el término asociado al movimiento angular alrededor del centro de fuerza. Si la fuerza F está dada en términos de r^{-2}

$$F = -\frac{k}{r^2} \quad (\text{A.xxx})$$

El potencial es igual a:

$$U(r) = -\int F(r)dr = -\frac{k}{r} \quad (\text{A.xxxi})$$

Por tanto el potencial efectivo es:

$$V(r) = -\frac{k}{r} + \frac{l^2}{2\mu r^2} = \quad (\text{A.xxxii})$$

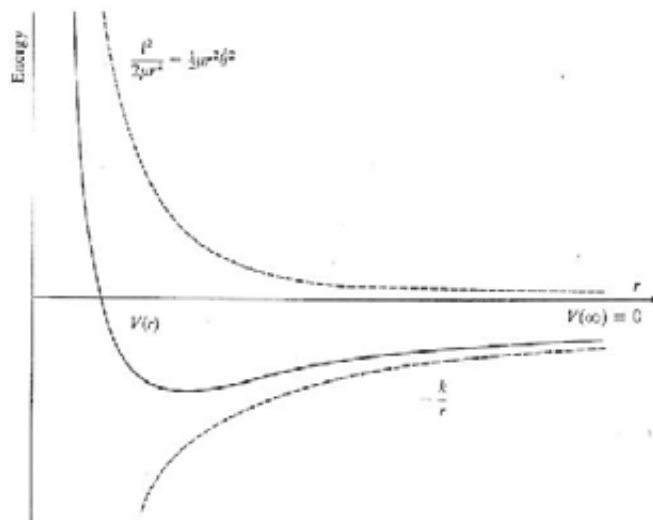


Figura A.5. Potencial efectivo.

La figura A.5 muestra este potencial $V(r)$ dado por la fuerza de la ecuación A.xxx. Si graficamos el movimiento de una partícula en un potencial como el anterior, identificamos (ver figura A.6) las siguientes zonas de energía:

E			
E ₁	E > 0	Energía no ligada.	La partícula se mueve desde energías en infinito hacia el centro de la fuerza (r=0) hasta la barrera de potencial en r=r ₁ y es reflejada hacia valores de r en infinito. V(r) es constante. El cambio de r en el tiempo tiende a 0, por lo que cambia de signo en un punto de retorno r=r ₁ .
E ₂	E < 0	Energía ligada.	El radio de la trayectoria está limitado por r ₃ y la variación r en el tiempo = 0. Movimiento circular.
E ₃	E _m < E ₂ < 0	r ₂ < r < r ₄ .	

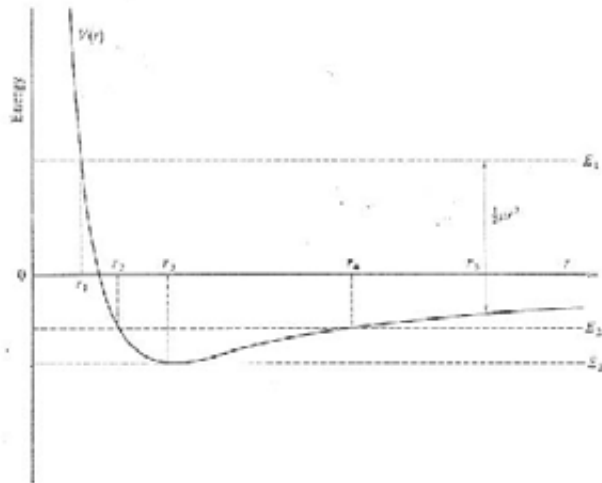


Figura A.5. Diferentes energías para el potencial efectivo.

La ecuación de trayectoria para una partícula moviéndose bajo un campo central cuya magnitud es proporcional al cuadrado de la distancia está dado por la ecuación A.xxii.

Si resolvemos la integral haciendo un cambio de variable pertinente, obtenemos:

$$\text{si } u = \frac{1}{r}$$

$$\cos \theta = -\frac{\frac{l^2}{\mu k r} - 1}{\sqrt{1 + \frac{2E l^2}{\mu k^2}}} \quad (\text{A.xxvii})$$

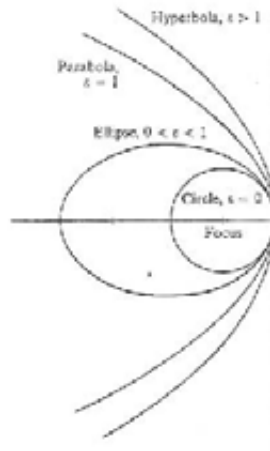


Figura A.6. Diferentes cónicas

Y si definimos las constantes:

$$\alpha = \frac{l}{\mu k}, \quad \varepsilon = \sqrt{1 + \frac{2El^2}{\mu k^2}} \quad (A.xxiii)$$

Obtenemos:

$$\frac{\alpha}{r} = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (A.xxiv)$$

La ecuación anterior define una cónica con un foco en el origen y con α definida como su excentricidad y 2α su lado recto. Dependiendo de los valores de las constantes antes definidas, podemos obtener diferentes cónicas (ver figura A.6):

ε	E	Cónica
> 1	> 0	Hipérbola
$= 1$	$= 0$	Parábola
$0 < \varepsilon < 1$	$V_m < E < 0$	Elipse
$= 0$	$= V_m$	Círculo
< 0	$> V_m$	No permitida

En el caso de que las orbitas sean elípticas (ver figura A.7) los semiejes están definidos como:

$$a = \frac{\alpha}{1 - \varepsilon} = \frac{k}{2|\varepsilon|}, \quad b = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} = \frac{l}{\sqrt{2\mu|E|}} \quad (A.xxv)$$

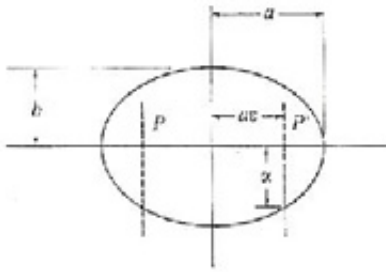


Figura A.7. Trayectorias elípticas.

Una vez resuelto el problema de dos cuerpos moviéndose en un campo central, podemos resolver el problema de tres cuerpos restringido. Sean M_1 , M_2 las masas de dos objetos bajo orbitas circulares alrededor de su centro de masa (ver figura A.8). Sea ω la velocidad angular de este movimiento. Si un objeto de masa m se pone en posición de equilibrio moviéndose alrededor del origen con velocidad angular ω . La masa M_1 ejerce una fuerza F_1 en m en el punto $P(x,y)$ y M_2 una fuerza F_2 . Si m está en equilibrio con respecto a M_1 y M_2 :

$$mr\omega^2 e_r + F_1 + F_2 = 0 \quad (A.xxvi)$$

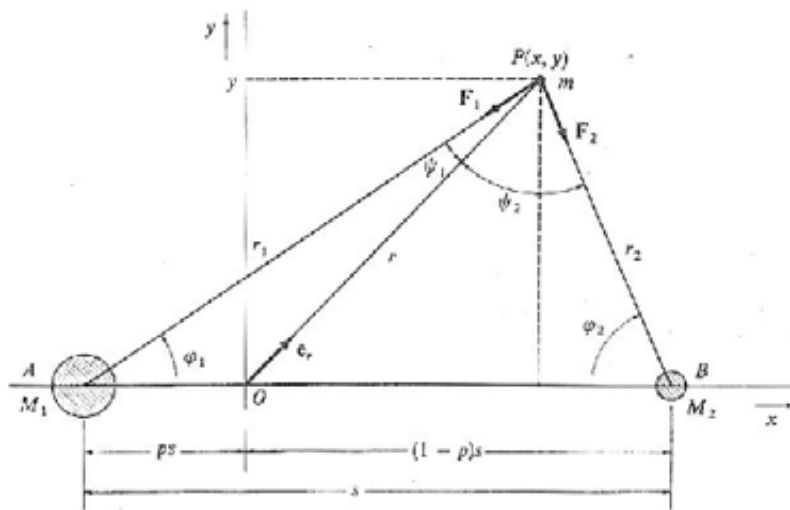


Figura A.8. Diagrama esquemático de la posición del tercer cuerpo de masa m y de los cuerpos de masa M_1 y M_2 moviéndose bajo atracción gravitacional en orbitas circulares.

Si permitimos que los cuerpos estén separados por una distancia s , entonces y las distancias de ambos objetos al centro de masa están definidas por:

$$\overline{OB} = (1 - p)s \quad \overline{OA} = ps \quad (\text{A.xxxvii})$$

Las magnitudes de las fuerzas son entonces:

$$F_1 = \frac{\gamma m M_1}{r_1^2} = \frac{\gamma m M(1-p)}{r_1^2} \quad (\text{A.xxxviii})$$

$$F_2 = \frac{\gamma m M_2}{r_2^2} = \frac{\gamma m Mp}{r_2^2} \quad (\text{A.xxxix})$$

Donde γ es la constante gravitacional. Para que el cuerpo de masa m este en equilibrio con los otros dos cuerpos, las componentes de las fuerzas F_1 y F_2 perpendiculares a e_r deben ser iguales. Es decir:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\text{sen}\psi_1}{\text{sen}\psi_2} \quad (\text{A.xl})$$

Aplicando la ley de senos al triángulo OAP:

$$\frac{\text{sen}\varphi_1}{r} = \frac{\text{sen}\psi_1}{ps} \quad (\text{A.xli})$$

Con:

$$\text{sen}\varphi_1 = \frac{y}{r_1} \quad (\text{A.xlii})$$

Combinando ecuaciones:

$$\text{sen}\psi_1 = \frac{psy}{rr_1} \quad (\text{A.xliii})$$

O de manera similar:

$$\text{sen}\psi_2 = \frac{(1-p)sy}{rr_2} \quad (\text{A.xliv})$$

Ahora bien, utilizando los resultados de las ecuaciones anteriores, utilizándolos en las ecuaciones de las fuerzas F_1 y F_2 :

$$\frac{\frac{\gamma m M(1-p)}{r_1^2}}{\frac{\gamma m Mp}{r_2^2}} = \frac{\frac{(1-p)sy}{rr_2}}{\frac{psy}{rr_1}} \quad (\text{A.xlv})$$

Simplificando:

$$\frac{y}{r_1^3} = \frac{y}{r_2^3} \quad (\text{A.xlvi})$$

Si:

$$r_1 = r_2 \equiv \rho \quad (\text{A.xlvii})$$

Igualando ambas fuerzas a la fuerza centrífuga:

$$mr\omega^2 = F_1 \cos\psi_1 + F_2 \cos\psi_2 \quad (\text{A.xlviii})$$

Aplicando la ley de cosenos al triángulo OAP y al triángulo OBP

$$\cos\psi_1 = \frac{r^2 + \rho^2 - p^2 s^2}{2r\rho}, \quad \cos\psi_2 = \frac{r^2 + \rho^2 - (1-\rho)^2 s^2}{2r\rho} \quad (\text{A.xlix})$$

Ahora bien, calculando ω en función de otros parámetros, igualando la fuerza gravitacional y centrífuga para el cuerpo de masa M_1 :

$$\frac{\gamma M_1 M_2}{s^2} = M_1 p s \omega^2 \quad (\text{A.l})$$

$$\omega^2 = \frac{\gamma M_2}{p s^2} = \frac{\gamma M}{s^3} \quad (\text{A.li})$$

Utilizando las formas anteriores en las formas iniciales de las fuerzas F_1 y F_2 :

$$mr \left(\frac{\gamma M}{s^3} \right) = \left(\frac{\gamma m M (1-p)}{\rho^2} \right) \left(\frac{r^2 + \rho^2 - p^2 s^2}{2r\rho} \right) + \left(\frac{\gamma m M p}{\rho^2} \right) \left(\frac{r^2 + \rho^2 - (1-\rho)^2 s^2}{2r\rho} \right) \quad (\text{A.lii})$$

Simplificando:

$$\rho^3 = \frac{r^2 + \rho^2 - p s^2 + p^2 s^2}{2r^2} s^3 \quad (\text{A.liv})$$

Ahora bien reescribiendo para el triángulo OAP el val de r:

$$r^2 = \rho^2 + p^2 s^2 - 2pp \cos\varphi_1 \quad (\text{A.lv})$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{x+ps}{\rho}$$

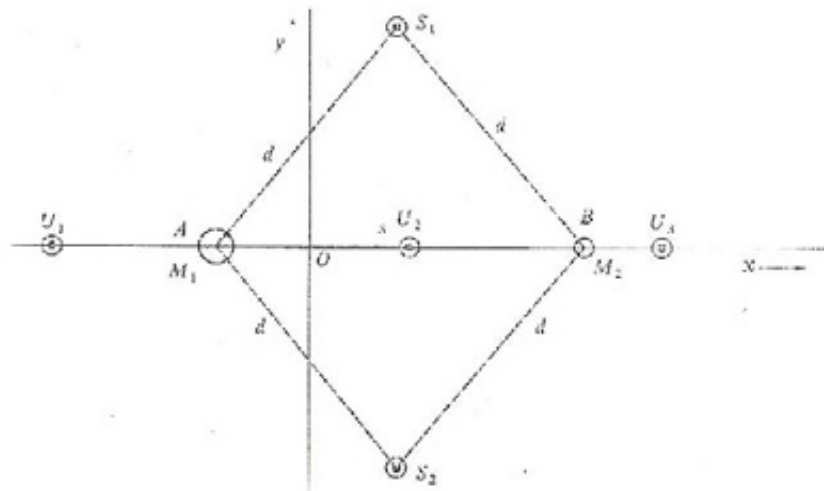
$$x = \frac{s}{2} - ps$$

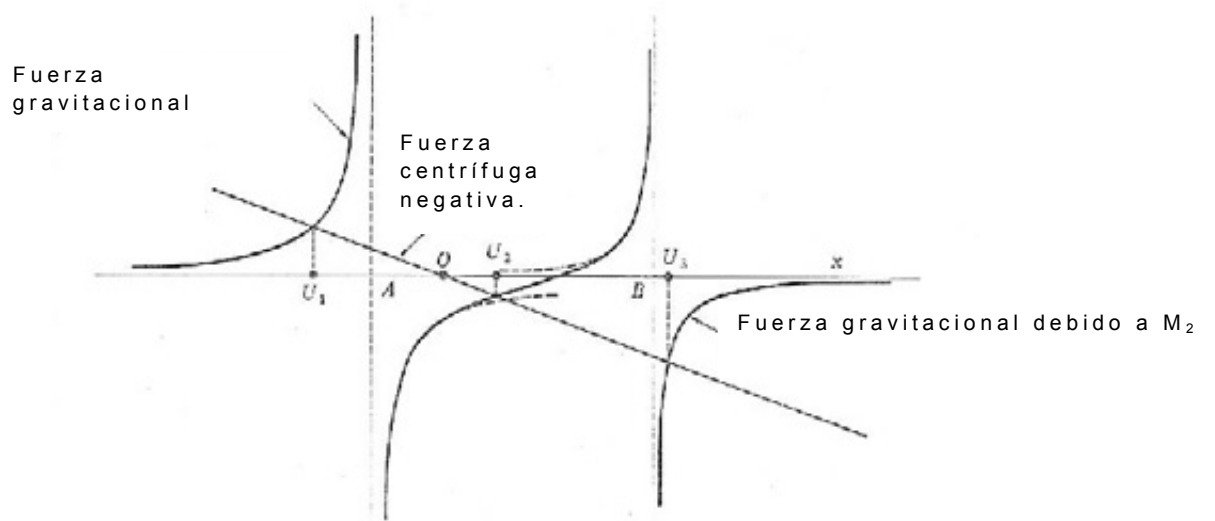
$$\cos\varphi_1 = \frac{s}{2\rho}$$

$$r^2 = \rho^2 - p^2 s^2 - ps^2$$

$$p^2 = \rho^2$$

$$p = \rho$$





§ APÉNDICE 2

MOSAICOS

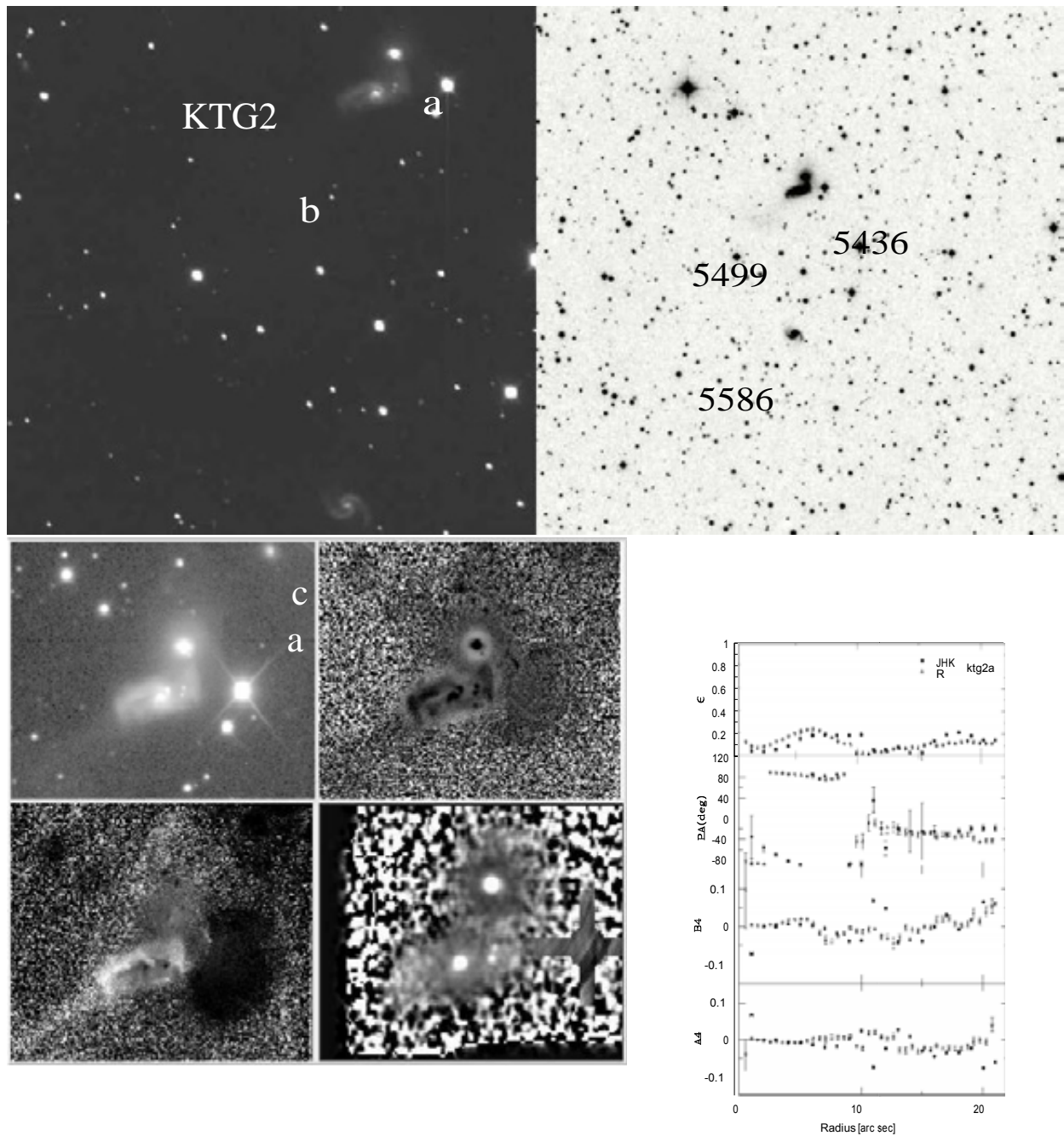


Figura A 2.1.- Mosaico del sistema KTG2 en el cual incluye una imagen global del sistema (SPM) de $7.2' \times 7.2'$, una imagen digitalizada de Monte Palomar de $20' \times 20'$. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG2a que incluye información detallada del sistema. Imagen logarítmica en la banda R, imagen bajo un filtro gaussiano en la banda R, imagen color B-I, e imagen infrarroja compuesta JHK bajo un filtro gaussiano, así como parámetros geométricos (ϵ , P.A.). El diámetro mayor de la galaxia es 1.4 arc min.

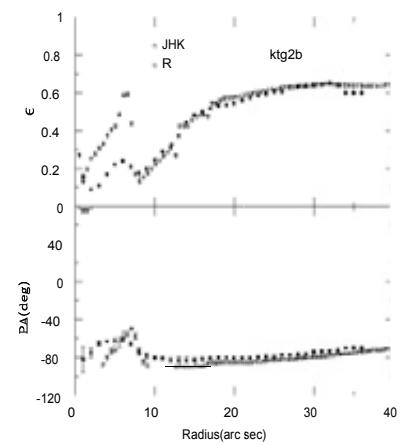
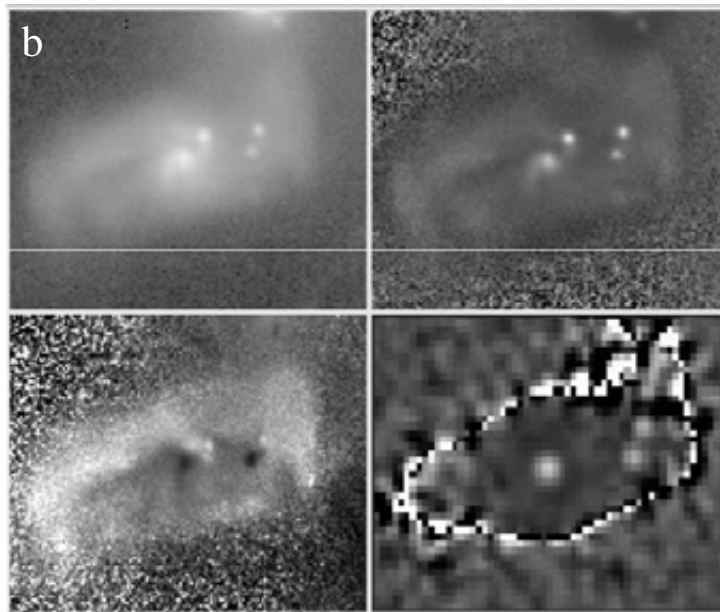


Figura A 2.2.- Mosaico individual de la componente KTG2b que incluye información detallada del sistema. Imagen logarítmica en la banda R, imagen bajo un filtro gaussiano en la banda R, imagen color B-I, e imagen infrarroja compuesta JHK bajo un filtro gaussiano, así como parámetros geométricos (ϵ , P.A.). El diámetro mayor de la galaxia es 1.1 arc min

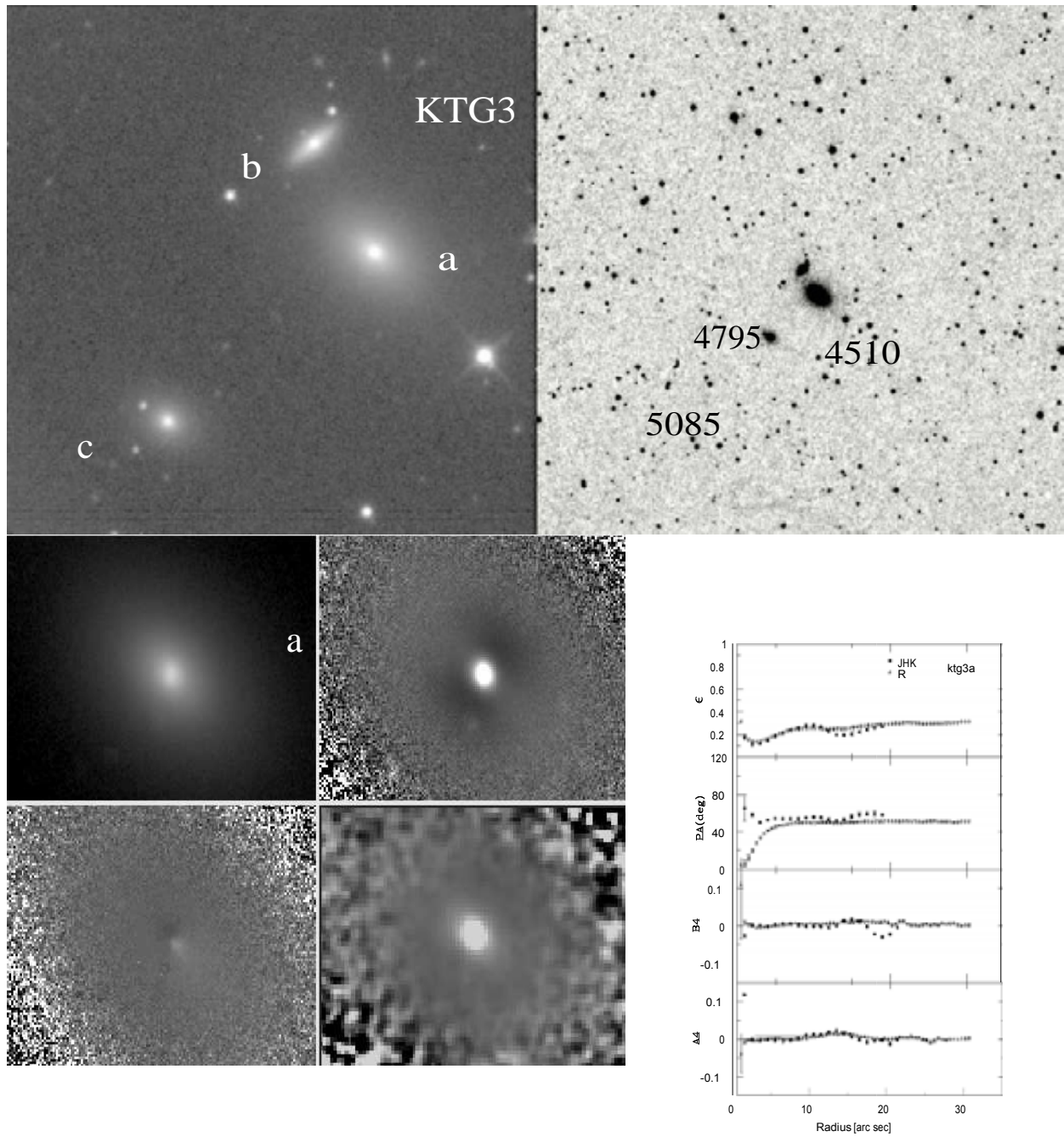


Figura A 2.3.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 7.2' x 7.2' de SPM, imagen SDSS de 18' x 18'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG3a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 1.2'.

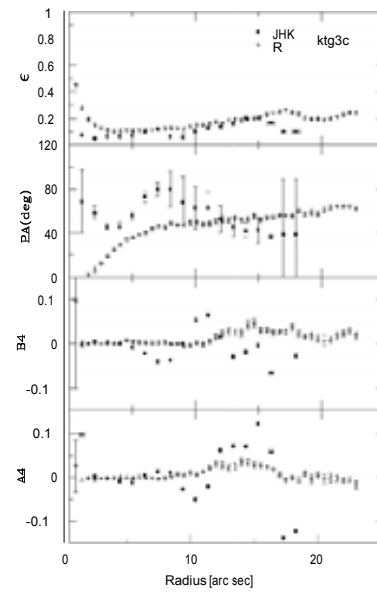
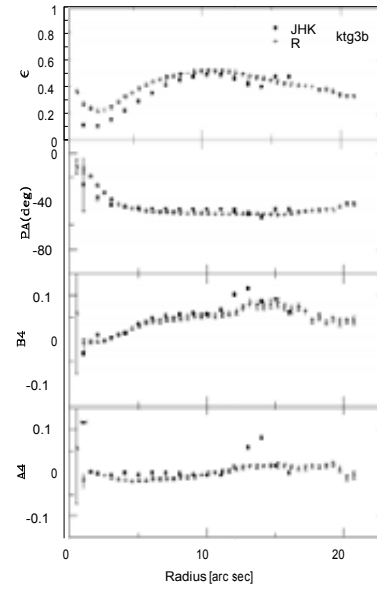
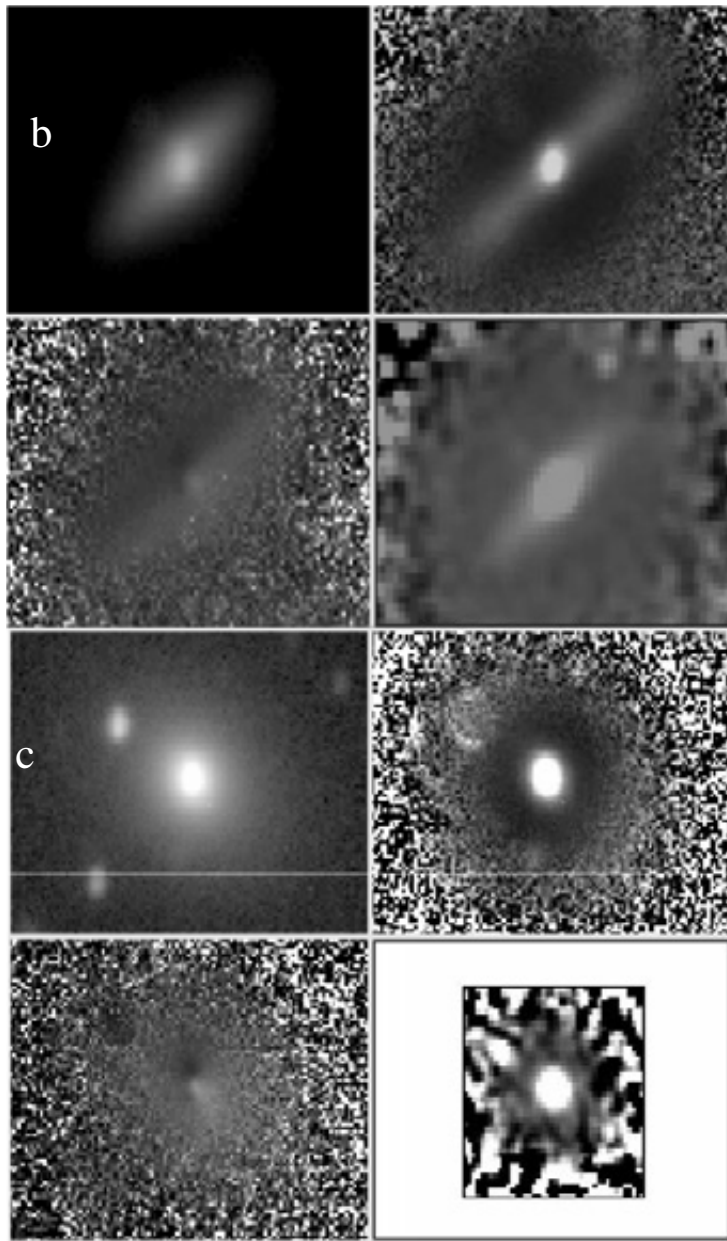


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG3b y KTG3c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.4' y 0.2' respectivamente.

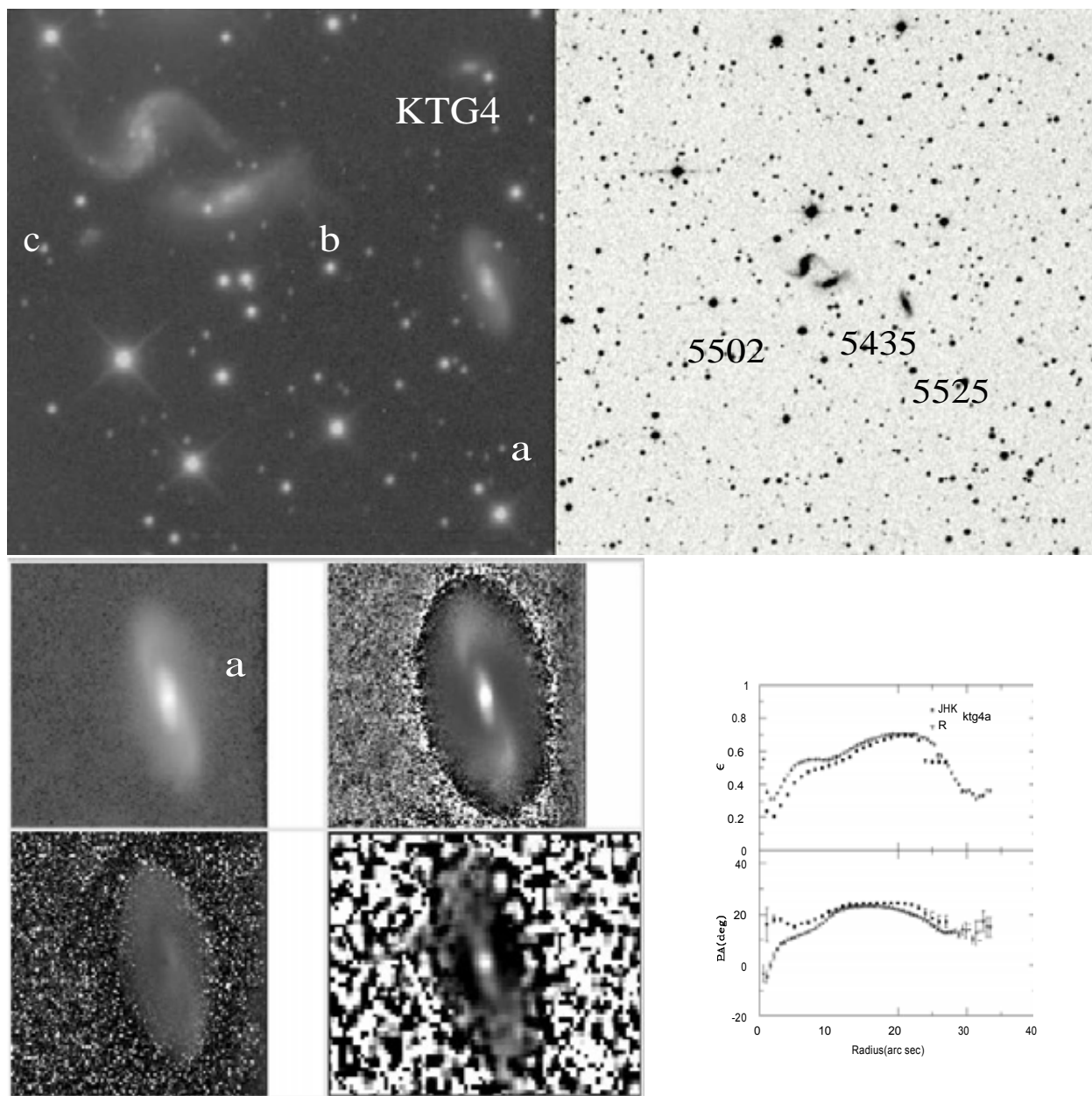


Figura A 2.5.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 7.2' x 7.2' de SPM, imagen SDSS de 15' x 15'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG4a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 0.8'

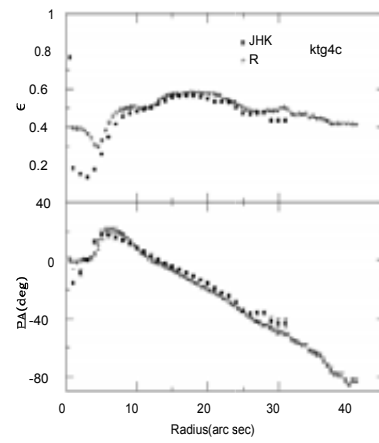
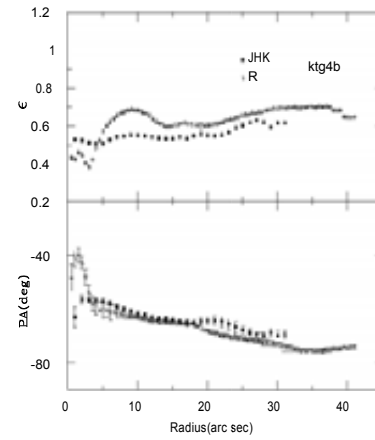
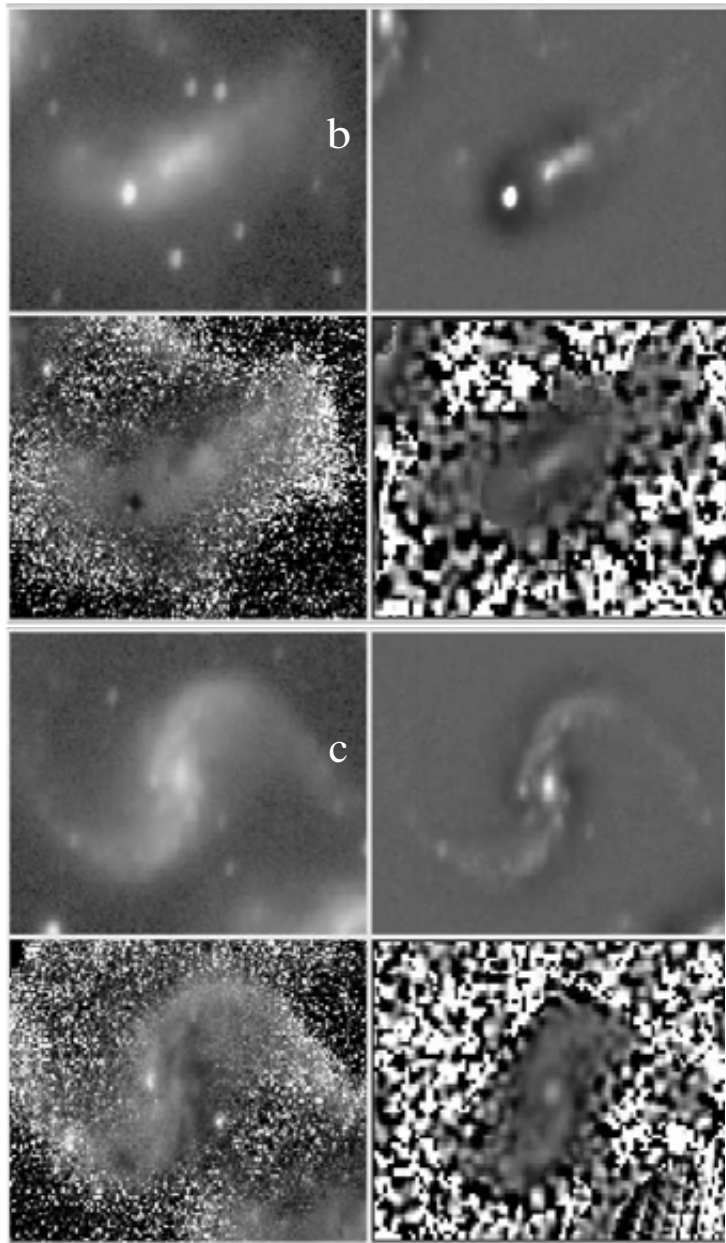


Figura A 2.6.- Mosaicos individuales de *KTG4b* y *KTG4c* similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 1.2' y 0.9' respectivamente.

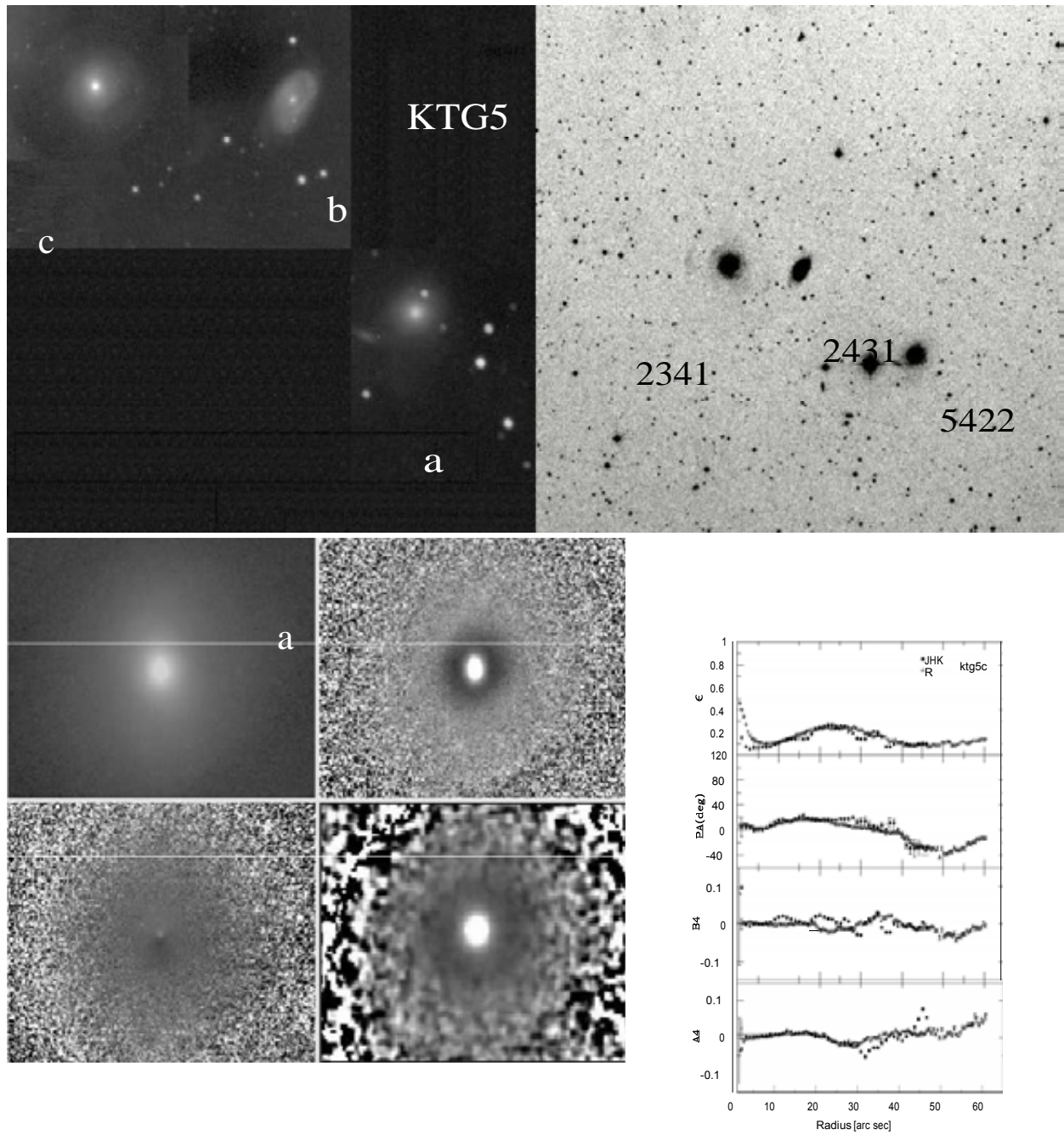


Figura A 2.7.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 8.66' x 8.66' de SPM, imagen SDSS de 40' x 40'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG5c similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 6.3'.

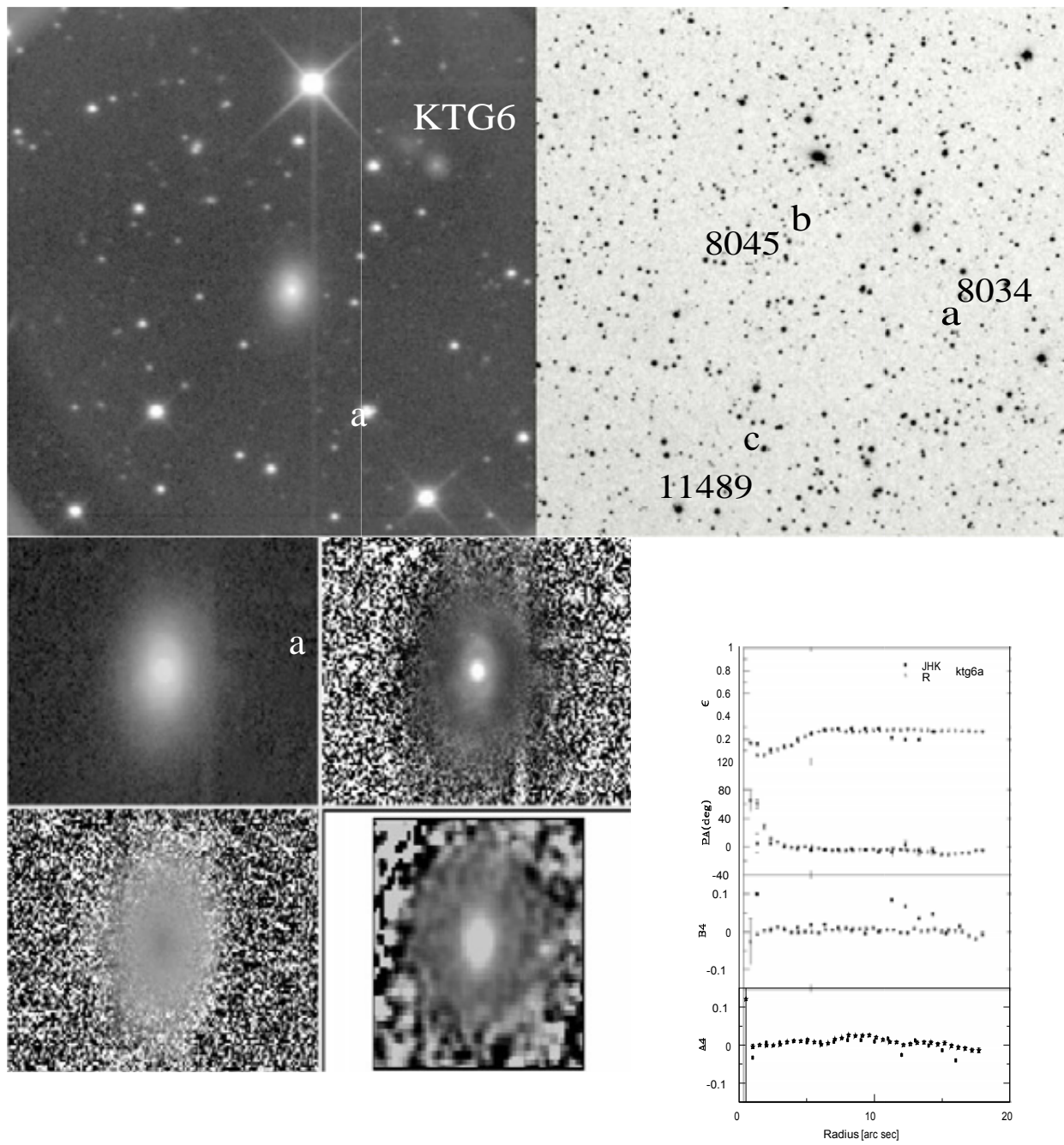


Figura A 2.8.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 7.2' x 7.2' de SPM, imagen SDSS de 25' x 25'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG6a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 0.6'.

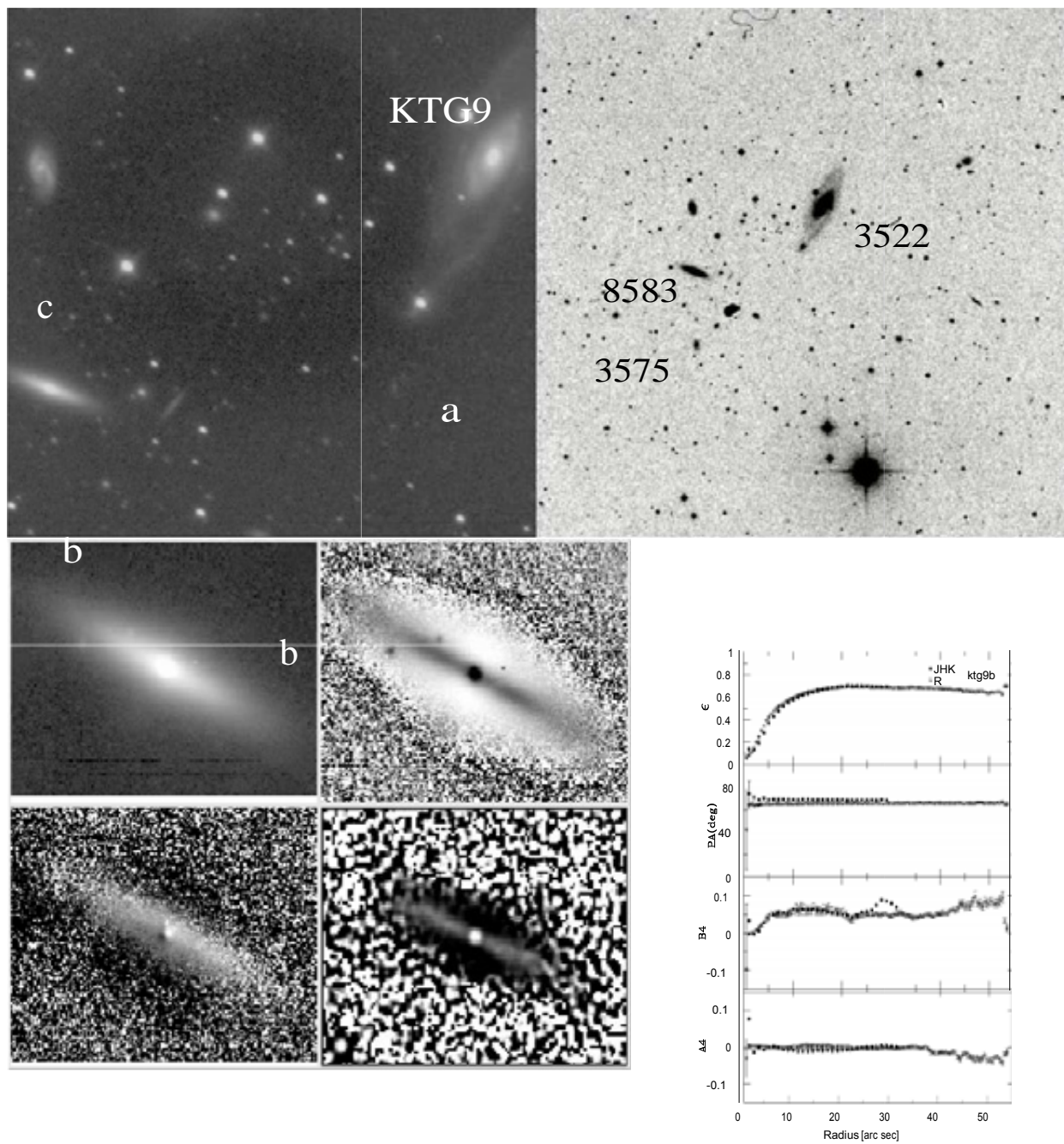


Figura A 2.9.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de $4.2' \times 4.2'$ de SPM, imagen SDSS de $25' \times 25'$. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG3a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es $1.4'$.

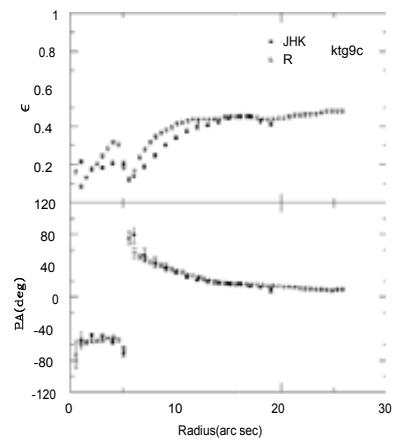
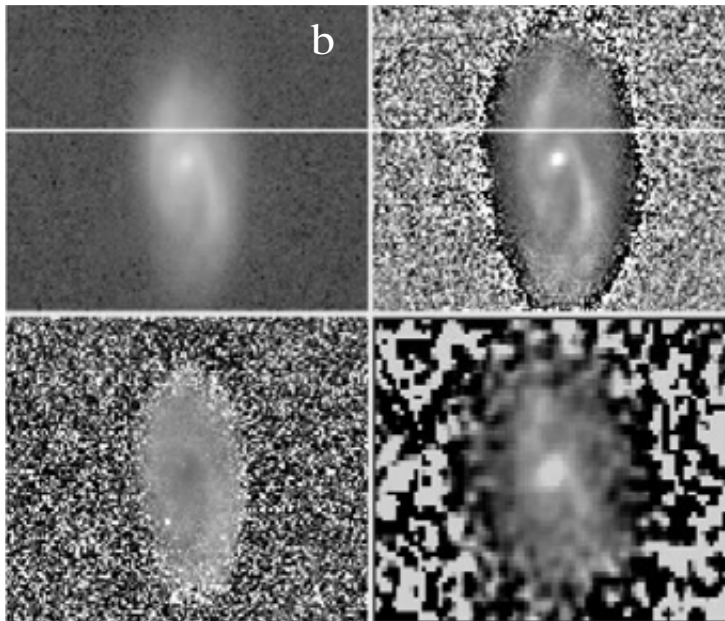


Figura A 2.10.- Mosaico individual de KTG9b similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 0.8'.

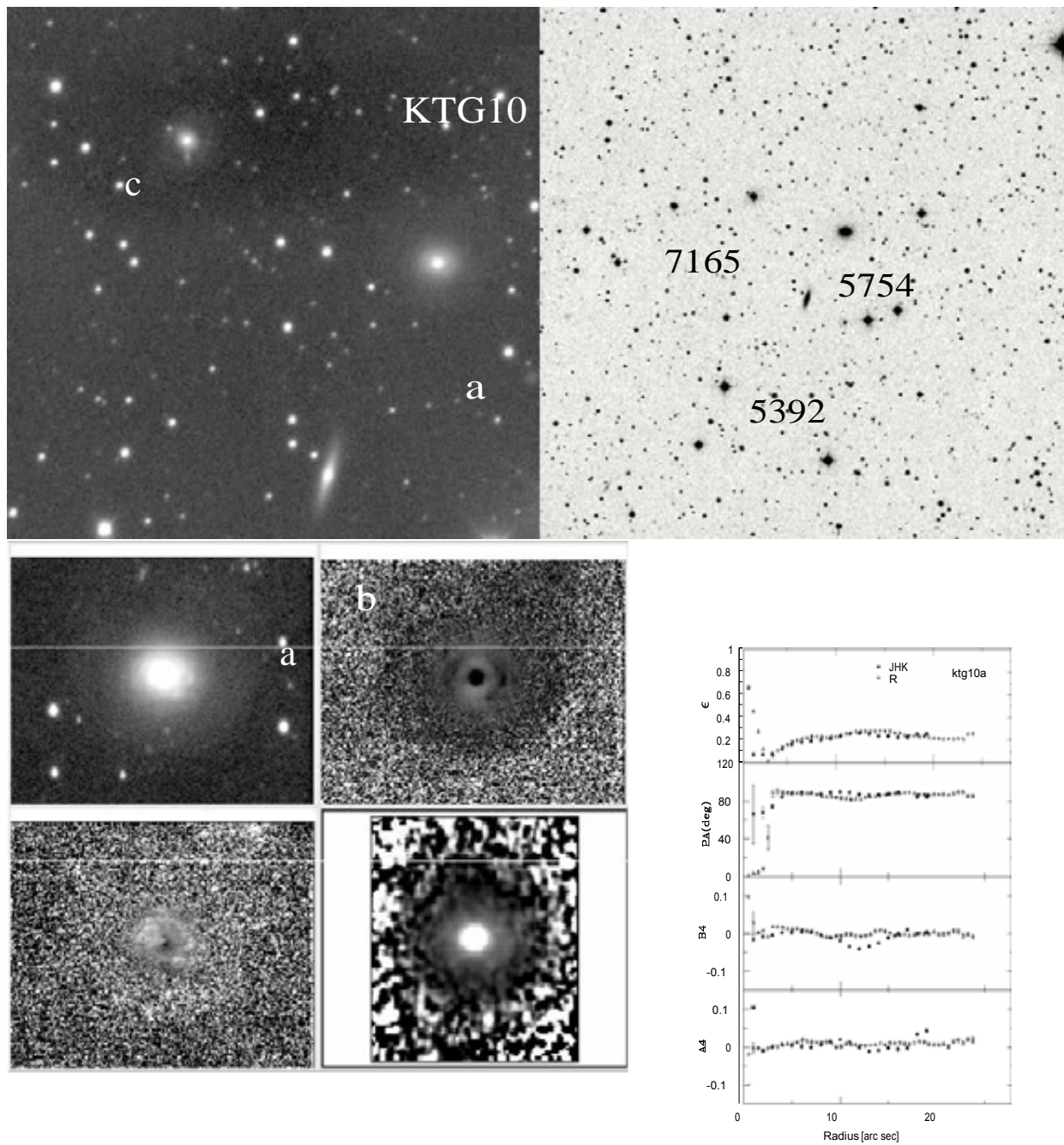


Figura A 2.3.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 4.2' x 4.2' de SPM, imagen SDSS de 20' x 20'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG10a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 0.6'.

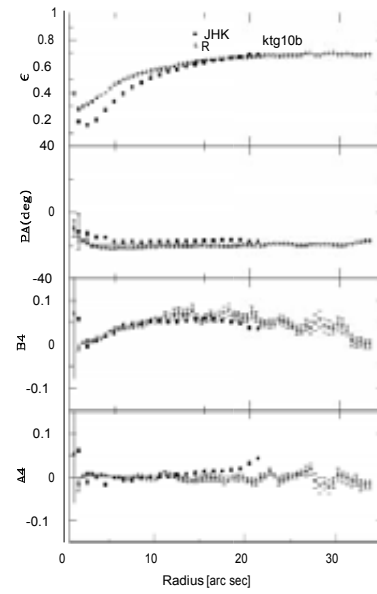
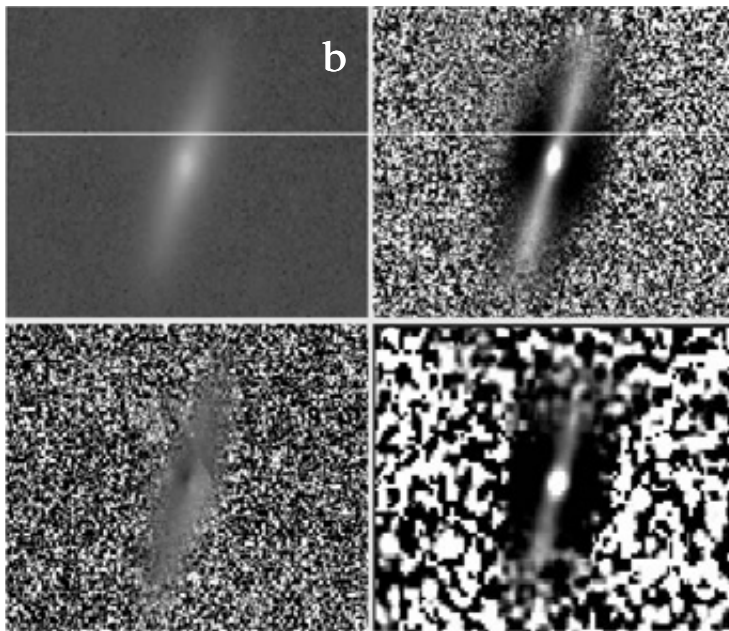


Figura A 2.12.- Mosaico individual de KTG10b similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 0.2'.

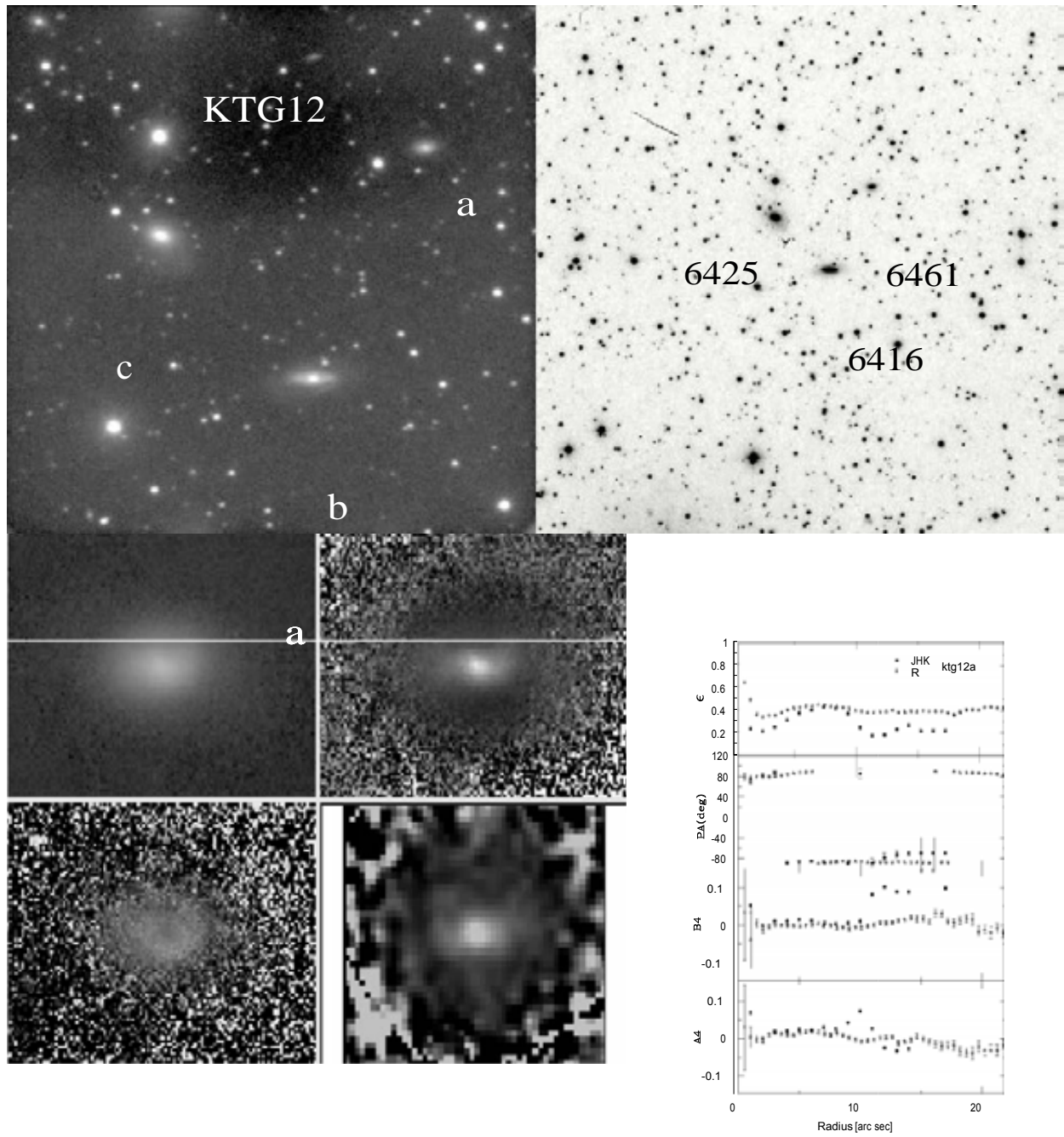


Figura A 2.13.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 4.2' x 4.2' de SPM, imagen SDSS de 20' x 20'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG12a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 0.3'.

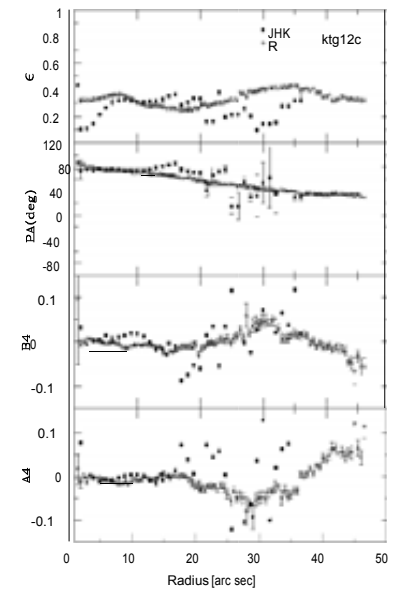
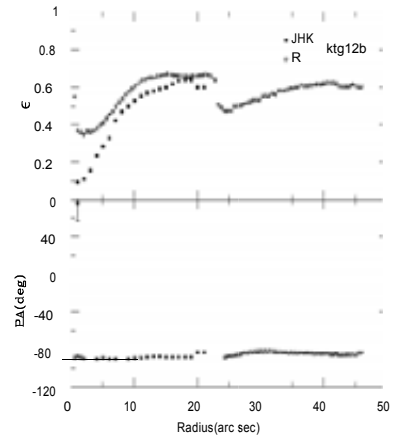
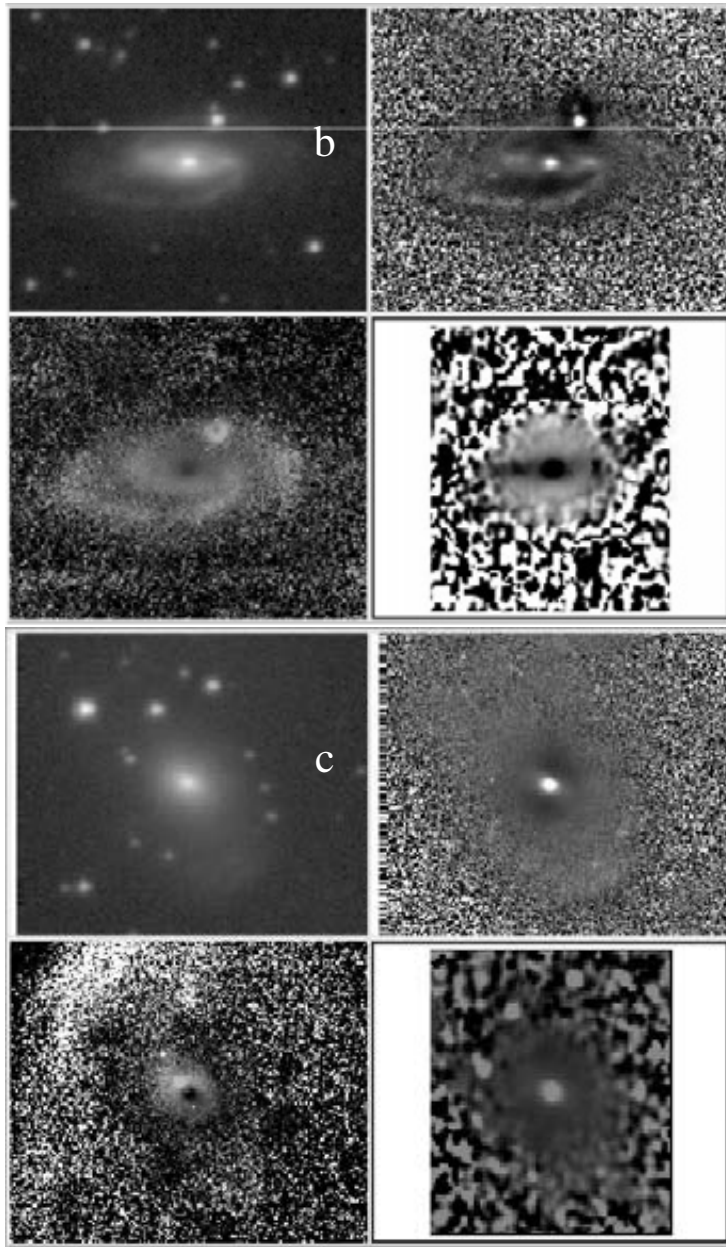


Figura A 2.14.- Mosaicos individuales de KTG12b y KTG12c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.6' y 1.3' respectivamente.

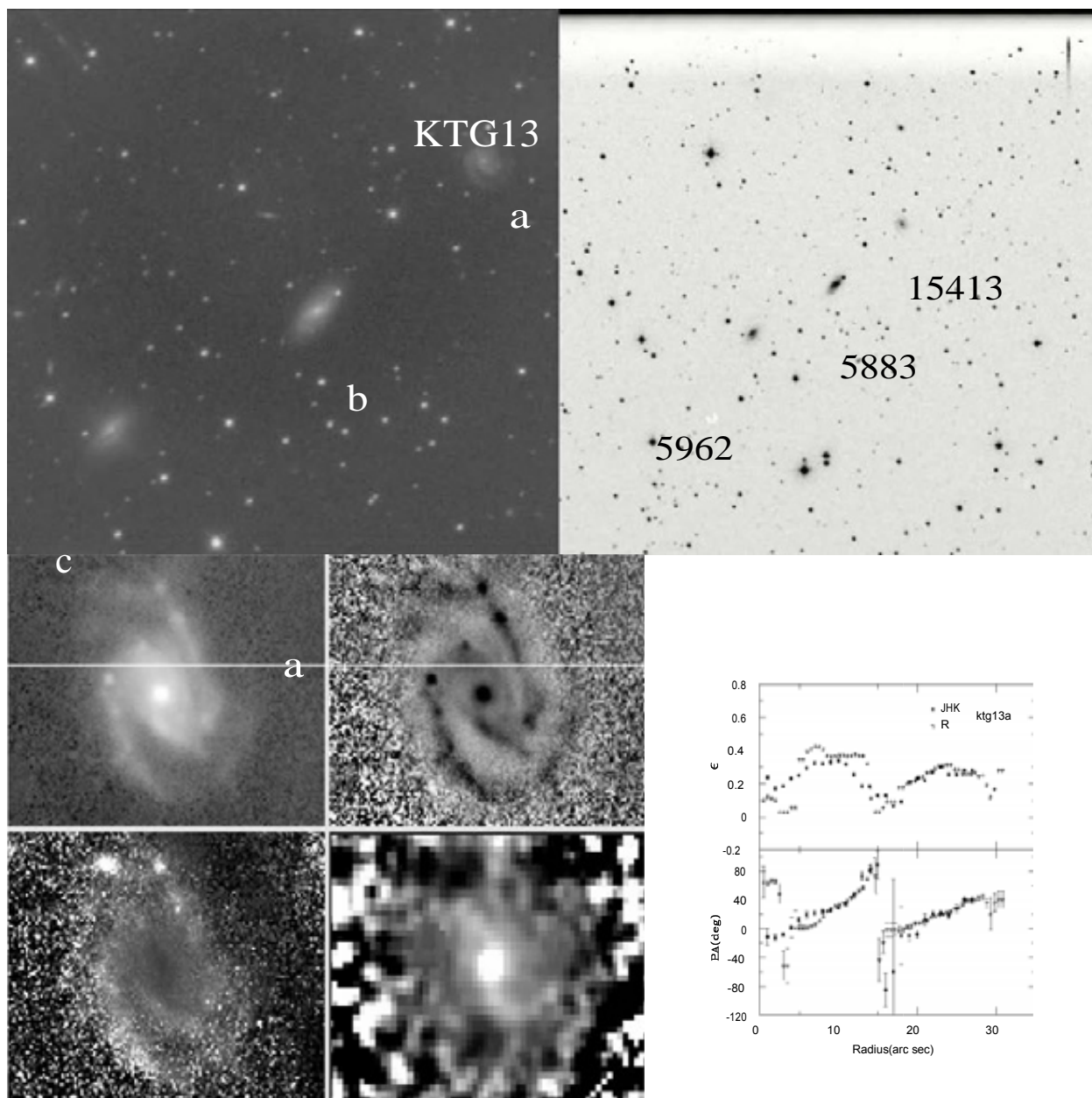


Figura A 2.15.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 4.2' x 4.2' de SPM, imagen SDSS de 18' x 18'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG13a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 1.0'.

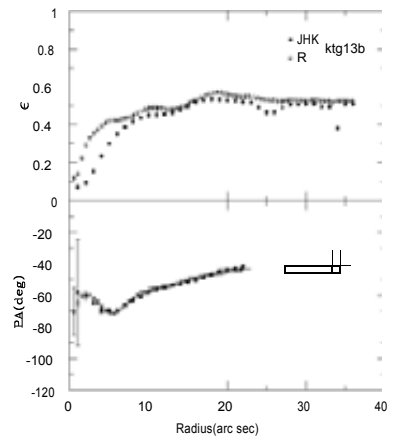
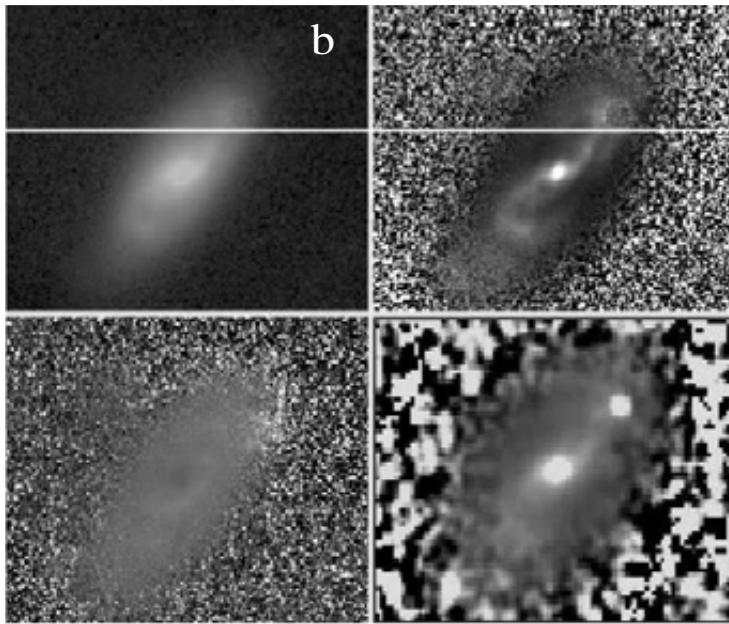


Figura A 2.16.- Mosaico individual de KTG13b similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 0.6'.

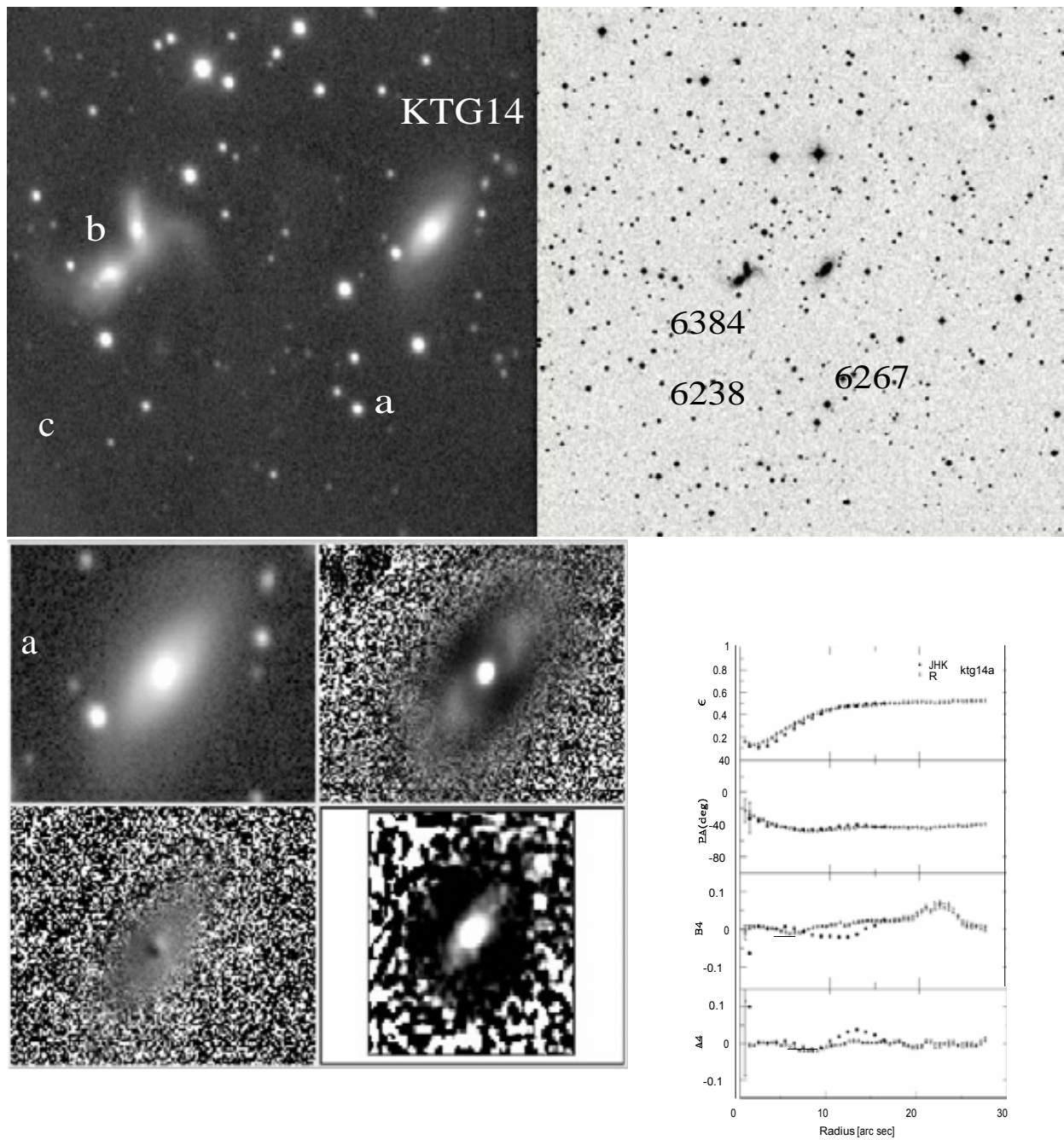


Figura A 2.17.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 7.2' x 7.2' de SPM, imagen SDSS de 16' x 16'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG14a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 0.5'

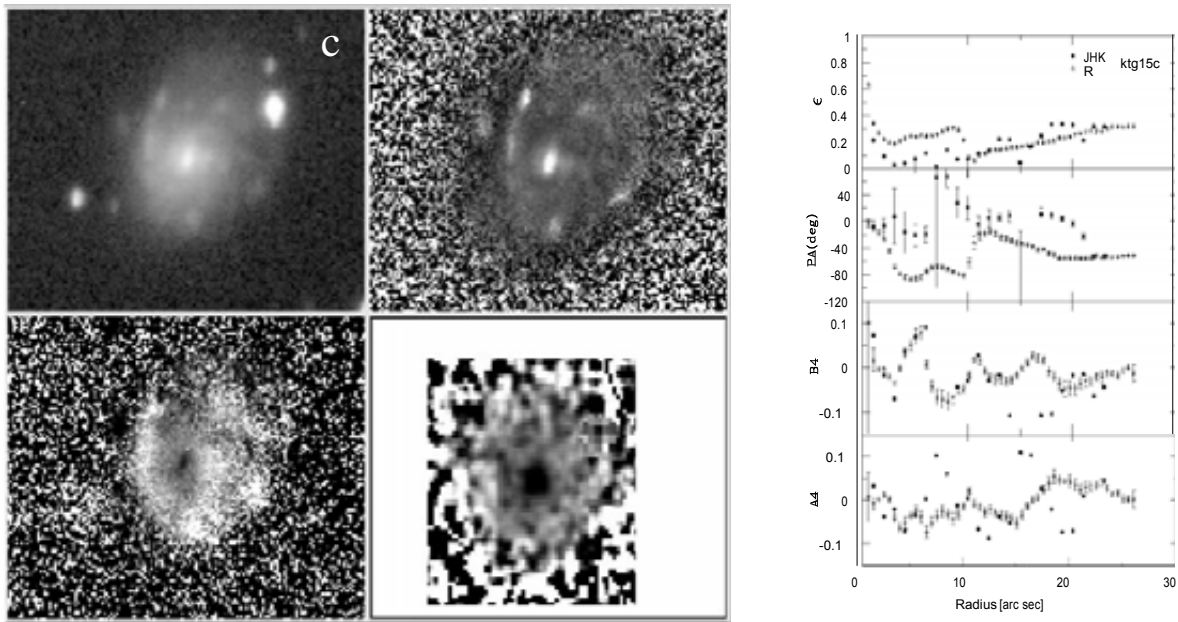


Fig. 18.— KTG14b and KTG14c mosaics. Same as fig. 2. The major diameter of the galaxies are 0.4 arc min and 0.4 arcmin respectively.

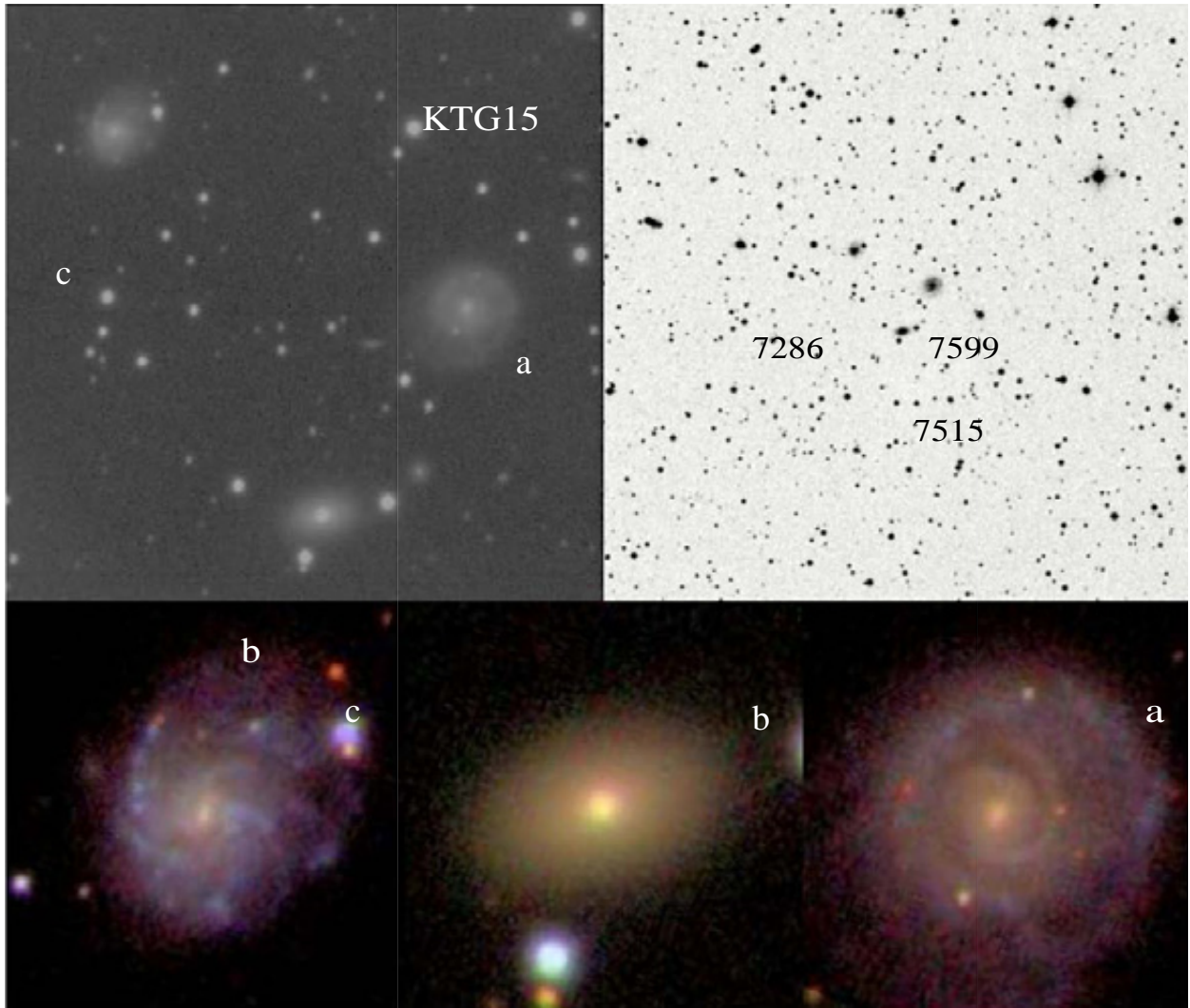


Figura A 2.19. Mosaico del sistema KTG15 en el cual incluye una imagen global del sistema (SPM) de $7.2' \times 7.2'$, una imagen digitalizada de Monte Palomar de $20' \times 20'$, e imágenes individuales de cada una de las galaxias obtenidas de la base de datos SDSS.

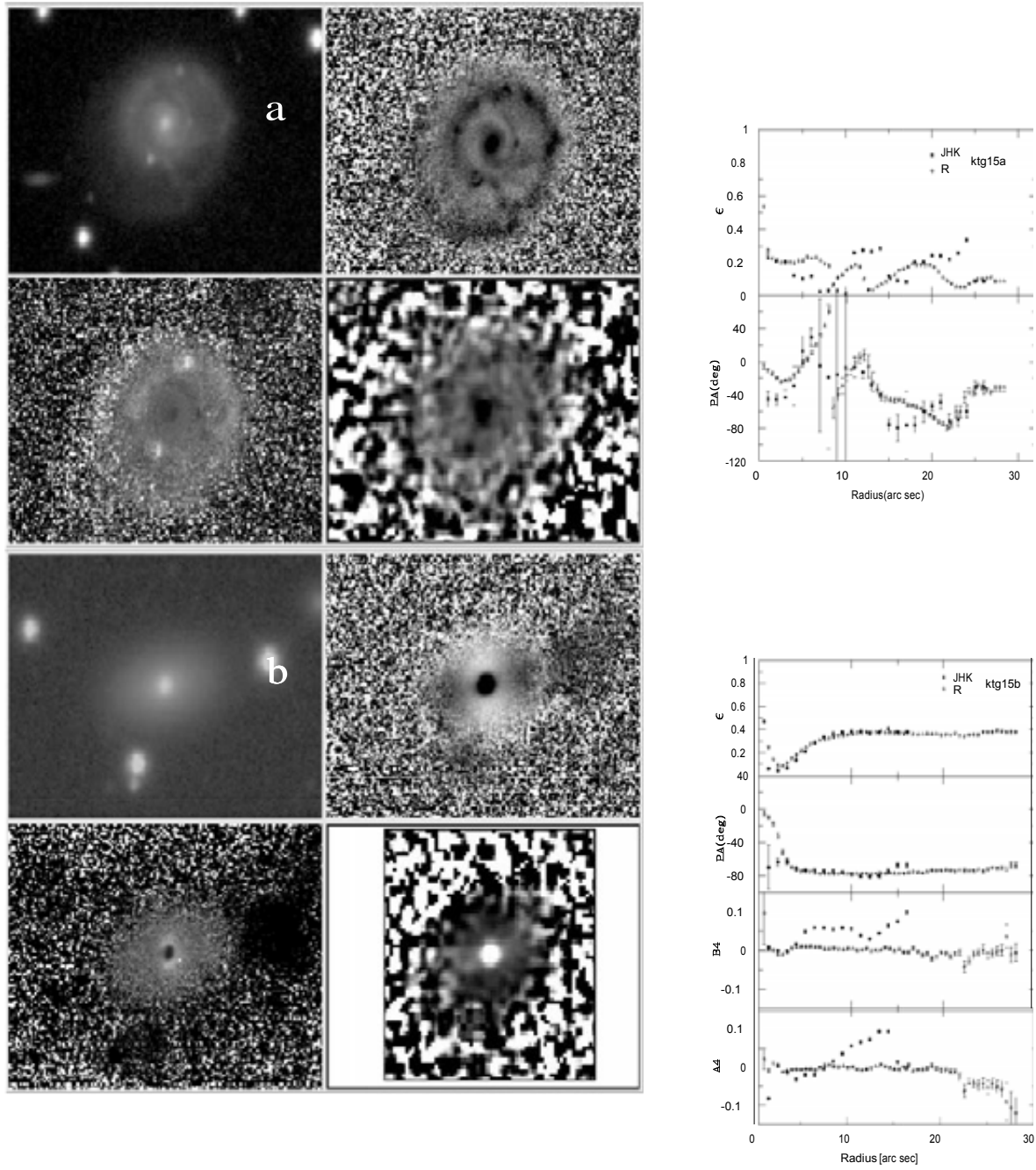


Figura A 2.20.- Mosaicos individuales de KTG20a y KTG20b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.7' y 0.8' respectivamente.

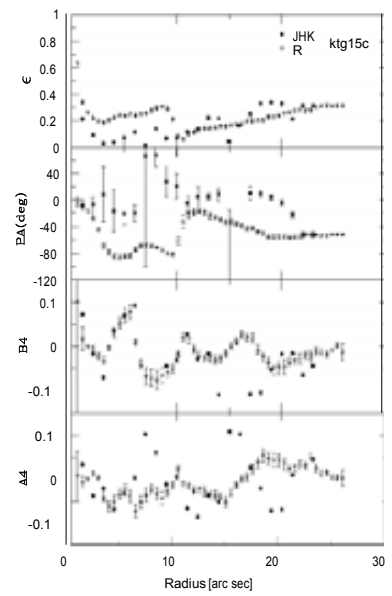
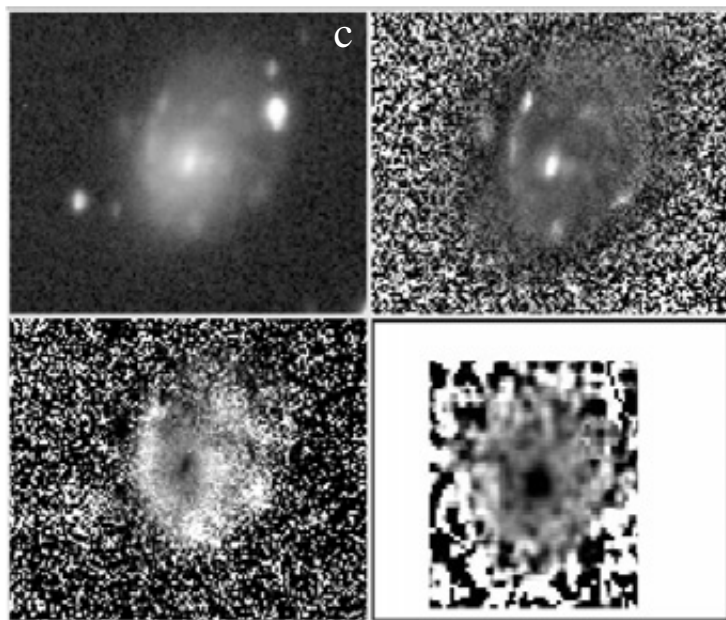


Figura A 2.21.- Mosaico individual de KTG15b similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 0.5'.

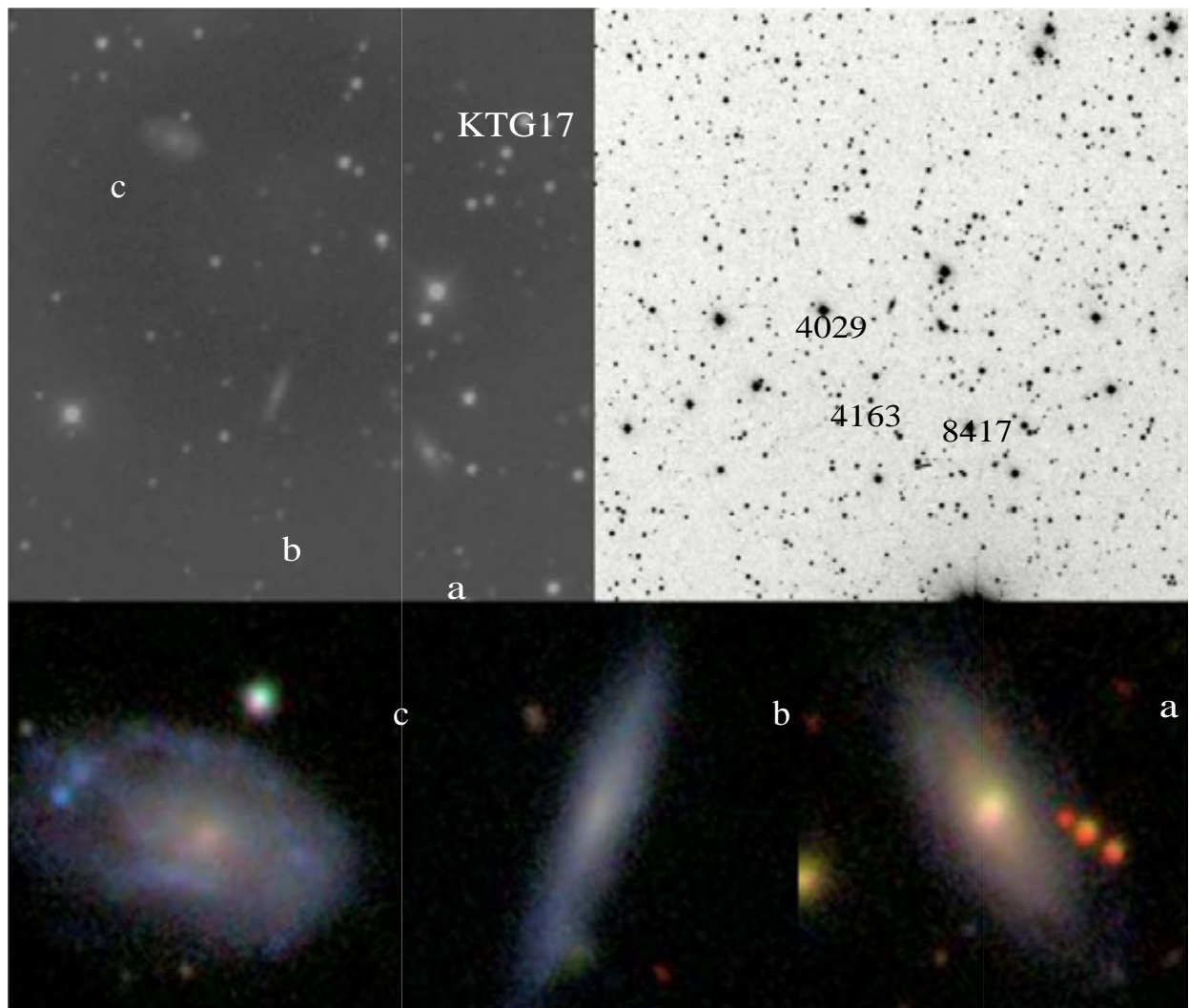


Figura A 2.22. Mosaico del sistema KTG15 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 4.2' x 4.2', Monte Palomar de 20" x 20".

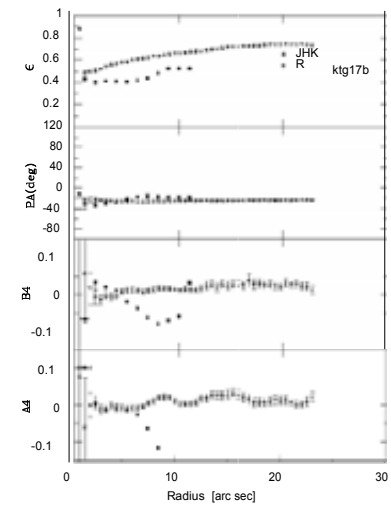
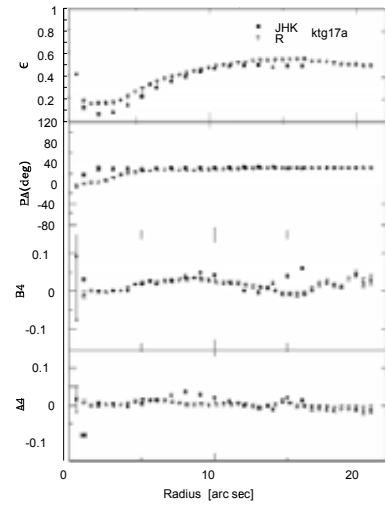
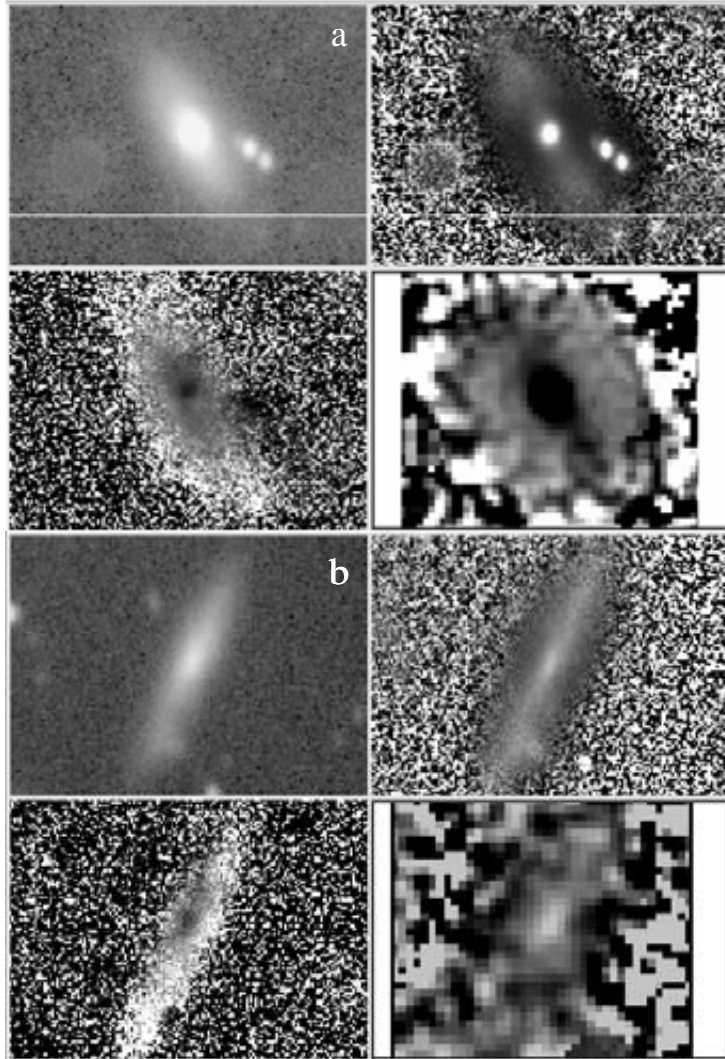


Figura A 2.23.- Mosaicos individuales de KTG17a y KTG17b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.75' y 1.0' respectivamente.

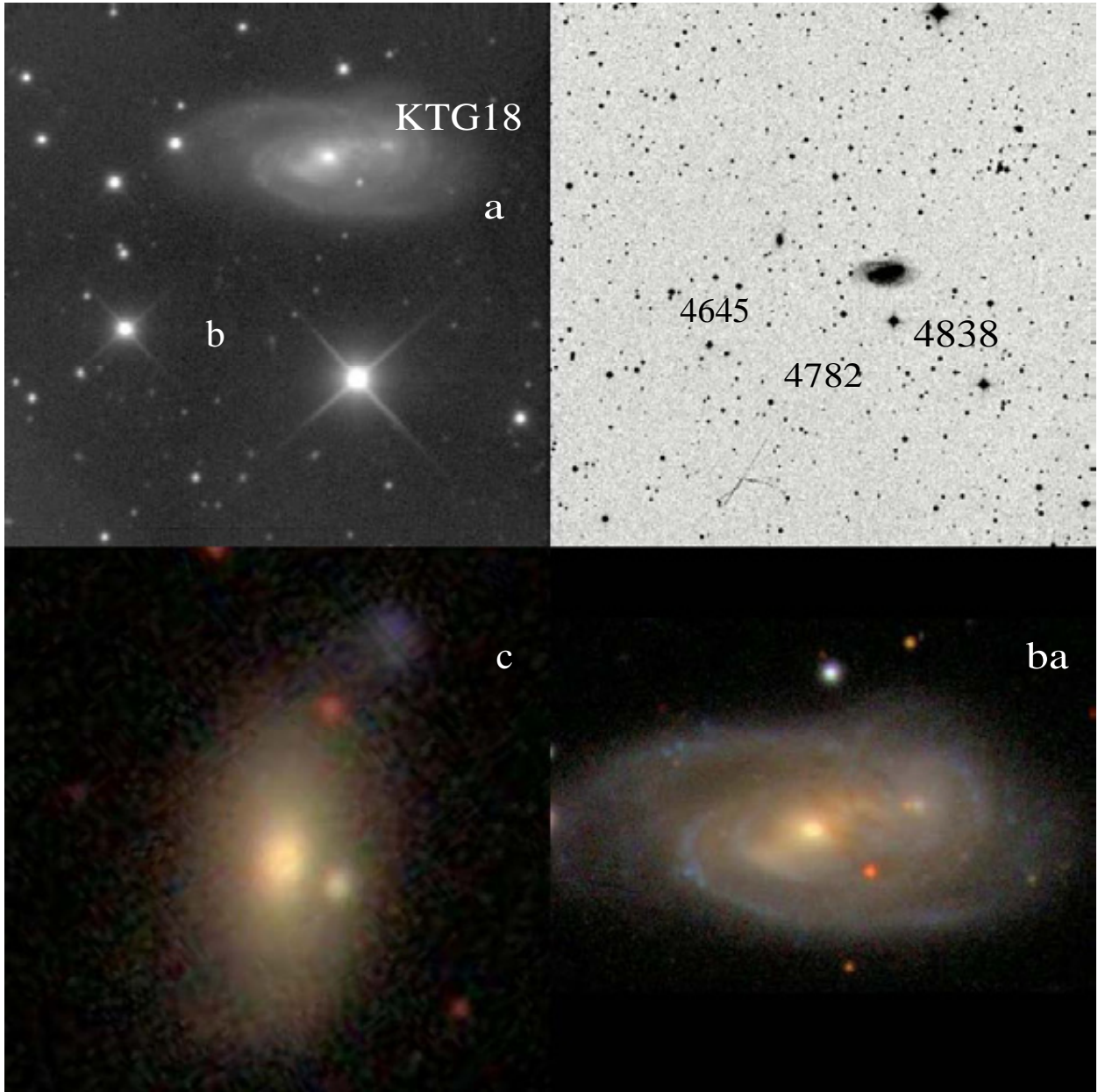


Figura A 2.24. Mosaico del sistema KTG15 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 7.2' x 7.2', Monte Palomar de 20" x 20'.

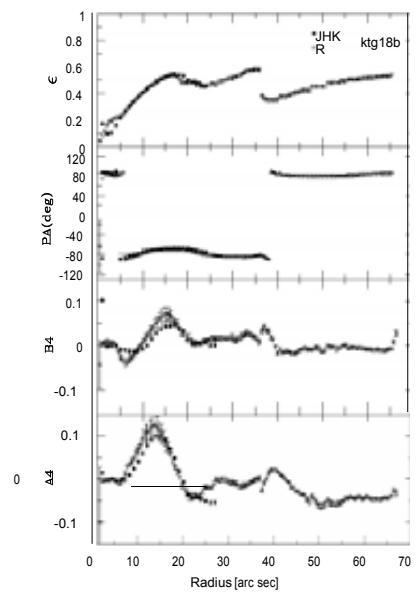
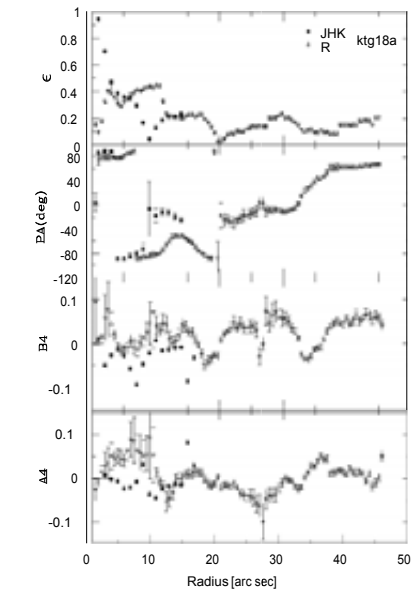
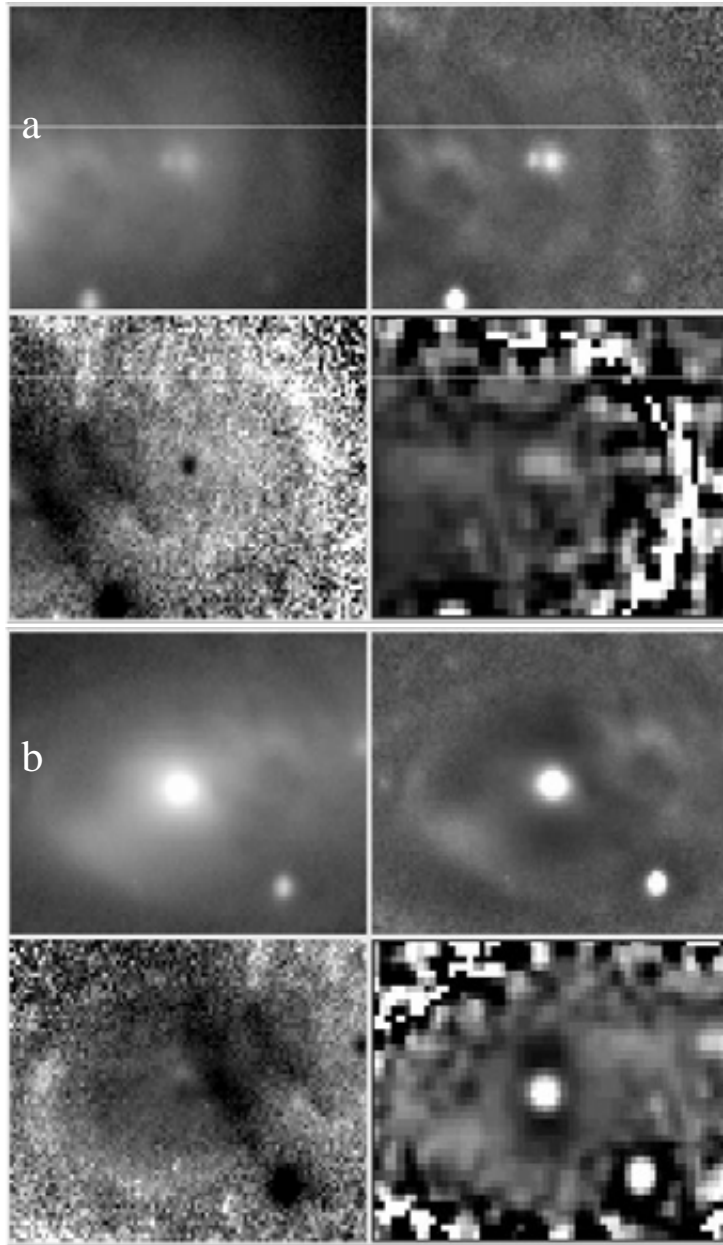


Figura A 2.25.- Mosaicos individuales de KTG18a y KTG18b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.8' y 0.9' respectivamente.

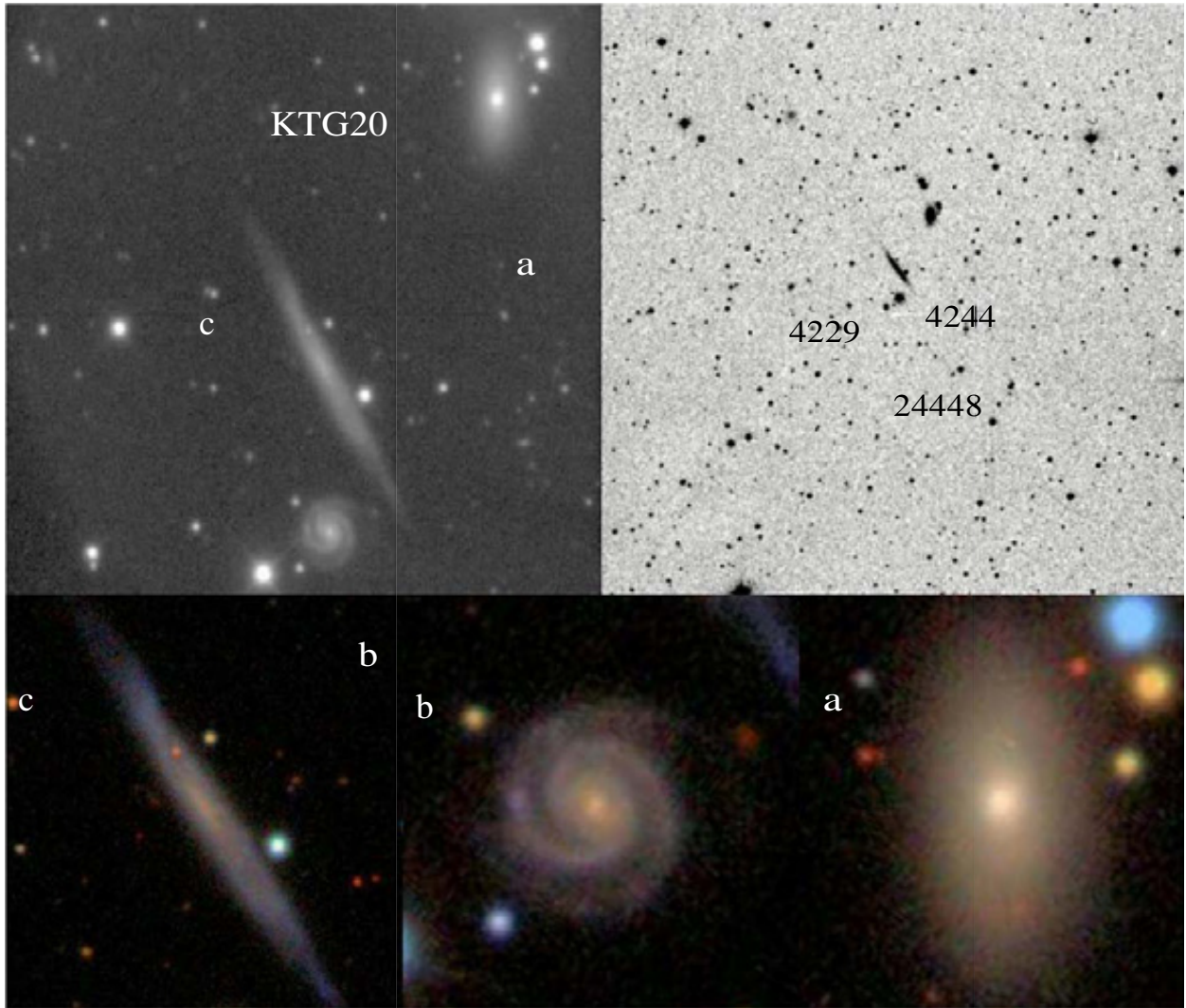


Figura A 2.26. Mosaico del sistema KTG20 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de $7.2' \times 7.2'$, Monte Palomar de $20' \times 20'$.

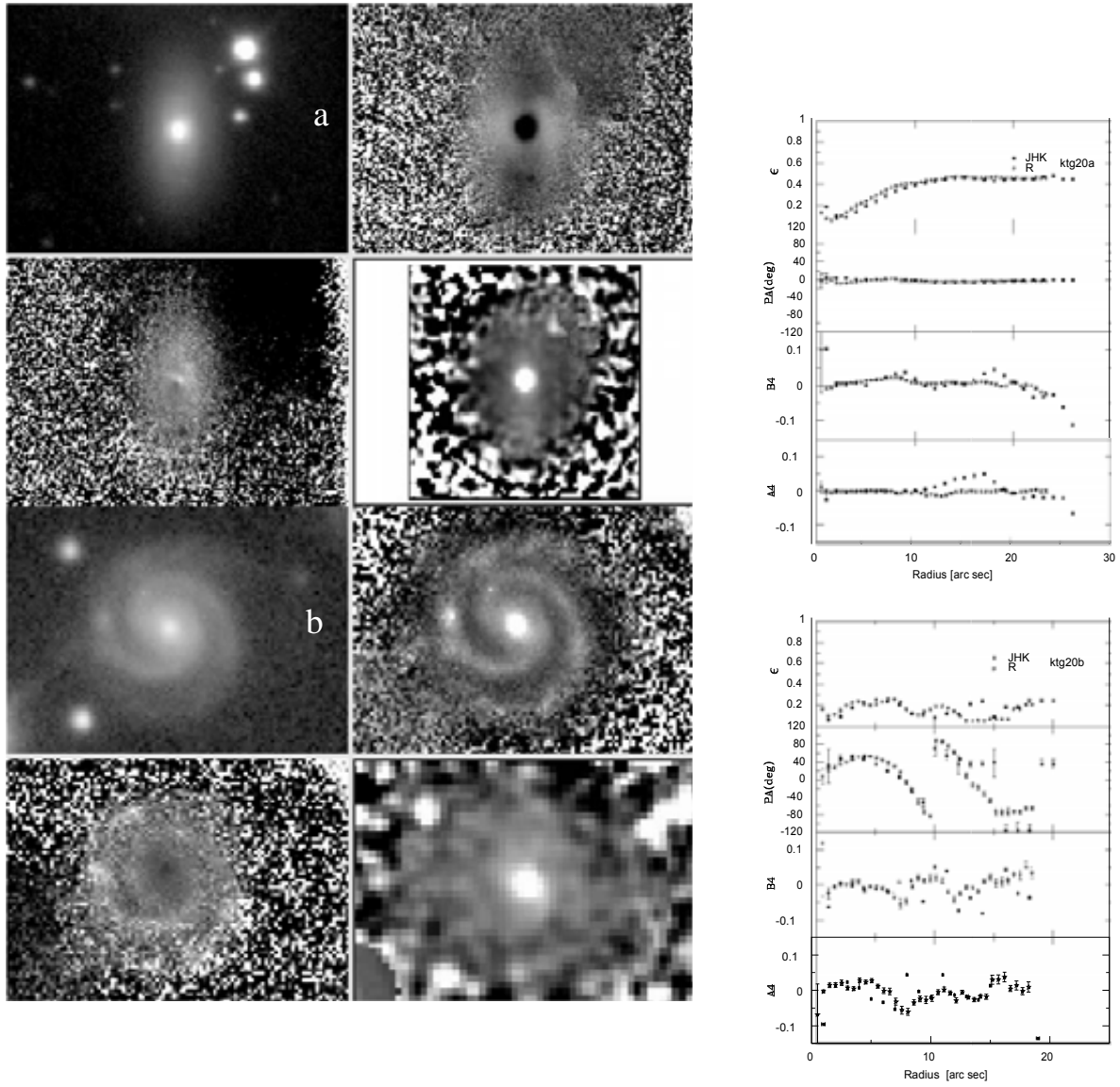


Figura A 2.27.- Mosaicos individuales de KTG20a y KTG20c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.94' y 0.46' respectivamente.

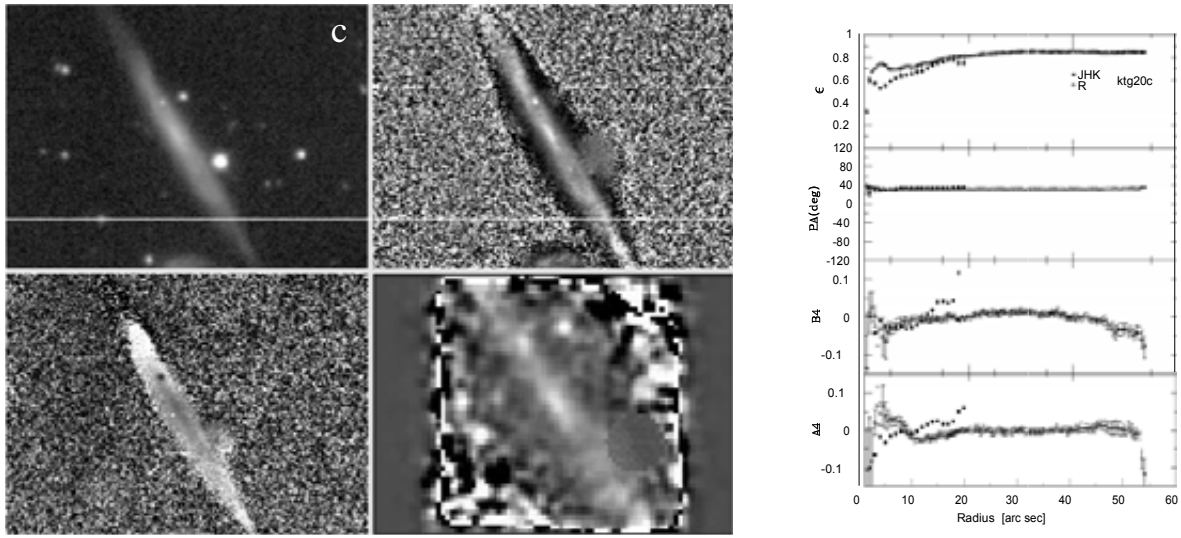


Figura A 2.26.- Mosaico individual de KTG20c similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 2.26'.

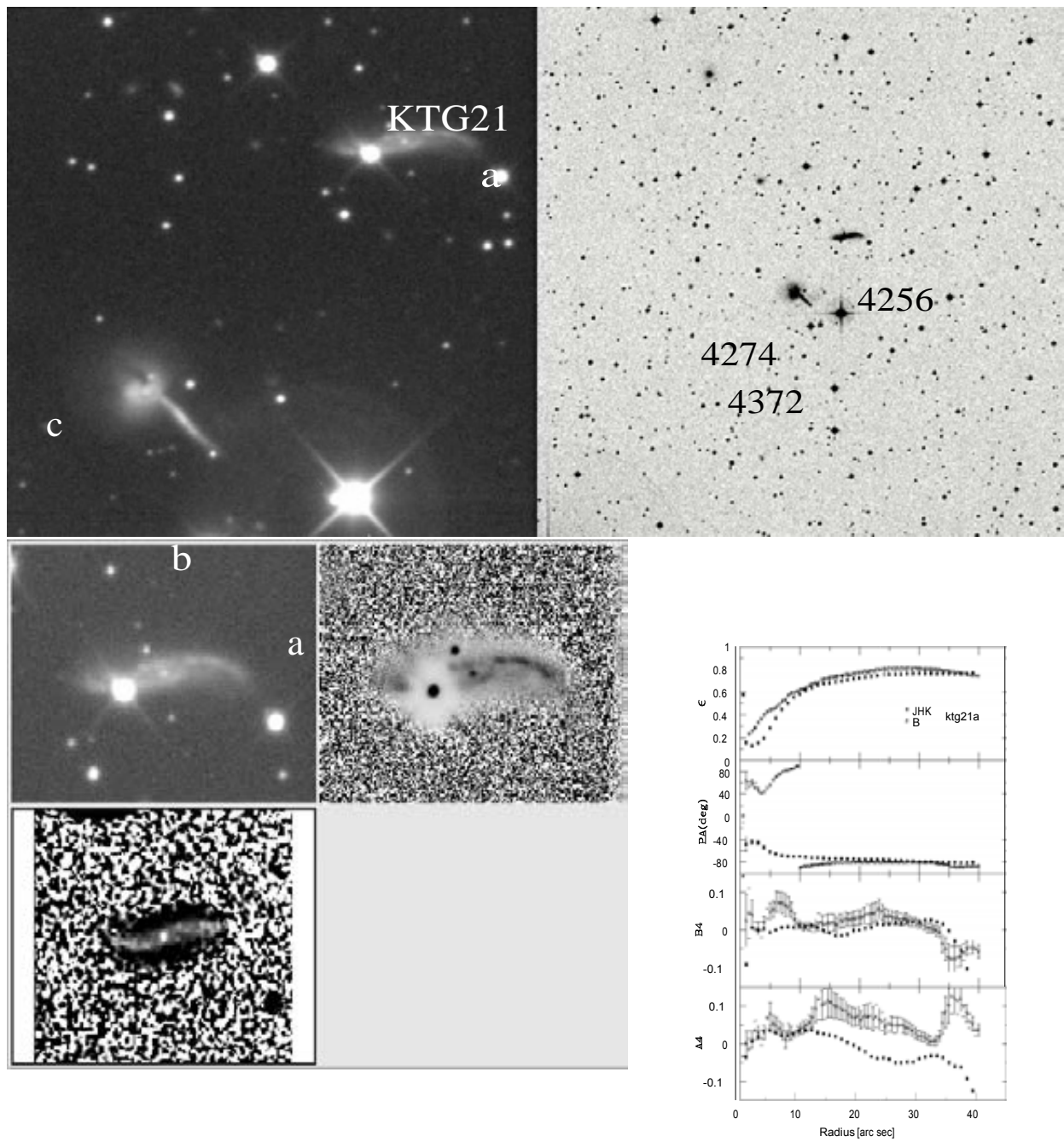


Figura A 2.29.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 7.2' x 7.2' de SPM, imagen SDSS de 20' x 20'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG21a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 1.3'

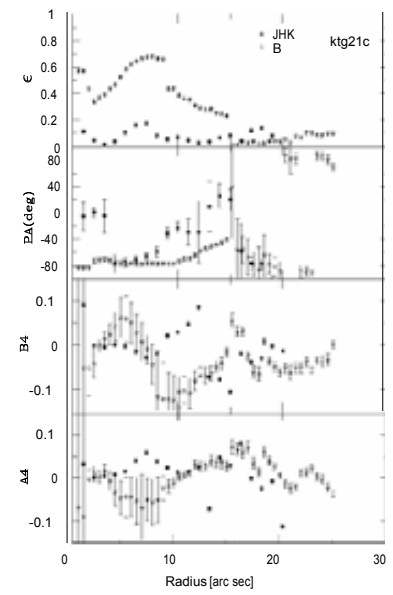
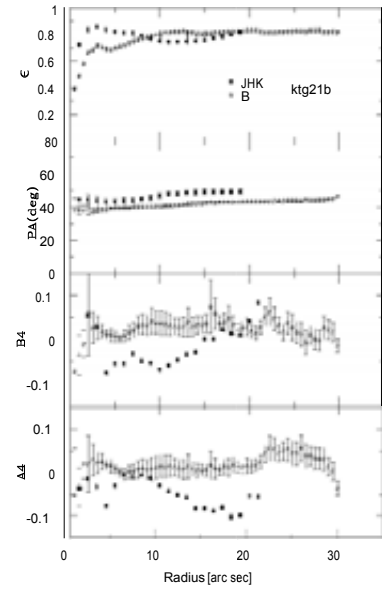
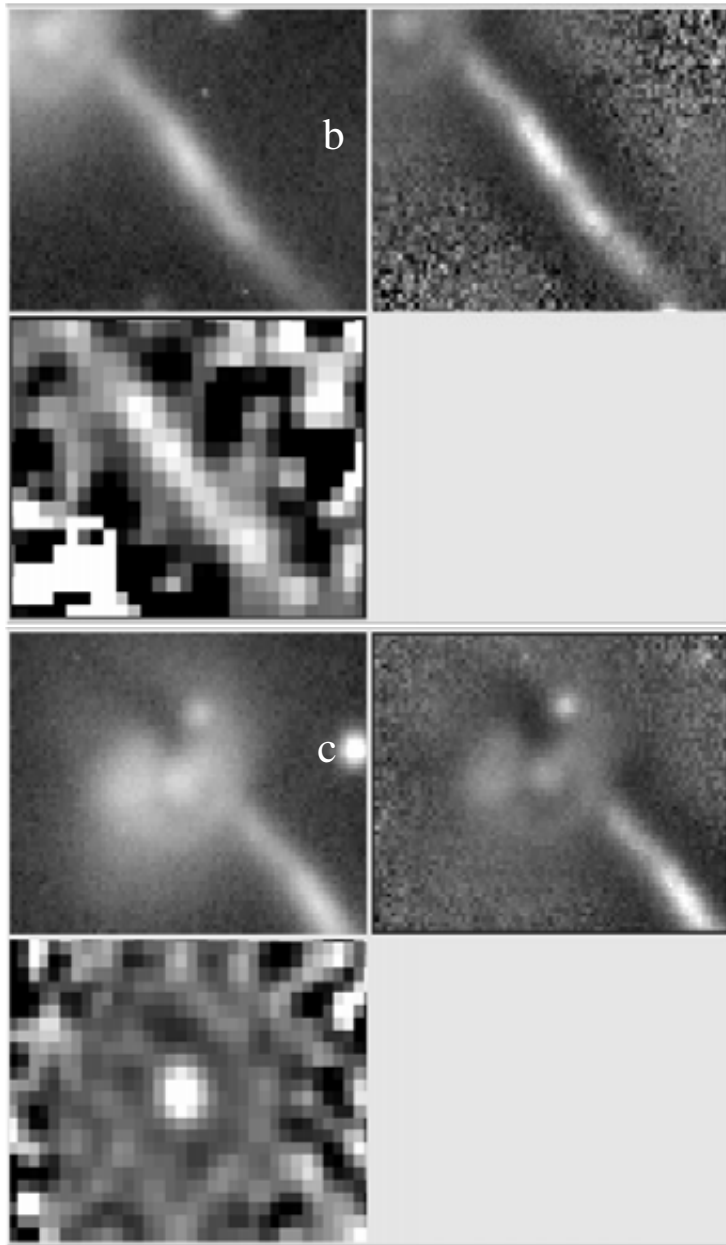


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG21b y KTG21c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.8' y 0.8' respectivamente.

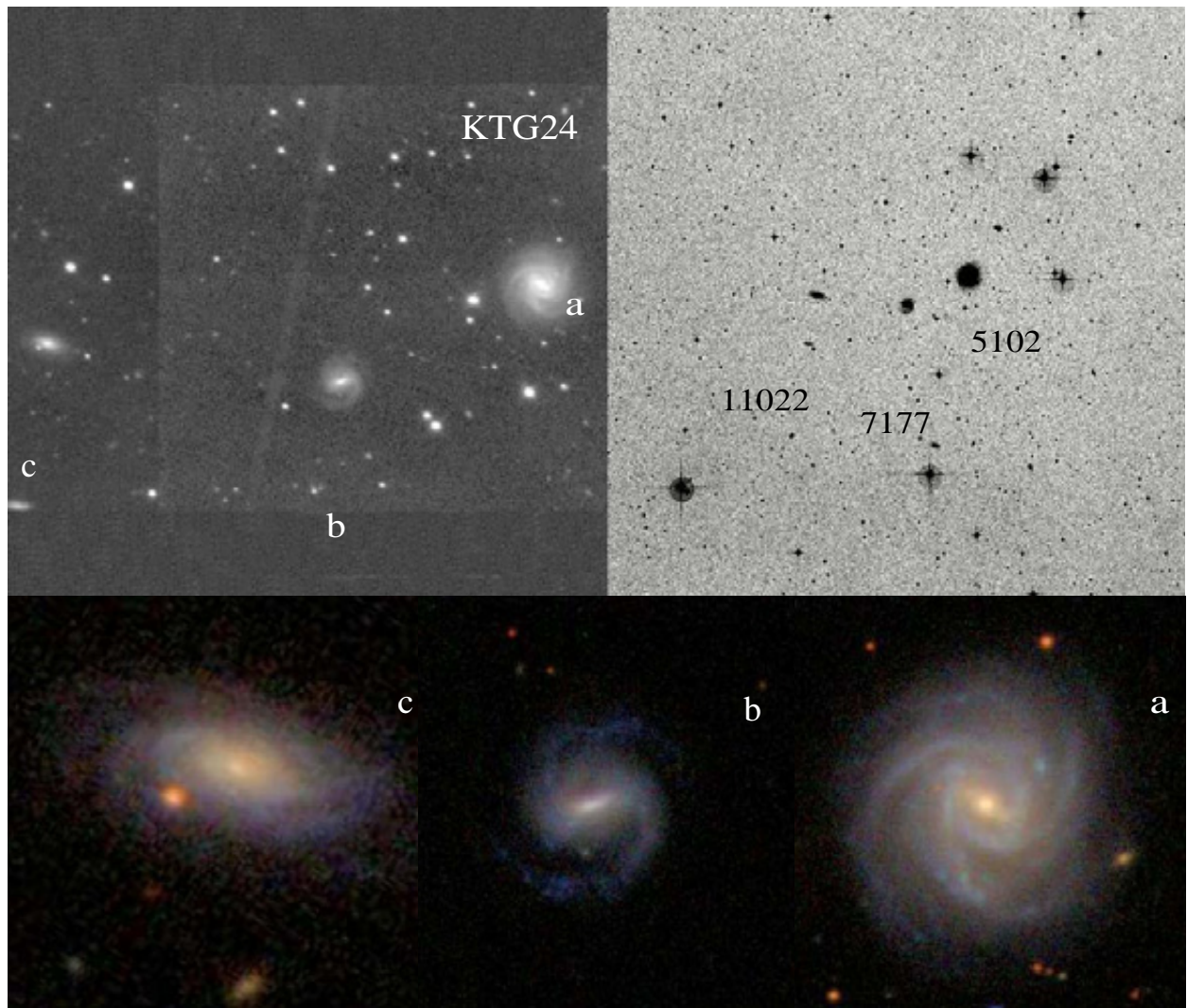


Figura A 2.31. Mosaico del sistema KTG24 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 4.2' x 4.2', Monte Palomar de 28' x 28'.

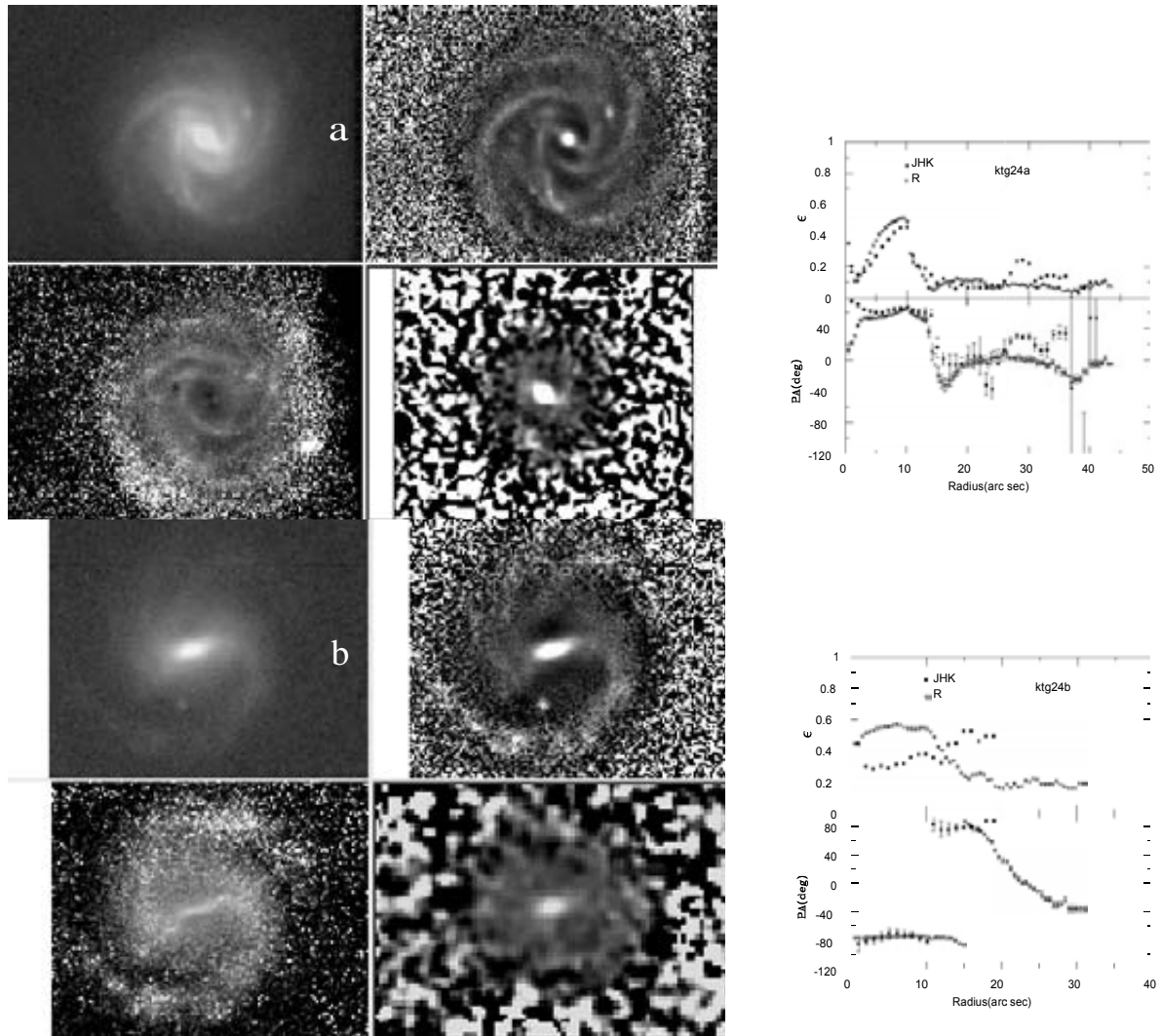


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG24a y KTG24b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 1.21' y 0.74' respectivamente.

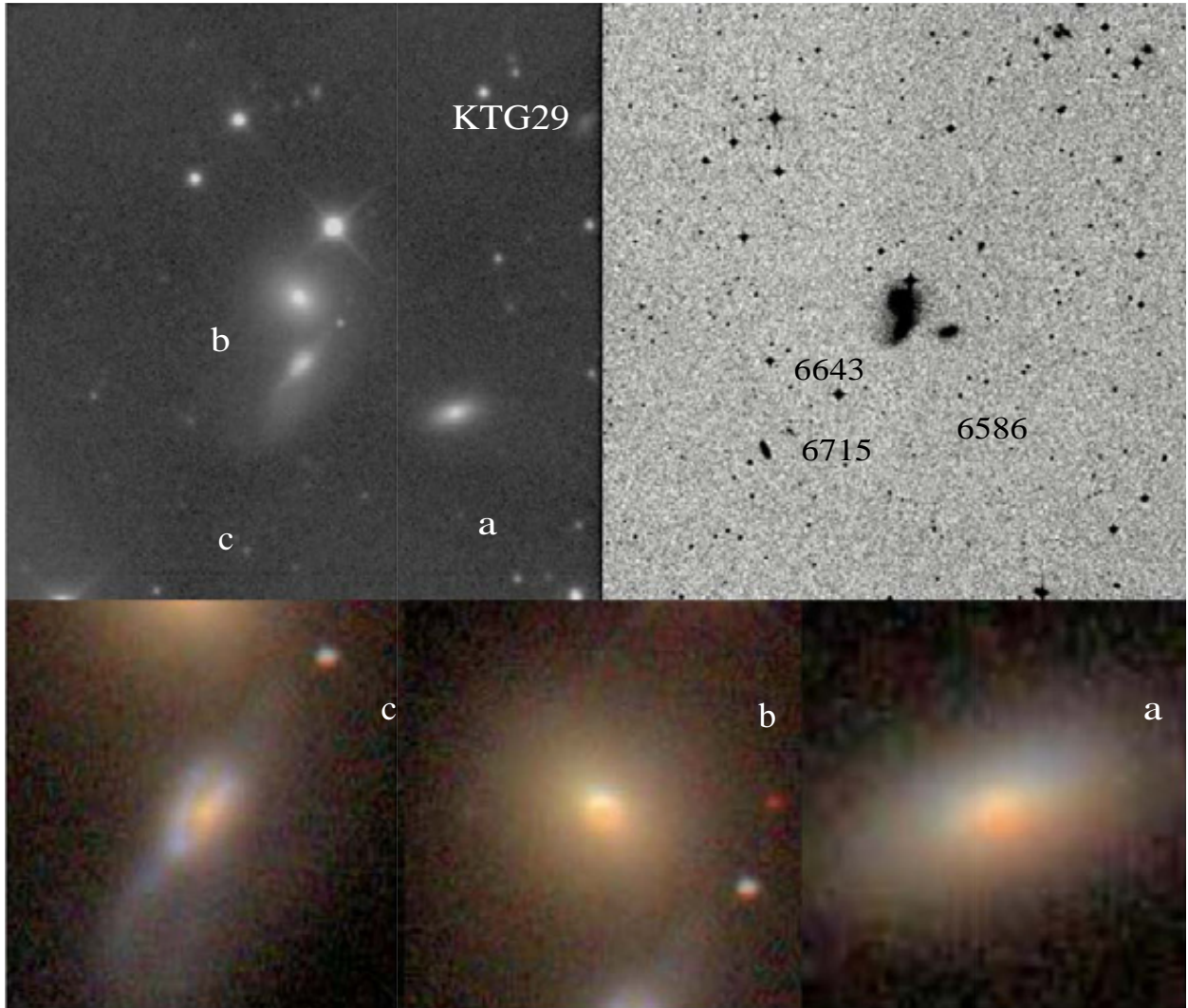


Figura A 2.33. Mosaico del sistema KTG29 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 7.2' x 7.2', Monte Palomar de 15' x 15'.

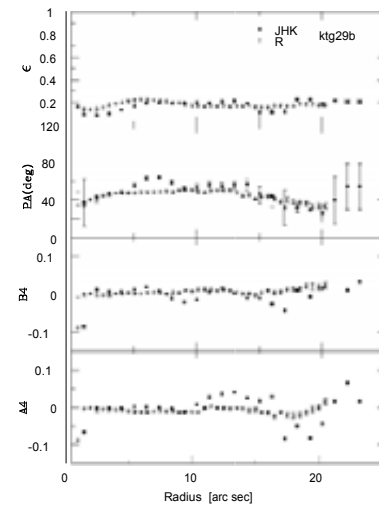
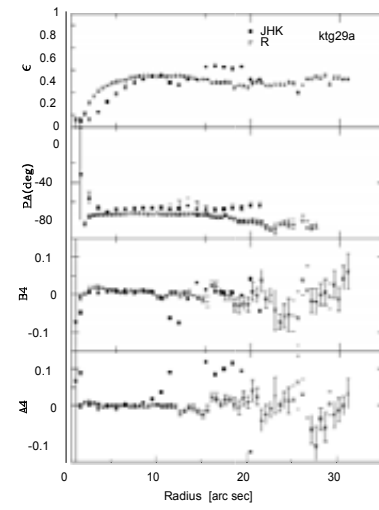
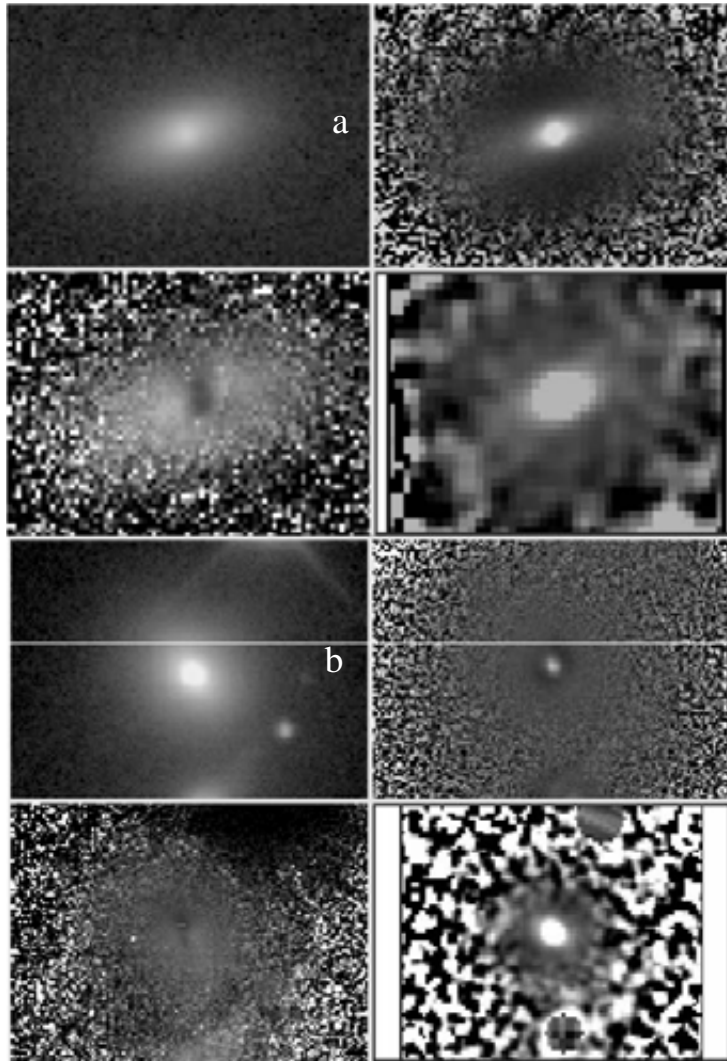


Figura A 2.34.- Mosaicos individuales de KTG29a y KTG29b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.56' y 0.8' respectivamente.

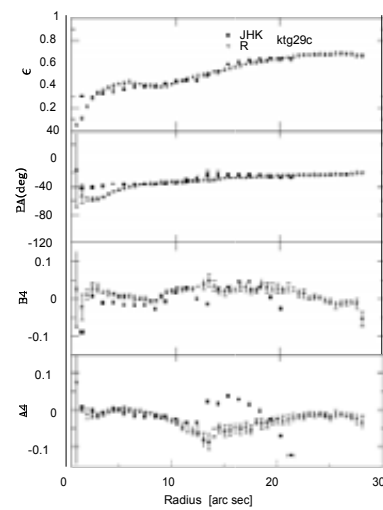
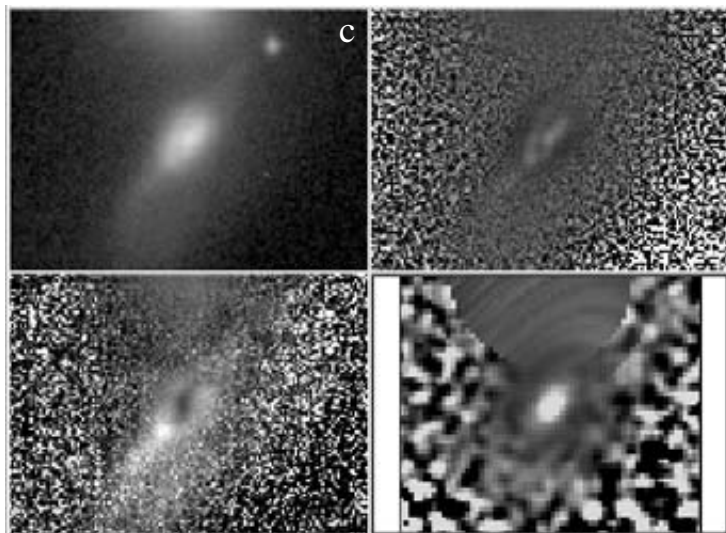


Figura A 2.35.- Mosaico individual de KTG29c similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 1.3'.

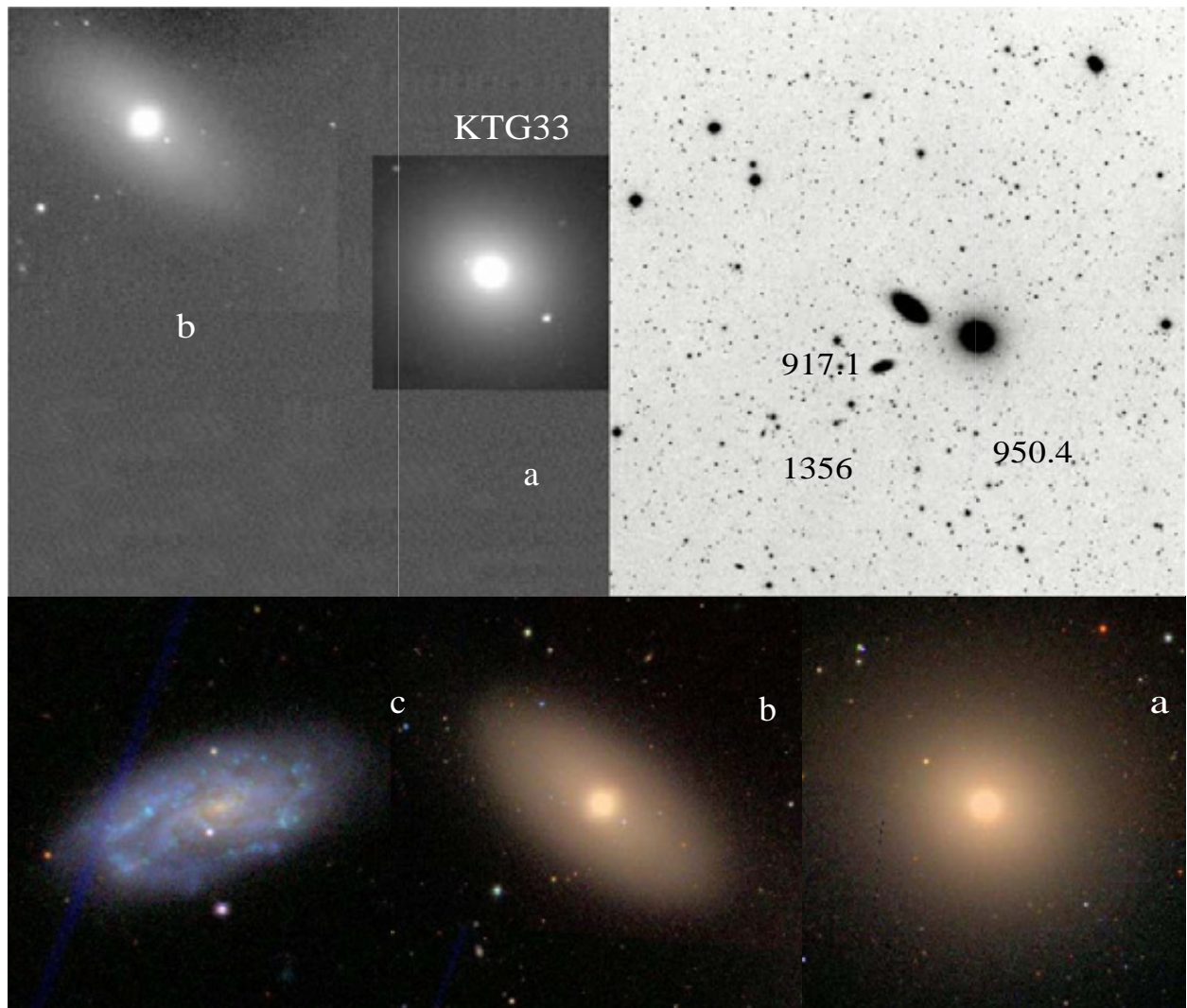


Figura A 2.36. Mosaico del sistema KTG33 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 5.81' x 5.81', Monte Palomar de 60' x 60'.

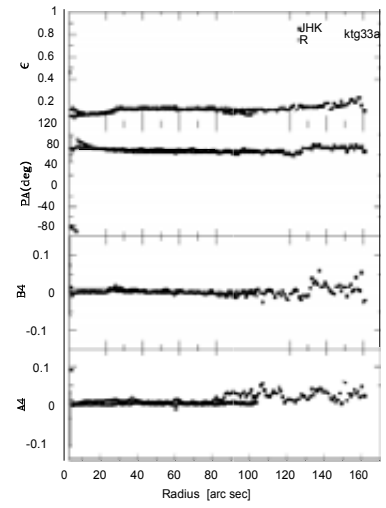
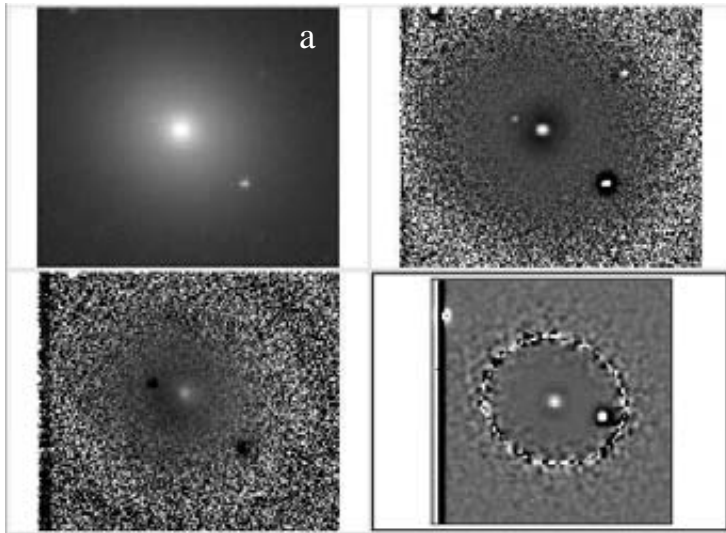


Figura A 2.37.- Mosaico individual de KTG33a similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es 5.4'.

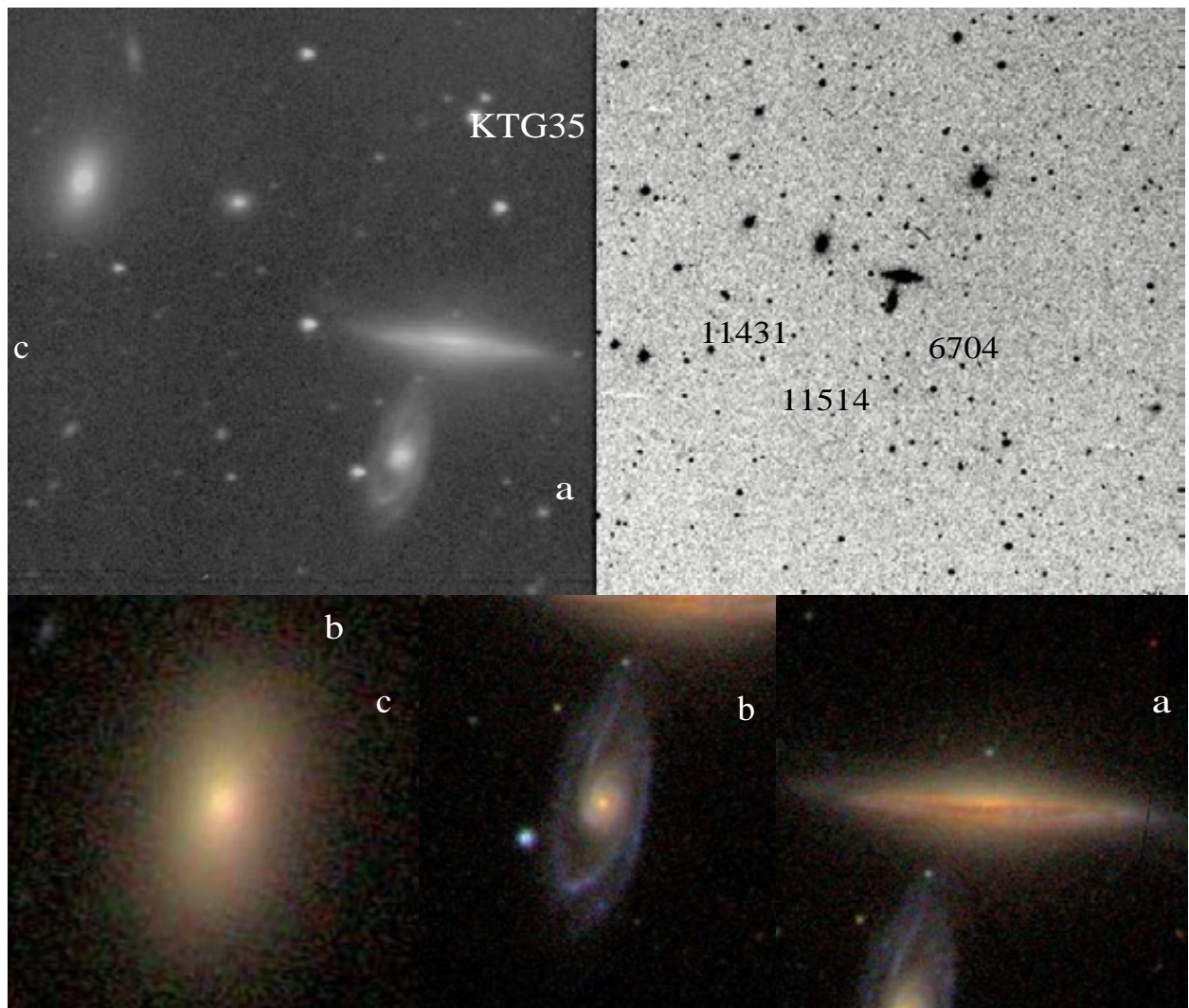


Figura A 2.38. Mosaico del sistema KTG35 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 7.2' x 7.2', Monte Palomar de 20' x 20'

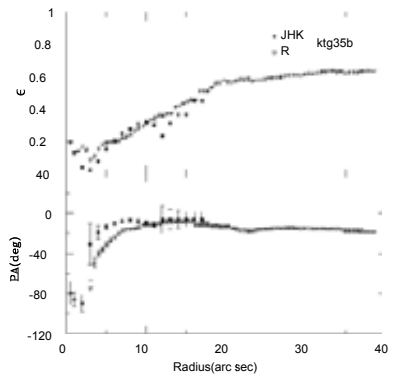
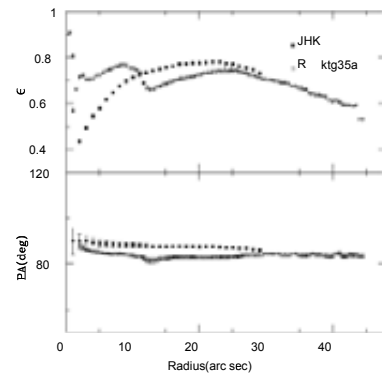
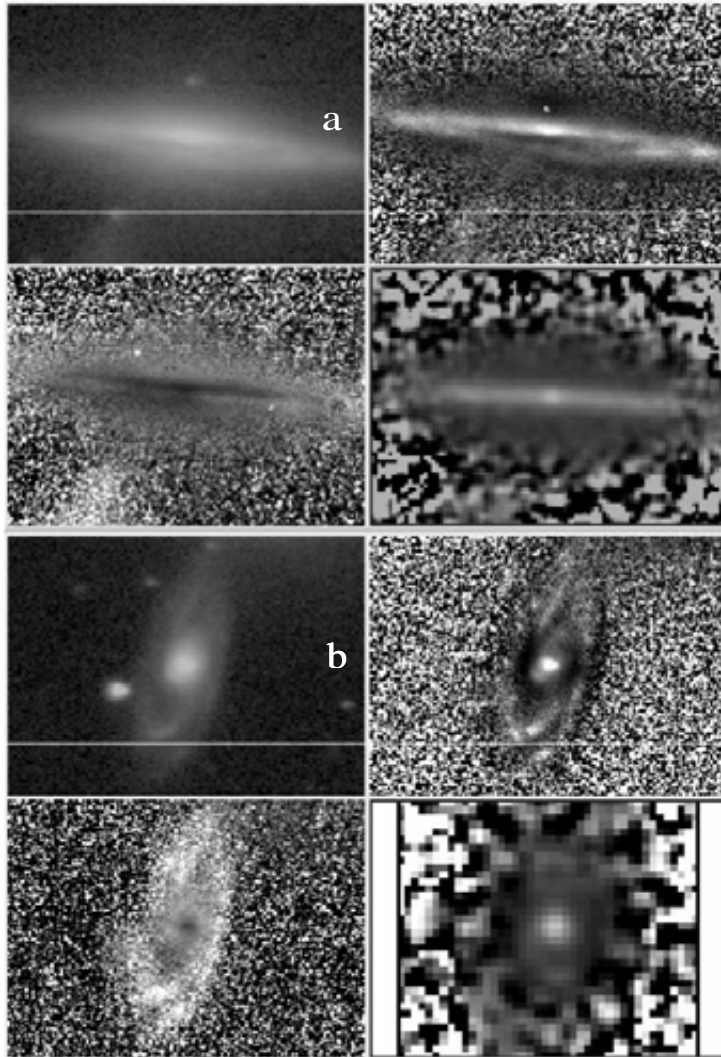


Figura A 2.39.- Mosaicos individuales de KTG35a y KTG35b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 1.22' y 1.12' respectivamente.

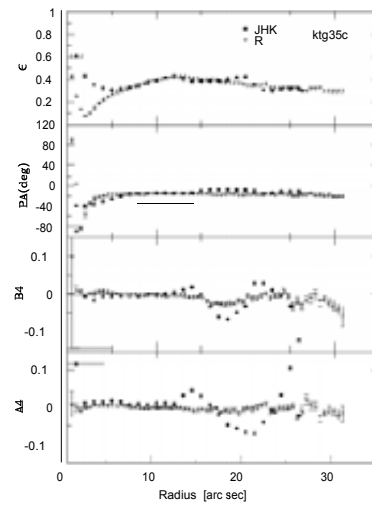
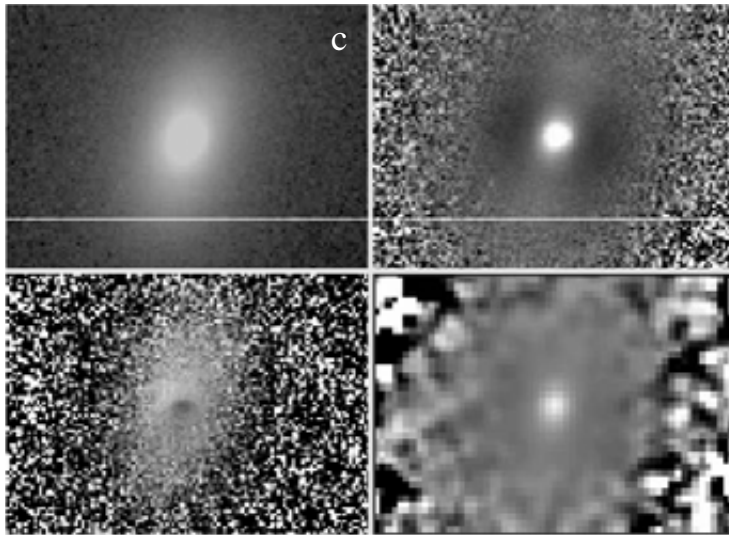


Figura A 2.35.- Mosaico individual de KTG15b similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es $0.81''$.

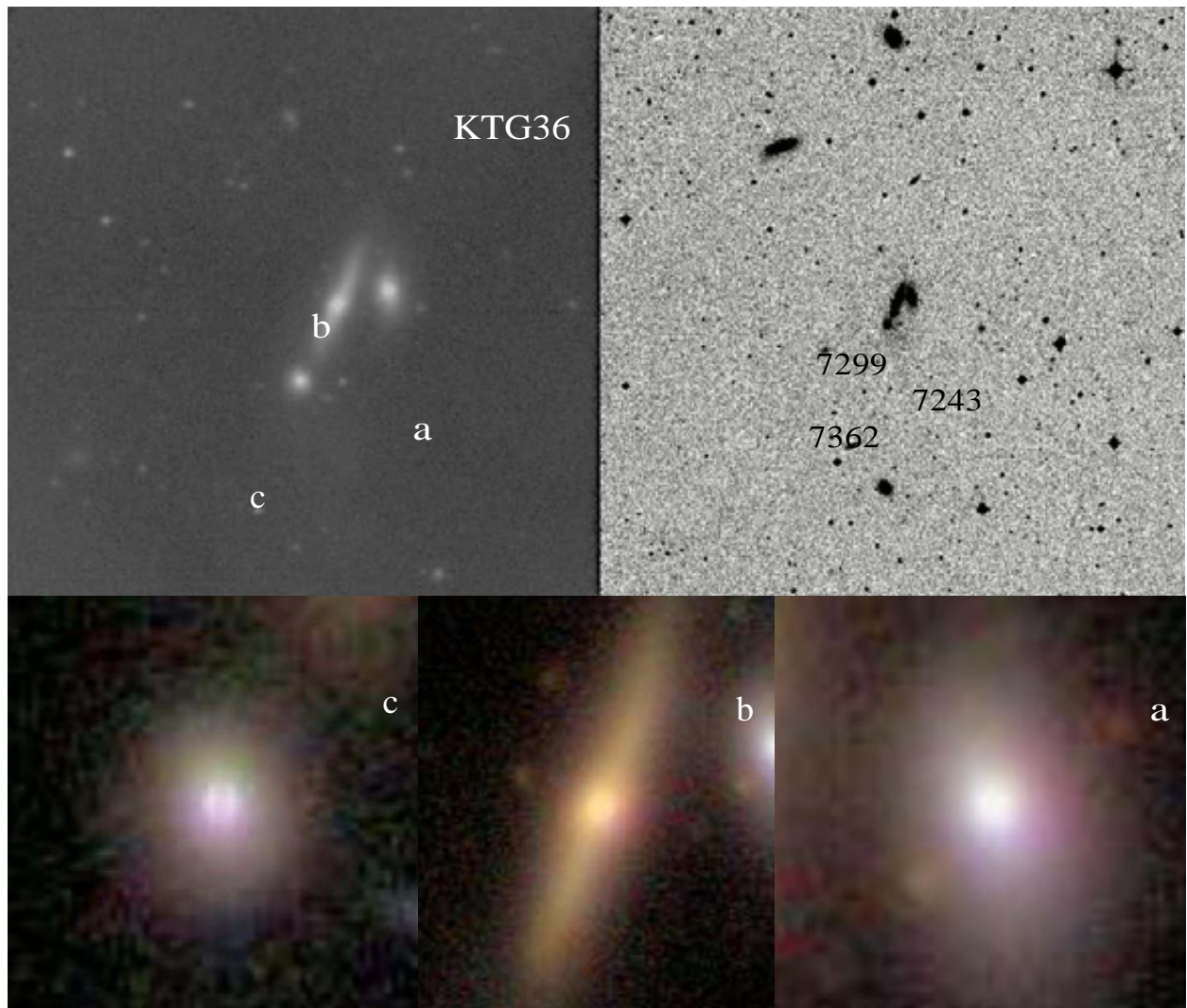


Figura A 2.41. Mosaico del sistema KTG36 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 7.2' x 7.2', Monte Palomar de 15' x 15'.

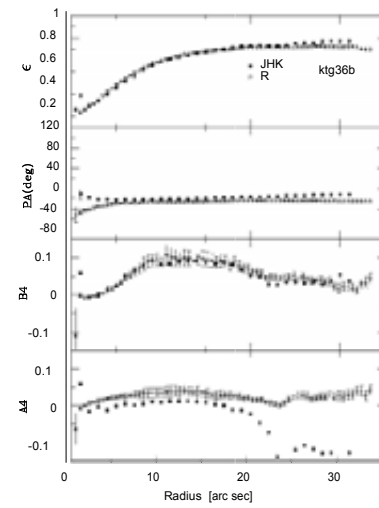
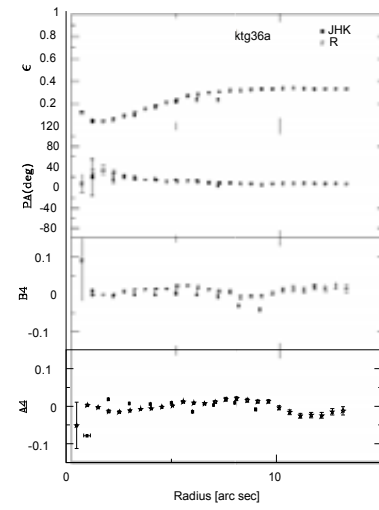
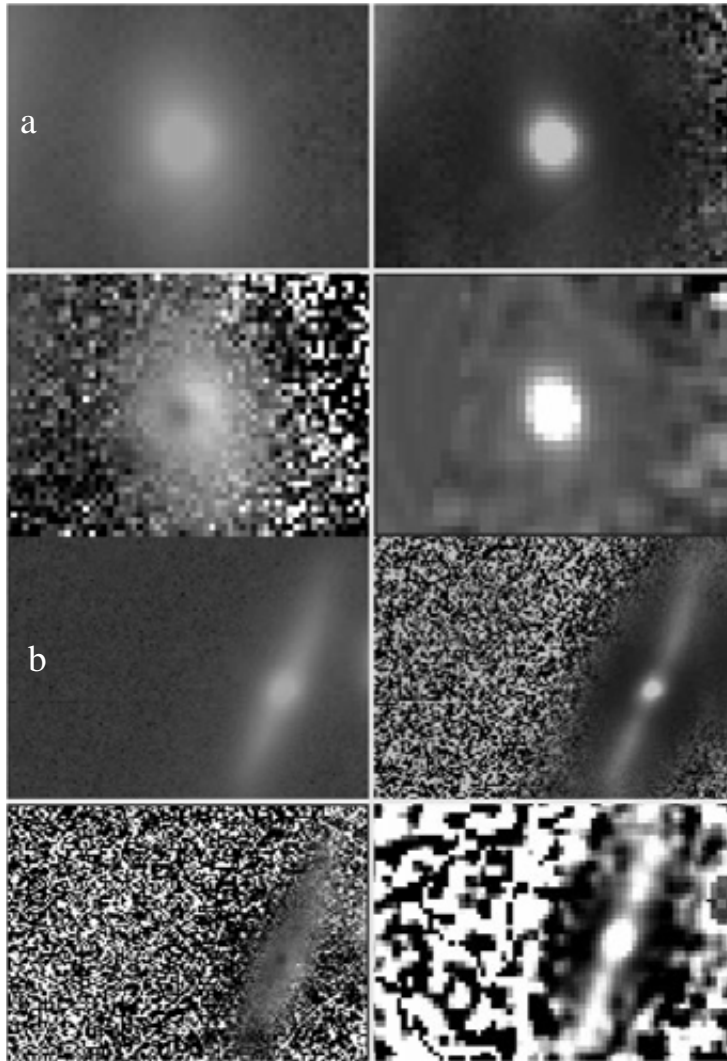


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG36a y KTG36b similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.5' y 1.25' respectivamente.

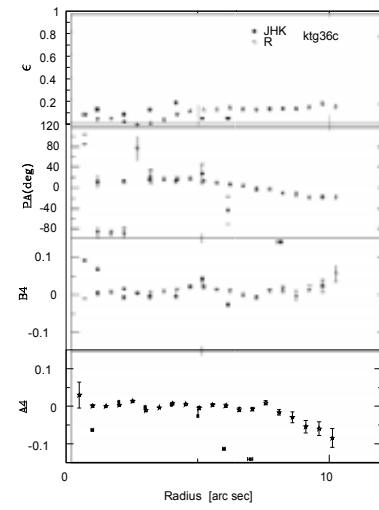
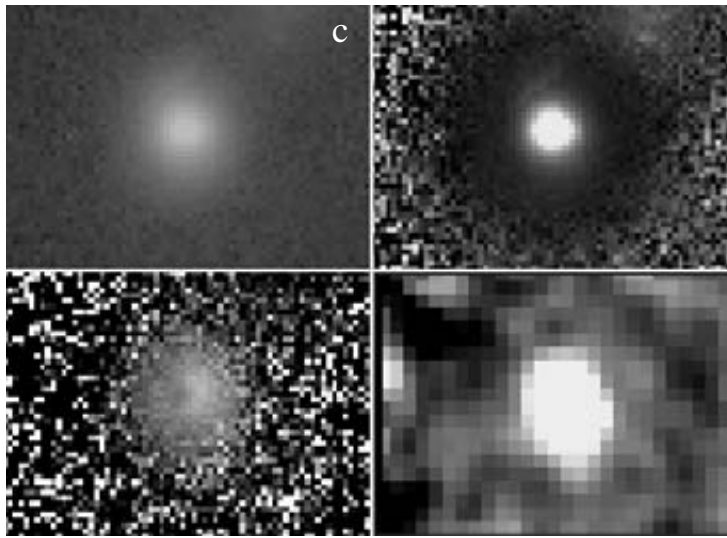


Figura A 2.43.- Mosaico individual de KTG36c similar a la figura A 2.2. El diámetro mayor es $0.33''$.

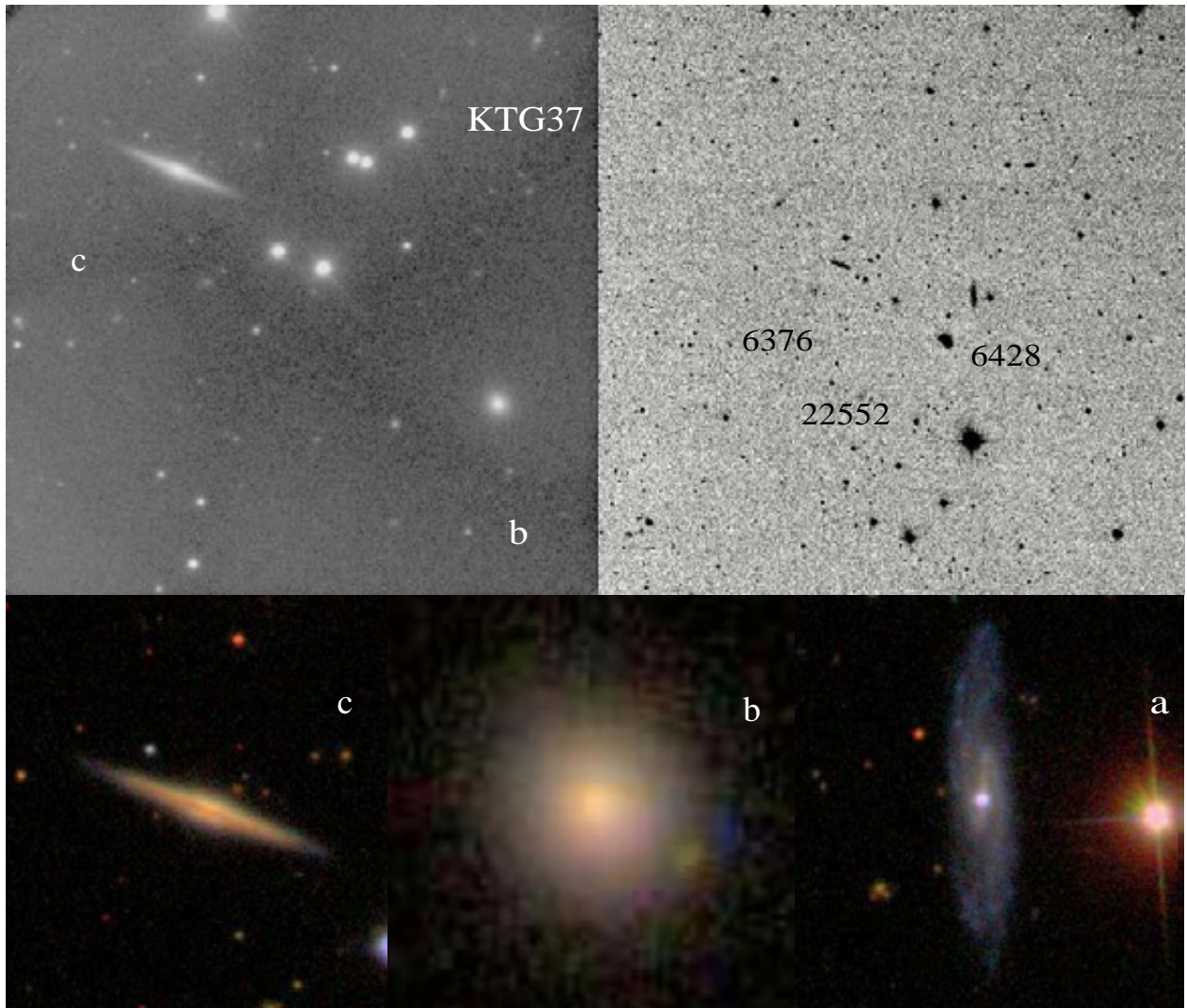


Figura A 2.44. Mosaico del sistema KTG37 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 7.2' x 7.2', Monte Palomar de 26' x 26'.

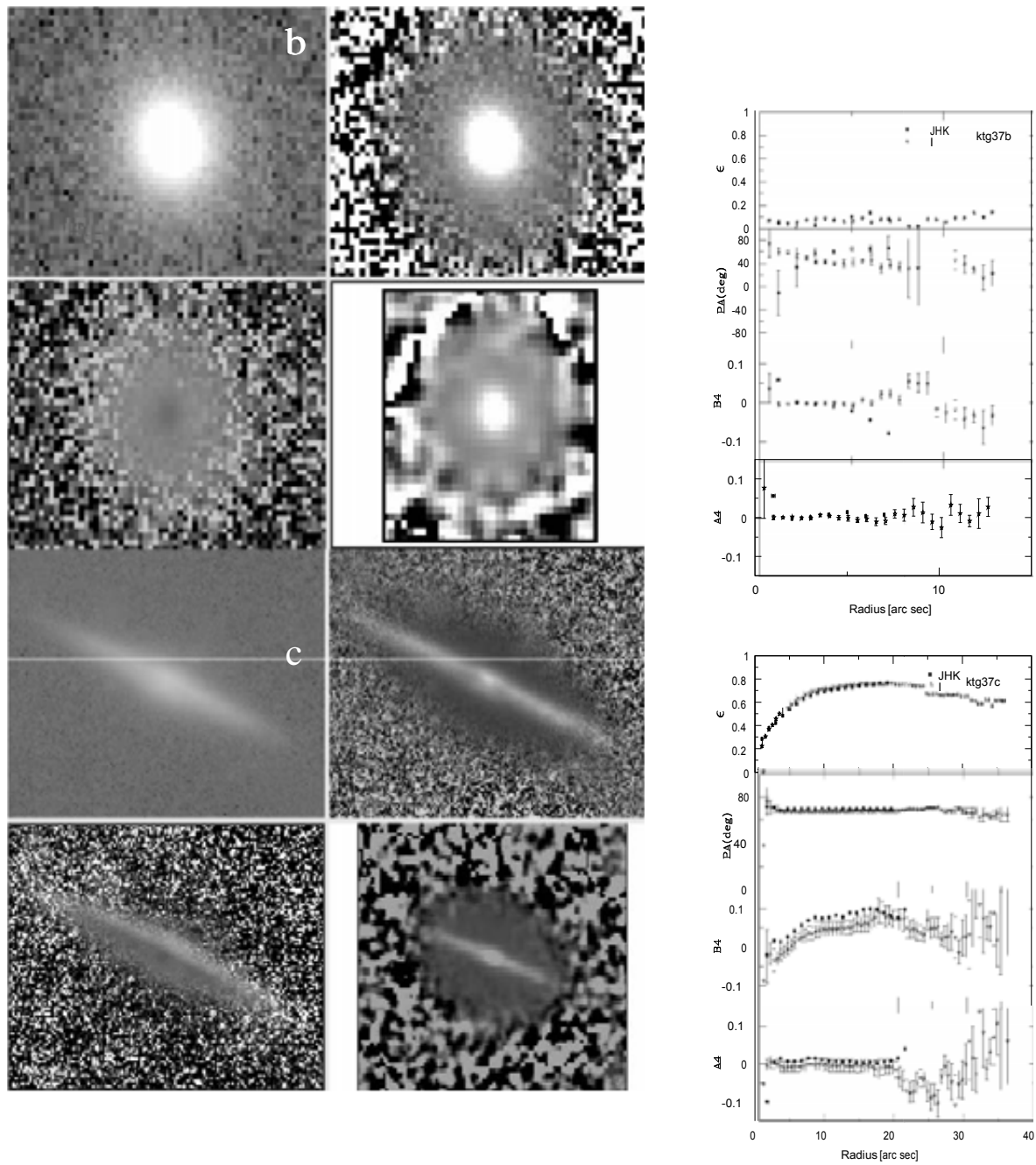


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG3b y KTG3c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 0.34' y 1.09' respectivamente.

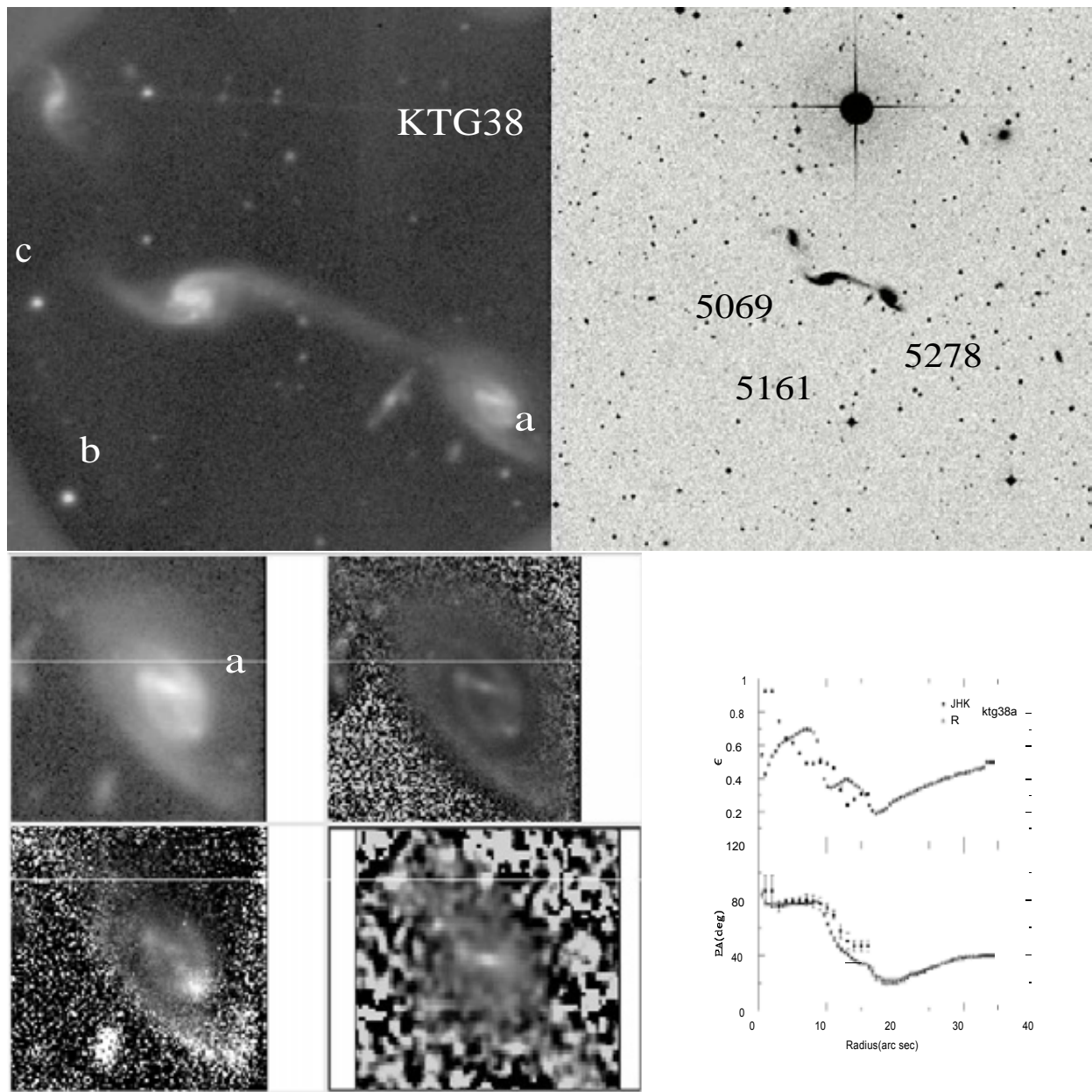


Figura A 2.46.- Mosaico similar a la figura A 2.1. Imagen de 7.2' x 7.2' de SPM, imagen SDSS de 20' x 20'. En la parte inferior mosaico individual de la componente KTG38a similar al de la figura A 2.2. El diámetro mayor de la galaxia es 0.8'

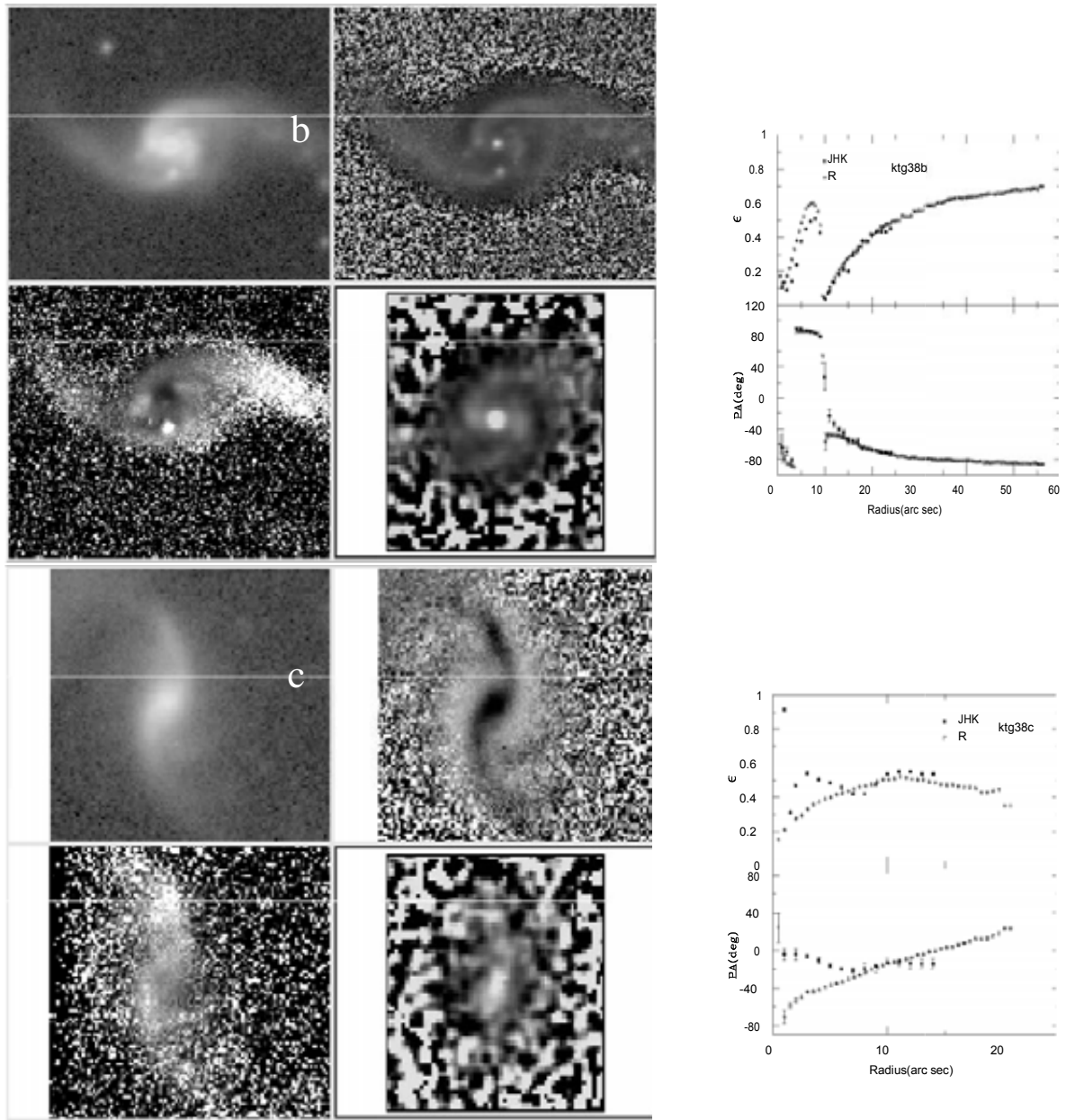


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG38b y KTG38c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 1.5' y 0.4' respectivamente.

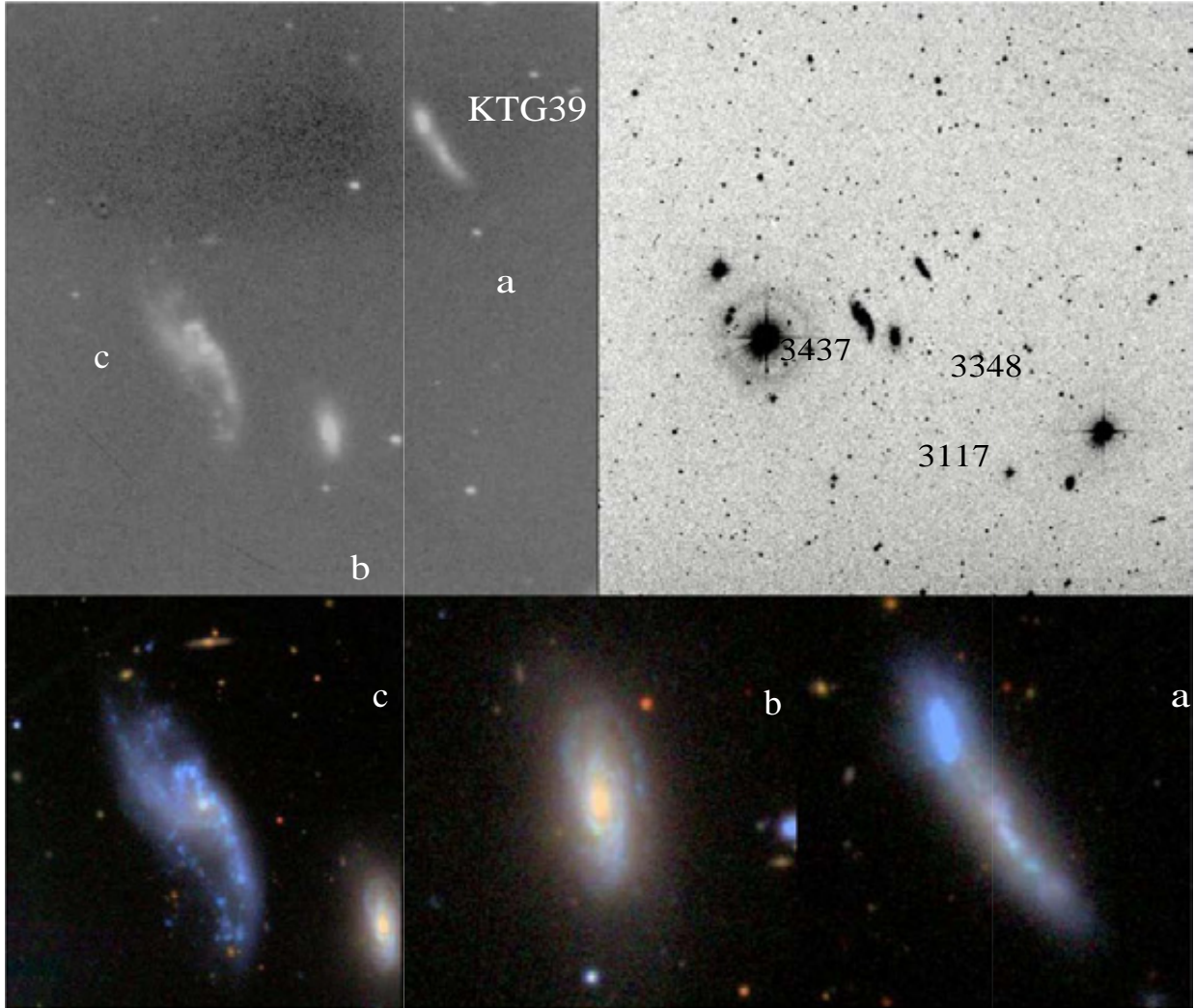


Figura A 2.48. Mosaico del sistema KTG39 similar a la figura A 2.19. Imagen de (SPM) de 4.2' x 4.2', Monte Palomar de 30' x 30.

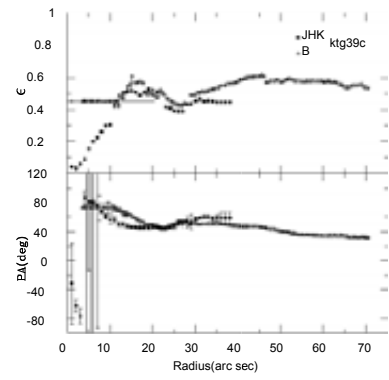
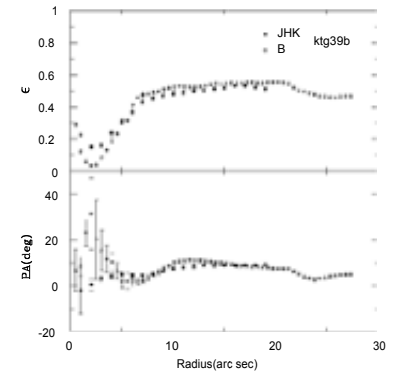
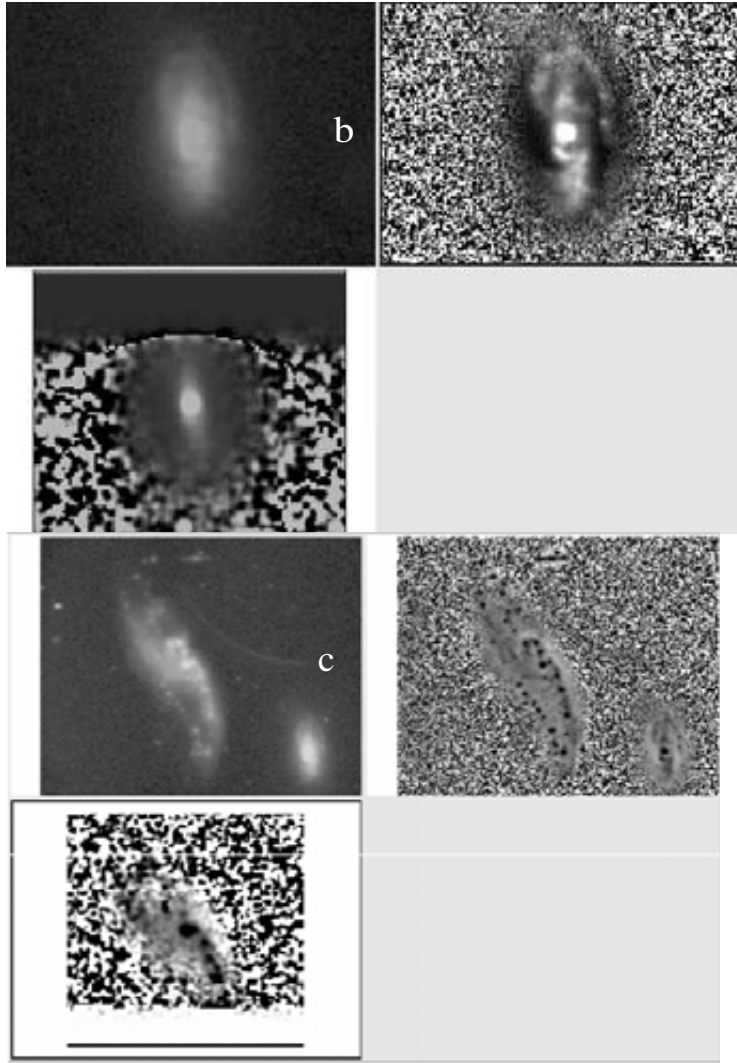


Figura A 2.4.- Mosaicos individuales de KTG39b y KTG39c similares a la figura A 2.2. Los diámetros mayores son 1.4' y 1.3' respectivamente.

§ 14 BIBLIOGRAFÍA

HyperLEDA <http://leda.univlyon1.fr>

IRAF <http://iraf.noao.edu>

NED <http://nedwww.ipac.caltech.edu>

SLOAN DIGITAL SKY SURVEY <http://www.sdss.org>

Aceves H. 2001 MNRAS, 326, 1412

Ann H. B. & Park J. C. 2006 NA, 11 293

Anosova Z. P. 1987 Ap, 87, 653

Anosova, Zh. P., et al, “*Configurations of Triplets of galaxies*”, en Astronomy Reports, Vol.37 (5), pp.475480, 1993.

Anosova, J., “*Hierarchical and Non Hierarchical Triples*”

Athanassoula 2005; 2005AIPC..804, 333

Avila-Reese, V., Carrillo, A., Valenzuela, O., & Klypin, A. 2005, MNRAS, 361, 997

Balogh et al. 2000. 2000Obs...120..410B

Bamford et al. 2009. 2009MNRAS.393.1324B

Barazza F.D., Jogee S. Marinova. 2008 ASPC, 328, 1039

Barazza F.D., Jogee S. Marinova. 2008 ASPC, 328, 1039

Blumenthal et al. 1984, 1984ApJ...287..774B

Bournaud et al. 2005. 2005MNRAS.364L..18B

Buta, R. & Combes, F. 1996, Fundamental Cosmology Physics, 17, 95

Buta, R. 1999 ApJS, 269, 79

Capaccioli M. et al. 1991 ApJ, 371, 535

Casasola, V., Bettoni D., Galletta G. 2004, A&A, 422, 941

Chernin, A. D., MIKKOLA, S.1991, MNRAS, 253, 153, 1991.

Chernin, A.D., et al, 1994, “A&A, 281, 685, 1994.

Colln, P., Valenzuela, O., & Klypin, A. 2006, ApJ, 644, 687

Colles M. 2001 MNRAS, 328, 1039

Condon et al. 1993. 1993AJ....105.1730C

Condon J.J., Helou G., Jarret T. H. 2002, ApJ, 123, 1881

Conselice, C. J. 1997, PASP, 109, 1251

Conselice, C. J. 2003, ApJS, 147, 1 (C2003)

Conselice, C. J., Bershadsky, M. A., & Gallagher, J. S., III 2000, A&A, 354, L21

Coppin et al. 2006. 2006MNRAS.372.1621C

de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H.G., et al. 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies, New York, Springer-Verlag

de Vaucouleurs, A., & Longo, G. 1988, Catalogue of visual and infrared photometry of galaxies from 0.5 micrometer to 10 micrometer, University of Texas

Diacu, F., *"The Solution of the nbody Problem"*, en The Mathematical Intelligencer, Vol. 18, pp. 6670, 1996.

Diaz-Gimenez 2008 arXiv:0809.3483

Domingue D.L., Keel W. C., White R. E. 2000, ApJ, 545, 171

Donas J. et al. 2007, ApJS, 173, 597

Dressler A. 1980 ApJ, 236, 351

Dressler A. et al. 1997 ApJ, 490, 577

Dupraz C & Combes F 1986 A&A, 166, 53

Eggers D. 2005 ApJ, 129, 136

Elmegreen, B.G., & Elmegreen, D.M. 1982, MNRAS, 201, 1021

Elmegreen D. M. et al. 1991 A&A, 244, 52

ELMEGREEN, D.M., Galaxies and Galactic Structure, Prentice Hall, 1999, pp 295

Erwin, Peter. 2005, MNRAS, 364, 283

Eskridge P. B. et al. 2000, AJ, 119, 536

Farrah et al. 2001. 2001MNRAS.326.1333F

Farrah et al. 2002. 2002MNRAS.335.1163F

Finkbeiner, D.P. & Davis, M., 1998, ApJ, 500, 525

Firmani, C., & Avila-Reese, V. 2000, MNRAS, 315, 457

Focardi, P & Kelm, B. 2002, A&A, 391, 35

Franco-Balderas A. et al. 2003 A&, 406, 415

Franco-Balderas A. et al. 2005 RMXAA, 41, 483

Frei, Z., Guhathakurta, P., Gunn, J. E., & Tyson, J. A. 1996, AJ, 111, 174

Gadotti, D.A., & dos Anjos, S. 2001, AJ, accepted (astro-ph/0106303) Gil de Paz A. et al. 2003, ApJS, 173, 185

Gavazzi et al. 2010. 2010arXiv1003.3795G

Giovanelli, R., Haynes, M. P., Salzer, J. J., Wegner, G., da Costa, L. N., & Freudling, W. 1995, AJ, 110, 1059

GNEDin, O., Weinberg, D. H., Pizagno, J., Prada, F.

Godwin, J.G., Bucknell, M.J., Dixon, K.L., Green, M.R., Peach, J.V., & Wallis, R.E. 1977, The Observatory, 97, 238 GNEDin, O., Weinberg, D. H., Pizagno, J., Prada, F. & Rix, H.-W. 2006, preprint (astro-ph/0607394)

Goto T. 2005, MNRAS, 360, 332

Graham, A. W., Trujillo, I., & Caon, N. 2001, AJ, 122, 1707

Grouchy, R.D.; et al. 2008, ApJ, 136, 980 & Rix, H.-W. 2006, preprint (astro-ph/0607394)

Heisler J Tremaine S Bahcall J.N 1985 ApJ, 298,

Hernquist L. & Quinn P.J. 1987 ApJ, 312, 1

Hernquist L. & Quinn P.J. 1987 ApJ, 312, 17

Hernández-Toledo H., Dultzin-Hacyan D., Sulentic J.W. 2001 ApJ, 121, 1319

Hernández-Toledo, H. M., Avila-Reese, V., Conselice, C. J., & Puerari, I. 2005, AJ, 129, 682

Hernández-Toledo, H. M., Avila-Reese, V., Salazar-Contreras, J. R., & Conselice, C. J. 2006, AJ, 132, 71

Hernández-Toledo H., Zendejas-Dominguez J., Avila Reese V. 2007 ApJ, 134, 2286

Hernández-Toledo H. & Ortega-Esbri S. 2008 A&A, 487, 485

Hernández-Toledo H. et al. 2008 ApJ, 136, 2115

Heidt et al. 1999 1999A&A...352L..11H

Heisler J Tremaine S Bahcall J.N 1985 ApJ, 298, 8

Hickson 1997, 1997astro.ph.10044H

Huchra J. P. & Geller M. J. 1982 ApJ, 2557, 423

Huchtmeier et al. 2010. 2010yCat..35060677H

Hughes et al. 1998; 1998PhRvD..58I2002H

Iono D. yun M.S., Ho P. T. P 2005, ApJS, 158, 1

James A. et al. 2002, MNRAS, 335, 853

Jansen R. A. et al. 2000, ApJS, 126, 271

Jansen, R.A., Franx, M., Fabricant, D., & Caldwell, N. 2000, ApJS, 126, 271

Jarret T. H. 2000, PASP, 112, 1008

Jones et al. 2009 6df 2009MNRAS.399..683J

Keel W.C. 1993 ApJ, 106, 1771

Karachentseva, V. E. 1973, Astrof. Issledovanija Byu. Spec. Ast. Obs., 8, 3

Karachentseva V. E. Karachentsev I. D. 2000 ASPC, 209 11

Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Huchtmeier, W. K. 2006, A&A, 451,817

Karachentsev 2008, Astrophysical Bulletin, Volume 64, Issue 1,

Karachentsev I. D. & Makarov D. I. 2008 AstBu, 63, 299

Kassin, S. A., de Jong, R. S., & Weiner, B. J. 2006, ApJ, 643, 804

Kauffmann, G., Charlot, S., & Balogh, M.L. 2001, MNRAS, submitted (astro- ph/0103130)

Kauffmann, G., White, S.D.M., & Guiderdoni, B. 1993, MNRAS, 264, 201

Kautsch S. J. et al. 2006, A&A, 455, 765

Keel W.C. 1993 ApJ, 106, 1771

Kennicutt R.C. 1998 ApJ, 498, 541

Klypin, A.A., Kravtsov, A.V., Valenzuela, O., & Prada, F. 1999, ApJ, 522, 82

Koopmann, R. A., & Kenney, J. D. P. 2006, ApJS, 162, 97

Lacey, C.G., & Silk, J. 1991, ApJ, 381, 14

Larson, R.B., & Tinsley, B.M. 1978, ApJ, 219, 46

Maia M. A. G. da Costa L. N. Latham D. W. 1989 ApJS, 69, 809

Marziani P. et al. 1999, ApJ, 117 2736

Mendes-De Oliveira C. & Hickson P. 1994, ApJ, 427, 648

Monnier R.D. et al. 2003 A&A, 188, 55

Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., & Oemler, A., Jr. 1996, Nature, 379, 613

Moore, B., Ghigna, S., Governato, F., Lake, G., Quinn, T., Stadel, J. & Tozzi, P. 1999, ApJ, 524, L19

Morgan, W. W., & Osterbrock, D. E. 1969, AJ, 74, 515

Moss C. 2006 MNRAS, 373, 167

Nolthenius R White S. D. M. MNRAS, 235, 505

Okamura, S., Kodaira, K, & Watanabe, M. 1984, ApJ, 280, 7

Park C. Gott, J. R. Choi Y. 2008 ApJ, 674, 784

Pisano, D. J., Wilcots, E. M., & Liu, C. T. 2002, ApJS, 142, 161

Pizagno, J., et al. 2005, ApJ, 633, 844

Pompei E., Dahlem M., Iovino A. 2007 A&A, 473, 399

Primack J. 2005 2005hst..prop10678P

Prugniel Ph. 1987, CDS Bull., 33, 17

Prugniel, Ph., & Héraudeau, Ph. 1998, A&AS, 128, 299

Rampazzo R. et al. 2005 MNRAS, 356, 1177

Rampazzo et al. 2004, 2004ANS...325...58R

Rampazzo R. et al. 2005 MNRAS, 356, 1177

Rampazzo R. et al. 2006 MNRAS, 368, 851

Ravindranath S. et al. 2001, ApJ, 122, 653

Richter, O., & Sancisi, R. A&A, 290L 9

Rivolo, A. R., & Yahil, A. 1981, ApJ, 251, 477

Rix, H., & Zaritsky, D. ApJ 447 82

Roberts, M.S., & Haynes, M.P. 1994, ARA&A, 32, 115

Schlegel, D.J., Finkbeiner, D.P. & Davis, M., 1998, ApJ, 500, 525

Schweizer 1998, 1998AJ....116.2206S

Shustov, B., Wiebe, D., & Tutukov, A. 1997, A&A, 317, 397

Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R. et al. 2006, AJ, 131, 1163 Kirkpatrick, J.D.,

Stoughton C. 2002 ApJ, 123, 485-548

Sofue y. 1993, PASP, 105, 308

Takata et al. 2006, 2006ApJ...651..713T

Tomita A. et al. 2000 ApJ, 188, 55

Toomre A & Toomre J 1972 ApJ, 178, 623

Trentham, N., Møller, O., & Ramirez-Ruiz, E. 2001, MNRAS, 322, 658

Trofimov A. V. & Chernin A.D. 1995 Azh, 72, 308

Tully, R. B. 1987, ApJ, 321, 280

Tully, R. B., & Pierce, M. J. 2000, ApJ, 533, 744

Tully, R.B., Pierce, M.J., Huang, J., Saunders, W., Verheijen, M.A.W. & Witchalls, P.L., 1998, AJ, 115, 2264

Valtonen, M., Mikkola, S., "The Few body Problem in Astrophysics" en Astronomy and Astrophysics, Vol 29, pp 929

van Albada 2001 et al., 2001, A&AS

Vaisanen et al., 2007ApJ...659L...9M

Valiante et al., 2007ASPC..380..417V

van den Bergh, S., Galaxy Morphology and Classification, Campuente University Press, 1998, pp 111

Veilleux et al., 2002ApJS..143..315V

Verheijen, M. A. W. 1997, Ph.D. Thesis,

Wang, B. & Heckman, T.M. 1996, ApJ, 457, 645

White R. A. et al. 1999 ApJ, 118, 2014

Whitford, A.E. 1936, ApJ, 83, 424

Wozniak et al. 1995, A&AS, 111, 115

Zaritsky, D., Kennicutt, R.C., & Huchra, J.P. 1994, ApJ, 420, 87

Zavala, J., Avila-Reese, V., Hernández-Toledo, H., Firmani, C. 2003, A&A, 412, 633

Zheng, J. Valtonen M.J. Chernin A. D. ApJ, 105, 2047

Zhu, M.; et al. 1999, ApJ, 188, 145

Zwicky F. Herzog E. Wild P. 1961