

## Fenómenos violentos en núcleos galácticos activos

Sergio A. Cellone

FCAG, UNLP – IALP, CONICET, Argentina.

scellone@fcaglp.unlp.edu.ar

**Abstract.** High spatial resolution, multifrequency observations are required to study active galactic nuclei (AGN). At the same time, variability observations are a powerful complementary tool to test those innermost regions in AGN that cannot be resolved. This review presents an update on these kinds of observational studies, with particular emphasis on some violent phenomena in AGN.

**Resumen.** El estudio de los núcleos galácticos activos (AGN) requiere observaciones a distintas frecuencias y con la más alta resolución espacial. En forma complementaria, la observación de fenómenos de variabilidad es una herramienta poderosa para explorar las regiones más internas de estos objetos, que no pueden resolverse espacialmente. En este informe se presenta una puesta al día sobre estos tipos de estudios observacionales, con especial énfasis en algunos eventos violentos en AGN.

### 1. Introducción

Cuatro décadas atrás, Maarten Schmidt (1963) determinó un corrimiento al rojo  $z = 0.158$  para la contraparte óptica casi estelar de la radiofuente 3C 273, lo que permitió determinar su magnitud absoluta y acotar su tamaño. El resultado obtenido planteó el desafío de explicar cómo puede generarse una luminosidad mayor que la de una galaxia en un volumen similar al del Sistema Solar.

Originalmente, otras fuentes semejantes a 3C 273 recibieron el nombre de *quasars* (QSS, *quasi stellar sources*), mientras que aquellos objetos con propiedades similares, salvo por no presentar emisión intensa en radio, se llamaron *quasi stellar objects* (QSO). Hoy en día, el nombre de cuasar y el acrónimo QSO se extienden a ambos tipos de objetos. Se habla, entonces, de quasars “radio intensos” (RLQ, *radio loud quasars*) y de quasars “radio silenciosos” (RQQ, *radio quiet quasars*). La posterior comprensión de que galaxias Seyfert y radiogalaxias son versiones menos poderosas del mismo fenómeno (análogas a RQQ y RLQ, respectivamente) llevó a la inclusión de todos estos objetos dentro de lo que llamamos núcleos galácticos activos (AGN). (Ver Shields 1999 para una amena revisión histórica.)

De hecho, dos características básicas que distinguen a los AGN son:

1. alta emisión de energía en todo el espectro
2. variabilidad.

La primera determina la masa ( $M$ ), dado que el balance entre presión de radiación y gravedad requiere que la luminosidad bolométrica no supere el límite

de Eddington:

$$L_E = \frac{4\pi G c m_p M}{\sigma_e},$$

donde  $m_p$  y  $\sigma_e$  son la masa del protón y la sección eficaz del electrón, respectivamente, y el resto de los símbolos tiene su significado habitual.

Por su parte, la segunda característica implica que el tamaño del “motor” central debe estar acotado por

$$\Delta x \leq c \Delta t.$$

Haciendo las cuentas, resulta que se generan hasta  $\sim 10^{13} L_\odot$  en unos pocos parsecs cúbicos. La fusión nuclear es insuficiente, y la alternativa es la conversión de energía gravitacional, con un agujero negro super-masivo (SMBH,  $M_{\text{BH}} \lesssim 10^9 M_\odot$ ) como motor central acretando materia de sus alrededores.

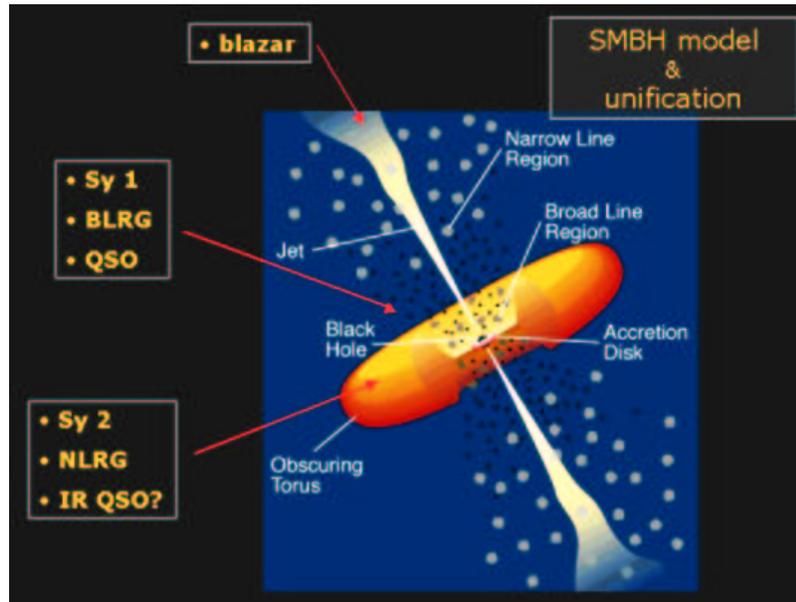


Figura 1. El modelo estándar y la unificación de los distintos tipos de AGN.

El amplio rango espectral de la emisión electromagnética sugiere una estructura compleja para la fuente central, con distintas componentes emitiendo a distintas frecuencias. El modelo más aceptado comprende un SMBH central rodeado de un disco de acreción (AD) y un anillo grueso de gas y polvo (DT: *dusty torus*), con dos jets de plasma eyectados perpendicularmente al disco, en direcciones opuestas. Este modelo permite además unificar distintos tipos de AGN según su orientación con la visual (ver Fig. 1). En particular, cuando ésta coincide con la dirección del jet, se observa un AGN altamente variable y de espectro “liso” conocido como *blazar*. (Ver, p. ej.: Urry & Padovani 1995, Urry 2003, y

referencias allí citadas.)

Los modelos alternativos involucran formación estelar violenta (*starbursts*), aunque sus partidarios comienzan a admitir que la controversia entre “monstruo” (como se suele llamar al SMBH) y *starburst* está dando paso a la comprensión de que ambos fenómenos conviven y cada uno jugaría su papel para determinar las distintas características de los AGN (Cid Fernandes 2005).

Quizás una de las evidencias más fuertes en favor del modelo estándar de SMBH + AD + jets haya sido el descubrimiento de los *microquasars* galácticos (Mirabel & Rodríguez 1994), prácticamente versiones a escala reducida de un AGN.

Recientemente, la posibilidad de obtener observaciones con alta resolución espacial en distintas frecuencias produjo importantes aportes para revelar la estructura más interna de los AGN. En la Sec. 2 se ven algunos ejemplos al respecto, mientras que en la Sec. 3 se discute el aporte obtenido mediante observaciones ópticas con alta resolución temporal.

## 2. Observaciones multifrecuencia y de alta resolución espacial

### 2.1. QSO oscurecidos

Un problema persistente para el modelo estándar ha sido la aparente falta de quasars “tipo 2” (IR QSO, ver Fig. 1), es decir, AGN muy luminosos pero con la visual a su zona central bloqueada, como ocurre en las Seyfert 2 y las NLRG. Recientemente, utilizando datos de Chandra (en rayos-X) y del HST (en el óptico), se han identificado algunas decenas de candidatos a quasars tipo 2. Dado que los rayos-X blandos ( $S$  : 0.5 – 2 keV) son más absorbidos por el gas en el DT que los rayos-X duros ( $H$  : 2 – 8 keV), definiendo un índice de “dureza”:  $HR = \frac{H-S}{H+S}$ , la cota  $HR \geq 0.2$  permite seleccionar candidatos a QSO oscurecidos, que son posteriormente identificados en imágenes ópticas con el HST (Padovani et al. 2004, Vignali et al. 2004, Brusa et al. 2005).

En AGN más cercanos, imágenes de óptica adaptable en el infrarrojo con telescopios de 8-10 m han permitido detectar lo que podría ser la emisión del DT (Almudena Prieto & Meisenheimer 2005). Incluso, en la radiogalaxia Cygnus A ( $z = 0.056$ ) se habría logrado detectar el borde interno del DT, calentado por la radiación de la zona más central del AGN (Canalizo et al. 2005).

### 2.2. La dicotomía RQ–RL

Otra pregunta que se mantiene vigente es por qué existen dos tipos de AGN según su luminosidad en radio: los radio silenciosos (RQ) y los radio intensos (RL). Los RQ son mayoría (85–90%), y la línea divisoria entre ambas clases se suele ubicar en el cociente de flujos radio/óptico  $\frac{F_{5\text{GHz}}}{F_B} \simeq 10$ . Aunque se ha sugerido que existiría un continuo en las propiedades de radio de los AGN (ej.: Blundell 2003), el hecho de que los RL siempre se dan en galaxias elípticas mientras que los RQ tienden a evitarlas apunta a una dicotomía RQ–RL.

En uno u otro caso, la potencia en radio del AGN quedaría determinada por la rotación (*spin*) del SMBH, capaz de proveer la energía necesaria para acelerar el material de los jets hasta escalas de kiloparsecs, pero sin afectar la emisión

entre el IR y los rayos-X, que depende de la acreción, y no difiere entre RL y RQ (Wilson & Colbert 1995).

Los SMBH con alto spin se producirían por la coalescencia de dos SMBH en un sistema binario resultante de la fusión (*merger*) de dos galaxias, cada una con su SMBH central. Algunos de los primeros resultados observacionales que dan sustento directo a este esquema son la detección con VLBA de un período orbital de 1.05 años para el *core* de la radiogalaxia 3C 66A (Sudou et al. 2003), y el descubrimiento en rayos-X (con Chandra) de un AGN binario en NGC 6240, una galaxia ultraluminosa en IR (Komossa et al. 2003)

La alternativa de que el SMBH adquiera spin por la acreción de material también parece posible. En el caso del blazar H1517+656 habría evidencias de acreción en el plano perpendicular al jet, tras un *merger* reciente (O'Dowd et al. 2005).

### 2.3. La relación jet – disco

Una adecuada combinación de observaciones multifrecuencia, con alta resolución espacial y cubrimiento temporal, ha permitido mostrar en forma fehaciente la vinculación entre el disco de acreción y el radio-jet en un AGN, fenómeno ya conocido en microcuasars (Mirabel & Rodríguez 1994).

En el caso de la radiogalaxia 3C 120 ( $z = 0.033$ ), Marscher et al. (2002) combinaron 3 años de observaciones en X (2.4 – 20 keV) del satélite RXTE con interferometría en radio de la evolución del jet obtenida con el VLBA. Sus resultados muestran que los mínimos en el flujo X coinciden con cambios en el espectro (se hace más “duro”), señalando la desaparición de la parte más interna del disco de acreción al cruzar el horizonte de eventos del SMBH, mientras que la corona del disco, responsable de la emisión X más energética, no se ve prácticamente afectada. Dado que además las eyecciones de componentes supralumínicas en el jet de radio se producen unos 40 días después de cada mínimo en la curva de luz en rayos-X, se estaría viendo parte del material del disco interno que fue acelerado hacia los jets.

## 3. Variabilidad óptica

Si bien la interferometría permite resolver espacialmente la emisión de los jets en radiofrecuencias, alcanzando escalas de kiloparsecs, e incluso de parsecs en los objetos más cercanos, el resto de las componentes en la gran mayoría de los AGN quedan muy por debajo de la resolución alcanzable aun desde el espacio. Esto se ilustra en la Tabla 1, que da los tamaños aproximados de las componentes de un AGN típico con  $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$ . En particular, la cuarta columna da los correspondientes tamaños angulares suponiendo una distancia  $d = 1$  Gpc. Por otra parte, en la Sección 2.3 también se vió que las observaciones de variabilidad temporal del flujo en distintas frecuencias pueden aportar datos importantes sobre las regiones del AGN que no se resuelven espacialmente. En lo que sigue se discutirán algunos aportes al tema desde la variabilidad en el rango óptico.

Tabla 1 Tamaños aproximados de las componentes de un AGN con  $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$  a una distancia  $d = 1 \text{ Gpc}$

Componente	Tamaño		
	tiempo-luz	[UA] – [pc]	[arcsec]
$R_{\text{S}}$	15 min	2 AU	$2 \times 10^{-9}$
Disco acrec.	1 h $\sim$ 1 d	7 $\sim$ 200 AU	$7 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-7}$
BLR	8 $\sim$ 80 d	$10^3 \sim 10^4$ AU	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
$R_{\text{DT}}$ (interno)	$\sim$ 40 d	$\sim 5 \times 10^3$ AU	$5 \times 10^{-6}$
NLR	1 $\sim$ 100 yr	0.3 $\sim$ 30 pc	$5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3}$
jets de radio	40 d $\sim$ $10^6$ yr	0.03 pc $\sim$ 300 kpc	$5 \times 10^{-6} \sim 60$

Prácticamente todos los AGN experimentan variaciones de flujo a lo largo de todo el espectro, tanto en el continuo como en las líneas de emisión, en escalas temporales que van de días a años. De hecho, la variabilidad suele ser un criterio de detección de quasars (ej.: Mushotzky 2004). Pero es justamente el fenómeno de variación a escalas de horas o minutos (usualmente conocido como *microvariabilidad*) el que aporta datos sobre las zonas más internas de los AGN. Los modelos propuestos para explicar el origen de la (micro)variabilidad en AGN pueden clasificarse como sigue (ej.: Blandford & Rees 1978, Mangalam & Wiita 1993, Romero 1995):

- Intrínsecos

- *Shock-in-jet*: una onda de choque delgada, relativista, impacta una inhomogeneidad o curva del jet (escala de pcs). La variación de flujo es función de  $\lambda$ .
- Modelos geométricos: cambia la orientación del jet respecto del observador  $\Rightarrow$  cambia el factor Doppler. La variación de flujo es acromática.
- *Hot-spot*: inestabilidades en la superficie del disco de acreción.

- Extrínsecos

- Microlente gravitacional.
- Centelleo (sólo radio).

Sin descartar completamente los efectos de microlente gravitacional en algunos casos (Stickel et al. 1988, Nilsson et al. 1996), generalmente se acepta que los modelos tipo *shock-in-jet* son los más adecuados para explicar las variaciones del flujo óptico en los blazars. Los AGN de esta clase presentan un continuo óptico “plano” y generalmente polarizado, de origen no térmico, y comprenden a los objetos BLLac (caracterizados por líneas de emisión muy débiles o ausentes) y a los FSRQ (radio-quasars de espectro plano). En los blazars se supone que la dirección de propagación del jet coincide prácticamente con la visual, por lo que los efectos relativistas son importantes. El flujo observado en una banda

fotométrica resulta amplificado en un factor  $\delta^4$  con respecto al flujo intrínseco, donde

$$\delta = [\gamma (1 - \beta \cos \theta)]^{-1}$$

es el factor Doppler,  $\beta = v/c$  es la velocidad del material en el jet respecto de la de la luz, y

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{1/2}$$

es el factor de Lorentz. Por su parte, la escala temporal de variabilidad se reduce en un factor  $\delta$  con respecto al marco de referencia de la fuente (ej.: Urry & Padovani 1995). Como se verá más adelante, este es el único mecanismo plausible para explicar fenómenos de variabilidad violenta en algunos objetos.

### 3.1. Variabilidad a largo plazo

En escalas temporales de años, para ciertos blazars se detectan variaciones de algunas magnitudes. Por ej.: Ciprini et al. (2003) reportan que el objeto BL Lac GC 0109+224 varió entre  $R = 13.3$  y  $R = 16.4$  en el lapso 1995 – 2002, mientras que Raiteri et al. (2001) muestran una variación de casi 5 mag en menos de un año para AO 0235+64.

Habría dos (o más) mecanismos actuando en distintas escalas de tiempo. Mientras que durante los *outbursts* (escalas de días o menores) el espectro se hace más plano (duro) cuanto mayor es el flujo, lo que indica enfriamiento radiativo, el comportamiento a largo plazo es acromático. Esto último favorece modelos de geometría variable o cambios en el factor de Lorentz global sobre los modelos que involucran cambios en la aceleración o en la tasa de enfriamiento de los electrones del jet (ver también Villata et al. 2004).

Los modelos de microlente gravitacional también pueden producir variaciones acromáticas del flujo, pero, en objetos como PKS 2155–304, quedan excluidos por ser también variables en el porcentaje de polarización (Courvoisier et al. 1995).

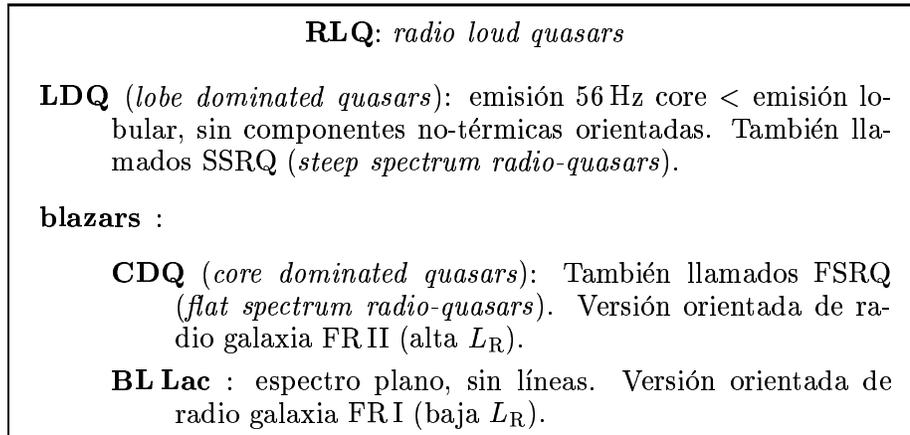
### 3.2. Variabilidad intra noche (microvariabilidad)

Con la generalización del uso de los CCD, que permiten alcanzar precisiones de unas pocas centésimas de magnitud mediante fotometría diferencial, se hizo evidente que algunos AGN experimentan lo que dio en llamarse *microvariabilidad* o variabilidad intra-noche: variaciones  $\gtrsim 2 - 5\%$  en el nivel de flujo, en escalas temporales que van desde unos pocos minutos a unas 10 horas (Miller et al. 1989, Carini et al. 1990).

El estudio de muestras comparables de AGN de tipos RL y RQ permite discriminar entre modelos de variabilidad que involucran inestabilidades en el disco de acreción y aquellos basados en shocks o cambios geométricos en el jet. Esto se debe a que, dado que en los RQ no habría jets relativistas prominentes, cualquier variación en el flujo debería originarse en el disco de acreción.

Los resultados muestran que, mientras alrededor del 60% de los RL son variables en escalas “intra-noche”, prácticamente no se detecta microvariabilidad en

Figura 2. Esquema de clasificación para quasars radio intensos



ningún AGN de tipo RQ, al nivel de unas pocas centésimas de magnitud (Jang & Miller 1995, 1997; Romero et al. 1999), lo cual favorece a los modelos tipo *shock-in-jet*.

En una serie de trabajos recientes, el grupo de la Pune University (Gopal-Krishna et al. 2003; Sagar et al. 2004; Stalin et al. 2003, 2004, 2005) analizó más específicamente las propiedades de variabilidad “intra-noche” de varias muestras de quasars, discriminando entre los distintos tipos de RLQ (ver Fig. 2).

Sus resultados muestran que el fenómeno de microvariabilidad es más frecuente, y con mayores amplitudes, en un subconjunto de los blazars compuestos por los objetos BL Lac y los FSRQ con alta polarización (HPQ). La probabilidad de detectar microvariabilidad con amplitudes > 3% es  $\gtrsim 50\%$  en ambas clases. Este resultado es coherente con el hecho de que la polarización se asocia a shocks en jets relativistas (ver Andruchow et al., este volumen).

En escalas temporales más largas (semanas – años) todos los CDQ y BL Lac muestran variabilidad.

En cuanto a los RQQ, y contra lo dicho anteriormente, también presentarían microvariabilidad durante  $\sim 1/6$  del tiempo, aunque con amplitudes  $\sim 1\%$ . Se interpreta como que los RQQ también tendrían (micro)jets ópticos modestamente no alineados con la visual. El jet no llegaría a extenderse lo suficiente como para emitir (intensamente) en radio debido a pérdidas por efecto Compton inverso (que se emiten como radiación X dura).

### 3.3. Fenómenos violentos en el óptico

Uno de los AGN más violentamente variables es AO 0235+164, un objeto BL Lac con  $z = 0.94$  (ver 3.1). En noviembre de 1999 este objeto experimentó uno de los eventos de microvariabilidad más violentos que se hayan registrado: su flujo óptico amentó  $\sim 1.2$  mag en  $\sim 24$  hs, con variaciones intra-noche de hasta  $\sim 0.5$

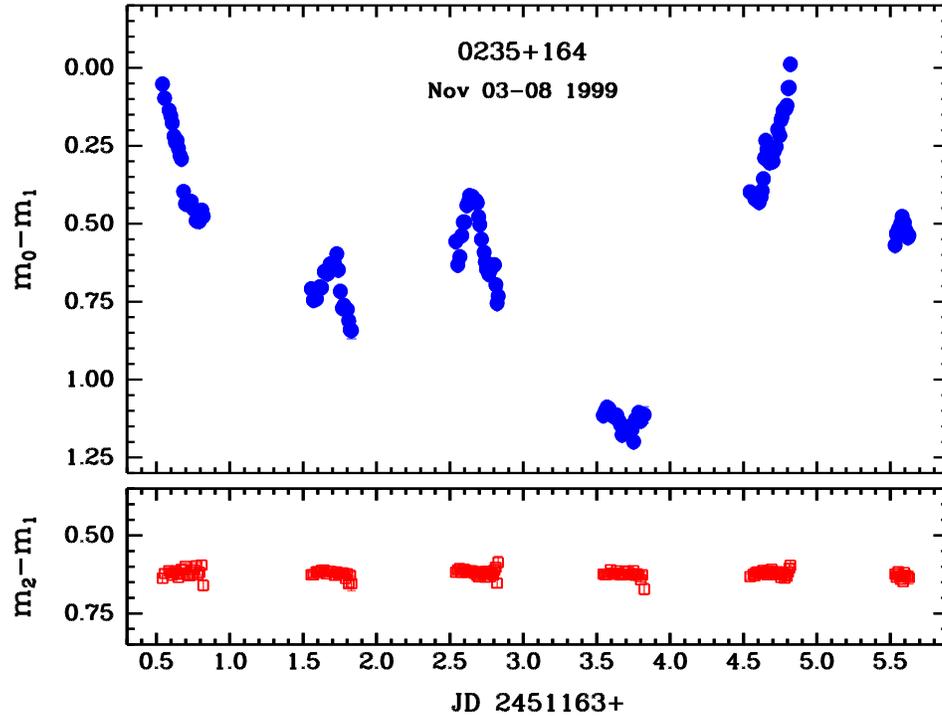


Figura 3. Curva de luz diferencial (banda  $V$ ) para AO 0235+164 respecto de una estrella de comparación (panel superior), y para una estrella de control (panel inferior). Datos correspondientes a noviembre de 1999.

mag (Romero, Cellone, & Combi 2000; ver Fig. 3). La violencia del evento (gran variación de flujo en poco tiempo) requiere invocar efectos relativistas en el jet, prácticamente invalidando cualquier modelo alternativo basado en inestabilidades en el disco de acreción, más aún modelos starburst.

A lo largo de las 6 noches de observación, el índice espectral cambió levemente, de modo que el espectro resultó más “duro” (azul) cuanto más brillante. Esto sugiere un origen *shock-in-jet* para el evento; las pérdidas radiativas explican el comportamiento espectral.

Sin embargo, la 3ra. noche de observación se registró un evento eruptivo ( $\Delta m \simeq -0.20$  mag, seguido de  $\Delta m \simeq +0.35$  mag) prácticamente acromático, lo que sugiere para el mismo un origen geométrico. Por ejemplo, un cambio del ángulo del jet respecto de la visual  $\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = 1^\circ$ , para un factor de Lorentz  $\gamma = 25$ , produciría un cambio en el factor Doppler  $\delta = 50 \rightarrow \delta = 42$ , originando una disminución del flujo observado  $|\Delta F| = 70\%$ .

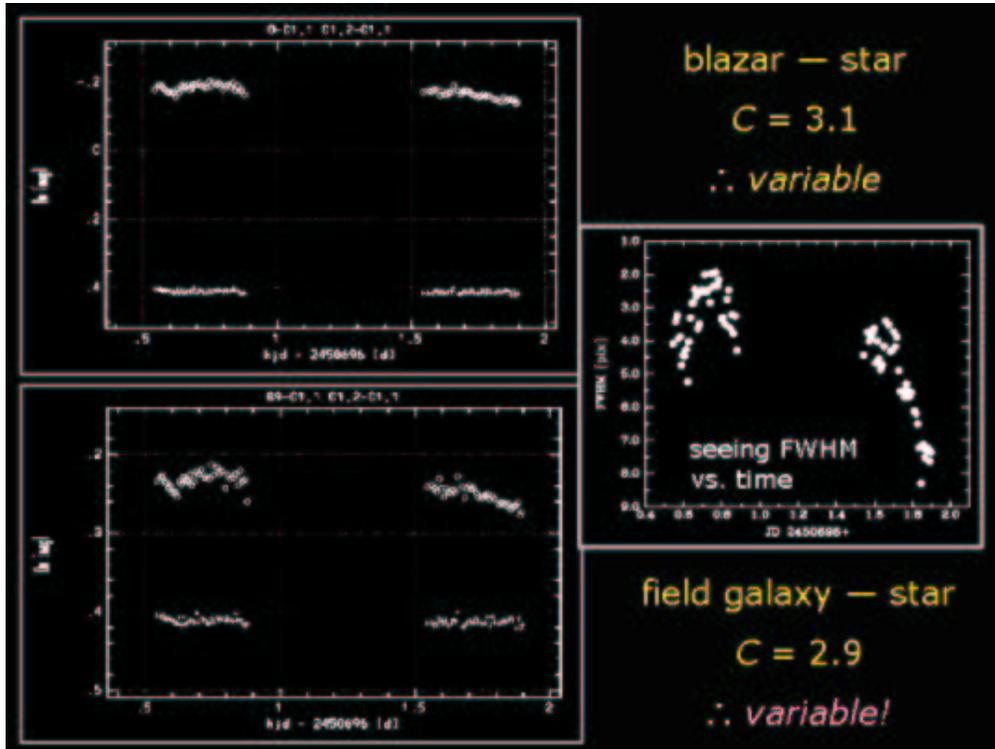


Figura 4. Curva de luz diferencial (banda  $V$ ) para el blazar PKS 2316–423 (*arriba-izq.*) y para una galaxia de campo (*abajo-izq.*). *Derecha*: evolución temporal del tamaño de la imagen (FWHM).

### 3.4. Errores sistemáticos

Otros autores (Dai et al. 2001; Xie et al. 2001, 2002) han reportado variaciones de hasta 2 mag ( $\Delta F \simeq 500\%$ ) en menos de 15 min para algunos blazars. De confirmarse estos eventos, se requeriría un replanteo radical de los mecanismos básicos que operan en los AGN.

Sin embargo, es razonable suponer que la metodología empleada en estos casos favorece los errores sistemáticos: para la fotometría diferencial, los autores mencionados han usado como comparación y control estrellas hasta 5 mag más brillantes que el AGN, en contra de recomendaciones bien conocidas (Howell et al. 1988). De hecho, Romero et al. (2002) no han encontrado ninguna variación semejante en una amplia muestra de blazars, mostrando al mismo tiempo que la inadecuada selección de las estrellas de comparación / control puede generar variaciones espectaculares (pero espurias) en las curvas de luz.

Otra fuente de errores sistemáticos se debe a los efectos contaminantes de la luz de la galaxia anfitriona que contiene al AGN, cuando el FWHM de la imagen (*seeing*<sup>1</sup>) varía a lo largo de las observaciones.

Cellone et al. (2000) han mostrado que pueden generarse fuertes contribuciones espurias a la microvariabilidad observada mediante fotometría diferencial, debido a que el *seeing* afecta en forma diferente al perfil de la galaxia (fuente extendida) y a los perfiles del núcleo y estrellas de comparación (fuentes puntuales), de modo que cuando cambia el *seeing* se producen variaciones en la relación de flujos galaxia/núcleo medidos con una abertura fija.

La Fig. 4 muestra el caso de PKS 2316–423, un AGN con galaxia anfitriona prominente. La curva de luz resulta variable según los criterios estadísticos usuales, pero lo mismo ocurre para una galaxia normal del mismo campo y similar magnitud aparente. Se nota que los cambios (espurios) en las curvas de luz siguen cualitativamente la evolución temporal del *seeing*. Es conveniente, entonces, verificar la presencia o no de este tipo de comportamiento correlacionado con el *seeing* en casos de AGN con galaxias anfitrionas prominentes.

**Agradecimientos.** Agradezco al Comité Científico de la 47a. Reunión de la A<sup>3</sup> por su invitación para presentar este informe, y al IALP–CONICET por la ayuda económica.

#### Apéndice 1: Lista de acrónimos

**AD** : disco de acreción (*accretion disk*)

**AGN** : núcleo galáctico activo (*active galactic nucleus*)

**BLR** : región de líneas anchas (*broad line region*)

**CDQ** : cuasar con emisión de radio dominada por el core (*core dominated quasar*)

**DT** : anillo grueso de gas y polvo (*dusty torus*)

**FRI** : radiogalaxia de tipo Fanaroff-Riley I, con emisión de radio de baja potencia

**FR II** : radiogalaxia de tipo Fanaroff-Riley II, con emisión de radio intensa

**FSRQ** : radio-cuasar de espectro plano (*flat spectrum radio-quasar*)

**FWHM** : ancho total a medio máximo (*full width at half maximum*)

**HPQ** : cuasar con polarización alta (*high-polarization quasar*)

**HST** : Telescopio Espacial Hubble

**IR** : infrarrojo

**LDQ** : cuasar con emisión de radio dominada por los lóbulos (*lobe dominated quasar*)

**NLR** : región de líneas angostas (*narrow line region*)

**NLRG** : radio galaxia de líneas angostas (*narrow line radio galaxy*)

**QSO** : objeto casi estelar (*quasi stellar object*); originalmente cuasar no emisor en radio, se extiende a todo cuasar

---

<sup>1</sup>Se utiliza aquí el término *seeing* en un sentido amplio, involucrando tanto factores atmosféricos como del telescopio y su entorno. Ver Cellone (2004).

**QSS** : fuente casi estelar (*quasi stellar source*), quasar  
**RLQ, RL** : (quasar) radio-intenso (*radio loud [quasar]*)  
**RQQ, RQ** : (quasar) radio-silencioso (*radio quiet [quasar]*)  
**RXTE** : Satélite *Rossi X-Ray Timing Explorer*  
**SMBH** : agujero negro super-masivo (*super-massive black hole*)  
**SSRQ** : radio-quasar de espectro empinado (*steep spectrum radio-quasar*)  
**VLBA** : *very long baseline array*

## Referencias

- Almudena Prieto, M., & Meisenheimer, K. 2005, en: Proc. IAU Symp. 222, en prensa (astro-ph/0406653)
- Blandford, R. D., & Rees, M. J. 1978, Pittsburgh Conference on BL Lac Objects, Pittsburgh, p. 328-347
- Blundell, K. M. 2003, *New Astronomy Review*, 47, 593
- Brusa, M., Comastri, A., Daddi, E., et al. 2005, *A&A*, 432, 69
- Canalizo, G., Max, C., Antonucci, R., et al. 2005, en: Proc. from "Penetrating Bars through Masks of Cosmic Dust" Conf., en prensa (astro-ph/0406669)
- Carini, M. T., Miller, H. R., & Goodrich, B. D. 1990, *AJ*, 100, 347
- Cellone, S. A. 2004 (<http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~scellone/Informe.html>)
- Cellone, S. A., Romero, G. E., & Combi, J. A. 2000, *AJ*, 119, 1534
- Cid Fernandes, R. 2005, en: Proc. IAU Symp. 222, en prensa (astro-ph/0405561)
- Ciprini, S., Tosti, G., Raiteri, C. M., et al. 2003, *A&A*, 400, 487
- Courvoisier, T. J.-L., Blecha, A., & Bouchet, P., et al. 1995, *ApJ*, 438, 108
- Dai, B. Z., Xie, G. Z., Li, K. H., Zhou, S. B., Liu, W. W., & Jiang, Z. J. 2001, *AJ*, 122, 2901
- Gopal-Krishna, Stalin, C. S., Sagar, R., & Wiita, P. J. 2003, *ApJ*, 586, L25
- Howell, S. B., Warnock, A. I., & Mitchell, K. J. 1988, *AJ*, 95, 247
- Jang, M., & Miller, H. R. 1995, *ApJ*, 452, 582
- Jang, M., & Miller, H. R. 1997, *AJ*, 114, 565
- Komossa, S., Burwitz, V., Hasinger, G., Predehl, P., Kaastra, J. S., & Ikebe, Y. 2003, *ApJ*, 582, L15
- Mangalam, A. V., & Wiita, P. J. 1993, *ApJ*, 406, 420
- Marscher, A. P., Jorstad, S. G., Gómez, et al. 2002, *Nature*, 417, 625
- Miller, H. R., Carini, M. T., & Goodrich, B. D. 1989, *Nature*, 337, 627
- Mirabel, I. F., & Rodríguez, L. F. 1994, *Nature*, 371, 46
- Mushotzky, R. 2004, en "Supermassive Black Holes in the Distant Universe", ed. A. J. Barger, Kluwer Academic Publishers (Dordrecht), p. 53
- Nilsson, K., Charles, P. A., Pursimo, T., Takalo, L. O., Sillanpää, A., & Teerikorpi, P. 1996, *A&A*, 314, 754
- O'Dowd, M., Urry, C. M., Scarpa, R., Wayth, R. B., & Webster, R. L. 2005, *ApJ*, en prensa (astro-ph/0409392)

- Padovani, P., Allen, M. G., Rosati, P., & Walton, N. A. 2004, *A&A*, 424, 545
- Raiteri, C. M., Villata, M., Aller, H. D., et al. 2001, *A&A*, 377, 396
- Romero, G. E. 1995, *Ap&SS*, 234, 49
- Romero, G. E., Cellone, S. A., & Combi, J. A. 1999, *A&AS*, 135, 477
- Romero, G. E., Cellone, S. A., & Combi, J. A. 2000, *A&A*, 360, L47
- Romero, G. E., Cellone, S. A., Combi, J. A., & Andruchow, I. 2002, *A&A*, 390, 431
- Sagar, R., Stalin, C. S., Gopal-Krishna, & Wiita, P. J. 2004, *MNRAS*, 348, 176
- Schmidt, M. 1963, *Nature*, 197, 1040
- Shields, G. A. 1999, *PASP*, 111, 661
- Stalin, C. S., Gopal-Krishna, Sagar, R., & Wiita, P. J. 2003, *JAp&A*, 25,1
- Stalin, C. S., Gopal-Krishna, Sagar, R., & Wiita, P. J. 2004, *MNRAS*, 350, 175
- Stalin, C. S., Gupta, A. C., Gopal-Krishna, & Wiita, P. J., Sagar, R. 2005, *MNRAS*, 356, 607
- Stickel, M., Fried, J. W., & Kuehr, H. 1988, *A&A*, 198, L13
- Sudou, H., Iguchi, S., Murata, Y., & Taniguchi, Y. 2003, *Science*, 300, 1263
- Urry, C. M. 2003, en *ASP Conf. Ser. Vol. 311*, p. 49
- Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, *PASP*, 107, 803
- Vignali, C., Alexander, D. M., & Comastri, A. 2004, *MNRAS*, 354, 720
- Villata, M., Raiteri, C. M., Kurtanidze, O. M., et al. 2004, *A&A*, 421, 103
- Wilson, A. S., & Colbert, E. J. M. 1995, *ApJ*, 438, 62
- Xie, G. Z., Li, K. H., Bai, et al. 2001, *ApJ*, 548, 200
- Xie, G. Z., Zhou, S. B., Dai, et al. 2002, *MNRAS*, 329, 689