



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"RELACION MASA LUMINOSIDAD (TULLY-FISHER) DE
GALAXIAS ESPIRALES COMPAÑERAS DE UNA
GALAXIA ELIPTICA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C A
P R E S E N T A :
ERENDIRA MARIA HUERTA MARTINEZ



DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSE DE JESUS GONZALEZ GONZALEZ

2005



0349568



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo resposcional.
 NOMBRE: Eréndira María Huerta
Martínez
 FECHA: 7 de Noviembre 2005
 FIRMA: [Firma]

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
 "Relación masa-luminosidad (Tully-Fisher) de galaxias espirales compañeras de una galaxia elíptica"

realizado por Huerta Martínez Eréndira María

con número de cuenta 09321162-8, quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
 Propietario Dr. José de Jesús González González

Propietario Dr. Ramiro García García

Propietario Dr. José Ernesto Marquina Fábrega

Suplente Dr. Vladimir Avila Resse

Suplente Dr. Gerardo Carmona Ruíz

Consejo Departamental de Física

[Firma]
 M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ DE
 DEPARTAMENTO DE FÍSICA

*A Chonita y a Ligia
por transmitirme su amor a la vida.*

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer por su paciencia, experiencia y sobre todo su generosidad a Jesús González, mi asesor.

A Gude y a Mario por darme su confianza y su apoyo incondicional.

A Bolívar y a Canek por haber crecido a mi lado y darme fuerzas para salir adelante.

A Itza y a Tonatiuh por ser mis mejores amigos y hermanos.

A Coco por estar en México.

A Livia, Amarela, Isabel y Raquel por su ejemplo de fuerza y valor.

A Raúl, Blanca y Lidia porque a pesar de la distancia han estado conmigo.

En especial quiero agradecer a mis sinodales: Ramiro García, Vladimir Avila, Gerardo Carmona y José Marquina, por su confianza, y por haber sido mis mejores maestros; gracias por enseñarme Física.

A mis amigos entrañables de la facultad: Susana, Julia, Jimena, Julio, Parménides porque por ustedes acabé la carrera.

A toda mi familia por estar siempre al pendiente de mí.

A las personas con las que cotidianamente estoy.

Gracias a Sinhué porque sin él esta tesis no tendría gráficas.

Y como dice Violeta Parra:

Gracias a la vida...

“RELACION MASA-LUMINOSIDAD (TULLY-FISHER) DE GALAXIAS ESPIRALES COMPAÑERAS DE UNA GALAXIA ELIPTICA”

1. INTRODUCCION	3
2. CARACTERISTICAS DE LAS GALAXIAS	4
2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS	4
2.2 SECUENCIA MORFOLOGICA DE HUBBLE	6
2.3 PROPIEDADES DE GALAXIAS DE DISCO	8
2.4 ROTACION DE GALAXIAS DE DISCO	9
2.5 RELACION TULLY-FISHER DE GALAXIAS ESPIRALES	12
2.6 PARES MIXTOS DE GALAXIAS	15
2.7 OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO	16
3. METODO DE EXTRACCION DE DATOS	16
3.1 REDUCCION DE IMAGENES	19
3.1.1 BIAS	19
3.1.2 FLAT	21
3.2 CALIBRACION GEOMETRICA	24
3.3 APLICACION DE LA CALIBRACION GEOMETRICA	27

3.4 PASOS FINALES DE REDUCCION	28
3.4.1 CALIBRACION DE INTENSIDAD	
RELATIVA	28
3.4.2 INTERPOLACION DE RAYOS COSMICOS	29
3.4.3 SUSTRACCION DEL CIELO	30
3.5 IDENTIFICACION DE LA ZONA DE EMISION	30
4. CURVAS DE ROTACION	31
5. DISCUSION	47
6. CONCLUSIONES	49
7. BIBLIOGRAFIA	51

1. INTRODUCCION

La evolución de las galaxias en el Universo observable puede darse en forma aislada o en interacción. La motivación de esta investigación es cuantificar el efecto de la interacción en la evolución de las galaxias de disco.

Las galaxias de disco aisladas definen una relación entre su masa y luminosidad, llamada Tully-Fisher. En particular, la masa se estima a partir del máximo de la amplitud en la curva de rotación de la galaxia de disco. En este proyecto se miden las curvas de rotación de galaxias de disco en interacción con una galaxia elíptica -pares mixtos-. Posteriormente se compararán con curvas de rotación de galaxias espirales aisladas.

Tenemos una colección de imágenes de 100 galaxias en pares mixtos, observadas en el telescopio de San Pedro Mártir en 2002. Tales galaxias pertenecen al catálogo de Karachantseva (1973), es un catálogo completo a una magnitud límite que identifica pares de galaxias aislados donde las dos componentes son comparables en tamaño. En este caso el par lo forman una galaxia de disco y una galaxia elíptica.

En el sistema de par mixto todos los efectos de la formación estelar se deben a la galaxia de disco, ya que contiene mucho gas a diferencia de la galaxia elíptica que solamente perturba gravitacionalmente a la galaxia de disco.

En cada imagen está la galaxia tipo espiral, y se centra en la emisión de $H\alpha$ (6562.82 Å) en el visible, hacia el rojo se encuentra la línea de NII (6548.03 Å) y hacia el azul está NII (6583.41 Å), tales son líneas prohibidas que sólo se dan en bajas densidades.

2. CARACTERISTICAS DE LAS GALAXIAS

2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

En el siglo XVII Immanuel Kant explicaba que la Vía Láctea es un equivalente “indefinidamente grande” del sistema solar:

“...Si un sistema de estrellas fijas vinculadas en sus posiciones a un plan común, tal como la Vía Láctea, estuviera tan lejos que las estrellas individuales de las que se compone ya no fueran distinguibles ni siquiera en el telescopio por la debilidad de su luz, su forma y tamaño aparente; entonces esto se halla en perfecta armonía con la idea de que esas figuras elípticas son universos islas o Vías Lácteas...”¹

Desde este momento quedó una pista histórica de la existencia de un número ilimitado de galaxias dispersas através del espacio y aún más alejadas unas de otras que las estrellas de la Vía Láctea.

Fué hasta 1918 cuando se propuso un modelo de galaxia coherente con el tamaño de la Vía Láctea. Se observaron nebulosas -objetos difusos-, fuera de nuestra galaxia y comenzó un debate acerca de su ubicación y tamaño real.

El astrónomo Sharpley concluyó que tales objetos no podían ser universos islas y eran nebulosas gaseosas en los confines de la Vía Láctea. Estimó el tamaño de la Vía Láctea y concluyó que era mayor que la distancia a la que aparentemente estaban las nebulosas. Sin embargo Sharpley no tomó en cuenta la extinción que la materia interestelar produce en la emisión de luz de las estrellas: se ven más lejos de lo que realmente están.

1 Immanuel Kant

A partir de la velocidad de rotación de las galaxias espirales se concluyó que si estuvieran dentro de nuestra galaxia, entonces girarían con velocidades mayores que la velocidad de escape. Actualmente sabemos que tales nebulosas espirales son universos islas o galaxias, similares a la Vía Láctea.

En 1923 Edwin Hubble demostró finalmente que las nebulosas espirales son galaxias independientes. Identificó en la galaxia de Andrómeda M31 (Figura 1) dos estrellas variables cefeidas.

Una de las formas de medir distancias astronómicas es obteniendo una luminosidad absoluta de una estrella relativamente cercana, puede ser supernova, nova o cefeida; observando estrellas de mismo tipo en otros lugares a través de una relación logarítmica se estima la distancia. De tal manera Hubble dedujo la distancia a M31 que es aproximadamente de 2.2 millones de años luz, fuera de los confines de la Vía Láctea, y era la galaxia más cercana a nosotros; hasta ahora se han descubierto cerca de 10 galaxias más cercanas, pero son enanas.

A grandes rasgos las galaxias son conglomerados autogravitantes que contienen de cientos a cientos de miles de millones de estrellas, polvo, gas, cúmulos globulares, materia oscura y demás objetos cósmicos.

Actualmente se estima que existen 10^{10} galaxias en el universo observable. Hay varias que se comparan en masa a la Vía Láctea (alrededor de $7 \cdot 10^{11}$ masas solares) la mayoría son mucho más pequeñas y sólo algunas son más grandes.



Figura 1. Galaxia Andr6meda M31.

Las galaxias tienen t6picamente dos componentes morfol6gicas dominantes: un disco y un esferoide. De acuerdo al dominio de una a otra componente se clasifican en el6pticas, lenticulares y de disco espirales e irregulares.

2.2 SECUENCIA MORFOLOGICA DE HUBBLE

A finales de la d6cada de 1920, Edwin Hubble ya hab6a clasificado a las galaxias en 2 tipos principales: espirales y el6pticas. Las el6pticas son t6picamente m6s luminosas en volumen y materia que las espirales. Subsecuentemente, a las espirales las dividi6 en espirales ordinarias y espirales barradas, e introdujo en este tipo a las galaxias lenticulares; aproximadamente el 80% de las galaxias observadas son espirales. La mayor6a de la materia bari6nica en el universo est6 contenida en las galaxias espirales y el6pticas.

Hubble m6s adelante incluy6 a las galaxias irregulares que no tienen simetr6a definida, pero tambi6n son discos. Tal taxonom6a de galaxias se llama la secuencia morfol6gica de Hubble y se ilustra en la figura 2.

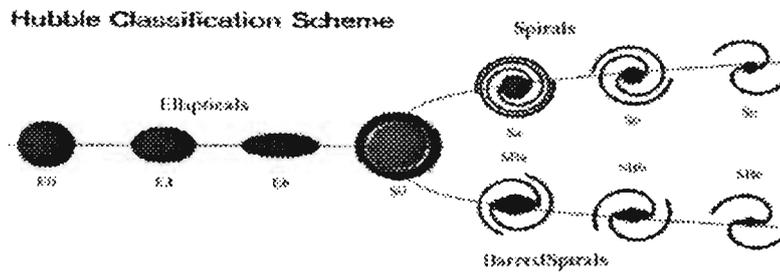


Figura 2. Secuencia de Hubble.

Los distintos tipos de galaxias no sólo se diferencian por su apariencia visual, también tienen distintas propiedades con respecto a sus poblaciones estelares, contenidos de gas, su tamaño y su evolución en el tiempo.

Las diferencias más significativas entre las galaxias espirales y elípticas son:

- La razón entre las velocidades aleatorias y las de rotación de las estrellas es mayor en las elípticas que en las espirales. En las galaxias de disco se tiene un disco galáctico casi plano soportado por la rotación, mientras que las elípticas son esferoides soportados por la dispersión de velocidades.
- Casi no hay gas en las galaxias tipo elípticas, ni polvo interestelar. En cambio en las galaxias espirales abundan el gas y el polvo y aún más en las irregulares. No hay evidencia de muchas estrellas jóvenes en galaxias elípticas, probablemente por la ausencia actual de nubes de gas y polvo.
- No se observa una estructura espiral en las galaxias elípticas.

2.3 PROPIEDADES DE GALAXIAS DE DISCO

Las galaxias de disco fueron las primeras en descubrirse debido a que abundan en la cercanía de la Vía Láctea. Una galaxia de disco es un sistema plano soportado por su rotación. En una galaxia de disco el Hidrógeno atómico y molecular está concentrado en su mayoría en un disco delgado, y ahí se encuentran las estrellas jóvenes o en nacimiento.

La distribución de materia bariónica es proporcional a la distribución de luz, sobre todo la producida por estrellas poco masivas y viejas pues son las más abundantes. La luz es producida en gran parte por estrellas jóvenes masivas, que se concentran en la región de los brazos espirales y son detectadas por su observación directa o por la emisión de regiones HII que irradian intensamente en el visible y en el UV (ultravioleta), pueden ser muy intensas pero no trazan fielmente la masa estelar, pues estas estrellas son muy escasas con relación a las poco masivas.

La diferencia entre las galaxias espirales y espirales barradas se encuentra cerca del bulbo, que en el caso de las espirales ordinarias es casi esférico, mientras que en las otras el bulbo está visiblemente elongado en forma de barra. Las espirales barradas son asimétricas.

Las galaxias espirales tienen una subclasificación: Sa, Sb, Sc y Sd, de igual forma las barradas son: SBa, SBb, SBc y SBd. En ambas secuencias, las clasificaciones a, b, c y d se refieren al tamaño del bulbo, y qué tan intensos y enrollados son los brazos espirales. El bulbo es más pequeño y los brazos son menos largos desde a hasta d, como se observa en la figura 2.

2.4 ROTACION DE GALAXIAS DE DISCO

Una galaxia de disco vista de canto, alineada con la rejilla de un espectrógrafo de un telescopio, tiene un espectro de luz coherente por el hecho de que está girando. Si la galaxia se encuentra rotando de tal forma que la parte izquierda al eje galáctico se acerca a nosotros, la parte derecha se aleja y si la rotación es uniforme entonces el espectro resulta (Figura 3):

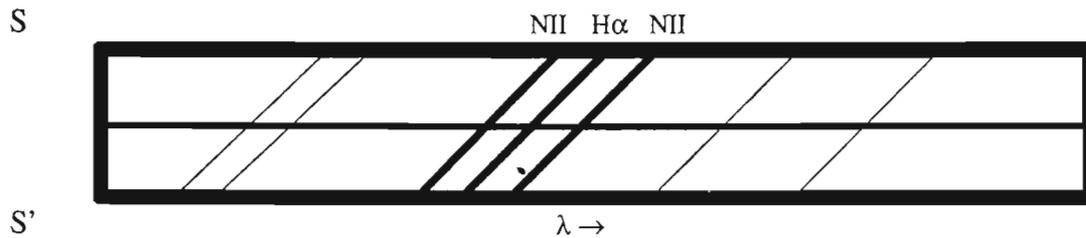


Figura 3. Espectro en una rendija alineada a una galaxia espiral que gira uniformemente con velocidad angular constante. El espectrógrafo va de S a S' y λ es la longitud de onda. La línea del centro horizontal es el continuo de la galaxia.

Las líneas espectrales están inclinadas porque la luz del lado izquierdo, con respecto al centro de la rendija, tuvo un corrimiento Doppler hacia el azul; mientras que el lado derecho lo tuvo hacia el rojo del espectro de luz, lo anterior sucede porque la fuente de emisión de fotones (las estrellas o regiones gaseosas) están en movimiento rotacional. Este corrimiento total incluye además al corrimiento debido a que la galaxia se aleja o acerca hacia nosotros.

A partir del espectro es posible determinar la variación de la velocidad circular, con respecto a la distancia al centro de la galaxia, es decir, se encuentra la velocidad de rotación como función de la distancia al centro de la galaxia.

El espectro observado de las galaxias de disco indica que no giran uniformemente (Figura 4) :

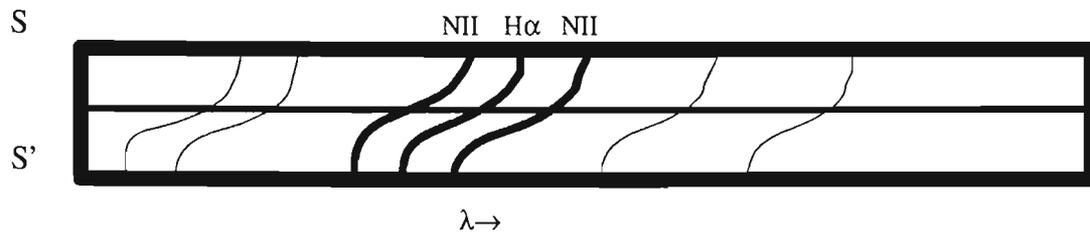


Figura 4. Modelo de espectro observado en la rendija de una galaxia tipo espiral con velocidad diferencial.

Si un sistema de masa M está rotando en equilibrio centrífugo y con órbitas circulares se cumple que :

$$\vec{a}_g = \vec{a}_c$$

El primer término es la aceleración gravitacional y del otro lado está la aceleración centrífuga; igualando se tiene:

$$\vec{a}_g = \frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r} = \vec{a}_c \rightarrow \frac{GM}{r} = v^2$$

Donde G es la constante gravitacional, M la masa del sistema, r la distancia al centro del sistema y v la velocidad de rotación. Se observa en la mayor parte de las galaxias que velocidad alcanza un máximo y después se hace aproximadamente constante. La masa total del sistema contenido en el radio fijado (Ley de Gauss) se expresa como:

$$M \propto v_{max}^2 \quad r \propto r$$

Una galaxia de disco presenta rotación diferencial; su velocidad angular decrece hacia afuera. Si se grafica la velocidad lineal promedio de rotación de las estrellas contra la distancia al centro de la galaxia se obtiene la curva de rotación, $v(r)$.

Lejos de centro de la galaxia se espera:

$$v_{rot} \propto r^{-1/2}$$

Porque para un disco delgado de estrellas con distribución de densidad superficial exponencial, como es típicamente el caso, la curva de rotación externa tiene que decrecer keplerianamente (es decir de la forma $r^{-1/2}$).

Sin embargo lo anterior no se observa en las curvas de rotación obtenidas observacionalmente en galaxias de disco (ver figura 5).

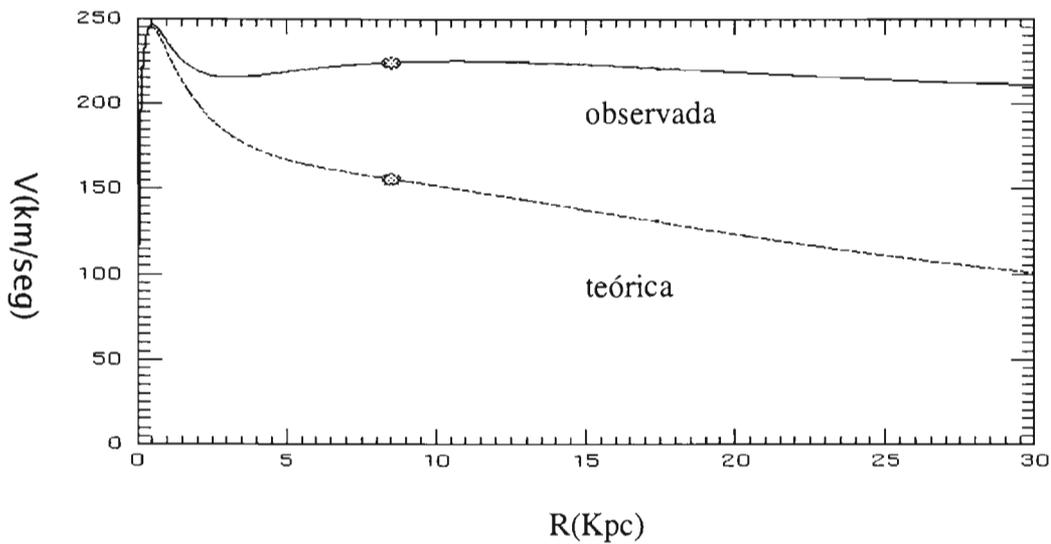


Figura 5. Curva de Rotación Típica (Velocidad de rotación vs Distancia al centro galáctico) de una galaxia de disco. La curva superior es la observada y la inferior es la esperada teóricamente para un disco con distribución exponencial de densidad superficial².

La curva de rotación obseuada muestra que la velocidad de rotación no decrece con la distancia;

2 Ver en <http://www.astronomynotes.com/ismnotes/>

lo anterior es fuerte evidencia de la existencia de materia indetectable u oscura. La velocidad circular se mantiene alta donde hay menos materia luminosa. Aparentemente la galaxia contiene mucho más materia de la que se observa.

Al menos que la ley de la gravedad no sea correcta, resulta que la materia oscura es la que domina el movimiento de las estrellas, gas y cúmulos globulares dentro de la galaxia. La materia oscura no se espera que sea materia ordinaria, es decir, no estaría compuesta de protones, neutrones y electrones, sino de partículas masivas que solo interaccionan gravitacionalmente y no con la radiación ni los bariones.

2.5 RELACION TULLY-FISHER DE GALAXIAS ESPIRALES

La relación entre la luminosidad de galaxias espirales y su velocidad máxima de rotación se descubrió en 1977 por Tully y Fisher. Es uno de los más precisos estimadores indirectos de distancias galácticas. El trabajo original de Tully y Fisher se hizo con observaciones en radio para estimar la línea de 21 cm de emisión del Hidrógeno neutro y con la banda de color B para las luminosidades.

La relación Tully-Fisher es una relación entre la luminosidad intrínseca de una galaxia y su velocidad máxima de rotación que es proporcional a la masa contenida en el radio de máxima rotación.

La relación Tully-Fisher es un indicador de distancias porque si una galaxia cumple la relación Tully-Fisher, se puede, a partir de la medición de la velocidad máxima de rotación, deducir la luminosidad intrínseca. Desde la Tierra se mide el flujo que llega de la galaxia. El flujo de energía (F) producido por una fuente de luminosidad L a una distancia d es:

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Es decir, el flujo va inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Utilizando la diferencia entre la magnitud absoluta M (relacionada con la luminosidad) y la aparente m (relacionada al flujo medido) ³ en d=10pc se obtiene:

$$m - M = -2.5 \log \frac{F(d)}{F(10)} = -2.5 \log \frac{10\text{pc}^2}{d^2} = 5 \log \frac{d}{10\text{pc}}$$

De tal manera, despejando d obtenemos la distancia a la que se encuentra el objeto de magnitud absoluta M (estimada por la relación Tully-Fisher a partir del ancho de línea medido) y observado con magnitud aparente m.

La relación Tully-Fisher (luminosidad vs velocidad de rotación) se utiliza para medir la constante de Hubble H_0 y el parámetro de aceleración q_0 , directamente ligados a la expansión del Universo.

La relación Tully-Fisher se observa en galaxias de disco debido a que tienen curvas de rotación típicamente planas. En la práctica, la relación luminosidad vs velocidad máxima de rotación es ajustada por la siguiente ecuación:

$$L = A v_{max}^\alpha$$

³ La magnitud absoluta se define como el brillo intrínseco del objeto a 10 parsecs, mientras que m depende del instrumento de medición en la Tierra o el flujo de energía detectado observacionalmente.

Donde L es la luminosidad de la galaxia, v_{\max} es la máxima velocidad de rotación, α la pendiente de la relación Tully-Fisher y A su coeficiente a punto cero, α es un parámetro a determinar en las observaciones.

Al graficar los datos en escala logarítmica ($\log L$ vs $\log V_{\max}$), ellos se ajustan muy bien a una línea recta (figura 6), la relación de Tully-Fisher. La dispersión resulta muy pequeña. El valor empírico de α depende de la banda en la que se mide la luminosidad: va de ~ 2.8 en la banda B (azul) a ~ 3.5 en la banda K o M (infrarrojo cercano). En estas últimas bandas la luminosidad traza fielmente la materia estelar de la galaxia.

Por otro lado, $v \propto \frac{M_{\text{din}}}{r}$ donde M_{din} es la masa dinámica del sistema y r la distancia

desde el centro de la galaxia a un punto dentro de la galaxia, indica que la velocidad de rotación es una medida de la compactitud del sistema, incluyendo a la materia oscura. Por lo tanto la relación Tully-Fisher puede ser entendida como una relación entre la masa estelar de una galaxia y la compactitud de su campo gravitacional.

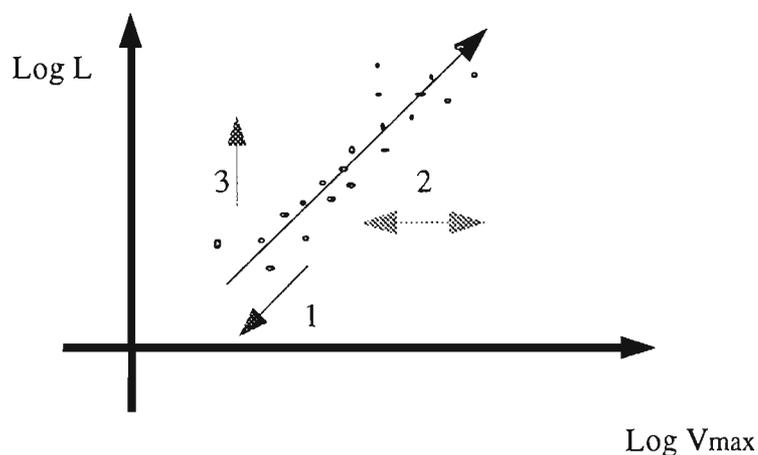


Figura 6. Caracterización de las galaxias que cumplen la relación Tully-Fisher.

2.6 PARES MIXTOS DE GALAXIAS

En la presente tesis, se analiza una colección de espectros de rendija larga observados en una muestra de galaxias de tipo espiral que tienen una compañera elíptica, y este par de galaxias no tiene cercana ninguna otra galaxia comparable (par mixto aislado de galaxias).

Este par de galaxias puede presentar distintos grados de interacción, pero como las galaxias elípticas no tienen gas, muchos efectos de la interacción se pueden aislar mejor que cuando ambas galaxias son de disco.

Una forma de interacción es que la galaxia espiral ceda materia a la galaxia elíptica, sin que aumente su tasa de formación estelar, en ese caso la galaxia de disco tendrá menos masa y menos luminosidad que una galaxia aislada (flecha 1 en la figura 6).

Otra posibilidad es que aún que la discoidal pierda algo de masa, su luminosidad aumenta si la interacción induce una mayor tasa de formación de estrellas reciente (flecha 3 de la figura 6).

También es posible que la galaxia discoidal matuviera su luminosidad pero que su velocidad de “rotación” fuese perturbada por la interacción y no necesariamente indique la velocidad circular (masa) de la galaxia -flecha 2 (ambas direcciones) en la figura 6.

De estos ejemplos idealizados puede verse porque esperamos que las desviaciones en la relación Tully-Fisher de las galaxias en pares mixtos con respecto a las aisladas, sea una medida cuantitativa de los efectos de interacción de la evolución de las galaxias.

2.7 OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO

Tenemos una colección de datos espectroscópicos de alrededor de 100 galaxias espirales en pares mixtos del catálogo de Karachantseva (1973), obtenidos en el telescopio de 2.1 metros de San Pedro Mártir en 5 temporadas en 2002 y 2003. Tales observaciones se centran en la línea de emisión $H\alpha$ del Hidrógeno. En esta tesis se mide la curva de rotación de cada galaxia determinada por la emisión del gas, o la absorción estelar, alrededor de $H\alpha$.

Más adelante se determinará el máximo de rotación a partir de estas curvas, y combinando nuestras mediciones con datos fotométricos obtenidos también en San Pedro Mártir, se compararán las galaxias en pares mixtos con las aisladas en un diagrama Tully-Fisher. Con esta comparación se pretende cuantificar los efectos de interacción en la evolución de las galaxias en lugar del uso clásico de la relación Tully-Fisher como un indicador de distancias.

3. METODO DE EXTRACCION DE DATOS.

El espectrógrafo de rendija larga nos da información bidimensional. De tal forma que para cada campo a lo largo de la rendija descompone el espectro de ese punto en la galaxia. A primer orden estas dos dimensiones se separan a lo largo de las columnas o renglones del detector CCD (espacio de la imagen), pero sufren distorsiones geométricas y de sensibilidad producidas por el instrumento.

El objetivo de la reducción de datos es transformar el espacio de pixeles al espacio físico ortogonal que determine la intensidad a lo largo de la longitud de onda en función de la distancia al centro de la galaxia, antes de poder obtener la curva de rotación de cada galaxia.

2.7 OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO

Tenemos una colección de datos espectroscópicos de alrededor de 100 galaxias espirales en pares mixtos del catálogo de Karachantseva (1973), obtenidos en el telescopio de 2.1 metros de San Pedro Mártir en 5 temporadas en 2002 y 2003. Tales observaciones se centran en la línea de emisión $H\alpha$ del Hidrógeno. En esta tesis se mide la curva de rotación de cada galaxia determinada por la emisión del gas, o la absorción estelar, alrededor de $H\alpha$.

Más adelante se determinará el máximo de rotación a partir de estas curvas, y combinando nuestras mediciones con datos fotométricos obtenidos también en San Pedro Mártir, se compararán las galaxias en pares mixtos con las aisladas en un diagrama Tully-Fisher. Con esta comparación se pretende cuantificar los efectos de interacción en la evolución de las galaxias en lugar del uso clásico de la relación Tully-Fisher como un indicador de distancias.

3. METODO DE EXTRACCION DE DATOS.

El espectrógrafo de rendija larga nos da información bidimensional. De tal forma que para cada campo a lo largo de la rendija descompone el espectro de ese punto en la galaxia. A primer orden estas dos dimensiones se separan a lo largo de las columnas o renglones del detector CCD (espacio de la imagen), pero sufren distorsiones geométricas y de sensibilidad producidas por el instrumento.

El objetivo de la reducción de datos es transformar el espacio de pixeles al espacio físico ortogonal que determine la intensidad a lo largo de la longitud de onda en función de la distancia al centro de la galaxia, antes de poder obtener la curva de rotación de cada galaxia.

La figura 7 presenta el espectro de rendija larga observado para una de estas galaxias (k284a). El continuo de la galaxia, que es más intenso hacia el centro, produce la línea gruesa horizontal que parte por la mitad a la imagen y en casi todos los casos es la más intensa. El gas de la galaxia espiral emite radiación principalmente en $H\alpha$, $[NII]$, $[SII]$ y OII , que al igual que las líneas de emisión de la atmósfera terrestre (líneas telúricas) son las líneas verticales.

Las líneas telúricas se extienden a todo lo largo de la rendija, mientras que las de la galaxia son de una menor extensión. De estas últimas la que mejor se observa en las imágenes es $H\alpha$ (6562.82 Å), en el lado azul está $[NII]$ (6548.03 Å) y en el lado rojo $[NII]$ (6583.41 Å), dos transiciones de Nitrógeno muy cercanas.

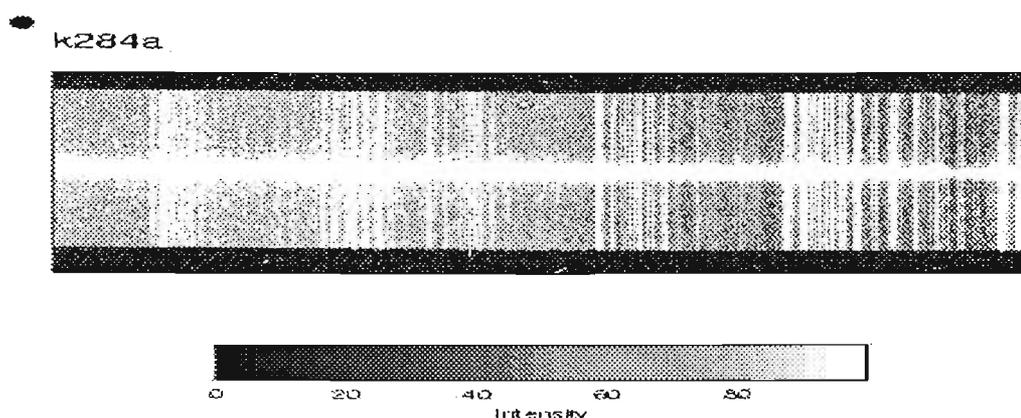


Figura 7. Imagen de la galaxia espiral k284a, el eje horizontal representa la longitud de onda y el vertical la rendija, ambos en pixeles. Las líneas verticales son el cielo y la horizontal es la galaxia.

A simple vista, el continuo de la galaxia define un centro casi recto pero al graficarla con mayor resolución es una curva. De la misma manera las líneas espectrales no son rectas sino curvas que deben calibrarse para linearizar las imágenes en ambas direcciones, Ya linearizadas y calibradas las imágenes se sustrae el espectro telúrico dejando libre el espectro de la galaxia para medir la curva de rotación.

Gracias a la física atómica, se conoce experimentalmente la posición y la distancia característica entre líneas de emisión. Al encontrarse en rotación las estrellas o el gas de la galaxia, debido al efecto Doppler o corrimiento al rojo z , la posición de una línea de emisión cambia. Existe una relación que a partir de z nos permite calcular, tanto el corrimiento neto de la galaxia (debido a la expansión del Universo y su velocidad neta) como la velocidad del gas o las estrellas a lo largo de la galaxia:

$$\frac{v}{c} = z = \frac{\lambda_{em} - \lambda_{obs}}{\lambda_{em}}$$

Donde v es la velocidad de las estrellas o gas, c la velocidad de la luz, z el corrimiento al rojo, λ_{em} la longitud de onda emitida desde la fuente, y λ_{obs} la longitud de onda observada desde la Tierra.

En general, la velocidad promedio de las estrellas que giran alrededor del centro de una galaxia espiral es del orden de 200 km/s, mientras que la velocidad de la luz es de casi 300 000 km/s, por lo que la razón entre las velocidades es menor a 0.001, se considera que no es necesario hacer una corrección relativista.

También es importante tomar en cuenta que el espectrógrafo detecta tanto a la luz de la galaxia como la de cualquier otro objeto que caiga dentro de la rendija. En ocasiones detectamos estrellas de nuestra propia galaxia u otros objetos que aparecen como líneas horizontales paralelas a la línea de la galaxia. Cuando se trata de una estrella al ser puntual se ve una línea angosta.

3.1 REDUCCION DE IMAGENES

En un primer paso la reducción de imágenes contempla: Corrección por Bias (sesgo electrónico) y variaciones de sensibilidad de pixel a pixel del detector CCD (campos planos).

En esta etapa también se caracteriza al detector en términos de su ruido de lectura y su ganancia, a partir de los cuales generamos para cada observación su correspondiente imagen de varianza (ruido de fotones y de lectura) para una apropiada propagación de errores a lo largo del proceso de reducción.

3.1.1 BIAS (Cero electrónico)

Los bias son imágenes con un tiempo de exposición muy corto: 1 microsegundo. Se toman cuando el obturador del telescopio se encuentra cerrado. El objetivo de los bias es ubicar un sistema de referencia donde la intensidad en el espacio de imágenes sea cero cuando no llegue ningún fotón al CCD.

La imagen en el CCD tiene un ruido de origen, llamado ruido de lectura, debido a los amplificadores y electrónica que transforma la carga acumulada por la luz (1fotón=1electrón) en cuentas digitalizadas. Para poder medir todos los electrones acumulados en cada pixel del CCD, se opera con un voltaje distinto de cero, cuya carga equivalente se estima con este tipo de imagen Bias.

Se toman 20 bias por noche. Se utiliza un programa llamado AddBias que procede en VISTA el cual promedia los bias de cada noche por temporada, se tienen 5 temporadas Run 27, Run 28, Run 29, Run 30 y Run 31, con 3 y 4 noches de observación. Existe un archivo llamado Bias que guarda el promedio por noche y por temporada. De las imágenes Bias se derivan tanto el punto cero electrónico de las imágenes como el ruido de lectura con gran precisión.

Como se puede ver en la figura 8 -que representa una gráfica de intensidad fijando una longitud de onda, es decir, es un corte de rendija- la gráfica del promedio de los Bias no es suave; cada pixel contiene un ruido de imagen. Sin embargo, la amplitud de esa distorsión es del 1% comparándola con la intensidad en la imagen. Así que el siguiente paso en la reducción de datos es suavizar el promedio de los Bias para no agregar más ruido a las imágenes y quitar la forma de cero electrónico.

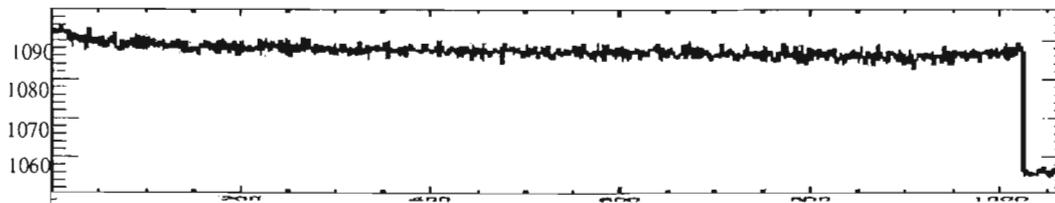


Figura 8. Gráfica de un corte vertical de un bias, el eje vertical es Intensidad [píxeles], mientras el eje horizontal es lo largo de la rendija [píxeles]

Otra situación que se puede observar en la gráfica 8 es que desde el principio de la rendija, la intensidad tiene un valor inicial (depende de cada temporada y noche), se queda casi constante y llega a un punto donde la gráfica cae dramáticamente en forma vertical, a partir de ahí, la gráfica continúa en otro nivel que se llama Overscan.

Idealmente el Overscan debería estar en el nivel cero de intensidad, ya que en el momento que cae la gráfica se trata de pixeles puramente electrónicos fuera del CCD. Para ubicar el punto cero, la solución es sustraer de las imágenes el nivel del Overscan.

Nuevamente se aplica un procedimiento en VISTA, llamado MBiasMod que suaviza la gráfica promedio y sustrae el Overscan. De tal forma se obtendrá el nivel cero del CCD y se conocerá el ruido en cada imagen cuando se aplique posteriormente.

3.1.2 FLAT (Campo Plano)

El objetivo de las imágenes llamadas Flat es crear un patrón de iluminación homogéneo para conocer la respuesta de sensibilidad del sistema: CCD, espectrógrafo y telescopio, además de sus distorsiones intrínsecas y la interferencia que existe debido a cada parte del sistema. Hay varios tipos de Flats y los utilizamos de distintas formas a lo largo del proceso de reducción.

El primer tipo es un Flat interno, se coloca una fuente de halógeno frente a la rendija del obturador. La luz de la lámpara de halógeno sólo ilumina el espectrógrafo y llega al CCD, el tiempo de exposición es de 5 segundos. Con esta imagen conoceremos la interferencia, la distorsión y la sensibilidad que tiene el espectrógrafo, sin tomar en cuenta la del telescopio y usamos los Flats para remover las variaciones de alta frecuencia (pixel a pixel).

La fuente de halógeno no es homogénea debido a que es una lámpara; con respecto a la longitud de onda se puede aproximar constante, pero en la rendija, la intensidad de luz es más fuerte en un lugar que en el resto del CCD. Cuando se grafica la intensidad en un corte de rendija, la curva que se ve es una de tipo gaussiano, existe mayor intensidad en medio que en el resto de la gráfica, es aquí donde está iluminando directamente la lámpara (Figura 9).

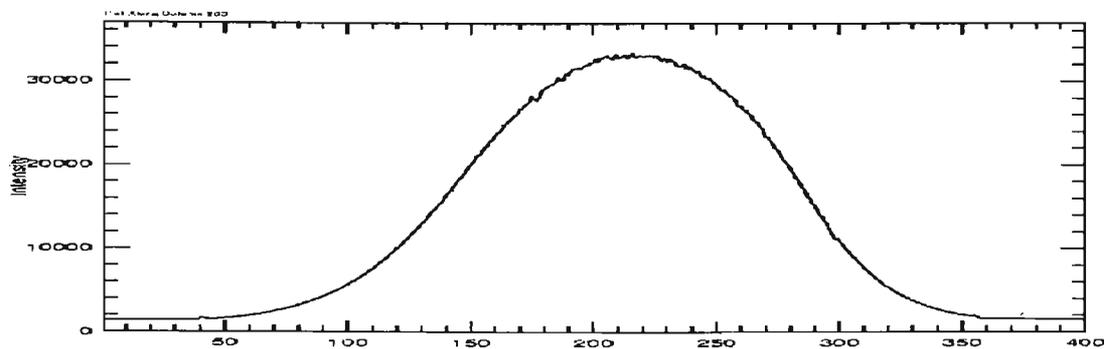


Figura 9. Gráfica de un corte vertical de una imagen promedio de Flat, el eje vertical es la intensidad [píxeles] y el horizontal el largo de la rendija [píxeles].

Se tienen imágenes de Flats en cada noche de observación de las 5 temporadas. Son alrededor de 20 Flats por noche.

Para tener un promedio de cada noche de observación y temporada se utilizó un programa en VISTA⁴ llamado AddFlat. El programa suma los flats y divide entre el número de Flats, queda una imagen promedio por cada noche y temporada.

Una vez que se tienen los Flats promedio por noche de observación, se sustrae el Overscan que se encontró en los Bias, para tener las gráficas de los Flats a partir de la referencia cero de intensidad.

El siguiente paso es suavizar las gráficas de los promedios de los Flats. Se toma un Flat promedio y se divide entre el Flat sin suavizar. Lo que resulta es una gráfica de la sensibilidad relativa pixel a pixel.

4 VISTA es un programa de reducción de datos astronómicos desarrollado en la Universidad de California, Santa Cruz.

En cada imagen se debe encontrar el centro de la rendija para ubicar los Flats en la misma referencia. Con tal objetivo se tomaron imágenes tipo flat con una máscara, se tapa todo el espectrógrafo y se deja una barra vertical en el centro de la rendija, se llaman Deckers (máscara de rendija). La cantidad de Deckers por noche de observación varía, hay noches donde no existe ningún Decker y otra en la que existen hasta 5 Deckers.

El Decker define el centro de la rendija, si se grafica la intensidad de luz con una longitud de onda, decrece en forma casi lineal. Se crea un programa que procede en VISTA llamado SDist cuyo objetivo es ubicar el centroide de la rendija. A partir del centro del Decker se fijan las coordenadas de los Flats promedio y de todas las imágenes posteriores

No se pueden utilizar las imágenes de los Flats sin revisarlos primero, debe existir coherencia en los Flats de cada noche. En la bitácora se mencionan los errores cometidos al observar las galaxias y demás imágenes, sin embargo, no es suficiente, hay errores que no se detectan desde la bitácora. Por medio de un programa llamado FlatHigh se vió la variación de pixel a pixel en cada noche de observación. Sólo la primera noche de la Run 30 resultó inconsistente, se observó un excesivo ruido de luz y no se tomó en cuenta para los Flats promedio que se utilizan en la reducción de imágenes. Finalmente, después de depurar los Flats que no funcionan, se dedujo que los flats son coherentes.

El siguiente paso es realizar la primera reducción de datos. Se trata de sustraer varias imágenes para que las galaxias se vean más claras. Lo primero es restar el Bias, se decidió tomar el Bias promedio de cada temporada en las imágenes correspondientes.

El mismo criterio se utilizó para sustraer el OverScan. Los siguientes son los Flats centrados con la máscara, en este caso se tomaron los promedios de cada noche de las diferentes temporadas que son coherentes.

3.2 CALIBRACION GEOMETRICA

La calibración geométrica se lleva a cabo mediante dos partes principales; la corrección en la forma del espacio de imágenes y la calibración de escalas absolutas.

La primera parte consiste en mapear las distorsiones geométricas de la imagen, con el objetivo de transformar a un sistema de referencia ortogonal, sin perder información (Figura 10).

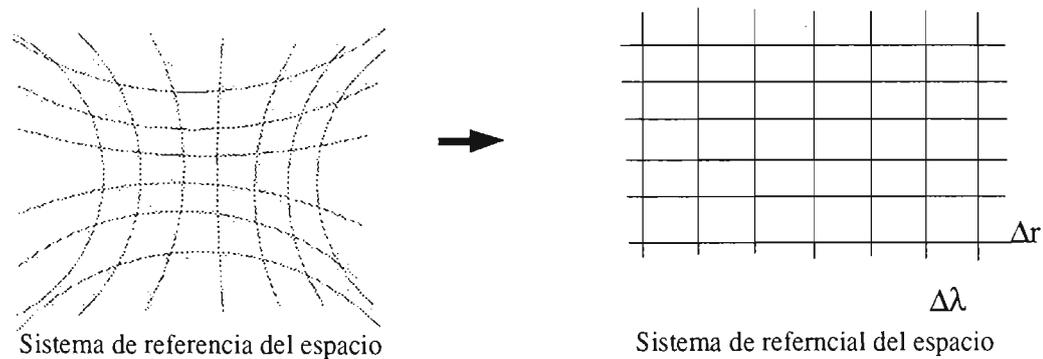


Figura 10. Transformación del sistema de referencia del espacio de imágenes al del espacio físico.

El sistema de referencia, en el eje horizontal, se corrige mediante el mapeo de objetos en distintas partes de la rendija. En particular utilizamos máscaras de distinto tamaño sobre la rendija, para determinar bidimensionalmente la forma y escala de la distorsión.

Para corregir el sistema de referencia en el eje vertical (curvatura de línea) se usaron espectros de rendija larga tomados en el cielo del crepúsculo -imágenes llamadas Twilights, figura 11-, que contienen el espectro de absorción del Sol dispersado por la atmósfera de la Tierra. Las líneas espectrales de absorción son conocidas, y se midió su desplazamiento a lo largo de la rendija.

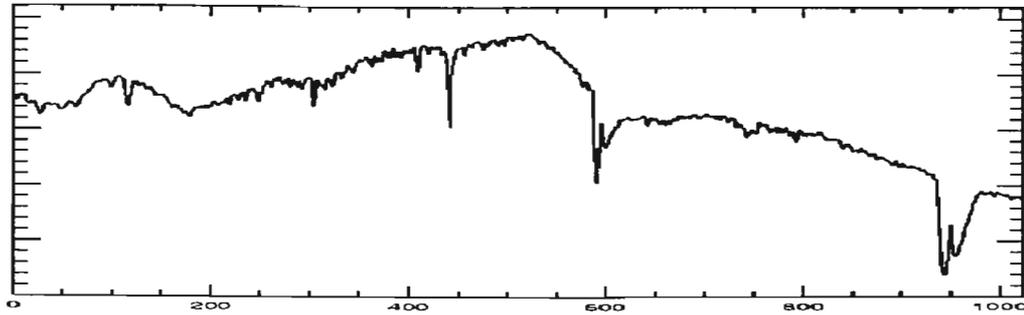


Figura 11. Twilight (campo del Sol) el eje horizontal es la longitud de onda [pixeles] y el vertical la intensidad [pixeles].

Además de la corrección de la forma de la distorsión es necesario incluir en la transformación las escalas absolutas espacial y de longitud de onda.

La escala absoluta espacial se determinó por el tamaño físico de las máscaras. Para la escala absoluta de longitud de onda se utilizaron los espectros de los arcos de Helio y Argón.

A cada pixel le corresponde una longitud de onda. Para identificar en qué línea del espectro de la luz emiten las galaxias, es necesario hacer una calibración en el eje que representa la longitud de onda. Tenemos un patrón de referencia y son las imágenes que aparecen en la bitácora de observación con el nombre de Arc Lamps (Figura 12).

Las imágenes son lámparas con distintas longitudes de onda: Helio, Neon, Argón. A través de un ajuste fino se encuentra la banda de la longitud de onda.

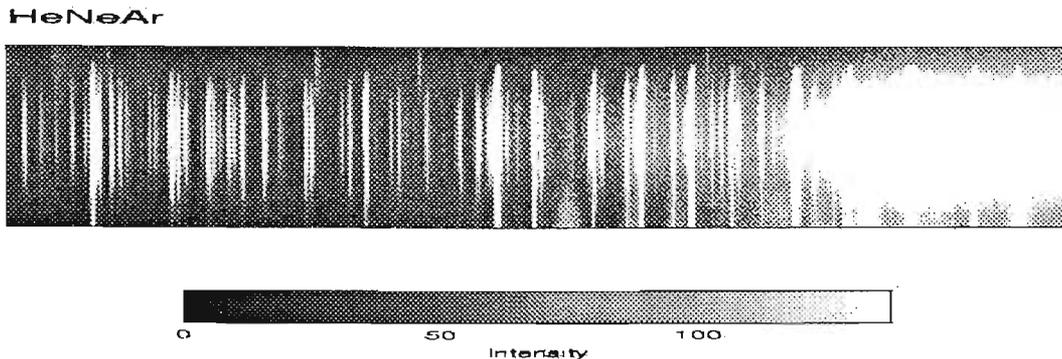


Figura 12. Espectro de emisión de una lámpara de Helio, Neón y Argón.

Se investigó en la página electrónica del telescopio de San Pedro Mártir cuáles son las líneas características de la emisión de las lámparas utilizadas. Existen varias opciones para calibrar y encontrar la relación entre cada pixel y la longitud de onda correspondiente usando un programa computacional:

La primera es fijar una línea de emisión y a partir de ella identificar el resto. La segunda es fijar una desviación estandar (σ) para que se empalmen las líneas de emisión con la incertidumbre que establezca σ . La tercera opción es armar el programa de tal forma que ajuste las líneas de emisión y la desviación estandar. Se eligió la última opción porque el criterio para elegir la línea o σ depende de varias condiciones.

Después de correr el programa en los promedios de las imágenes se llegó a una desviación estandar que varía entre 0.1 y 0.15 Amstrongs y desde 0.05 a 0.07 pixeles.

La incertidumbre ideal es de 1/20 de pixel, sin embargo, la desviación fija una incertidumbre un poco mayor. Finalmente se tiene un sistema de referencia en el centro de la imagen, y a cada pixel le corresponde un valor en la longitud de onda en el intervalo de emisión de la galaxia.

El mapeo de la distorsión completa se caracterizó por un polinomio bidimensional que permite la transformación en ambos ejes a un sistema de referencia ortogonal, sin distorsiones.

3.3 APLICACION DE LA CALIBRACION GEOMETRICA

El mapeo bidimensional descrito anteriormente nos permite llevar la imagen de pixeles en el detector (columnas y renglones), a “pixeles físicos” de cualquier tamaño espacial y de longitud de onda. Escogimos una escala lineal de $\Delta r=1.1$ segundos de arco en el sentido espacial, y en el sentido de la longitud de onda nuestros pixeles finales son equivalentes a 90 km/seg o sea

$$\Delta z = \Delta \ln \lambda = 3 * 10^{-4} \text{ (ver figura 11).}$$

Como las imágenes de las galaxias se toman en posiciones del telescopio distintas a las de las imágenes de calibración, se determina el desplazamiento de cada imagen respecto a la calibración identificando las orillas de la rendija y una o varias de las líneas de emisión del cielo. El mapeo de calibración geométrica se aplicó a cada imagen de tal forma que una galaxia siempre estuviera centrada en un pixel y con el mismo punto cero e intervalo de longitud de onda para poder comparar y cosumar observaciones de manera directa.

3.4 PASOS FINALES DE REDUCCION

A partir de aquí se va a utilizar un ejemplo para ilustrar el resto de la reducción de datos. Se elige la galaxia espiral k202b compañera de la galaxia elíptica k202a (Figura 13).

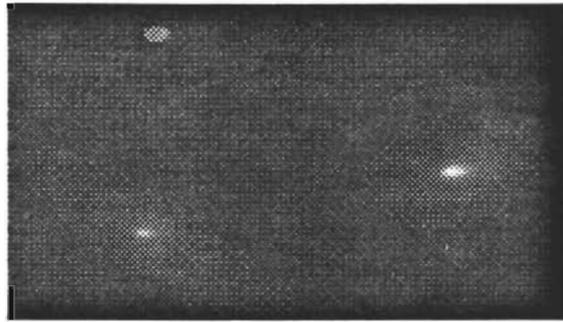


Figura 13. Galaxia k202b.

3.4.1 CALIBRACION DE INTENSIDAD RELATIVA

El telescopio no ilumina a la rendija de manera homogénea, por otro lado la apertura de la rendija tampoco es perfectamente constante y el espectrógrafo también tiene sus propias variaciones de sensibilidad. Es necesario corregir la respuesta instrumental neta (sistema telescopio, rendija, espectrógrafo y detector) a lo largo de la rendija antes de poder sustraer el espectro del cielo.

La calibración relativa se logra al dividir por las variaciones de flujo en las líneas telúricas brillantes en cada galaxia.

3.4.2 INTERPOLACION DE RAYOS COSMICOS

Como se puede observar en la figura 7, la imagen no está limpia, existen objetos que se encuentran alrededor de la galaxia, en algunos casos son estrellas en el campo del telescopio al momento de la observación. También hay puntos que se reparten en toda la imagen, esos puntos se llaman Ion Hits, producidos por los rayos cósmicos -partículas de protones y electrones que viajan en el medio interestelar. Se arregla un programa llamado MlongSlit3p que funciona en VISTA y por medio de iteraciones limpia la imagen. Mediante el programa se calcula la intensidad media en toda la imagen sin tomar en cuenta la emisión de la galaxia o estrellas que aparecen, se fija una desviación estandar y se sustraen las zonas que exceden a la intensidad medida, y se interpolan los Ion Hits.

La figura 14 muestra a la galaxia k202a sin Ion Hits ni inhomogeneidades en la rendija.

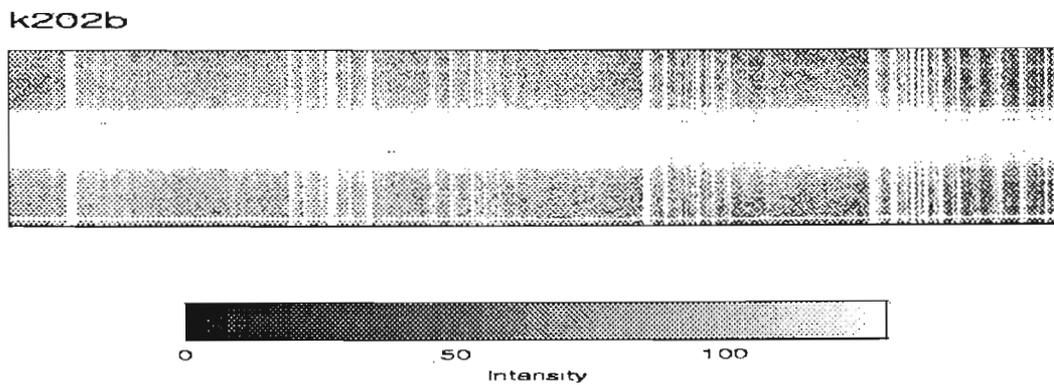


Figura 14. Galaxia k202a sin ion hits ni inhomogeneidades en la rendija.

3.4.3 SUSTRACCION DEL CIELO

En el siguiente proceso se sustrae el cielo de noche, es decir, se quita toda la luz que queda en la imagen con excepción de la galaxia espiral. Tal procedimiento se hace con el programa llamado MlongSlit4p.

La atmósfera terrestre crea un efecto de extinción que absorbe parte de la luz de la galaxia, al cambiar la dirección del telescopio, también cambia la extinción atmosférica. El programa MlongSlit4p también corrige tal extinción. Terminando esta reducción la imagen queda como se muestra en la figura 14.

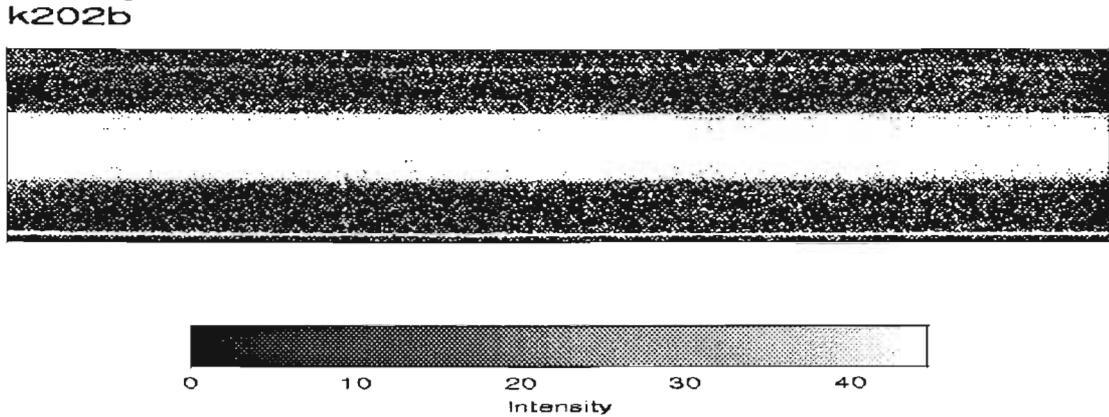


Figura 14. Galaxia k202a con el cielo sustraído y sin efecto de extinción.

3.5 IDENTIFICACION DE LA ZONA DE EMISION

Se identifica la zona de emisión de la galaxia incluyendo los efectos de la rotación. La primera emisión que se identifica visualmente es $H\alpha$ -la primera línea de la serie de Balmer del Hidrógeno, además existen dos líneas del Nitrogeno ionizado [NII], una hacia el rojo y la otra hacia el azul. El Azufre ionizado SII aparece más lejos del lado rojo y en el otro extremo está el Oxígeno dos veces ionizado OII. La extracción de la curva de rotación se hará con la línea $H\alpha$, así que es la primera en identificarse.

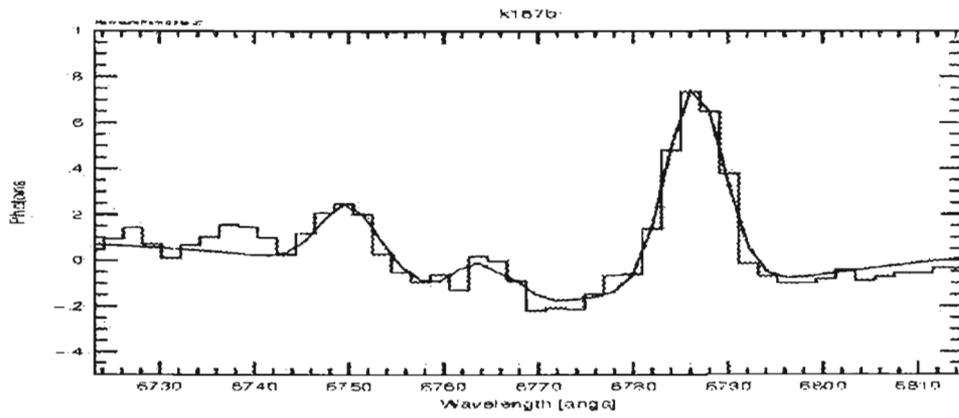
4. CURVAS DE ROTACION

Se utilizaron para determinar las curvas de rotación tres líneas en la región de H α : H α en 6563 A y el par de transiciones de NII en 6548 A y en 6583 A. Las tres líneas de emisión se ajustan a curvas gaussianas y la componente de absorción o emisión ancha se ajusta con un perfil Lorentziano por medio de mínimos cuadrados no lineales:

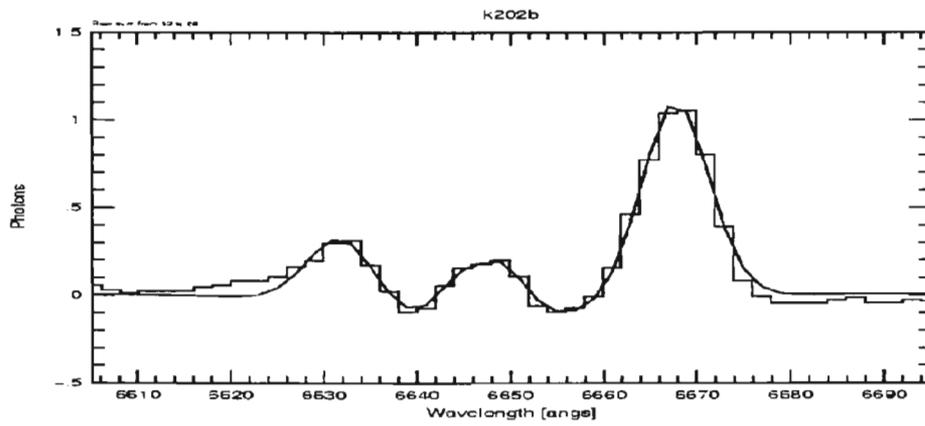
$$S(\lambda) = P_{H\alpha} e^{-(\lambda-6563(z+1))^2 / 2\sigma} + P_{N1} e^{-(\lambda-6548(z+1))^2 / 2\sigma} + P_{N2} e^{-(\lambda-6583(z+1))^2 / 2\sigma} + \frac{P_{\alpha 2}}{(\Gamma/2)^2 - (\lambda - 6563(z+1))^2}$$

$P_{H\alpha}$, P_{N1} , P_{N2} representan los picos de intensidad de emisión de H α en $\lambda=6563$ A, NII en $\lambda=6548$ A y NII en $\lambda=6583$ A respectivamente y $P_{\alpha 2}$ es la intensidad de una componente adicional -absorción o emisión ancha- de H α -ver figura 15. Se ajustan los parámetros P, z y Γ (σ se fija por la resolución del instrumento).

a)



b)



c)

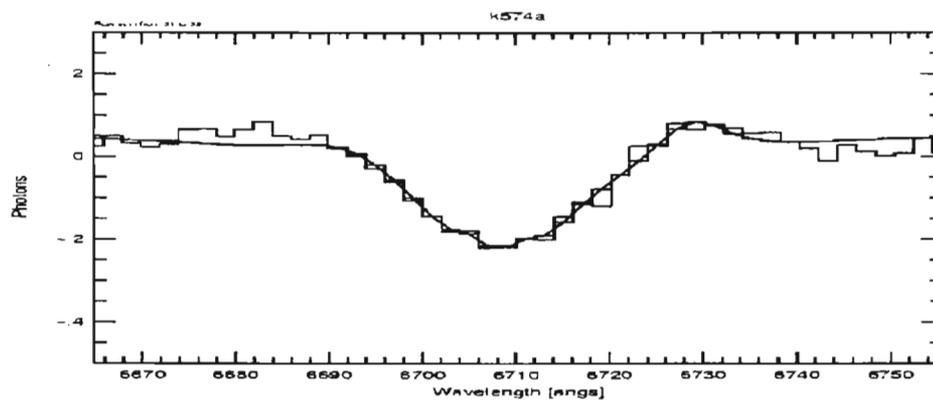


Figura 15. Ejemplos de ajuste de líneas a) domina la emisión, b) intermedia y c) domina la absorción.

A partir de los datos anteriores, se estima z en cada punto de la galaxia y con la relación $v/c=z$ se determina la velocidad como función del radio desde en centro a un punto de la galaxia. A cada punto se le asocia el error formal respecto al ajuste. La figura 16 muestra el resultado de nuestra galaxia ejemplo k202b.

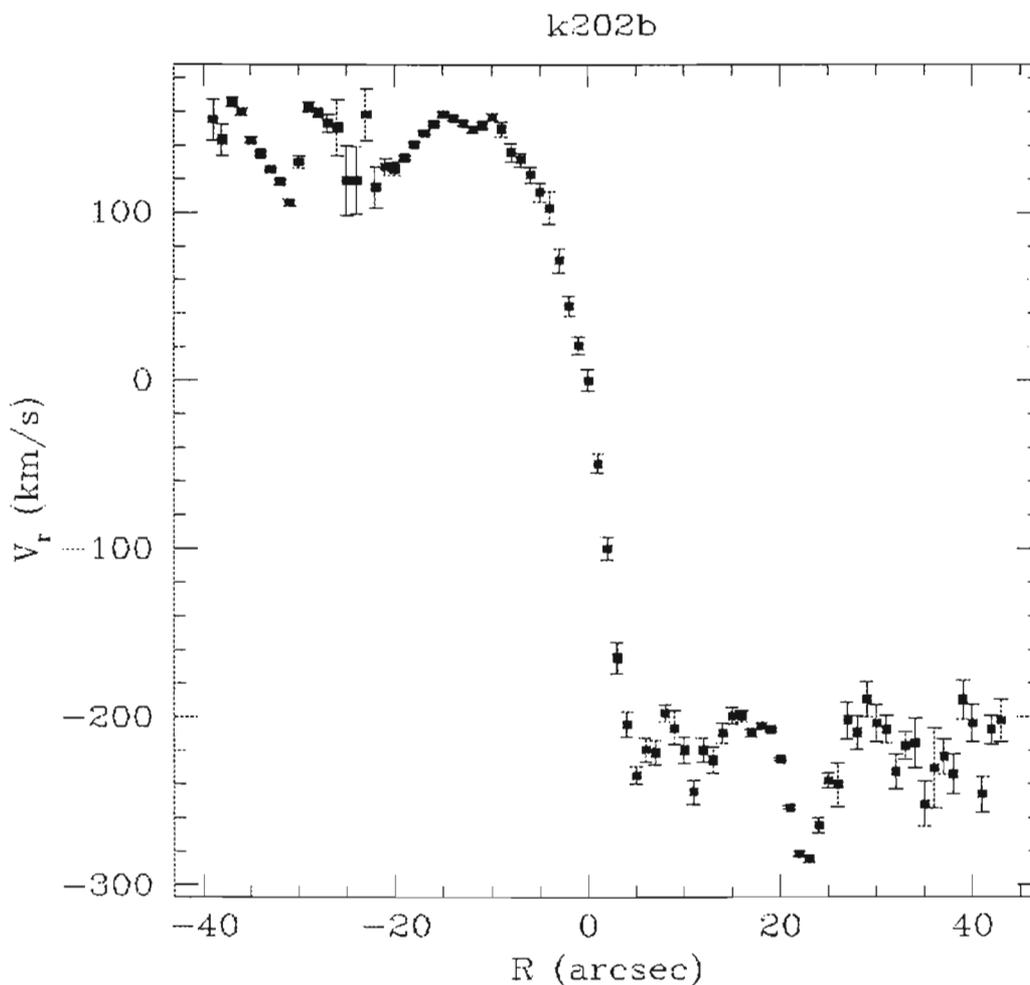
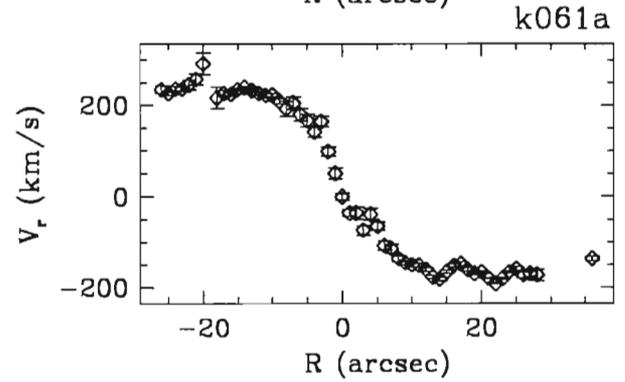
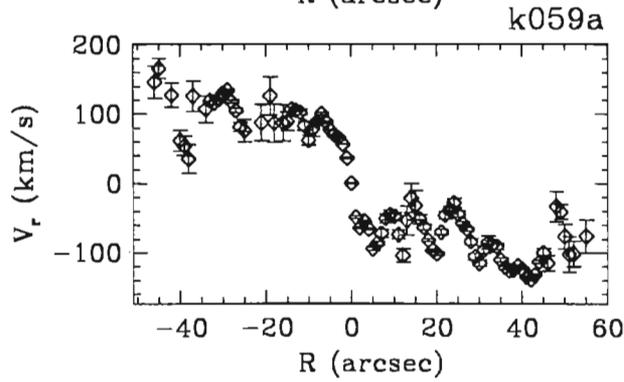
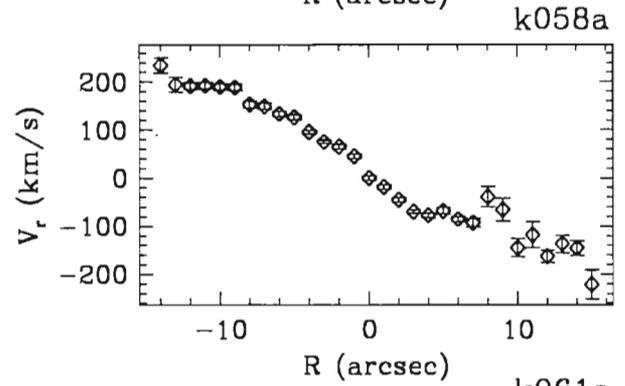
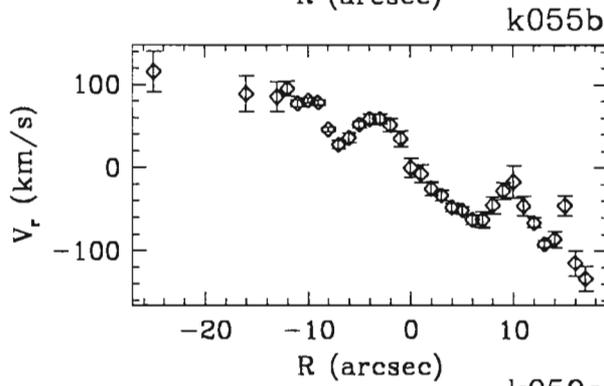
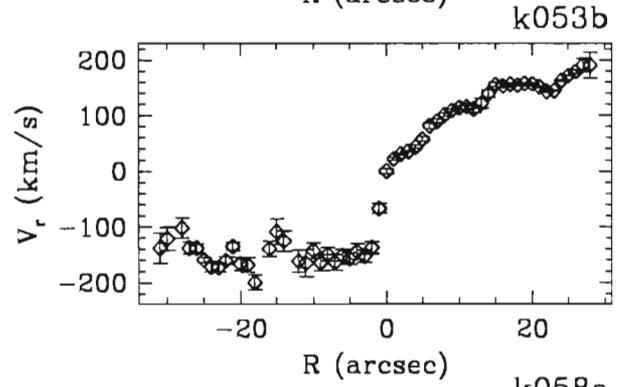
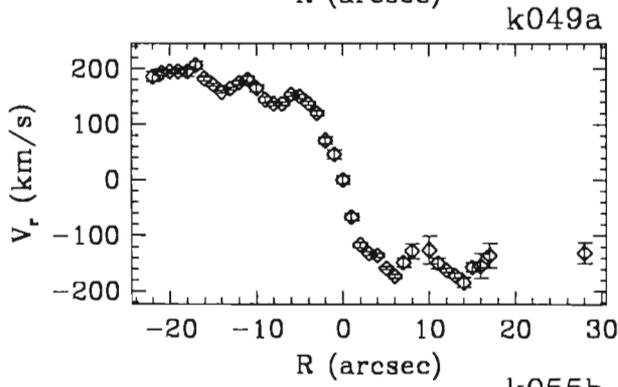
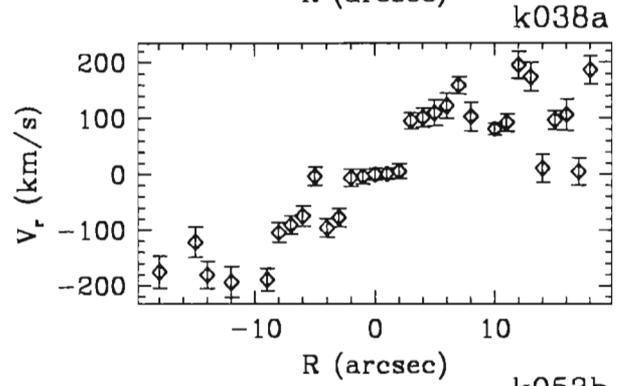
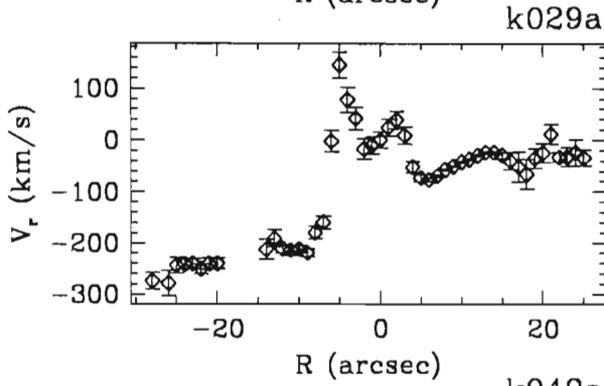
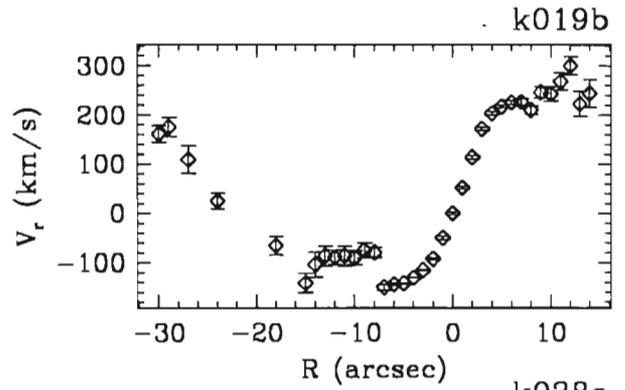
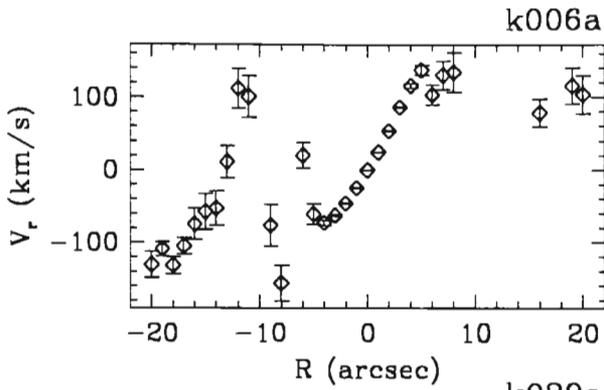


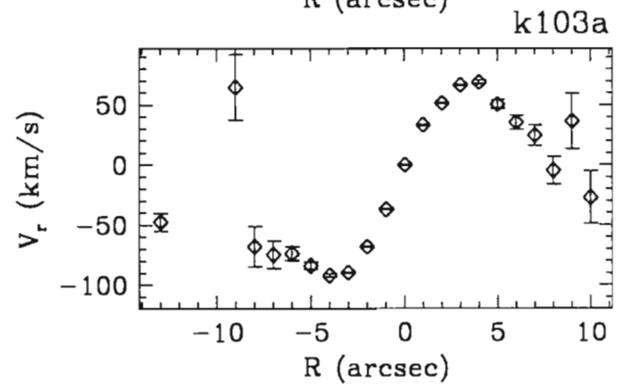
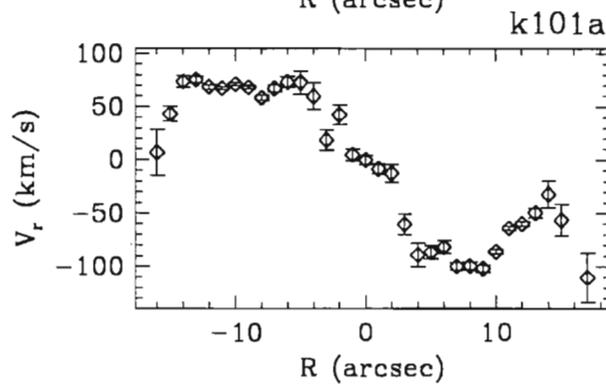
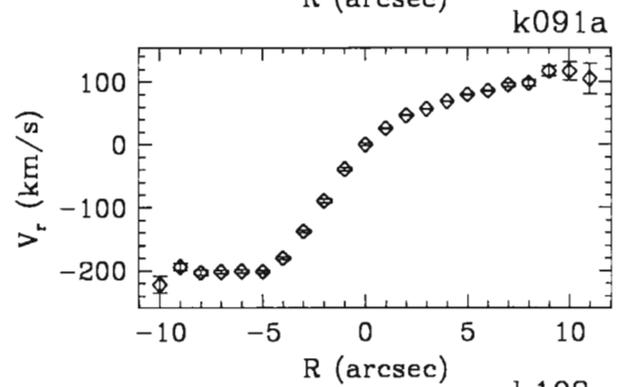
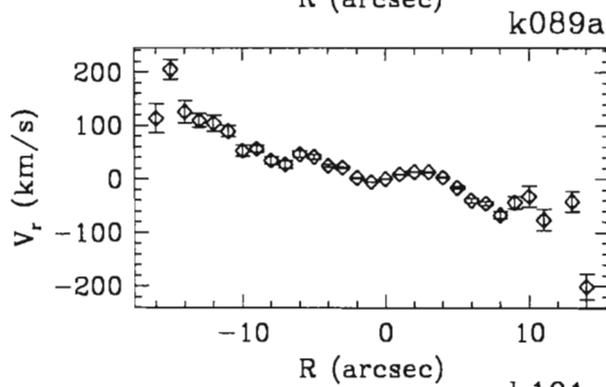
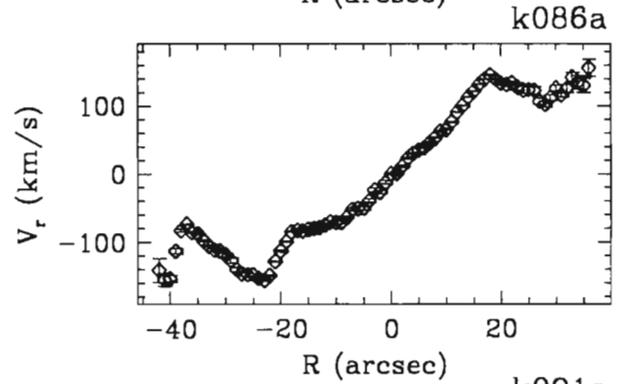
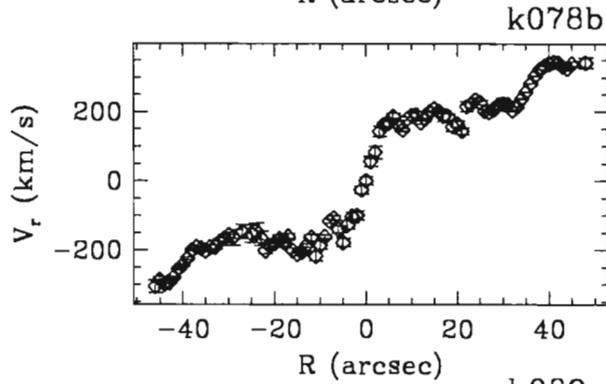
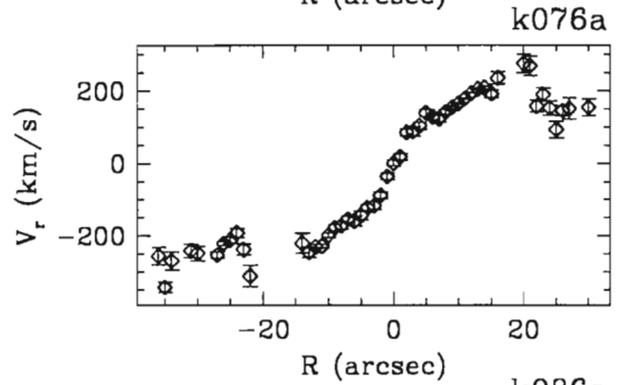
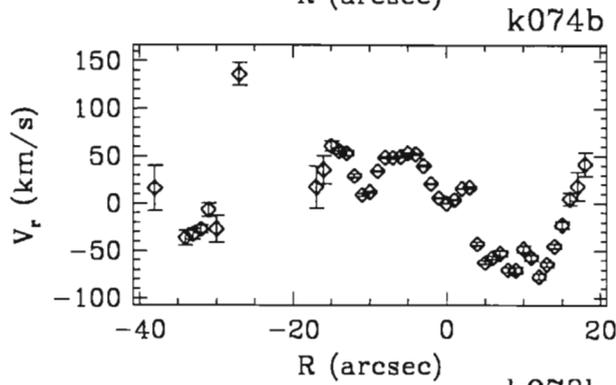
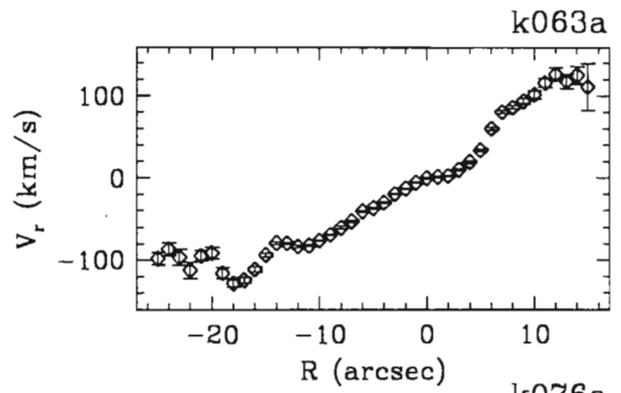
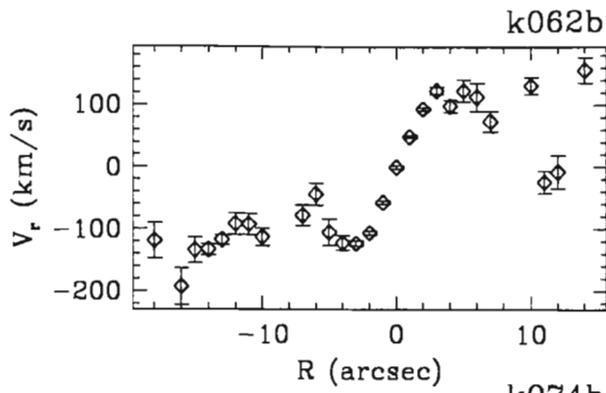
Figura 16. Curva de rotación de k202b.

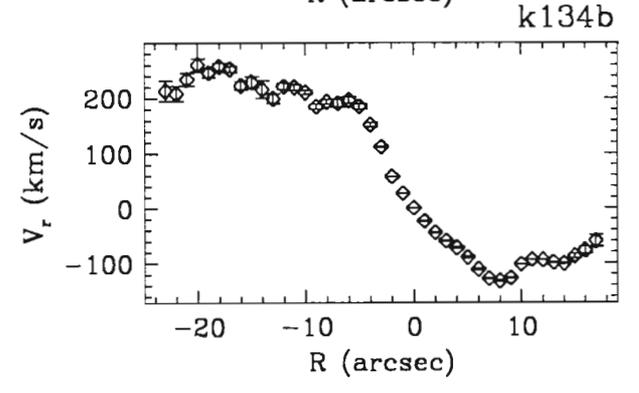
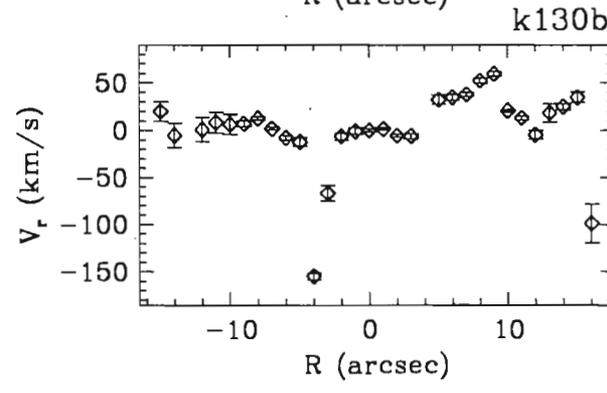
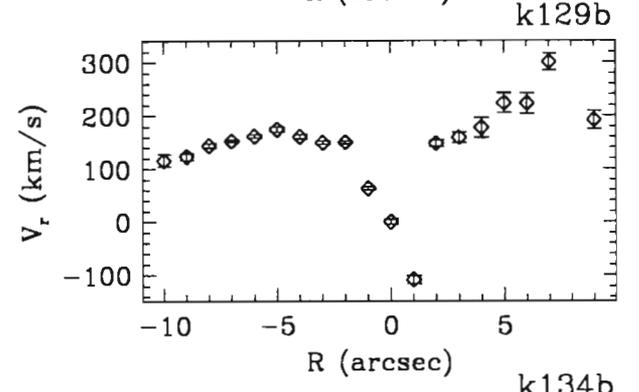
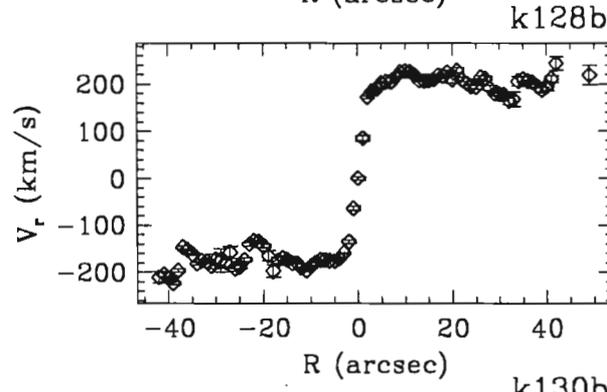
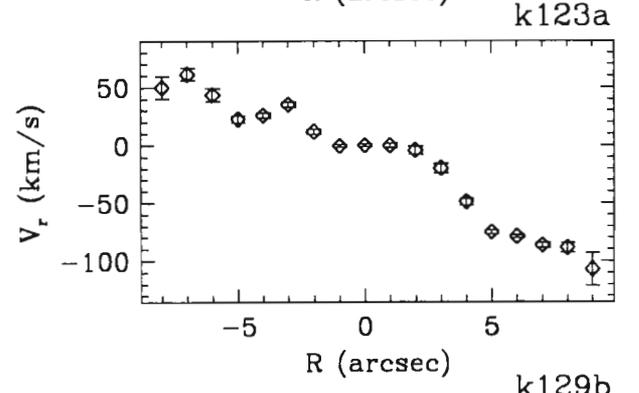
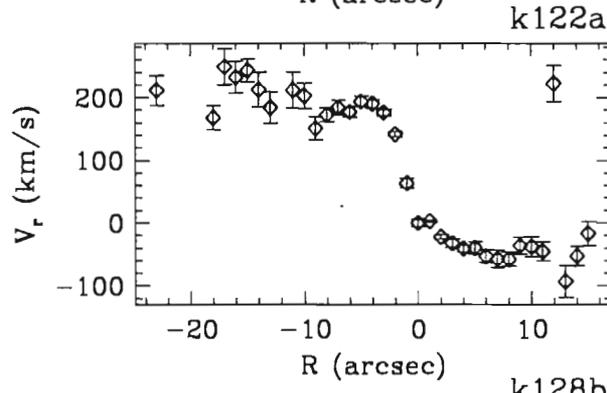
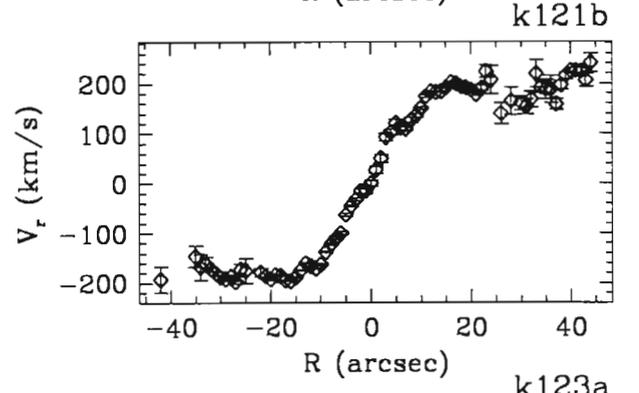
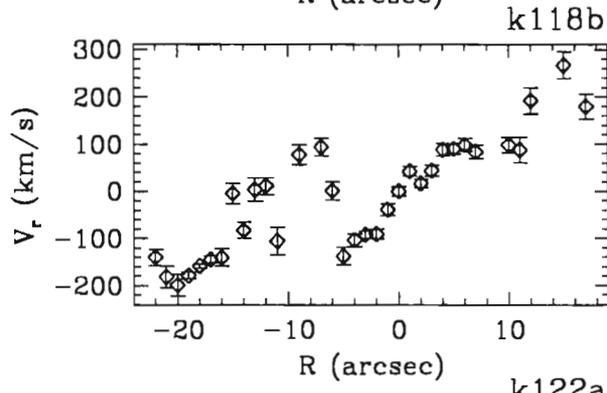
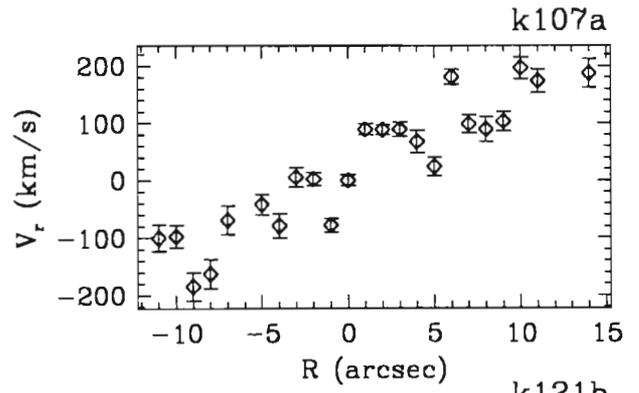
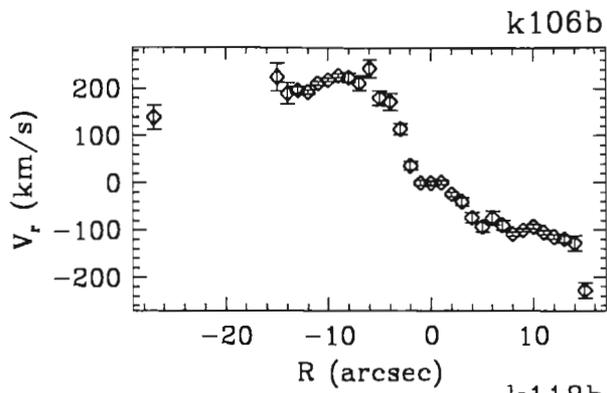
Para representar mejor a la rotación, se sustrajo el corrimiento al rojo (redshift) del punto central de la galaxia que mide esencialmente el desplazamiento del sistema.

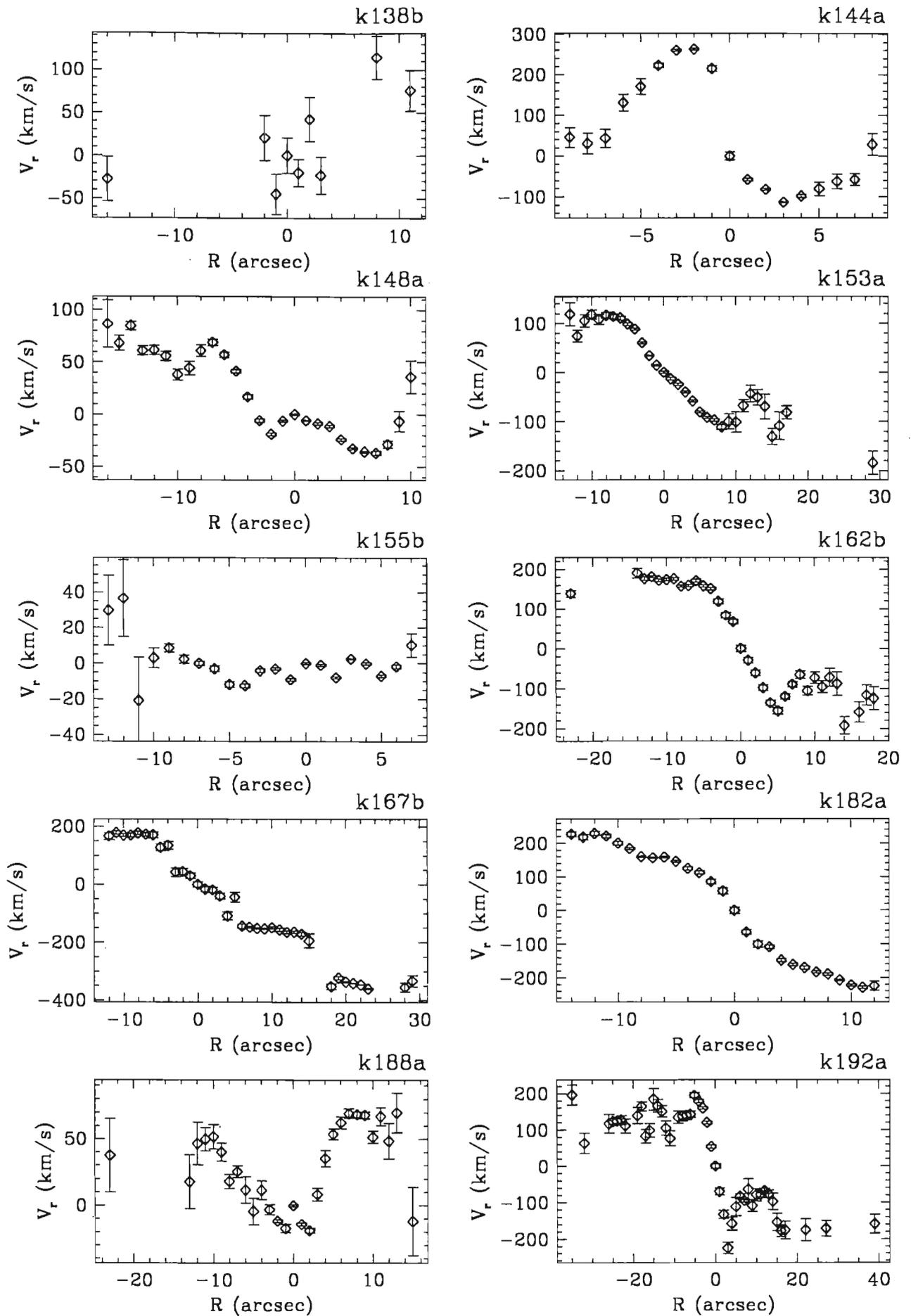
El eje vertical representa la velocidad de rotación del gas o estrellas que giran alrededor de las galaxias. El horizontal es la distancia a partir del centro de la galaxia en segundos de arco.

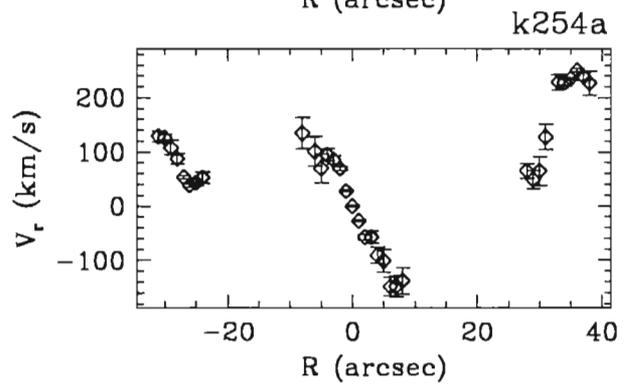
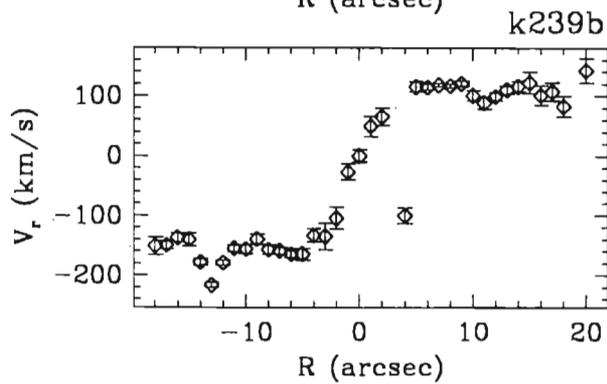
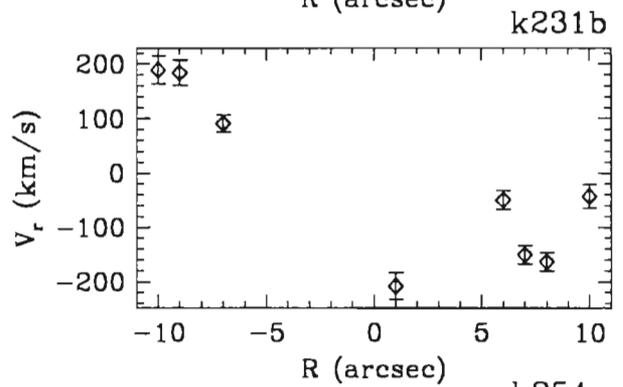
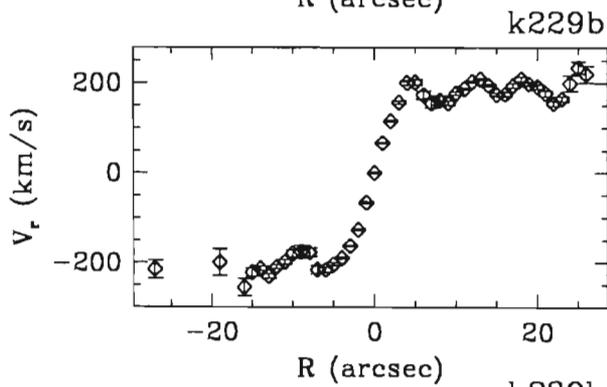
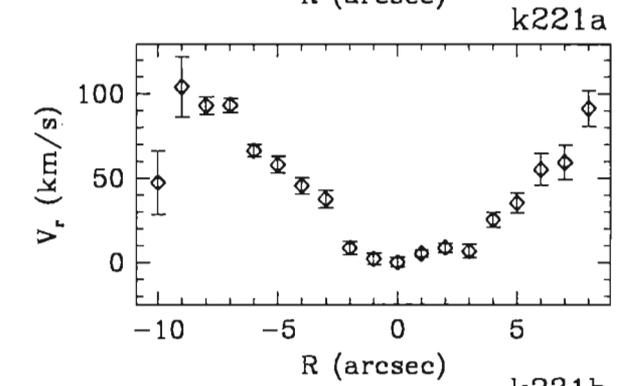
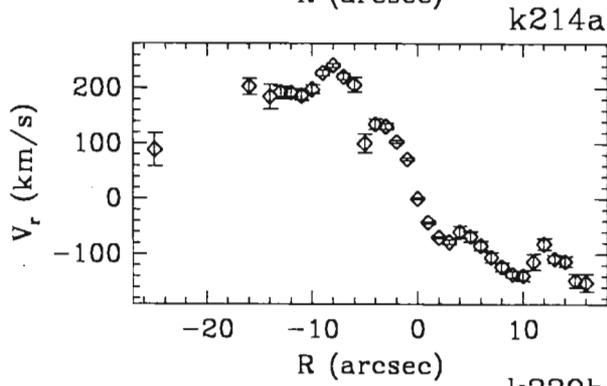
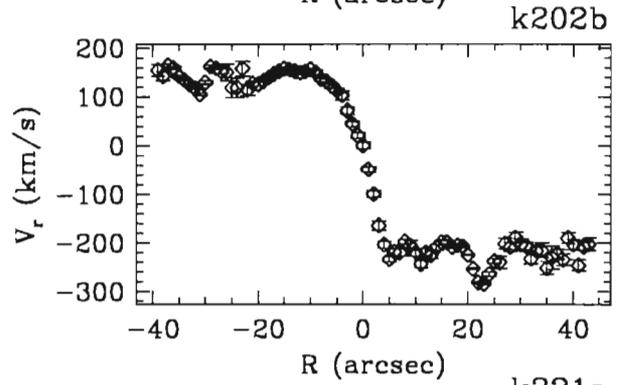
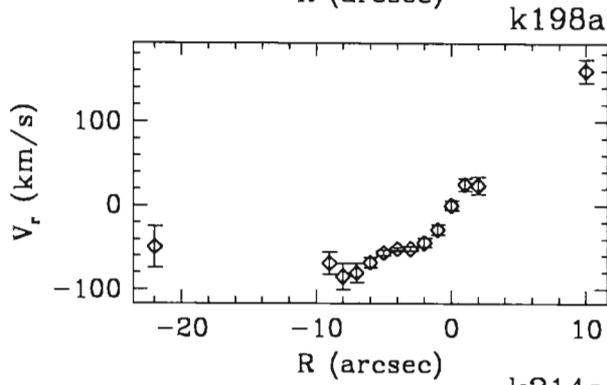
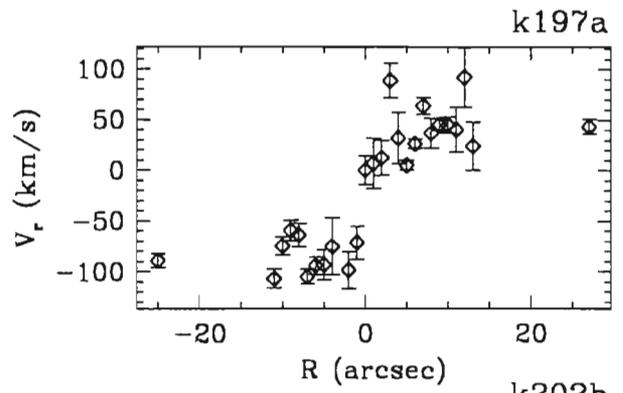
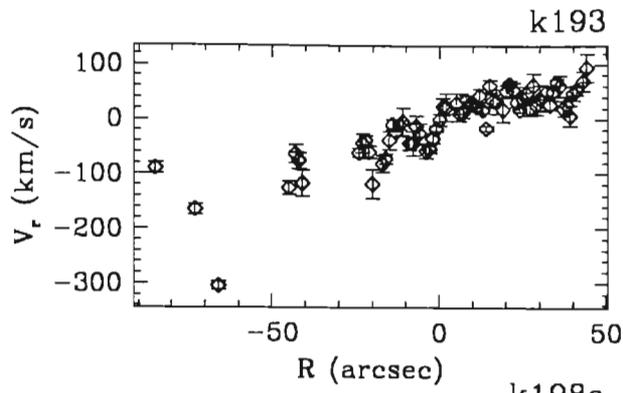
A continuación aparecen las curvas de rotación de 97 galaxias del catálogo de Karachantseva y 8 galaxias de disco de referencia cuyas curvas de rotación ya han sido determinadas -su nombre empieza con kara-, obtenidas en el presente trabajo.

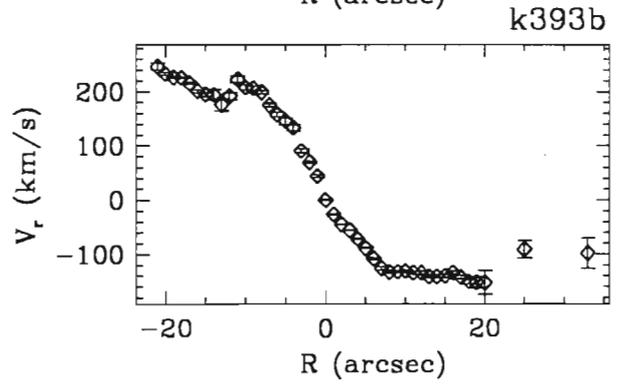
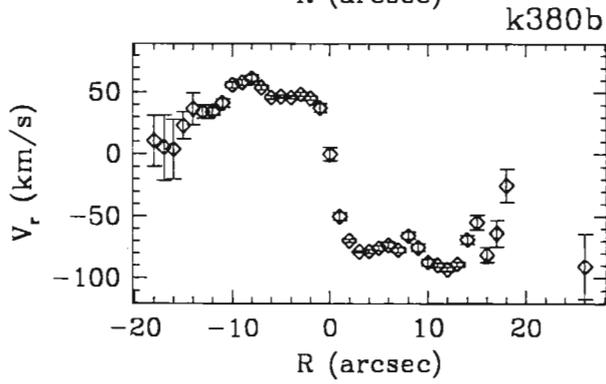
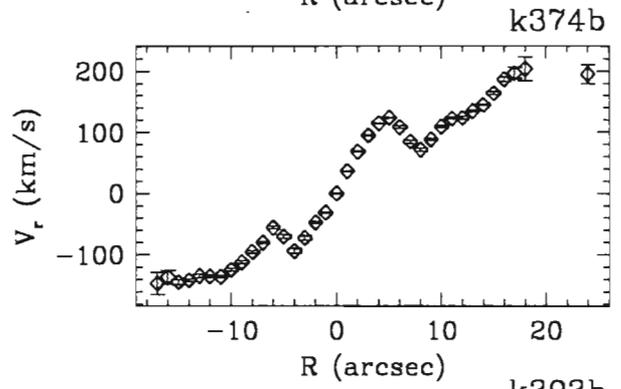
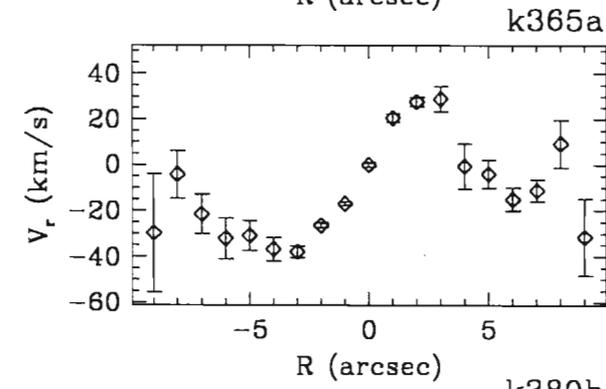
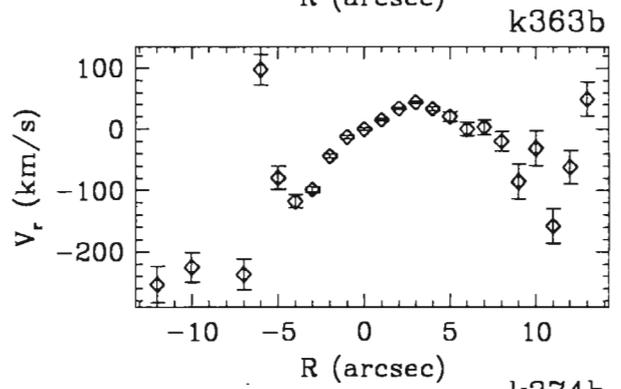
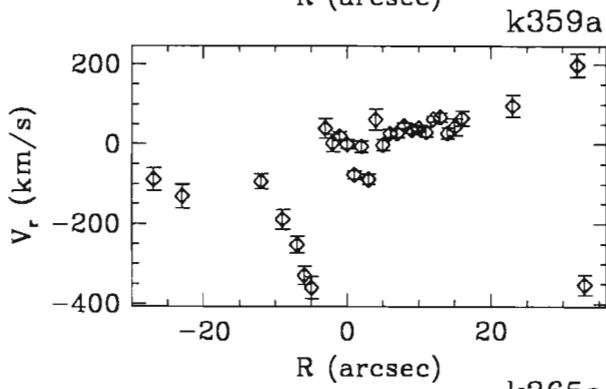
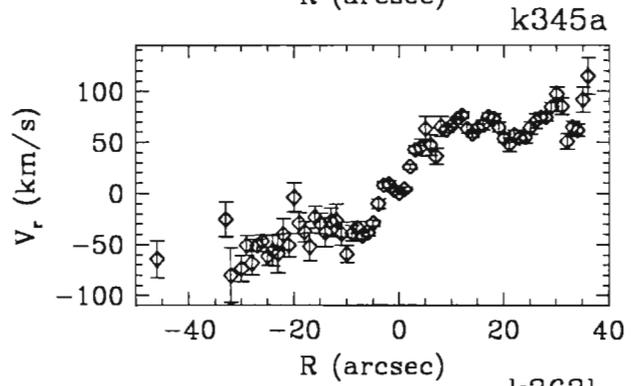
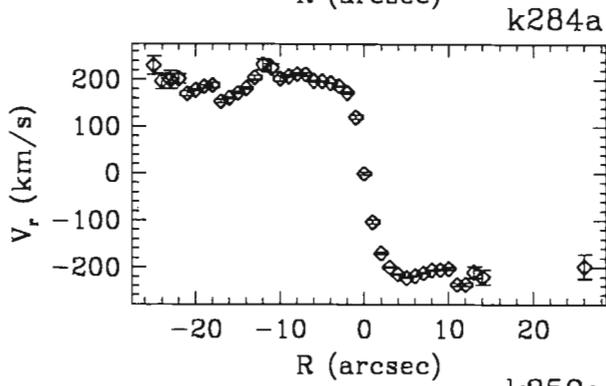
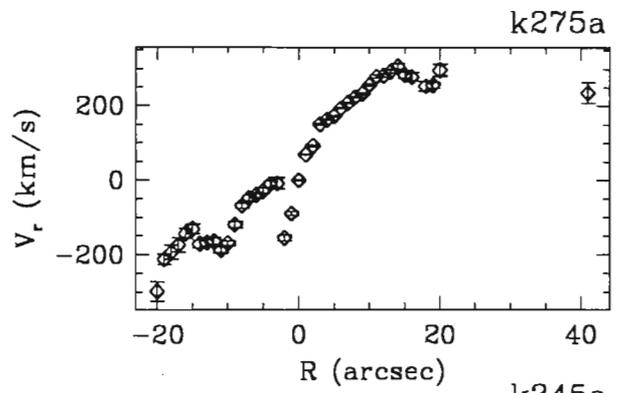
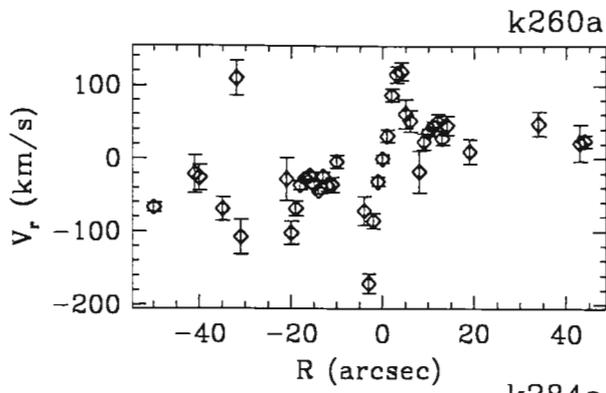


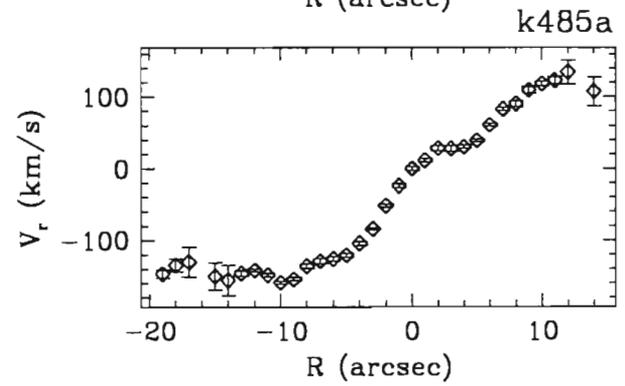
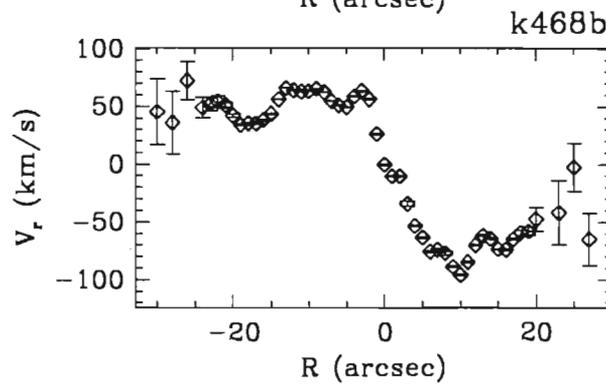
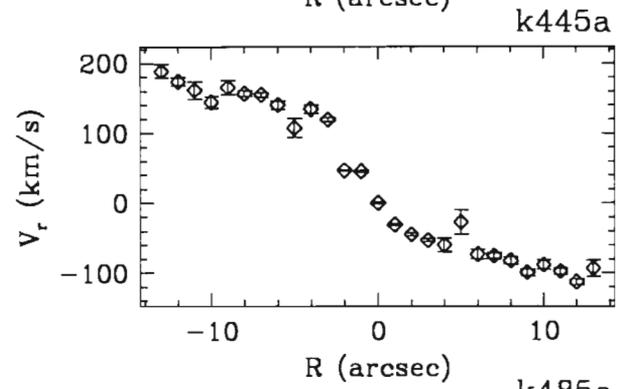
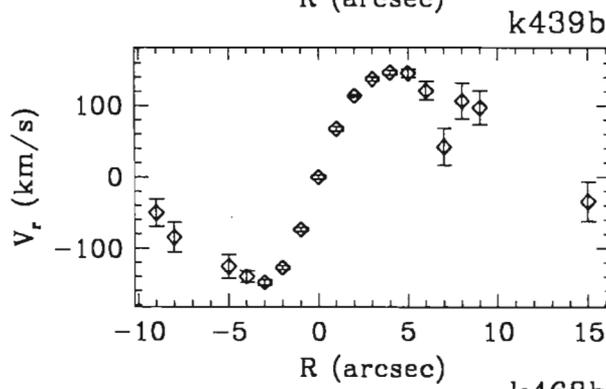
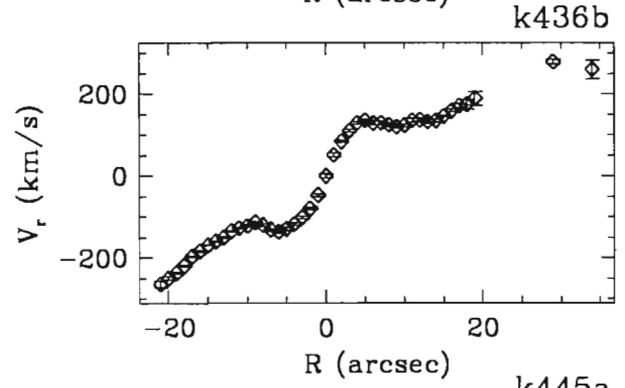
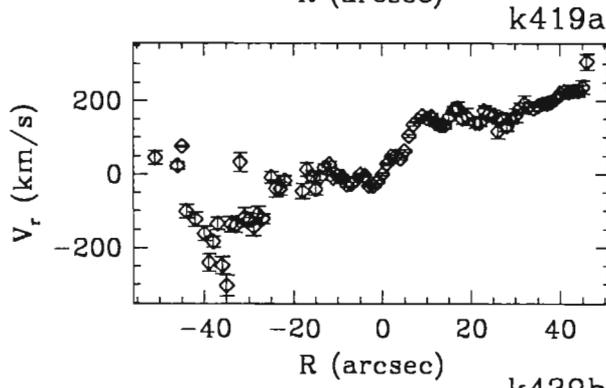
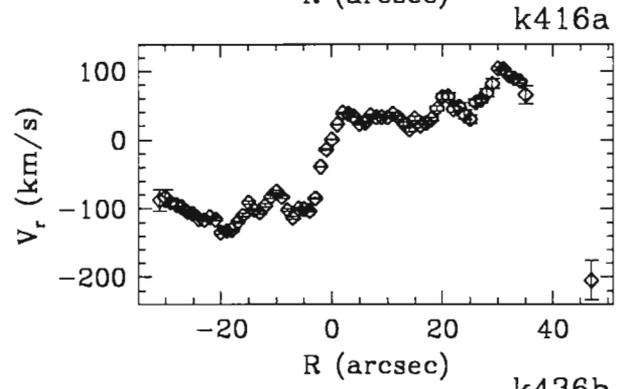
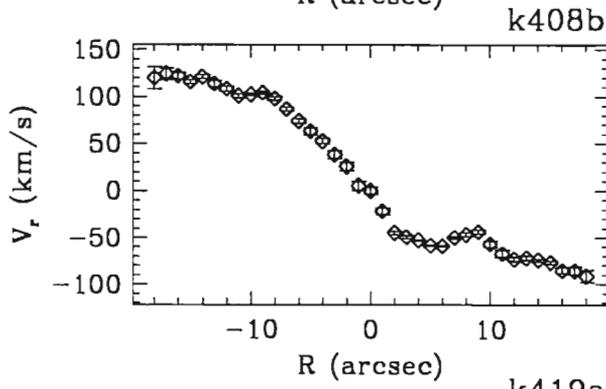
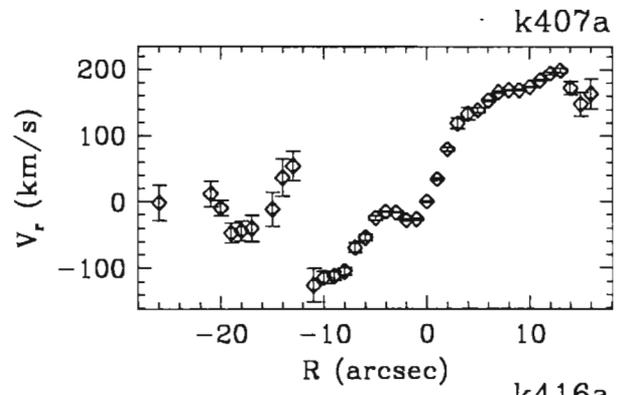
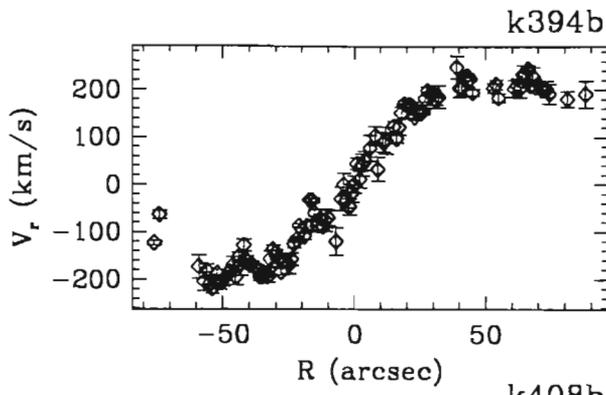


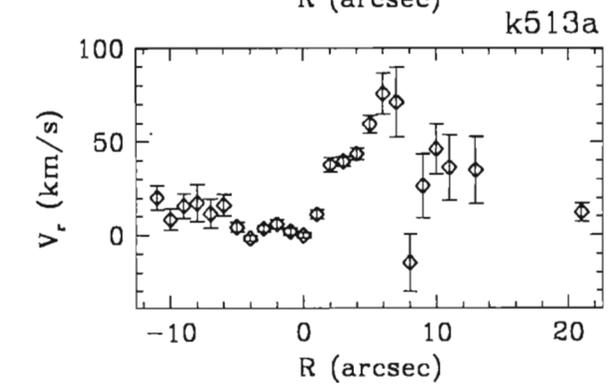
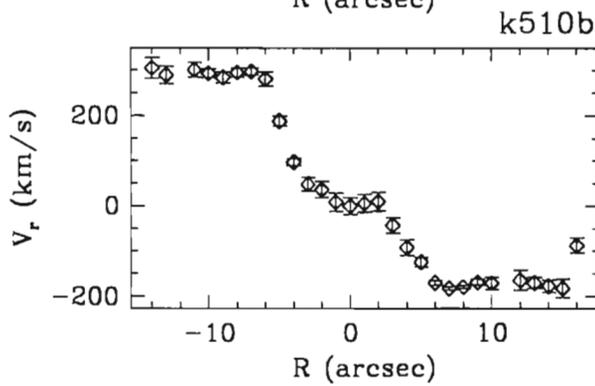
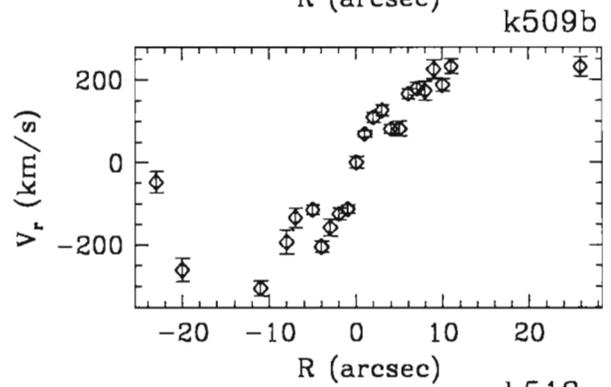
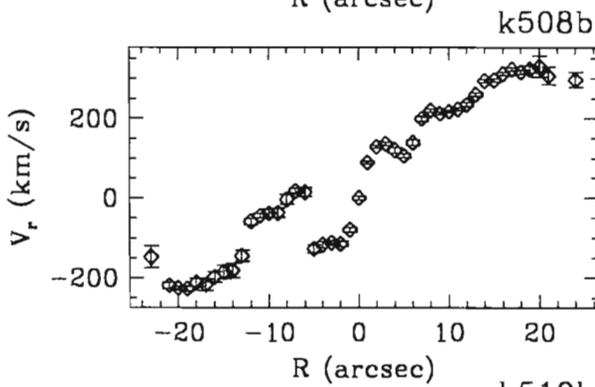
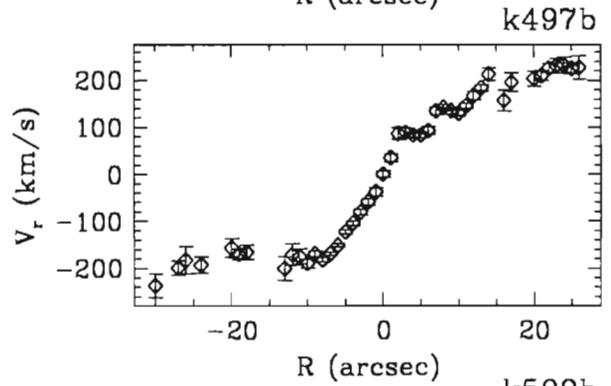
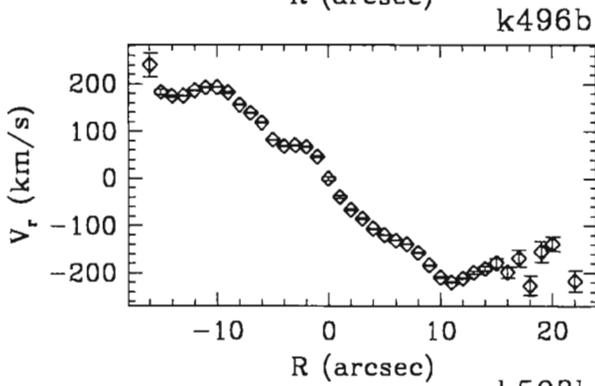
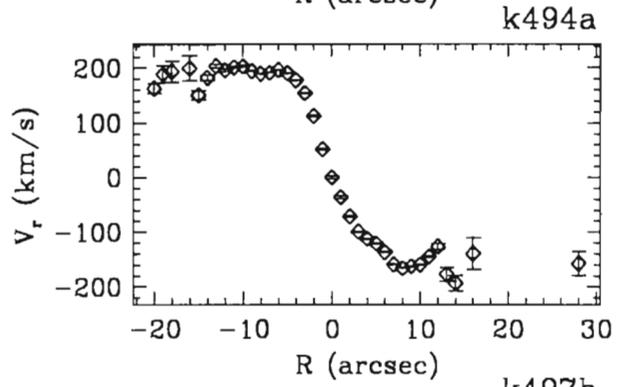
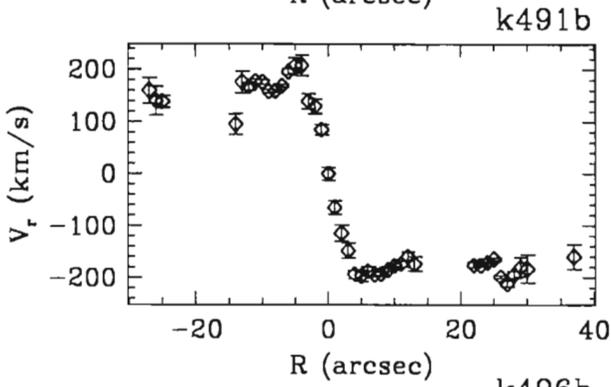
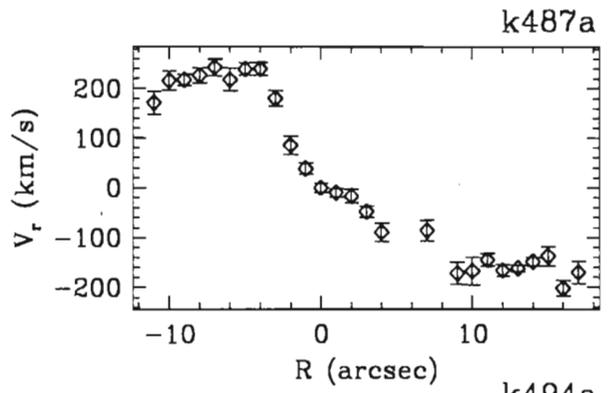
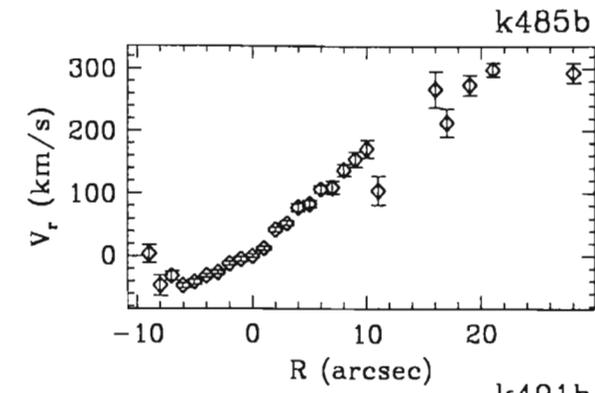


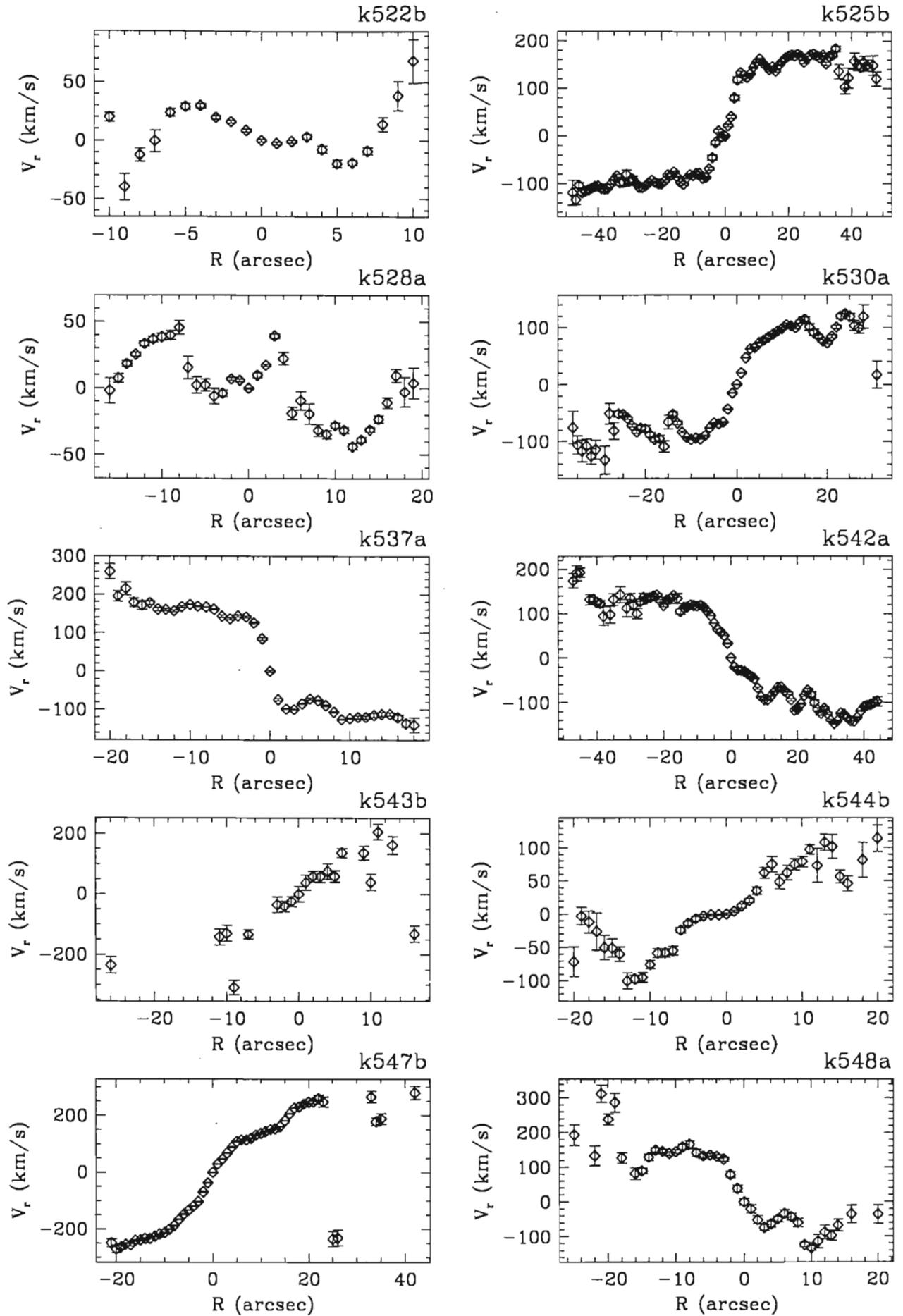


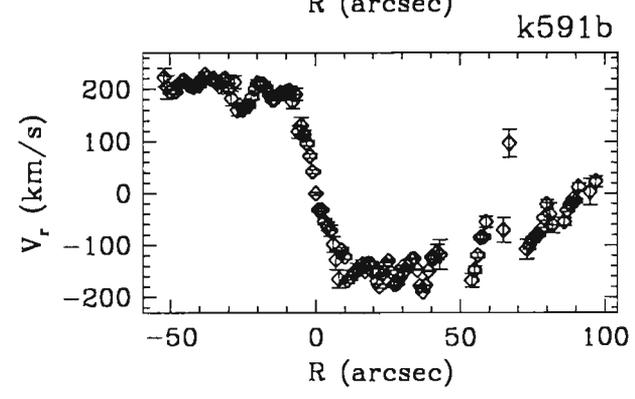
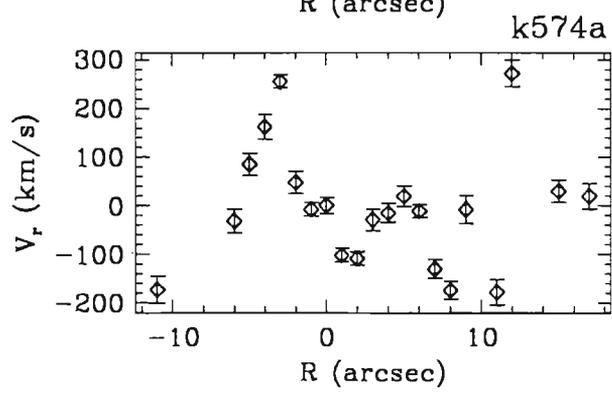
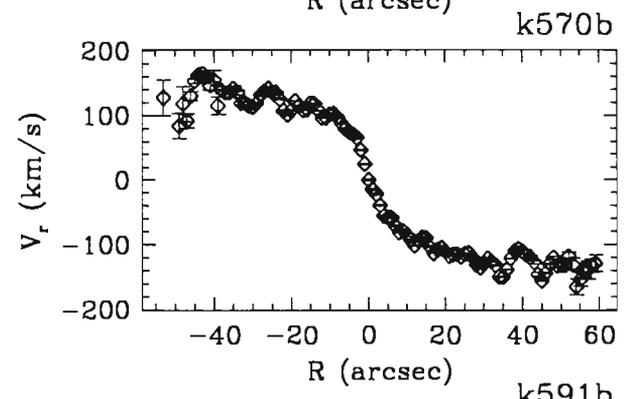
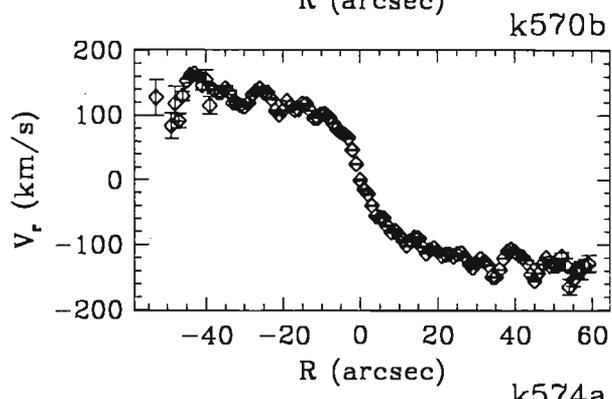
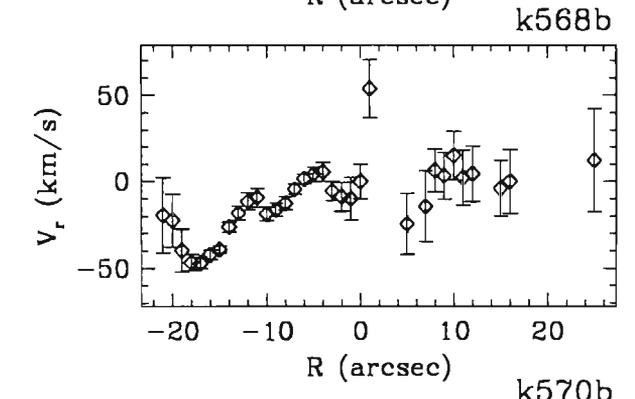
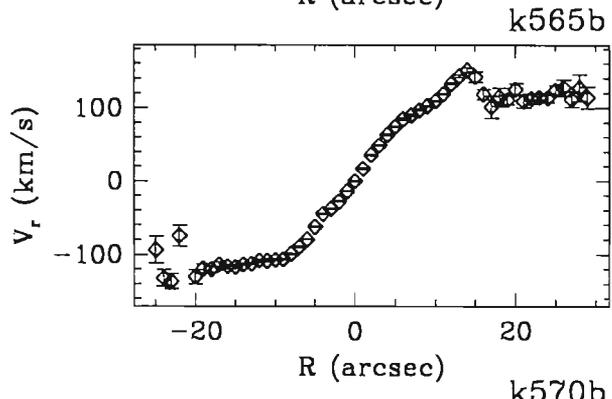
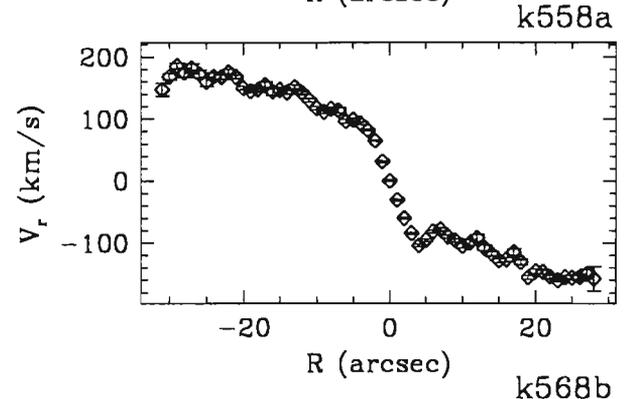
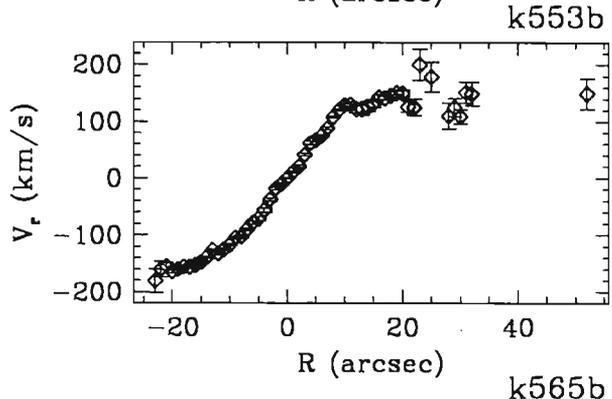
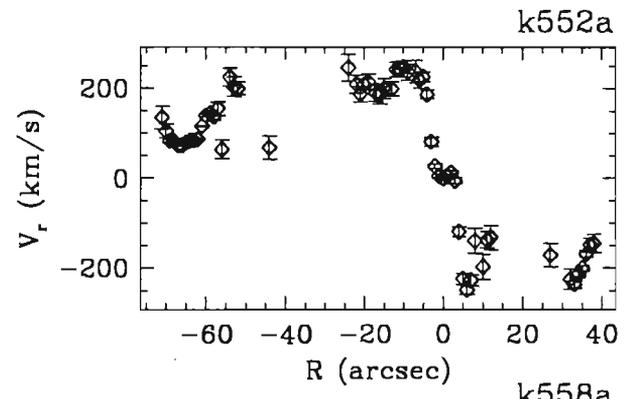
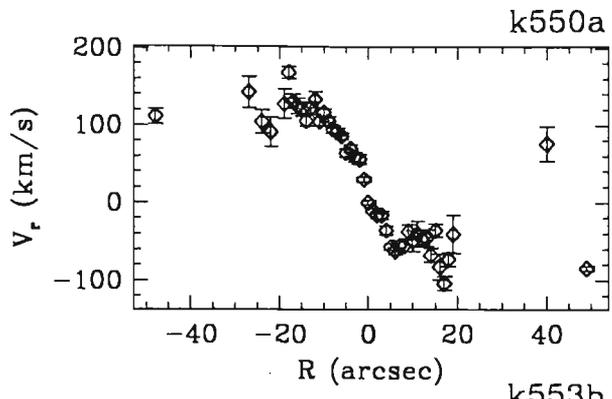


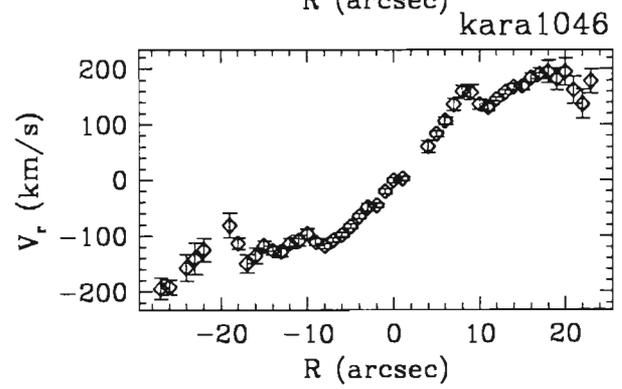
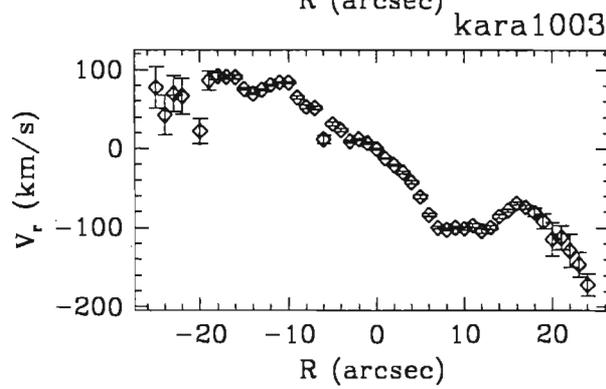
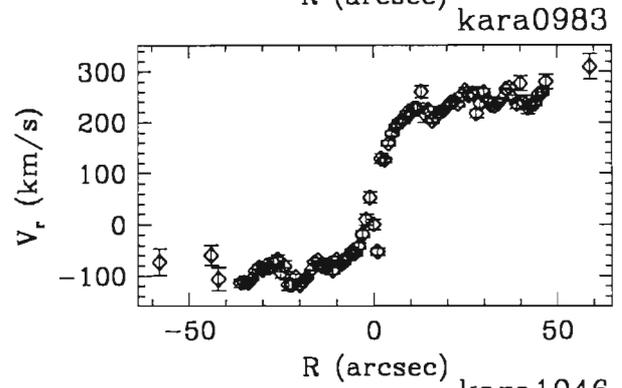
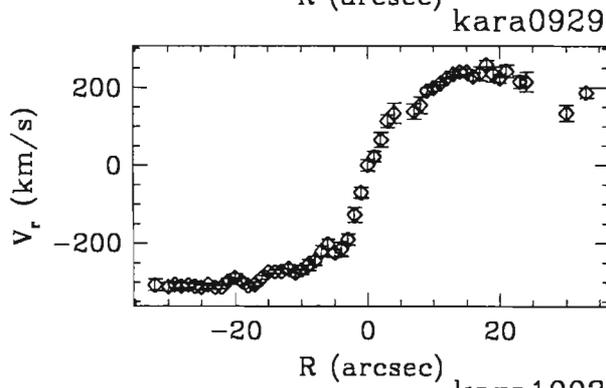
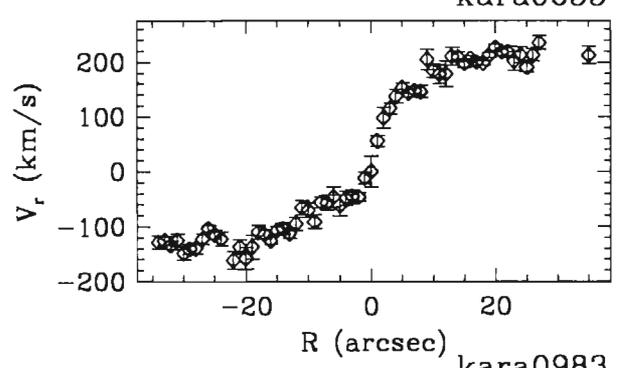
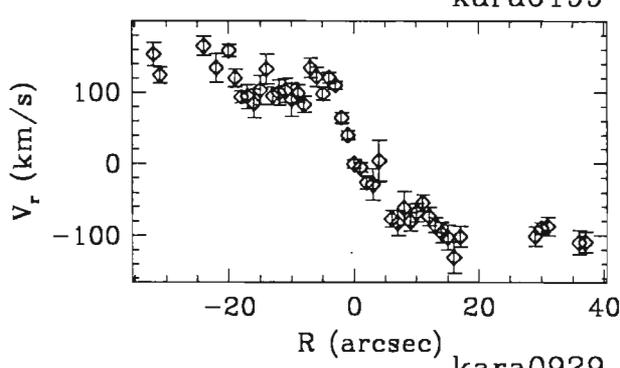
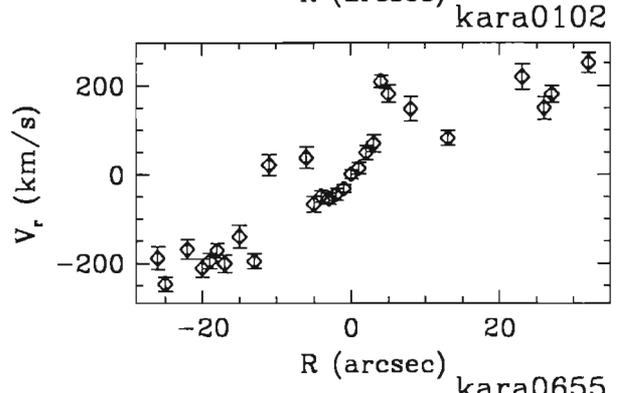
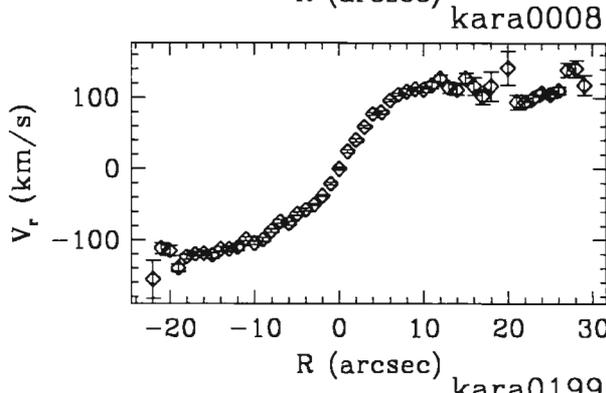
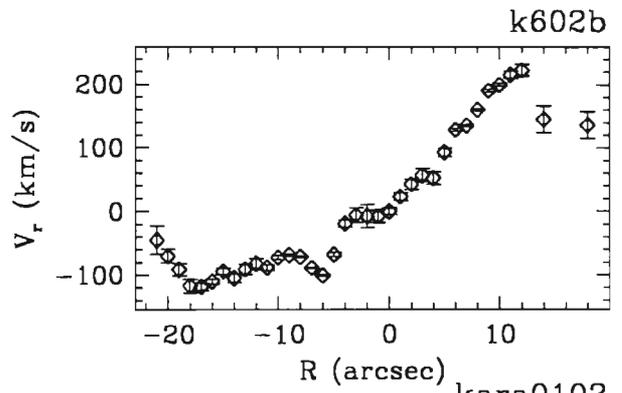
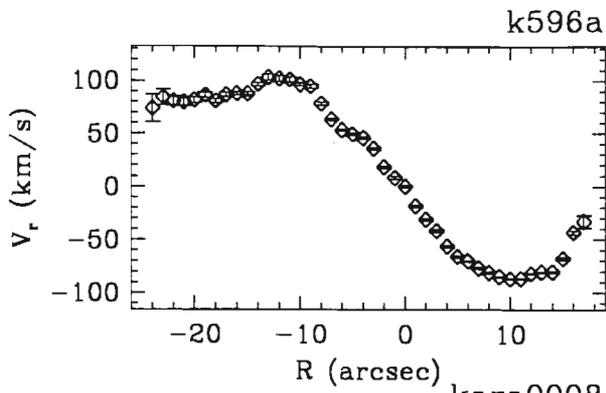


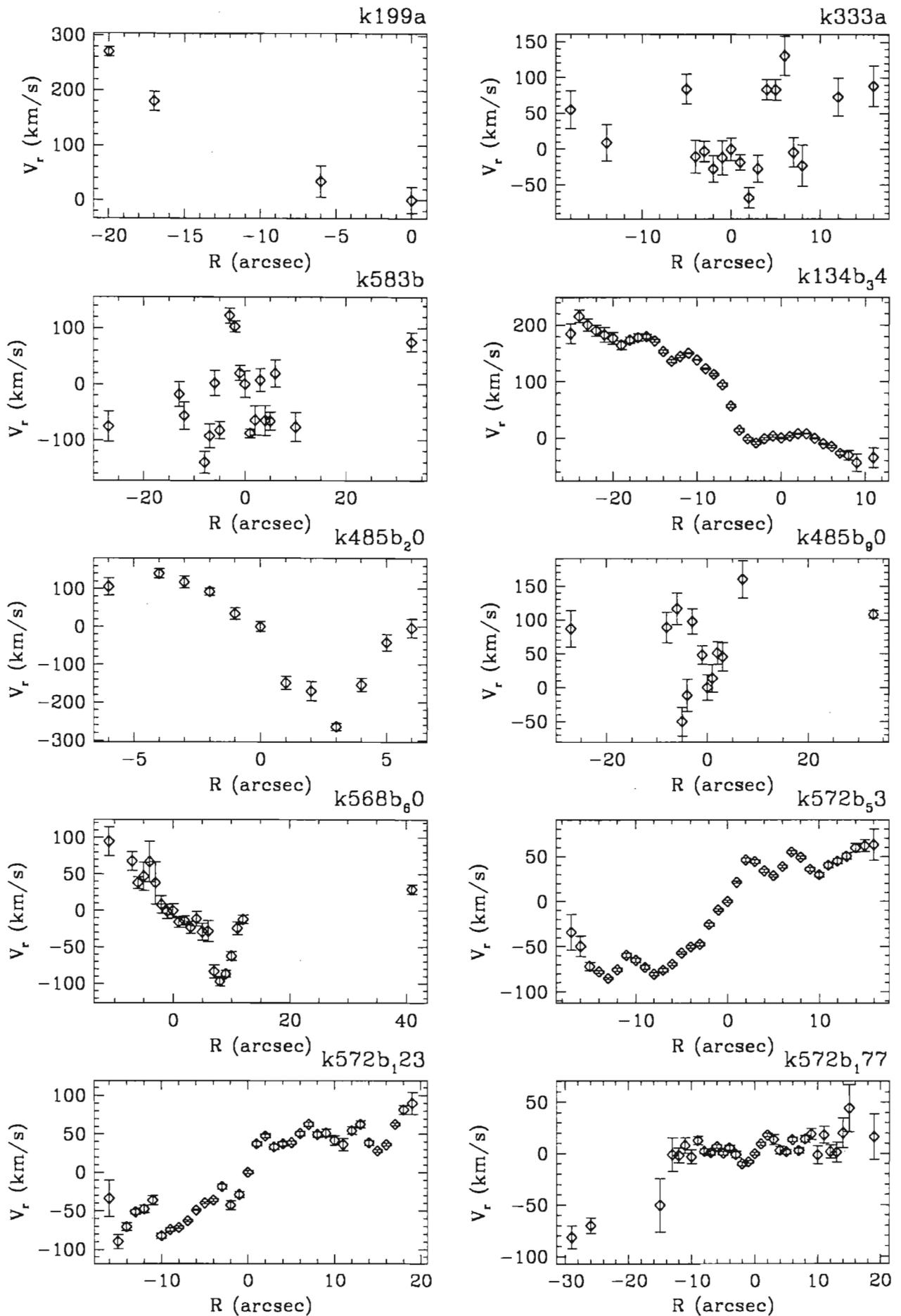












5. DISCUSION

En varias galaxias se encontró que la línea de NII es más intensa que $H\alpha$ –ver apéndice-, lo que implica que existe actividad nuclear en la galaxia de disco. En particular, en estas galaxias, NII es una línea de emisión de un núcleo activo que es un agujero negro supermasivo con un disco de acreción que lo rodea. En teoría cualquier galaxia tiene un agujero negro en su núcleo, sin embargo pocos se encuentran activos, es decir, no todos presentan un disco de acreción de donde consumen materia. Uno de los efectos que produce un agujero negro activo es la interacción entre galaxias, esto es debido a las fuerzas de marea que afectan al gas y polvo, apilándose en anillos concéntricos alrededor del hoyo negro. Así, se evidencia la existencia de actividad nuclear en una muestra importante de galaxias de disco que interaccionan con una galaxia elíptica. En la figura 17 aparece un histograma cuyo eje horizontal es el logaritmo de la razón de la intensidad de NII y $H\alpha$, el vertical es el número de galaxias. A partir de -0.3 en el eje horizontal, las galaxias tienen un núcleo activo, son 40 las galaxias con esta característica.

Como se ve en las gráficas la forma de la curva de rotación está influenciada por el ángulo de inclinación de la galaxia. Por ejemplo k155b está vista de frente y su gráfica es plana. Eventualmente se corregirá la curva de rotación por el ángulo de inclinación, que se estima por métodos de fotometría superficial.

La mayoría de las curvas de rotación son normales o típicas, sin embargo, existen varias que son asimétricas. A veces el centro dinámico no coincide con el que se observa en la galaxia o no hay simetría con respecto al centro, es decir el lado derecho es distinto al izquierdo.

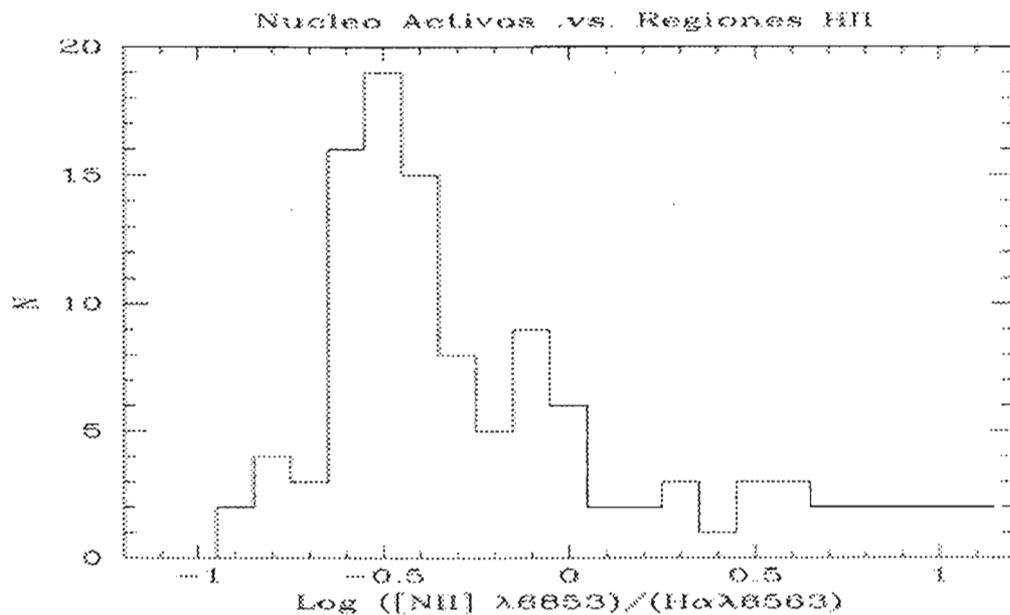


Figura 17. Histograma del logaritmo de la razón de NII y H α .

Un caso interesante es que existen galaxias que no presentan una curva de rotación plana lejos del centro, en ocasiones la velocidad disminuye. Eso significa que estas galaxias tienen menos materia oscura que la esperada en una galaxia de disco.

Otras galaxias muestran perturbaciones muy fuertes. En puntos donde debería existir una velocidad de rotación coherente, la velocidad aumenta o disminuye abruptamente. Pueden ser regiones de emisión afectadas por la interacción con la galaxia compañera.

Se descubrió que el par de galaxias k485a y k485b no es un par mixto, ambas son galaxias espirales, también k539a es una galaxia con dos compañeras extras, no es aislada. Los casos anteriores indican que no deberían de pertenecer al catálogo de Karachantseva.

6. CONCLUSIONES

- Se pueden determinar con precisión aceptable las curvas de rotación de imágenes obtenidas en el telescopio de 2.1 metros de San Pedro Mártir, con una resolución espectral de 5 Amstrongs en el ancho medio del máximo pico de emisión, con exposiciones entre 20 y 60 minutos por galaxia.
- Se observa en pares mixtos mayor número de galaxias con núcleo activo comparándolo con galaxias de disco aisladas.
- 50 de las 97 galaxias de disco en pares presentan una curva de rotación normal o típica de una galaxia de disco.
- 12 galaxias tienen una curva de rotación muy diferente a la esperada de una galaxia espiral aislada típica.
- En k029a, k059a, k074b, k118b, k129b, k153a, k188a, k192a, k260a, k419a, k508b, k513b, k528a, k530a y k591b se ven cambios abruptos en la velocidad.
- En k019b, k062a, k144a, k188a, k365a, k439b, k485b, k522b y k528a se encuentra evidencia de que la materia oscura no sigue aumentando lejos del centro galáctico.
- En k138b, k199a y k138b no se pudo extraer la curva de rotación.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

- Las 8 galaxias de referencia, cuyas curvas son previamente conocidas demuestran que las curvas de rotación obtenidas en este proyecto son confiables.
- Se utilizaron imágenes de galaxias cuya luz ha viajado durante millones de años, razón por la cual se sabe su estructura en el pasado; sin embargo, no se puede asegurar que conserven así en el presente. La colección de imágenes de galaxias son parte de la pista que tenemos hoy para imaginar y deducir el futuro, objetivo primordial de la ciencia.
- El trabajo a futuro es determinar la relación Tully-Fisher en esta colección para compararlas con galaxias espirales aisladas y se puedan cuantificar los efectos de la interacción en la evolución galáctica.

7. BIBLIOGRAFIA

COURTEAU, Stéphane. "Tully-Fisher Distances and Motions in the Northern Sky". A Ph. D. Dissertation. University of California, Santa Cruz 1992.

HACYAN, Shahen. "El Descubrimiento del Universo" . México 1989. Fondo de Cultura Económica. La Ciencia desde México.

KANT, Immanuel. "Crítica a la Razón Pura".

OSTERBROK, Donald. "Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei". California 1989. Ed. University Science Books.

PEIMBERT, Manuel et al. "Fonteras de Universo". México. 2000. Ed. Fondo de Cultura Económica. CONACYT. La Ciencia desde México.

SARMIENTO, Antonio. "El Fantasma cuyo andar deja huella. Evolución del Tiempo". México 1995. Fondo de Cultura Económica. La Ciencia desde México.

SHU, Frank. "The Physical Universe". California 1982. Ed. University Science Books.

TAYLER, Roger. "Galaxies: Structure and Evolution". Great Britain, Cambridge 1978. Ed. Cambridge University Press.

APENDICE

Vr +/-		H α 1 +/-		NII +/-		H α 2 +/-		Galaxia
Velocidad de Recesión (km/seg)		Intensidad de H α emisión 6563A		Intensidad de NII emisión 6583A		Intensidad de H α absorción		
5050.36	0.59	38.38	0.14	12.91	0.14	-2.86	0.45	k006a
5042.57	3.10	34.18	0.69	33.96	0.69	5.87	2.72	k019b
14323.85	15.47	19.82	2.11	28.76	2.11	-1.16	3.63	k029a
7004.59	6.78	3.48	0.20	3.66	0.20	-0.22	0.70	k049a
3681.45	4.71	3.05	0.06	1.10	0.06	-1.50	0.16	k053b
12674.93	11.06	6.06	0.37	2.65	0.37	-0.89	1.27	k055b
5838.17	4.33	8.36	0.27	5.20	0.27	0.12	0.88	k058a
3239.94	0.76	42.98	0.20	11.84	0.20	-2.86	0.65	k059a
4772.75	7.66	2.72	0.12	2.23	0.13	-0.97	0.41	k061a
6386.03	2.57	10.57	0.17	5.47	0.17	-0.41	0.56	k062b
3598.32	0.82	41.60	0.24	8.38	0.24	-2.29	0.66	k063a
7242.82	0.48	32.67	0.16	13.76	0.16	2.32	0.59	k074b
5519.78	8.03	2.62	0.07	0.82	0.07	-1.81	0.18	k076a
4908.09	11.61	0.49	0.11	1.13	0.11	-0.69	0.36	k078b
2504.81	1.28	12.26	0.09	3.94	0.09	-1.88	0.28	k086a
7311.90	0.59	88.25	0.37	34.04	0.37	1.22	1.16	k089a
10745.18	1.98	29.14	0.43	12.25	0.43	2.23	1.38	k091a
4977.42	4.45	3.91	0.07	1.70	0.07	-1.98	0.21	k101a
8365.96	0.30	146.13	0.30	46.73	0.30	1.05	1.21	k103a
8223.90	5.03	0.00	0.17	6.81	0.17	3.09	0.59	k106b
4158.52	9.69	2.43	0.08	0.28	0.08	-1.90	0.22	k107a
4794.90	9.66	1.79	0.07	1.35	0.08	-1.37	0.22	k118b
4494.31	5.62	1.75	0.10	3.22	0.10	-0.16	0.29	k121b
5046.61	5.88	16.38	0.36	7.17	0.36	-2.86	1.17	k122a
4846.87	1.29	23.37	0.22	5.86	0.22	-2.29	0.61	k123a
4422.15	3.36	3.23	0.06	3.08	0.06	-1.62	0.16	k128b
2908.86	4.65	0.00	1.37	32.22	1.37	3.30	3.69	k129b
6933.83	1.54	30.25	0.43	10.89	0.43	2.10	1.08	k130b
4863.59	0.24	137.54	0.28	25.66	0.28	0.87	0.92	k134b
5375.97	20.69	0.21	0.37	2.65	0.37	0.29	1.22	k138b
8062.36	9.90	0.00	1.94	12.91	1.94	16.71	7.38	k144a
2310.93	0.60	145.85	0.66	26.01	0.66	-1.43	2.25	k148a
5531.00	2.34	54.16	0.91	18.97	0.91	-2.86	6.19	k153a
7547.05	0.42	122.30	0.44	20.23	0.44	3.01	1.45	k155b
9412.79	8.31	10.67	0.29	2.64	0.29	-2.86	0.92	k162b
9246.47	9.22	2.40	0.12	1.63	0.12	-1.43	0.36	k167b
9148.08	9.26	4.44	0.27	4.18	0.27	-0.49	0.82	k182a
8196.63	0.73	49.85	0.22	18.42	0.22	-2.35	0.71	k188a
6732.83	6.55	6.63	0.21	3.05	0.21	-0.82	0.67	k192a
1088.26	10.73	9.60	0.74	1.49	0.74	-2.06	1.62	k193
8753.64	14.29	2.78	0.15	0.65	0.15	-1.80	0.52	k197a
9195.22	5.74	181.06	6.44	41.01	6.45	-2.86	20.72	k198a
10984.55	23.64	1.91	0.26	1.09	0.26	-1.43	1.03	k199a
3821.47	6.27	0.58	0.10	3.23	0.10	-0.03	0.24	k202b
7604.77	1.85	12.62	0.15	3.90	0.15	-1.35	0.43	k214a
7016.09	2.81	18.62	0.33	5.68	0.33	-2.29	1.09	k221a
9483.56	1.85	20.29	0.17	7.07	0.17	-1.62	0.48	k229b
8053.86	24.33	0.00	0.30	1.88	0.30	0.21	1.04	k231b
8186.02	10.69	1.00	0.10	1.27	0.10	-0.70	0.35	k239b
10322.90	1.21	12.93	0.32	37.48	0.32	8.48	1.08	k254a

Vr	+/-	H α 1	+/-	NII	+/-	H α 2	+/-	Galaxia
7728.00	6.06	0.00	0.10	2.78	0.10	0.34	0.32	k260a
6115.75	2.14	0.80	0.34	16.68	0.34	3.93	0.89	k275a
7484.87	2.64	4.80	0.10	4.70	0.10	0.90	0.25	k284a
1889.72	15.71	0.15	0.13	0.32	0.13	-1.05	0.35	k333a
2979.20	1.60	32.94	0.40	5.32	0.40	-2.70	0.97	k345a
2795.82	11.38	1.87	0.06	0.49	0.06	-1.17	0.19	k359a
6976.03	2.15	69.12	1.33	81.75	1.33	25.72	4.99	k363b
8383.22	0.92	21.43	0.14	5.70	0.14	-2.39	0.36	k365a
6556.32	1.04	18.72	0.14	6.27	0.14	-1.86	0.37	k374b
7634.22	5.62	3.85	0.10	1.80	0.10	-1.55	0.30	k380b
7946.64	1.37	56.18	0.57	26.94	0.57	-1.56	1.72	k393b
2390.55	18.03	0.00	0.21	2.52	0.22	0.13	0.46	k394b
7860.08	1.13	18.16	0.15	14.37	0.15	0.54	0.44	k407a
4019.71	3.85	7.53	0.19	1.83	0.19	-1.72	0.46	k408b
1897.12	0.58	52.05	0.23	19.58	0.23	-2.29	0.75	k416a
1843.40	4.16	0.00	4.12	181.99	4.13	146.57	12.56	k419a
8842.63	4.53	11.87	0.22	3.23	0.22	-2.86	0.76	k436b
8743.53	2.61	34.49	0.52	24.42	0.52	2.53	1.02	k439b
8797.81	1.58	18.03	0.19	5.01	0.20	-1.55	0.65	k445a
1915.27	0.44	77.63	0.28	31.56	0.28	1.87	0.98	k468b
9728.68	2.65	25.62	0.44	6.73	0.44	-2.81	1.24	k485a
9481.95	2.56	25.30	0.46	5.75	0.46	-2.86	1.16	k485b
7383.87	9.05	0.22	0.09	2.12	0.09	0.04	0.19	k487a
5756.76	2.14	15.33	0.18	8.27	0.18	-0.30	0.45	k494a
10821.05	4.10	19.01	0.35	7.05	0.35	-2.86	1.04	k496b
10338.73	6.78	0.00	0.14	3.31	0.14	0.99	0.37	k497b
7237.74	5.03	3.83	0.15	6.26	0.15	2.36	0.34	k508b
6747.95	14.12	0.00	0.16	2.48	0.16	0.16	0.35	k509b
12917.30	18.54	3.03	0.62	7.18	0.63	18.39	1.36	k510b
8119.51	1.41	7.42	0.08	4.02	0.08	-1.38	0.20	k513a
18323.72	0.99	37.96	0.28	11.19	0.28	-0.53	0.79	k522b
3318.64	2.10	8.23	0.13	4.86	0.13	-0.91	0.37	k525b
4974.34	0.52	45.38	0.19	15.86	0.19	-1.27	0.49	k528a
7099.40	0.31	51.57	0.12	17.57	0.12	-0.59	0.41	k530a
9069.00	2.79	10.50	0.13	3.39	0.13	-1.85	0.40	k537a
3842.38	1.07	53.74	0.40	20.70	0.40	-1.02	1.23	k542a
3548.68	1.28	15.26	0.14	3.95	0.14	-2.55	0.33	k544b
7740.43	1.76	11.75	0.13	5.90	0.13	-1.36	0.43	k547b
4198.40	9.91	0.40	0.09	2.02	0.09	0.09	0.17	k548a
6940.51	2.99	10.90	0.24	4.37	0.24	-0.55	0.68	k550a
7789.79	2.27	8.20	0.17	11.74	0.17	4.58	0.30	k552a
5040.92	1.50	16.91	0.17	6.17	0.17	-1.52	0.50	k553b
5834.13	1.48	11.07	0.10	3.90	0.10	-1.48	0.30	k558a
8348.62	0.79	30.38	0.17	7.70	0.17	-2.03	0.46	k565b
986.62	9.86	0.00	0.30	3.66	0.30	0.61	0.74	k568b
1902.19	9.68	9.92	0.54	1.20	0.54	-2.86	1.29	k568b
1344.14	1.21	18.13	0.13	4.68	0.13	-2.29	0.39	k570b
7064.13	1.25	16.04	0.18	12.36	0.18	0.30	0.54	k572b
6552.29	16.84	1.44	0.07	0.25	0.07	-1.21	0.18	k574a
5517.96	23.59	0.07	0.09	0.48	0.09	-1.18	0.15	k583b
5146.64	2.47	10.79	0.13	8.28	0.13	-2.19	0.36	k591b

Vr	+/-	Hα1	+/-	NII	+/-	Hα2	+/-	Galaxia
5157.54	0.86	37.62	0.20	12.68	0.20	-2.58	0.66	k596a
4792.44	4.99	0.76	0.09	3.69	0.09	0.11	0.22	k602b
6332.14	1.56	19.17	0.22	7.05	0.22	-1.36	0.60	kara0008
4852.19	10.00	0.35	0.12	2.46	0.12	0.23	0.23	kara0102
3884.33	5.68	16.67	0.45	4.59	0.45	-2.86	1.47	kara0199
5527.57	28.04	1.95	0.28	1.03	0.28	-0.41	0.97	kara0655
10946.03	15.18	1.50	0.28	4.34	0.28	-0.10	0.49	kara0929
4686.80	10.13	3.39	0.25	3.65	0.25	-1.51	0.82	kara0983
3555.04	1.28	35.30	0.30	10.13	0.30	-2.86	0.87	kara1003
7941.28	5.14	11.51	0.41	3.93	0.41	-1.26	1.12	kara1046