



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA  
CENTRO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“Caracterización Espectral de la  
Microvariabilidad en Cuasares”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

P R E S E N T A

ANTONIO RAMÍREZ



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

---

---

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA  
CENTRO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“Caracterización Espectral de la  
Microvariabilidad en Cuasares”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

P R E S E N T A

ANTONIO RAMÍREZ

CODIRECTORES DE TESIS: DRA. DEBORAH DULTZIN KESSLER  
DR. JOSE A. DE DIEGO ONSURBE

*“Cuando creíamos que teníamos todas las respuestas, de pronto, cambiaron todas las preguntas”.*

Mario Benedetti

*“La existencia es una caída acabada”.*

Jean-Paul Sartre

*“Lo teórico es algo que no funciona y sabemos porque. Lo práctico es algo que funciona y no sabemos por qué. Cuando lo teórico y lo práctico se unen, ya nada funciona y no sabemos por qué”.*

Bernard Werber  
(Según lo recuerdo de cómo lo recordaba Nicolás)

*“Estamos convocados por los fantasmas de Pancho Villa y Emiliano Zapata, quienes no son fantasmas pinches, light y descafeinados, sino espectros cabrones, duros y rasposos”.*

Paco Ignacio Taibo II

P.S. A estos dos nombres yo agregaría el de Virginia Woolf.



# Agradecimientos

Quiero agradecer a la Dra. Deborah Dultzin y al Dr. José Antonio de Diego, mis asesores, su ayuda para realizar este trabajo. A la Dra. Irene Cruz-González, al Dr. Christophe Morissete, al Dr. Michael Richer y al Dr. Vahram Chavushyan por aceptar ser sinodales, y por los valiosos comentarios y sugerencias que sin duda mejoraron lo que aquí se reporta. A la Dra. Grabirella Piccinelli y al Dr. Yair Krongold, pues sin su apoyo jamás habría podido terminar esta investigación. Al Dr. André Moitinho por su valiosa ayuda en la reducción de datos. Al Dr. Raúl Mújica, por su apoyo para asistir a un par de congresos. A la Dra. Erika Benítez, por las discusiones de los viernes que a veces eran jueves. A Alfredo Díaz y Carmelo Guzmán por su ayuda para resolver todos los problemas computacionales que se me presentaron durante la realización de la tesis. A Bertha Vázquez por todo el apoyo durante mi estancia en el IA. A Ricardo Laudato, por las excelentes clases de inglés que en mucho me han ayudado.

Al Instituto de Astronomía de la U.N.A.M. por brindarme las facilidades para realizar este trabajo. Al CONACyT por el apoyo económico.



*Todos los caracoles un día se ven obligados a desprenderse de toda posesión material y caminar desnudos por el barrio.* En mi opinión así debería ser la culminación de la vida de estudiante, y formar una nueva concha con la vida: aprendiendo, creciendo, ayudando. Dejar atrás la preocupación por *El Título* es una buena manera de comenzar a armar un nuevo caparazón. Quizás podríamos colgar un letrero en esta concha que diga: *esto aprendí, esto soy, esto te doy.* La materialización de los conocimientos adquiridos puede verse como un mérito en solitario, mas yo prefiero verla como la solidificación del apoyo de familiares, amigos, amores, profesores. Es decir, el proceso de realizar una tesis debe ser una vivencia más que promiscua. Es decir, la vida. Mencionar sólo a algunas personas puede ser injusto, pero no se ofenda nadie, pues no es falta de cariño y reconocimiento; ustedes saben el lugar que tienen en mi corazón.

A mi madre (Chelo) y mis hermanos (Alicia, Hugo y Toña), por su apoyo y comprensión durante largos años. A mis sobrinos, por toda la alegría y corajes que me han brindado. A mí tía Tere, que ha sido como una segunda madre. A la memoria de mí tío Beto. A mis tías Lourdes y Coco, que siempre aparecen en momentos difíciles. A Cosette, por las ricas sesiones de cine. Al buen Yiro, que es un cuate muy chido. A mi primo Raúl, por ser un buen carnal. A Selva, por mantenerse al pie del cañón, con una taza de café a la mano. A Solecita, por buena amiga y por llenarme de ese buen estado de animo que se llama Veracruz.

Nuevamente a la tequila, sin cuyos vapores los lunes no serían lunes. A Gabirucha, pues al ser como es me sostiene en esta lucha social que debe ser el vivir. Te quiero. A Paco Ignacio Taibo II, por crear al gran Belascuas. A los zapatistas y todas las personas honradas de la otra campaña, pues me han dado un halito de esperanza de un mundo mejor.

Hago de un ¡Zapata vive! Un grito de agradecimiento para tod@s y todes. Desde abajo y a la izquierda podremos cambiar al mundo.



# Índice General

	i
<b>Agradecimientos</b>	<b>iii</b>
	<b>v</b>
<b>Resumen.</b>	<b>xi</b>
<b>1 Núcleos Activos de Galaxias.</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción . . . . .	1
1.2 Definición y Clasificación de un NAG . . . . .	2
1.3 El modelo estándar del fenómeno NAG . . . . .	3
1.3.1 Modelos de Brotes Estelares . . . . .	8
1.4 Objetos radio callados y radio emisores ¿dicotomía real o sesgo observacional? . . . . .	9
1.5 Esquema unificado . . . . .	11
<b>2 Variabilidad de Núcleos Activos de Galaxias.</b>	<b>13</b>
2.1 Introducción. . . . .	13
2.2 Características: escalas de tiempo y de magnitud . . . . .	15
2.2.1 Variabilidad de período largo. . . . .	15
2.2.2 Estallidos. . . . .	16
2.2.3 Ráfagas. . . . .	16
2.2.4 Microvariabilidad. . . . .	17
2.3 Modelos de variabilidad. . . . .	18
2.3.1 Mecanismos extrínsecos de la microvariabilidad. . . . .	18
2.3.2 Mecanismos intrínsecos de la microvariabilidad . . . . .	19

2.4	Variabilidad y dicotomía. . . . .	23
2.4.1	Microvariabilidad. . . . .	23
2.4.2	Variabilidad de períodos intermedio y largo. . . . .	24
2.5	Características espectrales de la variabilidad . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Estudio comparativo de microvariabilidad entre dos muestras de cuasares: propiedades en radio de la microvariabilidad.</b>	<b>29</b>
3.1	Introducción . . . . .	30
3.2	Selección y observación de las muestras . . . . .	30
3.2.1	Selección de las muestras . . . . .	30
3.2.2	Observaciones . . . . .	33
3.3	Resultados . . . . .	34
3.4	Discusión . . . . .	36
3.4.1	Estadística muestral . . . . .	36
3.5	Conclusiones . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Estudio Comparativo de Microvariabilidad Multicolor en Cuasares</b>	<b>45</b>
4.1	Introducción. . . . .	45
4.2	Los datos . . . . .	46
4.3	Resultados . . . . .	48
4.3.1	Cuasares Radio Emisores . . . . .	52
4.3.2	Cuasares Radio Callados . . . . .	55
4.4	Discusión . . . . .	59
4.4.1	La prueba $\chi^2$ para homogeneidad . . . . .	60
4.4.2	Análisis estadístico de comparación de parejas . . . . .	61
4.4.3	El Nivel de Actividad . . . . .	64
4.5	Resumen y conclusiones . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Caracterización Espectral de la Microvariabilidad en Cuasares.</b>	<b>69</b>
5.1	Introducción. . . . .	69
5.2	Los datos . . . . .	71

5.3	Continuo de emisión de un cuasar y la variabilidad en su forma. . . . .	72
5.3.1	Índice de variabilidad espectral y los modelos de emisión de un cuasar. . . . .	75
5.4	Resultados . . . . .	82
5.4.1	Resolución temporal de la variabilidad espectral . . . . .	82
5.4.2	Ajustes del modelo y datos iniciales . . . . .	85
5.4.3	Cuasares radio emisores . . . . .	86
5.4.4	Cuasares radio callados . . . . .	92
5.5	Discusión . . . . .	104
5.6	Resumen y conclusiones . . . . .	108
<b>6</b>	<b>La extraña variabilidad del blazar PKS 0736+017</b>	<b>111</b>
6.1	Introducción . . . . .	111
6.2	Observación y reducción de datos . . . . .	113
6.3	Análisis de variabilidad . . . . .	115
6.3.1	Variabilidad . . . . .	115
6.3.2	Características de la variabilidad . . . . .	117
6.4	Discusión . . . . .	120
6.5	Conclusiones . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Conclusiones y discusión final.</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>El índice de variabilidad espectral</b>	<b>129</b>
A.1	Independencia del sistema fotométrico . . . . .	130
A.2	Independencia de la extinción interestelar . . . . .	130
A.3	Independencia respecto de $H_o$ y $q_o$ . . . . .	130
<b>B</b>	<b><math>\varpi_\nu</math> en función de los parámetros del modelo</b>	<b>133</b>
B.1	Microvariabilidad debida a un proceso no térmico . . . . .	134
B.2	Microvariabilidad debida a un proceso térmico . . . . .	134
B.3	Contribuciones en las bandas B y R relativas a la contribución en V . . . . .	135
<b>C</b>	<b>Criterio de simultaneidad</b>	<b>137</b>

**Bibliografía**

**139**

# Resumen.

Comprender la naturaleza de los núcleos activos de galaxias representa uno de los mayores retos para la astronomía moderna. En este sentido, mejorar nuestro conocimiento sobre la microvariabilidad óptica (MV) en cuasares juega un papel muy importante. De ser intrínseca a la fuente, la MV puede deberse a: perturbaciones en el disco de acreción (de origen térmico) o a procesos en el jet (de origen no térmico). Por observación no se ha podido diferenciar entre estas causas ni el tipo de objetos al que están asociadas. En la presente investigación se presenta un estudio fotométrico, realizado sobre una muestra de cuasares, que pretende caracterizar la MV, en particular su relación con la emisión en radio de estos objetos. Los objetivos principales son: comparar las propiedades de MV entre cuasares radio emisores (RLQ) y cuasares radio callados (RQQ) y, establecer el origen térmico o no térmico de ésta. Se observó una muestra de cuasares, conformada por 23 RQQ y 23 RLQ, utilizando para ello cuatro telescopios distribuidos en México y España. La metodología empleada consistió en medir el flujo en tres bandas ópticas (BVR) de manera cuasi-simultánea. Se comparó estadísticamente el número de eventos de MV entre RQQ y RLQ. Sobre cada evento se realizó un novedoso análisis de color para establecer su naturaleza térmica o no térmica. Se detectó microvariabilidad en 5 RQQ y en 3 RLQ. Un total de 11 detecciones fueron registradas. 3 variaciones pueden ser descritas por eventos térmicos, 5 por eventos no térmicos y 3 indefinidas. Se concluye que la microvariabilidad es un fenómeno independiente de la emisión en radio. Por primera vez se detectó MV de origen térmico en RLQ y MV de origen no térmico en RQQ, implicando que la fuente de energía en RLQ y RQQ es la misma o muy parecida.





# Capítulo 1

## Núcleos Activos de Galaxias.

### 1.1 Introducción

Hacia 1963 se tenía noticia de fuentes de radio con apariencia estelar en el óptico, pero con líneas de emisión que no se identificaban con elementos conocidos. En ese año se pudo obtener el espectro de las radio fuentes 3C 273 y 3C 48 (Schmidt 1963) gracias a la identificación de sus contra-partes ópticas (Hazard, Mackay y Shimmins 1963; Greenstein y Matthews 1963). En ambos casos se trataba aparentemente de *estrellas* azules. Schmidt (1963) identificó cuatro líneas de emisión de 3C 273 al asignar un corrimiento al rojo inusual de  $\sim 16\%$ . Un valor tan alto (para esa época) indicaba que la fuente se encontraba a distancias cosmológicas, así como una luminosidad extremadamente alta (los resultados de Schmidt implicaban una luminosidad de  $\sim 10^{46}$  egr/s, es decir, el equivalente a  $10^{11}$  estrellas en su conjunto). Toda esta energía debería generarse en una región espacial tan pequeña como para no ser resuelta por observación directa. Este descubrimiento ocurrió cuando ya se comprendía la naturaleza de la emisión de las estrellas, por lo cual se entendió que se trataba de un tipo no conocido de fuente de energía.

Como la marca distintiva de estos objetos fue su apariencia estelar, se les denominó *objetos cuasi estelares*, de donde se deriva el actual nombre de *cuasar*.

Posteriormente, se observó que algunos cuasares se encontraban envueltos por una nubosidad que se asociaba a una galaxia subyacente (e.g. Hawkins 1978; Wyckoff et al. 1982). Sandage (1971) propuso que la emisión de los cuasares podría ser la combinación de una fuente compacta de emisión no térmica y una galaxia elíptica, siendo el brillo de la fuente compacta la dominante de la emisión. Así, se esperaba que el *perfil fotométrico* de un cuasar fuera más parecido al de una estrella cuanto más brillante fuera el núcleo compacto respecto al brillo de la galaxia subyacente.

Investigaciones subsecuentes mostraron lo acertado de estas suposiciones. Hawkins (1978) encontró que de siete cuasares observados por él, cinco mostraban indicios de una galaxia subyacente. Los dos restantes eran los más brillantes de sus muestras y mostraban una apariencia más parecida a una estrella. Wyckoff et al. (1982) analizaron una muestra de 38 cuasares para estudiar la nubosidad circundante de los mismos. La correlación de

los parámetros observados de estas nubosidades era consistente con las propiedades de galaxias colocadas a las distancias cosmológicas de cuasares. También encontraron que, a bajo corrimiento al rojo, estas nubosidades bien podían interpretarse como galaxias con magnitudes absolutas del orden de  $-21.5 \pm 0.8$  en el filtro R y diámetros medios de  $85 \pm 30$  kpc. Hoy en día, la idea de que los cuasares son fuentes que residen en los núcleos de galaxias es ampliamente aceptada y corroborada por las observaciones (e.g. Dunlop et al. 2003).

A lo largo de estas cuatro décadas de investigación se han descubierto diferentes fuentes cuya emisión recuerda, de una u otra manera, a la de un cuasar. Básicamente, enormes cantidades de energía producidas en una zona espacial muy pequeña, el continuo se ajusta por una ley de potencias, con excesos en las regiones espectrales correspondientes al radio, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma, presentan líneas de emisión de alta excitación, con anchos muy superiores a los presentes en galaxias normales, etc. A la vez, se comprendía su importancia para entender la formación y la evolución del universo.

Muchos de estos objetos son galaxias que contienen un núcleo compacto tipo cuasar y se conocen como galaxias Seyfert. Otros son los objetos tipo BL Lac, los LINERs y las radio galaxias. A todos estos objetos se les conoce genéricamente como núcleos activos de galaxias (NAG de ahora en adelante). Para profundizar en las propiedades de cada grupo se recomienda ver Ruano (1992), Fuentes y Krongold (1997), Carrillo (1988), de Diego (1994), Benítez (1998), Ordoñez (1997) y Ramírez (2000).

Mucho se ha avanzado en la comprensión de estos objetos. Aunque el esquema básico de la producción de energía en un NAG se entiende de manera más que aceptable, los detalles de éste aún deben ser trabajados considerablemente. Por ello, estudios como el que aquí se presenta pretenden arrojar algo de luz en el entendimiento del fenómeno NAG.

## 1.2 Definición y Clasificación de un NAG

Según Brecher (1977), las características observables que de manera general debe poseer una fuente para ser clasificada como NAG, son las siguientes:

1. Luminosidades altas, entre  $10^{38}$  -  $10^{47}$  ergs/s.
2. La región de emisión es compacta (típicamente menor al tamaño del Sistema Solar), con un núcleo óptico muy brillante.
3. Emisión no térmica con excesos (relativos a galaxias normales) en las regiones espectrales correspondientes a radio, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y, en ocasiones, en rayos gamma. Sin embargo, los procesos térmicos juegan un papel importante en la emisión de estos objetos, pues es a éstos que se atribuye la emisión conocida como “joroba azul” y que es observada en el ultravioleta y el óptico.
4. Variabilidad en todos los rangos espectrales, en todas las escalas de tiempo y con un rango muy grande de amplitudes.
5. Líneas de emisión muy anchas, del orden de varias centenas a miles de km/s.

Si bien es posible que en algún subtipo de NAG no se detecte alguna de estas características (un ejemplo claro es el de los objetos BL Lac, los cuales sólo muestran un intenso

continuo; e.g. Rieke et al. 1976; Falomo et al. 1994; Fiorucci, Ciprini y Tosti 2004), siempre se satisfacen los puntos 1 y 2.

Las anteriores características pueden explicarse usando las siguientes componentes observables constitutivas de un NAG:

- a) Una fuente central de continuo y que suele representarse por una ley de potencias, con excesos identificados con emisión térmica.
- b) Una región de emisión de líneas anchas (BLR, del inglés *Broad Line Region*, o bien, región de emisión de líneas anchas), que se identifica con una región de gas denso con velocidades altas, situada entre 0.1 y 1 pc.
- c) Una región de emisión de líneas delgadas (NLR, del inglés *Narrow Line Region*, o bien, región de emisión de líneas delgadas), que se identifica con una región de gas de densidad baja y velocidades menores a las presentes en la BLR, situada entre 10 y 100 pc.
- d) Emisión no térmica que, en los objetos radio-emisores (un 10% del total), se encuentra asociada a un plasma que usualmente presenta una estructura característica de lóbulo doble a distancias de kpc o Mpc de la fuente central. Frecuentemente se observa también una fuente compacta de radio en el núcleo a escalas de pc.

La fenomenología de los diferentes tipos de NAG hace suponer que la emisión de estos objetos se origina por el mismo mecanismo. De aquí la importancia de establecer la definición de un NAG como primer paso para comprobar la validez de esta suposición.

La clasificación en subtipos de los NAG busca caracterizar las condiciones físicas de estos objetos (Lawrence 1987; Kellerman et al. 1989; Risaliti y Elvis 2004), más que su apariencia observable. Una de las más utilizadas divide a los NAG en dos grandes grupos, según su emisión en radio (Urry y Padovani 1995; Kellerman et al. 1989). Y es que basta ver el espectro continuo de los cuasares para notar que existe una clara diferencia en la emisión en radio entre *cuasares radio fuertes* y *cuasares radio callados* (ver Fig. 1.1). Esta clasificación se encuentra actualmente en un polémico debate (véase § 1.4).

De manera alternativa suele separarse a los NAG en grupos, dependiendo del ancho de sus líneas de emisión. Así, un NAG cuyo espectro muestra líneas anchas y delgadas se clasifica como NAG tipo I, mientras que uno que solamente muestra líneas delgadas es un NAG de tipo II (Lawrence 1987). Las anchuras de las líneas delgadas son menores a 1000 km/s, mientras que las líneas anchas corresponden a velocidades que pueden llegar hasta unos 10,000 km/s (Antonucci 1993).

### 1.3 El modelo estándar del fenómeno NAG

Los modelos que describen a los NAG deben ser capaces de explicar las propiedades observables vistas en la sección anterior, en función de un número reducido de características físicas generales (por ejemplo, la masa y el momento angular del objeto central, la tasa de acreción, las características de la galaxia anfitriona y su entorno, etc.)

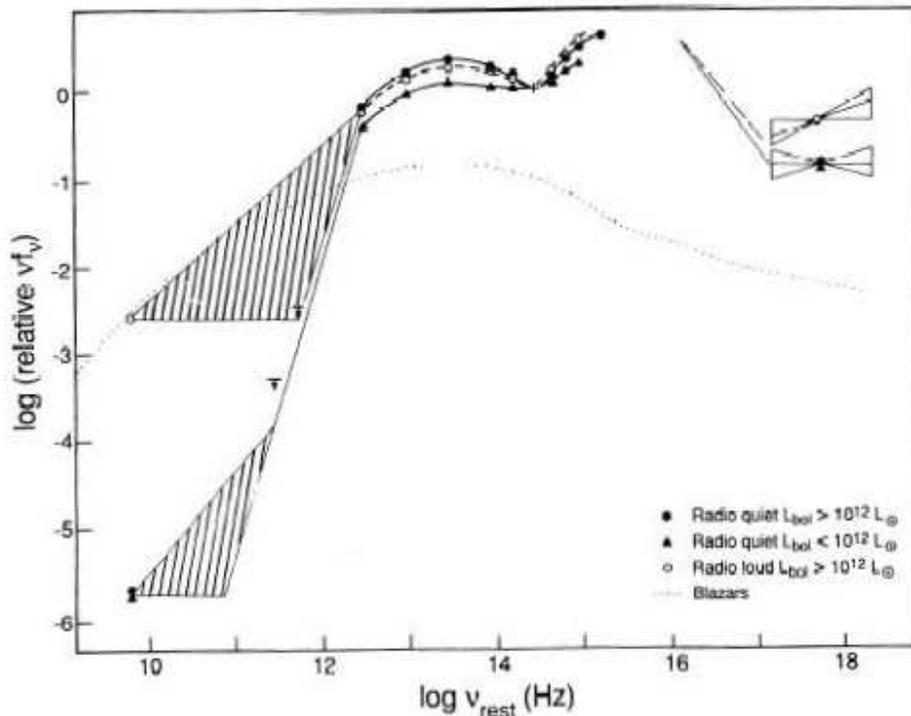


Figura 1.1: Potencia emitida por cuasares típicos, desde el radio hasta los rayos x duros. De acuerdo a lo que se aprecia en la figura, los cuasares pueden ser divididos en dos grandes clases dependiendo de la potencia emitida en radio (relativa al óptico): aquellos con emisión potente (radio emisores) y aquellos con emisión débil (radio callados). Tomado de Bregman 1990.

Por otro lado, los cambios de flujo observados en el continuo de muchos NAG poseen escalas temporales que sugieren una fuente sumamente pequeña (ver Capítulo 1), en algunos casos de horas-luz en el límite óptico y hasta segundos-luz en el límite de rayos X (e.g., de Diego et al. 1998; Kunieda et al. 1990); sin embargo, la zona que produce la variación puede ser sólo una parte de la máquina central.

La luminosidad típica de un NAG es  $\sim 10^{46}$  ergs/s ( $\sim 10^{12} L_{\odot}$ ; Edelson y Malkan 1986), demasiado grande para ser emitida por estrellas, incluso considerando estrellas supermasivas con masas del orden de  $10^5 M_{\odot}$  (Goodman y Tan 2004). Así, para explicar una emisión tan alta, junto con las otras propiedades listadas en § 1.2, se ha tenido que recurrir a modelos de producción de energía no convencionales. Aunque diversos modelos han sido propuestos aquí sólo se presentarán los más sobresalientes.

Una porción importante de la emisión de un NAG se atribuye a fuentes de origen no térmico. Esta suposición se justifica por la apariencia de su espectro continuo, que en mayor o en menor medida se ajusta a una ley de potencias y por el grado muy alto de polarización en la emisión de algunos de estos objetos (e.g. de Diego 1994). Otra parte substancial del continuo lo conforman componentes térmicas que se ajustan a la emisión de un cuerpo negro (e.g. Malkan y Moore 1986; Malkan 1983). Este es el caso del exceso

ultravioleta (Malkan y Sargent 1982; Czerny y Elvis 1987; Wandel y Petrosian 1988; Shang et al. 2004). Esta componente térmica podría ser tan importante en algunos objetos que ésta sería la componente dominante (Bregman 1990). Así, el continuo óptico de los NAG podría estar dominado en algunos casos por la emisión térmica y en otros predominaría la emisión no térmica.

La teoría más difundida y aceptada entre la comunidad astronómica plantea que en el núcleo de una galaxia activa existe un hoyo negro supermasivo ( $10^7 M_{\odot} < M < 10^{10} M_{\odot}$ ; e.g. Shields et al. 2003) rodeado por un disco de material en rotación. Este disco sería la principal fuente de energía, la cual se libera conforme la materia pierde energía y momento angular, hundiéndose en el pozo de potencial del objeto central (e.g. Zeldovich y Novikov 1964; Blandford y Rees 1992; Popovic et al. 2004; Tao y Qian 2004; Goodman y Tan 2004). Es decir, la fuente última de energía en un NAG sería la energía gravitatoria del objeto central. Esta teoría es conocida comúnmente como *Modelo Estándar* (ME de aquí en adelante). En este modelo, el disco de acreción tendría un tamaño de  $\sim 1 - 30 \times 10^{14}$  cm, la región de emisión de líneas anchas estarían a  $\sim 2 - 20 \times 10^{16}$  cm del hoyo negro, el radio interior del toro de polvo estaría  $\sim \times 10^{17}$  cm, la región de emisión de líneas delgadas se extendería a  $\sim 10^{18} - 10^{20}$  cm, los jets son detectados desde  $10^{17}$  cm hasta varias veces  $10^{20}$  cm (ver Urry y Padovani 1995; Wilson 1997; ver Figura 1.2).

Dado que el material que rodea al objeto central debe tener momento angular, resulta natural que la materia se organice en un disco (Czerny y Elvis 1987). Una distribución esférica del material es descartada por ser ineficiente para liberar la energía asociada a un cuasar. Al proceso en que se transporta momento angular hacia la zona exterior del disco, mientras el material cae hacia el objeto central, se le conoce como *acreción*. Aunque el origen de este proceso no se entiende con claridad se puede explicar de la siguiente manera:

Al extraer continuamente energía y momento angular de una partícula que se encuentre inicialmente en órbita circular en torno a un objeto central, ésta empezará a caer hacia este objeto describiendo una espiral. Para poder extraer energía y momento angular de un gas sujeto a un campo gravitatorio se necesita encontrar la manera de redistribuir el momento angular inicial entre las partículas del gas, permitiendo así que algunas caigan en el pozo de potencial. Los discos de acreción brindan esta posibilidad vía la viscosidad del material en el disco. Esto se debe a que cualquier proceso viscoso es capaz de redistribuir momento angular entre los elementos del gas. En estas circunstancias, cada elemento del gas se libera de toda la energía que puede (suponiendo que el gas radia eficientemente) por fricción con otros elementos del gas. Se trata de la fricción en el plano de contacto entre las capas adyacentes de gas, que tiende a frenar el movimiento, provocando que la energía liberada se disipe en forma de calor. De esta manera, la viscosidad hace que el gas pierda energía. Puesto que la única fuente de energía es el potencial gravitatorio, esto quiere decir que el gas se hunde más profundamente en el pozo de potencial. Así, la viscosidad permite convertir, de manera eficiente, la energía potencial (gravitatoria) en radiación (e.g. Shakura y Sunyaev 1973; Wandel y Petrosian 1988; Collin-Souffrin y Dumont 1990; Blandford y Rees 1992; Campbell 2003; Czerny y Elvis 1987; Czerny 2004).

Los parámetros más importantes de los modelos de disco de acreción son la masa del hoyo negro y la viscosidad (e.g. Zeldovich y Novikov 1964; Salpeter 1964; Shakura y Sunyaev 1973; Blandford y Rees 1992). Desafortunadamente, existen diversas fuentes

de incertidumbre relacionadas con la viscosidad, debido a las contribuciones cinemática, turbulenta y magnética, sobre las cuales aún falta una mayor comprensión (e.g. Collin-Souffrin y Dumont 1990; Campbell 2003; Czerny y Elvis 1987; Czerny 2004).

Diversos modelos de disco de acreción han sido propuestos (e.g. San y Malkan 1989; Laor y Netzer 1989; Laor 1990; Czerny y Zbyszewska 1991; Hubeny et al. 2000, 2001). Los modelos actuales proponen que estos discos deben ser ópticamente gruesos y geométricamente delgados (e.g. Malkan y Sargent 1982; Kriss et al. 1999; Blaes y Socrates 2001; Czerny 2004), con un ensanchamiento en la dirección perpendicular al plano del disco muy cerca del objeto central.

Se piensa que el exceso óptico/UV es de origen térmico, procedente de un disco de acreción ópticamente grueso (e.g. Malkan y Sargent 1982; Shang et al. 2004), con el máximo de emisión en el extremo ultravioleta (EUV 100-912 Å; e.g. Mathews y Ferland 1987). En 3C 273 y en PKS 0736+017 se han reportado buenos ajustes al espectro por modelos de disco de acreción (Malkan y Moore 1986; Kriss et al. 1999; Blaes y Socrates 2001).

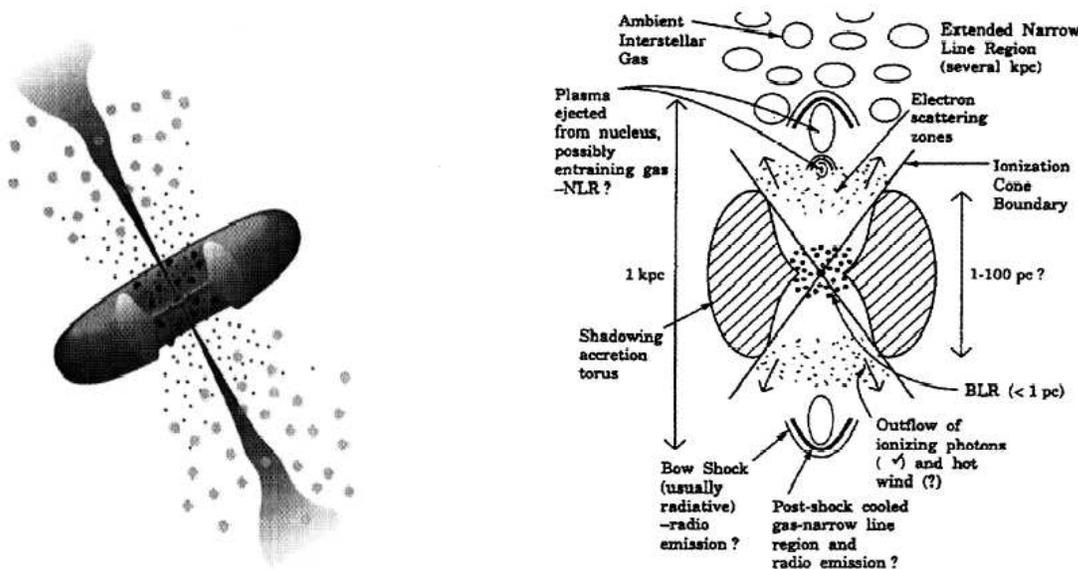
La emisión térmica del disco de acreción es modelada como emisión de cuerpo negro. El modelo más sencillo representa al disco como un cuerpo negro simple. Mientras, en otros modelos más complicados la emisión sería producida por diversos anillos (que conformarían al disco) a diferentes temperaturas; también, suele utilizarse una modificación de estos cuerpos negros *multitemperatura*, al incluir la opacidad por átomos de diversos elementos (Malkan y Sargent 1982; Shang et al. 2004; Blaes y Socrates 2001; Czerny y Elvis 1987; Malkan y Moore 1986; Malkan 1983).

Además de la disipación viscosa en torno a un hoyo negro, hay otro mecanismo de generación de energía: la transformación de masa en energía. Este proceso proviene de la energía de amarre de la materia antes de “caer” al hoyo negro (e.g. Kembhavi y Narlikar 1999). En un hoyo negro de Schwarzschild (i.e., sin rotación),  $\sim 10\%$  de la materia se convierte en radiación, mientras que en un hoyo negro de Kerr (i.e., con rotación) esta eficiencia es de hasta  $\sim 40\%$ .

Si en la región del óptico/UV la contribución del disco de acreción es tan importante como parece ser (el exceso azul así lo sugiere), los estudios de variabilidad óptica nos estarían permitiendo observar el núcleo de estos objetos a una escala 100 veces más pequeña que la región de líneas de emisión anchas (e.g. Czerny y Elvis 1987).

En ocasiones al ME se le añaden flujos de material altamente colimado, desplazándose en dirección perpendicular al plano del disco a velocidades relativistas (Fig. 1.2; Urry y Padovani 1995). En torno a estos flujos de material, o jets, existen varios problemas que deben solucionarse. Algunas de estas dificultades son: averiguar el proceso físico que puede acelerar la materia a velocidades relativistas, o cómo se relacionan los jets con los discos de acreción (Blandford y Znajek 1977; Blandford y Payne 1982; Livio, Ogilvie y Pringle 1999) y cómo se encuentra el balance entre energía cinética y radiativa (Wang et al. 2003). Pero quizá uno de los mayores retos con los que debe lidiar los modelos es explicar el mecanismo mediante el cual puede mantenerse colimado este flujo a lo largo de varios kpc más allá del núcleo (e.g. Tavecchio 2004; Sambruna 2003). La emisión de este jet suele representarse por una ley de potencias (con pendiente negativa). Así, la emisión en el óptico estaría

representada por la suma de la emisión del disco de acreción y la emisión del jet.



(a) Representación de Urry y Padovani (1995).

(b) Representación de Wilson (1997).

Figura 1.2: La estructura básica de un NAG de acuerdo al Modelo Estándar. En este modelo, el fenómeno NAG se explica mediante un hoyo negro central que se encuentra rodeado por un disco de material que lentamente cae hacia él. Además, suelen observarse jets de partículas relativistas. Se cree que en la zona cercana al hoyo negro debería localizarse la región de emisión de líneas. Más allá del disco de acreción, y rodeando a éste, se encontraría un toro de polvo que, en algunos casos, ocultaría la región más interna del disco de acreción y la región de emisión de líneas anchas. El disco de acreción se restringe a dimensiones menores a aquellas de la región de emisión de líneas anchas, es decir, poco menos de un parsec.

Otro ingrediente que suele agregarse al ME es polvo circumnuclear que, en ocasiones, ocultaría la región más interna de un NAG (Sanders et al. 1989; Pier y Krolik 1993; Urry y Padovani 1995 y referencias ahí citadas). Los modelos sugieren que el polvo es transparente en el lejano infrarrojo (Pier y Krolik 1993). En esta región espectral, la radiación tiene posiblemente un origen térmico por granos de polvo (Sanders et al. 1989). La elevada anisotropía de la emisión óptica ha llevado a modelos donde el polvo se distribuye formando un toro (ver Figura 1.2), lo que juega un papel muy importante en la apariencia de un NAG. Sin embargo, recientemente Elvis (2000) ha propuesto un modelo simple basado en el modelo estándar que prescinde de un toro de polvo y, en su lugar, el material absorbedor estaría constituido por un viento. Aunque este modelo también posee sus dificultades, es factible que en un futuro cercano pueda dar mejores explicaciones a los fenómenos observados (e.g. Bottorff 2002; Elvis 2003).

Lo anterior ha llevado a desarrollar investigaciones en el infrarrojo, donde se muestra la posibilidad de que núcleos Tipo I, al estar oscurecidos por el polvo, serían observados

como un núcleo Tipo II (e.g. Bailey et al. 1986; Fabbiano et al. 1986; Hough et al. 1987; Antonucci y Barvainis 1990; McCarthy et al. 1999; Djorgovski et al. 1991). Esto explicaría la existencia de dos tipos de NAG, en cuanto a la emisión de líneas se refiere. Algunas investigaciones muestran que la emisión en el continuo de rayos X en NAG de Tipo II, relativo a los de Tipo I, es consistente con la idea de un núcleo oscurecido (Lawrence y Elvis 1982; Fabbiano et al. 1984; Fabbiano et al. 1986).

Una muestra de la extinción por polvo puede verse en algunos NAG Tipo II. En estos objetos, una fracción de la luz está polarizada y el espectro (en luz polarizada) muestra fuertes líneas anchas parecidas a los NAG de Tipo I (e.g. Antonucci y Miller 1985: el caso de la Sy2 NGC 1068; Antonucci 1984: el caso de la radio galaxia 3C 234).

Por otro lado, algunos autores opinan que la división de NAG en Tipos I y II debería manifestarse en la distribución espectral de energía (“SED”, por sus siglas en inglés), lo que podría ayudar a buscar indicios de objetos de Tipo I en NAG de Tipo II (es decir, NAG no oscurecidos en NAG con oscurecimiento; Risaliti y Elvis 2004). Algunos estudios de espectro-polarimetría indican que para algunos NAG de Tipo II, el flujo de las líneas anchas en ocasiones está más polarizado que el continuo (Tran 1995). Esto podría indicar que además del continuo nuclear hay otra fuente extendida que provocaría, vía dispersión electrónica, polarización reflexiva, donde la emisión que se refleja vendría de la región de emisión de líneas.

Aunque a grandes rasgos el modelo estándar reproduce bastante bien la eficiencia en la producción de energía (Woltjer 1990; Netzer 1990; Osterbrock 1991), se presentan varios problemas teóricos. El más importante es el origen mismo del hoyo negro. Por otro lado, es difícil explicar cómo llega la materia suficiente a la zona del disco para producir la luminosidad observada (en general, tan grande como  $\sim 1M_{\odot}$ /año).

Aunque aún se requiere mucho trabajo para entender los detalles de los procesos que, en el marco del modelo estándar, producen las características observables de un NAG, se confía en que pronto sean resueltas éstas gracias a las nuevas tecnologías que se avecinan.

Por otro lado, la observación de estrellas en la región nuclear ha favorecido al modelo estándar, pues la dinámica de estas estrellas nos permite distinguir la presencia de un objeto compacto, un hoyo negro quizás, en el corazón de galaxias cercanas, incluyendo la nuestra (Eckart y Genzel 1997; Dressler y Richstone 1988; Miyoshi et al. 1995; Statler et al. 1999; Kormendy y Richstone 1995). En algunos otros NAG se han detectado maseres de agua cuya dinámica permite inferir la presencia de un objeto supermasivo en estos objetos (Greenhill 2000; Braatz et al. 2003; Maloney 2002).

### 1.3.1 Modelos de Brotes Estelares

En la actualidad, el modelo estándar es la mejor opción para comprender la fenomenología de un NAG. Sin embargo, existen modelos alternativos que tratan de explicar las propiedades de estos objetos sin recurrir a procesos exóticos (como la existencia de un hoyo negro), sobre todo en objetos de brillo bajo. Uno de estos modelos es el conocido como modelo de brotes estelares. En éste, se propone que las características de un NAG pueden describirse por la formación cuasi-simultánea, o *brotes*, de estrellas (Terlevich et al. 1992; Fernandes

1997; Weedman 1983; Terlevich 1997).

Modelos de este tipo se habían utilizado en los años sesenta (Shklovskii 1960; Field 1964; Pronik 1973), pero fueron desechados debido a que no podían explicar satisfactoriamente las propiedades de los NAG. Sin embargo, Terlevich et al. (1987) volvieron a presentar modelos mejorados en los que la mayor parte de la luminosidad bolométrica emitida se debe a estrellas jóvenes, mientras que las líneas permitidas anchas y su variabilidad son debidas a supernovas y remanentes de supernovas.

Los modelos de brotes estelares siguen presentando muchos problemas a pesar de estas mejoras. Una de las dificultades más importantes es que se requiere de una explosión de supernova al mes para mantener la energía que se observa en cuasares (Terlevich et al. 1992). Otra dificultad es que, si bien algunas supernovas muy luminosas recuerdan en algo las líneas anchas de galaxias Seyferts, el espectro de supernovas y los remanentes de supernova de nuestra galaxia no ajustan bien al espectro de los NAG (e.g. Filippenko 1989; Ohsuga et al. 1999). Adicionalmente, estos modelos no pueden explicar la microvariabilidad ni la presencia de jets.

Algunos modelos que podrían tener más éxito son los modelos que combinan el ME con modelos de brotes estelares. Por ejemplo, Ohsuga et al. (1999) proponen que el material del disco de acreción es “lanzado” a la zona central debido a la presencia de un toro de brotes de formación estelar. Este toro se mantendría en corrotación con el disco y produciría la radiación suficiente como para arrastrar la superficie del disco hacia la zona central. En estos trabajos se supone que la acreción evoluciona en dos pasos (Umemura et al. 1998). Primero, el disco se mantiene estable por el flujo de radiación y, segundo, la superficie del disco cae en avalancha hacia el centro a causa de la pérdida de momento angular debida al arrastre de la radiación sobre esta capa. Algunas observaciones de alta resolución que dan apoyo a estos modelos muestran que las regiones de brotes estelares se presentan frecuentemente formando anillos en torno a la región central. Estas regiones consistirían de agrupamientos compactos de poco menos de 10 pc (Wilson et al. 1991; Forbes et al. 1994; Mauder et al. 1994; Buta et al. 1995; Barth et al. 1995; Maoz et al. 1996; Leitherer et al. 1996).

## 1.4 Objetos radio callados y radio emisores ¿dicotomía real o sesgo observacional?

Si bien los cuasares fueron descubiertos por su poderosa emisión en la banda del radio (Schmidt 1963), poco después se descubrió que no todos poseían una emisión semejante (Sandage 1965). Diversas muestras, seleccionadas ópticamente y observadas en el radio, muestran que solamente del 10 al 40 por ciento de estos objetos presentan una intensa emisión en radio (e.g. Sramek y Weedman 1980; Condon et al. 1981; Marshall 1987; Kellerman et al. 1989; Miller, Peacock y Mead 1990).

Al observar el espectro de emisión del continuo de cuasares queda claro que algunos objetos presentan un exceso de emisión en radio (ver Figura 1.1; Ver además Bregman 1990), a pesar que las características generales del continuo ionizante (es decir, la luminosidad en ultravioleta, rayos X y el índice espectral en óptico-rayos X) son similares (Sanders et al.

1989; ver además Fig. 1.1). Debido a esta característica suele dividirse a los cuasares, así como a prácticamente todos los subtipos de NAG, en fuentes radio emisoras y fuentes radio calladas (ver por ejemplo Kellerman et al. 1989; Stocke et al. 1992; Ivezić et al. 2002).

Bregman (1990) supone que al ser tan parecidos los espectros de ambas clases de objetos sus fuentes deberían ser más o menos la misma. Por el contrario, Wang y Staubert (2003) encontraron que, al modelar discos de acreción y su relación con los jets relativistas, debe existir una dualidad.

En los trabajos que investigan esta *dualidad* se propone que el suave continuo no térmico, que va del radio al infrarrojo en NAG radio emisores, es radiación sincrotrónica producida por los jets relativistas. Algunos de estos fotones sufrirían dispersión Compton inversa hacia altas energías, provocada por los mismos electrones del jet (este caso se conoce como Compton sincrotrónico auto-absorbido; e.g. Rybicki y Lightman 1979). Por su parte, estos trabajos suponen que los NAG radio callados no poseerían jet, con lo cual carecerían de emisión en radio. Sin embargo, algunos estudios han establecido que los objetos radio callados tienen flujos polares que serían compuestos de gas con velocidades sub-relativistas (e.g. Begelman 1993; Barthel 1992; Punsly 1999) e incluso relativistas (Blundell et al. 2003), es decir, jets.

A pesar de su nombre, la emisión en radio de los objetos radio callados no es cero, sino débil al compararle con la emisión de los radio fuertes. Para distinguir a unos de otros regularmente se define el parámetro  $R$ , que representa el cociente de flujos radio-a-óptico (Strittmatter et al. 1980; Kellerman et al. 1989; Falcke, Sherwood y Patnaik 1996). En el caso de Kellerman et al. (1989), estos autores encontraron que los valores de  $R$  (tomando el flujo en radio a 5 GHz y el flujo en óptico en la banda B) se distribuían principalmente entre valores del orden o mayores a 10 y valores menores a 3. Al primer grupo los denominaron radio emisores mientras que al segundo, radio callados. Al resto de fuentes que llegan a encontrarse entre 3 y 10 se les ha dado por llamar *radio emisoras intermedias* (Miller, Rawlings y Saunders 1993; Falcke, Sherwood y Patnaik 1996).

Por otro lado, la distinción entre radio callados y radio emisores se asocia comúnmente con la clasificación de NAG en Tipos I y II (Lawrence et al. 1989). Aunque algunos estudios muestran similitudes generales en el aspecto de líneas de emisión de cuasares, sugiriendo que las condiciones físicas en las BLR son similares (Netzer 1990; Zheng et al. 1997), otros han encontrado diferencias significativas entre las BLR de objetos con y sin emisión en radio (e.g. Baldwin 1997).

Una correlación inversa entre las líneas de emisión del óptico de Fe II y [OIII] parece estar conectada con la distinción entre radio emisores y radio callados (Baldwin 1997; Boroson y Green 1992). Se ha encontrado que los perfiles de las líneas de ionización alta y baja son similares cuando se trata de objetos radio callados (Baldwin 1997 y artículos ahí citados). Francis et al. (1993), Brotherton et al. (1994) y Corbin y Francis (1994) interpretan esto en términos de una componente de líneas de ancho medio muy fuerte en objetos radio emisores. Sulentic et al. (1995) y Marziani et al. (1996) encontraron diferencias de velocidades entre las líneas de C IV y  $H\alpha$ , las cuales muestran diferencias en el comportamiento de objetos radio emisores y radio callados.

La existencia de esta posible dualidad en radio se encuentra en debate. Hay investi-

gaciones que dan soporte a la idea de una modalidad dual (ver por ejemplo Kellerman et al. 1989; Stocke et al. 1992; Ivezic et al. 2002; Boroson 2002), y otras que lo niegan (e.g. Goldschmidt et al. 1992; Cirasuolo et al. 2003; White et al. 2000; Becker et al. 2001; Hooper et al. 1995; Shields et al. 2003; Barvainis et al. 2005).

En todas estas investigaciones suele argumentarse que la idea contraria es errónea debido a sesgos observacionales. Por ejemplo, Goldschmidt et al. (1992) argumentan que los resultados de Kellerman et al. (1989) y de Stocke et al. (1992) se basan en muestras que son completas a tan sólo el 30%. Por otro lado, investigaciones desarrolladas a partir de muestras tomadas del FIRST (White et al. 2000; Becker et al. 2001), en la opinión de Izevic et al. (2002), podrían estar introduciendo sesgos debido a que sólo se incluyen cuasares con emisión en radio potente e intermedia. A su vez, Cirasuolo et al. (2003), basándose en argumentos estadísticos, refutan los resultados de Izevic et al., sugiriendo al mismo tiempo que la dualidad podría ser el resultado de observar tan sólo a los objetos más brillantes.

Boroson (2002) sugiere que esta dicotomía puede deberse a la masa del hoyo negro central, en el sentido que los objetos radio emisores poseen los hoyos negros más masivos. Sin embargo, Shields et al. (2003) encuentran que, en un estudio de la relación hoyo negro-a- bulbo, los hoyos negros para objetos radio emisores y radio callados cubren el mismo rango de masas ( $10^7 - 10^{10} M_{\odot}$ ).

Recientemente, investigaciones sobre microvariabilidad no han mostrado diferencia alguna entre radio emisores y radio callados (de Diego et al. 1998; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005), a pesar de que investigaciones previas habían encontrado el resultado contrario (Jang y Miller 1997; Romero et al. 1999; Gopal-Krishna et al. 2000).

Las investigaciones en torno a una dicotomía de las propiedades en radio de la población de NAG prosiguen impulsadas por preguntas básicas tales como: ¿cuál es la causa de la diferencia entre radio callados y radio emisores? y, de existir en realidad dos poblaciones ¿es fundamentalmente diferente la física de la emisión entre estos objetos?

Las investigaciones sobre el misterio de la dicotomía en radio sobresalen debido a que de comprobarse que ambos tipos de objetos pertenecen a la misma población, bastaría con observar a los objetos con las características extremas para poder caracterizar la maquina central de todos los núcleos activos en su conjunto.

## 1.5 Esquema unificado

En principio, las propiedades de los diferentes tipos de NAG se explican de la misma manera (mediante el ME). Sin embargo, la intensa emisión anisotrópica de los objetos radio fuertes, y la posible existencia de un toro de polvo circumnuclear, hacen que los modelos tengan una dependencia muy fuerte de la orientación, manifestándose en la apariencia del objeto; es decir, las particularidades observables del tipo de NAG que vemos deberían explicarse por efectos secundarios como la masa del hoyo negro y la orientación del jet (e.g. Laor 2000; Boroson 2002; Böttcher y Dermer 2002). Así, para entender lo que son los NAG el primer paso podría ser explicar las principales subclases con modelos que sólo difieran,

precisamente, por la orientación espacial de las fuentes de energía. Esto ha dado origen a los *modelos estándar de unificación* (Antonucci 1993; ver además Urry y Padovani 1995).

Por todo lo que se ha venido exponiendo, no es de sorprender que el principal modelo de unificación investigue la manera de unificar radio galaxias, cuasares y blazares (Urry y Padovani 1995), es decir, NAG radio emisores, dada la emisión fuertemente anisotrópica de estos objetos.

Dada esta emisión anisotrópica, los sesgos observacionales pueden jugar un papel importante al tratar de armar un modelo unificado. Por ejemplo, el efecto de orientación relativista (el llamado *beaming*) podría ser responsable de variaciones rápidas en el nivel de flujo o de las altas polarizaciones y luminosidades que caracterizan a los blazares (Blanford y Rees 1978). Por otro lado, la evolución cósmica también puede ser importante para los modelos unificados, pero ésta ha sido ignorada durante mucho tiempo (Vagnetti y Spera 1994).

En suma, al entender el origen y la magnitud de las anisotropías y el efecto de la evolución cósmica podrían removerse estos efectos y hacer una mejor aproximación a propiedades intrínsecas tales como las masas y el espín de los hoyos negros, la tasa de acreción y la formación y evolución de fuentes individuales. Mientras todos estos estudios continúan, quedamos con la pregunta cardinal en el estudio de los núcleos activos: ¿cuáles son los parámetros fundamentales que gobiernan la máquina central y el poder último en estos objetos?





## Capítulo 2

# Variabilidad de Núcleos Activos de Galaxias.

### 2.1 Introducción.

En el Capítulo 1 se planteó que las propiedades observables del fenómeno NAG implican la producción de luminosidades sumamente altas en regiones extremadamente pequeñas. En términos de liberación de energía por unidad de masa se requiere un mecanismo muy eficiente. La hipótesis más aceptada en la actualidad es la presencia de un hoyo negro supermasivo rodeado por un disco de acreción en el núcleo de estos objetos.

Mientras que por observación directa no se puede resolver la región central de un NAG, los estudios de variabilidad nos permiten analizar las condiciones físicas de estas regiones, en particular, las aquéllas de período corto, es decir, microvariabilidad y ráfagas cobran (Mangalan y Wiita 1993; Wagner y Witzel 1995; Böttcher 1999). Los estudios de altas energías pueden complementar la información extraída de la variabilidad (Pian 2002; Sikora et al. 2001).

La **variabilidad** se define como los cambios en el nivel de flujo ocurridos en cualquier escala de tiempo, desde minutos hasta años (Ghosh y Rao 1992; Qian et al. 1991; Peng y Bruyn 1995; Heeschen 1984; O'Neill et al. 2004; ver además Wagner y Witzel 1995; Ulrich, Maraschi y Urry 1997). Las amplitudes de estas variaciones pueden ser desde pequeñas variaciones de décimas o centésimas de magnitud (de Diego et al. 1998; Gopal-Krishna et al. 2000; Barbieri et al. 1988; McGimsey et al. 1975; Usher, Warnock y Green 1983; Miller, Carini y Goodrich 1989; Carini y Miller 1991; Wagner et al. 1990) hasta excursiones de variabilidad gigante, como es el caso de las variaciones en rayos X, desde factores de 10 hasta cercanos a 60 (Sembay et al. 1993; Morini et al. 1986; Gallo et al. 2004; Boller, Brandt, Fabian y Fink 1997).

Todas las clases de NAG presentan el fenómeno de variabilidad, aunque con diferencias significativas. Por ejemplo, mientras que los blazares ocupan la cola con mayor actividad (e.g. Urry 1996; Trevese et al. 1994), los LINERs y radio galaxias ocupan el lado opuesto (Maoz et al. 2005; Ruano 1992). Incluso, en algunos trabajos se ha llegado a sugerir la

conveniencia de separar a los NAG de acuerdo a la amplitud de las variaciones en: *objetos de gran actividad*, *objetos de actividad moderada* y *objetos con muy poca actividad* (Pica et al. 1988). Sin embargo, una clasificación semejante tendría lugar sólo después de aclarar la dicotomía en la emisión en radio.

Para cuantificar la ocurrencia de variabilidad se utiliza el nivel de actividad (en inglés se conoce como *duty cycle*), descrito como la fracción de tiempo de monitoreo en que se detecta variabilidad (e.g. Romero et al. 1999; Webb y Malkan 2000). Con este nivel de actividad, además, se puede comparar la frecuencia con que se presenta la variabilidad entre diferentes clases de NAG. En los blazares, el nivel de actividad puede ser tan alto como 80% en escalas temporales de horas a semanas (e.g. Carini 1990; Heidt y Wagner 1996; Ghosh et al. 2000). En microvariabilidad de cuasares, el nivel de actividad en escalas temporales de horas se encuentra en  $\sim 15\%$  (Jang y Miller 1997; Stalin et al. 2004; ver además el Capítulo 3).

Las hipótesis desarrolladas para explicar la variabilidad se han dividido en las que la ubican como el resultado de fenómenos extrínsecos a las fuentes y aquéllas que la explican por causas intrínsecas. Sin embargo, los estudios multifrecuencias han aportado evidencias fuertes para afirmar que se trata de un fenómeno intrínseco a los NAG. No sólo se reporta la detección de estos cambios de flujo en cualquier banda del espectro electromagnético donde se observe; además, suele observarse eventos correlacionados de variabilidad en diferentes bandas, como por ejemplo entre el óptico y las bandas del radio (e.g. Wagner y Witzel 1995), los rayos gamma (Wagner et al. 1995) y el infrarrojo (Kidger y de Diego 1992). Sin embargo, la enorme dificultad para coordinar observaciones de un mismo objeto en varios telescopios hace que trabajos de este tipo sean escasos (e.g. Hartman et al. 1996; Kidger y de Diego 1992; Villata et al. 2001; Villata et al. 2004). Por este motivo, en la mayor parte de los estudios se utiliza un solo telescopio, observando en varias bandas del óptico.

Los estudios de variabilidad pueden imponer restricciones a los modelos de producción de energía, pues el origen de la variabilidad debe estar íntimamente relacionado con las condiciones físicas del mecanismo que dan lugar al fenómeno NAG (e.g. Padrielli et al. 1987; Qian et al. 1991; Bondi et al. 1996). La restricción más obvia proviene de la escala temporal en que se desarrolla una variación, pues considerando argumentos causales se impone límites a la dimensión espacial de las regiones emisoras. Así, el tamaño propio  $\Delta x$  de la zona donde ocurre una variación queda acotada por

$$\Delta x \leq \Gamma c \Delta t,$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $\Delta t$  el tiempo que dura la variación, y  $\Gamma$  el factor de Lorentz (e.g. Wagner y Witzel 1995; Marscher y Gear 1985; Begelman, Rees y Sikora 1994; Ulrich, Maraschi y Urry 1997). Los estudios de variabilidad confinan a  $\Delta x$  a menos de un parsec (Sikora et al. 2001; Qian et al. 1991; Koratkar y Blaes 1999). Cabe reiterar que el centro de la región así limitada no corresponde necesariamente a la posición del objeto central, sino que puede tratarse de una zona cualquiera del núcleo activo donde alguna perturbación, como choques o inestabilidades magnéticas o gravitatorias, altera la emisión local (e.g. Mangalam y Wiita 1993; Böttcher 1999).

La división de los cuasares en radio callados y radio emisores (RQQ y RLQ, respectivamente) hace posible estudiar la variabilidad y la relación que ésta tiene con las propiedades

en radio de estos objetos (de Diego et al. 1998; Jang y Miller 1997; Gopal-Krishna et al. 2000; Stalin et al. 2004).

En este Capítulo se revisará brevemente los resultados sobre variabilidad en la emisión óptica de cuasares. La mención ocasional de otras regiones espectrales y otras clases de NAG se hace con el fin de ubicar el presente trabajo en el contexto más amplio de los estudios sobre NAG. El Capítulo se encuentra dividido en las siguientes secciones: primero se da una breve descripción sobre los diferentes tipos de variabilidad. En seguida se presenta los modelos más sobresalientes que intentan explicar estas variaciones. Finalmente, se aborda la posible relación de la variabilidad con la emisión en radio.

## 2.2 Características: escalas de tiempo y de magnitud

De manera general, los estudios reportan que la amplitud de las variaciones está relacionada con la escala temporal en que se presentan (e.g. Rabbette et al. 1998). De acuerdo con esto, en lo sucesivo se considerará la variabilidad dividida en las siguientes categorías:

- a) *Variabilidad de período largo*: las variaciones se desarrollan en escalas de tiempo de meses a años con amplitudes de décimas de magnitud.
- b) *Estallido*: las variaciones ocurren en períodos de meses a años con amplitudes de varias magnitudes.
- c) *Ráfagas*: las variaciones se desarrollan en escalas de tiempo de días a meses, con amplitudes de menores a iguales a los estallidos.
- d) *Microvariabilidad*: la escala de tiempo de la variación es de un día o menos, con amplitudes de décimas o centésimas de magnitud.

En principio, es de esperar que el origen de cada categoría sea diferente; sin embargo, la detección simultánea de varias categorías de variabilidad en una misma fuente hace pensar que las causas pueden estar relacionadas (Heidt y Wagner 1996; Villata et al. 2001, 2004; Clements et al. 2003; Ramírez et al. 2004; Dultzin-Hacyan et al. 1997).

A continuación se describirá brevemente las características más sobresalientes de cada una de las categorías de variabilidad, con un énfasis especial en la microvariabilidad.

### 2.2.1 Variabilidad de período largo.

Los estudios indican que la variabilidad de período largo es universal a todas las clases de NAG (e.g. Webb y Malkan 2000; Stalin et al. 2004; y donde quiera en la literatura). En el caso de los cuasares, la mayor parte ( $\sim 90\%$ ) presenta variaciones con amplitudes del  $\sim 10\%$  o mayores en escalas de tiempo de meses a años (e.g. Cristiani et al. 1996; Di Clemente et al. 1996; Trèvese, Kron y Bunone 2001; Fernandes, Terlevich y Aretxaga 1997; Vanden Berk 2004; Uttley y McHardy 2004). Por comparación, en la región del radio las amplitudes típicas son del  $\sim 10\text{-}20\%$  (Jones et al. 1981).

### 2.2.2 Estallidos.

La amplitud de los estallidos puede alcanzar varias magnitudes. En los blazares suele observarse este tipo de variaciones gigantes. Salvo por la periodicidad, el ejemplo típico de un estallido se reporta en el blazar OJ 287. Los estallidos periódicos de este objeto (con un período de 11.5 años; Pursimo et al. 2000; Qian y Tao 2003; Sillanpää et al. 1996; Valtaoja et al. 2000) presentan las características de lo que uno espera ver en un estallido. Aunque la variación de OJ 287 es el único estallido periódico confirmado, no es la única variación periódica de que se tenga noticia. En el blazar 3C 66A se observó una variación periódica de 65 días con amplitudes entre 32% y 45% (Lainela et al. 1999).

Otros ejemplos de estallidos ópticos fueron reportados en los objetos 3C 279 (con variaciones de 6 a 10 mags; Hudec, Vrba y Luginbuhl 1999; Eachus y Liller 1975) y el BL Lac 0954+658 (que varió por un factor de 6 en cuatro días; Wagner et al. 1993).

En cuasares, la detección de estallidos es poco frecuente, quizás debido a que los cuasares no son monitoreados con tanta frecuencia como los blazares. En la literatura sólo se encuentra el caso del cuasar J051303.94-702250.5 (Clocchiatti et al. 2003), que varió de magnitud 22.2 a 19.4 en la banda R en 3 meses.

En los rayos X son comunes los estallidos en galaxias Seyfert 1 de líneas delgadas (Turner et al. 1999). Ejemplo de esto se encuentra en la galaxia IRAS 13224-3809, cuyo brillo varió por un factor de 57 en dos días (Boller, Brandt, Fabian y Fink 1997) y de 8 en unas cuantas horas (Gallo et al. 2004).

### 2.2.3 Ráfagas.

La escala temporal de las ráfagas va de días a meses (e.g. Webb y Malkan 2000; Romero et al. 1999). Esto sugiere que las zonas aledañas a la máquina central juegan un papel importante en la producción de estas variaciones.

La amplitud típica es de décimas de magnitud (e.g. Webb y Malkan 2000), aunque en algunos casos difícilmente podría alcanzar las 0.05 magnitudes en escalas de tiempo de días (e.g. De Ruiter y Lub 1986).

Los reportes de ráfagas suelen indicar una dependencia de la amplitud respecto a la longitud de onda, en el sentido que las variaciones de mayor amplitud se presentan a longitudes de onda más cortas (e.g. Romero et al. 1999; Webb y Malkan 2000; De Ruiter y Lub 1986).

Son comunes las detecciones de ráfagas en blazares, que se presentan con mayor frecuencia que los estallidos. Los ciclos de actividad en blazares pueden ser tan altos como 80%, en escalas temporales de horas a semanas (e.g. Carini 1990; Heidt y Wagner 1996; Ghosh et al. 2000).

La variabilidad tipo ráfaga también suele reportarse en longitudes de onda del radio y rayos X; en ocasiones se le asocia con variaciones en el ángulo de polarización de la luz polarizada, tanto en radio como en óptico (Moles et al. 1985; Sillanpää et al. 1992; Kikuchi et al. 1988; Takalo et al. 1994; Makino et al. 1989).

### 2.2.4 Microvariabilidad.

En el óptico, la escala de tiempo de la microvariabilidad es semejante a la de las variaciones más rápidas en rayos X (es decir, de minutos a horas), pero las amplitudes son substancialmente menores (Pian 2002; Sponholz y Molteni 1994; O'Neill et al. 2004; Snyder et al. 1980; Tanihata et al. 2000; Miller et al. 2000; Turner et al. 1999).

En el caso de los cuasares, las amplitudes típicas de esta clase de variabilidad son de décimas e incluso centésimas de magnitud, en escalas de tiempo de minutos a horas (e.g. de Diego et al. 1998; Romero, Cellone y Combi 1999; Gopal-Krihna et al. 2000; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005). En estos objetos, sin embargo, los eventos de microvariabilidad óptica más rápidos poseen amplitudes que pueden alcanzar varias décimas de magnitud en unos cuantos minutos (de Diego et al. 1998; Gopal-Krishna et al. 2000; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005). A estos eventos, Gopal-Krishna et al. (2000) los denominaron *spikes* (aunque la traducción literal al español debería ser *puntas*, para el trabajo presente se ha elegido la traducción de *espigas*).

Los primeros reportes de microvariabilidad (Matthews y Sandage 1963; Oke 1967) fueron refutados por la comunidad astronómica al considerar que se trataba de errores instrumentales. Sin embargo, para la década de 1970 se confirmó la detección de microvariabilidad en los blazares BL Lac (Racine 1970) y OJ 287 (Epstein et al. 1972). Toda duda terminó cuando en el blazar OQ 530, Carini, Miller y Goodrich (1990) detectaron un evento de microvariabilidad que pudo ser observado simultáneamente desde dos observatorios diferentes. Estos resultados hacían suponer que variaciones de este tipo debían detectarse en los cuasares (dada la similitud entre estas clases de NAG).

Actualmente, gracias al avance de las técnicas de observación, el uso de CCDs a manera de fotómetros, el mejoramiento en el manejo de datos y la correlación de variabilidad entre el óptico y otras bandas del espectro, ha sido posible establecer que la microvariabilidad es un fenómeno real e intrínseco de los cuasares (e.g. Carini et al. 1989; Carini y Miller 1991; de Diego et al. 1998; Gopal-Krishna et al. 2000; Wagner et al. 1990).

Por otro lado, aunque algunos estudios indican que la ocurrencia de microvariaciones está asociada a un cierto estado de brillo, ya sea máximo o mínimo (e.g. Heidt y Wagner 1996), otras investigaciones encuentran que este fenómeno podría estar relacionado más bien con los períodos de transición entre diferentes niveles del flujo (e.g. Lyutyi et al 1989; Howard et al. 2004; Dultzin-Hacyan et al. 1997).

Como en el caso de los estallidos y las ráfagas, los blazares exhiben mucha microvariabilidad (Heidt y Wagner 1996; de Diego 1990; McFarland et al. 2001; Rabbette et al. 1998; Ghosh et al. 2000). Hasta hace poco más de una década, las investigaciones en torno a microvariabilidad se realizaban típicamente sobre objetos radio emisores (RL por sus siglas en inglés; e.g. Carini 1990; Jang y Miller 1995), por lo que se pensaba que este fenómeno era exclusivo de este tipo de NAG. Esta creencia se acentuaba dado que en núcleos activos radio callados (RQ por sus siglas en inglés), como galaxias Seyfert 1, es muy raro detectar microvariaciones (Dultzin-Hacyan et al. 1993; Miller et al. 2000).

En cuasares, hasta 1997 sólo se había detectado microvariabilidad en objetos RL (Wiita, Gopal-Krishna y Sagar 1993; Jang y Miller 1995; Gopal-Krishna et al. 1993; Eggers, Shaffer

y Weistrop 2000). Estos resultados hacían suponer que las microvariaciones debían tener su origen en fenómenos relacionados con la fuente de emisión no térmica, es decir, los jet relativistas (ver § 2.3.2.1). Sin embargo, Jang y Miller (1997) y de Diego et al. (1998) detectaron microvariabilidad en RQQ y, suponiendo que un cuasar RQ carece de tales jets, fueron favorecidos los modelos que explican la microvariabilidad como el resultado de perturbaciones en el disco de acreción (ver § 2.3.2.2). de Diego et al. (1998) incluso detectaron que este fenómeno es tan común en los RQQ como en los RLQ. Sus resultados han sido confirmados por estudios posteriores (Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005).

Al lector interesado en profundizar en el tema de microvariabilidad, y de variabilidad en general, se le recomiendan los artículos de revisión de Wagner y Witzel (1995) y Ulrich, Maraschi y Urry (1997), así como las investigaciones de tesis realizadas por Benítez (1998), de Diego (1994) y Ramírez (2000).

## 2.3 Modelos de variabilidad.

Los estudios de variabilidad óptica son de primordial importancia, pues si el exceso óptico/UV (la joroba azul) es en efecto emisión proveniente del disco de acreción (Malkan y Sargent 1982; Malkan y Moore 1986; Malkan 1983; Czerny y Elvis 1987; Moles et al. 1985), estos estudios permitirían restringir las condiciones físicas de esta componente. Aunque la emisión del disco puede estar contaminada por el flujo proveniente de la componente cuyo pico de emisión se encuentra en el IR (e.g. Siemiginowska et al. 1995) y por la emisión del jet de partículas relativistas, la escala temporal de estas variaciones nos remite a las regiones cercanas al objeto central (Mangalam y Wiita 1993; Wiita 1996; Ghisellini y Celotti 2002).

En el Capítulo 1 se vio que una fracción importante de la emisión óptica de un RLQ es de origen no-térmica (ver, además, Gear et al. 1985). Esta emisión se atribuyó a la radiación sincrotrón de un jet de partículas relativistas orientado muy cerca de la línea de visión. Una prueba de este tipo de emisión es la alta polarización en el óptico (e.g. de Diego 1994; ver además Gopal-Krishna et al. 2000 y Jang y Miller 1997), así como la correlación en el óptico y el radio de la variabilidad del ángulo de polarización (Moles et al. 1985; Sillanpää et al. 1992; Kikuchi et al. 1988; Takalo et al. 1994).

En el caso particular de la microvariabilidad, los modelos para explicarla se dividen en dos categorías: intrínsecos y extrínsecos. Entre los mecanismos extrínsecos figuran el centelleo interestelar y las microlentes gravitatorias. Los mecanismos intrínsecos se dividen a su vez en dos grupos: los modelos que se relacionan con procesos en el jet relativista y modelos que tratan con perturbaciones en el disco de acreción. A continuación, se revisarán los aspectos más sobresalientes de estos modelos.

### 2.3.1 Mecanismos extrínsecos de la microvariabilidad.

La luz que proviene de un cuasar puede fluctuar a causa del material que va encontrando a su paso. Así, el centelleo interestelar (e.g. Heeschen y Rickett 1987; Rickett et al. 2001) y el fenómeno de lente gravitatoria (e.g. Gopal-Krishan y Subramanian 1991; Hawkins 1993;

Hawkins 1978) han sido invocados para explicar la variabilidad de estos objetos.

En la región espectral del óptico, el centelleo interestelar es descartado para producir variabilidad, ya que sólo afecta a longitudes de onda grandes, en la región del radio (para más detalles al respecto ver Ramírez 2000 y referencias ahí citadas).

Por otro lado, el fenómeno de lente gravitatoria puede ser la causa de algunas variaciones reportadas en el óptico (Wisotzki et al. 1995; Argote 1997). La detección de variabilidad provocada por una lente gravitatoria puede ayudar a determinar el tamaño y el perfil de brillo de un cuasar, así como la distribución de materia compacta a lo largo de la línea de visión (Wambsganss 2001; Richard et al. 2003; Santos et al. 2004; Keeton 2001).

Poco después del hallazgo del primer cuasar múltiple, en 1979 (el objeto QSO 0957+561, Walsh et al. 1979), se sugirió que los objetos compactos en la galaxia-lente producirían a su vez microimágenes (Chang y Refsdal 1979). Aunque se estima que la escala de tiempo de la variabilidad sea de varios años, para el caso en que la fuente cruce una cáustica se espera que la escala de tiempo pueda ser de tan sólo unos meses (e.g. Wambsganss et al. 2000; Wambsganss 2001a, 2001b). A este fenómeno se le conoce como microlentes gravitatorias. Recientemente se ha sugerido que el fenómeno de microlente puede ser generado por subhalos de materia oscura en la galaxia-lente (e.g. Maccio y Miranda 2006).

Inicialmente se esperaba distinguir un evento de lente gravitatoria al detectar una variación acromática, es decir, una variación en la que la forma del espectro continuo se conservara a medida que la variación se desarrolla, pues el fenómeno de lente gravitatoria no produce cambios en el color de la fuente. Sin embargo, dado que el tamaño de la región emisora observada depende de la frecuencia a la que se emite, es decir, a mayor frecuencia de emisión la zona que emite es más pequeña, sería factible observar una variación espectral durante episodios de variabilidad por microlente gravitatoria (Alexander 1995). Para explicar la ocurrencia de microvariabilidad se descarta este fenómeno pues la variabilidad atribuible a microlentes gravitatorias es poco clara (ver Wambsganss 2001a, 2001b). Adicionalmente, los casos de variaciones por lentes gravitatorias son muy pocos (e.g. Wisotzki et al. 1995; Inada et al. 2003; Inada et al. 2006).

Evidencia observacional en contra del modelo de variabilidad por lentes gravitatorias, y por centelleo interestelar, se refiere a la correlación de variabilidad en diferentes bandas (Hartman et al. 1996; Wagner et al. 1995; Uttley y McHardy 2004; Papadakis et al. 2003; Wagner et al. 1993; Wagner 2001; Guibin et al. 1998; Böttcher 1999; Romanova y Lovelace 1996; Li y Kusunose 2000) ya que éstas hacen suponer que la mayoría de las variaciones son de origen intrínseco a las fuentes.

### 2.3.2 Mecanismos intrínsecos de la microvariabilidad

Los modelos de microvariabilidad intrínseca han sido divididos en dos grandes grupos: variabilidad debida a procesos en el jet relativista (e.g. Krishan y Wiita 1994; Böttcher 1999), y variabilidad provocada por perturbaciones en el disco de acreción (Mangalam y Wiita 1993; Krishan y Wiita 1994).

### 2.3.2.1 Procesos en el jet.

Si la emisión no térmica en un RLQ es debida a un jet de partículas relativistas, es de esperar que cualquier perturbación en el jet produzca alteraciones en el nivel de brillo. Las escalas de tiempo involucradas en la dinámica del jet coinciden con las escalas de tiempo correspondientes a ráfagas y microvariabilidad (e.g. Webb y Malkan 2000; Sikora y Madejski 2000). Mediante argumentos de causalidad, estas escalas sugieren que el origen de este tipo de variabilidad debería encontrarse en un lugar bien localizado, y no en el volumen entero del jet.

Los modelos más socorridos explican la variabilidad como el resultado de choques que se propagan a lo largo del eje del jet (estos modelos son conocidos en inglés como *shock-in-jet models*, Heidt y Wagner 1996; Eggers, Shaffer y Weistrop 2000; Webb y Malkan 2000). Los choques se producirían entre nódulos de material nuevo inyectados al jet (conocidos en inglés como *knots*), y grumos e irregularidades de éste (e.g. Blandford y Königl 1979; Gopal-Krishna y Wiita 1992; ver además Fig. 1.2). Algunas observaciones en favor de estos modelos muestran a un jet segmentado, producido quizá por la presencia de estos nódulos (ver Figura 2.1) La microvariabilidad podría generarse cuando los nódulos interaccionan con estas estructuras del jet (Marscher 1996; Marscher, Gear y Travis 1992), o cuando éste interacciona con el medio en que se encuentra embebido (Jang y Miller 1995, 1997; Miller y Noble 1996). Las ráfagas deberían estar relacionadas con la evolución misma de los nódulos.

Los movimientos superlumínicos, detectados en radiofrecuencias (e.g. Bondi et al. 1996), sugieren la existencia de nódulos "relativistas" inyectados al jet. En tal situación, la diferencia de amplitud en diferentes objetos podría depender del ángulo formado entre el eje del jet y la línea de visión (e.g. Stalin et al. 2004). En ocasiones, el resultado observable de estos choques serían ráfagas cuyas curvas de luz presentan un aumento pronunciado, seguidas por una disminución lenta (como se ha observado en el objeto OJ 287, Dultzin-Hacyan et al. 1997).

Como se ha mencionado, la correlación de variabilidad entre diferentes bandas representa una oportunidad excelente para comprobar los modelos de producción de energía. Por ejemplo, en los modelos de choques se espera que la emisión de rayos gamma sea el resultado del efecto Compton inverso auto-absorbido en la región interior del jet, quizás en una región cercana a la base del mismo (Böttcher 1999; Hartman et al. 1996; Romanova y Lovelace 1996; Li y Kusunose 2000). En una situación semejante debería observarse una relación entre las variaciones a bajas y altas frecuencias. En los objetos 3C 279 y PKS 0420-014 se ha observado variaciones en el óptico acompañadas de niveles de brillo por arriba de lo normal en la región de los rayos gamma (Hartman et al. 1996; Wagner et al. 1995; Böttcher 1999). Por otro lado, existen reportes de variaciones correlacionadas en el óptico y el radio (e.g. Wagner et al. 1993; Wagner 2001; Guibin et al. 1998).

La cuasiperiodicidad que ocasionalmente se reporta (e.g. Heidt y Wagner 1996) se puede explicar suponiendo que los nódulos se desplazan siguiendo las líneas de campo magnético a lo largo del eje del jet, describiendo una hélice y produciendo lo que se conoce como efecto faro (e.g. Gopal-Krishna y Wiita 1992).

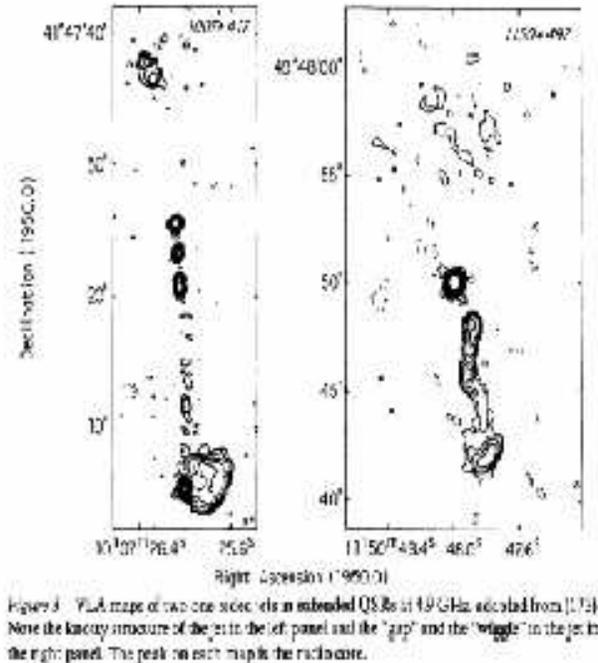


Figura 2.1: Las observaciones en radio nos dan información sobre la estructura de nódulos en un jet de partículas relativistas. De acuerdo a los modelos, esta apariencia sería el producto de la interacción de material nuevo que es inyectado al jet e irregularidades del mismo. En el panel derecho puede verse que la interacción del jet con su entorno puede generar alteraciones en la emisión. Tomado de Wilson 1997.

### 2.3.2.2 Procesos en el disco de acreción

Mucha de la energía emitida por un NAG proviene del disco de acreción (para mayores detalles sobre discos de acreción se recomienda ver Koratkar y Blaes 1999). En tal caso, es de esperar que las perturbaciones ocurridas en éste, se traduzcan en variabilidad óptica (Krishan y Wiita 1994; Galeev, Rosner y Vaiana 1979; Liang y Thompson 1979; Takalo et al. 1994; Sillampää 1992).

Las variaciones de período largo podrían ser explicadas como el resultado de las pulsaciones del disco pues las escalas temporales corresponden a los períodos térmicos del disco (e.g. Vila 1979; Webb y Malkan 2000; Miller et al. 2000; Pereyra et al. 2006). Por otro lado, las variaciones de período corto podrían tener su origen en la ocurrencia de manchas calientes, similares a las manchas solares, en la región interna del disco, con lo cual las escalas temporales estarían dominadas por los períodos dinámicos del disco (e.g. Krishan y Wiita 1994; Galeev, Rosner y Vaiana 1979; Liang y Thompson 1979; Webb y Malkan 2000). En este caso, las variaciones podrían generarse cuando una mancha es eclipsada por una región más externa del mismo disco (e.g. Carrasco, Dultzin-Hacyan y Cruz-González

1985).

Otros modelos basados en el disco de acreción explican la variabilidad de período corto en Rayos X y óptico/UV, e incluso en rayos gamma, como el resultado de reconexiones magnéticas en la corona del disco (Krishan y Wiita 1994; Miller et al. 2000; Pineault 1977; Pineault 1981; Abramowicz et al. 1991; Zhang y Bao 1991; Wiita y Chakrabarti 1991; Wiita et al. 1992; Mangalam y Wiita 1993; Sponholz y Molteni 1994; O’Neill et al. 2004).

### 2.3.2.3 Las fallas

En cuanto a las observaciones, los resultados son contradictorios. Mientras que algunos estudios concluyen que los modelos basados en el disco de acreción son los más indicados para explicar la variabilidad de período corto y largo (Vanden Berk et al. 2004; Helfand et al. 2001; Cristiani et al. 1996; de Diego et al. 1998; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005), otros más encuentran que los modelos de jet son los más convenientes (Gopal-Krishna et al. 2005; Jang y Miller 1997; Gopal-Krishna et al. 2000; Romero et al. 1999; Rabbette et al. 1998; Miller y Noble 1996; Eggers, Shaffer y Weistrop 2000; Enya et al. 2002; Heidt y Wagner 1996; Pica et al. 1982; Jang y Miller 1997; Romero et al. 1999). Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se basan en resultados cualitativos, por lo que se requiere más resultados cuantitativos (sobre fuentes individuales) que permitan desarrollar mejores modelos (e.g. Mangalam y Wiita 1993; Vanden Berk et al. 2004).

Los modelos de jet no pueden explicar todos los eventos de microvariabilidad observados (e.g. Howard et al. 2004; Wagner et al. 1993). Un problema serio de los modelos basados en el jet es que se requieren temperaturas de brillo muy grandes para explicar las observaciones ( $\sim 10^{14}$  K; e.g. Wagner et al. 1993; Horiuchi et al. 2004; Tingay et al. 2001). Esta temperatura de brillo (mucho mayor que la temperatura de brillo esperada teóricamente  $\sim 10^{12}$  K; e.g. Tingay 2001 y artículos ahí citados) suele explicarse mediante el direccionamiento por efecto Doppler, el cual concentraría la emisión en una dirección privilegiada, amplificando la emisión real (Rybicki y Lightman 1979; Lahteenmaki y Valtaoja 1999). Lamentablemente, para explicar las observaciones se requiere un factor de Lorentz mayor al calculado teóricamente (e.g. Koide et al. 2000). Adicionalmente, este efecto relativista requiere de ángulos muy pequeños entre el eje del jet y la línea de visión, lo que no sólo influye en la luminosidad y la longitud de onda de la emisión, sino también en la amplitud y la escala temporal de las variaciones (e.g. Stalin et al. 2004).

La detección de jets en RQQ (e.g. Blundell y Beasley 1998; Blundell y Rawlings 2001; Blundell, Beasley y Bickell 2003), y la posible simbiosis entre el jet y el disco de acreción (Takeuchi y Mineshige 1997), hacen factible pensar que cualquier evento que perturbe el disco se manifieste en el jet (Wiita 2005). En tal caso podría observarse variaciones que fueran la mezcla de la emisión de estas dos componentes básicas de un cuasar.

Un paso importante para profundizar en la comprensión de los mecanismos que tienen lugar en estos objetos es, sin duda, aclarar la relación que guardan la emisión en radio y la generación de variabilidad.

## 2.4 Variabilidad y dicotomía.

Para caracterizar los fenómenos relacionados con la acreción sobre el hoyo negro de un NAG, un aspecto importante es determinar si la dicotomía observada en radio se deriva de una diferencia física real o si sólo se trata de un efecto de selección. Los estudios de variabilidad sobre cuasares representan una herramienta útil para responder a esta pregunta, pues al investigar las propiedades en radio de la microvariabilidad en el fondo se investiga si existe alguna diferencia entre los procesos físicos de los objetos RQQ y RLQ.

Las investigaciones que se han desarrollado para discriminar si las variaciones observadas se producen en el disco de acreción o en el jet relativista básicamente se apoyan en la hipótesis de que los NAG RL poseen un jet y los RQ, no (entre otros, Vanden Berk et al. 2004; Helfand et al. 2001; Cristiani et al. 1996; de Diego et al. 1998; Jang y Miller 1997; Romero et al 1999; Gopal-Krshna 2000; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005; este trabajo). Con ello, si las variaciones se producen en el jet se debería detectar un nivel de actividad mayor en los objetos radio emisores.

### 2.4.1 Microvariabilidad.

Como se ha mencionado, hasta hace apenas diez años la microvariabilidad sólo se había detectado en RLQ y en NAG típicamente radio emisores. Este hecho provocó la creencia de que las propiedades en radio eran determinantes en la generación de microvariabilidad. Sin embargo, estudios realizados en la última década detectaron microvariabilidad en cuasares radio callados, por lo que el fenómeno parecería ser independiente de la emisión en radio (e.g. de Diego et al. 1998; Jang y Miller 1997; Romero et al 1999; Gopal-Krshna 2000; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005; este trabajo). Más aun, parecería ser que estadísticamente el nivel de actividad es similar en RLQ y RQQ (e.g. de Diego et al. 1998; Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005). Adicionalmente, se ha detectado radio jets en RQQ (Blundell y Beasley 1998; Blundell y Rawlings 2001; Blundell et al. 2003; ver además Stalin et al. 2004 y artículos ahí citados). Esta evidencia indica que la máquina central de ambos tipos de objetos debe ser la misma, o muy similar.

La validez de esta hipótesis queda de manifiesto al comparar la forma del espectro continuo de RQQ y RLQ (ver la Fig. 1.1), la cual sólo difiere cualitativamente en la emisión en radio. En ambos tipos de cuasar la emisión en el óptico e infrarrojo es muy parecida, y se puede representar como una ley de potencias con excesos de emisión en algunas bandas (Francis et al. 2000; Whiting, Webster y Francis 2001). No obstante, algunos estudios sobre líneas de emisión sugieren que debe existir alguna diferencia entre objetos RQ y objetos RL (Moles et al. 1985; Marziani, Sulentic, Dultzin-Hacyan et al. 1996).

Si bien algunas investigaciones reportan una incidencia mayor de microvariabilidad en cuasares radio emisores (Gopal-Krishna et al. 2005; Jang y Miller 1997; Gopal-Krishna et al. 2000; Romero et al. 1999; Rabbette et al. 1998; Miller y Noble 1996; Eggers, Shaffer y Weistrop 2000), sus resultados están basados en muestras muy poco representativas. En ocasiones comparan objetos RQ con objetos que por definición son variables, como los blazares. Es posible que estos sesgos invaliden sus conclusiones.

Por ejemplo, Eggers, Shaffer y Weistrop (2000) encontraron microvariabilidad en siete de diez RLQ, pero sin contra-muestra alguna. En el caso de Jang y Miller (1995,1997), su muestra está claramente sesgada al contar con 90% de Sy1, objetos en los que difícilmente se detectan microvariaciones en el óptico. Adicionalmente, en los trabajos de Jang y Miller los objetos RQ se encuentran claramente sesgados hacia objetos a corrimientos al rojo más grandes que los RL, lo que puede afectar sus resultados.

En contraste, sobresale la muestra seleccionada por de Diego et al. (1998) para su estudio comparativo entre RQQ y RLQ (ver capítulo 3). El cuidado que tuvieron al escoger los objetos de sus muestras les llevo a obtener resultados confiables sobre la microvariabilidad y su no dependencia de la radioemisión.

### 2.4.2 Variabilidad de períodos intermedio y largo.

En cuanto a la variabilidad de período largo y las ráfagas, aunque algunos estudios señalan que RQQ y RLQ varían de manera similar (e.g. Uttley y McHardy 2004; Vanden Berk et al. 2004; Helfand 2001; Cristiani et al. 1996), otras investigaciones encuentran que sí debe existir una dependencia con la emisión en radio (Enya et al. 2002; Rabbette et al. 1998; Heidt y Wagner 1996; Pica et al. 1982).

Vanden Berk et al. (2004) reportaron, usando una muestra de 25 000 cuasares (extraídos del SDSS), que los RLQ sólo son marginalmente más variables que los RQQ. Cristiani et al. (1996) encontraron el mismo resultado en una muestra de 486 cuasares.

Por otro lado, Enya et al. (2002) encontraron una clara división entre dos tipos de fuentes: aquéllas que varían con amplitudes mayores a 22.5% (los RL), y las que lo hacen con amplitudes menores a 7.5% (los RQ). Por su lado, Rabbette et al. (1998) y Heidt y Wagner (1996) concluyeron que no había evidencia de variabilidad de período intermedio con amplitudes mayores a 0.1 mag en ninguno de los cuasares radio callados que observaron. Pica et al. (1982) reportaron que tres cuartas partes de los RQQ de su muestra (31 fuentes en total) mostraban variaciones ópticas.

## 2.5 Características espectrales de la variabilidad

Aún no ha sido posible establecer el origen de la microvariabilidad, por lo que éste continúa siendo una de las principales interrogantes en los estudios sobre dicotomía en radio. El dilema en estos estudios sobre dicotomía reside en saber si ésta se debe a diferencias físicas entre los RQQ y los RLQ, o si sólo se debe a sesgos observacionales. Se pretende, entonces, que en los estudios sobre variabilidad se pueda acotar los modelos de producción de energía de un NAG (requisito para saber cómo se producen las microvariaciones) y con ello establecer si se trata de una sola población o no. En este sentido, los resultados han ido convergiendo a la idea de una población única de cuasares, donde muchos eventos de microvariabilidad serían producidos en el disco de acreción e intensificados por un jet relativista (ver Wiita 2005).

Ahora, para avanzar en la comprensión de la variabilidad y su relación con la emisión

en radio, es necesario estudiar el cambio en la forma del espectro durante períodos de variabilidad, de preferencia comparando las variaciones espectrales de RLQ y RQQ.

Dado que la forma del espectro continuo de un NAG debería estar íntimamente relacionada con el mecanismo o los mecanismos de emisión, o la combinación de ellos, cualquier evolución espectral debería estar relacionada con los cambios en las condiciones físicas de este(estos) mecanismo(s).

La forma del espectro suele describirse mediante el índice espectral,  $\alpha$ , que se define como la pendiente del espectro de energías en un plano log flujo-log frecuencia y se deriva de un conjunto de medidas fotométricas en dos o más bandas (e.g. Massaro y Trevese 1996; de Diego et al. 1998). Se dice que un espectro es más duro o más azul que otro cuando la pendiente es más positiva.

La mayoría de los reportes sobre evolución espectral indican que al presentarse una variación la amplitud es mayor en las longitudes de onda más cortas (Grandi et al. 1992; O'Brien et al. 1988; Pica y Smith 1983; Barbieri et al. 1988; Neugebauer et al. 1989; Cutri et al. 1985; Vanden Berk et al. 2004; Di Clemente et al. 1996; Gear et al. 1986; Papadakis et al. 2002). En estas observaciones (de variabilidad en el óptico) suele reportarse una correlación entre  $\alpha$  y el nivel de brillo, en el sentido de que aumentos en brillo conllevan un endurecimiento del espectro, mientras que si el brillo disminuye el índice espectral se hace más negativo (Lawrence y Papadakis 1993; Green, McHardy y Lehto 1993; Rabbette et al. 1998; sin embargo, ver Ramírez et al. 2004). También en la región UV se ha observado este comportamiento (Hanson y Coe 1985), lo cual no es de sorprender dada la relación tan íntima entre el óptico y el UV. Esta manera de variar es típica de objetos tipo blazar (por ejemplo BL Lac, Papadakis et al. 2003; Heidt y Wagner 1996; Papadakis et al. 2002).

Aunque en la mayoría de los reportes la relación entre el nivel de flujo y  $\alpha$  es clara, no siempre es simple. Por ejemplo, Lawrence y Papadakis (1993) y Green, McHardy y Lehto (1993) encontraron que para variaciones de 0.5 horas, las variaciones en la banda B son seguidas en tiempo por variaciones en la banda R y éstas a su vez, por variaciones en I. Por otro lado, Webb y Malkan (2000) reportaron que el 60% de las variaciones que detectan se dan con mayor frecuencia en el filtro azul (4200-4800 Å), mientras que el 40% restante se detectó en el filtro rojo (7150- 9000 Å).

De manera general, los modelos de generación de energía en núcleos activos, tanto térmicos como no-térmicos, predicen que el espectro se comportará de esta manera. El espectro de los cuasares suele explicarse como la mezcla de diferentes componentes con diferentes orientaciones respecto a la línea de visión (e.g. Czerny y Elvis 1987; Elvis et al. 1986; Brown et al. 1989(a), 1989(b); Stalin et al. 2004). Brown et al. (1989b) encontraron que las similitudes entre los cuasares con variabilidad violenta en el óptico (OVV, por sus siglas en inglés) y los BL Lac (observacionalmente sólo difieren en que los BL Lac no poseen líneas de emisión y exceso óptico/UV) podrían explicarse si los OVV están compuestos de emisión tipo BL Lac más otro (u otros) tipo(s) de emisión. En todos estos casos, los cambios de la componente variable (es decir, la componente BL Lac) llevarían a un endurecimiento del espectro al aumentar el brillo de los objetos (e.g. Webb y Malkan 2000; Vanden Berk et al. 2004; Di Clemente et al. 1996).

En ,

Se piensa que el exceso en la región del óptico/UV en los cuasares "normales" es una componente aparte de la emisión no térmica que va del infrarrojo a los rayos X (e.g. Czerny y Elvis 1987) y que posee un índice espectral igual a -1 (e.g. Elvis et al. 1986; Brown et al. 1989(a), 1989(b)). Un objeto por demás extraño es IRAS 13349+2438, en el que parecen mezclarse un blazar y un cuasar radio callado (Rabbette et al. 1998). Una mezcla de diferentes clases de NAG sólo se había encontrado en los objetos clasificados como blazar. Si la variabilidad es producida por la primera componente, esto conllevaría un endurecimiento del espectro total al aumentar el brillo.

Al observar en una banda fija, en el marco de referencia del observador se observa diferentes regiones espectrales para diferentes corrimientos al rojo,  $z$  (e.g. Giallongo, Trevese y Vagnetti 1991; Vanden Berk et al. 2004; Webb y Malkan 2000). Por ejemplo, Cristiani et al. (1996) encuentran que para  $z \leq 1$ , los cuasares son significativamente menos variables que a altos corrimientos al rojo. Si se presenta mayor actividad a mayores frecuencias en el marco de referencia del objeto, habría una dependencia de la variabilidad con  $z$ , en el sentido que a mayor corrimiento al rojo las amplitudes de las variaciones serían mayores (Vanden Berk et al. 2004; Di Clemente et al. 1996; Hook et al. 1994; Giallongo, Trevese y Vagnetti 1991; Bian, Huang y Zhou 2001; Trevese et al. 1994).

Los estudios evolutivos deben considerar la relación variabilidad- $z$ , pues si se mostrara que ésta no se debe a una mayor actividad a altas frecuencias, se comprobaría que hay una mayor actividad en épocas más tempranas (Giallongo, Trevese y Vagnetti 1991). En particular, de Diego et al. (1998) no encontraron evidencias de una dependencia entre la microvariabilidad y  $z$ .

Por otro lado, algunos estudios de variabilidad de período largo a menudo reportan que los objetos radio callados con mayor luminosidad,  $L$ , son los menos variables (Vanden Berk et al. 2004; Di Clemente et al. 1996; Trevese et al. 1991; Hook et al. 1994; Bian, Huang y Zhou 2001; Angione y Smith 1972; Cristiani et al. 1996). Esta relación también ha sido detectada en la región UV y en rayos X (O'Neill et al. 2004; Bian y Zhao 2003; Lu y Yu 2001).

Para explicar esto último se han propuesto varios mecanismos. En términos de emisión térmica del disco de acreción, Di Clemente et al. (1996) y Trevese et al. (1994) mostraron que entre mayor sea la temperatura del disco las variaciones en el flujo serán menores. Por otro lado, los modelos de estallidos de supernovas predicen que la amplitud de las variaciones debería ser menor para los objetos más luminosos (Hook et al. 1994; Bian, Huang y Zhou 2001; Angione y Smith 1972; Cristiani et al. 1996). Aquí es donde se encuentra la principal falla de estos modelos, pues no se observa una relación como la esperada ( $\frac{\Delta L}{L} \sim L^{-\frac{1}{2}}$ ; Fernandes et al. 2000).

En eventos de microvariabilidad, muchas investigaciones reportan una tendencia a que las variaciones de mayor amplitud se presenten en los objetos con mayor  $z$ , con menor  $L$ , y a menor longitud de onda (Heidt y Wagner 1996; Dultzin-Hacyan et al. 1997; Hartman et al. 1996; Hudec, Vrba y Luginbuhl 1999; Eachus y Liller 1975). Sin embargo, de Diego et al. (1998), no encontraron evidencias a favor de estas relaciones.

Si bien el endurecimiento del espectro a niveles altos del brillo podría explicar la relación variabilidad- $z$ , con el tiempo se ha ido acumulando evidencia donde se muestra que

las curvas de luz de los cuasares pueden presentar una estructura muy diversa (Ramírez et al. 2004; Papadakis et al. 2002; 84; Heidt y Wagner 1996; Ghosh et al. 2000; Brown et al. 1989b; Malkan y Moore 1986; Massaro et al. 1998; Pica y Smith 1983; ver además Capítulo 6). Por este motivo, la generalización de decir que un aumento de brillo implicará un endurecimiento del espectro no es del todo correcta. La gamma de variabilidad espectral que se reporta en la literatura no apoya los modelos más comunes para explicar las variaciones, es decir, variabilidad de origen no-térmica (modelos de jet) y variabilidad de origen térmico (modelos de disco de acreción). Esto hace necesario más estudios de variabilidad espectral sobre muestras realmente representativas de las diferentes clases de NAG.

Quizás el ejemplo más representativo de un comportamiento “anómalo” es el reportado por Ramírez et al. (2004) y por Clements et al. (2003) para el objeto PKS 0736+017. En el caso de Ramírez et al. (2004), el espectro del objeto se tornó más rojo al aumentar el flujo para todas las escalas de tiempo registradas, desde horas hasta años.

Incluso en objetos donde se espera observar variaciones espectrales "normales" se ha llegado a observar variaciones anómalas, como en el caso del objeto BL Lac, que ha presentado aumentos de brillo acompañados de enrojecimientos (Papadakis et al. 2002; Benítez y Ramírez 2006).

Los estudios multifrecuencia cobran particular importancia en este contexto (Hartman et al. 1996; Wagner et al. 1995; Uttley y MacHardy 2004). Como se verá en los Capítulos 5 y 6, y se mencionó líneas arriba, en este tipo de investigaciones las observaciones deben realizarse lo más cercanas en el tiempo como sea posible, pues si algún evento de variabilidad tiene un retraso entre las diferentes bandas los resultados podrían ser afectados.

Aunque existen casos bien estudiados del fenómeno de variabilidad (como las campañas de observación de BL Lac organizadas por el grupo internacional WEBT; e.g. Villata et al. 2004), la enorme diversidad de comportamientos reportados, en ocasiones contradictorios, no permite dar conclusiones definitivas sobre las condiciones físicas de la máquina central de un NAG.

Quizás uno de los aspectos más importantes que deben cuidar las investigaciones es hacer una buena selección de los objetos que conformarán la muestra a estudiar (Vanden Berk 2004; Bahcall 1980; Trevese et al. 1994; de Diego et al. 1998), pues de lo contrario se podría obtener resultados erróneos. Por ejemplo, la relación magnitud- $z$  está sesgada por la variabilidad (Bahcall 1980), lo que conlleva efectos sobre la función de luminosidad y su dependencia con  $z$  (Trevese et al. 1994). La posible influencia de estos efectos sólo se logra eliminar seleccionando una muestra adecuada de objetos (e.g. de Diego et al. 1998), o mediante las muestras constituidas por cientos o miles de objetos (e.g. Vanden Berk et al. 2004), aunque aún en éstas los sesgos pueden estar presentes. Vanden Berk et al. (2004), por ejemplo, tratan de evadir el efecto introducido por la dependencia con el brillo, así como la dependencia con el corrimiento al rojo, agrupando sus datos por objetos, primero con  $z$  similares y después con  $L$  semejantes.

Hacer una buena selección de objetos es particularmente importante en el caso de los estudios sobre variabilidad y en aquellos que tratan de clasificar a los NAG. Cimatti, Zamorani y Marano (1993) realizaron observaciones en tres filtros en el óptico para saber

si era factible clasificar a los cuasares por sus propiedades de variabilidad. El resultado de su investigación indica que la variabilidad puede servir como un criterio de clasificación auxiliar, mostrando que hasta un 65% de objetos variables en sus muestras son cuasares. Si bien se ha descubierto algunos cuasares a través de la variabilidad (Trevese et al. 1994; Warren et al. 1999), la dependencia con  $L$  y  $z$  hace difícil considerarla como un buen parámetro, debido a los posibles sesgos introducidos.

Para seleccionar los objetos de la presente investigación se procuró tener el mayor control posible sobre la mayor cantidad posible de las características señaladas a lo largo de este Capítulo; como resultado se obtuvo una de las mejores muestras para estudios comparativos entre RQQ y RLQ. Las muestras de cuasares, una de RQQ y otra de RLQ, se eligieron pareando en  $L$  y  $z$  a los objetos de cada muestra. Una muestra similar fue utilizada por primera vez por de Diego et al. (1998), en lo que constituyó el origen del presente proyecto de investigación y que conforma el Capítulo 3 del trabajo que ahora se presenta. En el Capítulo 4 se reporta los resultados del análisis estadístico de comparación multifrecuencias de RLQ y RQQ cuando se presentan eventos de microvariabilidad. En el Capítulo 5 se muestra un estudio de variabilidad espectral sobre los objetos que se discuten en el Capítulo 4.

Antes de seguir adelante es importante hacer notar que si bien los resultados de todas las investigaciones dedicadas a estudiar el fenómeno NAG no han cubierto las expectativas que se tenía, al buscar una explicación a los problemas arriba mencionados se ha obtenido el beneficio de una comprensión mayor de estos objetos. Conforme las técnicas estadísticas empleadas mejoran y las observaciones se refinan, los modelos (incluso modelos alternativos al modelo estándar, como el modelo de brotes estelares) se han visto también mejorados.





## Capítulo 3

# Estudio comparativo de microvariabilidad entre dos muestras de cuasares: propiedades en radio de la microvariabilidad.

Este Capítulo tiene como finalidad ubicar al trabajo que se presentará en los Capítulos 4 y 5 en el contexto de los estudios comparativos de la microvariabilidad en cuasares. Tales capítulos derivan de manera natural de la tesis de licenciatura sobre microvariabilidad de Ramírez (2000). Aunque fue adaptado del trabajo de de Diego et al. (1998), aquí se presenta sólo un extracto y se ha introducido algunos comentarios adicionales para mayor claridad del trabajo subsiguiente (ver por ejemplo § 3.4.1.4, donde se ha anexado un breve, pero importante, comentario en torno al nivel de actividad calculado de la manera en que se hace en otros trabajos, a partir de los datos de la Tabla 3.3).

En este Capítulo se presenta el estudio fotométrico en la banda V realizado sobre una muestra de 17 cuasares con emisión puntual en radio (CRLQ) y 17 cuasares radio callados (RQQ). Las observaciones se realizaron entre 1996 y 1997 con el telescopio de 1.5 metros del Observatorio Astronómico Nacional ubicado en San Pedro Mártir, Baja California, México.

Los objetivos de esta investigación fueron: confirmar la existencia de microvariabilidad en objetos sin emisión en radio, y comparar las propiedades (amplitud y frecuencia temporal) de la microvariabilidad en ambos tipos de cuasares. Para ello, la selección de objetos se realizó de manera que se evitaran al máximo los efectos de selección. El método estadístico, basado en el análisis de varianzas (*ANOVA*), y el procedimiento de observación empleados muestran que las microvariaciones en RQQ pueden ser tan frecuentes como en CRLQ. Se discutirá brevemente las implicaciones sobre los modelos físicos de microvariabilidad.

## 3.1 Introducción

La microvariabilidad de cuasares radio emisores es un fenómeno aceptado como real desde finales de la década de 1980 (ver Capítulo 2 de este trabajo; Wagner y Witzel 1995). Hasta 1995, los monitoreos sólo habían mostrado evidencia marginal de microvariabilidad en cuasares radio callados y radio moderados (Gopal-Krishna, Wiita y Altieri 1993; Gopal-Krishna, Sagar y Wiita 1993, 1995; Jang y Miller 1995).

Dado que los modelos de producción de energía para cuasares sugieren que la mayor parte de la emisión en los RLQ se produce en un jet de partículas relativistas (ver Capítulos 1 y 2; Bregman 1992) y que en los RQQ no existía, hasta hace poco tiempo, evidencia de un jet o ésta era muy débil (Antonucci, Barvanis y Alloin 1990; Miller, Rawlings y Saunders 1993; Kellerman et al. 1994), muchos de los modelos más desarrollados para explicar microvariabilidad se basan en mecanismos relacionados con el jet.

Sin embargo, en 1997 Jan y Miller anunciaron las dos primeras detecciones de microvariabilidad en RQQ. En su estudio encontraron que la microvariabilidad debía ser un fenómeno más común en RLQ que en RQQ. De los diez RQQ que observaron, solamente 2 mostraron evidencias de microvariaciones, mientras que en cinco de los 7 RLQ monitoreados se presentó el fenómeno. Esto sugería, o bien que en la emisión de RQQ debía estar involucrado un jet, o bien que el origen de la microvariabilidad debía encontrarse en el disco de acreción.

Para discernir el origen de estas variaciones es necesario comparar las propiedades en radio de la microvariabilidad en ambos tipos de objetos. Tal comparación debe realizarse con objetos que sean lo más representativo posible del grupo al que pertenecen, RLQ o RQQ. Simultáneamente al el trabajo de Jan y Miller (1997), se realizaba el trabajo que aquí se presenta. En este último se compararon propiedades tales como amplitud y escala temporal con un par de muestras más representativas de RLQ y RQQ que las elegidas por Jan y Miller. En la primera parte de este Capítulo se presenta la selección y la observación de las muestras de RLQ y RQQ. En seguida se aplicará diversas pruebas estadísticas para comparar las propiedades del fenómeno de microvariabilidad en RQQ y RLQ, y se discute las implicaciones de los resultados obtenidos. Finalmente, el Capítulo termina con un resumen del estudio realizado.

## 3.2 Selección y observación de las muestras

### 3.2.1 Selección de las muestras

Las características observables de un NAG y las condiciones de observación (climáticas e instrumentales) pueden introducir sesgos al estudiar la microvariabilidad en cuasares (ver Capítulos 1 y 2). No sólo el rango tan amplio de luminosidades, corrimientos al rojo y distribución espectral de estos objetos puede llevar a la selección de una muestra sesgada; además, se requiere considerar las correlaciones que se llegan a encontrar entre la luminosidad y el corrimiento al rojo con la amplitud de las variaciones (ver Capítulo 2). Así, para llevar a cabo el estudio que aquí se reporta, se ha intentado minimizar al

Tabla 3.1: **La muestra.**

PAR		A.R.	DEC.		
ID	Objeto	(J.D. 2000.0)	(J.D. 2000.0)	V	z
1a	US 1867	08:53:34	+43:49:01	16.4	0.513
1b	3C 334.0	16:20:21	+17:36:29	16.4	0.555
2a	1628.5+3808	16:30:13	+37:58:21	16.8	1.461
2b	3C 298	14:19:07	+06:28:35	16.7	1.439
3a	1222+023	12:25:17	+02:06:56	17.0	2.05
3b	PKS0421+019	04:24:08	+02:04:30	17.0	2.048
4a	US 995	09:48:59	+43:35:18	16.4	0.226
4b	PKS0736+01	07:39:18	+01:37:05	16.4	0.191
5a	1E15498+203	15:52:02	+20:14:02	16.5	0.25
5b	PKS 1217+02	12:20:11	+02:03:42	16.5	0.24
6a	US 737	09:35:02	+43:31:12	16.3	0.456
6b	PKS 1103-006	11:06:31	-00:52:52	16.4	0.426
7a	CSO 179	12:53:17	+31:05:50	16.0	0.78
7b	3C 110	04:17:16	-05:53:49	15.9	0.781
8a	CSO 233	09:39:35	+36:40:01	17.0	2.03
8b	PKS1022-102	10:24:56	-10:31:44	17.0	2.0
9a	CSO 21	09:50:45	+30:25:19	17.0	1.19
9b	PKS 1127-14	11:30:07	-14:49:27	16.9	1.187
10a	TON 156	13:21:16	+28:47:19	16.6	0.549
10b	PKS 1327-21	13:30:07	-21:42:04	16.7	0.528
11a	TON 133	12:51:00	+30:25:42	17.0	0.56
11b	3C 281	13:07:53	+06:42:13	17.0	0.599
12a	CSO 18	09:46:36	+32:39:51	17.0	1.3
12b	PKS 0514-16	05:16:15	-16:03:08	16.9	1.278
13a	E 0111+388	01:13:54	+39:07:45	16.7	0.234
13b	PKS 2247+14	22:50:25	+14:19:50	16.9	0.237
14a	MRK 1014	01:59:50	+00:23:41	15.6	0.163
14b	PKS 2349-01	23:51:56	-01:09:13	15.3	0.173
15a	Q0050-253	00:52:44	-25:06:51	16.1	0.626
15b	PKS 2243-123	22:46:18	-12:06:51	16.4	0.63
16a	US 3150	02:46:51	-00:59:31	16.8	0.467
16b	PKS 0003+15	00:05:59	+16:09:49	16.4	0.45
17a	US 3472	02:59:38	+00:37:36	16.6	0.532
17b	PKS 0122-042	01:24:34	-04:01:05	17.0	0.561

NOTA.- Las unidades de la ascensión recta son horas, minutos y segundos, y las unidades de la declinación son grados, minutos de arco y segundos de arco. Los cuasares radio callados se identifican con la letra **a**; los cuasares radio emisores son identificados con una letra **b**.

máximo los efectos indeseables mediante una selección apropiada de las muestras, misma que permite reducir el efecto de las condiciones observacionales.

En el Capítulo 2 se mostró que las amplitudes de la variabilidad de período largo puede estar correlacionada con el corrimiento al rojo,  $z$  (e.g. Cristiani et al. 1996; Di Clemente et al. 1996; Hook et al. 1994) y anticorrelacionadas con la luminosidad de los objetos,  $L$  (e.g. Pica y Smith 1983; Neugebauer et al. 1989; Hook et al. 1994; Cristiani et al. 1996).

En el primer caso podría tratarse del efecto de observar diferentes regiones espectrales, en el marco de referencia de los cuasares. Para el segundo caso, esta relación podría estar influenciada por la correlación entre  $z$  y  $L$ . Por otro lado, en un estudio sobre una muestra de 41 cuasares y 23 objetos del tipo BL Lac, Nair (1997) encontró que las escalas temporales de la variabilidad no se encontraban relacionadas con su amplitud. Cristiani et al. (1996), por su parte, encontraron que la escala temporal no parece estar correlacionada con el corrimiento al rojo o la luminosidad, aunque Netzer et al. (1996) sí encontraron una correlación, en una muestra de objetos radio emisores, entre la escala de tiempo y la luminosidad.

Para evitar estos posibles efectos, la selección de objetos que conforman las muestras del presente estudio se realizó de manera que para cada cuasar radio emisor existiera un RQQ con brillo y corrimiento al rojo similares. En primer lugar, los objetos fueron extraídos del catálogo de Veron-Cetty y Veron (1987), con las únicas condiciones de ser más brillantes que  $V = 17$  y poder ser observados desde el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. La potencia en radio de los objetos fue comparada entre los catálogos de Hewitt y Burbidge (1993) y Veron-Cetty y Veron (1983) de fuentes extragalácticas con fuerte emisión en radio. Esto permitió una selección preliminar de RLQ y RQQ. Entonces, aquellos cuasares radio emisores que se encontraban clasificados como fuentes no resueltas en el catálogo de fuentes emisoras en radio de Molongo 408 MHz (Large 1981), fueron elegidos para conformar la muestra de objetos no resueltos con emisión en radio (CRLQ). Estos cuasares corresponden a fuentes cuya morfología en radio corresponde a la emisión en un punto, a diferencia de los cuasares con estructura, cuya morfología está dominada por la emisión de lóbulos dobles, similares a los presentes en radio galaxias. Felcke, Sherwood y Patnaik (1996) indican que los CRLQ deberían ser RLQ con el eje del jet paralelo a la línea de visión. Finalmente, ambas muestras fueron comparadas considerando solamente aquellos pares de objetos con aproximadamente el mismo corrimiento al rojo y brillo. En la Tabla 3.1 se muestra los datos de ambas muestras. En la columna 1 se presenta el número de identificación de cada par de objetos, en los que el primer elemento de un par corresponde a RQQ; la columna 2 lista el nombre más común para cada objeto; en las columnas 3 y 4 se identifica las coordenadas (J2000.0); en las columnas 5 y 6 se muestra, respectivamente, la magnitud aparente  $V$  y el corrimiento al rojo.

Con este procedimiento de selección se cancelan posibles sesgos, tales como el cociente señal-a-ruido, la corrección  $K$  y efectos de evolución, y las posibles diferencias introducidas por la luminosidad y el corrimiento al rojo. Así, el análisis de los datos podría dar una mejor estimación de las diferencias entre ambas muestras si estos efectos tuvieran influencia sobre la microvariabilidad.

La selección de RLQ sin emisión extendida en radio tiene dos ventajas. La primera es que, si la microvariabilidad es producida en el jet, la variación debería acentuarse por efectos de direccionamiento relativista de la radiación, debido a que el eje del jet se encontraría muy cerca de la línea de visión. Al elegir cuasares con emisión extendida en radio, se podría perder el control sobre los efectos que la dirección introduce, por ejemplo, en la amplitud de las variaciones (Stalin et al. 2004). En este sentido, la segunda ventaja es que, de esta manera se asegura observar objetos con una orientación sumamente similar, evadiendo sesgos debidos al desconocimiento de la orientación de la muestra. Así, los CRLQ conformarían una muestra lo más homogénea posible, desde un punto de vista

observacional. Además, se espera que las propiedades físicas de la población de RLQ estén bien representadas en la muestra de CRLQ. Esto último se debe a que, el esquema unificado para radio galaxias y cuasares indica que los cuasares con emisión en radio dominada por lóbulos, así como los cuasares con emisión puntual son el mismo tipo de objetos, pero vistos bajo diferentes ángulos (e.g. Barthel 1989; Urry y Padovani 1995).

### 3.2.2 Observaciones

Las observaciones que aquí se reporta fueron realizadas con el telescopio de 1.5 m (f/13.5) del Observatorio Astronómico Nacional, situado en la sierra de San Pedro Mártir, durante tres temporadas que corrieron del 11 al 13 de noviembre de 1996, del 7 al 10 de febrero de 1997 y del 12 al 16 de mayo de 1997.

Las observaciones fueron hechas en la banda V. Para evadir sesgos debidos a los instrumentos y/o a condiciones atmosféricas, cada pareja fue observada durante la misma noche y, cuando fue posible, en secuencias traslapadas. Únicamente en dos casos se perdió uno de los objetos en un par dado. Cada miembro de un par fue monitoreado durante el mismo lapso de tiempo, usualmente más de 3 hrs., mientras que la frecuencia de observación fue de 3 a 9 veces por noche.

Para ilustrar el procedimiento de observación se ha elegido el caso del objeto radio callado US 995, monitoreado el 7 de febrero de 1997 debido a que el segundo grupo de observaciones es muy interesante por razones que se discutirán más adelante. En cada ocasión que un objeto fue observado, se tomó cinco exposiciones de  $\sim 1$  minuto cada una (en todos los casos, el número de exposiciones fue el mismo para cada miembro del mismo par). Para el caso ilustrado en la Figura 3.1(a), el tercer grupo de cinco observaciones está quebrado en dos y tres observaciones separadas por 13 minutos, debido a la necesidad de recentrar el objetivo después de que se perdió accidentalmente. Las imágenes fueron enviadas a la memoria de la computadora y salvadas en disco mientras que otra exposición era tomada, con un tiempo muerto de tan sólo unos segundos. Con este procedimiento, fue posible monitorear de 2 a 4 pares por noche. Algunas estrellas en el campo del cuasar fueron utilizadas como estrella de referencia, para calibrar la magnitud relativa, y como estrella de comparación, para calibrar las inestabilidades instrumentales. Con el interés de ahorrar tiempo, no fueron observadas estrellas estándares por lo que no fue posible hacer una calibración absoluta del flujo.

Tanto el procesamiento preliminar de las imágenes, como la fotometría fueron realizadas con la paquetería *IRAF*. Las imágenes *bias* fueron obtenidas cada noche. Un promedio de ellas fue sustraído del resto de las imágenes obtenidas durante la sesión. Los *campos planos* fueron *campos de cielo*, tomados al inicio y/o al final de cada noche. Estas imágenes fueron combinadas para generar una *imagen media de campo plano*, para obtener las imágenes finales. De estas últimas se obtuvo la fotometría, para los cuasares y las estrellas de campo, mediante el uso de la subrutina *APPHOT*. Para cada sesión se utilizó la misma pseudo apertura, la cual rondó los 2 segundos de arco (de radio). Con ello se obtuvieron las magnitudes instrumentales, utilizadas para construir *las curvas diferenciales de luz* de cada cuasar, relativas a las estrellas de comparación (que fueron estrellas de campo) así como entre pares de estas últimas. Aunque una apertura semejante parecería resultar insuficiente

para evitar sesgos debidos a inestabilidades atmosféricas cuando se tienen objetos en que se aprecia la galaxia huésped, Cellone, Romero y Combi (2000) mostraron que este problema está presente sólo en el caso de una galaxia huésped tan brillante como el objeto durante episodios de intensa inestabilidad atmosférica. En el trabajo presente no se cuenta con un objeto donde se tenga una galaxia tan brillante; además, en el observatorio de San Pedro Mártir no se presentan situaciones de inestabilidad atmosférica tales como las mencionadas por Cellone, Romero y Combi (i.e., variaciones de entre 4 y 5 segundos de arco).

### 3.3 Resultados

Para cada objeto, la búsqueda de microvariaciones se realizó mediante un análisis de varianzas (ANOVA). El ANOVA es una prueba estadística muy robusta empleada regularmente en la industria y en las investigaciones científicas. La manera de emplear esta prueba se explica en muchos libros de estadística elemental (e.g. Box, Hunter y Hunter 1978; Scheffler 1988; Canavos 1988). La prueba ANOVA que se empleó para buscar microvariaciones fue la de un solo sentido (de cola superior). Brevemente, se calcula la varianza de las medias de cada grupo de cinco observaciones, así como la media para la dispersión entre cada grupo. Entonces, se toma el cociente de estas varianzas y se multiplican por el número de observaciones (es decir, 5). El número obtenido con este procedimiento es tomado como la estadística F y las probabilidades se calculan fácilmente por medio de un programa computacional de estadística o por medio de tablas.

Existen diversas ventajas del procedimiento usado para coleccionar y analizar los datos. Primero, al tomar cinco exposiciones en cada ocasión se incrementan dramáticamente los grados de libertad respecto al procedimiento estándar de realizar una observación en cada ocasión. Esto, además, mejora el subsiguiente análisis estadístico. En segundo lugar, los errores se pueden calcular directamente de la dispersión de las observaciones, en lugar de tomar la dispersión de Poisson. Esto permite estimar el error empíricamente en lugar de tomar la estimación teórica arrojada por las rutinas de IRAF. El problema con el error fotométrico obtenido con las rutinas de IRAF, según nuestra experiencia y la de otros autores (e.g. Gopal-Krishna et al. 1993a), es que están mal estimados al asignarles un valor más bajo de lo que en realidad son. El motivo de esta falla es que este error teórico no considera todas las fuentes de variación durante las observaciones y la reducción de datos. Por ejemplo, IRAF no toma en cuenta la posibilidad de un aumento espurio de la señal después de una corrección de campo plano, por lo que el error que se estima directamente de la señal corregida puede diferir del error original. Como resultado de la mejora en los errores, ANOVA conduce a una estimación superior de la probabilidad de variaciones cuando se compara con la prueba estándar  $\chi^2$  basada en el cálculo teórico de los errores.

Aunque varias estrellas de campo fueron seleccionadas como estrellas de comparación, los resultados fueron obtenidos con sólo dos estrellas, una de comparación y una de referencia, según lo dicta la norma de fotometría diferencial con CCD (Howell y Jacoby 1986); sin embargo, con el presente análisis sólo es necesaria la primera estrella. En cuanto a la estrella de comparación, se utiliza para calcular errores, pero con el análisis ANOVA los errores se estiman directamente de las diferencias, en magnitud, de los objetos y las

estrellas de referencia dentro de cada grupo de datos.

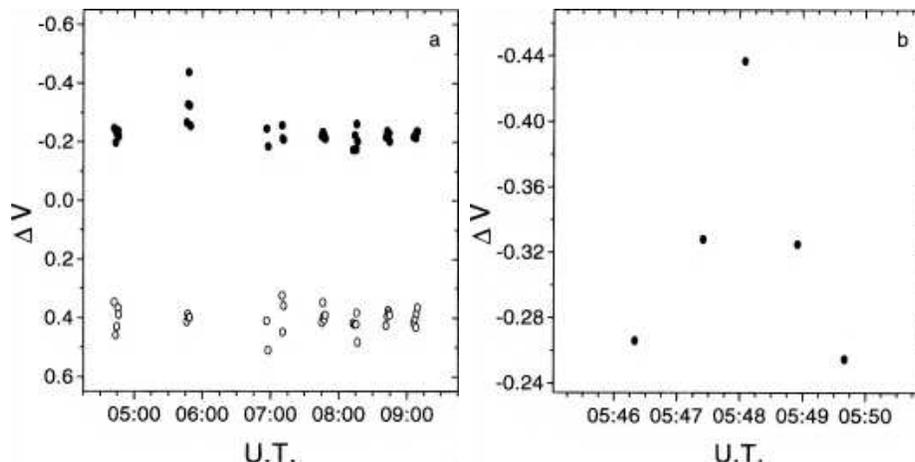


Figura 3.1: Curva de luz para US 995 observado en febrero 7 de 1997. Los círculos negros se refieren a las observaciones del cuasar y los círculos abiertos a una estrella de comparación en el mismo campo del objeto. (a) Las observaciones completas muestran un aumento de brillo en el segundo grupo de observaciones del cuasar mientras que el tercer grupo de observaciones se perdió debido a la necesidad de recentrar después de haber perdido accidentalmente al objeto. (b) Los detalles del segundo grupo de observaciones muestran una variación de 0.17 magnitudes en tan sólo 2 minutos. Tomado de de Diego et al. 1998

Antes de pasar a describir los resultados más sobresalientes, debe hacerse una advertencia en torno al uso del término *nivel de significancia*. Éste debe entenderse como la probabilidad de obtener un resultado espurio, o un error estadístico de tipo I. De manera alterna, el nivel de significancia se dará en unidades de  $\sigma$ , la desviación estándar. A partir de una tabla de probabilidades normales, una detección de  $3\sigma$  corresponde a un nivel de significancia de  $\sim 0.1\%$ . En los resultados del presente trabajo, el nivel de significancia de la variación alcanzó el 1% ( $\sigma \sim 2.32$ ). Las estrellas de comparación mostraron una probabilidad mucho mayor de calma que los cuasares, con niveles de significancia mayores al 20%.

En el objeto US 995 se observó una variación el 7 de febrero de 1997. El cuasar fue monitoreado durante 4.5 horas. Después de la primera hora de monitoreo, el brillo se incrementó al menos una décima de magnitud y, 1.5 horas después de esto, había disminuido. Los datos correspondientes al segundo grupo de cinco observaciones (Fig. 3.1(a)) muestran una forma de “V” invertida (Fig. 3.1(b)). Un incremento rápido del brillo se observa del primero al tercer punto, mientras que en los dos últimos puntos se observa una disminución igual de rápida. Para la estrella de comparación, los datos del segundo grupo muestran una dispersión muy pequeña, lo que podría indicar que las condiciones atmosféricas fueron extremadamente buenas durante esa parte de la noche. Si esta variación es real, la dispersión de este grupo tiene una componente más grande para la variación que para el error observable, implicando un aumento en brillo de 0.17 mag en tan sólo dos minutos (quizás un *spike* de los que se habla en Stalin et al. 2004; Gopal-Krishna 2000). En cualquier caso, el promedio de ese grupo se encuentra por arriba del valor promedio para esa noche, dejando fuera la posibilidad de un *punto mal tomado*, reforzando la posibilidad de este

comportamiento tan notable.

## 3.4 Discusión

El resultado más sobresaliente de este trabajo muestra que la microvariabilidad en RQQ es un fenómeno más común de lo sugerido por reportes anteriores. Considerando sólo a los objetos con la probabilidad de variación más alta (i.e., que la probabilidad de variaciones espurias o error estadístico de tipo I sea menor al 1%), se encuentra que nueve de los 17 cuasares radio callados observados y cinco de los radio emisores mostraron variabilidad. Si el límite se restringe a un nivel de  $3\sigma$  (que generalmente se adopta para aceptar una variación como tal), el número de objetos en que se detectó microvariabilidad se reduce a cinco en ambas muestras.

Al lector interesado en la discusión de cada una de las variaciones detectadas, se le recomienda la lectura del artículo de de Diego et al. (1998).

### 3.4.1 Estadística muestral

En esta sección se confrontará estadísticamente los resultados de microvariabilidad obtenidos para las muestras de RQQ y CRLQ. Los objetivos son encontrar las posibles diferencias entre las poblaciones madre mediante la estimación del número de objetos que presentan microvariabilidad, aun en el caso de no ser detectadas. Para este fin, se aplicó diversas pruebas estadísticas bien conocidas. Algunas de estas pruebas tratan con propiedades cualitativas de los resultados (tales como la detección o la no detección de microvariaciones), mientras que otras tratan directamente con los resultados numéricos. Primero, se utilizará una prueba  $\chi^2$  para homogeneidad para comparar el número de objetos variables en cada muestra. Posteriormente, la varianza observada en cada objeto será separada en dos componentes, una que represente el error observacional y otra para las variaciones intrínsecas del objeto. Entonces, dos pruebas de diferencias son aplicadas a los promedios de las varianzas intrínsecas de los objetos RQQ y CRLQ: una prueba de comparación de parejas y una prueba de muestra independiente. Los resultados e implicaciones de estas dos pruebas son discutidos. Las diferencias de las varianzas intrínsecas entre las observaciones pareadas permiten una estimación de la ocurrencia de microvariabilidad en cuasares.

#### 3.4.1.1 La prueba $\chi^2$ para homogeneidad.

La prueba para homogeneidad  $\chi^2$  se utiliza para comparar dos o más propiedades cualitativas de varias muestras. El procedimiento de esta prueba está descrito en diversos libros sobre estadística (e.g. Scheffler 1988; Canavos 1988). Para el presente caso, los datos de RQQ y RLQ se dividen en aquellos que presentaron microvariabilidad y aquéllos que no presentaron microvariabilidad. Para la discusión que sigue, cada observación se tomará como independiente, aunque algunas de ellas puedan no serlo debido a que se refiere al mismo objeto. Al hacer esto, pueden ser introducidos algunos efectos indeseables ya que las observaciones del mismo objeto pueden no ser independientes. Este es el caso, por

ejemplo, si alguno de los cuasares es intrínsecamente (mucho) más variable que los otros, la cual es una pregunta imposible de responder en el presente.

De un total de 29 monitoreos para cada clase de objetos, de los cuales 14 son observaciones de RQQ y nueve CRLQ en los que las variaciones alcanzaron un nivel significativo del 10%, 11 observaciones de RQQ y 8 de CRLQ son significativas a un nivel del 5%. De la misma manera, para nueve RQQ y para cinco CRLQ, el nivel significativo alcanzó el 1%. Para la prueba de homogeneidad, se eligió el último límite, ya que representa, proporcionalmente, la más grande diferencia entre RQQ y CRLQ. La Tabla 3.2 presenta el número de posibles variaciones, significativas a un nivel del 1%, observadas en cada tipo de cuasar (columna 1), el número de observaciones que no mostraron evidencia de microvariaciones (columna 2), el número total de observaciones (columna 3) y las frecuencias esperadas de microvariabilidad bajo la hipótesis nula, i.e., que ambos tipos de objetos poseen las mismas propiedades respecto a la microvariabilidad (columnas 4 y 5). Estas frecuencias esperadas fueron calculadas multiplicando el subtotal de cada línea y cada columna y dividiendo entre el número total de observaciones. La prueba de homogeneidad muestra que la probabilidad de observar los resultados mostrados en la Tabla 3.2 puede ser obtenida 44% de las veces a partir de dos muestras extraídas al azar de la misma población. Así, la probabilidad de observar la ocurrencia de variabilidad es muy grande como para rechazar la hipótesis nula, haciendo que la similitud de ambas muestras no sea cuestionada.

### 3.4.1.2 Pruebas cuantitativas para las diferencias entre cuasares radio callados y radio emisores.

Aunque la prueba de homogeneidad no muestra diferencias en la ocurrencia de microvariabilidad entre RQQ y CRLQ, una prueba cuantitativa sobre las varianzas para ambas muestras puede indicar si esta clase de variabilidad es mayor en un tipo de objetos que en el otro. Si bien las varianzas extraídas directamente de los datos pueden ser utilizadas para esta comparación, se puede obtener una mejor estimación de las diferencias entre las muestras de RQQ y CRLQ si la varianza se separa en dos componentes, una para el cuadrado del error estimado y otra para las varianzas intrínsecas asociadas con las variaciones de las fuentes.

El error introducido en los procesos de observación y reducción de datos, para un cuasar dado, puede estimarse empíricamente de la dispersión media de cada grupo de cinco observaciones. Si el cuasar no varía, estos errores explican la dispersión de datos. Alternativamente, por propagación de errores puede demostrarse que, para los datos presentes en este trabajo, la varianza observada  $V_o$  es el resultado de los errores cuadrados  $e^2$  pesados por el número de observaciones en cada grupo (cinco) más la varianza intrínseca de la fuente  $V_r$ . Así, la varianza intrínseca que se estima para el cuasar, o bien, la parte de la varianza observada que no puede ser explicada por los errores, es

$$V_r = V_o - \frac{e^2}{5} \geq 0,$$

donde la restricción de ser mayor o igual a cero surge de consideraciones físicas.

La prueba *t de Student* usualmente se aplica para encontrar diferencias entre las medias de dos muestras de datos. Se considera que estos datos poseen una distribución normal,

lo cual es aproximadamente el caso para las diferencias de varianzas intrínsecas entre los datos emparejados de objetos RQQ y CRLQ, como se muestra en la Figura 3.2 (las observaciones no pareadas han sido omitidas). Para este grupo de datos, se ha calculado una *prueba estadística de parejas* (e.g. Scheffler 1988; Canavos 1988), en la que la media de la distribución de estas diferencias no debería ser significativamente diferente de cero si ambas muestras son extraídas de la misma población madre. La prueba arroja una probabilidad muy cercana al 30% de que las diferencias observadas ocurran por casualidad.

Vale la pena agregar que, repitiendo la prueba *t de Student* sobre las dos muestras de varianzas intrínsecas (i.e. sin calcular las diferencias entre las observaciones emparejadas), no sólo se obtiene la misma diferencia media dentro de los errores, lo cual era de esperarse, sino además la misma incertidumbre para estas diferencias. Este resultado es importante porque indica, primero, que la calidad promedio de las noches fue similar en todas las temporadas de observación y, segundo, que el brillo intrínseco y el corrimiento al rojo de cada objeto tuvieron pequeños efectos sobre el fenómeno de microvariabilidad, contrariamente a los resultados de los monitoreos de variabilidad de período largo. Una consecuencia directa es que si el brillo y la distancia pueden tomarse como parámetros de evolución para estos objetos, entonces la evolución no está relacionada con las microvariaciones.

### 3.4.1.3 Microvariabilidad en la muestra completa.

Los resultados de las pruebas realizadas evidencian que las diferencias en las propiedades de microvariabilidad entre las muestras de RQQ y CRLQ son demasiado pequeñas como para sugerir que éstas pertenecen a diferentes poblaciones madre.

El histograma de las diferencias de  $V_r$  para cada observación emparejada de un par de objetos se muestra en la Figura 3.2. Aunque esta figura posee, de manera somera, la forma de una función normal, no puede ajustársele una Gaussiana única. Con una muestra tan pequeña como la utilizada, no se espera el ajuste de una distribución normal sola, pues como puede verse en la Fig. 3.2 (la línea a puntos y guiones) una sola curva normal con media y desviación estándar calculada directamente de los datos desestiman la parte central de éstos. Sin embargo, una curva compuesta por dos Gaussianas reproduce bastante bien el perfil. La explicación para esto puede ser que la componente más puntiaguda (Fig. 3.2, la línea punteada) muestra las diferencias entre las observaciones emparejadas cuando ninguno de los objetos varía, mientras que la componente ancha (la línea a guiones) explicaría las diferencias cuando al menos uno de los objetos, en observaciones emparejadas, varía. Esto último se puede utilizar para estimar las diferencias en microvariabilidad entre RQQ y CRLQ, así como el número de objetos que varían.

La componente puntiaguda puede entenderse como la distribución de los errores de las mediciones y utilizarse para estimar la resolución de la prueba estadística. La desviación estándar de esta componente es  $10^{-4}$ , y representa el error medio al calcular la diferencia entre las varianzas intrínsecas de los objetos en cada observación emparejada. Esta componente explica 13 de las 28 observaciones emparejadas

La componente ancha explica 15 de las 28 observaciones emparejadas, lo cual implica que la microvariabilidad, aunque muy común en cuasares, no es fácil de detectar. La media de esta componente es  $(-1.2 \pm 1.7) \times 10^{-4}$ , que no es significativamente diferente de cero,

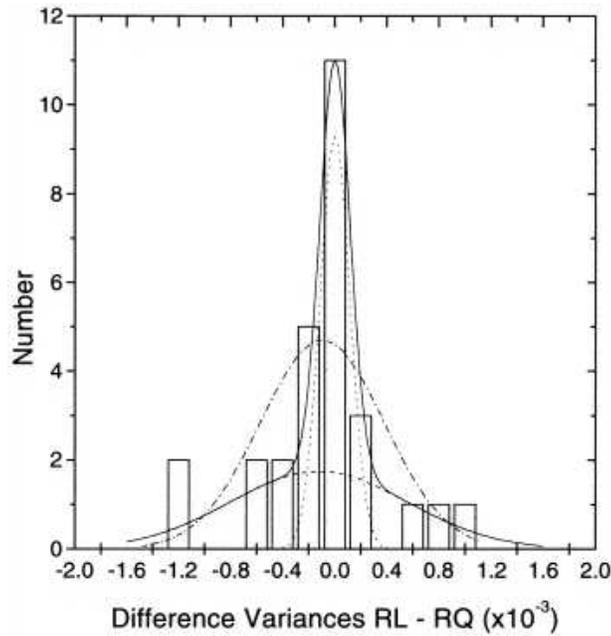


Figura 3.2: Histograma para las diferencias de varianzas intrínsecas entre CRLQ y RQQ para observaciones pareadas. La línea a punto-guión muestra el ajuste de una normal simple. La línea continua es el resultados de ajustar dos componentes, las cuales se representan con líneas a guión y punto. Tomado de de Diego et al. 1998

indicando que no hay diferencias entre las muestras de RQQ y CRLQ, tal y como se infirió de las pruebas que se llevaron a cabo y que se reportaron arriba.

De la teoría de probabilidad es posible distinguir el número de ocurrencias de microvariabilidad en las muestras, aun si se encuentran por debajo del nivel de detección. Sea  $A$  la probabilidad de que un objeto dado no varíe mientras está siendo monitoreado y  $B$ , la probabilidad de que sí varíe. Dado que no se encontraron evidencias de diferencias entre las dos muestras, tómesese  $A$  y  $B$  como iguales para cada muestra. Entonces, los objetos pareados estarán distribuidas como

$$A^2 + 2AB + B^2 = 1,$$

donde el primer término es la probabilidad de que ninguno de los objetos en un par determinado varíe, el segundo término es la probabilidad de que sólo uno de ellos varíe y el último término es la probabilidad de que los dos varíen. Ahora,  $A^2$  puede calcularse de la componente puntiaguda del ajuste discutido arriba como el cociente entre las observaciones emparejadas que ésta explica (13) y el número total de observaciones (28). Así,  $A = 68.14\%$  y  $B = 31.86\%$ . El número de ocurrencias de microvariabilidad en las 58 observaciones, incluyendo los dos monitoreos no emparejados, debería ser de aproximadamente 18. Dado que se detectaron 11 eventos de microvariabilidad, la probabilidad de detectar una microvariación con la metodología usada es aproximadamente del 60%.

Como se ha señalado, todas las pruebas podrían estar afectadas por el hecho de que algunos objetos están representados más que otros en la muestra. Así, se repitieron las

pruebas considerando las medias para cada objeto más que las observaciones individuales. Los resultados no difieren significativamente, pero la resolución es muy pobre, parcialmente debido a la pérdida de grados de libertad cuando se reducen los datos de 58 observaciones a sólo 34, y parcialmente debido a que las variaciones mismas se ocultan cuando son promediadas con otros datos.

Así, toda la estadística discutida en esta sección indica que las dos muestras poseen el mismo comportamiento, contrariamente a los resultados reportados por Jang y Miller (1995, 1997), quienes encontraron que las variaciones de escalas temporales cortas son más frecuentes en objetos radio emisores. No obstante, la proporción de objetos radio callados que mostraron variaciones a un nivel de  $3\sigma$  no es muy diferente de los resultados de Jan y Miller. Se señala, sin embargo, que en el caso del presente trabajo, al seleccionar sólo objetos puntuales para conformar la muestra de RLQ se puede producir un efecto importante si estos objetos no son representativos de la población de objetos radio emisores. Pero si esta muestra sí es representativa, las microvariaciones en RLQ se deberían explicar considerando diferentes modelos que no sean inestabilidades en el jet. Falcke, Sherwood y Patnaik (1996) encontraron que los CRLQ pueden ser en realidad RLQ o cuasares radio moderados con el jet visto en dirección al observador. Los cocientes de flujo radio a óptico entre los RLQ y RQQ cubren un rango amplio, de varias centenas o incluso miles para los primeros y varias decenas o incluso centenas para los últimos. Todos los RLQ que se utilizó en este trabajo tienen cocientes cercanos o por arriba de 1000, calculados entre las frecuencias de 408 MHz a la banda V, lo cual implica que todos ellos pertenecen a la población de radio emisores según el criterio de Falcke, Sherwood y Patnaik (1996). Más aún, Netzer et al. (1996) no encontraron diferencias en la variabilidad de período largo entre cuasares con emisión en radio, extendida y puntual. Así que la ausencia de diferencias en la microvariabilidad entre RLQ y RQQ que se ha encontrado sugiere fuertemente al disco de acreción o a las microlentes gravitatorias como responsables de muchas, si no es que la mayoría, de las microvariaciones observadas.

#### 3.4.1.4 Detección de microvariabilidad vs. tiempo de monitoreo

La caracterización de la frecuencia de microvariabilidad como una función de la duración del monitoreo es una herramienta sumamente útil para la planificación de observaciones futuras. Esto ha sido realizado tanto para blazares (Carini 1990), como para cuasares (Romero et al. 1999; Stalin et al. 2004).

Originalmente, para caracterizar el *nivel de actividad* (lo que en inglés se conoce como *duty cycle*), se lleva a cabo monitoreos tradicionales de tomar una imagen a la vez y producir una curva de luz con mejor resolución temporal que la del presente estudio. Sin embargo, del estudio de Carini no se espera observar una microvariación en menos de tres horas, por lo que nuestras observaciones se tomarán como “continuas” entre cada grupo de cinco observaciones. Si bien esto hace perder la “textura” de la variación, la información que se deriva es de gran importancia, como se verá a continuación. Como las espigas son un fenómeno observado sólo recientemente (de Diego et al. 1998; Gopal-Krishna et al. 2000), con una ocurrencia por demás azarosa, que requeriría un estudio aparte, por lo que aquí no se tocará el tema de este tipo de microvariabilidad.

Tabla 3.2: **Tabla de contingencias**  $\chi^2$ 

Cuasares	Observado		Total	Esperado	
	$P \leq 1\%$	$P > 1\%$		$P \leq 1\%$	$P > 1\%$
CRLQ	5	24	29	7	22
RQQ	9	20	29	7	22
Total	14	44	58	14	44

Frecuencias de variabilidad observadas y esperadas

Para caracterizar el nivel de actividad, se ha unido las observaciones de RQQ y CRLQ debido a que no se detectó diferencia entre unos y otros. Entonces, los datos se agruparon, de acuerdo a la duración del monitoreo, en parcelas con intervalos de 1 hora, centrados en valores enteros de la hora correspondiente. Por ejemplo, las parcelas con duración de 3 horas incluyen a las observaciones con duración de entre 2:30 y 3:30 horas. Se excluyen las parcelas de 2, 7 y 8 horas, ya que el muestreo resultó muy pobre (ver Tabla 3.3).

Suponiendo que todos los cuasares presentan el mismo nivel de actividad en  $H$  horas de monitoreo, se tiene una probabilidad  $P_H$  de detectar una microvariación en una fuente determinada. Esta probabilidad puede estimarse a partir del cociente entre la frecuencia de eventos de microvariabilidad observados,  $E_H$ , en una correspondiente parcela de  $H$  horas y el número total de monitoreos,  $N_H$ , en esta parcela:

$$P_H = \frac{E_H}{N_H}. \quad (3.1)$$

Por otro lado,  $P_H$  está relacionada con la probabilidad  $P_1$  de detectar una microvariación durante una hora de monitoreo en un objeto dado

$$P_H = 1 - (1 - P_1)^H. \quad (3.2)$$

Así,  $P_1$  puede ser estimada por

$$P_1 = 1 - (1 - P_H)^{1/H}. \quad (3.3)$$

Las columnas en la Tabla 3.3 muestran, respectivamente, los valores de  $H$ ,  $N_H$ ,  $E_H$ ,  $P_H$  (calculada con la ecuación 3.1), y  $P_1$  (ecuación 3.3) para cada parcela centrada en  $H$ . La media para  $P_1$ , calculada de los valores de la Tabla 3.3 y pesados por el número  $N_H$  de observaciones en cada parcela, da  $P_1 = (5 \pm 2)\%$ . Carini (1990) reportó un probabilidad del 50% para la detección de microvariabilidad en blazares en un monitoreo de 3 horas. Suponiendo que hay equivalencia entre el método de observación de Carini y el presente, de esta probabilidad y de la ecuación 3.3, la probabilidad de detección de microvariaciones en un blazar con un monitoreo de 1 hora es aproximadamente 21%. De las probabilidades  $P_1$  que se han calculado para cuasares y blazares, se estima que la probabilidad de detección de microvariabilidad en cuasares es aproximadamente 4 veces más pequeña que en blazares.

En estudios con monitoreos tradicionales, el nivel de actividad se calcula pesando la contribución de cada objeto variable por su número de horas de monitoreo (Romero et al.

1999; Stalin et al. 2004; la expresión utilizada por estos autores se reproduce en § 4.4.3). Con esta definición, los datos de la Tabla 3.3 arrojan una probabilidad del 17.2%. En comparación, Stalin et al. (2004), al observar un par de muestras de cuasares seleccionadas con criterios similares a los del presente trabajo, encontraron una probabilidad del 17% para el caso de RQQ y una del 15% para cuasares RL. Estos resultados vuelven a mostrar la similitud entre ambos grupos de cuasares.

Tabla 3.3: Nivel de Actividad

H	$N_H$	$E_H$	$P_H$	$P_1$
3	16	4	0.250	0.091
4	15	2	0.133	0.035
5	10	0	0	0
6	9	2	0.222	0.041

NOTA.- Los datos fueron agrupados en parcelas de tiempo

### 3.5 Conclusiones

En este Capítulo se ha presentado un estudio comparativo de las propiedades en radio de la microvariabilidad en una muestra de 17 cuasares radio callados y 17 cuasares con emisión puntual en radio. Para evitar cualquier sesgo de selección y aumentar la precisión del estudio, los objetos fueron pareados por brillo y corrimiento al rojo. Además, cada pareja fue observada en la misma noche, i.e., en las mismas condiciones de observación, y en muchos casos los miembros de un mismo par se observaron en secuencias traslapadas, excepto por dos ocasiones en las que se perdió uno de los miembros de un par. La selección de una muestra de cuasares con emisión puntual en radio, en lugar de cualquier tipo de cuasar radio emisor, fue una manera sencilla de evadir efectos espurios debidos a la orientación del jet y, a priori, una manera de seleccionar los objetos que pueden presentar los efectos relativistas más intensos si el origen de la microvariabilidad se encuentra en el jet.

La ocurrencia de microvariaciones en cada objeto fue determinada mediante la prueba ANOVA de un solo sentido. Esto condujo a la detección de microvariaciones, por arriba de un nivel de detección de  $3\sigma$ , en cinco RQQ y en cinco CRLQ, con una probabilidad de variabilidad muy alta en otros tres RQQ. Una prueba  $\chi^2$  para homogeneidad mostró que, al comparar la ocurrencia de microvariabilidad en las muestras de RQQ y CRLQ, ambos grupos de objetos no son significativamente diferentes. Este resultado contrasta con los resultados obtenidos por Jang y Miller (1995, 1997). Estos autores hallaron que la microvariabilidad debería ser un fenómeno mucho más frecuente en objetos radio emisores que en radio callados. Aunque de los resultados obtenidos en el presente trabajo no se pretende decir la última palabra, la metodología usada (la selección de las muestras, el procedimiento de observación y el análisis de datos) fue diseñada para optimizar la eficiencia del estudio.

La variabilidad intrínseca de los cuasares pudo ser evaluada al calcular los errores

estimados y la dispersión de los datos. Se aplicó dos pruebas estadísticas a las medias de las varianzas intrínsecas de RQQ y CRLQ, una prueba de parejas y una prueba de muestra independiente. Estas pruebas indican que, al nivel de resolución de los datos, las muestras presentan las mismas propiedades de microvariabilidad. Más aún, las diferencias entre las medias estimadas y las asociadas al error fueron comparables en ambas pruebas. Como el mismo resultado se obtiene al no tomar en cuenta la paridad en brillo y corrimiento al rojo de los objetos, la microvariabilidad parecería no estar relacionada con estas propiedades, lo que también va en contra de los resultados obtenidos en los monitoreos de período largo.

Mediante los resultados de las observaciones emparejadas fue posible estimar el número de eventos de microvariabilidad en la muestra completa, incluidos aquéllos por debajo del límite de detección. Esta estimación da 18 eventos de microvariabilidad de 58 monitoreos. Ya que el número total de detecciones fue 11, esto implica una eficiencia del  $\sim 60\%$  en la detección microvariabilidad con los instrumentos y metodología utilizados en este trabajo.

Finalmente, la probabilidad de detección de microvariaciones para un objeto dado fue calculada como una función de la duración del monitoreo, suponiendo que las variaciones que se busca detectar ocurren en escalas temporales mayores a 1 hora. Esta probabilidad es  $(5 \pm 2)\%$  en una hora de monitoreo, i.e., 4 veces más pequeña que la respectiva probabilidad para blazares inferida de los resultados de Carini (1990), suponiendo que ambas metodologías pueden compararse.

De todos estos resultados se concluye que la variabilidad puede tener su origen en el disco de acreción o en el fenómeno de microlentes gravitatorias, aunque no se descarta que el jet juegue un papel importante en la microvariabilidad de algunos RLQ. Para discernir el origen de un evento dado de microvariabilidad es necesario un estudio de color al menos en tres bandas (aunque podría no ser suficiente). Esto se verá más adelante, en los siguientes capítulos.







## Capítulo 4

# Estudio Comparativo de Microvariabilidad Multicolor en Cuasares

### 4.1 Introducción.

La investigación presentada en el Capítulo 3 arrojó como resultado que la microvariabilidad en cuasares no depende de las propiedades en radio de estos objetos. Estudios posteriores han encontrado conclusiones similares para variabilidad de período largo e intermedio (e.g. Webb y Malkan 2000; Vanden Berk 2004). En su conjunto, estos resultados sugieren que la fuente de energía en RQQ y RLQ es la misma, o por lo menos muy parecida.

Los resultados de estudios comparativos entre RQQ y RLQ, como el presentado en el Capítulo 3, habían hecho suponer que el origen de la microvariabilidad se encuentra en el disco de acreción; sin embargo, el descubrimiento de jets relativistas en RQQ no permite hacer ningún tipo de inferencia respecto al origen de este fenómeno (procesos del jet o perturbaciones del disco de acreción). La posibilidad de que exista una simbiosis disco-jet (ver Falcke et al. 1996) puede complicar cualquier análisis, ya que algunas variaciones originadas en el disco deberían propagarse hacia el jet (Gupta et al. 2005; Wiita 2005).

Debido a que el exceso óptico/UV se identifica con la emisión del disco de acreción, los estudios de variabilidad óptica cobran particular relevancia. El análisis de las variaciones espectrales en estas longitudes de onda, puede introducir importantes restricciones a los modelos de emisión (esto se verá en el Capítulo 5). No obstante, la presencia de más componentes espectrales, como la emisión no térmica de un jet relativista, complica el panorama.

Cuando una variación es detectada, un estudio de color puede ayudar a encontrar alguna característica distintiva de la componente variable en la forma del espectro continuo. Tal estudio se llevó a cabo sobre una muestra similar a la del Capítulo 3 (seleccionada con los mismos criterios, para evitar sesgos debidos a posibles efectos de evolución, brillo, y de orientación) y es presentado en dos partes. La primera de ellas se refiere a un estudio

comparativo, análogo al del Capítulo 3 pero ahora en las bandas ópticas BVR, y es mostrada en el Capítulo presente. La segunda consiste en analizar la variabilidad en la forma del espectro continuo y es reportada en el Capítulo 5.

En § 4.2 se presenta las observaciones y el tratamiento de éstas; en § 4.3 se presenta los resultados de las microvariaciones detectadas; en § 4.4 se discute éstos resultados y en § 4.5 se presenta un resumen y las conclusiones.

## 4.2 Los datos

Dos muestras de cuasares, una constituida por 23 RQQ y una muestra de control conformada por 23 RLQ, fueron observadas para la realización del presente estudio (ver Tabla 4.1). En el Capítulo 3 se describe los criterios de selección. Brevemente, las muestras se formaron de manera que por cada RLQ hubiera un RQQ similar en brillo y corrimiento al rojo (diferiendo en tan sólo 10%). Con ello se evitan posibles sesgos por evolución y brillo (ver Capítulo 2). Para evitar sesgos debidos a la orientación del jet (como efectos sobre la amplitud y la escala temporal de las variaciones), se eligieron RLQ con emisión puntual en radio (CRLQ, del inglés *core dominated radio loud quasar*), en los cuales se supone que el jet estaría apuntando en la dirección del observador.

En la Tabla 4.1 se presenta la muestra completa. Con un número se identifica a cada pareja (col. 1), donde “a” se refiere a la componente RQQ y “b”, al RLQ; el nombre del objeto (col. 2); las coordenadas (J2000.0) de cada uno de ellos (cols. 3 y 4); la magnitud en la banda V reportada en la literatura (col. 5) y el corrimiento al rojo (col. 6).

Las observaciones fueron realizadas en varias temporadas, entre 1998 y 2002, utilizando cuatro telescopios distribuidos en México y España. En México se emplearon los telescopios de 1.5 m y 2 m (Mx1 y Mx2, respectivamente, de ahora en adelante), operados por el Observatorio Astronómico Nacional (OAN), ubicado en la sierra de San Pedro Mártir, Baja California. En España, se emplearon el telescopio Jacobus Kapteyn Telescope (JKT) de 1 m, ubicado en Roque de los Muchachos y operado por el grupo Isaac Newton y, el telescopio de 1.5 m de la Estación Observacional de Calar Alto (EOCA), ubicado en el Centro Astronómico Hispano-Alemán en Calar Alto (CAHA), y que es operado por el Observatorio Astronómico Nacional (de España). En la Tabla 4.2 se presenta la bitácora de las observaciones, incluyendo el telescopio utilizado en cada ocasión. En ella se presenta el número de identificación para cada objeto (col. 1), la fecha de observación (col. 2), el telescopio utilizado (col. 3), el lapso de tiempo que duró el monitoreo (col. 4) y un comentario sobre la microvariabilidad, cuando la hubo (col.5). Adicionalmente se utilizó el telescopio de 0.84 m ubicado en San Pedro Mártir, pero la mala calidad de las observaciones no permite que sean empleadas salvo en el caso de PKS 0736+017 (ver Cap. 6).

En todas las observaciones se emplearon filtros BVR de la serie Johnson-Cousins, con los detectores CCD que se enumeran a continuación. En México, en el telescopio Mx1, un SITE SI003 con  $1024 \times 1024$  pixeles de  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  cada uno, que consta de una cubierta de metácromo II y una VISAR, para mejorar la respuesta en el azul. En el telescopio Mx2, un CCD Thomson TH7398 con  $2048 \times 2048$  pixeles, de  $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$  cada uno, con una recubierta de metácromo II. En España, en el JKT, un TEK1024AR constituido por

Tabla 4.1: La muestra.

(ID)		A.R.	DEC.		
PAR	objeto	(J.D. 2000.0)	(J.D. 2000.0)	V	z
1a	US 1867	08:53:34	+43:49:01	16,4	0,513
1b	3C 334.0	16:20:21	+17:36:29	16,4	0,555
2a	1628.5+3808	16:30:13	+37:58:21	16,8	1,461
2b	3C 298	14:19:07	+06:28:35	16,7	1,439
3a	1222+023	12:25:17	+02:06:56	17	2,05
3b	PKS0421+019	04:24:08	+02:04:30	17	2,048
4a	US 995	09:48:59	+43:35:18	16,4	0,226
4b	PKS0736+01	07:39:18	+01:37:05	16,4	0,191
5a	1E15498+203	15:52:02	+20:14:02	16,5	0,25
5b	PKS 1217+02	12:20:11	+02:03:42	16,5	0,24
6a	US 737	09:35:02	+43:31:12	16,3	0,456
6b	PKS1103-006	11:06:31	-00:52:52	16,4	0,426
7a	0214-033	02:17:29	-03:08:08.6	16,8	0,323
7b	PKS 2208-137	22:11:24	-13:28:09.7	17	0,39205
8a	CSO 233	09:39:35	+36:40:01	17	2,03
8b	PKS1022-102	10:24:56	-10:31:44	17	2
9a	CSO 21	09:50:45	+30:25:19	17	1,19
9b	PKS 1127-14	11:30:07	-14:49:27	16,9	1,187
10a	TON 156	13:21:16	+28:47:19	16,6	0,549
10b	PKS 1327-21	13:30:07	-21:42:04	16,7	0,528
11a	TON 133	12:51:00	+30:25:42	17	0,56
11b	3C 281	13:07:53	+06:42:13	17	0,599
12a	CSO 18	09:46:36	+32:39:51	17	1,3
12b	PKS 0514-16	05:16:15	-16:03:08	16,9	1,278
13a	E 0111+388	01:13:54	+39:07:45	16,7	0,234
13b	PKS 2247+14	22:50:25	+14:19:50	16,9	0,237
14a	MRK 1014	01:59:50	+00:23:41	15,6	0,163
14b	PKS 2349-01	23:51:56	-01:09:13	15,3	0,173
15a	Q0050-253	00:52:44	-25:06:51	16,1	0,626
15b	PKS 2243-123	22:46:18	-12:06:51	16,4	0,63
16a	US 3150	02:46:51	-00:59:31	16,8	0,467
16b	PKS 0003+15	00:05:59	+16:09:49	16,4	0,45
17a	US 3472	02:59:38	+00:37:36	16,6	0,532
17b	PKS 0122-042	01:24:34	-04:01:05	17	0,561
18a	MRK 830	14:50:26	+58:39:44.8	16	0,21
18b	OX 169	21:43:35	+17:43:49.5	15,7	0,213
19a	PG 1444+407	14:46:46	+40:35:06.0	15,6	0,267
19b	PKS 2135-14	21:37:45	-14:32:55.1	15,5	0,2
20a	PG 1543+489	15:45:29	+48:46:09	16,4	0,4
20b	PKS 1510-08	15:12:50	-09:05:60.0	16,5	0,361
21a	MC3 1750+175	17:52:46	+17:34:20.3	15,5	0,507
21b	PKS 2128-12	21:31:35	-12:07:04.5	16,1	0,501
22a	PG 1538+477	15:39:33	+47:35:33	16	0,77
22b	PKS 1424-11	14:27:37	-12:03:54	16,4	0,805
23a	PG1407+265	14:09:23	+26:18:18	15,9	0,944
23b	PKS 2145+06	21:48:05	+06:57:35	16,4	0,99

Los cuasares radio callados se identifican con la letra a; los cuasares radio emisores son identificados con una letra b).

1024×1024 píxeles de  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  cada uno, bañado de una cubierta de AR. En el telescopio EOCA, un Tektronics TK1024AB de 1024×1024 píxeles de  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  cada uno.

La estrategia de observación es similar a la descrita en el Capítulo 3, pero considerando tres filtros en lugar de sólo uno. Brevemente, se toma 5 imágenes de un objeto en cada filtro, en la secuencia BVR, salvo en un par de casos, de manera consecutiva (con un tiempo de exposición de  $\sim 1$  minuto). Para la fotometría diferencial, los errores en las diferencias de magnitud se obtuvieron directamente de las observaciones. Estos errores son típicamente de entre 0.001 y 0.01 magnitudes instrumentales. Adicionalmente, cada pareja de cuasares fue observada en la misma noche y, cuando fue posible, en secuencias traslapadas para evitar posibles sesgos debidos a diferentes condiciones observacionales.

Previo a la extracción de datos, las imágenes fueron corregidas por el ruido intrínseco del detector (*bias*) y por campos planos. Los campos planos fueron adquiridos tomando imágenes del cielo al inicio y/o final de cada noche de observación. Los objetos se observaron, en la medida de lo posible, cuando se encontraban cruzando el meridiano con el fin de minimizar efectos de color provocados por la extinción. Para cada objeto, estrellas de campo fungieron como estrellas de referencia y de comparación; típicamente, de cuatro a ocho estrellas fueron utilizadas para este fin (salvo en un par de casos donde sólo se contaba con dos estrellas). Las estrellas seleccionadas fueron aquéllas que permanecieron estables durante las observaciones, a un nivel de confianza del 20%. Aquí sólo se mostrarán los resultados con dos de ellas.

La reducción de datos se efectuó con la paquetería IRAF/APPHOT. Las aperturas utilizadas fueron elegidas mediante el método de curvas de crecimiento, lo que permite reducir el ruido en los datos. Las pseudo-aperturas típicas se encontraron entre los tres y seis segundos de arco. Cuando la galaxia huésped se apreciaba en las imágenes de algún objeto, aun para tiempos de exposición tan cortos, se tomó una apertura suficientemente grande para evitar efectos debidos a la dispersión atmosférica (*seeing*). Esto se hizo a pesar de que Carini y Miller (1991) y Clements y Carini (2001) encontraron que la galaxia huésped no puede provocar microvariaciones *falsas*, debido a luz de ésta que *entre y salga* de la apertura. Cellone, Romero y Combi (2000), por otro lado, mostraron que la galaxia huésped puede influir en la detección de variaciones espurias, pero sólo en condiciones de mucha variabilidad atmosférica (en que el FWHM varíe unos  $\sim 5$  segundos de arco) para galaxias tan brillantes como el núcleo. No existe un caso semejante en el estudio que ahora se presenta.

## 4.3 Resultados

En los resultados que se presentan a continuación, y que son discutidos en la sección 4.4, no se ha incluido los datos del objeto PKS 0736+017 ni de su pareja. Esto se debe a que el objeto se encontraba en un estado de gran actividad, lo que podría alterar los resultados de la muestra completa. A cambio, las observaciones de este objeto son presentadas en el Capítulo 6 pues, además, las características espectrales de las variaciones de este cuasar meritaron estudiarlas aparte.

Para cada objeto, la ocurrencia de microvariabilidad se estableció mediante una revisión visual de las curvas de luz, más la probabilidad arrojada por una prueba de varianzas ANOVA. En la prueba ANOVA se tomó un nivel de significancia (ver Capítulo 3) del 1% como criterio de detección de variabilidad. A diferencia de una prueba tradicional, donde el seguimiento se realizan de manera continua y se comparan las varianzas del objeto y de la estrella de comparación ( $C=\sigma_{obj}/\sigma_{est}=2.576$ , como criterio de detección de variabilidad; ver Jang y Miller 1997), ANOVA es una prueba estadística empírica muy robusta que considera todas las fuentes de error. Una prueba tradicional, por el contrario, se basa en un modelo teórico que no contempla todas estas fuentes, corriendo el riesgo de obtener resultados espurios. Por ejemplo, la dispersión interna de cada grupo de cinco observaciones (el error estándar) puede ser tan grande que ANOVA considere algunas variaciones como explicables a motivos ajenos a los cuasares, lo que no podría ocurrir en una prueba tradicional.

Tabla 4.2: Bitácora de observación y microvariabilidad

PAR ID	Fecha de Observación	Telescopio	Tiempo de monitoreo	Microvariabilidad
1a	1999/05/02	JKT	03:56:40	SÍ
	2000/03/02	EOCA	04:59:26	
1b	1999/05/02	JKT	02:15:44	
	2000/03/02	EOCA	03:30:19	
2a	1999/05/05	JKT	05:50:37	
	1999/06/16	JKT	02:53:35	
	2001/06/13	Mx1	02:23:30	
2b	1999/05/05	JKT	05:25:22	
	1999/06/16	JKT	02:53:41	
	2001/06/13	Mx1	01:17:56	
3a	2002/01/13	Mx2	03:22:09	
3b	2002/01/13	Mx2	03:58:35	
5a	1999/05/02	JKT	01:02:55	
	2000/03/03	EOCA	01:59:51	
5b	1999/05/02	JKT	03:54:31	
	2000/03/03	EOCA	03:45:00	
	2000/03/17	JKT	04:19:42	
6a	1999/05/03	JKT	04:08:51	
	2000/03/03	EOCA	04:58:32	
	2001/12/17	Mx1	03:56:57	
	2001/12/19	Mx2	04:48:38	
6b	1999/05/03	JKT	03:02:29	
	2000/03/03	EOCA	06:38:21	
	2001/12/17	Mx1	02:50:25	
	2001/12/19	Mx2	04:33:21	
7a	1999/08/19	JKT	03:05:08	
7b	1999/08/19	JKT	03:16:23	
8a	2001/12/18	Mx2	03:31:52	
	2001/12/18	Mx1	02:48:02	

Bitácora...(continuación)				
8b	2001/12/18	Mx2	03:29:07	
	2001/12/18	Mx1	02:46:41	
9a	2001/12/19	Mx1	02:32:35	SÍ
9b	2001/12/19	Mx1	02:35:35	
10a	2002/01/11	Mx2	01:23:57	
11a	2000/03/01	EOCA	02:38:34	
	2000/03/04	EOCA	03:49:35	
	2002/01/12	Mx2	01:18:37	
11b	2000/03/01	EOCA	02:40:04	SÍ
	2000/03/04	EOCA	03:44:49	SÍ
	2002/01/12	Mx2	02:45:25	
12a	2001/12/20	Mx1	03:36:44	
	2002/01/11	Mx2	02:39:46	
12b	2001/12/20	Mx1	03:59:41	
	2002/01/11	Mx2	05:29:03	
13a	1999/08/17	JKT	03:23:11	
	1999/08/20	JKT	03:46:18	
	2000/07/29	JKT	01:33:02	
	2000/07/31	JKT	01:42:45	
	2001/10/10	Mx1	04:44:42	
13b	1999/08/17	JKT	03:25:36	
	1999/08/20	JKT	02:37:51	
	2000/07/29	JKT	00:40:00	
	2000/07/31	JKT	04:40:07	
	2001/10/10	Mx1	04:06:31	
14a	1999/08/16	JKT	02:44:10	
	1999/08/21	JKT	03:22:12	
	2001/12/19	Mx2	02:29:26	
	2001/12/19	Mx1	02:55:27	
14b	1999/08/16	JKT	02:52:37	
	1999/08/21	JKT	03:28:59	
	2001/12/19	Mx2	02:31:04	
	2001/12/19	Mx1	01:51:12	
15a	2001/10/13	Mx1	05:13:22	
15b	2001/10/13	Mx1	04:16:14	
16a	1998/12/08	JKT	03:52:10	
	1999/08/18	JKT	02:53:12	
	2001/10/11	Mx1	05:22:55	
	2001/10/14	Mx1	05:20:06	
	2001/12/17	Mx1	04:30:35	
	2001/12/20	Mx1	04:15:26	
16b	1998/12/08	JKT	03:18:05	
	1999/08/18	JKT	03:21:42	
	2001/10/11	Mx1	03:08:26	SÍ
	2001/10/14	Mx1	05:15:19	
	2001/12/17	Mx1	02:12:59	

Bitácora...(continuación)				
	2001/12/20	Mx1	02:47:01	
17a	2001/10/14	Mx1	00:57:44	
	2001/12/20	Mx2	03:15:40	SÍ
	2002/01/12	Mx2	02:05:25	
17b	2001/10/14	Mx1	00:46:47	
	2001/12/20	Mx2	03:15:48	
	2002/01/12	Mx2	01:59:31	
18a	1999/08/17	JKT	02:11:23	POSIBLE
	1999/08/18	JKT	02:01:24	POSIBLE
	2000/03/24	JKT	03:33:12	
	2001/06/14	Mx1	01:07:52	SÍ
18b	1999/08/17	JKT	02:11:23	
	1999/08/18	JKT	02:24:38	
	2000/03/24	JKT	06:35:59	
	2001/06/14	Mx1	01:14:11	
19a	1999/06/20	JKT	02:53:01	
	2000/03/25	JKT	02:48:32	
	2000/07/26	JKT	02:42:44	
19b	1999/06/20	JKT	02:51:43	
	2000/03/25	JKT	05:45:06	
	2000/07/26	JKT	04:31:27	
20a	1999/06/18	JKT	03:01:45	
	1999/06/20	JKT	02:54:58	
	2000/03/19	JKT	04:51:52	
	2000/03/20	JKT	04:24:08	
	2001/06/16	Mx1	02:02:55	
	2001/06/18	Mx1	02:08:52	
20b	1999/06/18	JKT	03:16:22	
	1999/06/20	JKT	02:08:37	
	2000/03/19	JKT	04:45:06	
	2000/03/20	JKT	04:22:11	SÍ
	2001/06/16	Mx1	02:15:49	
	2001/06/18	Mx1	02:53:44	
21a	1999/06/19	JKT	02:16:37	
	1999/06/20	JKT	02:59:37	SÍ
	1999/08/16	JKT	03:36:02	
	1999/08/19	JKT	02:57:09	
	1999/08/20	JKT	03:08:51	
	1999/08/21	JKT	02:53:12	
	2000/07/27	JKT	04:11:22	
	2000/07/28	JKT	04:46:25	
21b	1999/06/19	JKT	02:07:57	
	1999/06/20	JKT	02:54:14	
	1999/08/16	JKT	03:22:20	
	1999/08/19	JKT	03:08:14	
	1999/08/20	JKT	03:36:16	

Bitácora...(continuación)			
	1999/08/21	JKT	02:51:06
	2000/07/27	JKT	03:49:53
	2000/07/28	JKT	02:39:16
22a	2000/03/18	JKT	04:55:32
22b	2000/03/18	JKT	02:25:01
23a	1999/06/17	JKT	03:01:45
	1999/06/20	JKT	02:57:07
23b	1999/06/17	JKT	04:03:35
	1999/06/20	JKT	03:11:34

De los 44 objetos observados, en 8 de ellos se detectó microvariabilidad, tres CRLQ y cinco RQQ. Los RQQ fueron: MC3 1750+175, Mrk 830, 1628.5+3808, CSO 21 y US 3472. Los CRLQ fueron: 3C 281, PKS 1510-089 y PKS 0003+15. En dos cuasares se observó microvariaciones en más de una noche: Mrk 830 se observó variar en tres noches (aunque en dos de ellas el nivel de significancia es de tan sólo 5%), mientras que 3C 281 varió en dos noches. Así, en total se cuenta con 11 posibles detecciones de microvariabilidad.

A continuación se describirá los resultados para cada uno de estos cuasares. En las Figuras 4.1 se muestra las curvas de luz diferenciales para cada objeto. En estas Figuras, los símbolos representan la media de cada grupo de cinco observaciones de cada objeto (panel izquierdo) y las estrellas (panel derecho). Las barras de error corresponden a un error estándar hacia cada lado y fueron calculados de la dispersión de cada grupo de cinco observaciones.

### 4.3.1 Cuasares Radio Emisores

**3C 281.-** Este cuasar radio emisor es conocido por encontrarse en un cúmulo de galaxias muy rico (Yee y Green 1987). Se ha reportado una variación de 0.15 magnitudes, en su emisión infrarroja, en un lapso de un año (Enya et al. 2002b). Cuando fue observado en mayo de 1997 (ver Capítulo 3) no se detectó evento alguno de microvariabilidad. En este cuasar se detectaron un par de eventos de microvariabilidad, los días 1 y 4 de marzo de 2000, con el telescopio EOCA.

*1 de marzo de 2000.-* Esta noche, el objeto fue monitoreado en tres ocasiones, cubriendo un lapso de tres horas. Un análisis visual de las curvas de luz muestra una disminución en el brillo del objeto de varias centésimas de magnitud (Fig. 4.1(a)). La prueba ANOVA confirma que existe una microvariación en las bandas B y V, detectable a un nivel de significancia del 1%, pero no en la banda R. Esta detección se aprecia con todas las estrellas disponibles. La amplitud máxima se registra entre el primer grupo de datos y el tercero. En la banda V, la amplitud de los cambios a partir del primer monitoreo es,  $\Delta V = 0.031 \pm 0.007$ , en un lapso de tiempo de 2.7 horas, mientras que entre el segundo y el tercero  $\Delta V = 0.024 \pm 0.007$ , en poco más de una hora. En la banda B, las amplitudes son  $\Delta B = 0.053 \pm 0.011$  entre el primer monitoreo y el tercero y  $\Delta B = 0.033 \pm 0.019$  mag entre el segundo y el tercero, en los mismos lapsos de tiempo.

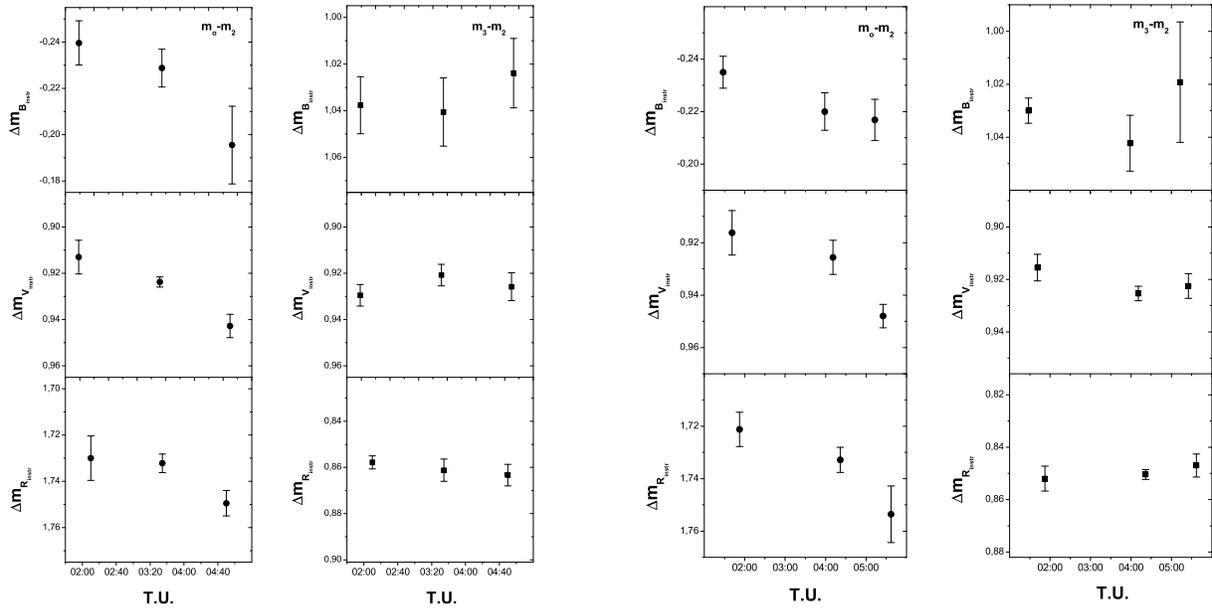
(a) **3C 281** (01/03/2000)(b) **3C 281** (04/03/2000)

Figura 4.1: Curvas de luz para los objetos discutidos en el texto. En cada Figura, el panel izquierdo muestra los datos para el cuasar, mientras que el panel derecho lo hace para las estrellas de comparación. En ambos casos los símbolos representan los valores promedios de cada grupo de cinco observaciones y, las barras de error representan un error estándar a cada lado del promedio. Al pie de cada Figura se indica el nombre del cuasar y la fecha de observación.

*4 de marzo de 2000.*- En esta noche, 3C 281 fue monitoreado en tres ocasiones en un lapso de 3.75 horas. Mediante una revisión visual de las curvas de luz, se puede establecer la ocurrencia de una posible variación en las tres bandas (Fig. 4.1(b)). Sin embargo, con la prueba ANOVA sólo son apreciables una variación en la banda V y una variación marginal (con un nivel de significancia del 5%) en la banda R. La amplitud de la variación es  $\Delta V = 0.027 \pm 0.006$  mag en el lapso del monitoreo, entre el primer grupo y el tercero.

**PKS 1510-089.**- Liller y Liller (1975) reportaron que, en la región óptica, este cuasar atravesó por un período de intensa actividad durante 1948, cuando pudieron observarse dos máximos separados por 57 días. En uno de éstos, la fuente alcanzó una magnitud mínima de  $B=11.8$  (cinco magnitudes más brillante de lo normal). El brillo reportado por estos autores corresponde a la magnitud en la banda B y se derivó de la colección fotográfica de Harvard, constituida de placas sensitivas al azul más un filtro B. Para 1952, el brillo había disminuido a  $B=15.0$  (ver Villata et al. 1997). En 1999 el objeto volvió a mostrar gran actividad. En marzo de ese año, el objeto cambió su brillo de  $B=17.21$  a  $B=16.65$  en tan sólo 40 minutos (Xie et al. 2001); mientras tanto, en junio el cambio fue de  $R=16.20$  a  $R=16.7$  en 28 minutos para después aumentar en brillo a  $R=16.11$  en 13 minutos. Dai et al. (2001) reportaron una variación de 2 mag, en la banda R, ocurrida durante los 41

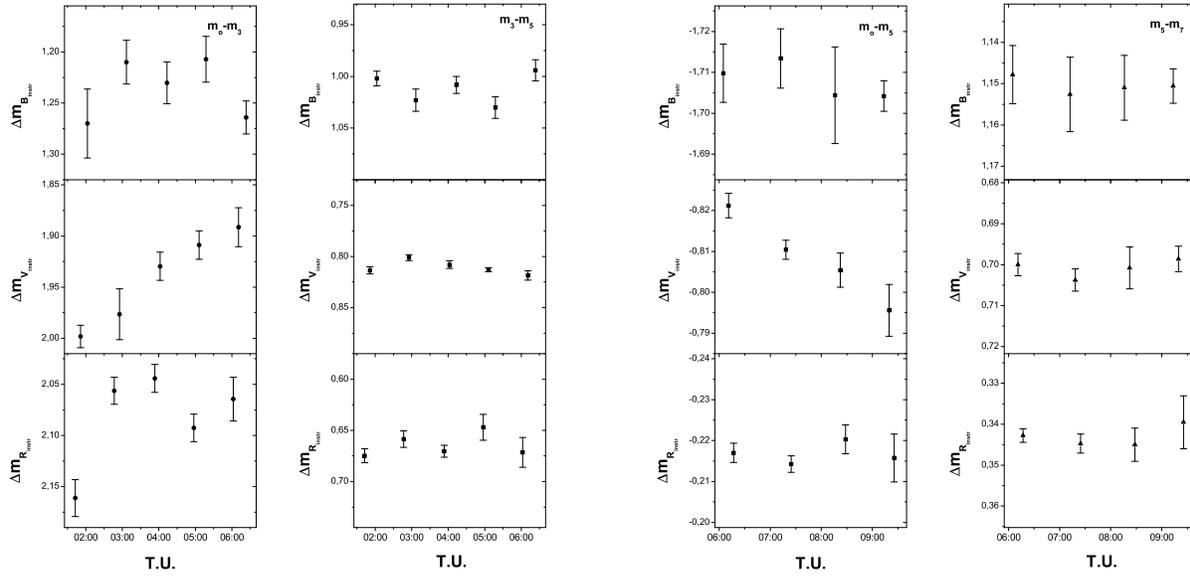
minutos que duró su monitoreo a finales de mayo de 2000. Por su parte, Xie et al. (2004) lo observaron variar en marzo de 2002 con las siguientes amplitudes:  $\Delta R \sim 0.8$  mag en 54 minutos,  $\Delta R \sim 1.35$  en 89 minutos y  $\Delta R \sim 0.54$  en 48 minutos. Sin embargo, Romero et al. (2002) y Romero Cellone y Combi (1999) no detectaron actividad alguna cuando lo observaron entre 1998 y 1999. Tornikoski et al. (1994) detectaron tres ráfagas en la región óptica, las cuales fueron seguidas por una contraparte en radio con 100 días de retardo. Villata et al. (1997) reportaron oscilaciones del brillo, en las bandas óptica B y R, con amplitudes de 0.63 mags. El espectro continuo de este cuasar radio emisor presenta un exceso óptico/UV muy pronunciado.

Para el estudio presente, el objeto fue monitoreado en 5 diferentes ocasiones durante la noche del 20 de marzo de 2000, dos meses antes que las observaciones de Dai et al. (2001), en un lapso de 4.3 horas. Las curvas de luz (Fig. 4.1(c)) indican un evento de microvariabilidad acompañado de un cambio en el color del objeto, pues la variación sólo es apreciable en las bandas V y R. Mientras que en V se detecta un cambio progresivo, en R se observa una variación entre el primero y el segundo conjunto de datos para permanecer en ese nivel de brillo el resto del monitoreo. La prueba ANOVA concuerda con lo que se aprecia en la Fig. 4.1(c). Esta variación está confirmada con un nivel de significancia del 1%. La comparación entre las estrellas indica que éstas no varían.

La microvariación en la banda V parece evolucionar, a lo largo de las 4.3 horas de monitoreo, de manera constante a razón de  $0.024 \pm 0.014$  mags/hr. En la banda R, la amplitud entre el primer conjunto de datos y el promedio de los subsiguientes es  $\Delta R = 0.108 \pm 0.008$ . Es claro que esta microvariación fue acompañada de un cambio en la forma del espectro óptico (ver Fig. 4.1(c)). Dos meses después de este evento, el cuasar fue observado por Dai et al. (2001), quienes reportaron una variación extrema de 2 mags en tan sólo 13 minutos. El brillo de la fuente habría disminuido de 16.02 a 17.74 en 27 minutos y enseguida aumentado a 15.74 en 13 minutos. Estos resultados muestran que PKS 1510-089 se encontraba, de nueva cuenta, en una etapa de gran actividad durante el primer semestre de 2000.

**PKS 0003+15.-** Históricamente, este cuasar ha mostrado gran actividad. Pica et al. (1988), en un monitoreo de cuatro años, detectaron una variación de 0.8 mags en el filtro B. Schramm et al. (1994) reportaron una variación de 0.1 mags en el filtro R. En 1991-1992, las observaciones muestran variaciones de 0.1 mag en las bandas B y V en intervalos de 10 meses (Guibin et al. 1995). En 1994, se volvió a observar una disminución del brillo con una amplitud de 0.27 mags en el filtro V (Guibin et al. 1998). En octubre de 1994, Jang y Miller (1995) observaron una variación en la banda R con amplitud de 0.11 mag en 2 horas. Garcia et al. (1999) detectaron microvariabilidad y variabilidad de período largo. Eggers et al. (2000) reportaron microvariabilidad, con cambios de 0.005 mag/hr en el filtro R en octubre de 1994. En el lapso de un año, el brillo promedio del objeto aumento poco más de 0.1 mags. El brillo promedio, reportado por estos autores, es  $R=15.3$ . Previo a todas estas variaciones, el objeto había mostrado gran actividad (e.g. Barbieri et al. 1979). Para el estudio del Capítulo 3, este objeto fue observado sin que se encontrara evento alguno de microvariabilidad.

Para el estudio presente, el objeto fue monitoreado en cuatro ocasiones el 11 de octubre de 2001. Mientras que el brillo permaneció constante en las bandas B y R, se apreció un



(c) PKS 1510-089 (20/03/2000)

(d) PKS 0003+15 (11/10/2001)

Figura 4.1: continuación.

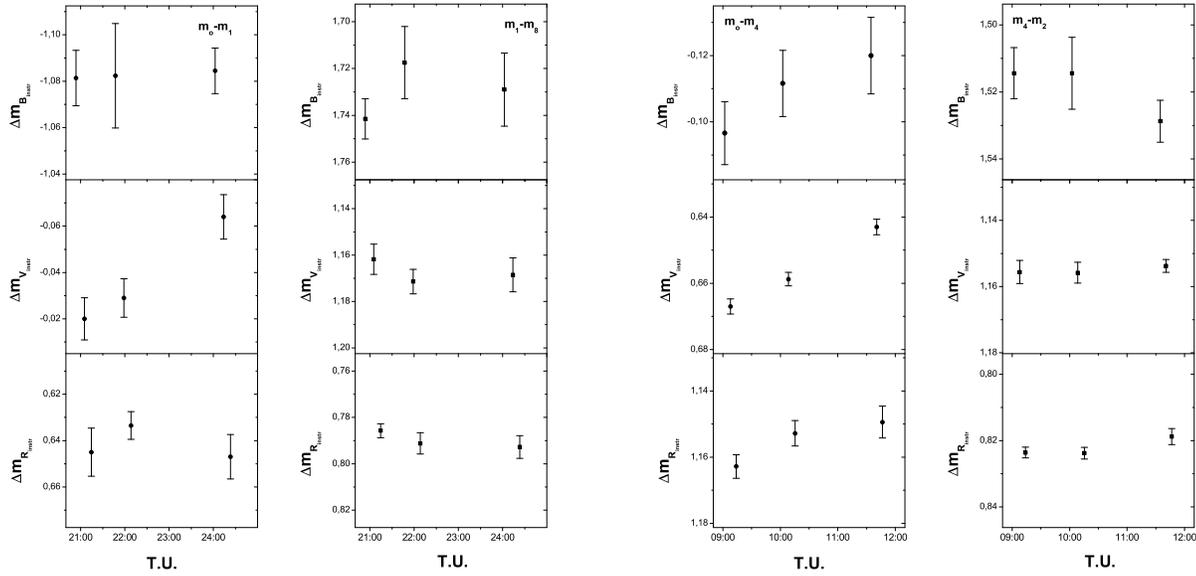
decremento en la banda V (Fig. 4.1(d)). La prueba ANOVA ratifica el resultado de esta revisión visual. La variación en la banda V es detectable al comparar con seis de las ocho estrellas en el campo. El cambio en brillo de este objeto se presentó a una tasa constante de  $0.008 \pm 0.005$  mags/hr durante las 3.13 horas que duró el monitoreo.

### 4.3.2 Cuasares Radio Callados

**MC3 1750+175.-** El único evento de variabilidad reportado para este cuasar corresponde a radiofrecuencias (Fanti et al. 1981; Mantovani 1982).

El objeto fue observado en tres ocasiones el 20 de agosto de 1999. Las curvas de luz (Fig. 4.1(e)) muestran un evento de microvariabilidad que sólo es visible en la banda V. Esta apreciación es confirmada por la prueba ANOVA. La amplitud de este cambio es  $\Delta V = 0.04 \pm 0.008$  mags, en un lapso de  $\sim 3.13$  horas, es decir, entre el primer conjunto de datos y el tercero.

**CSO 21.-** No hay reportes de variabilidad para este cuasar. Fue observado para el estudio del Capítulo 3, pero no se encontró señales de microvariaciones. Para el estudio presente, el objeto fue observado el 19 de diciembre de 2001 en tres ocasiones en un lapso de 2.5 horas. Aunque los datos de la banda B no son de muy buena calidad, en las curvas de luz (Fig. 4.1(f)) se aprecia un aumento gradual del brillo en la banda V. La prueba ANOVA indica, efectivamente, una variación en la banda V y una variación marginal en



(e) MC3 1750+175 (20/08/1999)

(f) CSO 21 (19/12/2001)

Figura 4.1: continuación.

la banda R (con un nivel de significancia del 10% para esta última), pero no así en B (si la tendencia observada en la curva de luz es una variación, ésta es ocultada por la dispersión interna de los datos). La prueba señala que las estrellas no estarían variando.

En la banda V se tendría, para una variación gradual, una tasa de cambio de  $0.010 \pm 0.003$  mag/hr. La amplitud del cambio en la banda R es, entre el primer conjunto de datos y el tercero,  $\Delta R = 0.016 \pm 0.004$  mag.

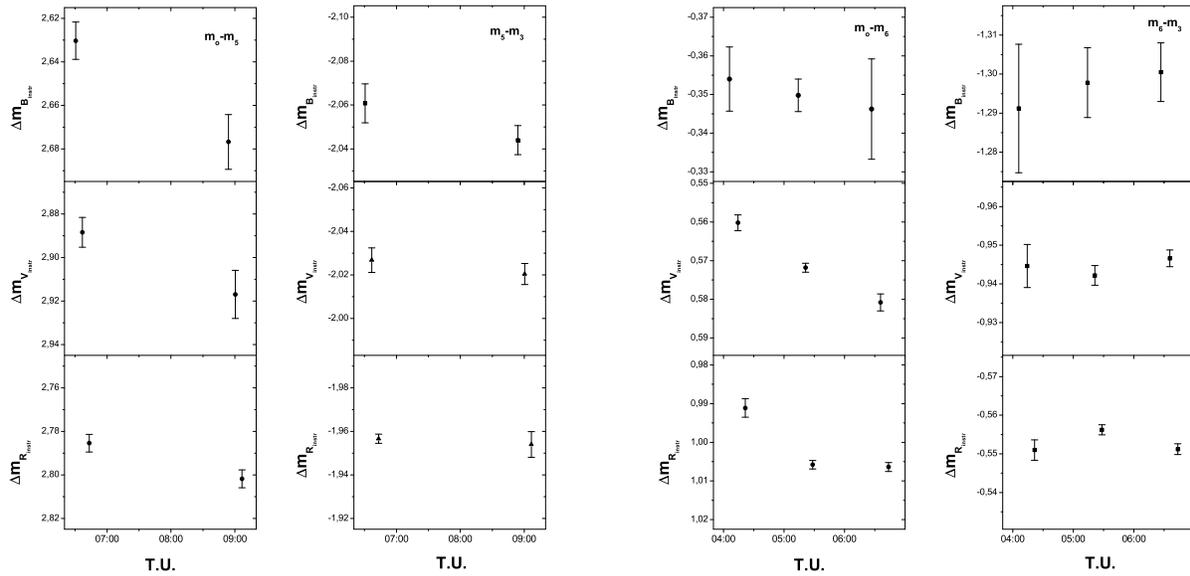
**1628.5+3808.-** El único reporte de microvariabilidad para 1628.5+3808 es el presentado en el Capítulo 3. Las dos variaciones detectadas ocurrieron en febrero y mayo de 1997. En febrero se detectó un evento con amplitud de 0.082 mags a lo largo de 3 horas de monitoreo. La microvariabilidad registrada en mayo, a lo largo de seis horas de monitoreo, estuvo constituida por pulsaciones con amplitudes de 0.04 a 0.057 mags.

El objeto fue monitoreado, en dos ocasiones, el 13 de junio de 2001. Las curvas de luz (Fig. 4.1(g)) muestran una disminución del brillo apreciable en las tres bandas.

La prueba ANOVA indica que la variación es detectable en las bandas B y R. En la banda V esta detección es tan sólo marginal, pues el nivel de significancia es del 5%. La dispersión de los datos en las estrellas de comparación muestra que éstas no presentan variaciones, con un nivel de significancia mayor que el 20%.

La amplitud de estos cambios sería  $\Delta B = 0.061 \pm 0.011$  mag y  $\Delta R = 0.018 \pm 0.004$  mag, en las 2.39 horas que duró el monitoreo. La detección marginal en la banda V tendría

una amplitud de  $\Delta V = 0.032 \pm 0.010$  mags.



(g) **1628.5+3808** (13/06/2001)

(h) **US 3472** (20/12/2001)

Figura 4.1: continuación.

**US 3472.-** En el Capítulo 3 se reportó microvariabilidad en la emisión óptica de este cuasar, con una disminución del brillo de 0.02 mags en un lapso de 50 minutos. A este declive del brillo siguió una serie de oscilaciones, durante 2 horas, con amplitudes entre 0.040 y 0.055 mags. También se ha reportado variabilidad de período largo en la emisión óptica e infrarroja (Enya et al. 2002).

Este objeto fue observado en tres ocasiones el 20 de diciembre de 2001, cubriendo un lapso de tiempo de 2.5 horas. Las curvas de luz (Fig. 4.1(h)) muestran una disminución sensible del brillo en las bandas V y R.

La prueba ANOVA confirma la variación, con todas las estrellas disponibles, ocurrida en estas bandas hasta por debajo de un nivel de significancia del 1%. En la banda V, el cambio parece haberse efectuado a una tasa constante de  $0.009 \pm 0.003$  mag/hr durante las 2.35 horas que duró el monitoreo. En R la variación es diferente pues entre el primer conjunto de datos y el segundo el brillo varió en  $0.014 \pm 0.002$  mag en un lapso de una hora. Hacia la tercera observación el objeto se encontraba en el mismo nivel de brillo.

**Mrk 830.-** Ningún tipo de variabilidad ha sido reportado para este cuasar (también clasificado como galaxia Sy1 por Veron-Cetty y Veron 2001). El objeto fue observado en busca de microvariabilidad en cuatro diferentes ocasiones, detectándose el fenómeno los días 17 y 18 de agosto de 1999 (con el telescopio JKT) y el 14 de junio de 2001 (con el telescopio Mx1). En las tres ocasiones el objeto poseía un brillo, en la banda V, cercano a 17.6 magnitudes. Este brillo es menor al reportado en NED ( $V=16.0$ ), pero muy cercano

a la magnitud reportada por Stepanian et al. (2001) ( $V=17.29\pm 0.03$  y  $B= 18.27\pm 0.06$ ,  $B-V = 0.98\pm 0.06$ ) y por Chavushyan et al. (1995) ( $V=17.62$ , con un color de  $B-V=1.10$ ).

Para el caso de las observaciones de agosto de 1999, lamentablemente, la mayoría de las estrellas de campo utilizadas en junio de 2001 no poseen una base de datos completa. Esto se debe a que, por descuido, en parte de las secuencias las estrellas utilizadas quedaron fuera del campo de las imágenes.

*17 de agosto de 1999.*- El objeto fue monitoreado en tres ocasiones en un lapso de 2.13 horas. Una revisión visual de las curvas de luz (Fig. 4.1(i)) indica la presencia de un evento de microvariabilidad detectable en la banda V. Debido a problemas instrumentales, se perdió el primer conjunto de imágenes de la banda R. La prueba ANOVA muestra que esta variación sería marginal, con un nivel de significancia del 3%. El incremento en brillo se habría efectuado a una tasa constante de  $0.015\pm 0.010$  mag/hr.

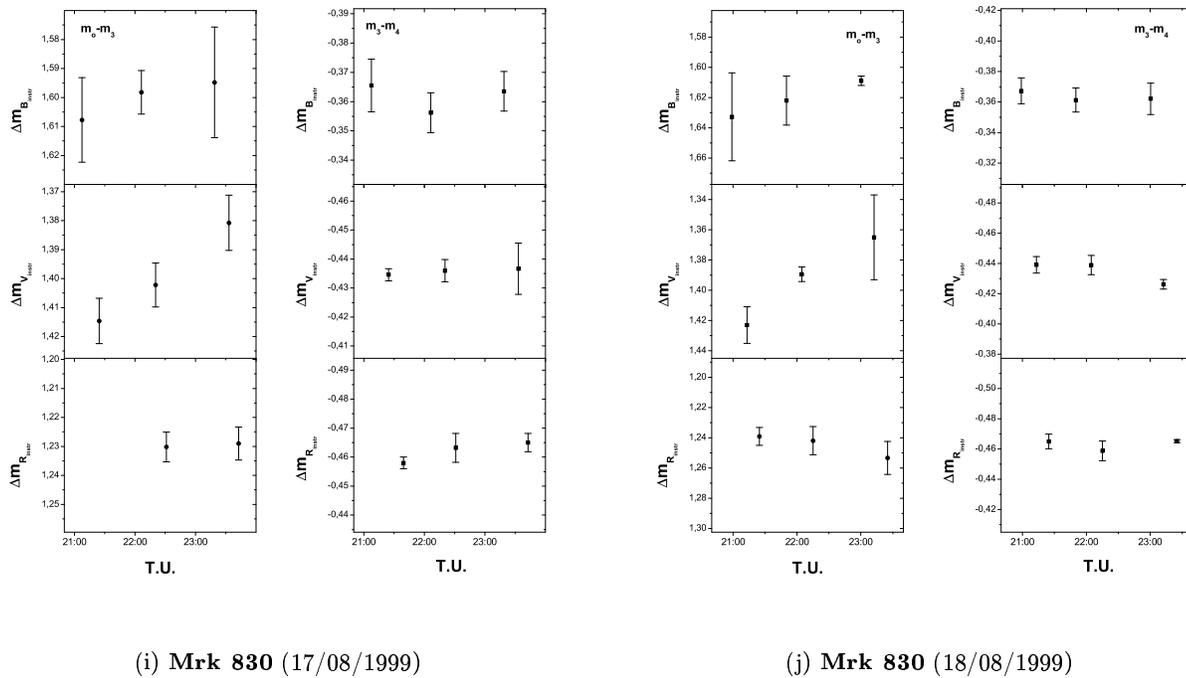
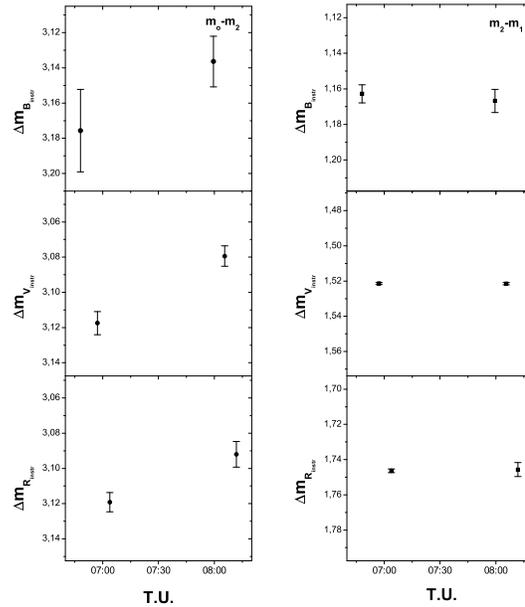


Figura 4.1: continuación.

*18 de agosto de 1999.*- El monitoreo consistió en tres grupos de observaciones a lo largo de dos horas. Una revisión de las curvas de luz (Fig. 4.1(j)) muestra, nuevamente, una posible variación en la banda V. La prueba ANOVA vuelve a detectar una variación marginal, con un nivel de significancia del 3%. Como ocurre en el caso de la noche anterior, la variación se habría presentado a una tasa constante, pero ahora sería de  $0.025\pm 0.027$  mags/hr.

*14 de junio de 2001.*- Esta noche el cuasar fue monitoreado sólo en un par de ocasiones. Una revisión visual de las curvas de luz (Fig. 4.1(k)) indica, a diferencia de lo ocurrido en agosto de 1999, una posible variación en las tres bandas. El brillo se habría incrementado

unas cuantas centésimas de magnitud entre los dos conjuntos de observaciones.



(k) **Mrk 830** (14/06/2001)

*Figura 4.1: continuación.*

De las tres noches, ANOVA muestra que es en ésta donde se apreció con mayor claridad la variación. Mientras que en las bandas V y R el nivel de significancia es de 1%, en la banda B el valor es de  $\sim 5\%$ . La dispersión interna en esta última banda es demasiado grande como para confirmar un cambio en el brillo. La amplitud de esta variación es de  $\Delta V = 0.039 \pm 0.007$  mags y  $\Delta R = 0.030 \pm 0.007$  mags, en un lapso de 1.18 horas. Si existe una variación en la banda B, la amplitud sería de  $\Delta B = 0.037 \pm 0.016$  mags.

## 4.4 Discusión

Una consecuencia inmediata de este trabajo consiste en advertir que la microvariabilidad es un fenómeno mucho más complejo de lo apreciable en estudios realizados en una sola banda óptica. Ello queda de manifiesto en los diferentes modos en que evoluciona el color de los cuasares durante eventos de microvariabilidad, aun para un mismo objeto (ver los casos de 3C 281 y Mrk 830). En el Capítulo 5 se analizarán estas variaciones espectrales.

Por ahora, se comparará los resultados de microvariabilidad entre las muestras de RQQ y RLQ. Los objetivos son 1) encontrar inferencias sobre las poblaciones de las cuales han sido extraídas las muestras al comparar los objetos que presentan microvariabilidad en cada muestra y, 2) describir la probabilidad de detectar un evento de microvariabilidad como función del tiempo en que un objeto es monitoreado. Las pruebas estadísticas utilizadas

se describen en el Capítulo 3. Algunas de ellas se refieren a propiedades cualitativas de los resultados (§ 4.4.1), mientras que otras a los resultados numéricos (§ 4.4.2). Las pruebas numéricas fueron realizadas sobre los datos de cada banda por separado.

Una prueba  $\chi^2$  para homogeneidad volvió a ser utilizada para comparar el número de objetos variables en cada muestra. Con ello puede determinarse si algún tipo de cuasar presenta mayor número de eventos de microvariabilidad que el otro. Esta comparación numérica de las diferencias entre las muestras se realiza a través del cotejo de las varianzas de los objetos pareados. Para ello, se consideró que la varianza observada, para cada objeto en cada banda, surge de diferentes fuentes de error. Así, se consideró que las varianzas podían separarse en dos componentes, una correspondiente al error observacional y otra debida a la varianza intrínseca de cada objeto (ver Cap. 3). Entonces se aplica un par de pruebas estadísticas sobre las medias de las diferencias de varianzas intrínsecas de los RQQ y CRLQ, una prueba *t de Student* de parejas y una de muestras independientes.

Al final de la sección se describirá la ocurrencia de microvariabilidad como función del tiempo de monitoreo, es decir, se calculará el Nivel de Actividad (ver Capítulo 2).

#### 4.4.1 La prueba $\chi^2$ para homogeneidad

La prueba  $\chi^2$  para homogeneidad se utiliza para comparar dos propiedades cualitativas de diversas muestras cuando el número de elementos en cada muestra es fijo. En el caso de este estudio se pretende encontrar si existe alguna diferencia entre las muestras de objetos y obtener alguna inferencia sobre las poblaciones de RQQ y CRLQ respecto a la microvariabilidad en la región óptica. Las hipótesis en que se basa la prueba son: la hipótesis nula:

*$H_o$ : las muestras están extraídas de una misma población en cuanto a las propiedades de microvariabilidad en el óptico;*

contra la hipótesis alternativa:

*$H_A$ : las muestras pertenecen a poblaciones distintas.*

Para cada muestra se contabilizó la cantidad de monitoreos donde se detectó microvariabilidad, sin importar la banda en que se presentó este fenómeno. Así, por ahora se considerará que un monitoreo está constituido por las observaciones en las tres bandas. Si bien cada observación se ha tomado como independiente, algunas pueden no serlo debido a que se trata del mismo objeto.

Así, el número total de observaciones pareadas para cada muestra es 63 (aunque en cada banda difiere el número de observaciones pareadas, es decir, las ocasiones en que se pudo observar a los dos miembros de un mismo par, que fueron de 61 para B, 63 para V y 61 para R). En 9 de estos monitoreos se detectó microvariabilidad, con un nivel de significancia del 1%. Este número se eleva a 11 cuando se toma en cuenta las dos detecciones marginales correspondientes a Mrk 830. De estas 11, cinco fueron detectadas en cuasares radio callados y cuatro en cuasares radio emisores.

En la Tabla 4.3 se presenta la tabla de contingencias  $\chi^2$  para estos datos. En ella aparece

Tabla 4.3: **Tabla de contingencias  $\chi^2$** 

Cuasares	Observado			Esperado	
	V(0.01)	NV(0.01)	Total	V(0.01)	NV(0.01)
RQQ	5	58	63	4.5	58.5
CRLQ	4	59	63	4.5	58.5
Total	9	117	126	9	117

*Tabla de contingencias  $\chi^2$  para comparar las propiedades en radio de la microvariabilidad de las dos muestras de cuasares. No parece haber diferencia alguna entre las dos muestras cuando se consideran los tres filtros. Este resultado indica que la microvariabilidad óptica es un fenómeno común a las dos clases de objetos.*

el número de observaciones en que se presentó variabilidad hasta un nivel de significancia del 1% (col. 1), el número de observaciones en que no hay evidencias de variabilidad (col. 2), el número total de observaciones (col. 3) y, las frecuencias esperadas de microvariaciones bajo la hipótesis nula, es decir, si ambos tipos de objetos poseen las mismas propiedades de microvariabilidad (cols. 4 y 5). Estas últimas se calculan multiplicando los totales parciales de cada fila y cada columna y dividiendo por el número total de observaciones. La prueba de homogeneidad muestra que la probabilidad de observar los resultados mostrados en la Tabla 4.3 puede obtenerse el 27% de las veces al extraer dos muestras aleatorias de la misma población. Así, la probabilidad de obtener las frecuencias de microvariabilidad observadas es suficientemente grande y no se rechaza la hipótesis nula, por lo que la similitud entre las dos muestras no debería ser cuestionada.

#### 4.4.2 Análisis estadístico de comparación de parejas

La prueba  $\chi^2$  para homogeneidad indica que las muestras pueden haber sido extraídas de la misma población. Nuevamente, se obtiene que la microvariabilidad óptica no depende de las propiedades en radio de los cuasares. Sin embargo, como se hizo en el Capítulo 3, se requiere una prueba sobre los valores cuantitativos de las varianzas de ambas muestras para verificar si la microvariabilidad es mayor (en amplitud) en un tipo de objeto que en otro. Los cambios de color registrados durante las variaciones hacen necesario considerar ahora los monitoreos de cada banda por separado.

En el Capítulo 3 se mostró que la varianza intrínseca de una fuente,  $V_r$ , puede escribirse como  $V_r = V_o - e^2/5$ , donde  $V_o$  se refiere a la varianza observada y  $e$  al error estándar dentro de cada grupo de cinco observaciones. Este último se refiere al error inherente a los procesos de observación y reducción de datos y se estima empíricamente de la dispersión media de cada grupo de cinco observaciones (es decir, el error estándar). Si en efecto ambas muestras son extraídas de la misma población, la diferencia media de las varianzas intrínsecas entre los objetos emparejados debería ser cero. La prueba estadística *t de Student* puede emplearse para encontrar diferencias entre las medias de muestras de datos cuando éstos tienen una distribución normal. Este es aproximadamente el caso de las diferencias de las varianzas intrínsecas. Para el total de monitoreos se calculó una prueba de parejas sobre los datos pareados en cada uno de los filtros. La prueba indica que no hay diferencias significativas entre las dos muestras (y arroja una probabilidad del 18.7%

en la banda B [en 61 monitoreos pareados] de que las diferencias observadas ocurran por casualidad. En el caso de V, esta probabilidad es del 19.1% [con 63 monitoreos pareados]. En la banda R es del 87% [con 61 monitoreos pareados]. Cuando se realiza una prueba de parejas independiente, los valores de la diferencia media son similares, dentro de los errores, al igual que la incertidumbre de tales diferencias).

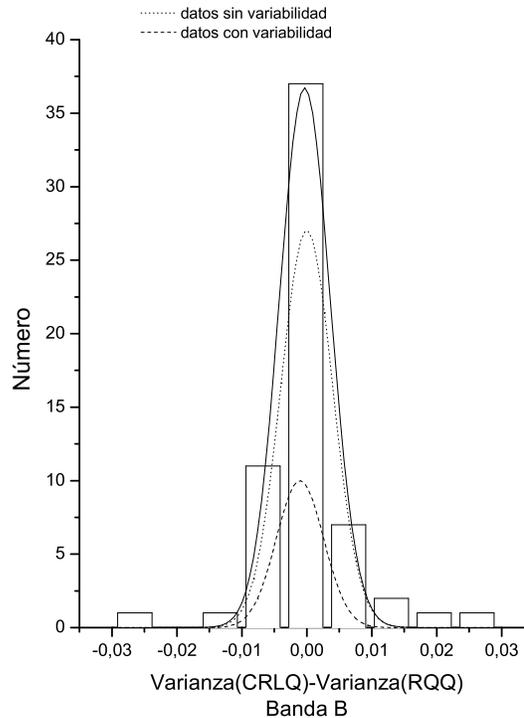


Figura 4.2a: *Histograma para las diferencias de las varianzas intrínsecas entre los CRLQ y RQQ pareados por observación en la banda B. La línea continua representa el resultado de ajustar la mezcla de dos distribuciones normales a los datos de objetos en que no se detectó microvariabilidad (línea a puntos) y los de aquellos objetos en que se detectó microvariabilidad al menos en una banda (línea a guiones).*

Los resultados de estas pruebas indican una diferencia muy pequeña en las propiedades de microvariabilidad de las muestras como para sugerir que provienen de poblaciones diferentes. En las Figuras 4.2a, 4.2b y 4.2c se muestra el histograma, para cada filtro, de la diferencia de las varianzas intrínsecas de las observaciones pareadas. Aunque a primera vista parecería que los datos pueden ser ajustados por una distribución gaussiana, en realidad no ocurre así. Un buen ajuste es obtenido al separar los datos entre monitoreos con variación (línea a guión) y monitoreos sin variación (línea punteada) (en este caso, se ha considerado que un monitoreo corresponde a una variación, aun cuando en el filtro en cuestión no se haya detectado variabilidad).

En la banda B, el grupo de datos donde no se detectó variabilidad está centrado en  $\sim 0$  y posee una desviación estándar de  $4 \times 10^{-3}$ , es decir, es indistinguible de cero (Fig. 4.2a); mientras, la componente de monitoreos con variabilidad tiene una desviación estándar de  $4 \times 10^{-3}$  y está centrada en  $1 \times 10^{-3}$ . Estos resultados indican que las muestras no son

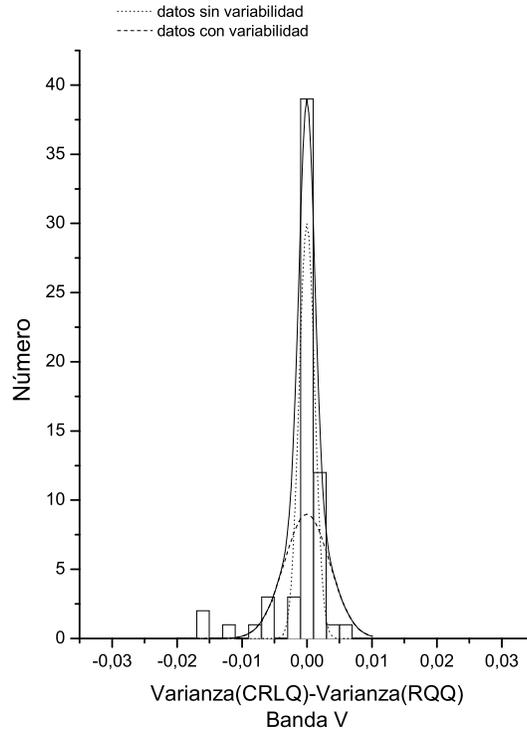


Figura 4.2b: *Histograma para las diferencias de las varianzas intrínsecas entre los CRLQ y RQQ pareados por observación en la banda V. La línea continua representa el resultado de ajustar dos distribuciones normales a los datos de objetos en que no se detectó microvariabilidad (línea a puntos) y los de aquellos objetos en que se detectó microvariabilidad al menos en una banda (línea a guiones).*

estadísticamente distinguibles. En la banda V se tiene un comportamiento similar (Fig. 4.2b); mientras que la componente no variable ajusta con una gaussiana cuya desviación estándar tiene un valor de  $1.2 \times 10^{-3}$  y está centrada en  $4 \times 10^{-4}$ , la componente variable se encuentra centrada en  $\sim 0$  con una desviación estándar de  $4 \times 10^{-3}$ . En la banda R, los datos ajustan con una sola gaussiana con desviación estándar de  $2.3 \times 10^{-3}$  y con un valor promedio de  $\sim 0$  (al tomar los datos en que se detectó microvariabilidad puede ajustarse una gaussiana centrada en  $4 \times 10^{-4}$  y desviación estándar de  $3 \times 10^{-3}$ , mientras que los datos de la no detección ajustan con una gaussiana centrada en 0 y desviación estándar de  $2.3 \times 10^{-3}$ ; Fig. 4.2c).

Estos resultados pueden verse afectados de alguna manera al considerar que algunos cuasares fueron observados en más ocasiones que otros. Por tal motivo, la prueba de parejas se repitió considerando los valores promedio, en cada banda, de las varianzas intrínsecas de un mismo par de objetos. El resultado cualitativo se mantiene, pues la prueba no encuentra diferencia significativa entre las muestras; sin embargo, los resultados cuantitativos cambian al hacer esto: en V, la probabilidad de que las diferencias observadas ocurran por casualidad aumenta hasta 27%, en B cambia hasta 23% y en R disminuye hasta 41%.

En este caso, los promedios se distribuyen de manera que el ajuste es bastante bueno,

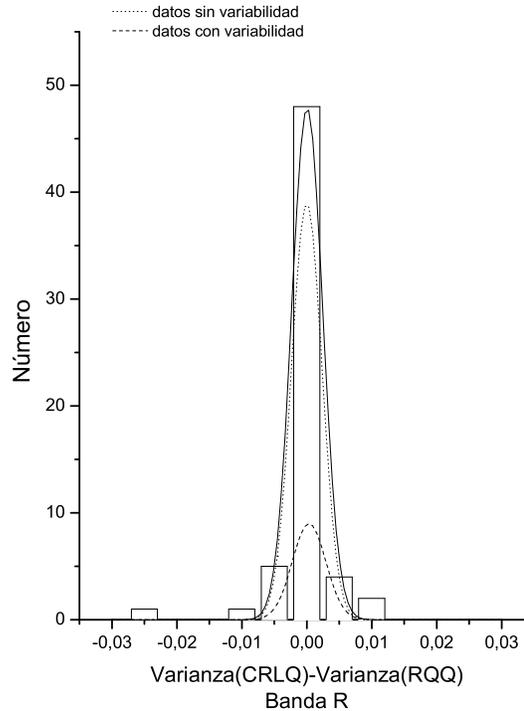


Figura 4.2c: Histograma para las diferencias de las varianzas intrínsecas entre los CRLQ y RQQ pareados por observación en la banda R. La línea continua representa el resultado de ajustar dos distribuciones normales a los datos de objetos en que no se detectó microvariabilidad (línea a puntos) y los de aquellos objetos en que se detectó microvariabilidad al menos en una banda (línea a guiones).

pues aunque se han perdido grados de libertad, los datos de las variaciones son *planchadas* por los datos sin variabilidad. Cabe destacar que la probabilidad obtenida para los datos de la banda V es consistente con el valor obtenido en el Capítulo 3, cuando se utilizó este mismo filtro.

La conclusión inmediata de estos resultados es que no se encuentra una diferencia significativa entre las dos muestras, es decir, las propiedades en radio de los objetos no influyen en la generación de microvariabilidad.

### 4.4.3 El Nivel de Actividad

La frecuencia con la que un tipo de NAG despliega microvariabilidad se mide con el Nivel de Actividad (DC, del inglés *Duty Cycle*). Caracterizar el Nivel de Actividad como función del tiempo es una herramienta muy útil para comparar el comportamiento de diferentes tipos de NAG y para planificar futuras observaciones. Debido a que algunas fuentes no despliegan microvariabilidad todo el tiempo (como puede apreciarse en la sección anterior), el DC se mide como el cociente del número de objetos que se han observado variar respecto al número total de monitoreos, pesados por el período de tiempo en que han sido observados,

esto es,

$$DC = 100 \frac{\Sigma N(\frac{1}{\Delta t_i})}{\Sigma(\frac{1}{\Delta t_i})} \% \quad (4.1)$$

(Romero et al. 1999). En esta expresión  $N = 1$  cuando se detectó microvariabilidad y 0 cuando no es así, y  $\Delta t_i = \Delta t_{oi}(1+z)^{-1}$ , donde  $\Delta t_{oi}$  se refiere al tiempo que duró el monitoreo en el sistema del observador y  $z$  es el corrimiento al rojo. Para calcular el DC se han considerado los monitoreos de RQQ y CRLQ en su conjunto, pues no se encontró diferencia entre las dos muestras. Cuando se calcula el DC sin tomar en cuenta la banda, se obtiene un valor del 9.1%. Si se considera los datos en que se obtuvo una detección marginal el valor no cambia demasiado, 9.9%.

Separando los datos por filtro se obtiene que en B,  $DC_B=2.3\%$  (pues sólo se tienen dos detecciones seguras en esta banda); en V,  $DC_V=6.8\%$  (pues tres de las detecciones en este filtro son marginales) y en R,  $DC_R=5.8\%$  (pues sólo se cuentan seis detecciones de microvariabilidad en esta banda). Los subíndices indican el filtro correspondiente.

Para la clase de los blazares, Carini (1990) reportó un DC de  $\sim 80\%$  para escalas de tiempo de horas a días, mientras que Sagar et al. (2004) reportaron un DC de 60% para microvariabilidad. Otros grupos de trabajo han encontrado resultados similares. Respecto a los cuasares, diversos grupos que investigan las propiedades en radio de la microvariabilidad han encontrado valores contradictorios para el DC de RQQ y RLQ (ver Capítulo 3). Esto se debe en parte a que en la mayoría de estos estudios, se considera por separado las muestras de RQQ y RLQ. Por ejemplo, Stalin et al. (2004) calcularon un DC para RQQ en el que sólo incluyeron los monitoreos correspondientes a las noches en que detectaron microvariabilidad, dejando fuera una parte de sus datos disponibles. Estos autores calcularon un DC para RQQ de 17%, mientras que calcularon un DC=15% para RLQ. Sus observaciones se realizaron en la banda R.

En el estudio presente, los valores encontrados para el DC cambian al tomar en cuenta, como lo hicieron Stalin et al. (2004), sólo aquellas noches con detecciones de microvariabilidad. Considerando las tres bandas, se observó un DC=30.7% (si se toman en cuenta las detecciones marginales, DC=34.5%). Al separar los datos por banda se obtiene que  $DC_B=8\%$ ,  $DC_V=23.7\%$  y  $DC_R=20\%$ .

Otros grupos, que han estudiado las propiedades en radio de los cuasares, han encontrado diferencias en el nivel de actividad de estos objetos. Romero et al. (1999) calcularon un DC para objetos RL y RQ de 68% y 6.9%, respectivamente (sus observaciones fueron realizadas con un filtro V). Tomando los datos de Jang y Miller (1997) se obtiene que el nivel de actividad para los RQQ debería ser de 7.6%, mientras que el de los RLQ sería del 60.6% (sus observaciones las realizaron con un filtro R). Con los datos de Gopal-Krishna et al. (2000), para objetos RQ, se obtiene un DC del 6.1% (tomando en cuenta sus detecciones que al menos son *muy probables*), mientras que al incluir las *detecciones probables* el DC es de 29.4%. Estos resultados muestran una clara diferencia entre cuasares radio emisores y radio callados, lo cual representa un comportamiento muy diferente al encontrado en el estudio presente.

En este punto sobresale la importancia de elegir una muestra confiable, sobre todo para estudios comparativos de este tipo. En el caso de Romero et al. (1999), estos autores

utilizan una muestra de objetos RL que incluye varios objetos BL Lac. El 53% de sus monitoreos y el 67% de sus detecciones de microvariabilidad, corresponden a objetos RL. Recordando que esta clase de NAG posee un DC sumamente alto (80%), no es de extrañar que se encuentre una diferencia entre objetos RL y RQ. Incluso, al comparar los valores obtenidos por de Diego et al. (1998) y Stalin et al. (2004), los resultados de Romero et al. (1999) hacen ver una clara diferencia entre la clase de los BL Lac y los cuasares normales. En cuanto a Jang y Miller (1997), su muestra está constituida básicamente por objetos típicamente no variables en el óptico, ya que está conformada en 90% por galaxias Sy1. Además, los objetos RQ de su muestra son relativamente más débiles que los RL. Esto se pone de manifiesto al ver que la magnitud promedio de RQ es similar a la magnitud promedio de RL (sólo difieren en un 2%), pero los RQ se encuentra a menor corrimiento al rojo (los promedios difieren en un 62%; para los RQQ la  $z$  promedio es de 1.3 mientras que la  $z$  promedio para los RLQ es de 0.5). Aunque en el presente trabajo no se encontró evidencia a favor de que la microvariabilidad pueda depender del brillo o del corrimiento al rojo, de ser así, es probable que una muestra semejante pueda afectar los resultados.

El problema de muestras no homogéneas también está presente en el trabajo de Gopal-Krishna et al. (2000). Este trabajo sólo consta de observaciones sobre RQQ y el único cuasar RL que observaron fue un BL Lac. Sus resultados son obtenidos de observaciones realizadas en dos bandas diferentes (V y R) lo que de acuerdo a los resultados obtenidos, expuestos en § 4.3, también puede introducir sesgos al no considerar que la frecuencia de microvariabilidad puede diferir aun para bandas tan cercanas. El 31.6% de las detecciones de Gopal-Krishna et al. (2000) corresponde a la banda V, mientras que el 68.4% a la banda R. Poco más del 60% de las observaciones de Gopal-Krishna et al. se realizaron en el filtro R, por lo que cabe preguntarse si esta diferencia en la detección se debe a un sesgo en las observaciones o a una diferencia real en el nivel de actividad entre V y R.

Cabe destacar que cuando Gopal-Krishna y sus colaboradores hacen una nueva selección de objetos (ver Stalin et al. 2004 y Gupta et al. 2005), lo hacen emulando los criterios del trabajo presente. Con estas nuevas muestras obtienen resultados semejantes a los presentados en el Capítulo 3. Aun así, los resultados de Stalin et al. (2004) deben ser tomados con cautela debido a que su muestra de RLQ está constituida por objetos que presentan estructura en radio, lo que puede traer consecuencias serias debido a la orientación del jet ya que, tal como ellos lo muestran, la orientación del jet puede influir tanto en la amplitud como en la escala temporal de una variación.

En el Capítulo 3 se desarrolló un método alternativo para calcular el nivel de actividad. En este método se consideraba que todos los cuasares presentan el mismo nivel de actividad en  $H$  horas de monitoreo. De nueva cuenta, los datos se agruparon de acuerdo a la duración del monitoreo en parcelas con intervalos de 1 hora. Se han excluido las parcelas de 6 y 7 horas ya que el muestreo resultó muy pobre. Utilizando los datos del presente Capítulo en las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.2, se obtiene que la media de  $P_1$  tiene un valor igual a  $6.4 \pm 4\%$ , lo cual no es diferente del valor encontrado en el Capítulo 3 ( $P_1 = 5 \pm 2\%$ , la mayor incertidumbre puede deberse al uso de tres filtros en lugar de sólo uno). Esto nos habla de la consistencia del método observacional utilizado. La Tabla 4.4 es similar a la Tabla 3.3, cuyas columnas muestras, respectivamente, los valores de  $H$ ,  $N_H$ ,  $E_H$ ,  $P_H$  y  $P_1$  para cada parcela centrada en  $H$ .

Tabla 4.4: Nivel de Actividad

H	$N_H$	$E_H$	$P_H$	$P_1$
1	10	2	0.200	0.0200
2	21	3	0.143	0.074
3	53	4	0.075	0.026
4	25	2	0.080	0.021
5	17	0	.....	.....

NOTA.- Los datos fueron agrupados en parcelas de tiempo

## 4.5 Resumen y conclusiones

Se ha realizado un estudio comparativo de las propiedades en radio de la microvariabilidad en cuasares. Para ello, una muestra de 23 RQQ y 23 CRLQ fue observada en las bandas ópticas BVR. Con el fin de evitar cualquier sesgo debido a la selección de la muestra, los objetos fueron elegidos de manera que a cada CRLQ le correspondiera un RQQ similar en brillo y corrimiento al rojo. La elección de CRLQ para conformar la muestra de RLQ evita fácilmente sesgos debidos a la orientación y, en caso de variabilidad producida en el jet asegura que intervendrán efectos relativistas grandes. Adicionalmente, para evitar posibles sesgos debidos al clima y/o los instrumentos, cada pareja de objetos fue observada durante la misma noche en secuencias traslapadas.

Cada evento de microvariabilidad se examinó mediante una prueba ANOVA de un solo sentido más una revisión visual de las curvas de luz. Con ello, se tienen cinco eventos en RQQ y cuatro en CRLQ donde la probabilidad de una detección positiva alcanzó un valor menor al 1%. Posteriormente, las propiedades de microvariabilidad de cada muestra fueron comparadas utilizando una prueba  $\chi^2$  para homogeneidad. Esta prueba no mostró una diferencia significativa entre las muestras, en concordancia con los resultados obtenidos en el Capítulo 3.

Adicionalmente, se mostró que ambos tipos de cuasares presentan, cuantitativamente, las mismas propiedades de microvariabilidad. Para ello, se aplicó una prueba *t de Student* a las diferencias de las varianzas de cada pareja RQQ-CRLQ. Dado que los cuasares fueron pareados por su brillo y corrimiento al rojo, estas propiedades no influyen en este resultado. Más aún, los resultados no difieren al aplicar una prueba estadística *t de Student* independiente sobre el total de monitoreos, confirmando que la evolución de los objetos parece tener poca influencia sobre la microvariabilidad.

Finalmente se calculó el Nivel de Actividad (DC), es decir, la probabilidad de detección de microvariaciones como función del tiempo de monitoreo. Esta probabilidad es del 2.3% en la banda B, 6.8% en la banda V y 5.8% en la banda R. Estos porcentajes aumentan al tomar en cuenta los datos de sólo aquellas noches donde se detectó microvariabilidad. En tal situación, el valor del DC es de 8% para la banda B, 23.7% para la banda V y 20% para la banda R. Sin separar los datos por filtro se obtiene un DC de 9.1% para el total de observaciones y 30.7% para los datos correspondientes a las noches donde se detectó microvariabilidad.

Los resultados obtenidos por Jang y Miller (1995, 1997), Gopal-Krishna et al. (2000) y Romero et al. (1999) indican que la microvariabilidad podría estar relacionada con la emisión en radio de los cuasares. Sin embargo, en estas investigaciones se utilizan muestras demasiado heterogéneas, lo que no permite un estudio comparativo adecuado. Por otro lado, cuando Gopal-Krishna et al. hicieron una nueva selección de objetos, emulando una muestra similar a la descrita en el Capítulo 3, los resultados que obtienen son compatibles con los del estudio presente (Stalin et al. 2004; Gupta et al. 2005). Al comparar los resultados presentados en los Capítulos 3 y 4 y la de estos grupos de trabajo debe tenerse en cuenta que las metodologías utilizadas son muy diferentes.

Estos resultados indican que la microvariabilidad debe tener un origen similar en ambos tipos de objetos, RQQ y RLQ, pues este fenómeno no depende de sus propiedades en radio. Hace diez años este resultado habría favorecido a los modelos que explican la microvariabilidad como el resultado de procesos en el disco de acreción, dejando de lado los modelos basados en el jet. Sin embargo, la detección de jets relativistas en RQQ indica que el mecanismo físico en ambos tipos de objetos puede ser el mismo o muy parecido. Con ello, aunque los estudios comparativos han aportado avances en la comprensión de estos objetos, aún no es posible establecer el origen de la microvariabilidad.

Dado que los eventos relacionados con el disco de acreción tienen un origen térmico y los relacionados con el jet uno no térmico, durante la evolución de un cambio de brillo esta diferencia debería manifestarse en la forma del espectro continuo. Es posible que un estudio de color permita hacer tal distinción. En el siguiente Capítulo se presenta un estudio en que se analiza esta posibilidad.





## Capítulo 5

# Caracterización Espectral de la Microvariabilidad en Cuasares.

### 5.1 Introducción.

Los resultados del capítulo 4 muestran que la microvariabilidad es un fenómeno complejo, incluso más de lo que puede apreciarse en los estudios fotométricos que utilizan una sola banda. No obstante, estos resultados confirman las conclusiones presentadas en el capítulo 3, esto es, establecen que la microvariabilidad no depende de las propiedades en radio de los cuasares. Junto con el hallazgo de jets en RQQ, esto indica que el mecanismo de emisión de RQQ y RLQ podría ser el mismo, o por lo menos similar. Si bien éste es un avance importante en el estudio del fenómeno NAG, es deseable establecer si la microvariabilidad se origina en el disco de acreción o en el jet relativista.

La importancia de este discernimiento reside en las restricciones que pueden imponerse a los modelos de producción de energía de un cuasar. En este sentido, puesto que el exceso óptico/UV es identificado con la emisión del disco de acreción (Krishan y Wiita 1994; Galeev, Rosner y Vaiana 1979; Liang y Thompson 1979; Lawrence 2005; Pereyra et al. 2006), los estudios en esta región espectral, incluyendo por supuesto los estudios de microvariabilidad óptica, pueden ofrecer entonces un diagnóstico sobre las condiciones físicas del disco. No obstante, la presencia de otras componentes espectrales, tales como la emisión del jet, complica cualquier escenario que sea propuesto.

Diversas investigaciones indican que la forma del espectro continuo es reproducida aceptablemente por los modelos. Esta forma suele caracterizarse, como se dijo en el Capítulo 2, mediante el índice espectral, definido como la pendiente de una curva en el plano  $\log(f_\nu)$  vs.  $\log(\nu)$  y establecido como la diferencia en magnitudes entre diferentes bandas, esto es,  $\alpha \equiv \log(f_{\nu_2}) - \log(f_{\nu_1}) / \log(\nu_2/\nu_1) = -0.4(m_{\nu_2} - m_{\nu_1}) / \log(\nu_2/\nu_1)$  (e.g. Massaro et al. 1998; Trevese y Vagnetti 2002). Por otro lado, la variabilidad en la forma del espectro continuo ofrece una vía para establecer si los modelos han sido ajustados correctamente.

Si bien se ha llevado a cabo algunos estudios de esta índole, la mayor parte de ellos utilizan cuando mucho sólo dos bandas del óptico o promedian los valores del color, perdiendo

con ello información sobre la *textura* de las variaciones (Trevese y Vagnetti 2002; Webb y Malkan 2000; Giveon et al. 1999; Webb y Malkan 2000; D'Amicis et al. 2002; Trevese y Vagnetti 2002; Vagnetti y Trevese 2003). Así, el riesgo de perder detalles importantes de las componentes es inevitable (ver por ejemplo el trabajo de Siemiginowska et al. 1995, quienes en un estudio de color no pueden explicar adecuadamente la dispersión de sus datos en la región óptico-IR). Por otro lado, estas investigaciones no han abordado el tema de la microvariabilidad.

Trevese y Vagnetti (2002) realizaron uno de los trabajos más sobresalientes sobre la variabilidad de período intermedio. Ellos estudiaron el comportamiento del espectro óptico de una muestra de cuasares en el plano  $\alpha - \beta$ , donde  $\alpha$  se refiere al índice espectral y  $\beta$  es un índice de variabilidad espectral. En su investigación encontraron que la variabilidad de período intermedio debería originarse por procesos térmicos. Sin embargo, sus datos muestran una dispersión excesiva, por lo que no se descarta la acción de otras componentes. Además, agrupan sus datos en parcelas de corrimiento al rojo ( $z$ ) y luminosidad ( $L$ ), con lo que pierden definición en el comportamiento de las componentes espectrales.

Otro problema relacionado con los estudios de color se refiere al tiempo de retardo de un evento de variabilidad (en inglés se le conoce como *time lag*). Las observaciones indican un retardo en el cambio de flujo entre diferentes regiones espectrales, lo cual es cierto aun para bandas tan cercanas como las bandas ópticas. Así, el problema consiste en la dificultad de realizar observaciones simultáneas en diferentes bandas, tratando de evitar el establecer una forma errónea al espectro. Por ello, es necesario contar con un criterio en torno al lapso de tiempo máximo que debe transcurrir entre las observaciones en diferentes filtros. En el trabajo presente este criterio se basa en la tasa de cambio de brillo observado (ver Apéndice C), la cual debería ser mayor al tiempo de captura de una secuencia de imágenes.

En el Capítulo presente se mostrará un estudio de color, realizado sobre las variaciones presentadas en el Capítulo 4, el cual se basa en la definición de un índice de variabilidad espectral. El objetivo es determinar si la microvariabilidad se origina en el disco de acreción (es decir, por procesos térmicos) o en el jet (es decir, por procesos no térmicos). En este sentido, no se pretende establecer que proceso físico en particular genera un evento de variabilidad, sino de distinguir la naturaleza térmica o no térmica de dicho evento.

Para ello, es necesario modelar la emisión continua de los cuasares en que se detectó microvariabilidad, así como la variación de este continuo. La forma del espectro fue establecida mezclando y ajustando una ley de potencias y la emisión de cuerpo negro a los datos iniciales para cada objeto y en cada noche. La variabilidad espectral se establece, posteriormente, mediante la comparación de los cambios en el nivel de flujo entre diferentes bandas.

En § 5.2 se comenta el tratamiento de los datos. En § 5.3 se explica la manera en que se modela el continuo de emisión de cada cuasar y, se define el índice de variabilidad espectral. En § 5.3.1 se explica la manera en que funciona el método que se emplea en § 5.4 para analizar los datos. Finalmente, en § 5.5 se discute los resultados y, en § 5.6 se presenta un resumen y las conclusiones.

## 5.2 Los datos

Tabla 5.1: **Bitácora de observación y microvariabilidad**

PAR	Fecha de	Tiempo		
ID	Observación	Telescopio	de monitoreo	Microvariabilidad
3C 281	2000 mar 01	EOCA	02:40	SÍ
3C 281	2000 mar 04	EOCA	03:45	SÍ
PKS 1510-08	2000 mar 20	JKT	04:22	SÍ
PKS 0003+15	2001 oct 11	Mx1	03:08	SÍ
MC3 1750+175	1999 jun 20	JKT	02:59	SÍ
CSO 21	2001 dic 19	Mx1	02:32	SÍ
1628.5+3808	2001 jun 13	Mx1	02:23	SÍ
US 3472	2001 dic 20	Mx2	03:16	SÍ
Mrk 830	1999 ago 17	JKT	02:11	POSIBLE
Mrk 830	1999 ago 18	JKT	02:01	POSIBLE
Mrk 830	2001 jun 14	Mx1	01:08	SÍ

Nota: Extracto de la tabla 4.2. Los monitoreos corresponden a las detecciones de microvariabilidad reportadas en el capítulo 4.

Los detalles sobre la selección de objetos han sido expuestos en los Capítulos 3 y 4, al igual que la estrategia de observación y reducción de datos. Brevemente, se observó una muestra conformada por 22 cuasares con emisión puntual en radio (CRLQ) y otra constituida por 22 cuasares radio callados (RQQ) (se han excluido los datos de PKS 0736+017 y sus pareja). Las observaciones se efectuaron en cuatro telescopios ubicados en México y España, en las bandas BVR de la serie de Johnson-Cousins. La estrategia de observación consistió en monitorear a una pareja de objetos durante la misma noche y en secuencias traslapadas, tomando 5 imágenes de un objeto en cada filtro en la secuencia BVR (cada imagen con  $\sim 1$  minuto de exposición). Los errores son extraídos directamente de las observaciones y corresponden al error estándar dentro de cada grupo de 5 observaciones. La reducción de datos se realizó mediante el uso de la paquetería IRAF/APPHOT. Mediante la técnica de curvas de crecimiento se estableció aperturas que oscilaban entre los 3 y 6 segundos de arco, salvo en los casos en que la galaxia huésped fuera observada, situación en la que se utilizó una apertura mayor. En el capítulo presente se discutirán sólo aquellas observaciones en que un evento de microvariabilidad fue detectado. La Tabla 5.1 da cuenta de la bitácora de tales observaciones.

Antes de continuar se debe hacer una aclaración importante en torno a los datos presentados en el capítulo anterior. Originalmente, se esperaba discernir una microvariación térmica de una no térmica sólo con observar si la forma del espectro continuo presentaba un quiebre durante el cambio de flujo. Por ello, se utilizaron tres bandas ópticas en lugar de cuatro (o más), con la finalidad de evitar caer en una falta de simultaneidad. Las variaciones de origen térmico deben presentar el mayor cambio de color, lo que podría traducirse como un quiebre en la forma del espectro en un plano  $\log(f_\nu)$  vs.  $\log(\nu)$ . Sin embargo, durante el desarrollo de esta investigación, y una vez que ya se tenían los datos, se presentó el inconveniente de que este tipo de quiebres podrían no ser detectados debido

en parte a la amplitud minúscula de las microvariaciones, y en parte a que algunos de estos quebres podrían ser generados por variaciones no térmicas. Adicionalmente, al trabajar con flujos absolutos, la variabilidad espectral se habría encontrado susceptible de efectos espurios como, por ejemplo, el enrojecimiento.

Si bien es cierto que en el nuevo esquema de investigación es necesario ajustar un continuo a la información de tres bandas ópticas (lo cual puede llevar a errores grandes en el cálculo de los parámetros del modelo), también es cierto que estos errores poco tienen que ver con la descripción de las variaciones espectrales. Así, por ahora, los valores de este primer ajuste deben ser considerados más como una sugerencia que como un intento por restringir las condiciones físicas de las componentes espectrales. El ejemplo más claro se presenta para el caso de una variación no térmica, por cambios en el índice de una ley de potencias que contribuya al flujo total. En este caso, el valor inicial del índice tiene escasa relevancia (ver § 5.3 y Apéndices). Las verdaderas restricciones surgirán de la discriminación del origen (térmico o no térmico) de la microvariabilidad. En un futuro se podrá realizar un trabajo más completo, donde intervengan observaciones simultáneas incluso en regiones espectrales más allá del óptico, y con una densidad temporal más grande.

### 5.3 Continuo de emisión de un cuasar y la variabilidad en su forma.

Para describir la causa de un evento de microvariabilidad, antes que nada se debe suponer que el origen de la emisión de un cuasar es conocido. Dado que el continuo de emisión debe ser la suma de los flujos provenientes de las diferentes fuentes que conforman el NAG, el flujo específico debe estar dado por

$$f_{\nu} = f_{\nu_1} + f_{\nu_2} + f_{\nu_3} + \dots, \quad (5.1)$$

donde las componentes pueden ser identificadas con el disco de acreción, el jet, la galaxia huésped, el polvo, etc. La suposición más simple consiste en describir el continuo observado como la mezcla de emisión térmica y emisión no térmica (veanse los Capítulos 1 y 2). La primera componente suele asociarse con la emisión del disco de acreción, mientras que la segunda es identificada con el jet de partículas relativistas (las cuales estarán denotadas en lo subsiguiente por los subíndices  $T$  y  $n$ , respectivamente). Así, al instante  $t$  la emisión estaría determinada por

$$f_{\nu t} = f_{\nu n t} + f_{\nu T t}, \quad (5.2)$$

donde  $f_{\nu t}$  se refiere al flujo específico total,  $f_{\nu n t}$ , al flujo de la componente no térmica y,  $f_{\nu T t}$  al flujo de la componente térmica.

Al tiempo inicial ( $t = t_0$ ) la emisión no térmica contribuye con una proporción determinada por

$$a_{\nu t_0} \equiv \frac{f_{\nu n t_0}}{f_{\nu t_0}}, \quad (5.3)$$

mientras que la emisión térmica contribuye con una proporción

$$b_{\nu t_0} \equiv \frac{f_{\nu T t_0}}{f_{\nu t_0}}. \quad (5.4)$$

Adicionalmente, resulta útil (como se verá más adelante) comparar el flujo de cada componente al momento  $t$ , respecto al flujo total medido al tiempo inicial, esto es,

$$a_{\nu t} \equiv \frac{f_{\nu nt}}{f_{\nu t_0}}, \quad (5.5)$$

y

$$b_{\nu t} \equiv \frac{f_{\nu Tt}}{f_{\nu t_0}}. \quad (5.6)$$

Es claro que al variar una de las componentes lo hará también el flujo total (ver ecuación 5.2). Para medir este cambio en el nivel de flujo, resulta conveniente tomar la diferencia de flujo total entre un instante cualquiera  $t$  y el tiempo inicial  $t_0$ , y normalizar respecto al flujo total al tiempo inicial, esto es,

$$\varpi_{\nu t} \equiv \frac{f_{\nu it} - f_{\nu it_0}}{f_{\nu t_0}} \quad (5.7)$$

donde  $f_{\nu it}$  ( $i = n, T$ ) representa a la componente que ha variado.

Esta normalización resulta muy conveniente, pues la diferencia en flujos queda determinada por la proporción inicial de la componente que ha introducido el cambio y el flujo al tiempo  $t$  de ésta respecto al flujo total inicial (las expresiones 5.3 a 5.6). Es decir, para una variación debida a la componente no térmica, la expresión 5.7 puede ser escrita como

$$\varpi_{\nu n} = a_{\nu t} - a_{\nu t_0}, \quad (5.8)$$

mientras que para una variación de origen térmica se tiene

$$\varpi_{\nu T} = b_{\nu t} - b_{\nu t_0}. \quad (5.9)$$

Además, el valor del cociente  $\varpi_{\nu}$  es independiente del sistema fotométrico (estándar o instrumental), por lo que es posible evitar la propagación de errores, obteniendo con ello mayor exactitud. Otras ventajas consisten en evitar correcciones a los datos por extinción interestelar, así como evitar suposiciones cosmológicas (como el establecer valores para la constante de Hubble y el parámetro de desaceleración), toda vez que el cociente de flujos debe ser independiente de la distancia lumínica (Apéndice A).

Como la variabilidad espectral se establece al medir los cambios en el índice espectral, es decir, en los cambios de color, esto significa comparar los cambios de flujo entre diferentes bandas. En el caso de las observaciones presentes, la banda B ha sido tomada para comparar a las bandas V y R. Esto significa analizar los datos en los planos  $\varpi_{Vvs.\varpi_B}$  y  $\varpi_{Rvs.\varpi_B}$ , donde se puede representar (a manera de trayectorias bien definidas) los cambios de las componentes térmica y no térmica. Aunque un sólo par de frecuencias podría indicar el origen de la variación, en ocasiones no basta, por lo que es mejor utilizar tres o más bandas (como se verá más adelante), obteniendo así dos o tres planos, los cuales deberían ser analizados de manera simultánea. En el caso presente, con tres bandas, se define entonces el plano  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$ , donde se representan los cambios de flujo entre las bandas V y B y entre R y B a manera de un *índice de variabilidad espectral*.

Para determinar las trayectorias en estos planos, es decir, la manera en que varía  $\varpi_{\nu}$  depende del modelo que se utilice, toda vez que  $a_{\nu}$  y  $b_{\nu}$  son el cociente de flujos; así, por

ejemplo, si una de las componentes se refiere a emisión de tipo ley de potencias se tendría algo como lo que aparece en la ecuación 5.15.

Los valores de  $a_{\nu t_0}$  y  $b_{\nu t_0}$  están relacionados analíticamente entre las diferentes bandas haciendo más sencillo el análisis (ver apéndice B), pues sólo se requiere establece la contribución en una de las bandas. Los valores en V fueron utilizados para este propósito; obteniendo para la componente térmica

$$b_{\nu t_0} = b_{V t_0} \frac{f_{oV}}{f_{o\nu}} 10^{-0.4(m_{V t_0} - m_{\nu t_0})} \frac{f_{\nu t_0}}{f_{V t_0}},$$

mientras que para la componente no térmica

$$a_{\nu t_0} = a_{V t_0} \frac{f_{oV}}{f_{o\nu}} 10^{-0.4(m_{V t_0} - m_{\nu t_0})} \frac{f_{\nu t_0}}{f_{V t_0}}.$$

En estas expresiones,  $f_{\nu t_0}$  se refiere al modelo de emisión para la componente correspondiente;  $f_{o\nu}$ , a una constante de transformación entre los sistemas fotométricos instrumental y estándar (ver Zombeck 1990) y  $m_{\nu t_0}$  a la magnitud (ya corregida por extinción). Es fácil e importante notar que  $b_{\nu t_0} = 1 - a_{\nu t_0}$ . Es conveniente que el tiempo inicial corresponda al primer conjunto de observaciones para cada objeto y para cada noche.

De estas ecuaciones se obtiene las expresiones analíticas de 5.8 y 5.9. Así, para generar las curvas en los planos  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$  se requiere establecer la proporción inicial de cada componente (en la banda V) y, la descripción analítica de cada una.

En el estudio presente, la emisión térmica del disco se describirá por la emisión de un cuerpo negro *simple*, es decir,

$$f_{\nu T t} = \beta_t B_\nu(T_t) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^3} \frac{\beta_t}{e^{h\nu/kT_t} - 1}, \quad (5.10)$$

mientras que la emisión no térmica del jet estará determinada por una ley de potencias simple, es decir,

$$f_{\nu t} = A_t \nu^\alpha. \quad (5.11)$$

Las constantes  $A_t$  y  $\beta_t$  representan la amplitud de la emisión al tiempo  $t$ ; en otras palabras, ayudan a nivelar el flujo teórico de cada componente al nivel del flujo observado. Aunque la emisión del disco de acreción así modelada es una sobre-simplificación, no se pretende decir que la emisión del disco sea de tal naturaleza, es sólo que este es el tipo de emisión más simple que puede ajustar los datos (algo similar ha sido hecho con anterioridad por Malkan et al. 1986 y Lawrence 2005, entre otros).

Para efectuar el ajuste del modelo sobre los datos iniciales, de cada noche y para cada objeto, las magnitudes se transformaron a flujos absolutos. Recuérdese que el flujo se relaciona con la magnitud mediante la expresión

$$\log f_\nu = -0.4m_\nu + \log f_{o\nu},$$

(e.g., Zombeck 1990) donde  $m_\nu$  es la magnitud en el sistema estándar y  $f_{o\nu}$  es el flujo correspondiente a una estrella de magnitud cero. Otra forma de escribir esta ecuación es

$$f_\nu = f_{o\nu} 10^{-0.4m_\nu}.$$

Por otro lado, el sistema estándar está relacionado con el sistema instrumental mediante una expresión de la forma

$$m_\nu = a + m_{i\nu},$$

donde  $m_{i\nu}$  es la magnitud instrumental (ya corregida por extinción atmosférica). Debe recordarse que al contar sólo con tres bandas ópticas, los ajustes solamente son una aproximación somera, que será ratificada o rechazada por las curvas de variabilidad espectral. Los modelos se presentan en § 5.3.1 fueron ajustados a los flujos así obtenidos.

En el Apéndice B se muestra que una vez determinado el modelo de emisión  $f_{\nu t_0}$ , se puede ajustar el modelo a partir de tomar el cociente del flujo de la componente  $i$  ( $i = n, T$ ) entre el flujo inicial de la misma componente en la banda V. En el modelo del continuo de emisión se debe considerar que la frecuencia a la que se observa no corresponde a la frecuencia de emisión en la fuente, es decir,  $f_\nu \propto L(\nu[1+z])$ , donde  $L$  representa a la luminosidad emitida por la fuente y  $f_\nu$  al flujo observado (ver por ejemplo Kembhavi y Narlikar 1999). Para la componente no térmica, esto implica

$$\frac{f_{\nu n}}{f_{\nu n t_0}} = \frac{A_t}{A_{t_0}} \nu^\alpha \nu_V^{\alpha t_0} (1+z)^{\alpha - \alpha t_0}, \quad (5.12)$$

es decir,

$$f_{\nu n} = \frac{A_t}{A_{t_0}} \nu^\alpha \nu_V^{\alpha t_0} (1+z)^{\alpha - \alpha t_0} a_{V t_0} f_{ov} 10^{-0.4 m_{V t_0}}. \quad (5.13)$$

De manera similar, para el caso de la componente térmica se tendría que

$$f_{\nu T} = \frac{\beta_t}{\beta_{t_0}} \nu^3 \nu_V^{-3} \frac{\exp((h\nu_V/\kappa T_{t_0})(1+z)) - 1}{\exp((h\nu/\kappa T)(1+z)) - 1} b_{V t_0} f_{ov} 10^{-0.4 m_{V t_0}}. \quad (5.14)$$

Donde la magnitud  $m_{V t_0}$  se refiere a la magnitud en el sistema estándar ya corregida por extinción interestelar (la corrección por extinción interestelar se realizó mediante los valores reportados en NED para cada cuasar). Así, los parámetros del modelo son: el índice de la ley de potencias de la componente no térmica, la temperatura de la componente térmica y la contribución al flujo total (en la banda V) de la componente no térmica.

### 5.3.1 Índice de variabilidad espectral y los modelos de emisión de un cuasar.

En el Apéndice B se muestra que para una variación debida a la componente no térmica, la expresión 5.7 puede escribirse como

$$\varpi_\nu = a_{0\nu} [n_n (\nu + z\nu)^{\alpha - \alpha_0} - 1], \quad (5.15)$$

mientras que una variación térmica debería escribirse como

$$\varpi_\nu = b_{0\nu} (n_T [\frac{\nu}{\nu_V}]^3 \frac{e^{(h\nu_V/kT_0)(1+z)} - 1}{e^{(h\nu/kT)(1+z)} - 1} - 1). \quad (5.16)$$

En estas expresiones se ha sustituido el uso de  $t_0$  por un simple 0 para indicar que se trata del tiempo inicial; por ejemplo,  $a_{0\nu} = a_{\nu t_0}$  y  $b_{0\nu} = b_{\nu t_0}$ . Por otro lado,  $n_T = \frac{\beta_t}{\beta_0}$  y

$n_n = \frac{A_t}{A_0}$  (ver Apéndice B), haciendo factible calcular el cambio en la amplitud de cada componente sin necesidad de recurrir a valores absolutos. El valor inicial de estos cocientes es la unidad ( $n_{T0} = n_{n0} = 1$ ), y aumenta o disminuye de acuerdo a los cambios en la amplitud del brillo. Por ejemplo, un valor de  $n_T = 2$  implica que el valor de  $\beta_t$  se ha duplicado en el período de tiempo  $t - t_0$ . La inyección de nuevas partículas de la misma energía, o un cambio en el tamaño de la región emisora pueden provocar un cambio en la amplitud.

El ajuste de este *modelo juguete* se realiza sobre los datos correspondientes al inicio de la noche, obteniendo los valores de  $T_0$ ,  $\alpha_0$  y  $a_{0V}$ . Sin embargo, en el caso de los datos presentes sólo se cuenta con tres bandas, por lo que existen varias combinaciones de estos parámetros con las que se puede reproducir los datos. Este problema se puede resolver en parte realizando un procedimiento complementario, tomando como ajuste inicial el ajuste más sencillo, una ley de potencias, y observando si las curvas en el plano  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$  permiten explicar las variaciones a partir de ese primer ajuste. Si en este plano se encuentra una explicación factible a la variación observada, por simplicidad se puede considerar que el método ha encontrado una explicación factible del evento de microvariabilidad; si ocurre lo contrario, es decir, no se encuentra una explicación factible en este plano, se debe regresar al plano  $\log(f_\nu) - \log(\nu)$  y modificar el ajuste a los datos iniciales, añadiendo una componente extra y repitiendo el procedimiento (más adelante se ejemplificará este método).

En las expresiones 5.15 y 5.16 es posible que una variación sea producida por cambios simultáneos de las dos variables de una sola componente (es decir,  $T$  y  $\beta$  o  $\alpha$  y  $A$ ) en sentidos opuestos. Así, aunque el brillo comience a aumentar, por ejemplo, debido al cambio en el índice espectral, la disminución del brillo por un decremento en la amplitud de esta componente podría provocar que el brillo total comience a disminuir. Un caso semejante podría darse en una expansión de la componente térmica que produjera una disminución en la temperatura de la misma. La combinación de estos cambios puede provocar un vaivén en la curva (ver la Figura 5.1), como consecuencia del predominio de la variación en uno de los parámetros y la subsiguiente preponderancia del otro.

Una vez que se tiene el ajuste del modelo a los datos iniciales, se introducen cambios en los valores de  $T$  y/o  $n_T$  o a  $\alpha$  y/o  $n_n$ . Cada nuevo valor introduce así una variación en el nivel de brillo, calculando el correspondiente valor de  $\varpi_\nu$ . La sucesión de estos valores genera la trayectoria que deberían seguir los datos del objeto en el plano  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$ , conforme una variación se desarrolla. En la Figura 5.1 puede verse de manera esquemática este procedimiento para una variación de la componente térmica, en la que se incrementa el valor de  $T$  mientras disminuye el valor de  $n_T$  (curva superior), y para el caso en que  $T$  disminuye mientras que  $n_T$  aumenta (curva inferior). Así, el primer valor de  $\varpi_\nu$  es cero, y conforme se desarrolla la variación (es decir, conforme la diferencia entre  $T_0$  y  $T_t$  se incrementa:  $|T_{t_1} - T_0| < |T_{t_2} - T_0| < |T_{t_3} - T_0| < |T_{t_4} - T_0|$ ) se van generando las curvas en estos planos. En lo sucesivo sólo se mostrará el resultado final de este procedimiento, es decir, la trayectoria completa después de cierto tiempo transcurrido, que en el caso de la Figura 5.1 correspondería al panel inferior derecho (marcado como  $t_4$ ).

Como se mencionó líneas arriba, para los datos de los objetos presentados en el capítulo 4 no es posible establecer un conjunto único de parámetros ( $T_0$ ,  $\alpha_0$  y  $a_{0V}$ ) del *modelo juguete* de emisión, puesto que varias combinaciones de éstos pueden explicar las observaciones.

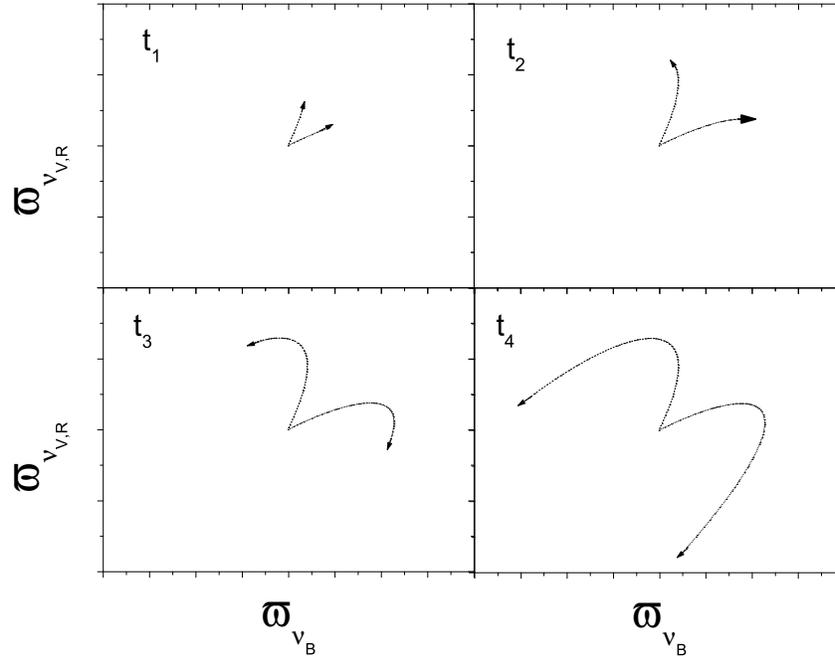


Figura 5.1: Los cambios en  $T$  y/o  $n_T$  o en  $\alpha$  y/o  $n_n$  generan variaciones en el nivel de brillo. Para cada nuevo nivel de flujo se calcula el valor de  $\varpi_{nut}$  y, colocándolos en el plano  $\varpi_{V,R}$  vs.  $\varpi_{V,B}$ , se va obteniendo la trayectoria correspondiente a la variación. En la figura se muestra un ejemplo de lo anterior para dos casos: uno para el cual  $T$  aumenta y  $n_T$  disminuye (curva superior en cada panel) y otro para el que  $T$  disminuye y  $n_T$  aumenta (curva inferior en cada panel). El primer valor corresponde al origen  $(0, 0)$ . En cada panel se muestra distintos momentos de estas variaciones, comenzando por el panel superior izquierdo ( $t_1$ ), prosiguiendo con el panel superior derecho ( $t_2$ ), y siguiendo con el panel inferior izquierdo e inferior derecho ( $t_3$  y  $t_4$ , respectivamente).

Para ejemplificar el problema véase la Figura 5.2. En esta gráfica se muestra un ajuste a los datos del objeto PKS 1510-089, en la cual se observa tres diferentes valores para la temperatura del disco (26 000 K, 20 000 K y 30 000 K) para los mismos valores de  $a_{0V}$  y  $\alpha_0$ . Como se puede ver, los tres valores ajustan de manera razonable. Ante este problema, para el caso del ajuste de dos componentes se ha supuesto un error arbitrario del 20% en el cálculo de los parámetros del modelo. El problema sería resuelto utilizando al menos cuatro bandas ópticas. Pese a ello, nótese la importancia de la posibilidad de distinguir una variación de origen térmico de una de origen no térmico, como puede apreciarse en las Figuras 5.3 y 5.6c(c).

Aunque efectivamente no puede darse un valor único a los parámetros, también es posible realizar estimaciones que, basándose en los valores encontrados en la literatura, permitan establecer un ajuste aceptable a partir del cual sea posible determinar la causa de una determinada variación.

Para ejemplificar el procedimiento que será utilizado en el resto del capítulo, se ha tomado los datos de PKS 1510-089. Antes que nada, los datos del primer monitoreo de la noche son transformados a flujos. En el plano  $\log(f_\nu) - \log(\nu)$  se ajusta a éstos el modelo de emisión más sencillo, correspondiente a una sola componente no térmica (Figura 5.8c(a)). A partir de los valores de este ajuste, se introduce pequeños cambios en  $\alpha$  y  $n_n$  y, se calcula  $\varpi_\nu$  obteniendo una curva en los planos  $\varpi_V : \varpi_B$  y  $\varpi_R : \varpi_B$ . Como puede verse en el panel c de la Figura 5.8c, la suposición de una componente espectral única no resulta suficiente, pues no importa si la variación en el índice  $\alpha_t$  se combina con variaciones en la amplitud (caso en que se tendrá el mayor cambio de color), no hay manera de que una sola componente pueda reproducir los datos.

Entonces, es necesario volver al plano  $\log(f_\nu) - \log(\nu)$  y añadir una segunda componente a la emisión del cuasar. Esta segunda componente debe ser la emisión térmica del disco. Una vez más se enfatiza en que el modelo más simple que ajusta a los datos es un cuerpo negro *simple* (aunque no debe olvidarse que el disco de acreción debe ser más complejo). Algunas investigaciones sugieren que la temperatura del disco debería encontrarse, aproximadamente, entre los 20 000 K y los 30 000 K (ver por ejemplo Czerny y Elvis 1987; Pereyra et al. 2006), aunque no se descartan temperaturas fuera de este rango (ver por ejemplo Lawrence 2005; Pereyra et al. 2006). En la Figura 5.2 se aprecia el nuevo ajuste a los datos de PKS 1510-089, combinando los flujos de origen térmico y no térmico. En el estudio de blazares, la contribución de la última componente podría ser  $\sim 80\%$ ; sin embargo, para el caso de un cuasar esta contribución debería ser de una proporción menor, incluso podría no ser la componente dominante en el óptico.

El índice espectral de la componente no térmica debería encontrarse en  $\alpha \sim -1$  (ver § 1.4 y § 2.4). En todos los casos se utilizó este valor para el segundo ajuste. Aunque en la literatura se encuentra que este valor es el que mejor describe los datos (las investigaciones suelen apoyarse en información del IR y rayos X), se procedió a comprobar si esta elección podría tener algún efecto relevante en el discernimiento del origen de un evento de microvariabilidad.

Esta exploración se efectuó tomando diferentes valores para  $\alpha_0$  y calculando los correspondientes valores de  $T_0$  y  $a_{0V}$ . A partir de éstos, se simulan variaciones debidas a las componentes térmica y no térmica. En las Figuras 5.6 y 5.7 se muestra, a manera de ejemplo, las curvas de variabilidad espectral para los datos de PKS 1510-089, correspondientes a cambios debidos a la componente no térmica y térmica, respectivamente. Las curvas corresponden a valores de  $\alpha_0 = -1, -0.7$  y  $-2$ . Como puede apreciarse en estas gráficas, la elección de  $\alpha_0 = -1$  puede no tener influencia en la descripción de la variación espectral.

Este resultado era de esperarse, pues como puede apreciarse en las ecuaciones 5.15 y 5.16, el valor inicial de  $\alpha$  no es tan relevante durante una variación. Incluso, la ecuación 5.15 muestra que para variaciones no térmicas, el valor de  $\alpha_0$  no importará tanto como sí ocurre para los valores de  $\alpha - \alpha_0$  y  $a_{0V}$ . La diferencia entre las curvas de la Figura 5.6 se debe precisamente a los diferentes  $a_{0V}$  que se han tomado. Para el caso de variaciones térmicas, diferentes combinaciones entre  $a_{0V}$  y  $T_0$  pueden generar diferencias mayores en la variabilidad debida a esta componente.

Para el ajuste mostrado en la Figura 5.2, la temperatura del cuerpo negro se ha supuesto en  $\sim 26\,000$  K (aunque se incluyen los valores totales para la mezcla con un cuerpo negro de

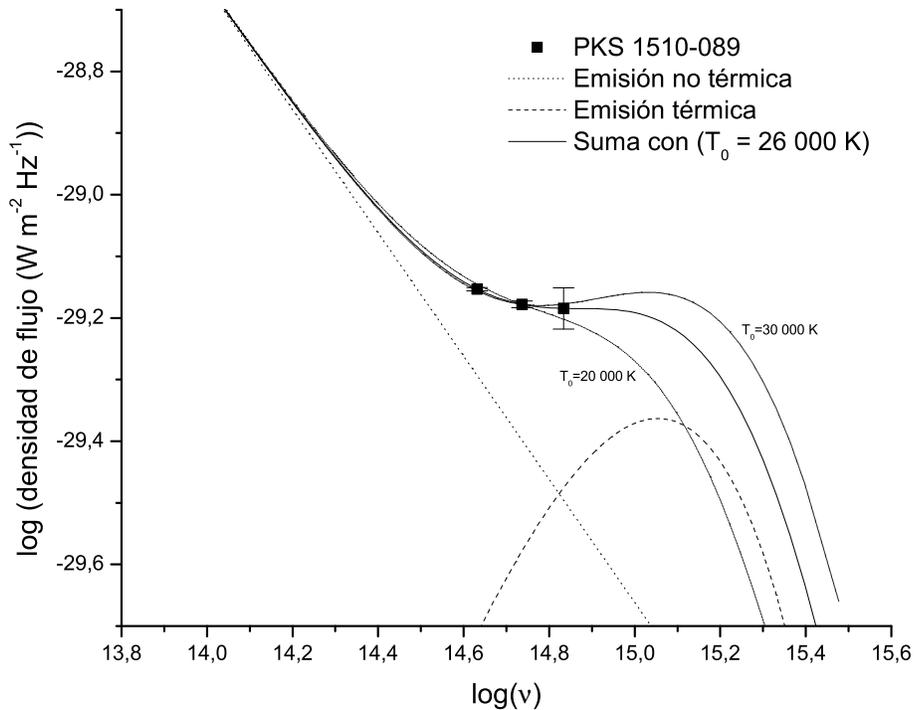


Figura 5.2: La combinación de dos componentes, una no térmica (línea a puntos) y una térmica (línea a guión) puede reproducir los datos correspondientes a PKS 1510-089, para el inicio del monitoreo. El índice espectral de la ley de potencias tiene un valor de  $-1$ , mientras que la temperatura del disco se encontraría en  $26\,000\text{ K}$ . La línea continua gruesa representa a esta mezcla. Sin embargo, diferentes valores de los parámetros pueden ajustar a estos datos. Por ello, es preciso recurrir al resto de los datos para este objeto y verificar cuales de entre todos estos valores pueden reproducir las variaciones observadas. Las líneas continuas delgadas representan la mezcla de una ley de potencias con índice igual a  $-1$  y cuerpos negros de  $20\,000$  y  $30\,000\text{ K}$ , como se indica en la figura (estos valores se obtienen al sumar y restar un error del  $20\%$  de la temperatura original).

$20\,000\text{ K}$  y otro de  $30\,000\text{ K}$ ). La contribución de la componente no térmica se encontraría en  $\sim 60\%$ . A partir de estos valores se calcula la curva que mejor describe el comportamiento de la variación en los planos  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$ . De esta manera, se obtiene las curvas mostradas en la Figura 5.3, donde es posible observar que la inclusión de la segunda componente puede describir el comportamiento de la variación detectada; más aún, la variación de la componente no térmica no puede explicar los datos, mientras que las variaciones de la componente térmica otorgan una explicación factible. En tal caso, las variaciones en la componente térmica debería ser de al menos  $8\,000\text{ K}$ . Aunque este valor es del mismo orden de magnitud del error que se ha supuesto para  $T_0$ , es claro que se ha detectado una variación térmica.

Es importante notar que, en el plano  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$  no es posible restringir una región exclusiva donde se encuentren las curvas que describan la variación por un origen dado.

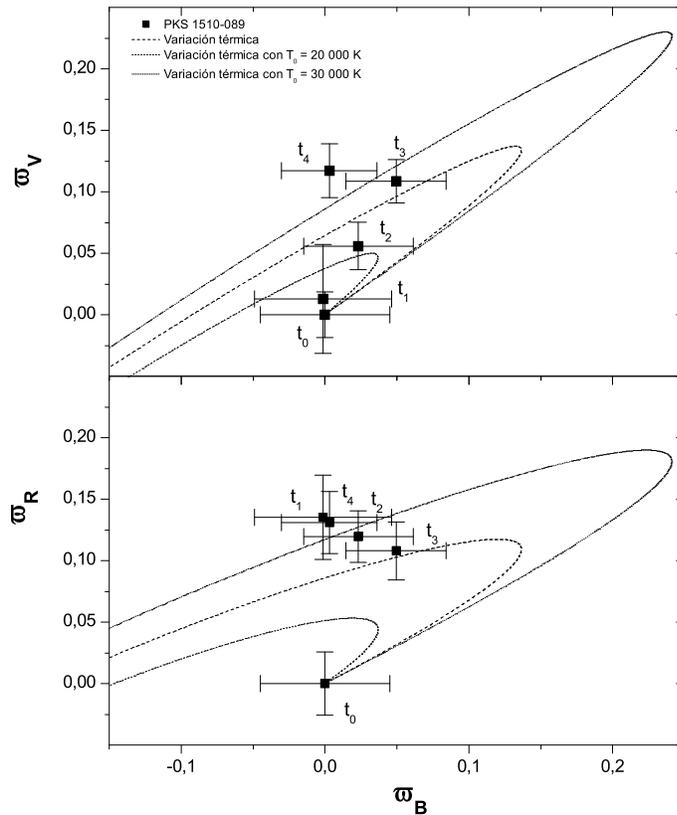


Figura 5.3: En esta figura, cada curva representa la variación de la componente térmica para los ajustes presentados en la figura 5.2. En cada caso, los cambios son similares, por lo que la única diferencia es la temperatura de la componente térmica.

Para una variación idéntica en diferentes cuasares, la contribución de cada componente y el corrimiento al rojo del objeto puedan cambiar la trayectoria de una variación. Para ilustrar esto, se ha tomado nuevamente el ejemplo del cuasar PKS 1510-089. En la Figura 5.4 se muestran diferentes curvas para cambios similares en temperatura e índice de la ley de potencias, pero a diferentes contribuciones de la componente no térmica ( $a_{0V} = 0.60, 0.85, 0.3$ ). En la Figura 5.5 se muestra algo similar para diferentes corrimiento al rojo ( $z = 0.0361, 0.8$  y  $1.5$ ). Sólo en aquellos casos como el de PKS 1510-089 es posible determinar que una variación como esta puede ser generada por la componente térmica y no por la no térmica. Es fácil ver que para cambios similares se observará variar de diferente manera al flujo de un cuasar

A continuación se presentarán los resultados para cada uno de los objetos que conforman la muestra de cuasares variables. En cada caso se ha llevado a cabo un procedimiento

similar al descrito anteriormente: se ha supuesto la existencia de una sola componente, se ha tratado de reproducir una variación como la observada en los planos  $\varpi_V : \varpi_B$  y  $\varpi_R : \varpi_B$ , regresado al plano  $\log(f_\nu) - \log(\nu)$  cuando es necesario para insertar una componente adicional y volver a analizar la variación.

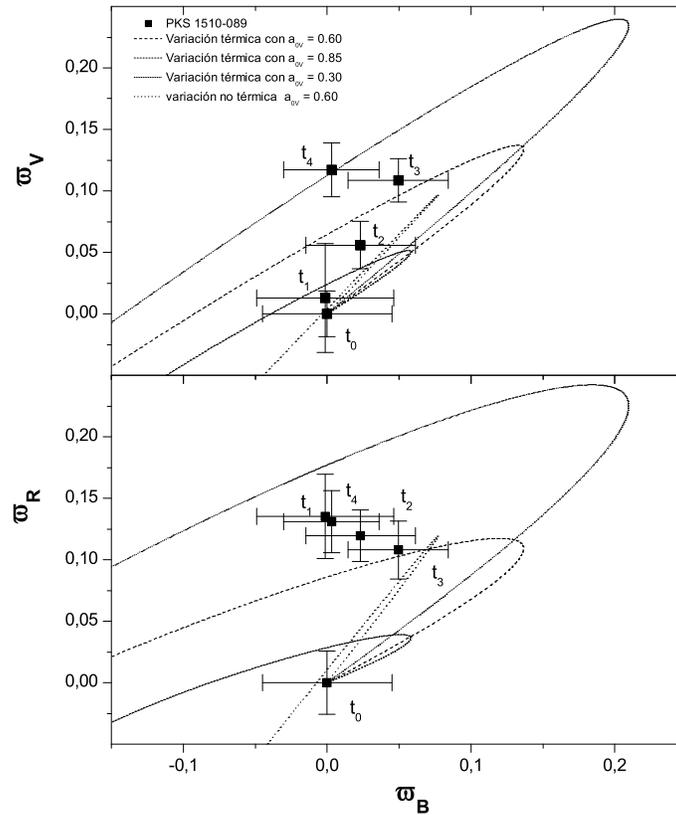


Figura 5.4: La contribución inicial de cada componente puede ser determinante para explicar un evento de variabilidad; por ejemplo, una contribución muy grande de la componente no térmica puede dar lugar a que una variación térmica sea confundida con una variación de origen no térmico. En una variación como la del cuasar PKS 1510-089 es claramente discernible el origen de dicha variación. En la figura se observa una variación de origen térmico. En los tres casos se ha tomado un cambio similar en  $T$  y  $n_T$ , mas para diferentes contribuciones de cada componente:  $a_{0V} = 0.361, 0.8, 1.5$  (recuérdese que  $b_{0V} = 1 - a_{0V}$ ). Nótese que una variación de origen no térmico es incapaz de generar un comportamiento como el observado. Por su parte, y a pesar del error tan grande en la estimación de los parámetros  $T_0$ ,  $\alpha_0$  y  $a_0$ , una variación térmica puede explicar la variación de PKS 1510-089.

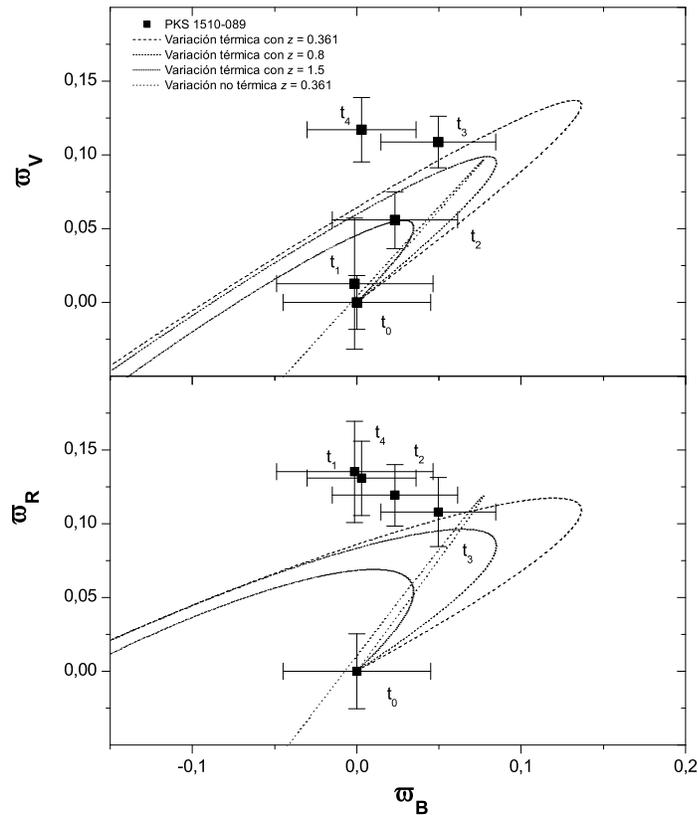


Figura 5.5: Es interesante notar que bajo las mismas condiciones (es decir, en las mismas  $T_0$ ,  $\alpha_0$  y  $a_{0V}$ ), para diferentes corrimientos al rojo se tendrá una apariencia diferente de la misma variación, lo que puede llevar a confusiones entre diferentes objetos, e imposibilita la restricción de alguna zona del gráfico a curvas originadas por cambios en una de las componentes. En esta figura se muestra variaciones para cambios iguales en  $T$  y  $n_T$ , pero a diferentes corrimientos al rojo. El valor de 0.361 corresponde a la  $z$  del cuasar.

## 5.4 Resultados

### 5.4.1 Resolución temporal de la variabilidad espectral

Antes de analizar la variabilidad espectral para cada evento de microvariabilidad detectado, debe hacerse una acotación referente al tiempo de retardo (*time lag*) de una variación. Para asegurar que la variabilidad espectral detectada sea real, se debe adquirir una secuencia completa (en los tres filtros) mientras no se manifieste un cambio en el nivel de brillo del objeto. Si el tiempo de retardo es menor al lapso de tiempo en que se adquiere una secuencia completa (para utilizar los tres filtros se emplea una rueda de filtros), se corre

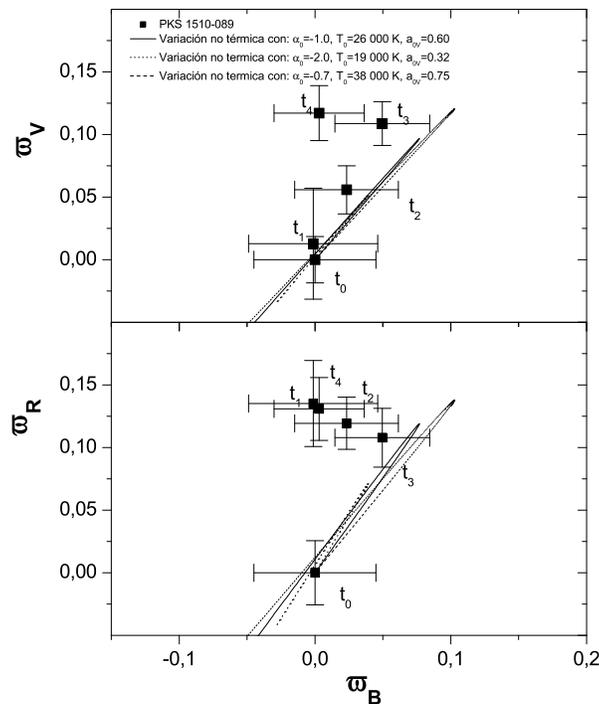


Figura 5.6: En esta gráfica se muestra tres curvas de caracterización para variaciones debidas a la componente no térmica para los datos de PKS 1510-089. Las tres curvas corresponden a cambios (similares) para índices espectrales de  $-0.7$ ,  $-1.0$  y  $-2.0$ . Las temperaturas correspondientes para estos tres índices, son  $38\,000\text{ K}$ ,  $26\,000\text{ K}$  y  $19\,000\text{ K}$ , respectivamente. A su vez, la contribución de la componente no térmica al flujo total cambia en cada caso,  $0.75$ ,  $0.6$  y  $0.32$ , respectivamente. Es claro que cambios en la componente no térmica no pueden dar lugar a la variabilidad de este cuasar. Con ello se tiene que, la elección de  $\alpha_0 = -1$  puede no ser determinante en el discernimiento del origen del evento de microvariabilidad.

el riesgo de detectar una variación espectral falsa, provocada por la observación del objeto en diferentes niveles de brillo. De aquí la importancia de contar con un criterio sobre el tiempo de captura máximo que puede transcurrir para considerar que este problema no se presentará.

Villata et al. (2002) han determinado que una secuencia completa entre las bandas V e I no debería exceder  $\sim 10$  minutos. Sin embargo, este límite puede resultar demasiado rígido en algunos casos, pues en realidad se conoce poco sobre las escalas temporales mínimas de la microvariabilidad. Por ejemplo, poco se sabe de la escala de tiempo en que se desarrollan las espigas, aunque parece ser muy pequeña. Además, es posible que existan microvariaciones de mayor período en las que el criterio de Villata et al. resulte innecesario. Por ello, es mejor utilizar un criterio de *simultaneidad* relacionado con el ritmo en que el nivel de brillo cambia durante un evento en particular. En tal caso debe suponerse que las variaciones son continuas. Esto no siempre se observa en una curva de luz (ver los casos de PKS 1510-089 y 3C 281 en el Capítulo 4); sin embargo, el análisis de las curvas presentadas

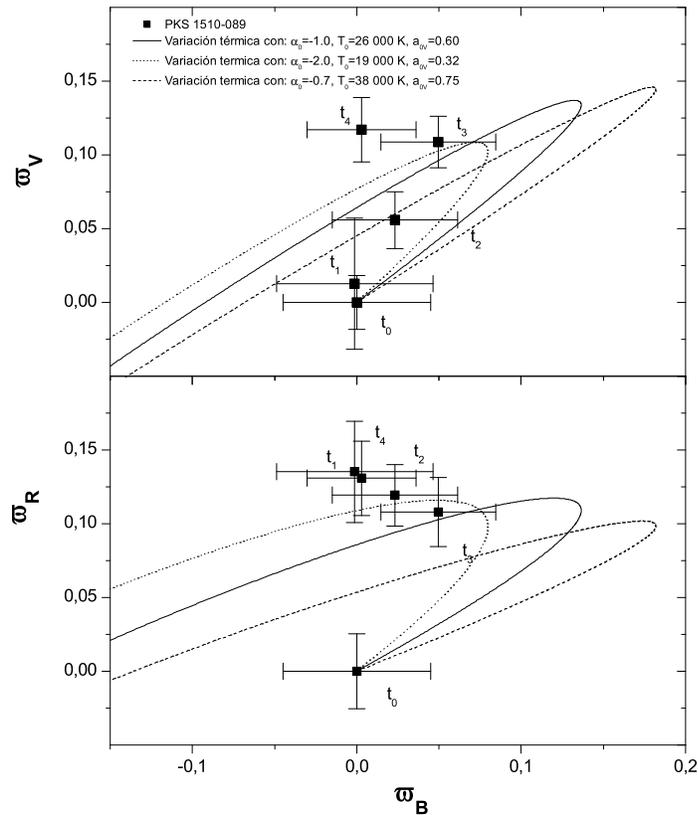


Figura 5.7: La elección de  $\alpha_0 = -1$  puede no ser un factor determinante en el discernimiento de la fuente de variabilidad. En esta gráfica se muestra tres curvas de caracterización para variaciones debidos a la componente térmica (para los datos de PKS 1510-089). Las tres curvas corresponden a cambios similares en la componente térmica para  $\alpha_0 = -0.7, -1.0$  y  $-2.0$ . Las temperaturas iniciales correspondientes para estos tres valores, son 38 000 K, 26 000 K y 19 000 K, respectivamente. Como puede verse, es factible explicar la variabilidad de este cuasar mediante la suposición de cambios en la componente térmica.

en § 5.4.3 indica que es posible suponer que la variación fue continua en los casos que aquí se discutirán.

Así, en el estudio presente se considerará que una secuencia de observaciones es simultánea cuando la amplitud de las variaciones no exceda el error medido, en el tiempo de adquisición de las imágenes. Esto significa que si una variación está en desarrollo, las imágenes en los tres filtros habrán sido tomadas *simultáneamente* cuando las tasas de cambio no lleven a diferencias de magnitud mayores a  $2.5e$  (donde  $e$  es el error estándar), es decir, al límite en que se tiene una variación marginal. En el Apéndice C se define un índice de

*simultaneidad* dado por la expresión

$$S_\nu \equiv \frac{\frac{\Delta m}{\Delta t_{obs}} \Delta t_{cap}}{2.5e},$$

donde  $\Delta m$  se refiere a la amplitud de la variación entre el primer monitoreo y el último de ellos, sin importar la banda en que se observó ésta,  $\Delta t_{obs}$  se refiere al tiempo que duró el monitoreo y  $\Delta t_{cap}$  es el tiempo requerido para tomar una secuencia completa (tomando los tiempos promedios de la captura de las imágenes entre B y R). Entonces, una secuencia de observaciones se ha tomado simultáneamente cuando se cumple que  $S_\nu < 1$ . Como este criterio debe ser aplicado a cada grupo de observaciones dentro del mismo monitoreo, se presentará el valor promedio de  $S_\nu$  para un monitoreo completo cuando ninguno de los  $S_\nu$  sea mayor a 1. Cuando este no sea el caso se presentará el valor de los índices para cada grupo de observaciones. Una vez adoptado este criterio, puede describirse las variaciones espectrales encontradas.

### 5.4.2 Ajustes del modelo y datos iniciales

Tabla 5.2: **Parámetros para el ajuste de una componente espectral única.**

Objeto	Magnitud	Error en la		
	(V)	magnitud	$\alpha_0$	$\delta\alpha_0$
3C 281	17.40	0.03	-0.03	0.01
3C 281	17.40	0.02	0.13	0.03
PKS 1510-08	16.86	0.02	-0.23	0.03
PKS 0003+15	15.36	0.02	0.08	0.02
MC31750+175	16.18	0.02	0.64	0.02
CSO 21	17.02	0.03	-0.67	0.11
1628.5+3808	16.78	0.02	-1.75	0.02
US 3472	16.25	0.01	0.48	0.01
MRK 830	17.55	0.03	-3.06	0.49
MRK 830	17.56	0.03	-2.51	0.35
MRK 830	17.66	0.01	-1.81	0.04

En esta tabla se presenta los valores de los ajustes a los datos iniciales cuando sólo se incluye una componente tipo ley de potencias. Las columnas representan los siguientes datos: nombre del objeto (col. 1); magnitud en la banda V (col. 2); error en la magnitud (col. 3); índice de la ley de potencias y el error en éste (cols. 4 y 5, respectivamente).

Las Figuras 5.8 muestran el ajuste a los datos por una componente espectral única para cada objeto (panel a). En el panel c de estas figuras se muestra las gráficas  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$  para el ajuste mostrado en el panel a. Cuando el modelo no puede explicar las observaciones se incluye una segunda componente. Este segundo ajuste se muestra en el panel b. Por último, en el panel d se muestra la variabilidad en  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$  para este segundo ajuste. En todos los casos, una prueba  $\chi^2$  indica que los ajustes son buenos.

En el panel d de las Figuras 5.8, las barras de error corresponden a la propagación de errores a partir del error estándar de cada grupo de cinco observaciones al calcular

Tabla 5.3: **Parámetros para el ajuste de dos componentes espectrales.**

Objeto	$T_0$ (K)	$a_{0V}$ (%)	Origen de la variación
3C 281	24 000	46	térmica
3C 281	26 900	46	no térmica
PKS 1510-08	26 000	60	térmica
PKS 0003+15	19 200	36	térmica(VB)
MC3 1750+175	33 700	26	térmica(VB)
CSO 21	29 500	78	no térmica
1628.5+3808	10 000	65	térmica
US 3472	27 900	29	térmica(?)
MRK 830	—	100	no térmica
MRK 830	—	100	no térmica
MRK 830	—	100	no térmica

En esta tabla se presenta los valores de los ajustes a los datos iniciales y el origen de la variación que se propone como causante de ésta. Las columnas representan los siguientes datos: nombre del objeto (col. 1); las columnas 2 a 4 presentan los parámetros del modelo y los resultados de las variaciones modeladas por éste: temperatura inicial del cuerpo negro (col. 2); contribución al flujo total por parte de la componente no térmica (col 3; recuérdese que  $b_{0V} = 1 - a_{0V}$  y que la contribución de cada componente en otras bandas está relacionada con las contribuciones en la banda V, véase Apéndice B), y el origen de la variabilidad detectada, térmica o no térmica (col. 4). En todos los casos se tomó  $\alpha_0 = -1$ .

$\varpi_\nu$ . Además, en estas figuras se presenta un indicador de la secuencia temporal de las observaciones. De éstos,  $t_0$  corresponde a los datos iniciales.

Debe recordarse que este es sólo un *modelo juguete*, por lo cual las curvas en los planos  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$  son una aproximación a las variaciones observadas. Cabe recordar que el porcentaje con que cada componente contribuye al flujo total se refiere a la banda V (las contribuciones en B y R dependerán del color del objeto, y del modelo utilizado para efectuar el ajuste). Es fácil notar que para este (primer) ajuste  $a_{0V} = a_{0B} = a_{0R} = 1$ .

En la Tabla 5.2 se presenta los datos relevantes del ajuste de una componente única: el nombre del objeto (col. 1), la magnitud en V y el error en ésta (cols. 2 y 3, respectivamente), el índice  $\alpha_0$  (col. 4) y el error en este,  $\delta\alpha_0$  (col. 5).

En la Tabla 5.3 se presenta los valores del ajuste de dos componentes para cada cuasar en que una componente única no puede dar una explicación de la variación espectral. En esta tabla se presentan el nombre del objeto (col. 1),  $T_0$  (col. 2), la contribución inicial de la componente no térmica  $a_{0V}$  (col. 3; recuérdese que  $b_{0V} = 1 - a_{0V}$ ), y la posible causa (térmica o no térmica) de la variación (col. 4).

### 5.4.3 Cuasares radio emisores

**3C 281.**- La magnitud que se reporta para este objeto es  $V = 17.02$  (Sandage, Veron y Wyndham 1965). En el Capítulo 4 se mostró que este cuasar presentó microvariabilidad

en dos noches de marzo de 2000.

*1 de marzo de 2000.*- Al iniciar el monitoreo de este objeto, su brillo era  $V = 17.40 \pm 0.03$ , casi media magnitud más débil a lo reportado en la literatura. Una ley de potencias simple ajusta a los datos iniciales, cuyo índice sería  $\alpha_0 = -0.03 \pm 0.01$  (Figura 5.8a(a)).

Una variación de esta componente única no puede explicar el evento de microvariabilidad observado, lo cual se manifiesta con mayor claridad en el panel BR de la Figura 5.8a(c). La curva se ha generado aumentando  $n_n$  y disminuyendo  $\alpha$  de manera simultánea.

Como una segunda componente debería ser agregada, los datos iniciales fueron ajustados, nuevamente, mezclando una ley de potencias, con índice espectral  $\alpha_0 = -1$ , más la emisión de un cuerpo negro con temperatura  $T_0 \sim 24\,000$  K (Fig. 5.8a(b)). Mientras que la primera componente contribuye con  $\sim 46\%$  a la emisión total, la segunda contribuye con el  $\sim 54\%$  restante.

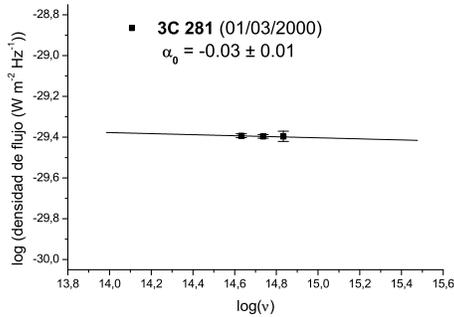
Con este nuevo arreglo tampoco es posible explicar el evento de microvariabilidad por un cambio en la componente no térmica. Por otro lado, la variación de la componente térmica puede generar un comportamiento como el observado (Fig. 5.8a(d)). Para ello, son requeridos una disminución en la temperatura de al menos  $\sim 1\,300$  K y, un aumento en la amplitud a  $n_T \sim 1.07$ .

El escrutinio de las curvas de luz de este cuasar (Fig 4.1(a)) podría indicar que la variación se desarrolló sólo hasta después de observar por segunda ocasión al objeto. Sin embargo, es posible que este evento de microvariabilidad haya estado presente desde el inicio del monitoreo. Un cambio constante de  $1\,300$  K en 2.7 horas implica que en 1.44 horas (es decir, entre el primero y el segundo monitoreo) debería medirse un cambio de unos  $700$  K. Simultáneamente, la amplitud de la emisión térmica habría aumentado a  $n_T \sim 1.04$ . El modelo indica que un cambio semejante bien pudo haberse presentado en las observaciones, y no detectarse debido al error observacional tal como puede apreciarse en la Figura 5.8a(d).

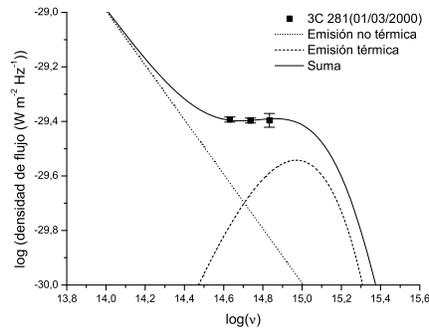
El criterio de simultaneidad indica que durante el tiempo de captura de las imágenes no se habría presentado cambio alguno en el nivel de brillo ( $S_B = 0.43$ ,  $S_V = 0.67$  y  $S_R = 0.17$ ). Así, si en efecto la variación se presentó a un ritmo constante, el cambio espectral no correspondería a un artificio de las observaciones.

*4 de marzo de 2000.*- Las observaciones correspondientes al inicio del monitoreo indican que  $V = 17.40 \pm 0.02$ , es decir, un brillo semejante al de la noche del 1 de marzo. Estos datos pueden ser ajustados por una componente espectral única (Figura 5.8b(a)), lo cual tendría nuevamente la forma de una ley de potencias, pero el índice habría cambiado a  $\alpha_0 = 0.13 \pm 0.03$ .

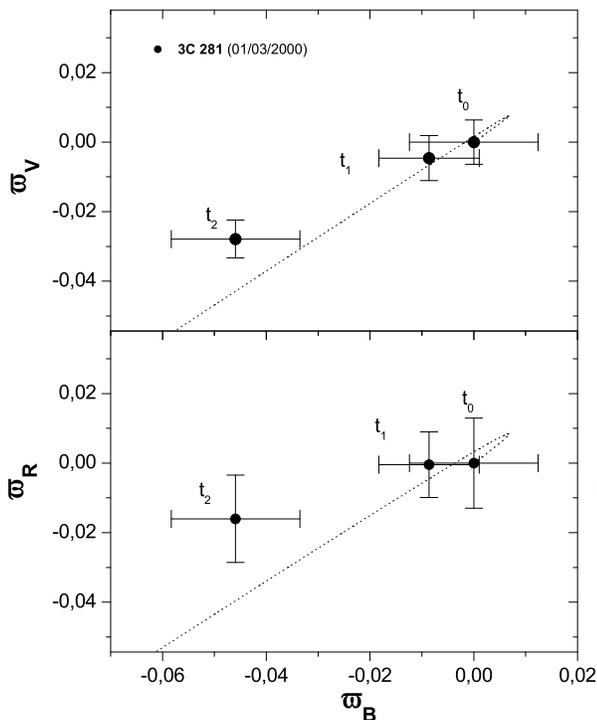
A diferencia de lo que ocurre con los datos del 1 de marzo, en esta ocasión es posible explicar la variación sin recurrir a una componente extra. En tal caso, el cambio en el índice espectral debería ser de al menos  $\Delta\alpha = 0.031$  (Fig. 5.8b(c)). Sin embargo, el espectro de emisión de este cuasar debería contener una segunda componente, pues la variabilidad detectada el 1 de marzo así lo sugiere. Dado que el nivel de brillo es similar entre las dos noches, la inclusión de la segunda componente se llevó a cabo considerando los datos del 1 de marzo. Así, la contribución de la componente no térmica sería de  $a_{0V} = 0.46$ , con



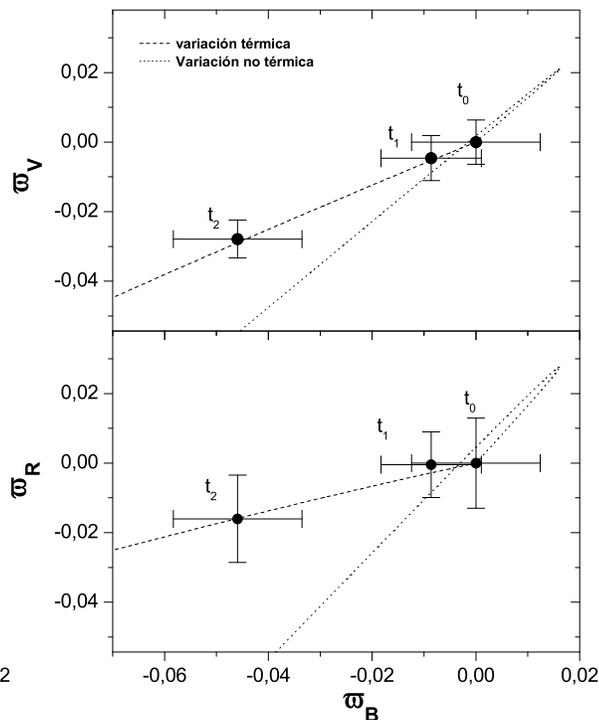
(a)



(b)

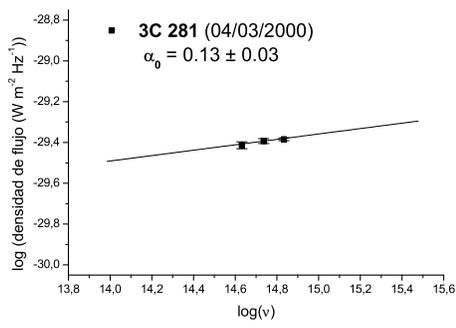


(c)

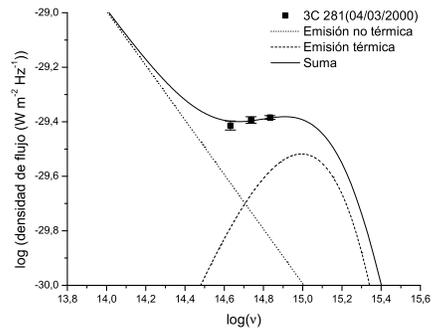


(d)

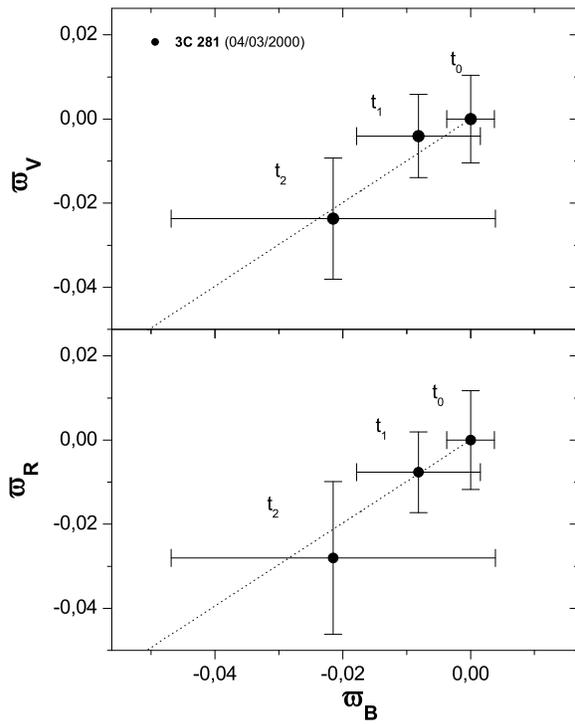
Figura 5.8a: Ajustes y variabilidad: (a) y (b): Ajuste del modelo de emisión a los datos del inicio del monitoreo. En todos los casos, la línea continua representa la suma de la emisión térmica del disco de acreción (línea a guión) y de la emisión no térmica del jet (línea a puntos). (c) y (d): Variaciones espectrales. En todos los casos, la línea a guión representa una variación debida a la componente térmica mientras que la línea a puntos a una variación debida a la componente no térmica. Los errores fueron obtenidos de la propagación del error, al calcular  $\varpi_\nu$ , encontrado de la dispersión de datos.  $t_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ) indica la secuencia temporal de los datos;  $t_0$  corresponde al inicio de cada monitoreo. En todas las gráficas los símbolos representan los datos.



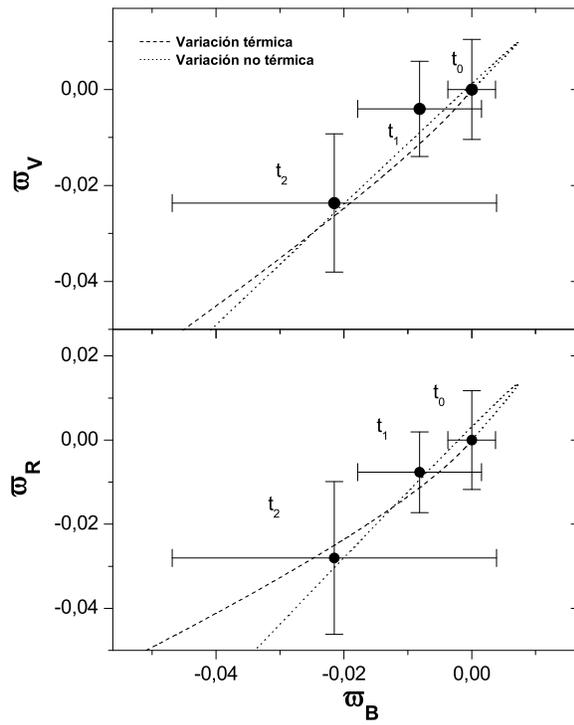
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8b: Ajustes y variabilidad

$\alpha_0 = -1$ . Por su parte, la componente térmica poseería una temperatura  $T_0 \sim 26\,900$  K (Figura 5.8b(b)).

En tal situación, cualquiera de las dos componentes puede generar una variación como la observada (Fig. 5.8b(d)); sin embargo, el mejor ajuste corresponde al caso de una variación de origen no térmico. Debe notarse que la curva generada por la variación de esta componente es diferente a cuando no se incluye la emisión térmica. El cambio podría generarse con una variación en el índice de esta componente,  $\Delta\alpha \sim 0.02$ , mientras que la amplitud de la misma se incrementaría a  $n_n \sim 1.08$ . En el caso de una variación térmica,  $\Delta T \sim 1\,800$  K y  $n_T \sim 1.09$ .

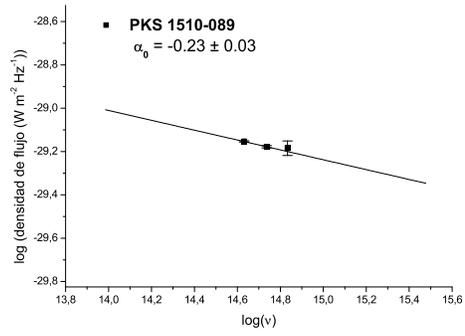
Un cambio no térmico implica una variación en  $\alpha$  a una tasa de  $\sim 5.3 \times 10^{-3}$  por hora. Suponiendo que la variación comenzó a desarrollarse desde el inicio del monitoreo, con una variación no detectable hacia el segundo monitoreo en la que  $\Delta\alpha \sim 0.013$ , sería posible observar un resultado como el que se presenta en la Figura 5.8b(d). En tal caso, el criterio de simultaneidad establece que no se presentó una variación durante el tiempo en que se adquirió una secuencia de imágenes ( $S_B = 0.14$ ,  $S_V = 0.48$  y  $S_R = 0.39$ ).

**PKS 1510-089.**- La magnitud en V que se reporta para este cuasar es de 16.5 (NED). La primera vez que se le observó el 20 de marzo de 2000 su brillo era de  $V = 16.86 \pm 0.02$ , es decir, menor al reportado en la literatura. El ajuste de una sola componente a estos primeros datos indica que el índice espectral debería encontrarse en  $\alpha_0 = -0.23 \pm 0.03$  (Figura 5.8c(a)). Sin embargo, no es posible dar una explicación satisfactoria a la variación espectral observada a partir de este ajuste (Fig. 5.8c(c)). Por tal motivo es necesario suponer la existencia de una segunda componente espectral.

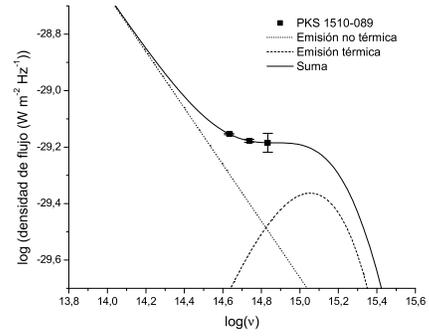
En la Figura 5.8c(b) se muestra el ajuste de dos componentes espectrales. La temperatura del cuerpo negro se encontraría en  $T_0 \sim 26\,000$  K, mientras que  $a_{0V} \sim 60\%$  sería la contribución de la componente no térmica al flujo total. El índice de esta componente se ha fijado, de nueva cuenta, en  $\alpha_0 = -1$ .

Como ocurrió en el caso de 3C 281 (01/03/2000), la inclusión de la componente térmica altera la forma en que varía el espectro por un cambio no térmico, respecto a cuando sólo se incluye una componente. A pesar de esta situación, una variación en la componente no térmica no posee las características que expliquen apropiadamente los datos de la Figura 5.8c(d). Por su lado, la forma en que varía el espectro debido a la componente térmica puede generar un comportamiento como el observado. No obstante, un cambio de origen térmico supondría que la amplitud de esta componente debería haber aumentado demasiado ( $n_T > 2.5$ ), mientras que la temperatura habría disminuido en 8 000 K.

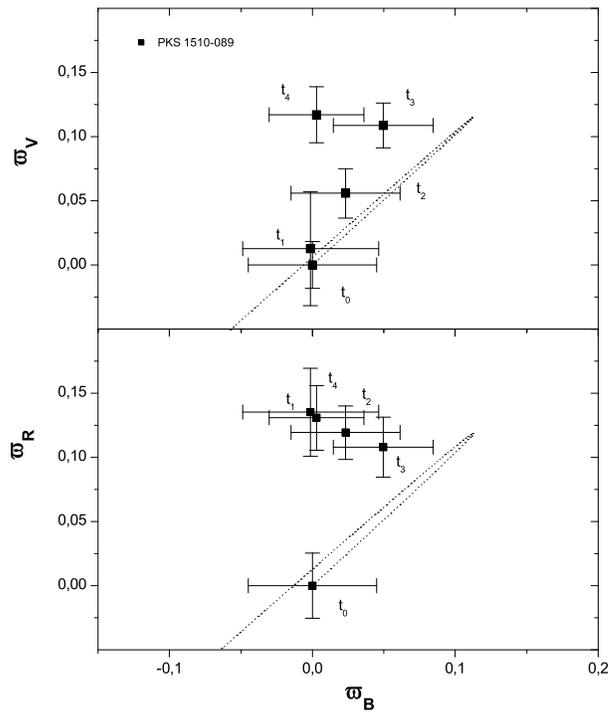
La tasa de cambio en la temperatura habría sido de  $\Delta T \sim 1\,800$  K por hora y un cambio en la región emisora de  $\Delta n_T \sim 0.57$  por hora. En una variación semejante (Figura 5.8c(d)), se puede suponer que el *salto* observado en la curva de luz de la banda R podría corresponder a un efecto falso. Esto se debe a la naturaleza misma de la variación, ya que el cambio en la magnitud podría encontrarse cerca del lugar donde la curva *se regresa*. Este *regreso* se debería a que primero domina la variación en  $n_T$  y posteriormente domina el cambio en la temperatura. Este comportamiento podría haber quedado de manifiesto si las observaciones se hubieran prolongado por horas. Con un cambio a ritmo constante (como parecería haber ocurrido al observar la curva de luz en el filtro V, Fig. 4.1(c)), el



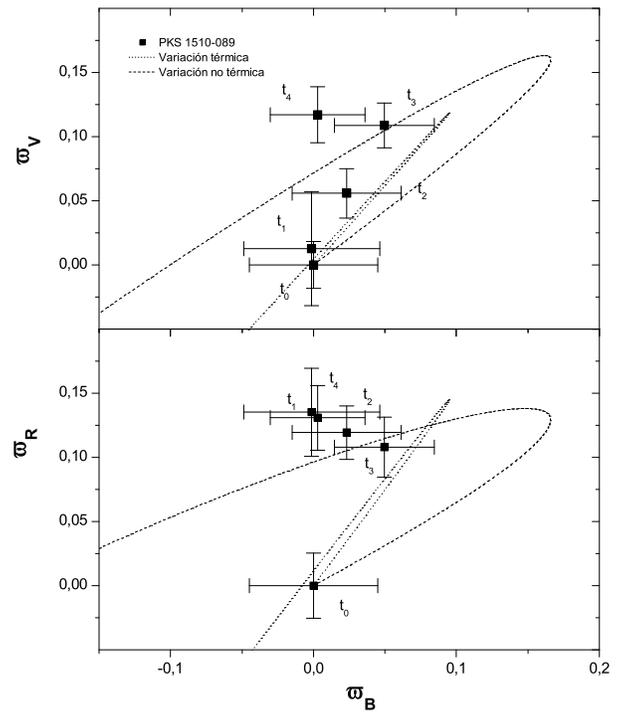
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8c: Ajustes y variabilidad

criterio de simultaneidad indica que las secuencias de observaciones se realizaron de manera simultánea ( $S_B = 0.09$ ,  $S_V = 0.22$  y  $S_R = 0.86$ ).

**PKS 0003+15.-** El brillo promedio de este cuasar se encontraba en  $V = 15.36 \pm 0.02$ , al inicio del monitoreo. Esto es una magnitud más brillante de lo reportado en la literatura,  $V=16.4$  (NED). El ajuste de una sola componente no térmica indica que  $\alpha_0 = 0.08 \pm 0.02$  (Figura 5.8d(a)).

Un cambio de esta componente única puede explicar los datos sólo de manera marginal en el plano  $\varpi_{V,R} : \varpi_B$ , en cuyo caso  $\Delta\alpha = 0.003$  (Figura 5.8d(c)). El comportamiento del espectro de este cuasar es difícil de explicar, puesto que en la banda R no se detectó microvariabilidad. Por ello, se añade una segunda componente. Este segundo ajuste indica que  $a_{0V} \sim 36\%$ , mientras que la temperatura de la componente térmica sería  $T_0 \sim 19\,200$  K. Nuevamente,  $\alpha_0 = -1$  (Figura 5.8d(b)).

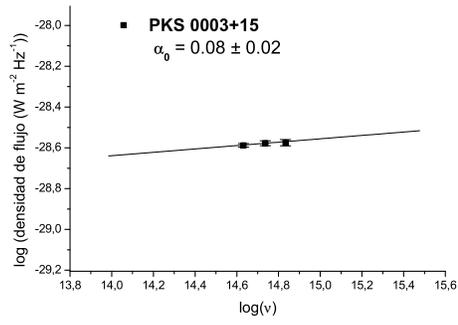
La variabilidad espectral de este objeto es complicada, resultando difícil de explicar. No obstante, una variación provocada por esta componente continúa siendo marginal (Figura 5.8d(d)). Por su lado, una variación térmica producida por sólo un cambio en la temperatura daría una explicación marginal, similar a una variación no térmica, como puede verse en la línea gruesa a guión de la Figura 5.8d(d). Así, para explicar el panel superior de esta figura se requiere un cambio simultáneo de  $T$  y  $n_T$ .

Si la variación fuera efectivamente de origen térmico, como lo sugiere los datos de las bandas B y V (panel superior de la Figura 5.8d(d)), la temperatura habría aumentado en poco más de  $\sim 1\,200$  K y la amplitud de esta componente habría disminuido a  $n_T \sim 0.85$ . Esto conlleva una tasa de cambio de 380 K por hora en la temperatura, y de 0.05 por hora en  $n_T$ . El criterio de simultaneidad indicaría en tal caso que este comportamiento espectral debería ser real ( $S_B = 0.02$ ,  $S_V = 0.19$  y  $S_R = 0.01$ ). Sin embargo, un cambio semejante produciría una variación observable en la banda R. Es probable que estos datos no posean la calidad requerida para dilucidar tal variación, o que exista la presencia de otra componente que altere el comportamiento del espectro durante el episodio de microvariabilidad.

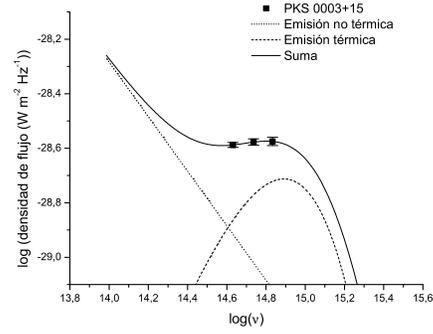
#### 5.4.4 Cuasares radio callados

**MC3 1750+175.-** La magnitud de este cuasar durante las observaciones, era de  $V = 16.18 \pm 0.02$ , es decir, media magnitud por debajo de lo reportado en la literatura,  $V=16.60$  (Kirhakos et al. 1994; Mantovani 1982; Fanti et al. 1981). Los datos correspondientes al inicio del monitoreo fueron ajustados por emisión no térmica cuyo índice espectral tendría un valor de  $\alpha_0 = 0.64 \pm 0.02$  (Figura 5.8e(a)). Sin embargo, en la Figura 5.8e(c) se puede apreciar la dificultad para generar una curva capaz de reproducir la variación espectral detectada, sobre todo en las bandas BV. Así que es necesario incluir una segunda componente, esperando con ello que pueda entenderse este extraño comportamiento.

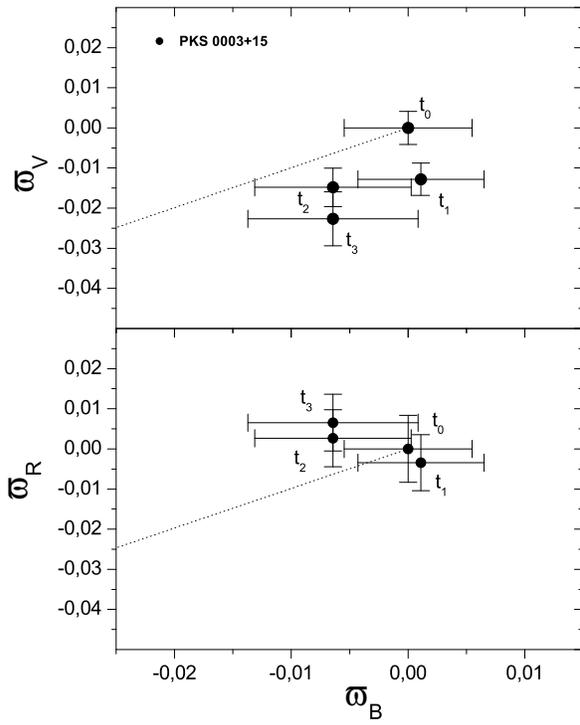
Añadiendo la emisión de un cuerpo negro con  $T_0 \sim 33\,700$  K y  $a_{0V} \sim 27\%$  (Figura 5.8e(b)), la variación de la componente térmica puede explicar sólo los datos en el panel BV (Figura 5.8e(d)). Como ocurrió en el caso de PKS 0003+15, para un cambio semejante debería observarse una variación en la banda R, lo cual no ocurre. Por su parte, los posibles cambios en la componente no térmica no poseen las características que puedan explicar esta



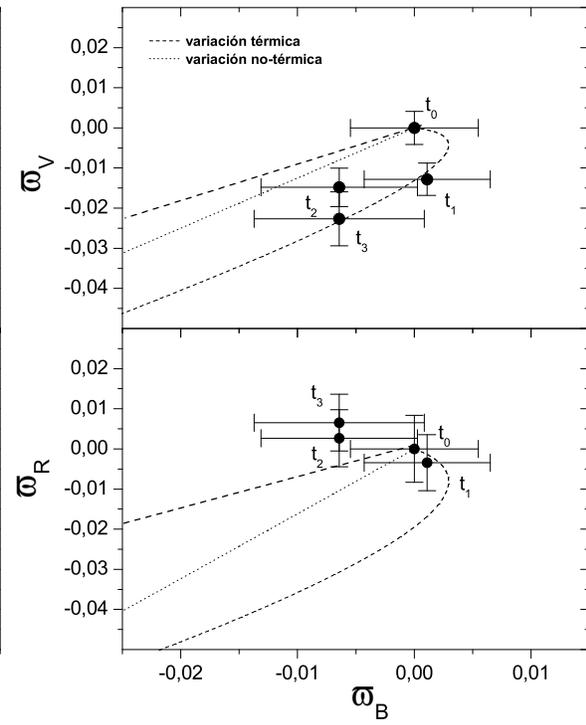
(a)



(b)

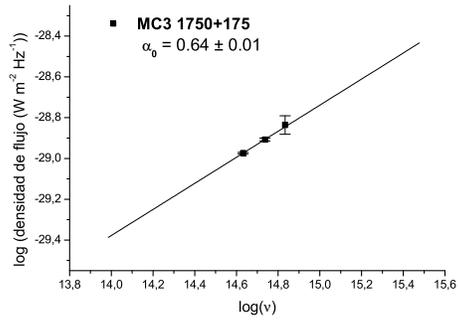


(c)

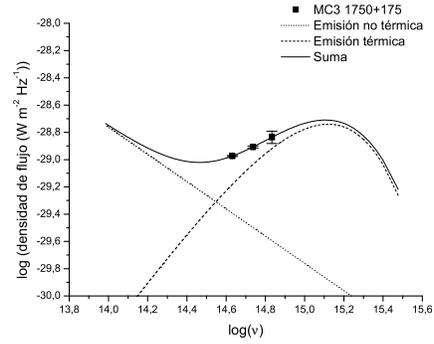


(d)

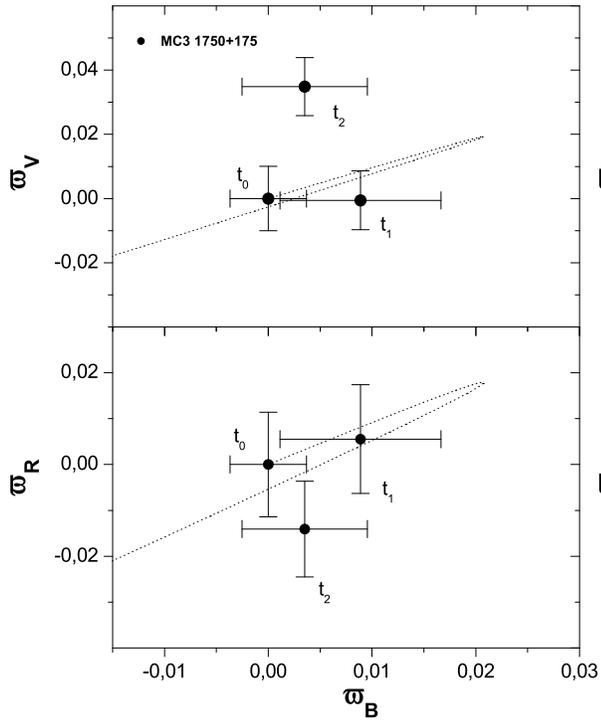
Figura 5.8d: Ajustes y variabilidad



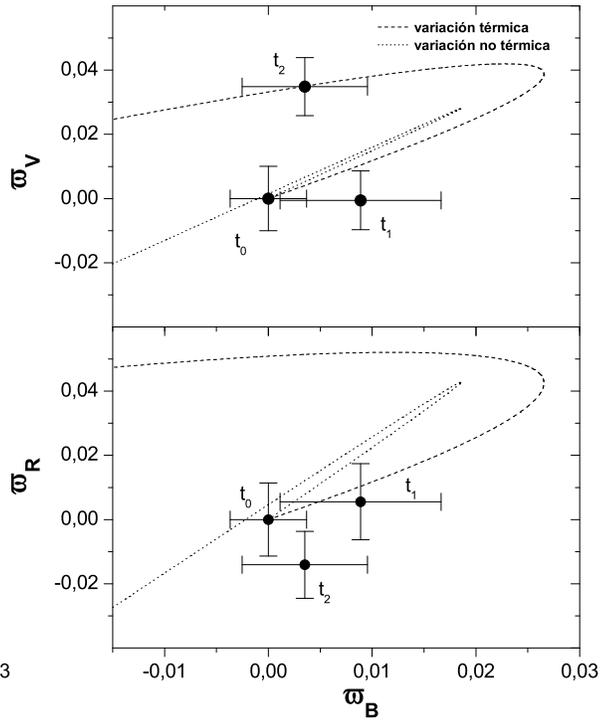
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8e: Ajustes y variabilidad

variación.

Para explicar el cambio que se aprecia en el panel superior de la Figura 5.8e(d), se requiere una disminución en temperatura de  $\sim 5\,600$  K, mientras que la amplitud debería alcanzar  $n_T \sim 1.44$ . En tal caso, el criterio de simultaneidad permite suponer que existiría una evolución espectral real ( $S_B = 0.01$ ,  $S_V = 0.21$  y  $S_R = 0.10$ ); sin embargo, los datos en BR hacen de esta variación algo mucho más complicado de describir con este *modelo juguete*.

**CSO 21.-** Al observar a este cuasar su magnitud se encontraba en  $V = 17.02 \pm 0.03$ , que es un valor similar al reportado en la literatura, 17.0 (NED). El ajuste por una componente única a los datos iniciales lleva a obtener un índice espectral  $\alpha_0 = -0.67 \pm 0.11$  (Figura 5.8f(a)).

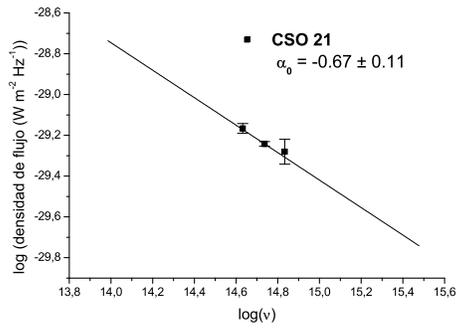
Los cambios en esta componente generan curvas capaces de reproducir la variación espectral observada (Figura 5.8f(c)). El índice espectral debería haber aumentado en  $\Delta\alpha = 0.002$ , mientras que la amplitud habría disminuido hasta  $n_n \sim 0.96$ . De acuerdo con lo que se observa en las Figuras 5.8f(c) y 4.1(f), es posible que la microvariabilidad detectada en las bandas V y R también se haya presentado en la banda B. Esta variación no sería observable debido a la magnitud de los errores. El criterio de simultaneidad indica que el nivel de brillo no habría cambiado durante el período de tiempo en que se tomaron las observaciones en una secuencia BVR ( $S_B=0.07$ ,  $S_V=0.35$  y  $S_R=0.11$ ).

Por simplicidad se supondrá que este evento es el resultado de la variación de una componente única. No obstante, es interesante revisar la posibilidad de una segunda componente. De manifestarse esta componente adicional (Figura 5.8f(b)), su temperatura se encontraría en  $T_0 \sim 29\,500$  K, mientras que  $a_{0V} \sim 78\%$ . En tal caso, la variación que se ha detectado podría ser generada por un cambio en cualquiera de las dos componentes, aunque un cambio de la componente térmica sería más adecuada para explicar el cambio observado (Figura 5.8f(d)). En tal caso, la temperatura debería disminuir por 415 K, mientras que la amplitud de la emisión de esta componente aumentaría a  $n_T \sim 1.10$ . Para el caso de una variación de origen no térmico, el índice espectral de esta componente se habría mantenido constante con un cambio en la amplitud a  $n_n \sim 1.02$ .

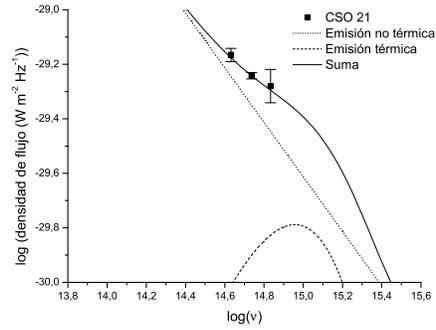
**1628.5+3008.-** El nivel promedio de brillo de este cuasar,  $V = 16.78 \pm 0.02$ , se encontraba en un valor similar a lo reportado en la literatura,  $V=16.80$  (Veron-Cetty y Veron 2001).

Una sola componente puede ajustar los datos, en cuyo caso el índice espectral se encontraría en  $\alpha_0 = -1.75 \pm 0.02$  (Figura 5.8g(a)). Sin embargo, la variación espectral observada no puede ser generada por cambios en esta componente única (Figura 5.8g(c)). Por ello, es necesario suponer la contribución de una segunda componente. En este caso, el modelo ajusta con un cuerpo negro de  $T \sim 10\,000$  K, mientras que la contribución de la componente no térmica sería  $a_{0V} \sim 65\%$  de la emisión total (Fig. 5.8g(b)). Aunque esta  $T_0$  es muy baja para un disco de acreción (correspondería a la zona externa del disco en un modelo más realista; e.g., Lawrence 2005), sin ella no es posible explicar la variabilidad espectral observada.

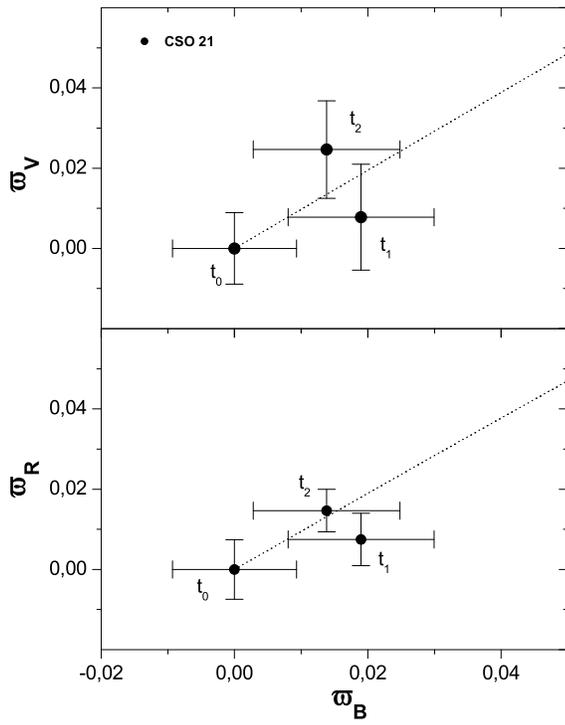
Con la adición de esta componente, una variación de origen no térmico sólo puede explicar marginalmente la microvariación observada. Por el contrario, un cambio debido a



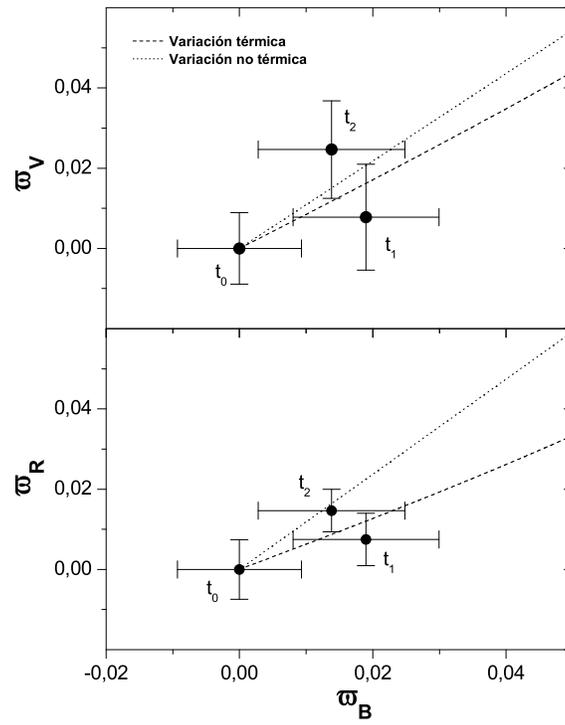
(a)



(b)

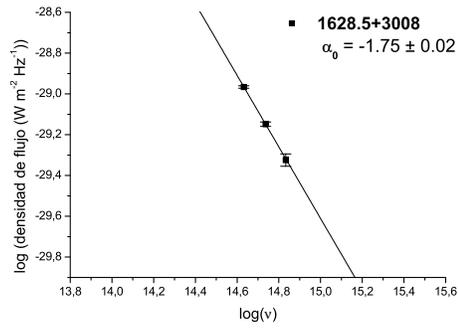


(c)

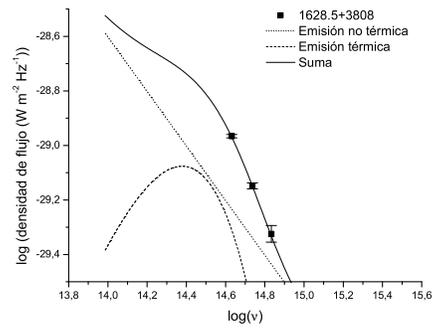


(d)

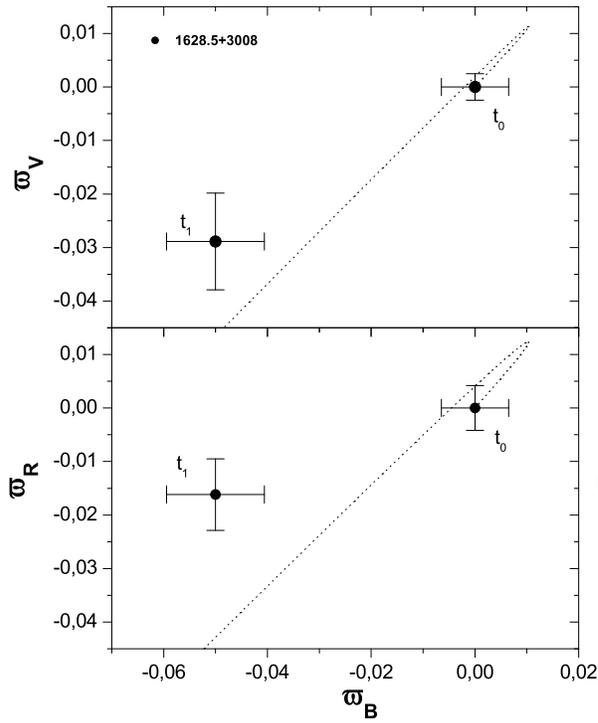
Figura 5.8f: Ajustes y variabilidad



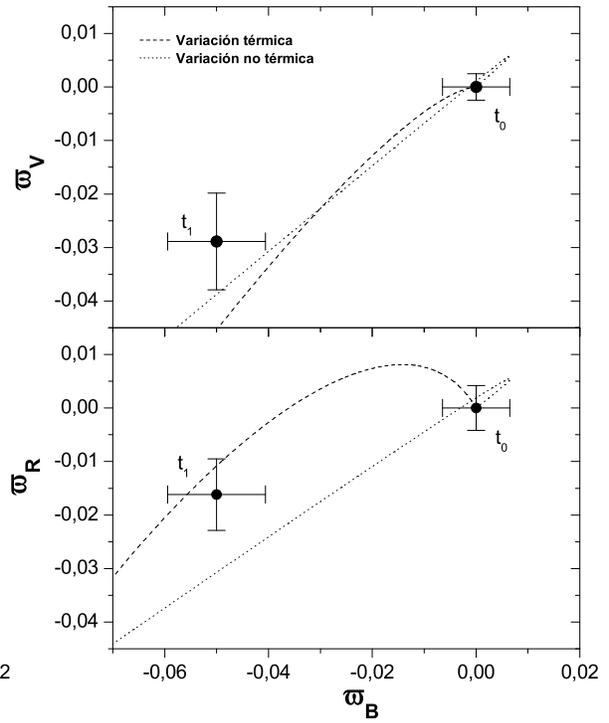
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8g: Ajustes y variabilidad

la componente térmica puede generar un comportamiento como el detectado (Fig. 5.8g(d)). En tal caso,  $T$  habría disminuido por  $\sim 760$  K, mientras que la amplitud habría aumentado a  $n_T \sim 1.48$ . De acuerdo al criterio de simultaneidad, la variación espectral debería ser real ( $S_B = 0.16$ ,  $S_V = 0.12$  y  $S_R = 0.14$ ).

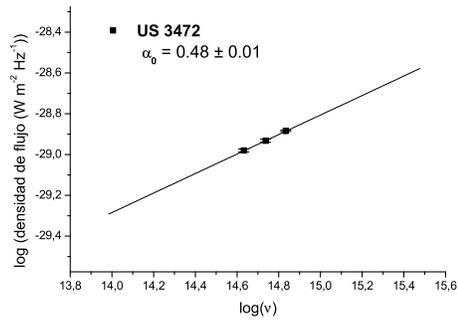
**US 3472.-** Durante las observaciones de este objeto la magnitud promedio se encontraba en  $V = 16.25 \pm 0.01$ , o sea que el nivel de brillo estaba por arriba de lo reportado en la literatura,  $V = 16.6$  (La Franca, Cristiani y Barbieri 1992). A las observaciones del primer monitoreo se les puede ajustar por una ley de potencias con índice espectral  $\alpha_0 = 0.48 \pm 0.01$  (Figura 5.8h(a)). No obstante, esta componente no puede dar explicación a la variación espectral que puede verse en la Figura 5.8h(c). Es por ello que debe agregarse una segunda componente. La mezcla de un cuerpo negro con temperatura  $T_0 \sim 27\,900$  K, más una componente no térmica que contribuya al flujo total con 29% puede ajustar a los datos (Fig. 5.8h(b)).

Mientras que un cambio en la componente no térmica es incapaz de explicar una variación como la observada, una variación de origen térmico sí (Fig. 5.8h(d)). Sin embargo, los cambios en  $T$  y  $n_T$  deberían ser mayores en la banda V que en la banda R. En V,  $T$  habría cambiado en  $\sim 2\,000$  K con  $n_T \sim 0.87$ , mientras que en el filtro R el cambio sería de tan sólo  $\sim 1\,200$  K y  $n_T \sim 0.92$ .

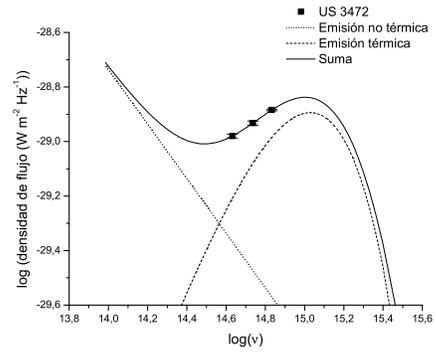
La tasa de cambio, según la banda V, debería ser de  $\sim 600$  K por hora. Las observaciones entre una y otra banda se tomaron con una diferencia de cuando mucho unos 8 minutos, por lo que la diferencia de temperaturas entre V y R debería ser de unos 80 K.

El criterio de simultaneidad promedio indica que las observaciones se realizaron cuando el objeto se encontraba en el mismo nivel de brillo (considerando el primero y el último de los grupos de observaciones:  $S_B = 0.05$ ,  $S_V = 0.53$  y  $S_R = 0.96$ ). Sin embargo, la variación en la banda R es muy rápida, llevando a una variación espectral espuria. Los datos correspondientes a esta banda, en el segundo y tercer monitoreo podrían haberse adquirido cuando el objeto se encontraba en un nivel de brillo diferente a cuando se adquirieron las secuencias en V y B (pues considerando los datos de el primero y el segundo de los monitoreos:  $S_R = 1.12$  y  $S_R = 1.26$ ). En tal caso, sería posible explicar la discrepancia en la temperatura por este efecto. A pesar de esta falta de simultaneidad, obsérvese que la microvariación espectral posee las características de un cambio en la componente térmica. Esto queda de manifiesto al reparar en la información de las bandas B y V, entre las cuales parece haberse dado la simultaneidad.

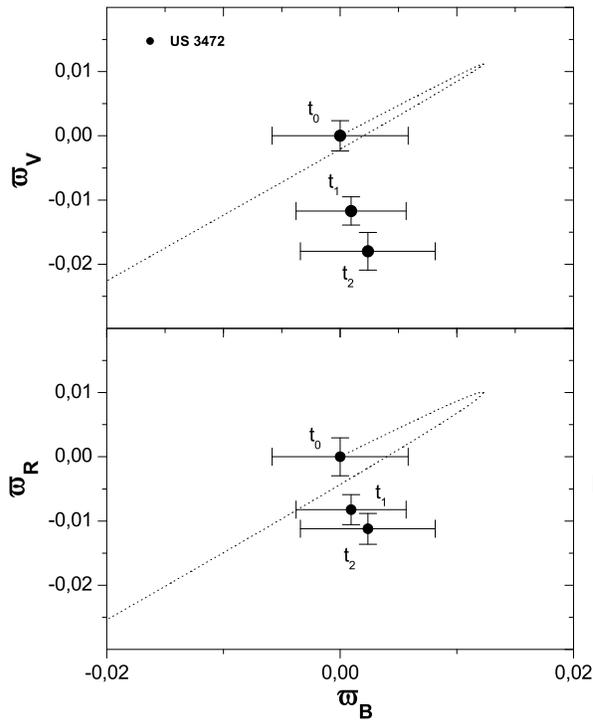
**Mrk 830.-** Durante cada ocasión en que pudo observarse a este cuasar, su brillo se encontraba en un valor muy parecido ( $V \sim 17.6$ ), una magnitud y media por debajo de lo reportado en NED,  $V = 16.0$ , pero muy cercano a la magnitud reportada por Stepanian et al. (2001) ( $V = 17.29 \pm 0.03$  y  $B = 18.27 \pm 0.06$ ,  $B - V = 0.98 \pm 0.06$ ) y por Chavushuyan et al. (1995) ( $V = 17.62$ , con un color  $B - V = 1.10$ ). El modelo de una sola componente ajusta de manera marginal a los datos de este objeto (Figs. 5.8i(a), 5.8j(a), 5.8k(a)). Aunque puede agregarse una componente térmica con  $T \sim 10\,000$  K (el cual es un valor muy bajo), basta con sólo una no térmica para explicar la variación espectral (a diferencia del caso de 1628.5+3808). Como además se tiene la posibilidad de que el brillo sea muy bajo, y otras componentes podrían cobrar cierta relevancia, se evito agregar esa segunda componente. En las tres noches, los cambios de brillo observados implican una variación



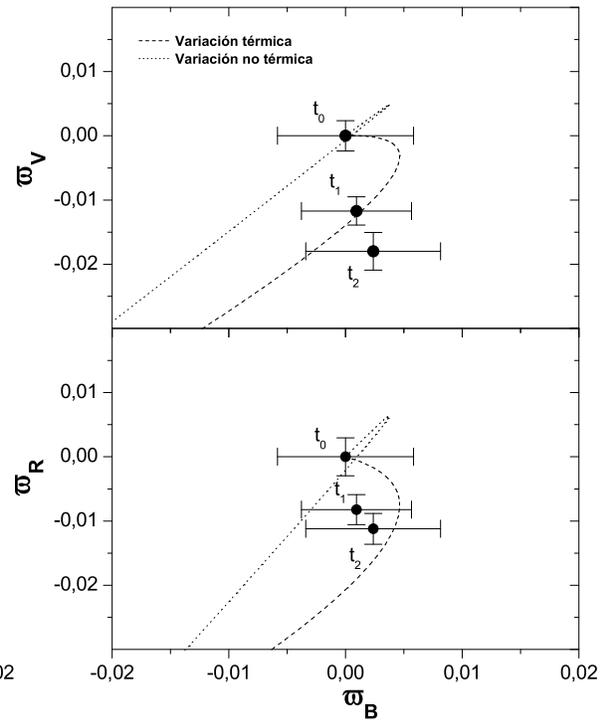
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8h: Ajustes y variabilidad

espectral que puede ser explicada por cambios de esta componente única. Sin embargo, el ajuste marginal a los datos espectrales hace que los siguientes resultados sean tomados con las debidas reservas.

*17 de agosto de 1999.*- El brillo del cuasar se encontraba en  $V = 17.55 \pm 0.01$  durante esta noche. Debido a la pérdida del primer conjunto de datos de la banda R, se utilizó el segundo grupo para hacer el ajuste del modelo. Una sola componente no térmica ajusta medianamente a estos datos, con un índice espectral  $\alpha_0 = -3.06 \pm 0.49$  (Figura 5.8i(a)). A partir de estos valores se buscó el mejor ajuste, para B y V, correspondiente a los datos iniciales. Los valores encontrados son muy parecidos. Sin embargo, el nivel de brillo tan bajo (según los datos de NED) puede provocar que este ajuste sólo sea una aproximación más o menos bondadosa.

Aunque el ajuste no es muy bueno, es posible explicar la microvariación como el resultado de cambios en esta componente única (Figura 5.8i(b)). En tal caso el índice espectral habría aumentado en  $9.8 \times 10^{-4}$ , entre el primero y el tercer conjunto de datos, mientras que  $n_n$  se habría mantenido constante. El criterio de simultaneidad indica que las observaciones se realizaron de manera simultánea ( $S_B = 0.09$ ,  $S_V = 0.35$ ,  $S_R = 0.02$ ).

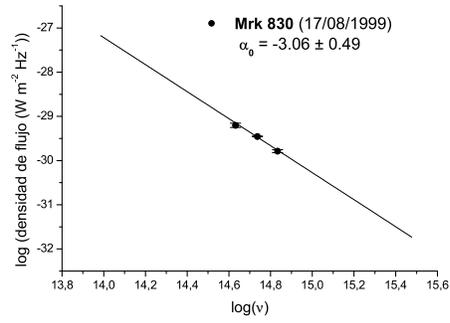
*18 de agosto de 1999.*- El brillo promedio se encontraba en el mismo nivel que en la noche del 17 de agosto. La magnitud en V fue de  $17.56 \pm 0.03$ . En esta ocasión, el ajuste a los datos tiene una calidad menor a la de la primera noche. Las primeras observaciones de la sesión serían ajustadas por una componente no térmica cuyo índice espectral debería ser  $\alpha_0 = -2.51 \pm 0.35$  (Figura 5.8j(a)).

Al igual que la noche del 17, la variación puede ser descrita como el resultado de un cambio no térmico. En este caso, el índice espectral habría disminuido en  $1.1 \times 10^{-3}$ , y la amplitud habría aumentado a  $\sim 1.01$  (Fig. 5.8j(b)). El criterio de simultaneidad indica que la variación espectral debería ser real ( $S_B = 0.27$ ,  $S_V = 0.39$  y  $S_R = 0.15$ ). Sin embargo, aunque el modelo predice que difícilmente se podría observar una variación en la banda B, tal y como parece ocurrir, también predice que se debería observar una variación en la banda R, lo cual no sucede.

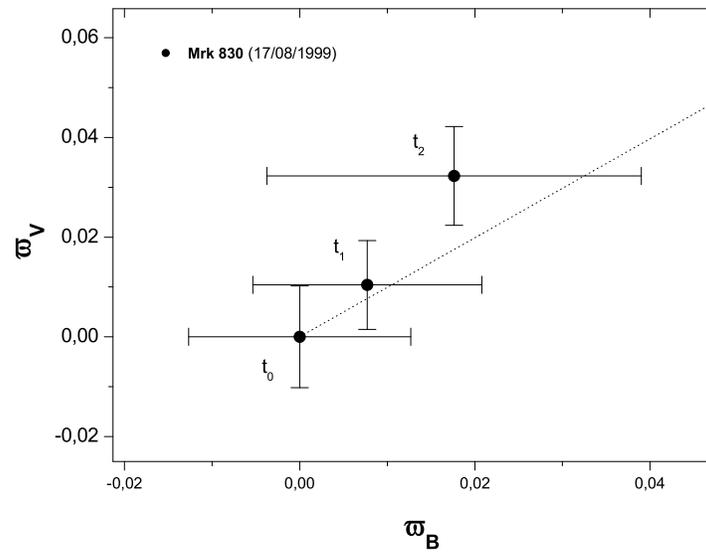
*14 de junio de 2001.*- El brillo durante esta noche ( $V = 17.66 \pm 0.01$ ) se encontraba una décima de magnitud más débil respecto al valor medido en agosto de 1999. Los datos del primer conjunto de observaciones pueden ser descritos por una ley de potencias, pero el índice se encontraría en  $\alpha_0 = -1.81 \pm 0.04$  (Figura 5.8k(a)).

Si ocurriera un aumento del brillo con una variación de  $\sim 1 \times 10^{-3}$  en el índice espectral mientras la amplitud se mantiene constante, el evento de microvariabilidad podría ser explicado marginalmente (Fig. 5.8k(b)). El criterio de simultaneidad establece que las secuencias de observaciones deberían haber sido tomadas sin que el brillo hubiera cambiado ( $S_B = 0.17$ ,  $S_V = 0.50$  y  $S_R = 0.37$ ), por lo que el cambio de color se considera real.

Los resultados de esta sección indican que, en general es posible dar una explicación

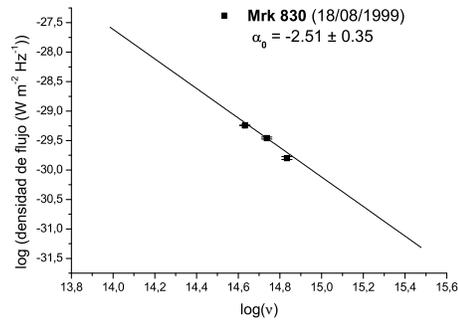


(a)

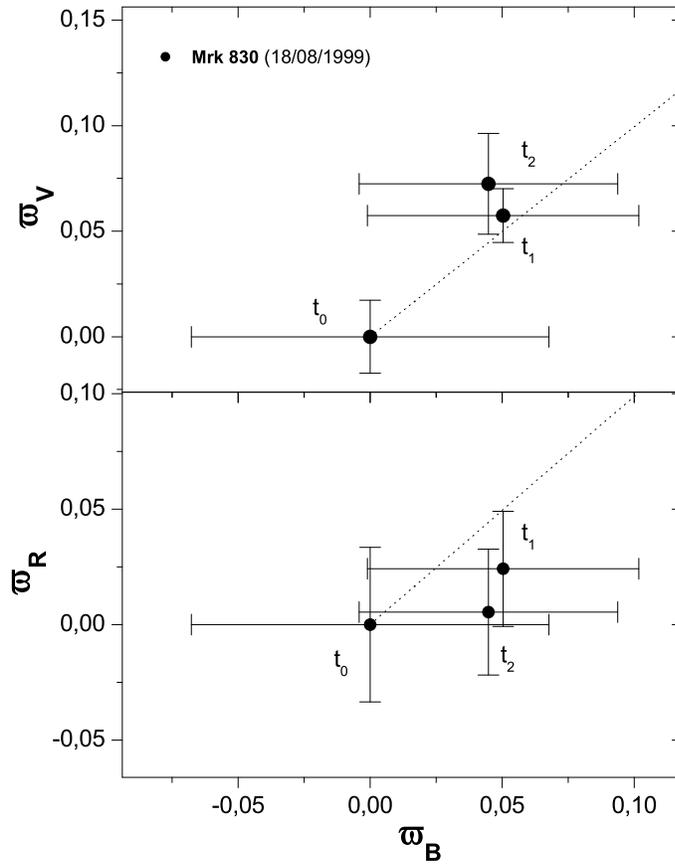


(b)

Figura 5.8i: Ajustes y variabilidad

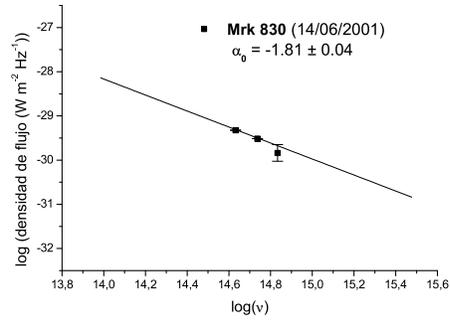


(a)

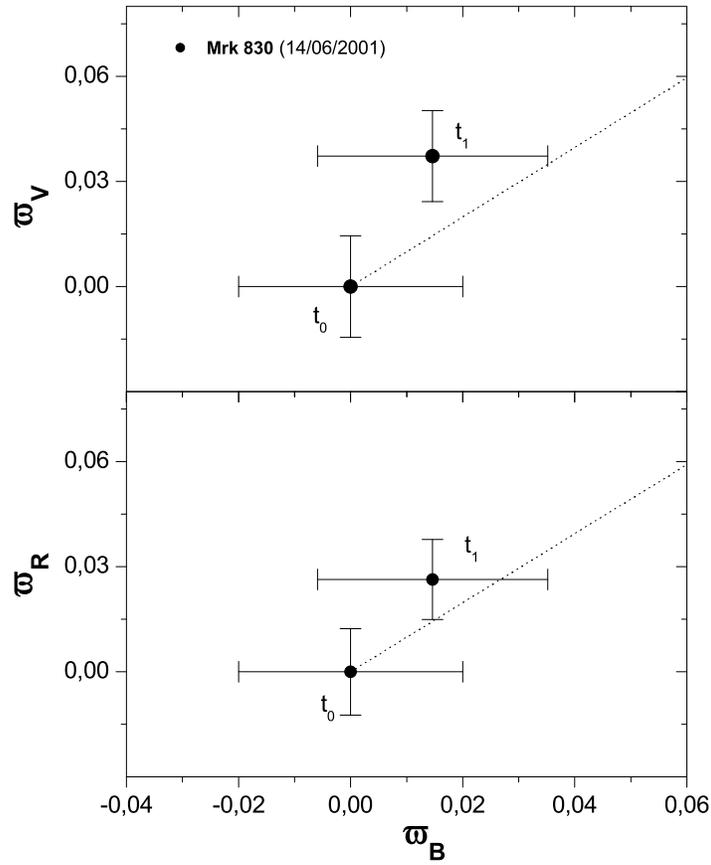


(b)

Figura 5.8j: Ajustes y variabilidad



(a)



(b)

Figura 5.8k: Ajustes y variabilidad

a los eventos de microvariabilidad detectados. Aunque el continuo de emisión puede ser explicado en todos los casos por una sola componente espectral, las variaciones espectrales hacen suponer la presencia de una segunda componente (posiblemente de origen térmico). Si bien este resultado era de esperarse, la novedad del estudio presente es mostrar la factibilidad de distinguir la causa de un evento de microvariabilidad.

Estos resultados pueden separarse en dos categorías claras. Por un lado se tienen las variaciones que sólo pueden ser explicadas por variaciones de origen térmico y, por el otro, aquellas donde las microvariaciones pueden ser explicadas por ambas componentes. Sin embargo, por simplicidad se ha supuesto que en el segundo caso es la componente no térmica, única, la mejor opción para explicar los datos.

En las Tablas 5.2 y 5.3 se presenta los resultados de todos estos ajustes, tanto a los *espectros* como a las variaciones espectrales. Debe tenerse un criterio laxo al considerar los valores de  $T_0$ ,  $\alpha_0$  y  $a_{0V}$ , pues al contar con sólo tres bandas ópticas existe mucha incertidumbre en los valores de estos parámetros. Lo mismo ocurre con la amplitud de los cambios de  $T$  y  $n_T$  y de  $\alpha$  y  $n_n$ . Sin embargo, nótese que la diferencia cualitativa entre una variación térmica y una no térmica permite distinguir, la mayor de las veces, entre un origen y otro. Un estudio en que se realicen observaciones en al menos cuatro bandas ópticas podría establecer claramente los parámetros del ajuste a los *espectros*, llevando a la posibilidad de establecer de manera más clara y precisa la causa de la variación espectral.

Es interesante notar que, de acuerdo al plano de caracterización espectral, la mayoría de las microvariaciones detectadas serían debidas a procesos de origen térmico, o por lo menos algo muy parecido.

## 5.5 Discusión

De acuerdo al criterio de simultaneidad, las variaciones espectrales descritas en la sección anterior deberían ser reales, y no el producto de efectos relacionados con el *time lag*. Si bien es factible la presencia de variaciones tipo espiga (ver Cap. 3), es difícil encontrar una explicación en este fenómeno para los eventos reportados en el Capítulo 4 (véase, sin embargo, el caso del cuasar US 3472). Esto es cierto sobre todo para aquéllos casos donde se observa una curva de luz con un aumento paulatino a lo largo del monitoreo, incluso si se trata de sólo una banda, como en los casos de Mrk 830 (14-junio-2001), PKS 1510-089, PKS 0003+15 y CSO 21.

El resultado principal del trabajo presente consiste en que, por primera vez, se tiene la posibilidad de distinguir una variación térmica de una no térmica durante eventos de microvariabilidad (ver ecuaciones 5.8, 5.9, 5.15 y 5.16). Esto puede proveer pistas para comprender los principales procesos de producción de energía, así como los mecanismos que generan las microvariaciones.

Otro resultado interesante consiste en advertir que la contribución relativa de cada componente es un parámetro importante para establecer el comportamiento de las curvas en los planos  $\varpi_{V,R}$  vs.  $\varpi_B$ . Más aún, en concordancia con las conclusiones del Capítulo 4, los resultados presentados en § 5.4 muestran que el origen de la microvariabilidad no

depende de las propiedades en radio de los cuasares. Sin importar el tipo de cuasar de que se trate, la microvariabilidad parece tener su origen tanto en procesos térmicos como no térmicos. Más aún, la microvariabilidad de origen no térmico puede detectarse tanto en RLQ (ver por ejemplo 3C 281/04-mar-2000) como en RQQ (ver el caso de Mrk 830/18-06-2001), así como la microvariabilidad de origen térmico puede presentarse en RQQ (ver el caso de 1628.5+3808) como en RLQ (ver por ejemplo PKS 1510-08).

De las once detecciones de microvariabilidad (se incluyen las variaciones posibles), 3 corresponden a variaciones de origen térmico (más otras 3 posibles) y 5 a variaciones de origen no térmico. Las tres posibles variaciones térmicas corresponden en realidad a eventos en que no es posible determinar el origen (los casos de los cuasares PKS 0003+15, MC3 1750+175 y US 3472), pero que al menos en parte poseen características semejantes a variaciones térmicas. Cuando una variación no pudo ser caracterizada como de un origen o de otro, se espera que esto sea por las condiciones mismas en que se desarrolla, o porque se necesitan más y mejores datos.

Un resultado interesante indica que los cambios de color más intensos se deben a variaciones de origen térmico. Dado que ciertos eventos de microvariabilidad pueden ser descritos por ambas componentes, cabe preguntarse cuántos de los eventos asignado a variaciones no térmicas pueden ser en realidad variaciones térmicas. Para responder a esta pregunta se requeriría ampliar las observaciones durante más tiempo y con mayor número de filtros.

Sin embargo, por ahora no es la intención confrontar los modelos teóricos. En otras palabras, el método empleado sólo debe ser tomado (por ahora) como un indicador cualitativo de la variación del espectro. En un futuro, con mayor número de datos será posible considerar modelos más reales que puedan considerar incluso la contribución de otras componentes como la galaxia huésped, por ejemplo.

En general, este comportamiento *unificado* en microvariabilidad concuerda con la detección de jets en RQQ. Si en verdad todos estos objetos (RQQ y RLQ) poseen un jet relativista, no parece raro encontrar la manifestación de fenómenos térmicos y no térmicos en ambos tipos de cuasares, sobre todo si existe una relación disco-jet.

Las condiciones físicas de un jet podrían explicar de manera “sencilla” la microvariabilidad, pues es de esperar que las escalas de tiempo de la dinámica en éste coincidan con las escalas de tiempo de la microvariabilidad. Sin embargo, existen cuestionamientos respecto a que sea el jet donde se generan las microvariaciones. Por un lado, se requiere de una temperatura de brillo mayor a la temperatura crítica de  $T \sim 10^{12}$  K (ver Capítulos 1 y 2). Si bien este problema podría ser salvado al considerar factores de Lorentz muy grandes, se requiere que el plasma se desplace a velocidades ultrarelativistas, mayores a las requeridas para la emisión sincrotrón (ver Wiita 2005 y referencias ahí citadas).

Por otro lado, hay indicios de jets sub-relativistas en los RQQ, o que incluso podrían estar *frustrados* en estos objetos (Ghisellini, Haart y Matt 2004).

Un problema adicional lo constituye la *intensificación* por Compton inverso, pues deberían observarse microvariaciones correlacionadas entre el óptico y frecuencias mayores a

las de esta región espectral, lo cual no parece ocurrir siempre.

Por otro lado, diversas investigaciones han ido confluyendo a la idea de que variaciones de diversas escalas temporales, incluyendo la microvariabilidad, serían producidas en el disco de acreción (Webb y Malkan 2000; Vagnetti y Trevese 2001; Trevese y Vagnetti 2002; Pereyra et al. 2006; ver además Mangalam y Wiita 1993 y Wiita 2005).

Uno de los trabajos más sobresalientes en torno al estudio de la variabilidad espectral ha sido llevado a cabo por Vagnetti y Trevese. Estos autores definen un índice de variabilidad espectral basado en el cambio de color, con lo que han podido determinar que la variabilidad de período intermedio y largo debería estar relacionada con perturbaciones en el disco de acreción (Vagnetti y Trevese 2001 y Trevese y Vagnetti 2002). Trevese y Vagnetti (2002) detectaron variaciones de período intermedio y largo en una muestra de cuasares, las cuales fueron interpretadas como producidas por manchas calientes y por cambios en la tasa de acreción. Vagnetti y Trevese (2001), por su parte, interpretaron las variaciones detectadas por Giveon et al. (1999) como variaciones de origen térmico, cuyos cambios de color se deberían a variaciones generadas en una región del disco mezcladas con el flujo de otra zona del mismo disco que no varía (ver además Lawrence 2005).

Por su parte, Webb y Malkan (2000) detectaron variaciones con escalas de tiempo de días en cuasares y galaxias Seyfert. En ambos casos las variaciones pueden ser explicadas por procesos térmicos, como manchas calientes y cambios en la tasa de acreción.

De acuerdo con algunos estudios, cambios en la tasa de acreción pueden generar cambios en la temperatura del disco de acreción, derivando en variaciones en el nivel de flujo. Las escalas de tiempo de estas variaciones corresponden a variaciones de período intermedio y largo (e.g., Pereyra et al. 2006; Wiita 2005; Webb y Malkan 2000). Algunas investigaciones encuentran indicios de que la tasa de acreción es la responsable del rango de seis ordenes de magnitud en luminosidad que se observa entre los diferentes tipos de NAG (Lawrence 2005). Otras perturbaciones en el disco de acreción pueden dar origen a variaciones con escalas de tiempo de semanas, días e incluso unas cuantas horas (e.g., Webb y Malkan 2000; Wiita 2005).

Aunque las variaciones térmicas presentadas en § 5.4 fueron clasificadas como microvariabilidad, pues fueron detectadas en un promedio de  $\sim 2$ -3 horas, en ningún caso parece tenerse una variación completa. Entonces, cabe la posibilidad de haber observado sólo parte de una variación de mayor período. En tal situación, las escalas de tiempo de algunos de los procesos del disco pueden coincidir con las escalas de tiempo de las variaciones que se han presentado. Por ejemplo, a causa de un cambio en la tasa de acreción la variabilidad podría manifestarse en escalas de tiempo de días, o incluso horas (ver Wiita 2005).

En cuanto a las variaciones en que no puede determinarse con claridad el origen por alguna de las componentes propuestas (como en el caso de los cuasares PKS 0003+15 y MC3 1750+175), la explicación podrá hallarse con mejores datos y con modelos más completos. Ciertamente es que la burda descripción del disco por emisión de cuerpo negro simple puede influir en estos resultados (aunque con anterioridad se han probado este tipo de modelos, que funcionan no obstante su simpleza; ver por ejemplo Malkan y Moore 1986;

Lawrence 2005); sin embargo, aún para modelos más completos, no se ha podido dar una explicación totalmente satisfactoria de las variaciones más simples. Por ejemplo, en los modelos estándares de disco de acreción se espera que las variaciones presenten un tiempo de retardo, lo cual no siempre se observa (ver por ejemplo Pereyra et al. 2006; Lawrence 2005; Wiita 2005 y referencias ahí citadas).

Por otro lado, algunas investigaciones consideran que la variabilidad óptica, aunque relacionada con el disco de acreción, no es generada en éste, sino a consecuencia de nubes de polvo que de vez en vez ocultarían una parte del disco (e.g. Gaskell et al. 2004). Sin embargo, una situación semejante debería presentar algún tipo de dependencia con la longitud de onda, pues la nube sólo cubriría parte del disco de acreción. En opinión de Lawrence (2005), una posible solución podría encontrarse si el polvo formara un viento que ocasionalmente cubriera el disco. Quizá el modelo de Elvis (2000, 2002) podría explicar una situación semejante.

La búsqueda de posibles fuentes de variabilidad espectral implica no sólo considerar otras fuentes que contribuyan al flujo y que presenten microvariabilidad; además, deben emplearse componentes constantes cuya contribución ayude a producir cambios espectrales. Muestra de ello se encuentra en los blazares. En estos objetos se ha encontrado que la variabilidad espectral es mayor cuando se encuentran en estado de bajo brillo (Vagnetti y Trevese 2003; Ramírez et al. 2004; Gu et al. 2006; ver el Cap 6). Esto se debe a que, cuando un blazar se encuentra en un nivel bajo de brillo, las componentes térmica y no térmica son comparables, por lo que se espera que la variación de cualquiera de éstas derive en marcadas variaciones espectrales.

Para el caso de cuasares, la presencia de más componentes que las supuestas en el trabajo presente podría generar variaciones espectrales no contempladas en el modelo (quizás así podrá darse explicación a variaciones como las de 3C 281(04-03-2000), PKS 0003+15 y MC3 1750+175). Por ejemplo, una variación producida en la región central del NAG podría derivar en una variación espectral si al flujo total contribuyen el continuo de Balmer, el polvo y la galaxia huésped [aunque en el caso de esta última, Vagnetti y Trevese (2001) no encontraron evidencias de que pudiera influir en el cambio espectral de la variabilidad en blazares].

Además, debe notarse la importancia de la contribución relativa de cada una de las componentes que se introduzcan en el modelo. Esto puede verse con facilidad para el caso del objeto PKS 1510-089, donde para cambios similares en el índice de la ley de potencias se tiene diferentes comportamientos en la variación espectral (ver Figura 5.8c). Algo semejante ha sido registrado por Gu et al. (2006).

Otra forma de variaciones más complejas implica a *variaciones simultáneas* en el disco y el jet. Algo semejante podría ocurrir si alguna perturbación de período largo en el disco se propaga al jet, transformándose en perturbaciones de éste y provocando que la variación observada sea producida por ambas componentes (aunque en algunos casos con un tiempo de retardo mayor al tiempo en que observamos cada cuasar). Otra posibilidad es que la emisión de una perturbación del disco sea reemitida y amplificada por las partículas del jet mediante Compton inverso. En tal situación, la emisión (variable) debería ser una especie de convolución de ambas componentes espectrales.

Un resultado interesante más. Debe notarse que el modelo que aquí se presenta puede dar una explicación a las variaciones que parecen dar un salto en las gráficas 4.1. Estas no serían más que el resultado de variaciones *continuas*, y paulatinas, cuyas características corresponderían a la naturaleza misma de la variación (i.e., la combinación espectral de componentes térmicas y no térmicas en las que alguna de ellas varía en amplitud y temperatura o índice espectral).

## 5.6 Resumen y conclusiones

Para explicar el origen de un evento de microvariabilidad es necesario estudiar la variabilidad espectral durante la evolución de dicho evento. Así, las microvariaciones reportadas en el Capítulo 4 fueron analizadas para indagar si su origen es de naturaleza térmica o no térmica. Para ello, se desarrolló un método consistente en modelar la emisión continua, mezclando emisión térmica (identificada con el disco de acreción) y emisión no térmica representada por una ley de potencias (e identificada con el jet de partículas relativistas). Una vez obtenida una estimación de los parámetros del modelo (la temperatura del disco, el índice de la ley de potencias y la contribución relativa de cada componente), se intentó reproducir la variación observada introduciendo cambios en dichos parámetros.

Los resultados principales de este Capítulo indican que la microvariabilidad puede ser generada tanto por mecanismos térmicos como no térmicos; esto, sin importar si se trata de un CRLQ o un RQQ. Junto con los resultados de los Capítulos 4 y 3, esto concuerda con los recientes hallazgos de jets relativistas en cuasares radio callados.

Con ello, podríamos estar ante un caso de *unificación* de microvariabilidad entre RQQ y RLQ, lo que a su vez podría estar indicando una *unificación* más amplia al incluir a los objetos tipo blazar, toda vez que los objetos CRLQ son ocasionalmente clasificados como blazares (ver por ejemplo los artículos de Gopal-Krishna y colaboradores).

La tasa de cambio de las variaciones fue utilizada para determinar la resolución temporal de las observaciones. Bajo este criterio puede considerarse que una serie completa de imágenes, en la secuencia BVR, fue tomada mientras que cada objeto se encontraba en el mismo nivel de brillo.

Aunque el método funciona en general, es deseable realizar un estudio donde las imágenes sean adquiridas con una mejor resolución temporal, así como contar con datos en al menos cuatro bandas ópticas. En tal situación sería deseable contar con modelos más realistas, lo que permitiría una mejor comparación con las observaciones. Para un estudio semejante sería recomendable utilizar un telescopio grande, como el telescopio de 2 metros del OAN, que permitiera realizar observaciones casi simultáneamente en al menos 4 bandas ópticas (con lapsos de captura menores a los diez minutos, como lo recomiendan Villata et al. 2002). Estas observaciones deberían realizarse sobre una muestra constituida por cuasares que han presentado microvariabilidad, así como algunos blazares cuyas variaciones representan casos interesantes, como PKS 0736+017. Durante eventos de microvariabilidad, el cambio en la forma del espectro puede estar influenciada por la contribución relativa de cada componente al flujo total.

Para terminar, permitase hacer incapie en los principales resultados de esta investigación:

\* Por primera vez, se tiene la posibilidad de comprobar los modelos de emisión de un cuasar vía la *microvariabilidad espectral*.

\* **La microvariabilidad en cuasares puede originarse en procesos térmicos o no térmicos, independientemente de la clasificación en radio de cada objeto.**







## Capítulo 6

# La extraña variabilidad del blazar PKS 0736+017

**Resumen.**-Se presentan las observaciones fotométricas, en las bandas ópticas BVR, del objeto tipo blazar PKS 0736+017. Estas observaciones se llevaron a cabo con tres telescopios en México y dos en España, entre diciembre de 1998 y abril de 2003. PKS 0736+017 presentó variaciones interesantes en diferentes escalas temporales y en amplitud. El brillo máximo se detectó el 19 de diciembre de 2001 ( $B = 14.90 \pm 0.01$ ,  $V = 14.34 \pm 0.01$ , y  $R = 13.79 \pm 0.01$ ). A lo largo de las observaciones, se detectó una extraña tendencia del brillo del objeto, pues éste se mostraba más rojo cuando aumentaba su brillo. Más aún, se muestra una correlación clara entre el nivel de brillo y la pendiente espectral durante una temporada. Este extraño comportamiento no puede ser descrito por los modelos más comunes de ráfagas en blazares. Para investigar el origen de la correlación entre el nivel de flujo y la pendiente espectral que se ha detectado en éste y otros blazares, se requiere un estudio adicional.

### 6.1 Introducción

Los blazares, como clase, exhiben variabilidad en el nivel de flujo en escalas de tiempo de minutos a años (por ejemplo, Ghosh et al. 2000; Vagnetti et al. 2003; Garcia et al. 1999; Brown et al. 1989a,b; Wright et al. 1998), poseen una polarización alta y variable (Angel y Stockman 1980), así como emisión en radio dominada por una morfología estelar con débiles estructuras extendidas (Antonucci y Ulvestad 1985). El continuo se caracteriza por un espectro plano en el radio y empinado en el óptico/IR, cuya emisión puede extenderse hasta energías en la región de los rayos gamma (Maraschi et al. 1994). La emisión proveniente de un chorro de partículas relativistas se explica como la fuente de las características observables de núcleos activos con fuerte emisión en radio, como los blazares (Blandford y Rees 1978). Su polarización, sumamente alta y variable, así como la variabilidad de su brillo, se toman generalmente como un reflejo de lo que ocurre en el corazón del motor nuclear.

Se ha propuesto diversos escenarios para explicar la variabilidad tan rápida que presen-

tan estos objetos. Comúnmente se invoca la presencia de choques relativistas que interactúan con el medio inhomogéneo del jet (Maraschi et al. 1989; Qian et al. 1991; Marscher et al. 1992; Marscher 1996; Gear et al. 1986; Ghisellini et al. 2002); modelos adicionales se refieren a procesos en el disco de acreción, tales como ráfagas o manchas calientes que serían eclipsadas por el mismo disco (Mangalam y Wiita 1993; Wiita 1996). Las dimensiones de las regiones emisoras se calculan utilizando argumentos causales.

Se ha encontrado que las amplitudes de la variabilidad en los NAG están correlacionadas con el corrimiento al rojo y anti-correlacionadas con la luminosidad (Hook et al. 1994; Cristiani et al. 1996; Di Clemente et al. 1996). Con respecto a escalas de tiempo, ninguna correlación fue encontrada con la amplitud de la variación en blazares por Nair (1997), ni con la luminosidad o el corrimiento al rojo en NAG (Cristiani et al. 1996). Una anticorrelación, entre las escalas de tiempo y la luminosidad de cuasares radio fuertes fue encontrada por Netzer et al. (1996).

Muchos autores han encontrado que la amplitud de la variabilidad en blazares es más alta a frecuencias altas, lo que lleva a un espectro más plano cuando el flujo aumenta y a uno más escarpado cuando el brillo disminuye (Racine 1970; Gear et al. 1986; Massaro et al. 1998; Ghisellini et al. 1997; Maesano et al. 1997a, b). Sin embargo, Ghosh et al. (2000) sugieren que no es correcto hacer tales generalizaciones. Ellos encontraron que ocasionalmente las amplitudes de las variaciones son semejantes en V y R, en el objeto PKS 0235+164, o aun más grandes en R, en el objeto PKS 0735+178.

PKS 0736+017 fue clasificado como un blazar por Angel y Stockman (1980), y muestra líneas de emisión fuertes, permitidas y prohibidas, en la región óptica (Falomo et al. 1994). Mientras que Padovani y Urry (1992) y Wall y Peacock (1985) reportan a PKS 0736+017 como un cuasar de espectro plano en el radio (FSRQ, por sus siglas en inglés), Brown et al. (1989a) lo clasifican como un cuasar Violentamente Variable en el Óptico, localizado en el centro de una galaxia elíptica, posiblemente una galaxia cD (Wright et al. 1998; Wyckoff et al. 1981; Smith et al. 1986; Hutchings 1987; Falomo y Ulrich 2000; Hughes et al. 2000; Kotilainen et al. 1998), que tiene dos compañeras débiles, resueltas y cercanas, incrustadas en la nebulosidad del objeto (Dunlop et al. 1993; Hutchings et al. 1988; Bondi et al. 1996). La magnitud absoluta de la galaxia anfitriona se ha determinado entre  $M_R = -24.3$  y  $M_R = -22.2$  (Falomo y Ulrich 2000; Hutchings 1987), y  $M_V = -21.7$  (Smith et al. 1986).

Históricamente, el brillo de este objeto ha sido variable en escalas de tiempo diferentes. Pica et al. (1980, 1988) reportaron una caída progresiva de 0.7 mags en seis años y dos ráfagas de unas 0.7 mags ocurridas en 1974 y 1978, en escalas de tiempo de semanas. Ghosh et al. (2000) observaron a PKS 0736+017 en la banda R; estos autores informan de la presencia de variaciones de amplitud pequeña ( $\Delta R = 0.34 \pm 0.05$  mags) en escalas de tiempo de seis días. Además, reportaron una variación de  $0.65 \pm 0.05$  mags durante el intervalo de sus observaciones (entre noviembre de 1995 y marzo de 1998). García et al. (1999) reportaron una variación de 0.8 mags (en el filtro V) en 400 días. McGimsey et al. (1975) observaron una variación óptica de 0.5 mags en una escala de tiempo de semanas y meses, con una amplitud máxima de 1.0 mags. Katajainen et al. (2000) distinguieron variaciones en brillo, en el filtro V, entre 16.25 y 16.84 mags en escalas de tiempo de 18 días. Schaefer (1980) reportó  $\Delta m_B = 0.5$  mags en 1 día. Ramírez et al. (2003) reportaron una variación de 0.3 mags en 4.5 horas en la banda óptica. Recientemente, Clements et al.

(2003) detectaron una ráfaga con  $\Delta R=1.3$  mags en dos horas, acaecida durante enero de 2002.

Pica et al. (1988) detectaron que PKS 0736+017 estaba en un mínimo de brillo en 1981, pero inmediatamente aumentó, alcanzando un pico de brillo en 1984. Estos autores informaron de una magnitud media de 16.8 en el punto más débil y 15.45 en la etapa brillante, con una magnitud media de 16.05 (en  $m_p$ ). La magnitud media para este objeto está entre 16 y 17 mags en la banda V (por ejemplo, Katajainen et al. 2000; Garcia et al. 1999; Wright 1984; Bondi et al. 1996).

Bondi et al. (1996) detectaron variabilidad en las frecuencias del radio en dos épocas diferentes (a principios de 1980 y a finales de 1981). Ellos encontraron que la fuente estaba formada por dos componentes y que la variabilidad fue provocada por cambios en las densidades de flujo y la separación de los componentes. En una tercera época, identificaron la componente más brillante con el núcleo. McAdam (1976) informó de la detección de variabilidad en flujo a 408 MHz, y Kedziora-Chudczer et al. (2001) observaron variaciones en la polarización.

Por otro lado, otros estudios se llevaron a cabo sin resultados positivos. Padrielli et al. (1987) realizaron observaciones multifrecuencia de PKS 0736+017 en busca de correlación entre frecuencias altas y bajas durante períodos de variabilidad. Jones et al. (1981) lo observaron como parte de su estudio de veinte fuentes de radio para tratar de clasificar las variaciones de flujo como debidas a cambios en la escala de la fuente, la estructura o la pendiente de la distribución de energías de electrones. Sitko et al. (1985) realizaron un estudio de polarimetría en el óptico sobre varios blazares, pero en el caso de PKS 0736+017 sólo encontraron evidencia marginal de una relación entre el grado de polarización y la longitud de onda.

Brown et al. (1989b), dentro de su investigación de las propiedades de la variabilidad en longitudes de onda de centímetros a ultravioleta, no encontraron ninguna correlación entre el nivel de flujo en el cercano-infrarrojo y la pendiente espectral de PKS 0736+017. Sin embargo hacen notar que, excluyendo los datos para el mínimo, el flujo muestra una anticorrelación significativa (a un nivel de confianza de más del 80%) entre el nivel de flujo y la pendiente espectral (tomando  $\alpha < 0$ ).

En este capítulo se presenta y discute la variabilidad, en la banda óptica, del cuasar con Variabilidad Óptica Violenta (OVV) PKS0736+017; en § 6.2, se describen las observaciones y los procedimientos de reducción; en § 6.3, se analiza el comportamiento de la variabilidad. Finalmente, en § 6.4 se presenta la discusión y, en § 6.5, las conclusiones.

## 6.2 Observación y reducción de datos

Las observaciones se llevaron a cabo con cinco telescopios distribuidos en México y España. Las observaciones de México se hicieron con tres telescopios: un 2.1 m (Mx1), un 1.5 m (Mx2) y un 0.84 m (Mx3) operados por el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California (nótese que aquí se ha cambiado la nomenclatura respecto de los Capítulos 4 y 5, donde al telescopio de 2.1 m se le nombró Mx2 y al de 1.5 m, Mx1).

Tabla 6.1: Bitácora de observación

Fecha	Tels.	$m_B$	$\delta m_B$	$m_V$	$\delta m_V$	$m_R$	$\delta m_R$
Dic/11/1998	S1	16.91	0.02	16.50	0.01	15.97	0.02
Mar/03/2000	M2	16.60	0.04	16.09	0.03	15.56	0.03
Mar/04/2000	S2	16.61	0.01	16.10	0.01	15.60	0.01
Mar/05/2000	S2	16.29	0.02	15.78	0.01	15.25	0.03
Nov/26/2000	M3	17.20	0.02	16.70	0.01	16.17	0.01
Nov/28/2000	M3	17.29	0.02	16.83	0.02	16.32	0.02
Nov/29/2000	M3	17.30	0.02	16.80	0.02	16.26	0.02
Dic/03/2000	M3	17.19	0.02	16.63	0.03	16.08	0.02
Dic/04/2000	M3	16.98	0.02	16.48	0.02	15.89	0.02
Dic/19/2001	M1	15.07	0.01	14.49	0.01	13.94	0.01
Abr/26/2003	M2	16.90	0.03	16.36	0.03	15.74	0.03

*Resumen de observaciones. Ver el texto para una descripción completa de la tabla. Las magnitudes listadas para diciembre de 2001 son valores promedio.*

Los telescopios en España fueron el telescopio de 1 m Jacobus Kapteyn (S1), operado por el Grupo Isaac Newton en el Observatorio Roque de Los Muchachos y, el telescopio de 1.52 m (S2) de la Estación de Observación de Calar Alto (EOCA) en el Centro Astronómico Hispano-Alemán (CAHA), operado por el Observatorio Astronómico Nacional (de España). Todas las observaciones se hicieron con filtros de serie de BVR Johnson-Cousins. La bitácora de las observaciones se presenta en la Tabla 6.1. En esta tabla, la fecha y el telescopio utilizado se listan en las columnas 1 y 2, respectivamente. Las magnitudes y las incertidumbres para cada filtro se listan en las columnas 3-8.

Los CCDs utilizados con Mx1 y Mx2 fueron un Site SI003 con  $1024 \times 1024$  pixeles de  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  cada uno, con una cubierta de metácromo II y VISAR para mejorar la respuesta en el azul. Con Mx3, el detector fue un CCD Thomson TH7398M con  $2048 \times 2048$  pixeles de  $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$  cada uno, con una cubierta de metácromo II. S1 poseía un TEK1024AR de  $1024 \times 1024$  pixeles de  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  cada uno, teñido con una capa de AR y, S2 tuvo un Tektronics TK1024AB de  $1024 \times 1024$  pixeles de  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$  cada uno.

Se reporta los resultados de cinco temporadas de observación (una se llevó a cabo con dos telescopios, Mx2 y S2). Cuatro noches de las 15 fueron eliminadas del análisis, debido a problemas de observación, tales como nubes y *seeing* muy malo. De las once noches restantes, una se tomó con Mx1, dos con Mx2, cinco con Mx3, una con S1 y dos con S2. En estos datos puede discernirse variabilidad año-a-año, mes-a-mes y día-a-día, así como microvariabilidad. Las estrellas de referencia y comparación que se utilizó se encontraban en el mismo campo del objeto (sólo se utilizó estrellas no variables), con el propósito de analizar la curva de luz del objeto.

La estrategia de observación se describe en los capítulos 3 y 4; brevemente, se tomaron cinco imágenes con cada filtro en la secuencia BVR con aproximadamente una hora entre cada conjunto de la observaciones. Las imágenes se redujeron con la paquetería IRAF/APPHOT. La mejor abertura se determinó mediante la técnica de curvas de crecimiento, que tuvo como resultado una pseudo-abertura de 3 FWHM. Los estándares fueron

estrellas de Landolt (Landolt 1992), utilizadas para obtener las magnitudes en el sistema estándar. Las incertidumbres se determinaron de la dispersión de la magnitud dentro de cada sucesión de cinco imágenes, que no difiere apreciablemente de la dispersión entre los grupos de imágenes para las estrellas de referencia. Cuando los datos fueron transformados a flujos, se realizaron correcciones por extinción atmosférica y enrojecimiento por polvo.

Tres escalas de tiempo de variabilidad son claramente discernibles: un año ( $\sim 2.3$  mag en BVR, entre noviembre de 2000 y diciembre de 2001), un día ( $\sim 0.1$  mag en BVR, durante la temporada de noviembre de 2000), y microvariabilidad ( $\sim 0.3$  mag en BVR, en diciembre de 2001). Cada una de estas variaciones se estudia en la próxima sección.

## 6.3 Análisis de variabilidad

### 6.3.1 Variabilidad

PKS 0736+017 fue observado dentro de un programa más amplio para estudiar microvariabilidad de NAG, y que fue presentado en los Capítulos 4 y 5. Unas cuantas observaciones se hicieron para monitorear la variabilidad de período largo. Así, los datos permiten obtener la información adecuada sobre variabilidad de período corto y largo. Sin embargo, el muestreo de período largo es escaso y limita las posibilidades para determinar parámetros tales como el momento preciso cuando comenzó y terminó una ráfaga, o la fecha en que ocurrió el máximo.

En las Figuras 6.1 y 6.2 se presenta las curvas de la luz en BVR, que muestran las variaciones en el flujo con escalas de tiempo de años y minutos, respectivamente. Las variaciones de período largo tienen amplitudes de hasta unas cuantas magnitudes, mientras que las amplitudes para la variabilidad de período corto son de unas cuantas centésimas a varias décimas de magnitud. A pesar del pobre muestreo en tiempo, la continua actividad es obvia. Adicionalmente, en la Figura 6.1 se presentan las curvas de luz para tres de las estrellas de campo que se utilizó como estrellas de control. Algunas estrellas en el campo de PKS 0736+017 presentan variabilidad de amplitud mucho más pequeña que el objeto (menos de 0.03 mags), pero sólo se escogieron aquéllas que mantuvieron su brillo constante durante las observaciones. Además, se consideró la estrella 2 de Smith et al. (1985) para el campo de PKS 0736+017. La estimación de la magnitud obtenida para esta estrella ( $B=15.92$ ,  $V=15.40$ , y  $R=15.04$ ) difiere levemente de los valores dados por Smith et al. ( $B=15.85$ ,  $V=15.37$ , y  $R=14.97$ ).

Un acontecimiento importante se detectó el 19 de diciembre de 2001, cuando el nivel de flujo alcanzó un máximo de  $B = 14.90$ ,  $V = 14.34$ ,  $R = 13.79$  (en las Tablas 6.1 y 6.2, y en la Fig. 6.1 sólo se muestra los valores promedio de las magnitudes para esta noche). Debido al escaso muestreo temporal, no está bien localizado en el tiempo el máximo en brillo real, pero debe haber ocurrido alrededor de esta época (ver Fig. 6.1). Además de este estallido, PKS 0736+017 mostró un evento de microvariabilidad durante las 4.5 hr que duró el monitoreo (Fig. 6.2c). El objeto disminuyó su brillo a una tasa de 0.066 mag/hr. Lamentablemente, debido a problemas instrumentales se perdió el primer punto en R.

En la literatura, se encuentra que el brillo de este blazar suele variar entre las magni-

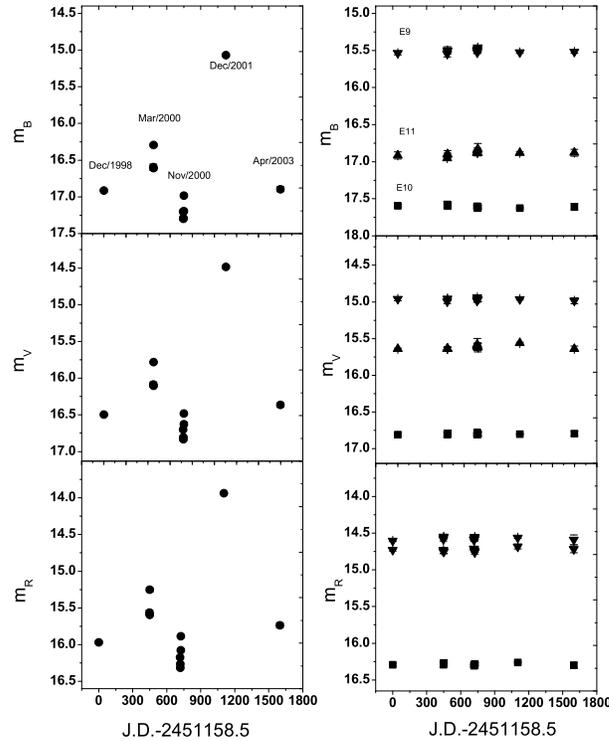


Figura 6.1: El panel izquierdo muestra las curvas de luz en las bandas B, en V y R para PKS 0736+017, como se lista en la Tabla 6.1. El panel derecho muestra las estrellas de referencia incluidas en el campo: triángulos invertidos para la estrella 9, cuadrados para la estrella 10 y triángulos para la estrella 11. En diciembre de 2001, los puntos son valores promedio.  $JD=241158.5$  corresponde al 11 de diciembre de 1998. Tomado de Ramírez et al. 2004

tudes 16 y 17 en V (por ejemplo, Garcia et al. 1999; Bondi et al. 1996; Wright et al. 1998; Katajainen et al. 2000). En el presente estudio, las observaciones muestran que el brillo se encontraba, generalmente, entre estos valores históricos. En diciembre de 2001 se detectó la magnitud más brillante (ver Tabla 6.1).

En general, las amplitudes de las variaciones son mucho más grandes que las incertidumbres, por lo que las técnicas estadísticas son innecesarias (las variaciones más pequeñas, entre noviembre 26 y 28 de 2000, son  $0.09 \pm 0.03$  mags en B,  $0.13 \pm 0.02$  mags en V y  $0.15 \pm 0.02$  en R).

Puede suponerse que esta actividad comenzó, por lo menos, a principios de 1998, ya que Katajainen et al. (2000) reportaron magnitudes en V en el rango de 16.84 a 16.25 entre 1995 y 1997. Más tarde, Ghosh et al. (2000) observaron una magnitud en R de 16.24 (dentro de los valores típicos) el 15 de diciembre de 1997 y el 25 de marzo de 1998, detectaron que el brillo había aumentado a 15.47 para, finalmente, disminuir a 15.94 en abril de 1998. El 11 de diciembre de 1998 se detectó que el brillo había bajado a  $V=16.50$  y  $R=15.97$ .

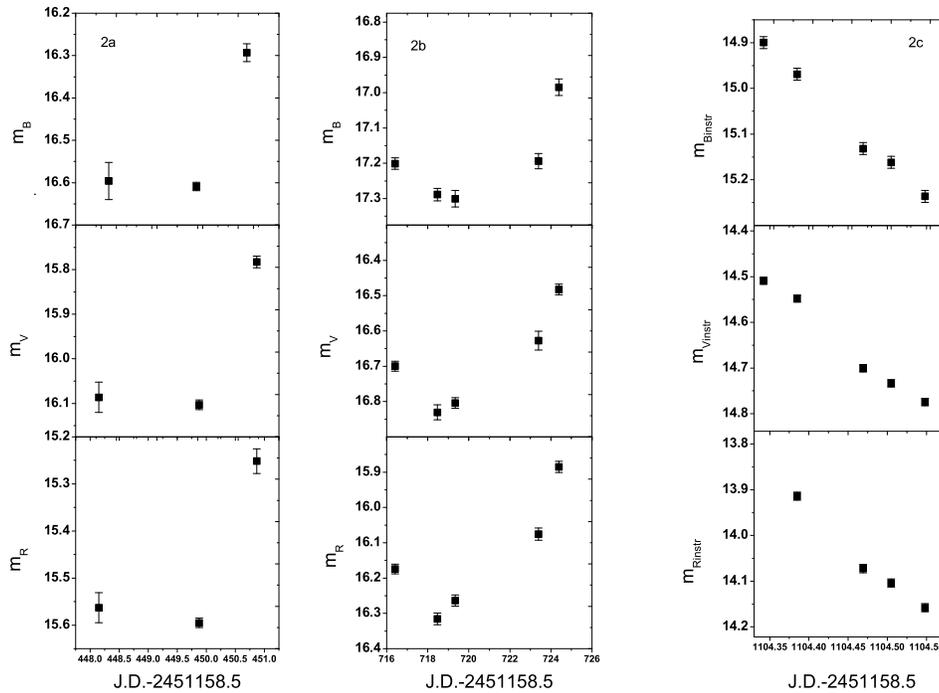


Figura 6.2: (a-c)). a) curvas de luz para la temporada de marzo de 2000 y b) para noviembre de 2000. Las magnitudes para diciembre de 2001 mostradas en c), son instrumentales. Tomado de Ramírez et al. 2004

El objeto fue monitoreado para estudiar su variabilidad de período largo en diciembre de 1998 y abril de 2003. Su brillo era semejante en ambas épocas ( $V \sim 16.4$ ), aunque el color observado fue diferente, más azul en diciembre de 1998 que en abril de 2003 (ver § 6.3.2 y Tabla 6.2).

### 6.3.2 Características de la variabilidad

El comportamiento más notable durante las observaciones fue que PKS 0736+017 se tornó más rojo cuando era más brillante (ver Figs. 6.3-6.5). En otras palabras, el espectro era más inclinado cuando el objeto era brillante y más plano cuando el flujo disminuía. Este comportamiento es contrario a los informes generales para esta clase de objetos (por ejemplo, Kedziora-Chudczer et al. 2001; Gear et al. 1985; Racine 1970; Gear et al. 1986; Massaro et al. 1998; Maesano et al. 1996; Papadakis et al. 2003) y a los modelos más comunes (por ejemplo, Li y Kusunose 2000; Chiang y Böttcher 2002; Wang y Kusunose 2002; Dermer 1998; Spada et al. 2001; Sikora et al. 2001; Qian et al. 1991; Wiita 1996; Dermer y Schlickeiser 2002; Nesci et al. 1998; Marscher et al. 1980; Trèvese y Vagnetti 2002), los cuales indican que los blazares se tornan más azules cuando aumenta su brillo. Este comportamiento raro fue notado también por Clements et al. (2003) a principios del 2002, apenas un mes después del estallido de diciembre de 2001. Estos autores

informaron  $V=14.322$  y  $R=13.717$  ( $V-R\sim 0.605$ ) en el máximo. Estos autores concluyeron que el fenómeno "parece estar más relacionado con la naturaleza de la variación que con la galaxia anfitriona o con el nivel del brillo".

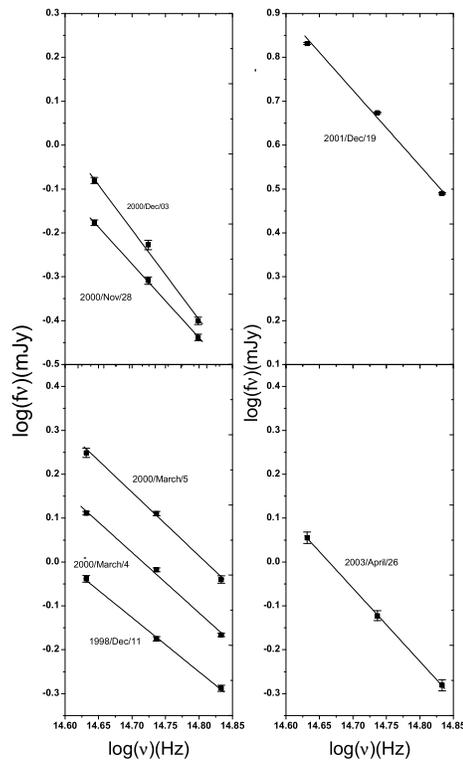


Figura 6.3: La forma del espectro en las bandas anchas del óptico de PKS 0736+017 puede ajustarse por una ley de potencias. Tomado de Ramírez et al. 2004.

En todas las temporadas de observación, los datos pueden describirse por una ley de potencias, es decir,  $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$  (nótese que a diferencia de como se trabajó en el capítulo 5, aquí  $\alpha > 0$ ), dónde  $\alpha$  es la pendiente espectral en el espacio  $\log(f_\nu)$  vs.  $\log(\nu)$  (ver Fig. 6.3), lo que permite cuantificar el enrojecimiento con bastante precisión. Mejores ajustes se pueden hacer al considerar más componentes espectrales en el modelo del espectro, tales como la contribución de la galaxia (por ejemplo, Wright et al. 1998) o un cuerpo negro (por ejemplo, Malkan y Moore 1986), pero con la resolución espectral de sólo tres puntos, sobre un espectro dominado por emisión no térmica (ver el espectro en NED para este objeto y las discusiones que se da para cada cuasar en el Capítulo 5), una componente extra no tiene sentido.

Los valores de la pendiente espectral y sus incertidumbres, para cada época, se presentan en las columnas 3 y 4 de la Tabla 6.2. En esta tabla, la fecha y la magnitud en el filtro R se listan en las columnas 1 y 2, respectivamente. Es evidente que comúnmente los puntos más brillantes tienen los espectros más inclinados. Esta tendencia se advierte claramente en noviembre de 2000, cuando se detectó una inclinación del espectro de  $\alpha =$

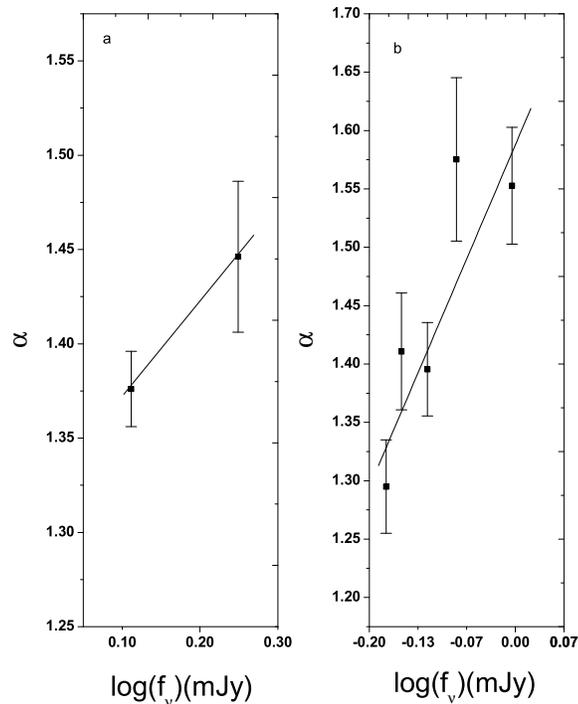


Figura 6.4: (a) los datos para marzo de 2000 presentan una tendencia en el sentido de que PKS 0736+017 es más rojo cuando es más brillante. (b) Esta tendencia fue confirmada con datos obtenidos en noviembre de 2000, que muestran una correlación clara entre el color y el brillo. Tomado de Ramírez et al. 2004.

1.30 a 1.55, mientras que el flujo aumentaba (Fig. 6.4b). Y aún más, el flujo y la pendiente se correlacionan muy bien, con un coeficiente de correlación de 89%. En marzo de 2000 se tiene dos estimaciones de  $\alpha$  (1.38 y 1.45), una de ellas con una incertidumbre grande. Sin embargo, la Fig. 6.4a muestra que la tendencia es todavía la misma, como en la Fig. 6.4b. En esta ocasión, el brillo aumentó mientras el espectro cambió levemente. Nótese que las incertidumbres para marzo del 2000 no se superponen.

Una tendencia similar a enrojecerse con aumentos del brillo fue observada en la variabilidad de período largo (ver Fig. 6.5), pero se encontró tan sólo una correlación marginal entre el índice espectral y el nivel de flujo. Algunos datos difieren del comportamiento general. En particular, en diciembre de 2001, mientras el flujo disminuía por 0.3 mag, la forma del espectro permaneció constante ( $\alpha=1.72$ ). Por otro lado, en abril de 2003 los datos muestran un nivel bajo de flujo y un valor alto de la pendiente espectral. No obstante, puede encontrarse una explicación en los datos de Clements et al. (2003). En el plano  $\alpha - \log(f)$ , estos datos se distribuyen en dos modos de variabilidad: uno con variaciones grandes del flujo y con cambios espectrales pequeños (la tendencia representada por la línea a guiones en la Fig. 6.5) y otro con el efecto inverso (la tendencia representada por la línea punteada en la Fig. 6.5). Entonces, los datos de diciembre de 2001 podrían ser entendidos si varían como el segundo modo, mientras que los datos de abril de 2003, se explican con el primero.

Tabla 6.2: Índice espectral vs. brillo

Fecha	$m_R$	$\alpha$	$\delta\alpha$
Dic/11/1998	15.97	1.24	0.05
Mar/03/2000	15.56	1.40	0.07
Mar/04/2000	15.60	1.38	0.02
Mar/05/2000	15.25	1.45	0.04
Nov/26/2000	16.17	1.40	0.04
Nov/28/2000	16.32	1.30	0.04
Nov/29/2000	16.26	1.41	0.05
Dic/03/2000	16.08	1.58	0.07
Dic/04/2000	15.89	1.55	0.05
Dic/19/2001	13.94	1.72	0.02
Abr/26/2003	15.74	1.67	0.02

*Comparación de la pendiente espectral relativo a la magnitud en la banda R.*

En diciembre de 2001, tanto el nivel de flujo como el comportamiento del espectro fueron similares a los reportados por Clements et al. (2003) para el estallido de enero de 2002. En la Fig. 6.5, se presenta el promedio del máximo reportado por Clements et al. para enero 23 (cálculo *a grosso modo* con las bandas R y V).

## 6.4 Discusión

El espectro del blazar PKS 0736+017 ha sido descrito bastante bien por una ley de potencias, aunque puede incluirse otras componentes. Un ejemplo de éstas pueden encontrarse en el trabajo de Malkan y Moore (1986), quienes observaron a este objeto en las bandas ultravioleta, óptica e infrarroja. En la región óptica/UV, estos autores indican que sus datos quedan bien ajustados con la mezcla de emisión de tipo ley de potencias con índice espectral 1.0, más emisión de cuerpo negro con temperatura de 26 000 K, si bien esta segunda componente sólo contribuye con un cuarto del brillo total. Adicionalmente, estos autores sugieren que PKS 0736+017 presenta la emisión combinada de cuasar "normal" (i.e., una mezcla de emisión de la ley de potencias con una pendiente espectral de 1.1, más la emisión térmica del disco de acreción) y emisión típica de blazares (i.e., representada por una ley de potencias con una pendiente de entre 1.1 y 2.0). En su ajuste, proponen que la componente con emisión típica de blazar debe tener una contribución mayor hacia longitudes de ondas más largas y cuando el continuo es muy brillante.

Por su parte, Brown et al. (1989a) propusieron que la emisión de cuasares OVV es una mezcla de una componente "inactiva", de una violentamente variable y de una con emisión térmica. La primera componente debe ser responsable de la emisión en longitudes de onda de centímetros, la segunda dominaría la región milimétrica a la ultravioleta y la tercera produciría la emisión que va del óptico al ultravioleta. De esta manera, la componente violentamente variable debería causar los estallidos y las ráfagas en estos objetos. Brown et al. (1989a, b) mencionan que, en estados de brillo alto, la forma espectral de cuasares OVV muestra propiedades semejantes a la emisión de objetos del tipo BL Lac.

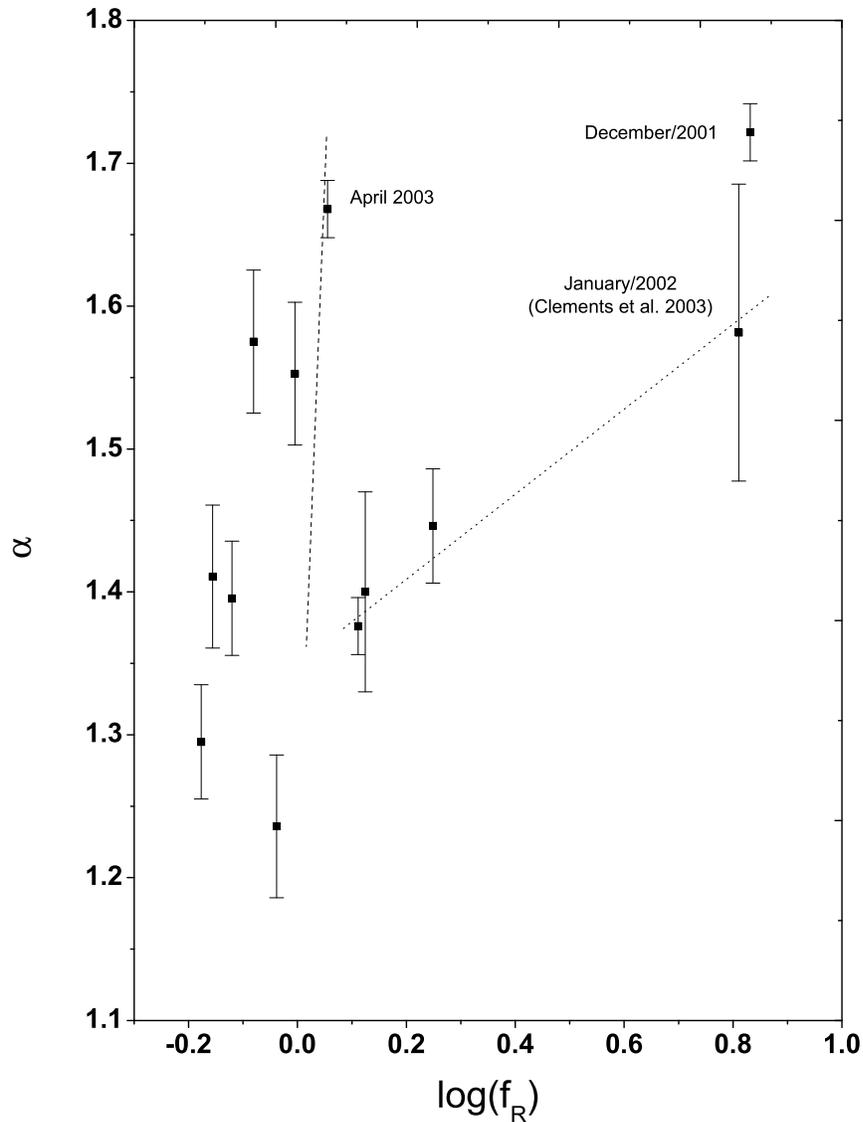


Figura 6.5: La relación entre el índice espectral y el brillo en  $R$ . Se han incluido nuestros datos y el promedio para el máximo de los datos de Clements et al. (2003) para enero de 2002. El análisis de los datos de Clements et al., extraídos de la versión en línea de su artículo, sugiere dos modos de variación. Estas tendencias son representadas, respectivamente, por las líneas a guiones y a puntos. Nuestros datos concuerdan con estas tendencias. En el nivel de flujo bajo, a los cambios pequeños de flujo corresponden cambios grandes en la pendiente espectral, mientras que cambios espectrales menos pronunciados corresponden al estado de brillo alto. En ambos casos, el objeto se enrojece cuando aumenta el brillo.

Estos modelos sencillos pueden dar una explicación cualitativa sólo para nuestros datos de bajo nivel de brillo. Lo anterior se advierte considerando que el espectro compuesto es más plano que la componente no térmica, pues la contribución térmica es más grande en

la parte azul. Entonces, cuando el objeto aumenta su brillo, la componente no térmica se vuelve aún más dominante, llevando a que el espectro compuesto se empine.

Sin embargo, a niveles altos de flujo la explicación ya no es satisfactoria porque los datos con la pendiente más grande, en diciembre de 2001, corresponden a una ráfaga (en este momento, la componente blazar debe ser dominante y deberían medirse los espectros más planos, como se ha reportado para diversos blazares). La mayoría de nuestros datos difiere del comportamiento predicho por los modelos de pérdida de energía por emisión sincrotrón (Brown et al. 1989a). Una variación térmica no puede explicar nuestros datos debido a que los cambios de esta componente conllevan cambios más grandes en la parte azul del espectro. Adicionalmente, se pueden apreciar dos modos de variabilidad en el plano  $\Delta\alpha - \log f_\nu$ .

Se ha detectado un comportamiento que no es explicado por los mecanismos usuales. Las evidencias de que las amplitudes de variación no son sistemáticamente mayores a altas frecuencias, en éste y otros blazares, aumentan (e.g. Ghosh et al. 2000; Brown et al. 1989b; Malkan y Moore 1986; Massaro et al. 1998; Clements et al. 2003, y este trabajo).

Brown et al. (1989b) observaron a PKS 0736+017 en longitudes de ondas infrarrojas sin encontrar correlación entre el nivel de flujo y el índice espectral; sin embargo, si no consideran el punto en el mínimo de brillo, encuentran una inclinación del espectro al aumentar de brillo, como también encontraron en el caso del blazar 3C 279. De manera adicional, no encontraron una correlación significativa entre el nivel de flujo y los valores del índice espectral para otros tres blazares (1308+326, 3C 345 y 3C 446). En sus conclusiones, Brown et al. indican que esta ausencia de correlación no es consistente con los que se espera observar por la emisión de una única componente de sincrotrón, por lo que otras componentes se deben incluir.

Con anterioridad, Miller (1981) encontró que el blazar 3C 446 se tornaba más rojos conforme aumentaba su brillo. Brown et al. (1986) reportaron que el espectro (NIR-óptico) de 3C 446 se inclinaba con aumentos de brillo durante sus temporadas de observación de julio de 1980 y septiembre de 1983. Estos autores explicaron sus observaciones argumentando que el máximo del brillo real podría haber ocurrido antes de sus observaciones y que la inclinación del espectro se presenta rápidamente. Esta explicación no puede ser aplicada a nuestros datos porque observamos PKS 0736+017 cuando el brillo iba en aumento (noviembre 2000).

Ghosh et al. (2000), en observaciones ópticas del BL Lac PKS 0735+178, encontraron un enrojecimiento de la fuente acompañada de aumentos de brillo. Adicionalmente, observaron que el índice espectral del blazar PKS 0235+164 permanecía casi constante cuando su brillo aumentó. Concluyen que estas características no pueden ser descritas en un marco de referencia donde la pérdida de energía sea puramente de origen sincrotrón (uno de los modelos más utilizados para explicar las ráfagas).

## 6.5 Conclusiones

El cuasar PKS 0736+017, clasificado como un OVV, fue observado entre diciembre de 1998 y abril de 2003. Diversos eventos de variabilidad fueron detectados en diferentes escalas temporales y con diferentes amplitudes. Algunas ráfagas fueron detectadas en marzo de 2000 y noviembre-diciembre de 2000, con cambios en el flujo de  $\sim 0.32$  y  $\sim 0.4$  mag, respectivamente.

Las características más sobresalientes que detectamos son:

\* Un estallido fue detectado el 19 de diciembre de 2001. En esta fecha, el nivel de brillo alcanzó un máximo de 14.90 en la banda B, 14.34 en la banda V y 13.79 en la banda R. Una disminución del brillo de  $\sim 0.3$  mags ocurrió en 4.5 hrs, mientras el índice espectral permanecía constante.

\* A lo largo de nuestras observaciones, se detectó una peculiar tendencia del objeto a enrojecerse con aumentos en el brillo. Más aún, una buena correlación entre el nivel de flujo y el índice espectral fue detectada en noviembre de 2000, mientras que se encontró una tendencia clara en marzo de 2000. Los datos de Clements et al. (2003) sugieren fuertemente la existencia de dos modos de variación. Nuestros datos concuerdan con esta suposición.

Clements et al. (2003) detectaron la misma tendencia entre el brillo y el índice espectral para PKS 0736+017, pero otras investigaciones no han hallado nada (por ejemplo, Brown et al. 1989b; Malkan y Moore 1986). No cabe duda de que se requiere más observaciones de blazares que presenten estos enrojecimientos al aumentar de brillo. Se requiere observaciones multi-frecuencia, con buena resolución en tiempo, de objetos tales como 3C 446, PKS 0735+178 y PKS 0736+017, que puedan darnos información importante en torno a las condiciones físicas de estas fuentes. Se necesitan mejores modelos que puedan justificar estos resultados observacionales.







## Capítulo 7

# Conclusiones y discusión final.

La herramienta más útil para probar y restringir los modelos de producción de energía en cuasares es la **variabilidad**. Sólo a través de este fenómeno es posible estudiar la región más interna de estas fuentes, contenida en el primer parsec. Esto es factible, pues las características observables de los eventos de variabilidad deben estar *íntimamente* relacionadas con las condiciones físicas de las componentes variables.

En particular, la dualidad en radio observada en los cuasares ha sido motivo de diversas investigaciones, entre las que destacan los estudios de la microvariabilidad (variaciones con amplitudes características de centésimas a décimas de magnitud y escalas de tiempo de minutos a horas). La importancia radica en establecer si esta dicotomía es producto de un sesgo observacional, o de condiciones reales en las fuentes. Así, el interés del presente trabajo se centró en distinguir la causa de la microvariabilidad como primer paso hacia una descripción más profunda de los modelos de emisión.

La propuesta es que la microvariabilidad es intrínseca a la fuente, generada ya sea por los procesos del jet de partículas relativistas (procesos de origen no térmico), o por perturbaciones en el disco de acreción (procesos de origen térmico). De poder distinguir dónde se generan estas variaciones, los modelos de producción de energía podrían ser mejorados; además, esto permitiría dar pie a establecer si la división en cuasares radio emisores (RLQ) y cuasares radiocallados (RQQ) es real o producto de sesgos observacionales.

Así, el objetivo principal de la presente investigación consistió en desarrollar el mecanismo para hacer tal discernimiento. Para llevar a cabo este estudio se observó dos muestras de cuasares: una consiste de 23 cuasares radio callados y otra de 23 cuasares radio emisores. Las muestras están formadas de manera que por cada RLQ existe un RQQ similar en brillo y corrimiento al rojo. Con ello, se logró reducir el riesgo de posibles sesgos debidos a evolución y brillo. Las observaciones fueron realizadas en cuatro telescopios distribuidos en México y España. Los filtros ópticos BVR fueron utilizados para realizar estas observaciones. La estrategia consistió en observar a los miembros de una misma pareja en la misma noche y en secuencias traslapadas, mientras los objetos cruzaban el meridiano. Esta estrategia ayuda a reducir los sesgos que pudieran ocurrir debido a condiciones climáticas e instrumentales.

Los resultados presentados en el Capítulo 4 muestran que, la microvariabilidad óptica en cuasares no depende de las propiedades en radio de estos objetos. Así, en cuanto a microvariabilidad se refiere, se estaría tratando con el mismo tipo de fuentes.

Por otro lado, la diferencia de las variaciones entre las diferentes bandas del óptico, muestra la existencia de una intensa actividad espectral. Así, al presentarse un evento de microvariabilidad, se comparó el cambio en el nivel de brillo entre diferentes bandas, tomando la diferencia en flujos entre un instante definido como inicial y otro cualquiera. Esta diferencia fue normalizada respecto al flujo del momento inicial, con las consecuentes ventajas descritas en el texto y en los apéndices.

A partir de estos cocientes se desarrolló un modelo de emisión simple, que fue ajustado a los flujos absolutos calculados de cada objeto. En este modelo se supuso a la emisión de un cuasar como la mezcla de emisión térmica, debida a un disco de acreción y modelado como la emisión de un cuerpo negro, y emisión no térmica debida al jet relativista. Si bien la aproximación de cuerpo negro puede ser burda, es muy útil para describir el comportamiento del espectro durante eventos de variabilidad. A partir de estos modelos, se encontró que la microvariabilidad puede tener su origen tanto en procesos de origen térmico (i.e., generados en el disco de acreción) como de origen no térmico (i.e., generados en el jet). Más aún, en algunos cuasares radio emisores se puede presentar la ocurrencia de variaciones de origen térmico (ver el caso del objeto 3C 281) mientras que en algunos cuasares radio callados se puede presentar variaciones de origen no térmico (ver el caso del cuasar CSO 21).

Así, se cumplió con el cometido de la investigación, pues contamos con la posibilidad de distinguir la naturaleza, térmica o no térmica, que da origen a algunos eventos de microvariabilidad. Es importante notar que la contribución relativa de cada componente al flujo total puede incidir en la confusión de una variación térmica como si fuera de origen no térmica. Existen también algunos casos en los que no es posible dar una explicación por ninguna de estas componentes (ver el caso de MC3 1750+175), pero cuyas características recuerdan mucho a las de una variación térmica.

Los valores de la temperatura del disco de acreción y el índice de la ley de potencias (propuestos en la literatura) son razonables para poder explicar la forma del espectro y su variabilidad.

La imposibilidad de dar una explicación a todos los eventos de microvariabilidad detectados, puede ser una limitante derivada de haber utilizado sólo tres bandas. Observaciones con al menos cuatro bandas y con una densidad temporal mayor podrían resultar en una mejor descripción del espectro de un cuasar y la variabilidad de éste. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que otros mecanismos contribuyan a la emisión total, los cuales puedan incidir en las variaciones espectrales. Tales componentes pueden incluir al polvo circumnuclear y la galaxia huésped.

Si bien los resultados de la presente investigación representan un avance importante en el estudio de cuasares, aún es difícil dar una explicación integral de los mecanismos de emisión en los NAG. Por ejemplo, existen reportes de variaciones anómalas de fuentes como PKS 0736+017. Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se observó este cuasar, el cual presentaba una curiosa tendencia a tornarse más rojo cuando su brillo aumentaba

y a tornarse más azul cuando el brillo disminuía. Las observaciones de otros objetos, así como los modelos, señalan que debería ocurrir el fenómeno contrario. Por este motivo se procedió a reportar este hallazgo de manera inmediata (Ramírez et al. 2004).

En resumen:

\* Se ha encontrado evidencia a favor de una *unificación* de microvariabilidad de cuasares. Los resultados presentados en los Capítulos 4 y 5 indican la microvariabilidad en RQQ y RLQ debe generarse en condiciones similares.

\* En este sentido, cualquier modelo que se proponga para explicar la emisión de energía en estos objetos debe contar con la presencia de un disco de acreción en torno a un hoyo negro más la eyección de material en forma de jet. Debe considerarse, entonces, la posibilidad de perturbaciones del disco de acreción propagándose al jet, ya sea por la inyección de nuevo material o por la intensificación de variaciones en la emisión del disco por las partículas del jet (vía Compton inverso). En tal sentido, la potencia del jet sí podría significar una diferencia (así lo muestra la diferencia en el nivel de actividad, para microvariabilidad, entre los blazares y los cuasares).

\* El desarrollo de modelos más reales, con discos de acreción descritos mediante un cuerpo negro modificado, así como mayor número de componentes espectrales (tales como polvo, galaxia huésped, etc.) darán más información sobre las condiciones físicas que imperan en estos objetos. Deberían realizarse, además, mejores observaciones que incluyan más filtros y mejor resolución temporal. Entonces, quizás, se podrá dar explicación a variaciones *anómalas* como las de PKS 0736+017 y MC3 1750+175.

\* Para establecer los modelos de emisión en cuasares, no basta con ajustar un espectro a los datos, además se debe verificar que el ajuste es correcto al estudiar la evolución temporal de la forma de éste. La contribución relativa de cada componente es importante para semejante estudio.

El método presentado en el Capítulo 5 sólo puede distinguir, por ahora, una variación térmica de una no térmica; sin embargo ha quedado expuesta la factibilidad del método para estimar algunas características fundamentales de los modelos de emisión (como la temperatura del disco y el índice de la emisión no térmica del jet). Para un trabajo futuro, es deseable realizar observaciones desde el telescopio de 2 m del OAN, utilizando para ello al menos cuatro bandas ópticas. En tal estudio, y dado que la semejanza entre RQQ y RLQ ha quedado establecida, no sería necesario hacer un estudio comparativo, permitiendo aumentar la resolución temporal de las observaciones. Con ello, la descripción de la evolución de un evento de microvariabilidad podrá ser seguida a detalle, ayudando a mejorar los modelos de emisión.







## Apéndice A

# El índice de variabilidad espectral

El uso de la expresión

$$\varpi_\nu \equiv \frac{f_{\nu t} - f_{\nu t_0}}{f_{\nu t_0}}, \quad (\text{A.1})$$

como base para determinar el cambio en la forma del espectro trae consigo ventajas importantes.

Por un lado,  $\varpi_\nu$  puede escribirse para el caso de una variación de origen no térmica, como

$$\varpi_{\nu t} = a_\nu - a_{0\nu},$$

mientras que para el caso de una componente térmica sería

$$\varpi_{\nu t} = b_\nu - b_{0\nu},$$

donde

$$a_{0\nu} \equiv \frac{f_{\nu n t_0}}{f_{\nu t_0}}, \quad (\text{A.2})$$

$$b_{0\nu} \equiv \frac{f_{\nu T t_0}}{f_{\nu t_0}} \quad (\text{A.3})$$

y

$$a_\nu \equiv \frac{f_{\nu n t}}{f_{\nu t_0}} \quad (\text{A.4})$$

y

$$b_\nu \equiv \frac{f_{\nu T t}}{f_{\nu t_0}}, \quad (\text{A.5})$$

donde el subíndice  $n$  se refiera a la componente no térmica y  $T$ , a la componente térmica.

A continuación se mostrará algunas de las ventajas que se obtiene

## A.1 Independencia del sistema fotométrico

La relación entre la magnitud en el sistema estándar,  $m$ , y la magnitud instrumental,  $m_i$ , una vez realizada la corrección por extinción atmosférica, es

$$m_\nu = a_\nu + m_{i\nu}. \quad (\text{A.6})$$

En flujos, esto implica que

$$f = f_o 10^{-0.4a} 10^{-0.4m_i},$$

(en el sistema instrumental se tiene que  $f = f_o 10^{-0.4m_i}$ ).

Así que el cociente de la diferencia en flujos entre dos instantes diferentes,  $t$  y  $t_0$ , y el flujo total inicial,  $f_{t_0} = f_o 10^{-0.4a} 10^{-0.4m_{i_0}}$ , quedaría determinado por

$$\frac{(f_t - f_{t_0})_{estdr}}{f_{t_0estdr}} = \frac{10^{-0.4a} (f_t - f_{t_0})_{instrumental}}{10^{-0.4a} f_{t_0instrumental}}, \quad (\text{A.7})$$

es decir

$$\varpi_{estdr} = \varpi_{instrumental}.$$

La importancia de este resultado radica en que se puede calcular el valor de  $\varpi_\nu$  en el sistema instrumental, lo que evita la propagación de errores e implica una mayor precisión del método.

## A.2 Independencia de la extinción interestelar

Para calcular el efecto de la extinción interestelar, en la ecuación A.6 debe agregarse el coeficiente  $A_z$ , que representa el efecto del enrojecimiento, es decir

$$m = a + m_i + A_z. \quad (\text{A.8})$$

Entonces, la ecuación A.7 quedaría expresada como

$$\frac{(f_t - f_{t_0})_{estndar}}{f_{t_0}} = \frac{10^{-0.4a} 10^{-0.4A_z} (f_t - f_{t_0})_{instrumental}}{10^{-0.4a} 10^{-0.4A_z} f_{t_0instrumental}}, \quad (\text{A.9})$$

por lo que  $\varpi_\nu$  es independiente de la corrección por extinción interestelar.

De igual manera se encontraría que, para cualquier corrección que deba efectuarse al obtener la magnitud, su efecto sobre  $\varpi_\nu$  será anulado.

## A.3 Independencia respecto de $H_o$ y $q_o$

Al modelar el flujo proveniente de un cuasar debe considerarse que el flujo recibido por un observador no es igual al flujo emitido por la fuente (en su sistema en reposo). Para

modelar el flujo de una fuente dada, la emisión de cada componente espectral debe ser corregida por consideraciones cosmológicas, por lo que el flujo medido por el observador está determinado por

$$f_{\nu_O} = \frac{(1+z)L(\nu_O[1+z])}{4\pi D_L^2}, \quad (\text{A.10})$$

donde  $f_{\nu_O}$  es el flujo observado,  $\nu_O$  es la frecuencia medida por el observador,  $z$  es el corrimiento al rojo,  $D_L$  es la distancia lumínica y  $L$  representa la emisión de la fuente (Kembhavi y Narlikar 1999). La distancia lumínica está determinada por

$$D_L = \frac{1}{H_o} \left[ z + \frac{1}{2}(1+q_o)z^2 + \dots \right],$$

(Padmanabhan 1993), donde  $q_o$  es el parámetro de desaceleración.

Si el flujo total varía debido a la componente  $i$  ( $i = n, T$ ), a diferentes instantes el cociente entre el flujo de la componente  $i$  al tiempo  $t$ ,  $f_{\nu_{it}}$ , y el flujo inicial de la misma componente,  $f_{\nu_{it_0}}$ , puede escribirse como

$$\frac{f_{\nu_{it}}}{f_{\nu_{it_0}}} = \frac{L_{\nu_{oit}}(\nu_O[1+z])}{L_{\nu_{oit_0}}(\nu_O[1+z])}.$$

En esta expresión puede verse que la tarea de suponer un valor para  $H_o$  y  $q_o$  es irrelevante, dado que al tomar el cociente de flujos no se requiere conocer la distancia lumínica. Por el contrario, resulta importante determinar el modelo de emisión, es decir,  $L_\nu$  y la contribución de cada componente al flujo total ( $a_{0\nu}$  y  $b_{0\nu}$ ; esto último puede verse líneas abajo).

Por otro lado, de esta última expresión, tomando los datos correspondientes al inicio del monitoreo en la banda V y resolviendo para  $f_{\nu_{it}}$ , se obtiene un resultado interesante, expresado en la siguiente ecuación

$$f_{\nu_{it}} = \frac{L_{it}(\nu_O[1+z])}{L_{it_0}(\nu_{V_0}[1+z])} c_{0V_0} f_{oV_0} 10^{-0.4m_{V_0}t_0}, \quad (\text{A.11})$$

donde  $c_{0V_0} = a_{0V_0}, b_{0V_0}$ , según sea el caso. Lo interesante de este resultado es que para modelar el flujo que se observa basta proponer un tipo de emisión,  $L_\nu$ , la proporción con que cada componente contribuye al flujo total en la banda V,  $c_{0V_0}$ , así como el valor observado de  $m_{V_0}$ . Para hacer una estimación del flujo observado al tiempo  $t$ , tampoco es necesario hacer una suposición de  $H_o$  y  $q_o$ , sino una estimación de  $c_{V_0}$ . Esto se ve con más detalle en el apéndice B.



## Apéndice B

# $\varpi_\nu$ en función de los parámetros del modelo

Calcular la expresión analítica de  $\varpi_\nu$  implica suponer la forma que tendrá el continuo de emisión. En el trabajo presente, se supondrá a este continuo como resultado de la mezcla de emisión no térmica y emisión térmica. La componente no térmica puede ser representada como una ley de potencias de la forma

$$L_{\nu n} = A\nu^\alpha, \quad (\text{B.1})$$

donde  $A$  es la amplitud de la emisión. Sin embargo, la frecuencia que realmente debe considerarse en la emisión es  $\nu_O = (1+z)\nu$  (ver expresión A.10), donde  $\nu_O$  se refiere a la frecuencia en que se observa y  $\nu$  a la frecuencia en que emite la fuente. Por este motivo, la expresión B.1 se debe escribir como

$$L_n(\nu_O[1+z]) = A\nu_O^\alpha(1+z)^\alpha. \quad (\text{B.2})$$

Por otro lado, la emisión térmica se representará como

$$L_T(\nu_O[1+z]) = \beta B_{\nu_O(1+z)}(T),$$

donde  $\beta$  es la amplitud de la emisión y  $B_\nu(T)$  representa a la ecuación de Planck. Así que el brillo total observado al tiempo  $t$  estará dado por

$$L_t(\nu_O[1+z]) = A\nu_O^\alpha(1+z)^\alpha + \beta B_{\nu_O(1+z)}(T). \quad (\text{B.3})$$

Por comodidad, de ahora en adelante se supondrá que la frecuencia se refiere al sistema del observador, eliminando el subíndice  $O$  de la notación, de manera que la ecuación B.3 se reescribe como

$$L_t(\nu[1+z]) = A\nu^\alpha(1+z)^\alpha + \beta B_{\nu(1+z)}(T)$$

Tomando el cociente del flujo de cada componente respecto al flujo de la misma pero al tiempo inicial se tiene, para el caso de la componente no térmica,

$$\frac{f_{\nu n}}{f_{\nu n t_0}} = \frac{A_t}{A_{t_0}} \nu^{\alpha-\alpha_{t_0}} (1+z)^{\alpha-\alpha_{t_0}}.$$

Resolviendo esta ecuación para  $f_{\nu nt}$  y considerando la expresión A.11, se tiene que

$$f_{\nu nt} = \frac{A_t}{A_{t_0}} \nu^{\alpha - \alpha_{t_0}} (1+z)^{\alpha - \alpha_{t_0}} a_{0\nu} f_{oV} 10^{-0.4m_V t_0}. \quad (\text{B.4})$$

De manera similar, para la componente térmica se obtiene

$$f_{\nu Tt} = \frac{\beta_t}{\beta_{t_0}} b_{0V} f_{oV} 10^{-0.4m_V t_0} \nu_V^{-3} \nu^{-3} \frac{\exp((h\nu_V/\kappa T_0)(1+z)) - 1}{\exp((h\nu/\kappa T)(1+z)) - 1}. \quad (\text{B.5})$$

Así, al sumar las expresiones B.4 y B.5 se tiene una manera de modelar la emisión observada a partir de los datos y suposiciones sobre la emisión en la banda V ( $a_{0V}$ ,  $b_{0V}$ ,  $A_{t_0}$  y  $\beta_{t_0}$ )

Un cambio de alguna de las componentes debe derivarse, entonces, de un cambio físico que hace variar su parámetro fundamental (es decir, el índice espectral de la ley de potencias o la temperatura del cuerpo negro) o bien de un cambio en la amplitud del brillo. Un ejemplo del último caso sería el aumento en las dimensiones de la región de emisión térmica, a temperatura constante  $T$ , o un aumento en el número de emisores de la misma energía que la componente no térmica (es decir, con una ley de potencias también constante). Así, es cómodo renombrar al cociente de estas amplitudes como  $n_i$  ( $i = n, T$ ). El valor inicial de  $n_i$  sería la unidad a partir de la cual aumenta o disminuye el parámetro  $A$  o  $\beta$ , según sea el caso. Un valor de  $n_i$  igual a 2 implica que el nivel de emisión se ha duplicado.

## B.1 Microvariabilidad debida a un proceso no térmico

Para una variación de origen no térmico, de la ecuación B.4 en la definición de  $\varpi_{n\nu}$  se obtiene que

$$\varpi_\nu = a_{0\nu} (n_n (\nu + z\nu)^{\alpha - \alpha_0} - 1). \quad (\text{B.6})$$

Cuando una variación es producida por cambios en el índice espectral o en las dimensiones de la región emisora, las curvas generadas son muy parecidas, indistinguibles cuando se considera las incertidumbres de los datos. Si el cambio en el flujo se produce debido tanto a cambios en  $\alpha$  como en  $n_n$  (de manera que el cambio en  $\alpha$  provoca aumentos o disminuciones en el brillo y  $n_n$  ocasiona variaciones en el sentido opuesto), las curvas que se obtienen presentan un vaivén, debido a que el cambio lo domina primero uno de los parámetros y después, el otro (ver Fig. 5.3, en el Capítulo 5).

## B.2 Microvariabilidad debida a un proceso térmico

Para el caso de una variación de origen térmico, de la ecuación B.5 y la definición del índice  $\varpi_\nu$  se obtiene la expresión

$$\varpi_{T\nu} = b_{0\nu} (n_T (\frac{\nu}{\nu_V})^3 \frac{\exp((h\nu_V/\kappa T_0)(1+z)) - 1}{\exp((h\nu/\kappa T)(1+z)) - 1} - 1). \quad (\text{B.7})$$

Al comparar la curva generada a partir de la expresión B.7 con la de un cambio en la componente no térmica (ec. B.6), puede hallarse el caso en que una variación no térmica pueda ser indistinguible de una variación térmica. Esto se pone de manifiesto al revisar el caso en que sólo cambia la amplitud de las componentes, donde ocurre que

$$\varpi_{T\nu} = b_{0\nu} \left( n_T \left( \frac{\nu}{\nu_V} \right)^3 E - 1 \right)$$

donde  $E = \frac{e^{(h\nu_V/\kappa T_0)(1+z)} - 1}{e^{(h\nu/\kappa T_0)(1+z)} - 1}$ , y

$$\varpi_{n\nu} = a_{0\nu} (n_n - 1).$$

Por otro lado, difícilmente puede verse una microvariación en la que se registre un aumento de brillo en una banda acompañada por la disminución de brillo en otra. En los planos  $\varpi_V$  vs.  $\varpi_B$  y  $\varpi_R$  vs.  $\varpi_B$ , esto se puede entender como la imposibilidad de tener curvas a lo largo de la parte superior izquierda a la parte inferior derecha (ver figuras 5.3). Sin embargo, puede presentarse una degeneración en este sentido al tener una variación con un *vaién* debido a cambios simultáneos del parámetro fundamental ( $T$  o  $\alpha$ ) y la amplitud, lo que puede simular un comportamiento anómalo. Otra posibilidad de observar un comportamiento anómalo se debe a una variación tan rápida (respecto al tiempo de captura de las imágenes) que las observaciones no sean simultáneas.

Las curvas que se generan a partir de las expresiones B.6 y B.7 dependen de la contribución inicial de cada componente al flujo total, así como de  $z$  y  $T_0$ . En estas ecuaciones puede verse que un cambio de temperatura o en el índice espectral, así como cambios en  $n_n$  y  $n_T$ , pueden introducir variaciones en  $\varpi_\nu$ .

### B.3 Contribuciones en las bandas B y R relativas a la contribución en V

Para modelar el espectro continuo con base en las componentes térmica y no térmica, sólo se requiere estimar la proporción con que cada una de ellas contribuye al flujo total en una banda. Para saber cual sería la contribución en las demás bandas, se puede hacer lo siguiente: considérese que la emisión de cada componente está determinada por

$$L(\nu([1+z])) = C f_\nu,$$

donde  $f_\nu$  es una ley de potencias o la planckiana y  $C$  es la amplitud. Entonces, de la ecuación A.10, se tiene que

$$C = f_{\nu_i} 4\pi D_L^2 (1+z) \frac{1}{f_\nu}.$$

Pero el flujo de cada componente está dado por  $f_\nu = c f_{0\nu} 10^{-0.04m_\nu}$ , donde  $c$  es igual a  $a_\nu$  en el caso de la componente no térmica y a  $b_\nu$  para la componente térmica. Entonces, el valor de  $C$  puede establecerse tomando los datos del tiempo inicial,  $t = t_0$  en la banda V, es decir

$$C_0 = c_{0V} f_{0V} 10^{-0.4m_{0V}} 4\pi D_L^2 (1+z) \frac{1}{f_{0V}}. \quad (\text{B.8})$$

Sin embargo, el valor de  $C_o$  puede encontrarse de igual manera con los datos de las otras dos bandas, es decir

$$C_o = c_{0\nu} f_{o\nu} 10^{-0.4m_{0\nu}} 4\pi D_L^2 (1+z) \frac{1}{f_{0\nu}}, \quad (\text{B.9})$$

donde ahora  $\nu = \nu_B, \nu_R$ . Entonces, igualando las ecuaciones B.8 y B.9 se tiene

$$c_{0\nu} f_{o\nu} 10^{-0.4m_{0\nu}} \frac{1}{f_{0\nu}} = c_{0\nu_V} f_{o\nu_V} 10^{-0.4m_{0\nu_V}} \frac{1}{f_{0\nu_V}},$$

por lo que al resolver para  $c_{o\nu}$ , se obtiene

$$c_{0\nu} = c_{0\nu_V} \frac{f_{0\nu_V}}{f_{0\nu}} 10^{-0.4(m_{0\nu_V} - m_{0\nu})} \frac{f_{0\nu}}{f_{0\nu_V}}. \quad (\text{B.10})$$

Así, para una variación térmica se tiene

$$b_{0\nu} = b_{0\nu_V} \frac{f_{0\nu_V}}{f_{0\nu}} 10^{-0.4(m_{0\nu_V} - m_{0\nu})} \frac{f_{0\nu}}{f_{0\nu_V}}, \quad (\text{B.11})$$

mientras que para una variación no térmica se tiene que

$$a_{0\nu} = a_{0\nu_V} \frac{f_{0\nu_V}}{f_{0\nu}} 10^{-0.4(m_{0\nu_V} - m_{0\nu})} \frac{f_{0\nu}}{f_{0\nu_V}}. \quad (\text{B.12})$$

Con lo cual se tiene que la contribución de cada componente al flujo total en las bandas B y R depende del color de la fuente, del porcentaje inicial asignado en la banda V y del modelo de emisión que se proponga (el cual incluye los valores iniciales de cada modelo).

## Apéndice C

# Criterio de simultaneidad

El tiempo de retardo debe ser tomado en cuenta cuando se quiere estudiar la variabilidad espectral, pues debe asegurarse que las observaciones en las diferentes bandas hayan sido adquiridas cuando el objeto se encontraba en el mismo nivel de brillo.

Por ello, es útil establecer un criterio basado en la tasa de variación, que permita considerar como simultáneas a las observaciones realizadas a un mismo nivel de brillo observado dentro del error. A continuación se desarrolla lo que se tomará como criterio de *simultaneidad*.

Una vez detectada una variación se considera la tasa de cambio extraída de las observaciones. Entonces, se toma la amplitud de la variación como la diferencia de magnitudes,  $\Delta m$ , entre los datos del inicio y el final del monitoreo; igualmente, el lapso de tiempo,  $\Delta t$ , se considera igual al lapso en que se observó  $\Delta m$ . Con ello se obtiene la tasa de cambio en la magnitud del objeto. Por otro lado, el error interno de cada grupo de cinco observaciones, es decir, el error estándar de esos cinco datos,  $e$ , puede tomarse como el error de las mediciones. Se toma, además, el tiempo de captura,  $\Delta t_{cap}$ , como el correspondiente al lapso de tiempo entre la adquisición de las imágenes en el filtro B y las observaciones en el filtro R. Entonces, se considerará que una secuencia de observaciones fueron realizadas *simultáneamente* cuando se tenga que

$$\frac{\frac{\Delta m}{\Delta t} \Delta t_{cap}}{e_\nu} < 2.5,$$

por lo que el índice de simultaneidad,  $S_\nu$ , queda definido como

$$S_\nu = \frac{\frac{\Delta m}{\Delta t} \Delta t_{cap}}{2.5e_\nu} < 1. \quad (\text{C.1})$$

El factor 2.5 se toma para evitar el riesgo de alcanzar una variación marginal (2.5 veces la desviación estándar). Así, se considera que se ha detectado una variación espectral real cuando  $S_\nu$  sea menor a 1.







# Bibliografía

- Abramowicz, M. A., Bao, G., Lanza, A., y Zhang, X. H., 1991, *A&A*, **245**, 454
- Alexander, T., 1995, *MNRAS*, **274**, 909
- Angel, J. R. P., y Stockman, H. S. 1980, *ARA&A*, **18**, 321
- Angione, R. J. y Smith, H. J., 1972, *IAUS*, **44**, 171
- Antonucci, R., 1984, *ApJ*, **278**, 449
- Antonucci, R., 1993, *ARA&A*, **31**, 473
- Antonucci, R.; Barvainis, R. y Alloin, D., 1990, *ApJ*, **353**, 416
- Antonucci, R. R. J. y Ulvestad, J. S. 1985, *ApJ*, **294**, 158
- Antonucci, R. Y Miller, J. S., 1985, *ApJ*, **297**, 621
- Argote, M. 1997, *Efectos de microlentes gravitacionales en cuasares*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias.
- Bahcall, J. N., 1980, *ApJ*, **240**, 377
- Bahcall, J. N.; Kirhakos, S.; Saxe, D. H. y Schneider, D. P., 1997, *ApJ*, **479**, 642
- Bailey, J.; Sparks, W. B.; Hough, J. H. y Axon, D. J., 1986, *Nature*, **322**, 150
- Baldwin, J. A., 1997, *ASPC*, **113**, 80
- Barbieri, C.; Cappellaro, E.; Romano, G.; Turatto, M. y Szuszkiewicz, E., 1988, *A&ASS*, **76**, 477
- Barbieri, C.; Romano, G. y Zambon, M., 1979, *A&AS*, **37**, 551
- Barth, A. J.; Ho, L. C. y Filippenko, A., 1995, *AJ*, **110**, 3
- Barthel, P. D., 1992, Physics of Active Galactic Nuclei, conferencia, 637
- Barvainis, R.; Lehar, J.; Birkinshaw, M.; Falcke, H. y Blundell, K., 2005, *ApJ*, **618**, 108
- Becker, R. H.; White, R. L.; Gregg, M. D. et al. 2001, *ApJS*, **135**, 227
- Begelman, M. C., 1993, *LNP*, **421**, 145
- Begelman, M. C.; Rees, M. J. y Sikora, M., 1994, *ApJ*, **429**, L57
- Benítez, E., Variabilidad de Núcleos Activos de Galaxias. 1997. Tesis Doctoral. Instituto de Astronomía, UNAM
- Benítez, E. y Ramírez, A., 2006, *ASPC*, **350**, 71
- Bian, W.-H.; Huang, K.-L. y Zhou, H.-N., 2001, *CAA*, **25**, 41
- Bian, W. y Zhao, Y., 2003, *IAUS*, **214**, 287
- Blaes, O. y Socrates, A., 2001, *ApJ*, **553**, 987
- Blandford, R. D. y Königl, A., 1979, *ApJ*, **232**, 34
- Blandford, R. D. y Payne, D. G., 1982, *MNRAS*, **199**, 883
- Blandford, R. D. y Rees, M. J., 1978, *blo.conf*, **328**
- Blandford, R. D. y Znajek, R. L., 1977, *MNRAS*, **179**, 433
- Blandford, R. D. y Rees, M. J., 1992, en Testing the AGN Paradigm, eds. S. S: Holt et al. AIP, **Vol. 254**, p. 3.
- Blundell, K. M.; Beasley, A. J. y Bicknell, G. V., 2003, *ApJ*, **591**, L103
- Blundell, K. M. y Beasley, A. J., 1998, *AAS*, **193**, 110.04
- Blundell, K. M. y Rawlings, S.; 2001, *ApJ*, **262L**, 5
- Boettcher, M y Dermer, C. D., 2002, *ApJ*, **564**, 86
- Boller, Th.; Brandt, W. N.; Fabian, A. C. y Fink, H. A., 1997, *MNRAS*, **289**, 393
- Bondi, M.; Padrielli, L.; Fanti, R.; Ficarra, A.; Gregorini, L.; Mantovani, F.; Bartel, N; Rommey, J.D.; Nicolson, G.D. y Weiler, K.W., 1996, *A&A*, **308**, 415

- Boroson, T. A., 2002, *ApJ*, **565**, 78
- Boroson, T. A. y Green, R. F., 1992, *ApJS*, **80**, 109
- Böttcher, M., 1999, *ApJ*, **515**, L21
- Bottorff, M. y Ferland, G., 2002, *ApJ*, **568**, 581
- Box, G. E. P.; Hunter, W. G. y Hunter, J. S., 1978, in *Statistics for Experimenters* (New York: Wiley)
- Braatz, J. A.; Wilson, A. S.; Henkel, C.; Gough, R. y Sinclair, M., 2003, *ApJSS*, **146**, 249
- Brecher, K., 1977, en *Frontiers of Astrophysics*, ed. E.H. Avrett (Harvard University Press: Cambridge), p. 438
- Bregman, J. N., 1990, *A&ARv*, **2**, 125
- Bregman, J. N., 1992, in *Variability of Active Galactic Nuclei*, ed. H. R. Miller & P. J. Wiita (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 1
- Brotherton, M. S.; Wills, B. J.; Francis, P. J. y Steidel, C. C., 1994, *ApJ*, **430**, 495
- Brown, L. M. J., Robson, E. I., Gear, W. K., et al. 1986, *MNRAS*, **219**, 671
- Brown, L. M. J.; Robson, E. I.; Gear, W. K.; Hughes, D. H.; Griffin, M. J.; Geldzahler, B. J.; Schwartz, P. R.; Smith, M. G. et al. 1989(a), *ApJ*, **340**, 129
- Brown, L. M. J.; Robson; Gear, W. K. y Smith, M. G., 1989(b), *ApJ*, **340**, 150
- Böttcher, M., 1999, *ApJ*, **515L**, 21
- Buta, R.; Purcell, G. B. y Crocker, D. A., 1995, *AJ*, **110**, 4
- Campbell, C. G., 2003, *MNRAS*, **345**, 1110
- Canavos, G., 1992, *Probabilidad y Estadística: Aplicaciones y Métodos*. Ed. McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V.
- Carini, M. T., 1990, Ph.D. thesis, Georgia State Univ.
- Carini, M. T.; Miller, H. R. y Goodrich, B. D., 1989, *BAAS*, **21**, 1130
- Carini, M. T.; Miller, H. R. y Goodrich, B. D., 1990, *AJ*, **100**, 347
- Carini, M. T. y Miller, H. R., 1991, *BAAS*, **23**, 1420
- Carrasco, L.; Dultzin-Hacyan, D. y Cruz-González, I., 1985, *Nature*, **314**, 146
- Carrillo, R., *Jets en Núcleos Activos de Galaxias*. 1988. Tesis de Licenciatura, Fac. de Ciencias, UNAM
- Cellone, S. A.; Romero, G. E. y Combi, J. A., 2000, *AJ*, **119**, 1534
- Chang, K. y Refsdal, S., 1979, *Nature*, **282**, 561
- Chavushyan, V. O.; Stepanyan, J. A.; Balayan, S. K. y Vlasyak. V. V., 1995, *PAZH*, **21**, 894
- Chiang, J. y Böttcher, M. 2002, *ApJ*, **564**, 92
- Cimatti, A.; Zamorani, G. y Marano, B., 1993, *MNRAS*, **263**, 236
- Cirasuolo, M.; Celotti, A.; Magliocchetti, M. y Danese, L., 2003, *MNRAS*, **346**, 447
- Clements, S. D., Jenks, A., & Torres, Y. 2003, *AJ*, **126**, 37
- Clements, S. D. y Carini, M. T., 2001, *AJ*, **121**, 90
- Clocchiatti, A.; Minitti, D; Aguilera, C.; Becker, A. et al. 2003, *IAUC*, **8258**, 1
- Collin-Souffrin, S. y Dumont, A. M., 1990, *A&A*, **229**, 292
- Condon, J. J.; O'Dell, S. L.; Puschell, J. J. y Stein, W. A., 1981, *ApJ*, **246**, 624
- Corbin, M. R. y Francis, P. J., 1994, *AJ*, **108**, 6
- Crampton, D., McClure, R. y Fletcher, J., 1992, *ApJ*, **392**, 23
- Cristiani, S.; Trentini, S.; La Franca, F.; Arexaga, I.; Andreani, P.; Vio, R. y Gemmo, A., 1996, *A&A*, **306**, 395
- Cutri, R. M.; Wisniewski, W. Z.; Rieke, G. H. y Lebofski, M. J., 1985, *ApJ*, **296**, 423
- Czerny, B., 2004, *adjh.conf.*, **461**
- Czerny, B y Elvis, M., 1987, *ApJ*, **321**, 305
- Czerny, B. y Zbyszewska, 1991, *MNRAS*, **249**, 634
- Dai, B. Z.; Xie, G. Z.; Li, K. H.; Zhou, S. B.; Liu, W. W. y Jiang, Z. J., 2001, *AJ*, **122**, 2901
- D'Amicis, R.; Nesci, R.; Massaro, E.; Maesano, M.; Montagni, F. y D'Alessio, F., 2002, *PASA*, **19**, 111
- de Dego, J. A. y Kidger, M., 1990, *Ap &SS*, **171**, 97
- de Diego, J. A.; Dultzin-Hacyan, D.; Ramírez, A. y Benítez, E., 1998, *ApJ*, **501**, 69

- de Diego, J. A., Núcleos de Galaxias Altamente Polarizados. Tesis Doctoral. 1994, Instituto de Astrofísica de Canarias, Universidad de la Laguna
- De Ruiter, H. R. y Lub, J., 1986, *A&AS*, **63**, 59
- Dermer, C. D. 1998, *ApJ*, **501**, L157
- Dermer, C. D. y Schlickeiser, R. 2002, *ApJ*, **575**, 667
- Di Clemente, A., Giallongo, E., Natali, G., Trevese, D. y Vagnetti, F. 1996, *ApJ*, **463**, 466
- Djorgovski, S.; Weir, N.; Matthews, K. y Graham, J. R., 1991, *ApJ*, **372**, L67
- Dresslar, A. y Richstone, D. O., 1988, *ApJ*, **324**, 701
- Dultzin-Hacyan, D.; Ruelas-Mayorga, A. y Costero, R., 1993, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, **25**, 143
- Dultzin-Hacyan, D.; Schuster, W. J.; Parrao, L.; Pena, J. H.; Peniche, R.; Benítez, E. y Costero, R., 1992, *AJ*, **103**, 1769
- Dultzin-Hacyan, D.; Takalo, L. O.; Benítez, E.; Sillampaa, A.; Purismo, T.; Letho, H. y de Diego, J. A., 1997, *RmxAA*, **33**, 17
- Dultzin-Hacyan, D. y Ruano, C., 1996, *A&A*, **305**, 719
- Dunlop, J. S.; McLure, R. J.; Kukulka, M. J.; Baum, S. A.; O'Dea, C. P. y Hughes, D. H., 2003, *MNRAS*, **340**, 1095
- Dunlop, J. S., Taylor, G. L., Hughes, D. H., & Robson, E. I. 1993, *MNRAS*, **264**, 455
- Eachus, L. J. y Liller, W., 1975, *ApJ*, **200**, L61
- Eckart, A. y Genzel, R., 1997, *MNRAS*, **284**, 576
- Edelson, R. A. y Malkan, M. A., 1986, *ApJ*, **308**, 59
- Eggers, D.; Shaffer, D. B. y Weistrop, D., 2000, *ApJ*, **119**, 460
- Elvis, M., 1986, *IAUS*, **119**, 73
- Elvis, M., 2000, *ApJ*, **545**, 63
- Elvis, M., 2002, *ASPC*, **255**, 303
- Enya, K.; Yoghi, Y.; Kobayashi, Y.; Minezaki, T. et al. 2002, *ApJS*, **141**, 45
- Enya, K.; Yoshii, Y.; Kobayashi, Y.; Minezaki, T.; Suganuma, M.; Tomita, H. y Peterson, B. A., 2002(b), *ApJS*, **141**, 31
- Epstein, E. E.; Fogarty, W. G.; Hackney, K. R.; Hackney, R. L. et al. 1972, *ApJ*, **178**, L51
- Fabbiano, G.; Miller, L.; Trinchieri, G.; Longair, M. y Elvis, M., 1984, *ApJ*, **277**, 115
- Fabbiano, G.; Willner, S. P.; Carleton, N. P. y Elvis, M., 1986, *ApJ*, **304**, L37
- Falcke, H., Sherwood, W. y Patnaik, A. R., 1996, *ApJ*, **471**, 106
- Falomo, R., Scarpa, R., & Bersanelli, M. 1994, *ApJS*, **93**, 125
- Falomo, R., & Ulrich, M. H. 2000, *A&A*, **357**, 91
- Fanti, C.; Ficarra, A.; Gregorini, L.; Mantovani, F. y Olori, M. C., 1981, *A&A*, **97**, 251
- Fernandes, C. Sodré, L. Jr. y Vieira da Silva, L. Jr., 2000, *ApJ*, **544**, 123
- Fernandes, R. C., 1997, *RevMexAA*, **6**, 201
- Fernandes, R. C.; Terlevich, R. y Aretxaga, I., 1997, *MNRAS*, **289**, 318
- Field, G. F., 1964, *ApJ*, **140**, 1434
- Filippenko, A. V., 1989, *AJ*, **97**, 3
- Fiorucci, M.; Ciprini, S. y Tosti, G., 2004, *A&A*, **419**, 25
- Forbes, D. A.; Norris, R. P.; Williger, G. M. y Smith, R. C., 1994, *AJ*, **107**, 3
- Francis, P. J.; Hooper, E. J. y Impey, C. D., 1993, *AJ*, **106**, 2
- Francis, P. J.; Whiting, M. y Webster, R. L., 2000, *PASAu*, **53**, 56
- Fuentes y Krongold, Compañeras de Campo de Galaxias Seyfert. 1997. Tesis de Licenciatura, Fac. de Ciencias, UNAM
- Galeev, A. A.; Rosner, R. y Vaiana, G. S., 1979, *ApJ*, **229**, 318
- Gallo, L.C.; Boller, Th.; Tanaka, Y.; Fabian, A.C. et al., 2004, *MNRAS*, **347**, 269
- Garcia, A., Sodré, L., Jablonski, F. J., & Terlevich, R. J. 1999, *MNRAS*, **309**, 803
- Gear, W. K.; Brown, L. M. J.; Robson, E. I.; Ade, P. A. R.; Griffin, M. J.; Smith, M. G.; Nolt, I. G.; Radostitz, J. V.; Veeder, G. y Lebofski, L., 1986, *ApJ*, **304**, 295

- Gear, W. K., Brown, L. M. J., Robson, E. I., et al. 1986, *ApJ*, **304**, 295
- Gear, W. K.; Robson, E. I.; Ade, P. A. R.; Griffin, M. J.; Brown, L. M. J.; Smith, M. G.; Nolt, I. G.; Raadostitz, J. V.; Veeder, G. Y.; Lebofsky, L., 1985, *ApJ*, **291**, 511
- Gear, W. K., Robson, E. I., & Brown, L. M. J. 1986, *Nature*, **324**, 546
- Ghisellini, G., Celotti, A., & Costamante, L. 2002, *A&A*, **386**, 833
- Ghisellini, G.; Haart, F. y Matt, G., 2004, *A&A*, **413**, 535
- Ghisellini, G., Villata, M., Raiteri, C. M., et al. 1997, *A&A*, **327**, 61
- Ghisellini, G. y Celotti, A., 2002, *ASPC*, **258**, 273
- Ghosh, K. K., Ramsey, B. D., Sadun, A. C., & Soundararaja-perumal, S. 2000, *ApJS*, **127**, 11
- Ghosh, T. y Rao, A. P., 1992, *A&A*, **264**, 203
- Giallongo, E.; Trevese, D. y Vagnetti, F., 1991, *ApJ*, **377**, 345
- Giveon, H.; Maoz, D.; Kaspi, S.; Netzer, H. y Smith, P. S., 1999, *MNRAS*, **306**, 637
- Goldschmidt, P.; Miller, L.; La Franca, F. y Cristiani, S., 1992, *MNRAS*, **256**, 65
- Goodman, J. y Tan, J. C., 2004, *ApJ*, **608**, 108
- Gopal-Krishna; Gupta, A. C.; Sagar, R.; Wiita, P. J.; Chaubey, U. S. y Stalin, C. S., 2000, *MNRAS*, **314**, 815
- Gopal-Krishna; Ledoux, C.; Melnick, J.; Giraud, E.; Kulkarni, V. y Altieri, B., 2005, *A&A*, **436**, 457
- Gopal-Krishna; Sagar, R. y Wiita, P. J., 1993a, *MNRAS*, **262**, 963
- Gopal-Krishna; Wiita, P. J. y Altieri, B., 1993b, *A&A*, **271**, 89
- Gopal-Krishna y Subramanian, K., 1991, *Nature*, **349**, 766
- Gopal-Krishna y Wiita, P. J., 1992, *A&A*, **259**, 109
- Grandi, P.; Tagliaferri, G.; Giommi, P.; Barr, P. y Palumbo, G. G. C., 1992, *ApJS*, **82**, 93
- Green, A. R.; McHardy, I. M. y Lehto, H. J., 1993, *MNRAS*, **265**, 664
- Greenhill, L. J., 2000, *AAS*, **196**, 2107
- Grenstein, J. L. y Matthews, T. A., 1963, *Nature*, **197**, 1041
- Gu, M. F.; Lee, C.-C.; Pak, S.; Yim, H. S. y Fletcher, A. B., 2006, *A&A*, **450**, 39
- Guibin, J.; Haiya, M.; Xuefen, C.; Zhili, L.; Shengguan, L. y Guanghua, L., 1995, *A&AS*, **114**, 337
- Guibin, J.; Xuefen, C.; Huiyu, M. y Jiancheng, W., 1998, *A&AS*, **128**, 315
- Gupta A. C. y Joshi, U. C., 2005, *A&A*, **440**, 855
- Hanson, C. G. y Coe, M. J., 1985, *MNRAS*, **217**, 831
- Hartman, R. C.; Webb, J. R.; Marscher, A. P.; Travis, J. P.; Dermer, C. D. et al. 1996; *ApJ*, **461**, 698
- Hawkins, M. R. S., 1978, *MNRAS*, **182**, 361
- Hawkins, M. R. S., 1993, *Nature*, **366**, 242
- Hazard, V.; Mackay, M. B. y Shimmins, A. J., 1963, *Nature*, **197**, 1037
- Heeschen, D. S., 1984, *AJ*, **89**, 1111
- Heeschen, D. S. y Rickett, B. J., 1987, *AJ*, **93**, 589
- Heidt, J. y Wagner, S. J., 1996, *A&A*, **305**, 42
- Helfand, D. J.; Stone, R. P. S.; Willman, B.; White, R.; Becker, R. H.; Price, T.; Gregg, M. D. y McMahon, R. G., 2001, *AJ*, **121**, 1872
- Hewitt, A. y Burbidge, G., 1993, *ApJS*, **87**, 451
- Hook, I. M., McMahon, R. G., Boyle, B. J., & Irwin, M. J. 1994, *MNRAS*, **268**, 305
- Hooper, E. J.; Impey, C. D.; Foltz, C. y Hewett, P. C., 1995, *ApJ*, **445**, 62
- Horiuchi, S.; Formalont, E. B.; Taylor, W. K.; Scott, A. R.; Lovell, J. E. J.; et al., 2004, *ApJ*, **616**, 110
- Hough, J. H.; Bailey, J.; Rouse, M. F. y Whittet, D. C. B., 1987, *MNRAS*, **227**, 1
- Howard, E. S. y Webb, J. R.; Pollock, J. T. y Stencel, R. E., 2004, *AJ*, **127**, 17
- Howell, S. B. y Jacoby, G. H., 1986, *PASP*, **98**, 802
- Hubeny, I.; Ago, E.; Blaes, O. y Krolik, J., 2000, *ApJ*, **533**, 710

- Hubeny, I.; Blaes, O.; Krolik, J. y Agol, E., 2001, *ApJ*, **559**, 680
- Hughes, D., Kukula, M. J., Dunlop, J. S. y Boroson, T. 2000, *MNRAS*, **316**, 204
- Hutchings, J. B. 1987, *ApJ*, **320**, 122
- Hutchings, J. B., Johnson, I. y Pyke, R. 1988, *ApJS*, **66**, 361
- Inada, N.; Oguri, M.; Becker, R. H.; White, R. L.; Gregg, M. D.; et al., 2006, *AJ*, **131**, 1934
- Inada, N.; Oguri, M.; Pindor, B.; Hennawi, J. F.; Chiu, K.; et al., 2003, *Nature*, **426**, 810
- Ivezic, J.; Manou, K.; Knapp, G. L.; Strauss, M. A. et al. 2002, *ApJ*, **124**, 2364
- Jang, M. y Miller, H. R., 1995, *ApJ*, **452**, 582
- Jang, M. y Miller, H. R., 1997, *AJ*, **114**, 2
- Jones, T. W.; Rudnick, L.; Owen, F. N.; Puschell, J. J.; Ennis, D. J. y Wwerner, M. W., 1981, *ApJ*, **243**, 97
- Katajainen, S., Takalo, L. O., Sillampää, A., et al. 2000, *A&A*, **143**, 357
- Kedziora-Chudczer, L. L., Jauncey, D. L., Wieringa, M. H., Tzioumis, A. K., & Reynolds, J. E. 2001, *MNRAS*, **325**, 1411
- Keeton, C. R., 2001, *ApJ*, **561**, 46
- Kellerman, K. I.; Sramek, R.; Schmidt, M.; Shaffer, D. B. y Green, R., 1989, *AJ*, **98**, 1195
- Kellerman, K. I.; Sramek, R. A.; Schmidt, M.; Green, R. F. y Shaffer, D. B. 1994, *AJ*, **108**, 1163
- Kembhavi, A. K. y Narlikar, J. V., 1999, Quasar and Active Galactic Nuclei: an Introduction (Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics, Pune, India)
- Kidger, M. R. y de Diego, J. A., 1992, *A&ASS*, **93**, 1
- Kikuchi, S.; Inoue, M.; Tabara, H. y Kato, T., 1988, *A&A*, **190**, L8
- Kirhukos, S., Sargent, W. L. W.; Sxhneider, D. D.; Bahcall, J. N.; et al., 1994, *PASP*, **106**, 646
- Koide, S.; Meier D. L.; Shibata, K. y Kudoh, T., 2000, *ApJ*, **536**, 668
- Koratkar, A. y Blaes, O., 1999, *PASP*, **111**, 1
- Kormendy, J. y Richstone, D., 1995, *ARA&A*, **33**, 581
- Kotilainen, J., Falomo, R. y Scarpa, R. 1998, *A&A*, **332**, 503
- Krishan, V. y Wiita, P. J., 1994, *ApJ*, **423**, 172
- Kriss, G. A.; Davidsen, A. F.; Zheng, W. y Lee, G., 1999, *ApJ*, **527**, 683
- Lainela, M.; Takalo, L. O.; Sillampää, A.; Pursimo, T. y Nilsson, K., 1999, *ApJ*, **521**, 561
- La Franca, F.; Cristiani, S. y Barbieri, C., 1992, *AJ*, **103**, 1062
- Landolt, A. U. 1992, *AJ*, **104**, 340
- Laor, A., 1990, *MNRAS*, **264**, 369
- Laor, A., 2000, *ApJ*, **543**, L111
- Laor, A. y Netzer, H., 1989, *MNRAS*, **238**, 897
- Lawrence, A., 1987, *PASP*, **99**, 309
- Lawrence, A., 2005, *MNRAS*, **363**, 57
- Lawrence, A.; Rowman-Robinson, M.; Leech, K.; Jones, D.H.P. y Wall, J. V., 1989 *MNRAS*, **240**, 329
- Lawrence, A. y Elvis, M., 1982, *ApJ*, **256**, 410
- Lawrence, A. y Papadakis, I., 1993, *ApJ*, **414**, L85
- Leitherer, C.; Vacca, W. D.; Conti, P. S.; Filippenko, A.; Carmelle, R. y Sargent, W. L. W., 1996, *ApJ*, **465**, 717
- Lähteenmäki, A y Valtaoja, E., 1999, *ApJ*, **521**, 439
- Liang, E. P. T. y Thompson, K. A., 1979, *BAAS*, **11**, 663
- Li, H. y Kusunose, M. 2000, *ApJ*, **536**, 729
- Liller, M. H. y Liller, W., 1975, *ApJ*, **199L**, 133
- Livio, M.; Ogilvie, G. I. y Pringle, J. E., 1999, *ApJ*, **512**, 100
- Lu, Y. y Yu, Q., 2001, *MNRAS*, **324**, 653
- Lyutyi, V. M. y Rakhimov, V. Yu., 1989, *SvAL*, **15**, 87
- Maccio, A. V. y Miranda, M., 2006, *MNRAS*, **368**, 599
- Maesano, M., Messaro, E. y Nesci, R. 1997a, *IAU, Circ.*, **6700**

- Maesano, M., Montagni, F., Massaro, E. y Nesci, R. 1997b, *A&A*, **122**, 267
- Makino, F.; Kii, T.; Hayashida, K.; Inoue, H.; Tanaka, Y. et al., 1989, *ApJ*, **347**, L9
- Malkan, M. A., 1983, *ApJ*, **268**, 582
- Malkan, M. A: y Moore, R. L., 1986, *ApJ*, **300**, 216
- Malkan, M. A. y Sargent, W. L. W., 1982, *ApJ*, **254**, 22
- Maloney, P., 2002, *PASAu*, **19**, 401
- Mangalam, A. V. y Wiita, P. J. 1993, *ApJ*, **406**, 420
- Mantovani, F., 1982, *A&A*, **110**, 345
- Maoz, D.; Barth, A. J.; Sternberg, A.; Filippenko, A.; Ho, L.C.; Macchetto, F. D.; Rix, H.-W. y Schneider, D. P., 1996, *AJ*, **111**, 6
- Maoz, D.; Nagar, N. M.; Falcke, H. y Wilson, A. S., 2005, *ApJ*, **625**, 699
- Maraschi, L., Celotti, A. y Treves, A. 1989, in Proc. 23rd, ESLAB Symp. on Two Topics in X-ray Astronomy ed. J. J. Hunt, & B. Battrock (Paris: ESA), **2**, 825
- Maraschi, L., Grandi, P., Urry, C. M., et al. 1994, *ApJ*, **435**, L91
- Marscher, A. P. 1980, *ApJ*, **235**, 386
- Marscher, A. P., 1980, *ApJ*, **239**, 296
- Marscher, A. P. 1996, in Blazar continuum Variability, ed. H. R. Miller, J. R. Webb, & J. C. Noble (San Francisco: ASP), *ASP Conf. Ser.*, **110**, 248
- Marscher, A. P., Gear, W. K., & Travis, J. P. 1992, in Variability of Blazars, ed. E. Valtaoja, & M. Valtonen (Cambridge Univ. Press), 85
- Marscher, A. P. y Gear, W. K., 1985, *ApJ*, **298**, 114
- Marshall, H. L., 1987, *ApJ*, **316**, 84
- Marziani, P.; Sulentic, J. W.; Dultzin-Hacyan, D.; Clavani, M. y Moles, M., 1996, *ApJS*, **104**, 37
- Massaro, E., Nesci, R., Maesano, M., Montagni, F., & D'Allesio, F. 1998, *MNRAS*, **299**, 47
- Massaro, E. y Trevese, D., 1996, *A&A*, **312**, 810
- Mathews, W. G. y Ferland, G. J., 1987, *ApJ*, **323**, 456
- Matthews, T. A. y Sandage, A. R., 1963, *ApJ*, **138**, 30
- Mauder, W.; Weigelt, G.; Appenzeller, I. y Wagner, S. J., 1994, *A&A*, **285**, 44
- McAdam, W. B. 1976, *PASA*, **3**, 86
- McCarthy, P.; Marzke, R.; Chen, H. W.; Persson, E.; Oemler, A.; Dressler, A.; Beckett, M. et al. 1999, *AAS*, **195**, 5701
- McFarland, J. P.; Miller, H. R.; Williams, A. M.; Ferrara, E. C. y Noble, J. C., 2001, *AAS*, **199**, 9805
- McGimsey, B. Q.; Smith, A. G.; Scott, R. L.; Leacock, R. J.; Edwards, P. L.; Hackney, R. L. y Hackney, K. R., 1975, *AJ*, **80**, 895
- Miller, H. R. 1981, *ApJ*, **244**, 426
- Miller, H. R.; Carini, M. T. y Goodrich, B. D., 1989, *Nature*, **337**, 627
- Miller, H. R.; Ferrara, E.C.; McFarland, J. P.; Wilson, J. W. y Daya, A. B., 2000, *NAR*, **44**, 539
- Miller, H. R. y Noble, J. C., 1996, *ASPC*, **110**, 17
- Miller, L.; Peacock, J. A. y Mead, A. R. G., 1990, *MNRAS*, **244**, 207
- Miller, P.; Rawlings, S. y Saunders, R., 1993, *MNRAS*, **263**, 425
- Miyoshi, M.; Moran, J.; Herrnstein, J.; Greenhill, L.; Nakai, N.; Diamond, P. y Inoue, M., 1995, *Nature*, **373**, 127
- Moles, M.; García-Pelayo, J.; Masegosa, J. y Aparicio, A., 1985, *AJ*, **90**, 39
- Moles, M.; García-Pelayo, J. M.; Masegosa, J.; Aparicio, A. y Quintana, J. M., 1985, *A&A*, **152**, 271
- Morini, M.; Chiappetti, I.; Maccagnni, D.; Maraschi, L.; Molteni, D.; Tanzi, E. G.; Treves, A. y Wolter, A., 1986, *ApJ*, **306**, L71
- Nair, A. D. 1997, *MNRAS*, **287**, 641
- Nesci, R., Maesano, M., Massaro, E., et al. 1998, *A&A*, **332**, L1
- Netzer, H., 1990, en Active Galactic Nuclei, Saas-Fee Advanced course 20, ed. R.D. Blandford, H. Netzer y L. Woltjer, 57
- Netzer, H.; Heller, A.; Loinger, F.; Alexander, T.; Baldwin, J. A.; Wills, B. J.; Han, M.; Frueh, M. y Higdon, J. L., 1996, *MNRAS*, **279**, 429
- Neugebauer, G.; Soifer, B. T.; Matthews, K. y Elias, J. H., 1989, *AJ*, **97**, 4

- Neugebauer, G.; Soifer, B. T.; Matthews, K. y Elias, J. H., 1989, *AJ*, **97**, 957
- O'Brien, P. T.; Gondhalekar, P. M. y Wilson, R., 1988, *MNRAS*, **233**, 801
- Ohsuga, K.; Umemura, M.; Fukue, J. y Mineshige, E., 1999, *PASJ*, **51**, 345
- Oke, J. B., 1967, *ApJ*, **150**, L50
- O'Neill, P. M.; Sandra, K.; Papadakis, I. E. y Turner, T. J., 2004, *AIPC*, **714**, 186
- Ordoñez, R., Catálogo y estudio Estadístico de emisión en multifrecuencias de Núcleos Activos de Galaxias de baja Luminosidad (LINERs). Tesis de Licenciatura. 1997. Fac. de Ciencias, UNAM
- Osterbrock, D. E.; 1991, *Rep. Prog. Phys.*, **54**, 579
- Padovani, P., & Urry, C. M. 1992, *ApJ*, **387**, 449
- Padielli, L.; Aller, M. F.; Aller, H. D.; Fanti, C.; Fanti, R.; Ficarra, A.; Gregorini, L.; Montavini, F. y Nicolson, G., 1987, *A&ASS*, **67**, 63
- Papadakis, I. E., Boumis, P., Samaritakis, V., & Papamastora-kis, J. 2003, *A&A*, **397**, 565
- Papadakis, I. E.; Petrucci, P. O.; Maraschi, L.; McHardy, I. M.; Uttley, P. y Haardt, F., 2002, *ApJ*, **573**, 92
- Peng, B. y de Bruyn, A. G., 1995, *A&A*, **301**, 25
- Pereyra, N. A.; Vanden Berk, D. E.; Turnshek, D. A.; Hiller, D. J.; et al., 2006, *ApJ*, **642**, 87
- Pian, E., 2002, *PASAu*, **19**, 49
- Pica, A. J., Pollock, J. T., Smith, A. G., et al. 1980, *AJ*, **85**, 1442
- Pica, A. J.; Smith, A. C.; Leacock, R. J.; Webb, J. R. y Pollock, J. T., 1982, *BAAS*, **14**, 908
- Pica, A. J.; Smith, A. G.; Webb, J. R.; Leacock, R. J.; Clements, S. y Gombola, P. P., 1988, *AJ*, **96**, 1215
- Pica, A. J. y Smith, A. C., 1983, *ApJ*, **272**, 11
- Pier, E. A. y Krolik, J. H., 1993, *ApJ*, **418**, 673
- Pineault, S., 1977, *MNRAS*, **179**, 691
- Pineault, S., 1981, *ApJ*, **246**, 612
- Popovic, L. C.; Mediavilla, E.; Bon, E. y Ilic, D., 2004, *A&A*, **423**, 909
- Pronik, I. I., 1973, *Sov. Astr.*, **16**, 628
- Punsly, B., 1999, *ApJ*, **527**, 609
- Pursimo, T.; Takalo, L. O.; Sillanpää, A.; Kidger, M. et al. 2000, *A&AS*, **146**, 141
- Qian, B. Y Tao, J., 2003, *PASP*, **115**, 490
- Qian, S. J.; Quirrenbach, A.; Witzel, A.; Krichbaum, T. P.; Hummel, C. A. y Zensus, J. A., 1991, *A&A*, **241**, 15
- Rabbette, M.; McBreen, B.; Smith, N. y Steel, S., 1998, *A&ASS*, **129**, 445
- Racine, R., 1970, *ApJ*, **159**, 99
- Ramírez, A., de Diego, J. A., Dultzin-Hacyan, D., & Benítez, E. 2003, in *Active Galaxy Nuclei: From central engine to Host Galaxy*, ed. S. Collin, F. Combes, & I. Shlosman, *ASP Conf. Ser.*, **290**, 123
- Ramírez, A., Estudio de Microvariabilidad en Cuásares Radio Fuertes y Radio Tenues. Tesis de licenciatura. 2000. Fac de Ciencias, UNAM
- Ramírez, A., de Diego, J. A., Dultzin-Hacyan, D., & Pérez-González, J. N., 2004, *A&A*, **421**, 83
- Richard, J.; Pello, R.; Kneib, J.-P.; Schearer, D.; Santos, M. R. y Ellis, R., 2004, *MUCO.CONF 27* (astro-ph/038543)
- Rickett, B. J.; Witzel, A.; Kraus, A. y Krichbaum, T. P., 2001, *ApJ*, **550**, L11
- Rieke, G. H.; Grasdalen, G. L.; Kinman, T. D.; Hizen, P.; Wills, B. J. y Wills, D., 1976, *Nature*, **260**, 754
- Risaliti, G. y Elvis, M., 2004, *sbhd.book*, **187**
- Romanova, M. M. y Lovelace, R. V. E., 1996, *A&AS*, **120**, 583
- Romero, G. E.; Cellone, S. A. y Combi, J. A., 1999, *A&ASS*, **135**, 477
- Ruano, C., Estudio estadístico de Galaxias Seyfert, tipos 1 y 2 en multifrecuencias, 1992. Tesis de Licenciatura, Fac. de Ciencias, UNAM
- Rybicki, G. B. y Lightman, A. P., 1979, *Radiative Processes in Astrophysics*, ED. *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Mass.*
- Sagar, R., Stalin, C. S., Gopal-Krishna y Wiita, P.J., 2004, *MNRAS*, **348**, 176
- Salpeter, E. E., 1964, *ApJ*, **140**, 796

- Sambruna, R. M.; 2003, *NewAR*, **47**, 457
- Sandage, A., 1965, *ApJ*, **141**, 1560
- Sandage, A. R., 1971, *SWNG.CONF.*, **271**
- Sandage, A.; Véron, P. y Wyndham, J. D., 1965, *ApJ*, **142**, 1307
- Sanders, D. B.; Phinney, E. S.; Neugebauer, G.; Soifer, B. T. y Matthews, K., 1989, *ApJ*, **347**, 29
- Sun, W.-H. y Malkan, M. A., 1989, *ApJ*, **346**, 68
- Schaefer, B. E. 1980, *PASP*, **92**, 255
- Scheffer, W. C., 1988, in *Statistics Concepts and Applications* (Menlo Park: Benjamin/Cummings)
- Schmidt, M., 1963, *Nature*, **197**, 1040
- Schramm, K. J.; Borgeest, U.; Kuehl, V.; von Linde, J.; Linner, M. O. y Scramm, T., 1994, *A&AS*, **106**, 349
- Sembay, S.; Warwick, R.S.; Urry, C. M.; Sokoloski, J.; George, I. M.; Makino, F.; Ohshi, T. y Tashiro, M., 1993, *ApJ*, **404**, 112
- Shakura, N. I. y Sunyaev, R. A., 1973, *A&A*, **24**, 337
- Shang, Z.; Brotherton, M.; Green, R.; Kriss, G.; Scott, J. et al. 2004, *AAS*, **204**, 9206
- Shields, G. A.; Gebhardt, K.; Salviander, S.; Wills, B. J.; Xie, B. et al. 2003, **583**, 124
- Shklovskii, I. S., 1960, *Sov. Astr.*, **4**, 885
- Siemiginowska, A.; Kuhn, O.; Elvis, M; Fiore, F.; McDowell, J. y Wilkes, B. J., 1995, *ApJ*, **454**, 77
- Sikora, M., Blazejowski, M., Begelman, M. C., & Moderski, R. 2001, *ApJ*, **554**, 1
- Sikora, M. y Madejski, G., 2000, *ApJ*, **534**, 109
- Sillanpää, A.; Takalo, L. O.; Nilsson, K.; Kidger, M. y de Diego, J.-A., 1992, *A&A*, **254**, L33
- Sillanpää, A.; Nilsson, K. y Takalo, T. O., 1992, *PAGN.CONF.*, **592**
- Sillanpää, A.; Takalo, L. O.; Pursimo, T.; Lehto, H. J. et al. 1996, *A&A*, **305**, L17
- Sitko, M. J., Schmidt, G. D., & Stein, W. A. 1985, *ApJS*, **59**, 323
- Smith, E. P., Heckman, T. M., Bothun, G. D., Romanishin, W., & Balick, B. 1986, *ApJ*, **306**, 64
- Snyder, W. A.; Davidsen, A. F.; Wood, K et al. 1980, *ApJ*, **237**, L11
- Sponholz, H. y Molteni, D., 1994, *MNRAS*, **271**, 233
- Sramek, R. A. y Weedman, D. W., 1980, *ApJ*, **238**, 435
- Stalin, C. S.; Gopal-Krishna; Sagar, R. y Wiita, P. J., 2004, *JApA*, **25**, 1
- Stalin, C. S.; Gopal-Krishna; Sagar, R. y Wiita, P. J., 2004, *MNRAS*, **350**, 175
- Statler, T. S., 1999, *ApJ*, **524L**, 87
- Stepanian, J. A.; Green, R. F.; Foltz, C. B.; Chaffers, F.; Chavushyan, V. H.; Lipovetsky, V. A. y erastova, L. K., 2001, *AJ*, **122**, 3361
- Stocke, J. T.; Morris, S. L.; Waymann, R. J. y Foltz, C. B., 1992, *ApJ*, **396**, 487
- Strittmatter, P. A.; Hill, P.; Pauliny-Toth, I. I.; Steppe, H. y Witzel, A., 1980, *A&A*, **88**, L12
- Sulentic, J. W.; Marziani, P.; Dultzin-Hacyan, D.; Calvani, M. y Moles, M., 1995, *ApJ*, **445**, L85
- Takalo, L. O.; Sillanpää, A.; Nilsson, K. y de Diego, J. A., 1994, *A&ASS*, **104**, 115
- Takeuchi, M. y Mineshige, S., 1997, *ApJ*, **486**, 160
- Tanihata, C.; Takahashi, T.; Kataoka, J.; Madejski, G. M.; Unoue, S.; Kubo, H.; Makino, F.; Mattox, J. R. y Kaawai, N., 2000, *ApJ*, **543**, 124
- Tao, J.; Qian, B. y Fan, J., 2004, *PASP*, **116**, 634
- Tavecchio, F., 2004, *MSAIS*, **Vol. 5**, 211
- Terlevich, R., 1997, *RevMexAA*, **6**, 1
- Terlevich, R.; Melnick, J. y Moles, M., 1987, *IAUS*, **121**, 499
- Terlevich, R.; Tenorio-Tagle, G.; Franco, J. Y Melnick, J., 1992, *MNRAS*, **255**, 713
- Tingay, S. J.; Preston, R. A.; Lister, M. L.; Piner, B. G.; et al., 2001, *ApJ*, **549L**, 55
- Tornikoski, M.; Valtaoja, E.; Terasranta, H.; Smith, A. G.; Nair, A. D.; Clements, S. D. y Leacock, R. J., 1994, *A&A*, **289**, 673
- Tran, H. D., 1995, *ApJ*, **440**, 597
- Trevese, D.; Kron, R. G.; Majewski, S. R.; Bershad, M. A. y Koo, D. C., 1994, **433**, 494

- Trevese, D.; Kron, R. G. y Bunone, A., 2001, *ApJ*, **551**, 103
- Trevese, D. y Vagnetti, F., 2002, *ApJ*, **564**, 624
- Turner, T. J.; George, I. y Netzer, H., 1999, *ApJ*, **526**, 52
- Ultrich, M.-H.; Maraschi, L. y Urry, C. M., 1997, *ARA&A*, **35**, 445
- Umemura, M.; Fukue, J. y Mineshige, S., 1998, *MNRAS*, **299**, 1123
- Urry, C. M., *Blazar Continuum variability en ASP Conference Series*, Vol. **110**, 1996, 391
- Urry, C. M. y Padovani, P., 1995, *PASP*, **107**, 803
- Usher, P. D.; Warnock, A. y Green, R. F., 1983, *ApJ*, **269**, 73
- Uttley, P. y McHardy, I. M., 2004, *PThPS*, **155**, 170
- Vagnetti, F. y Trevese, D., 2001, astro-ph/0102252
- Vagnetti, F., Trevese, D., & Nesci, R. 2003, *ApJ*, **590**, 123
- Vagnetti, F. y Spera, R., 1994, *ApJ*, **436**, 611
- Valtaoja, E.; Terasranta, H.; Tornikoski, M.; Silanpaa, A.; Aller, M. F.; Aller, H. D. y Hughes, P. A., 2000, *ApJ*, **531**, 744
- Vanden Berk, D. E.; Wilhite, B. C.; Kron, R. G.; Anderson, S.F. et al., 2004, *ApJ*, **601**, 692
- Veron-Cetty, M.-P. y Veron, P., 1983, *A&AS*, **53**, 219
- Veron-Cetty, M.-P. y Veron, P., 1987, *ESO Sci. Rep.*, **5**
- Vila, S. C., 1979, *ApJ*, **234**, 636
- Villata, M.; Mattox, J. R.; Massaro, E.; Nesci, R. et al. 2001, *MmSAI*, **72**, 151
- Villata, M.; Raiteri, C. M.; Kurtanidze, O. M.; Nokolashvili, M. G. et al. 2004, *A&A*, **421**, 103
- Villata, M.; Raiteri, C. M.; Ghisellini, G.; de Francesco, G.; et al., 1997, *A&AS*, **121**, 119
- Véron-Cetty, M. P. y Véron, P., 2001, *A&A*, **374**, 92
- Wagner, S. J., 2001, *ApJSS*, **278**, 105
- Wagner, S. J.; Camenzind, M.; Dreissigacker, O.; Borgeest, U.; Britzen, S.; Brinkmann, W.; Hopp, U.; Schramm, K.-J. y von Linde, J., 1995, *A&A*, **298**, 688
- Wagner, S. J.; Witzel, A.; Krichbaum, T. P.; Wegner, R.; Quirrenbach, A.; Erkens, U.; Khanna, R. y Zensus, A., 1993, *A&A*, **271**, 344
- Wagner, S. J. y Witzel, A., 1995, *ARA&A*, **33**, 163
- Wagner, S.; Sanchez-Pons, F.; Quirrenbach, A. y Witzel, A., 1990, *A&A*, **235**, L1
- Wall, J. V., & Peacock, J. A. 1985, *MNRAS*, **216**, 173
- Walsh, D.; Carswell, R. F. y Weymann, R. J., 1979, *Nature*, **279**, 381
- Wambsganss, J., 2001a, *ASPC*, **239**, 351
- Wambsganss, J., 2001b, *PASAAu*, **18**, 207
- Wambsganss, J.; Schmidt, R. W.; Colley, W.; Kundic, T. y Turner, E. L., 2000, *A&A*, **362**, L37
- Wandel, A. y Petrosian, V., 1988, *ApJ*, **329**, L11
- Wang, J.-M.; Ho, L. C. y Staubert, R., 2003, *A&A*, **409**, 887
- Wang, J.-M., & Kusunose, M. 2002, *ApJS*, **138**, 249
- Warren, W. H.; Sande, C. B.; Millar, A. C. y Home, A. T., 1999, *JAVSO*, **27**, 148
- Webb, W. y Malkan, M., 2000, *ApJ*, **540**, 652
- Weedman, W. D., 1983, *ApJ*, **266**, 479
- White, R. L.; Becker, R. H.; Gregg, M. D. et al. 2000, *ApJS*, **126**, 133
- Whiting, M. T.; Webster, R. L. y Francis, P. J., 2001, *MNRAS*, **323**, 718
- Wiita, P. J. 1996, in Blazar continuum Variability, ed. H. R. Miller, J. R. Webb, & J. C. Noble (San Francisco: ASP), *ASP Conf. Ser.*, **110**, 42
- Wiita, P. J.; Gopal-Krishna y Sagar, R., 1993, *AAS*, **183**, 106.08
- Wiita, P. J.; Mangalam, A. V. y Chakrabarti, S. K., 1992, *žit AIPC*, **254**, 251
- Wiita, P. J. y Chakrabarti, S. K., 1991, *BAAS*, **23**, 1423
- Wiita, P. J., 2005 (astro-ph/0507141)
- Wilson, A. S.; Helfer, T. T.; Haniff, C. A. y Ward, M. J., 1991, *ApJ*, **381**, 79
- Wisotzki, L.; Kohler, T. Y Reimers, D., 1995, *A&A*, **297**, L59

- Woltjer, L., 1990, en *Active Galactic Nuclei*, rf. T. J.-L., Couvoisier y M. Mayor, (Berlin, Springer), 57
- Wright, A. E. 1984, *PASA*, **5**, 510
- Wright, S. C., McHardy, I. M., & Abraham, R. G. 1998, *MNRAS*, **295**, 799
- Wyckoff, S., Gehren, T., & Wehinger, P. A. 1981, *ApJ*, **247**, 750
- Wyckoff, S.ä; Wehinger, P. A.; Gehren, T. y Spinrad, H., 1982, *BAAS*, **14**, 908
- Xie, G. Z.; Li, K.; BAi, J. M.; Dai, B. Z.; Liu, W. W.; Zhang, X. y Xing, S. Y., 2001, *ApJ*, **548**, 200
- Xie, G. Z.; Zhou, S. B.; Li, K. H.; Dai, H.; Chen, L. E. y Ma, L., 2004, *MNRAS*, **348**, 831
- Yee, H. K. y Green, R. F., 1987, *AJ*, **94**, 618
- Zeldovich y Novikov, 1964, *Doklady Acad. Nauk. SSSR*, **158**, 811
- Zhang, X.-H. y Bao, G., 1991, *A&A*, **246**, 21
- Zheng, W.; Kriss, G. A.; Telfer, C.; Grimes, J. P.; Davidsen, A. F., 1997, *ApJ*, **475**, 469
- Zombeck, M. V., 1990, *Handbook of space Astronomy and Astrophysics, Second Edition* (Cambridge, UK: Cambridge University Press)