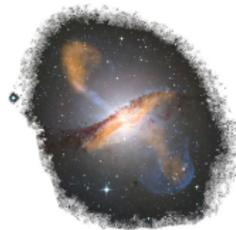


# Da atividade no núcleo das galáxias

Raniere Menezes



23 de novembro de 2017

# Da atividade no núcleo das galáxias

- ▶ Efeitos relativísticos (*beaming* + Doppler)
- ▶ Processos radiativos
- ▶ Introdução histórica aos AGN
- ▶ Espectros de AGN
- ▶ Tamanho da região emissora
- ▶ Buraco negro + disco de acreção
- ▶ Modelo unificado de AGN
- ▶ Propriedades do BN e disco
- ▶ Jatos
- ▶ Resumo

## Efeito de aberração relativística

Dadas as transformações de Lorentz para dois referenciais inerciais,  $K$  e  $K'$ , movendo-se com velocidade  $v$ , um em relação ao outro, na direção do eixo  $x$ :

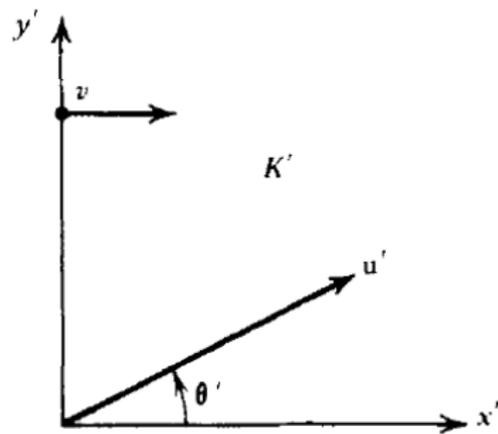
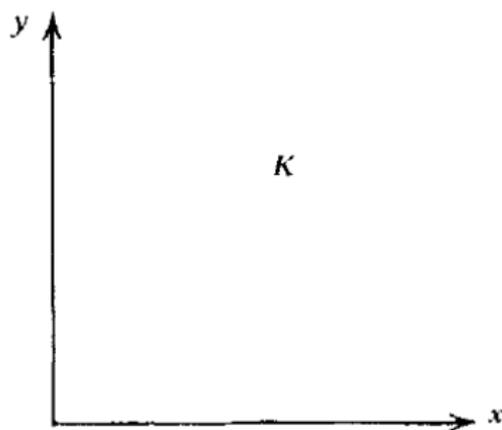
$$dx = \gamma(dx' + vdt') \quad (1a)$$

$$dy = dy' \quad (1b)$$

$$dz = dz' \quad (1c)$$

$$dt = \gamma(dt' + \frac{v}{c^2}dx') \quad (1d)$$

## Efeito de aberração relativística



## Efeito de aberração relativística

Uma partícula com velocidade  $u'$  em  $K'$  terá velocidade dada por

$$u_x = \frac{dx}{dt} = \frac{\gamma(dx' + vdt')}{\gamma(dt' + \frac{v}{c^2}dx')} = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}}, \quad (2)$$

e, analogamente,

$$u_y = \frac{u'_y}{\gamma(1 + \frac{vu'_x}{c^2})} \quad (3)$$

no referencial  $K$ .

## Efeito de aberração relativística

Se em  $K'$  a partícula move-se na direção  $\theta'$  dada por  $\tan \theta' = u'_y/u'_x$  (considerando apenas movimento no plano x-y), em  $K$ , a direção será

$$\tan \theta = \frac{u_y}{u_x} = \frac{u'_y}{\gamma(1 + \frac{vu'_x}{c^2})} \frac{(1 + \frac{vu'_x}{c^2})}{u'_x + v} = \frac{u'_y}{\gamma(u'_x + v)}, \quad (4)$$

mas como  $u'_y = u' \sin \theta'$  e  $u'_x = u' \cos \theta'$ , temos:

$$\tan \theta = \frac{u' \sin \theta'}{\gamma(u' \cos \theta' + v)}. \quad (5)$$

Da equação acima é fácil notar que, se uma partícula move-se perpendicularmente a  $v$  em  $K'$  (ou seja, se  $\theta' = \pi/2$ ), o mesmo não ocorre no referencial  $K$ !

## Efeito de aberração relativística

Em  $K$ , a partícula tem duas componentes de velocidade:  $u_x = v$  e  $u_y = u'/\gamma$  (ver equações 2 e 3), e, pela equação (5):

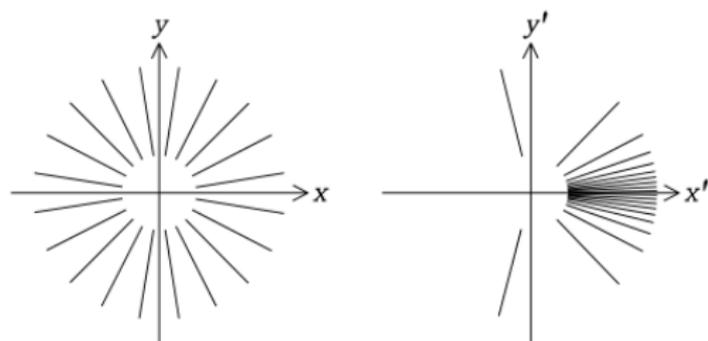
$$\tan \theta = \frac{u'}{\gamma v},$$

o que significa que  $\theta < \theta'$ . É importante notar que, se a partícula for um fóton,  $u' = c$  e, no regime ultrarrelativístico ( $v \sim c$ ), temos

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma}. \quad (6)$$

Em resumo, um corpo que emite radiação isotropicamente em seu referencial de repouso (uma estrela na origem de  $K'$ , por exemplo), possuirá emissão anisotrópica, concentrada na direção da velocidade relativa  $v$  entre os dois referenciais, no referencial  $K$ .

Ilustração do efeito de aberração relativística de um campo de radiação isotrópico (esquerda) visto pelo referencial de uma partícula em movimento com  $\gamma = 5$  (direita).



Fonte: <http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/InverseCompton.html>

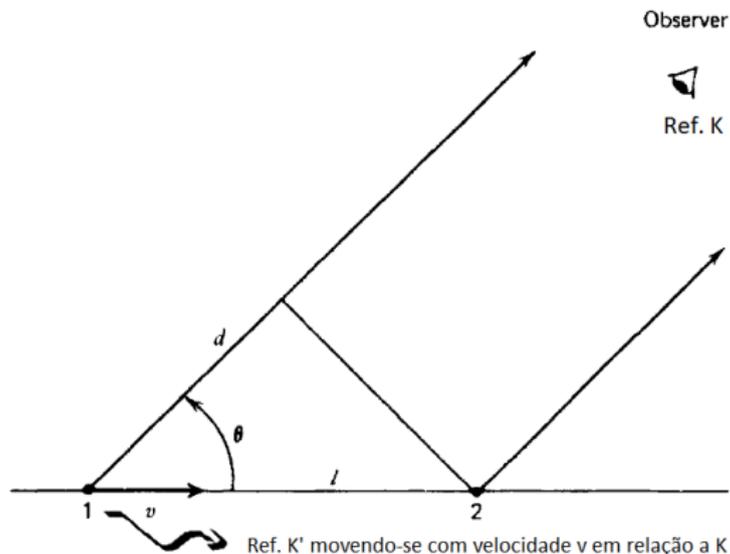
## Efeito Doppler

Considerando uma fonte de radiação em repouso no referencial  $K'$ , que desloca-se com velocidade  $v$  em relação ao referencial  $K$ , e que emite um pulso de radiação enquanto desloca-se do ponto 1 até o ponto 2 (em  $K$ ).

Se a frequência da radiação no referencial de repouso,  $K'$ , da fonte é  $\omega'$ , então o tempo decorrido para a fonte emitir um pulso de luz no referencial  $K$  é dado pelo efeito de dilatação temporal

$$\Delta t = \gamma \Delta t' = \frac{2\pi\gamma}{\omega'}.$$

## Efeito Doppler



Pelo esquema acima, notamos que  $l = v\Delta t$  e  $d = v\Delta t \cos \theta$ . Para o observador em  $K$ , a diferença entre os tempos de chegada  $\Delta t_{ch}$  do início e do final do pulso de radiação é

$$\Delta t_{ch} = \Delta t - \frac{d}{c} = \Delta t \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right).$$

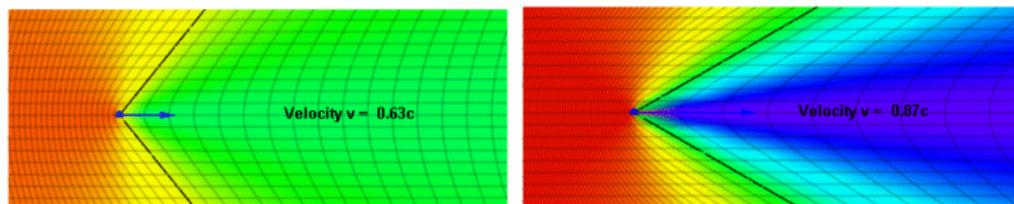
## Efeito Doppler

A frequência  $\omega$  da radiação observada em  $K$  será

$$\omega = \frac{2\pi}{\Delta t_{ch}} = \frac{\omega'}{\gamma(1 - \frac{v}{c} \cos \theta)} \longrightarrow \nu = \frac{\nu'}{\gamma(1 - \frac{v}{c} \cos \theta)}. \quad (7)$$

Onde o termo  $\gamma^{-1}$  é um efeito puramente relativístico, enquanto que o fator  $1 - (v/c) \cos \theta$  aparece mesmo na mecânica newtoniana.

# Ilustração do efeito de aberração relativística + efeito Doppler.

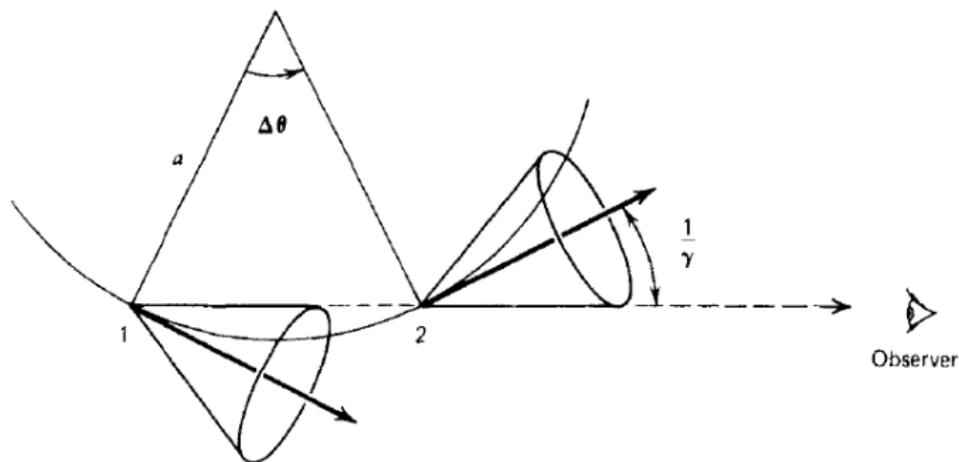


Relativistic Doppler effect – TxAlien, Creative Commons

[https://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic\\_Doppler\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_Doppler_effect).

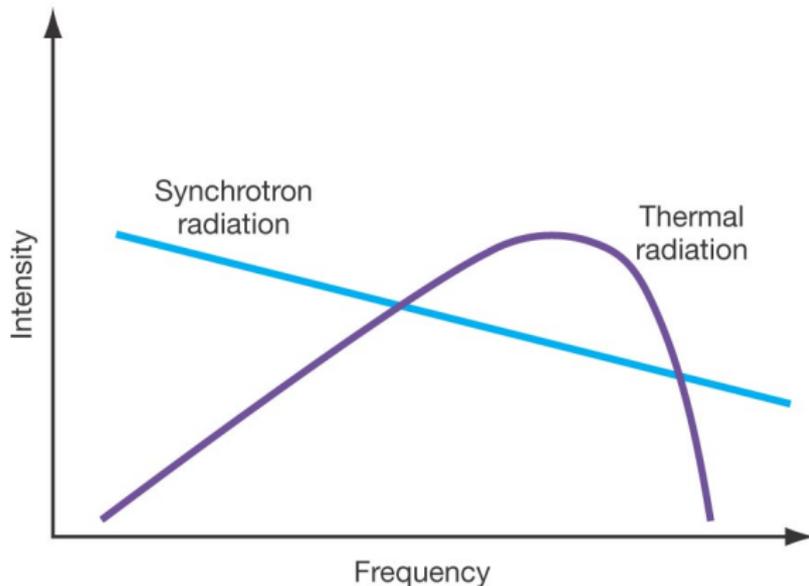
# Processos radiativos

# Partículas relativísticas carregadas e aceleradas por um campo magnético emitem radiação síncrotron.



Elétron acelerado num campo  $\vec{B}$  cte e perpendicular à tela.

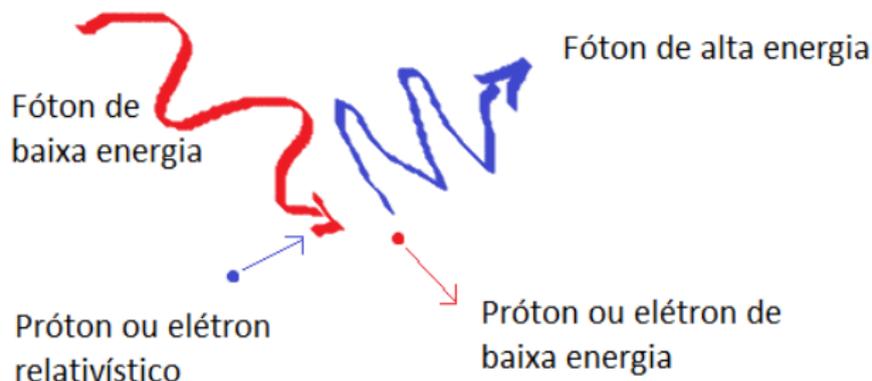
O distribuição espectral da radiação síncrotron emitida por uma população de  $e^-$  segue uma lei de potência.



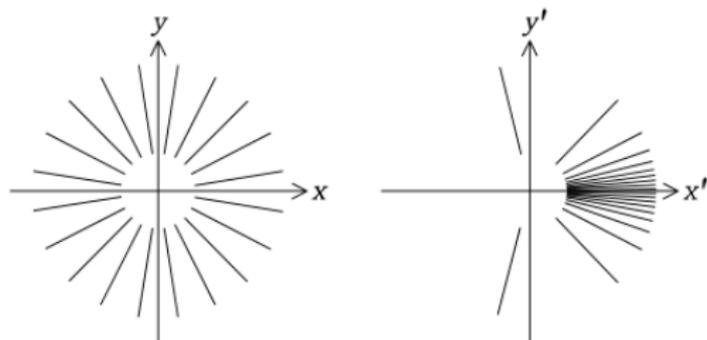
(b)

Copyright © 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Elétrons (ou p) relativísticos podem transferir energia para fótons pouco energizados via espalhamento Compton inverso.



## Espalhamento Compton inverso



Vamos supor um campo de radiação isotrópico no referencial  $K$ , onde um elétron  $e^-$  move-se em regime ultrarrelativístico. No referencial  $K'$ , onde o  $e^-$  encontra-se em repouso, o campo de radiação torna-se anisotrópico por conta do efeito de *beaming*.

## Espalhamento Compton inverso

O espalhamento Thomson desta radiação altamente anisotrópica sistematicamente reduz a energia cinética do  $e^-$  e a converte em radiação.

Para um elétron ultrarrelativístico interagindo com um fóton que aproxima-se pelo eixo  $x$  ( $\cos \theta = 1$ ), a frequência da radiação que o atinge em seu referencial de repouso é dada pela inversa da equação (7):

$$\nu'_0 = \nu_0 \left[ \gamma \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right) \right] \approx 2\gamma \nu_0. \quad (8)$$

## Espalhamento Compton inverso

No referencial de repouso do  $e^-$ , o espalhamento Thomson espalha o fóton sem mudar sua frequência ( $\nu_{esp} = \nu'_0$ ). No referencial do observador, o efeito *beaming* faz com que o fóton seja espalhado preferencialmente na direção do movimento do elétron e sua frequência é observada com um *blueshift* descrito por

$$\nu_{obs} = \nu_{esp} \left[ \gamma \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right) \right], \quad (9)$$

onde, no caso ultrarrelativístico,  $v/c \approx 1$ . No caso de  $\cos \theta \approx 1$ , temos:

$$\nu_{obs} \approx \nu_{esp} 2\gamma \approx 4\gamma^2 \nu_0. \quad (10)$$

No caso,  $\nu_{obs}$  representa a frequência máxima da radiação espalhada no referencial do observador.

# Núcleos ativos de galáxias

No final dos anos 50, várias fontes de rádio estavam sendo detectadas sem uma componente óptica óbvia.

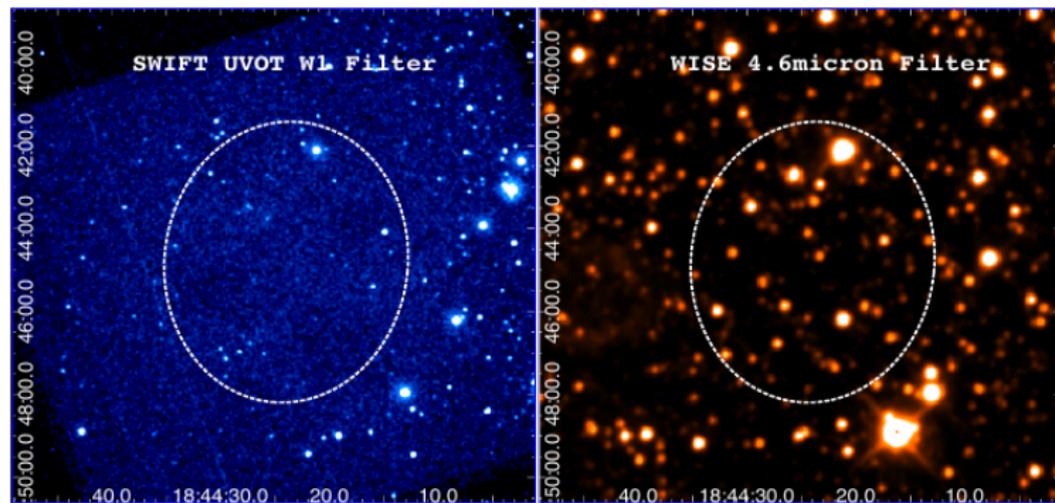
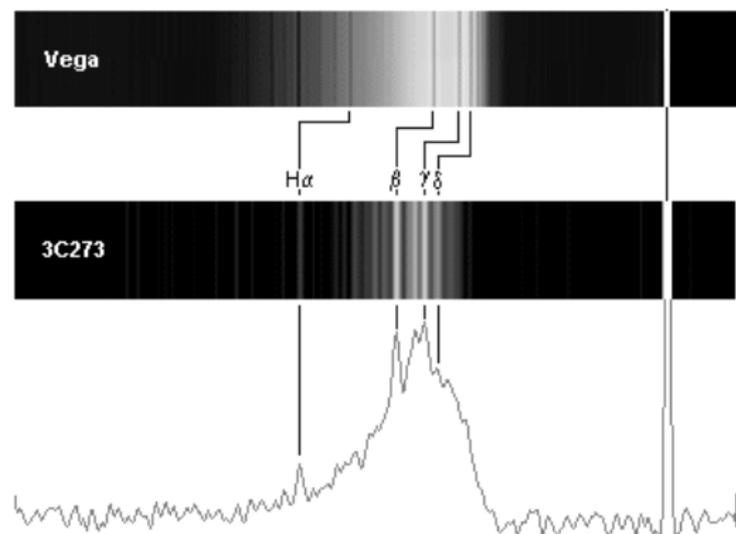


Imagem análoga (comparando, na verdade, UV, IR e raios- $\gamma$ )  
Massaro et al. (2015)

1962: a fonte de rádio 3C 273 foi ocultada pela Lua. O momento em que o sinal de rádio desapareceu marcou a posição precisa da fonte!



O redshift medido ( $z = 0,16$ ) indicava que o objeto estava se afastando de nós a 48000 km/s!



M. Gavin (1998)

Este tipo de objeto ficou conhecido como **quasar** (de *quasi-stellar object*).

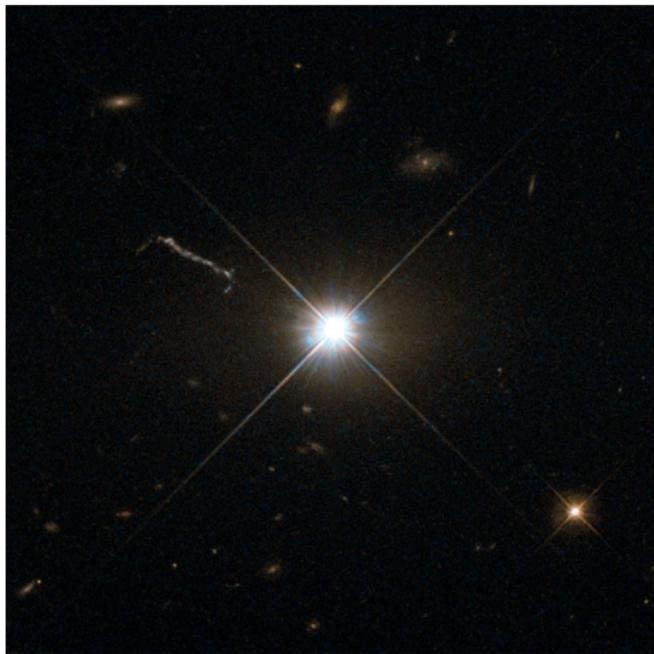
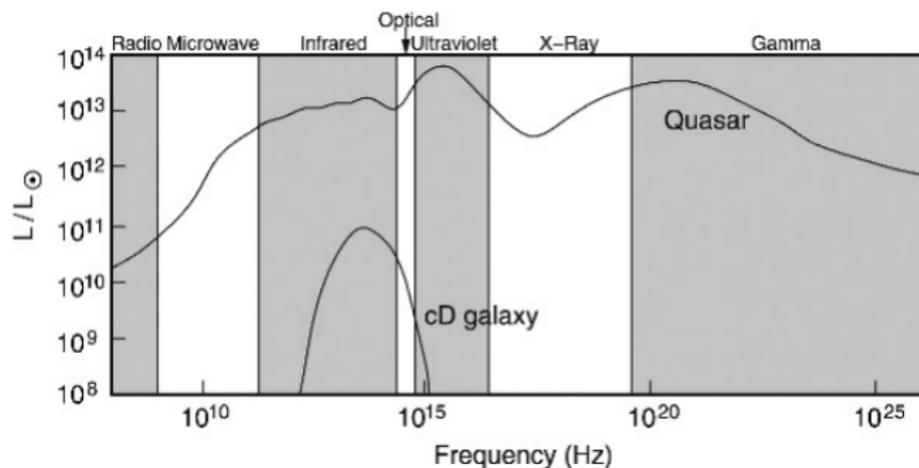


Imagem recente do 3C273 obtida com o HST.

A distribuição espectral de um quasar é muito mais ampla que a de uma galáxia inativa.



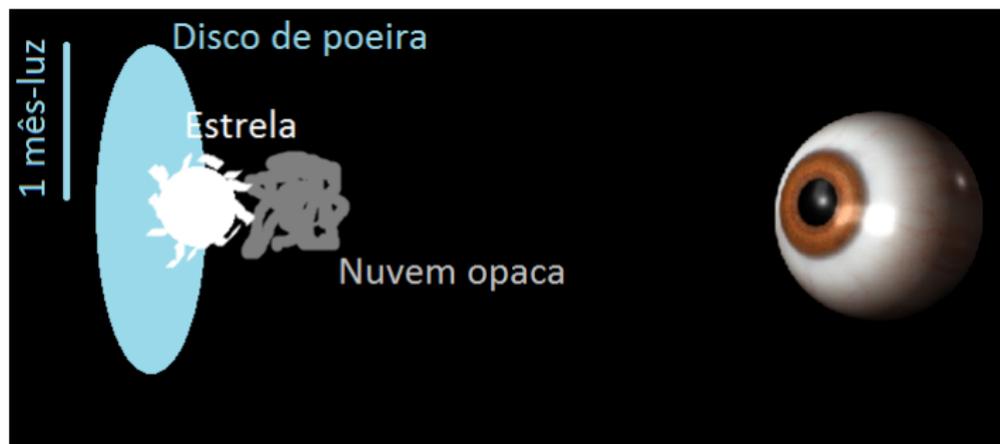
Schneider (2014).

Sua magnitude absoluta é de  $V \sim -26,5$ , enquanto que a magnitude absoluta da Via Láctea é  $V \sim -20,5$ .



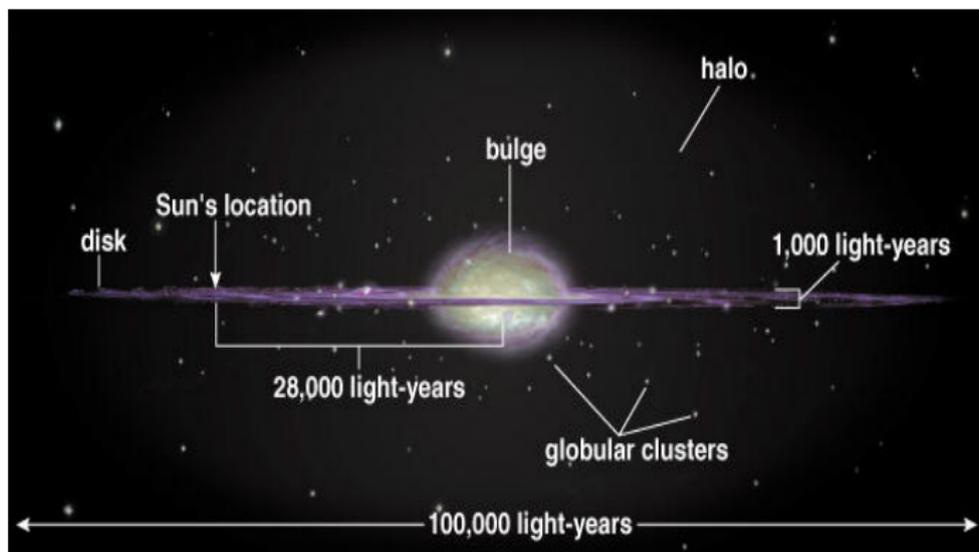
3C 273 é cerca de 250 vezes mais brilhante que a Via Láctea!

Podemos restringir o tamanho máximo possível da fonte com base em sua escala de tempo de variabilidade,  $t_{var}$ .

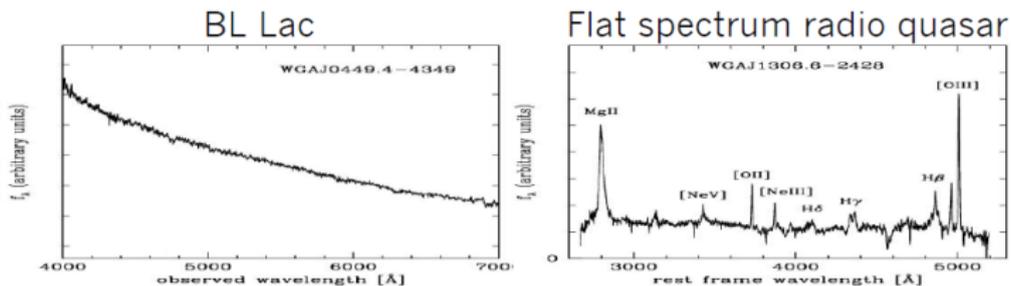


A região emissora tem que ser menor que a distância que a luz percorreu durante o tempo de variabilidade:  $d \lesssim \frac{2ct_{var}}{1+z}$ .

O tamanho típico da região emissora de quasares é da ordem de alguns dias-luz!



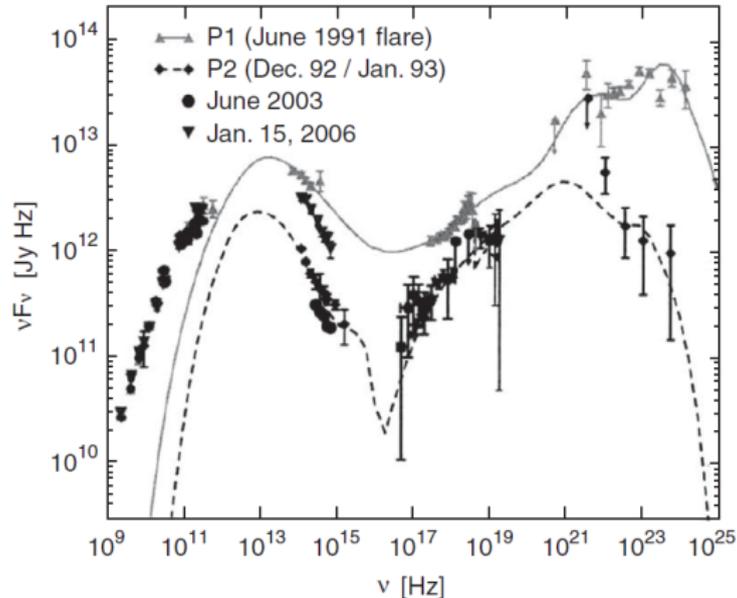
1968: BL Lacertae, catalogado anteriormente como uma estrela variável, emitia fortemente no rádio.



Mas seu espectro não apresentava linhas de absorção ou emissão!

Fonte: Padovani et al. (2012).

# Novas fontes semelhantes ao BL Lac foram encontradas e suas SED\* sempre apresentavam duas corcundas.



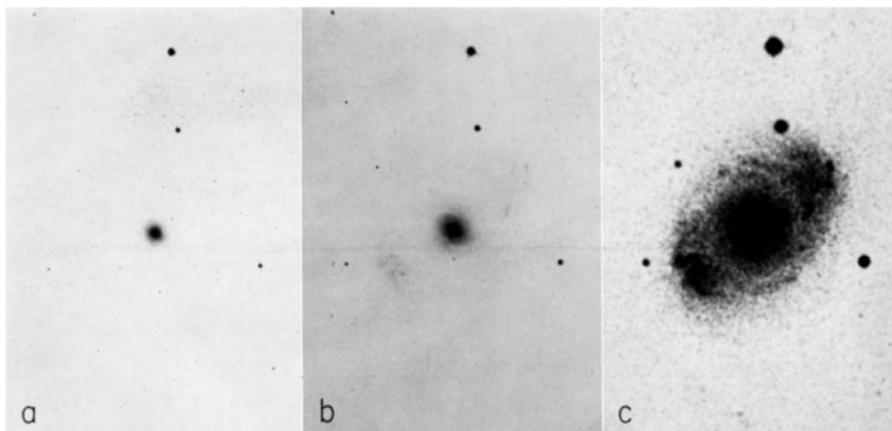
SED do 3C 279 - Fonte: Bottcher et al. (2007)

\*SED = distribuição espectral de energia.

## O que temos até então?

1. Objetos extragalácticos (alto *redshift*)
2. Forte emissão variável
3. Compactos e muito brilhantes
4. Linhas largas de emissão ou ausência de linhas
5. Distribuição espectral de energia que vai do rádio ao gama

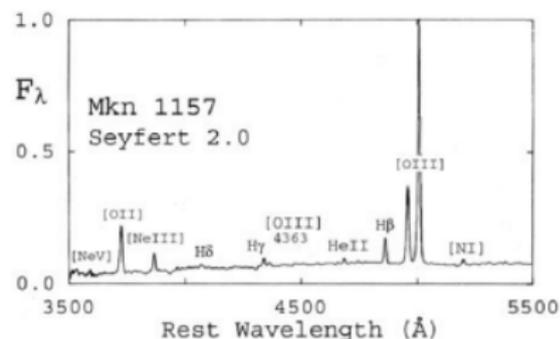
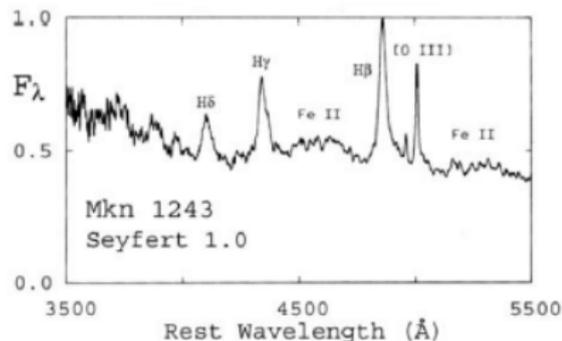
As galáxias Seyfert (1943) possuem núcleo incrivelmente luminoso e espectro parecido com o dos quasares.



Imagens da galáxia Seyfert NGC4151 com diferentes tempos de exposição.

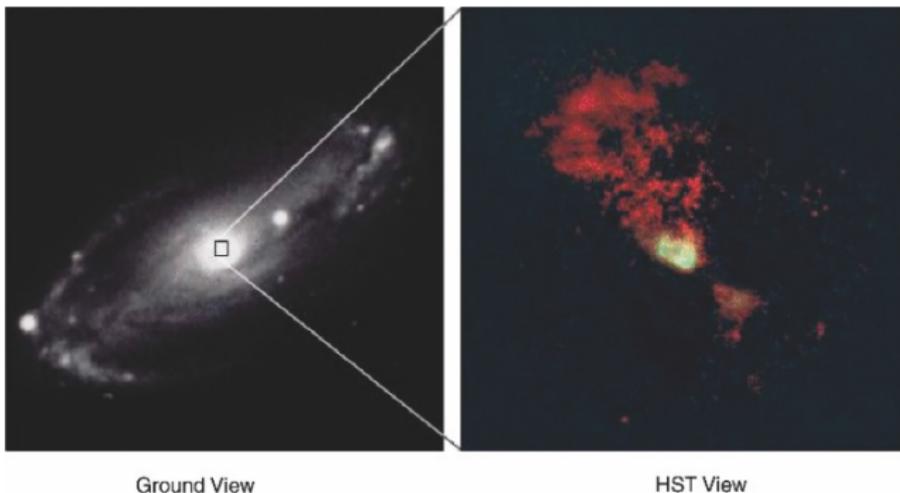
Fonte: Morgan (1968)

As galáxias Seyfert de tipo 1 apresentam linhas largas e linhas estreitas de emissão no seu espectro, já as de tipo 2 apresentam apenas linhas estreitas.



Fonte: Osterbrock (1984)

A radiação ionizante dos AGN não é distribuída de maneira isotrópica na galáxia! As linhas estreitas das Seyfert são emitidas por regiões em formato de cone.



Fonte: Allan Sandage e Andrew S. Wilson. Ver Schneider (2014) para mais detalhes.

Os jatos emitem radiação não-térmica (síncrotron e SSC\*) e podem atingir vários kpc de comprimento.

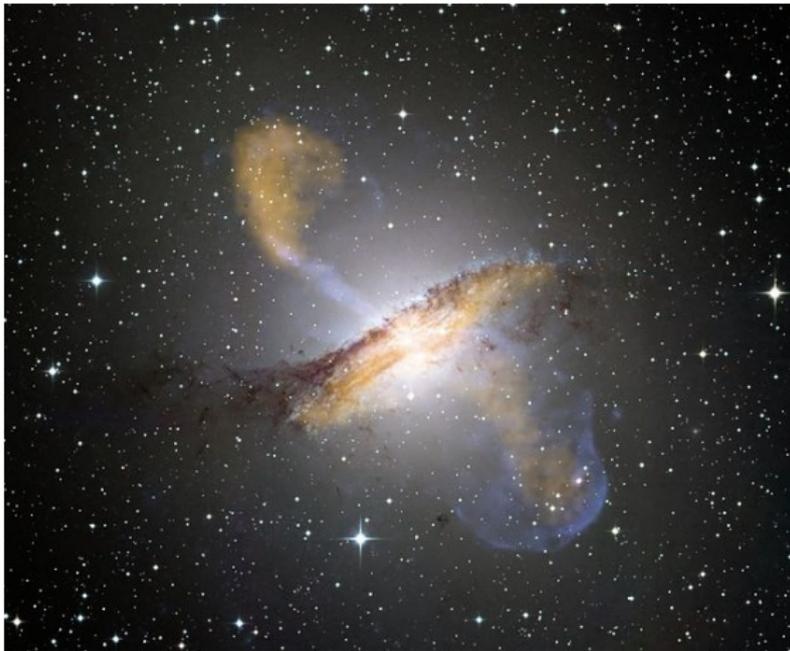
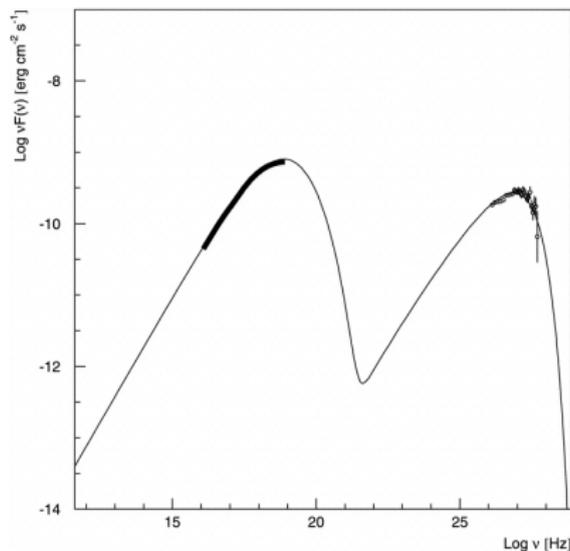


Imagem composta no óptico (ESO/WFI), rádio (A. Weiss) e raios X (R.Kraft) da galáxia Centaurus A.

\*SSC = synchrotron self-Compton = espalhamento Compton inverso da radiação síncrotron.

## Jatos, síncrotron e SSC

Muitas vezes não conseguimos observar o jato diretamente, mas conseguimos identificá-lo de maneira indireta através da SED do AGN, dominada pela emissão de radiação síncrotron e SSC.



Picos de síncrotron ( $\sim 10^{19}$  Hz) e SSC ( $\sim 10^{27}$  Hz) da SED do Mkn501. Fonte: Konopelko et al. (2003).

# Modelo unificado dos AGN

A única maneira, sem controvérsias, capaz de explicar tamanha quantidade de energia sendo emitida por uma região tão compacta é a acreção de matéria por um BN.

Processo físico	Eficiência
Fusão de Hidrogênio	0.7%
Acreção em BN	10% ~ 40%
Aniquilação de matéria-antimatéria	100%

O principal motivo por trás desta afirmação é que um BN é uma das maneiras mais eficientes de conversão de matéria em energia.

## Buraco negro como força motriz

- A aniquilação de matéria-antimatéria não pode ser um efeito dominante em AGN. Se fosse, uma assinatura de aniquilação dessas partículas seria facilmente detectada em raios gama.
- Uma taxa de acreção de  $\sim 2M_{\odot}/ano$  já é suficiente para explicar a luminosidade dos AGN mais brilhantes.

A energia potencial do disco é convertida em energia térmica através de fricção, fazendo com que o disco aqueça e caia no BN.

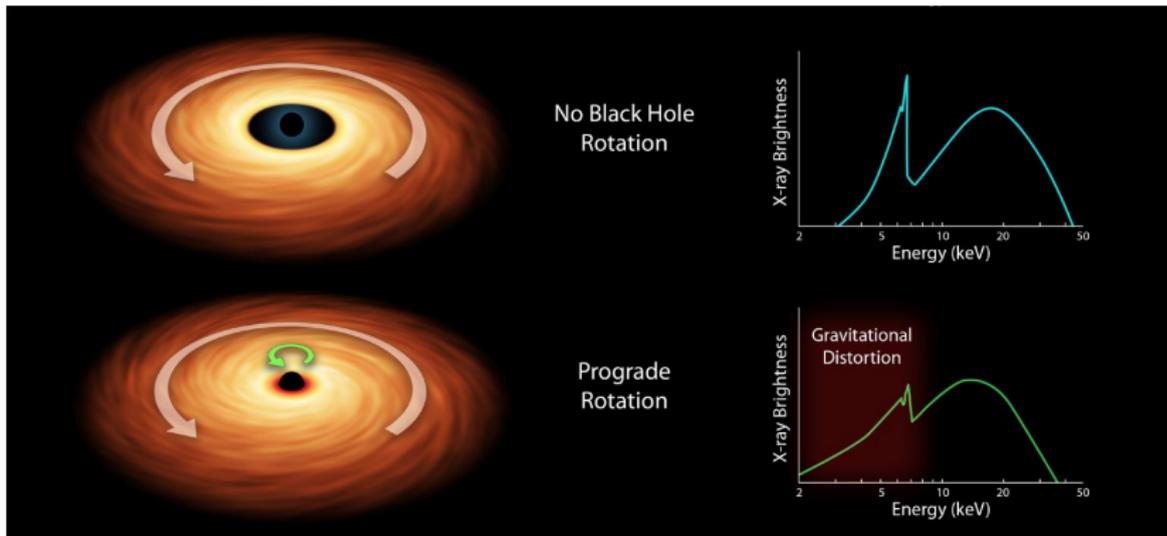


Concepção artística de um disco de acreção.  
ESO/M. Kornmesser.

## Existem pelo menos dois argumentos indicando que os BN em AGN rotacionam:

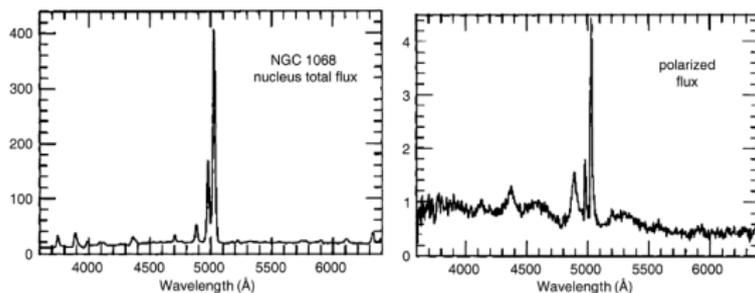
- O mecanismo mais provável capaz de colimar os jatos observados em AGN e explicar como eles se mantêm na mesma direção por milhões de anos, requer um forte campo magnético e um efeito de estabilidade giroscópica que só pode ser atingido se a fonte do jato estiver em alta rotação.
- A formação de BN em geral envolve o colapso de grandes quantidades de matéria numa região compacta. Para conservar o momento angular da nuvem progenitora, o BN precisa girar muito rápido (argumento mais indicado para BN estelares).

A acreção num BN em rotação pode ser até  $\sim 4$  vezes mais eficiente que em um BN estático.



E seu espectro é um pouco mais suavizado por conta da maior influência do efeito de *redshift* gravitacional.

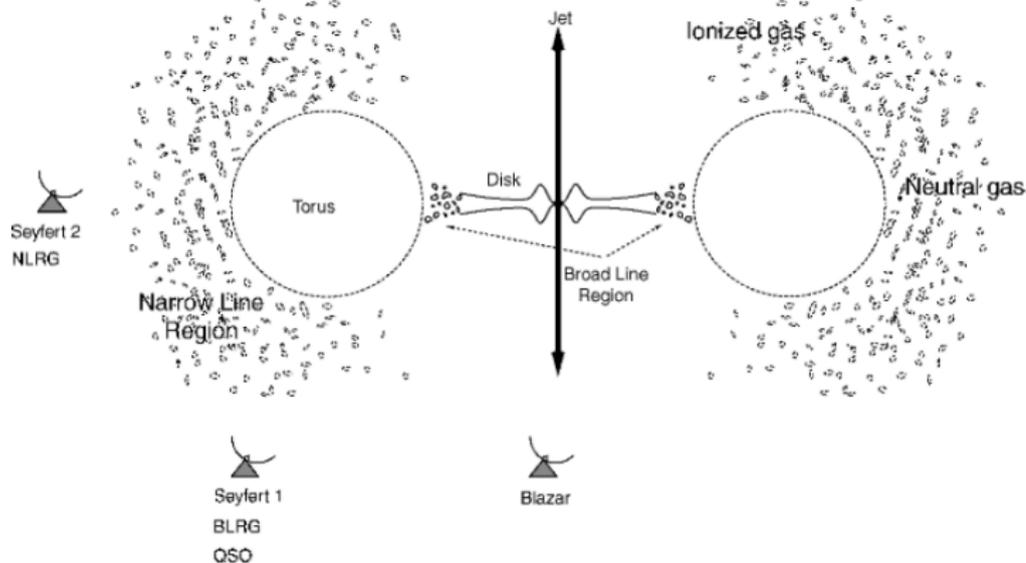
A observação de linhas largas no espectro polarizado de Seyferts 2 indica que as Seyferts 1 e 2 são o mesmo tipo de objeto.



Espectropolarimetria do núcleo da NGC 1068. Fonte: Miller et al. (1991).

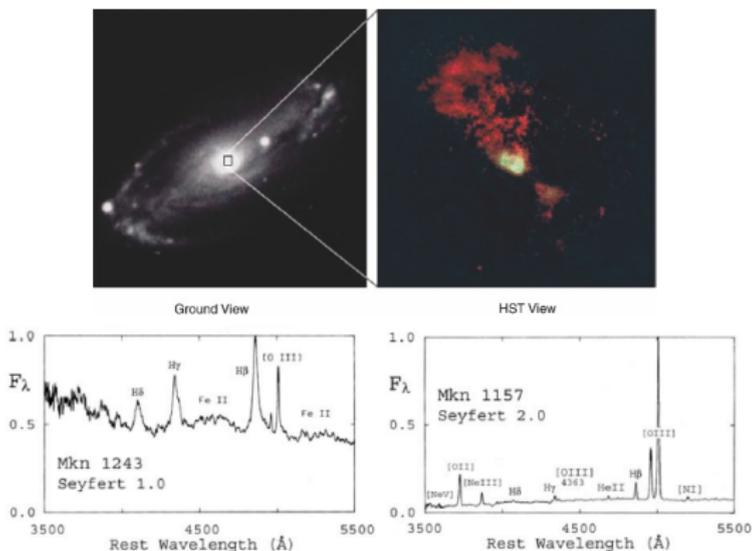
A interpretação deste resultado é que as Seyfert 2 também possuem uma região de emissão de linhas largas, mas sua observação direta é obscurecida por algum material absorvedor.

# Um único fenômeno unificando todos os tipos de AGN:

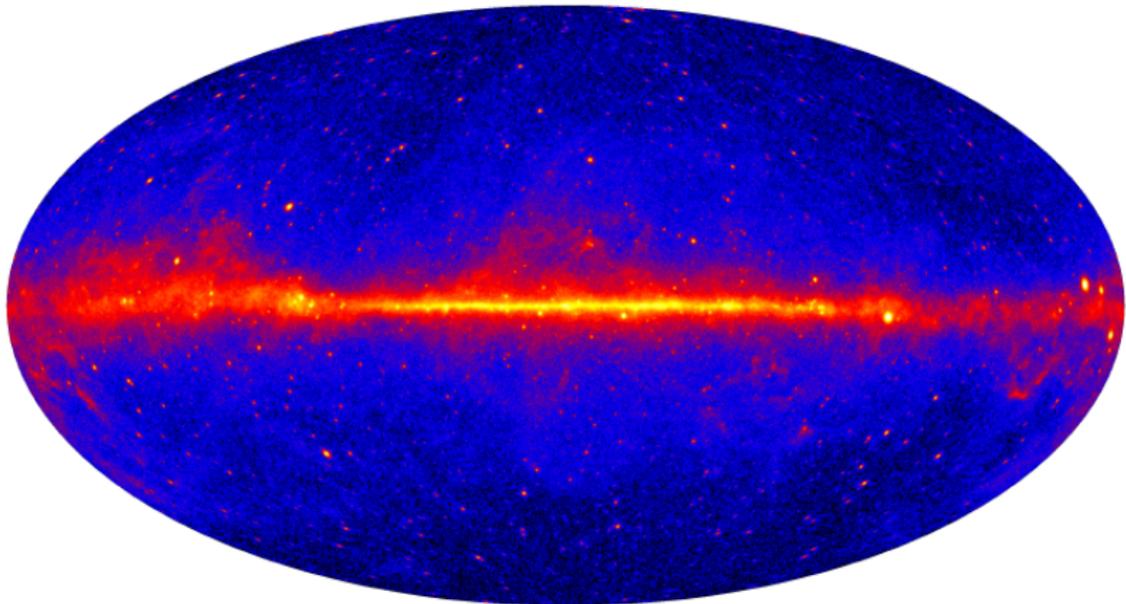


Fonte: Schneider (2014).

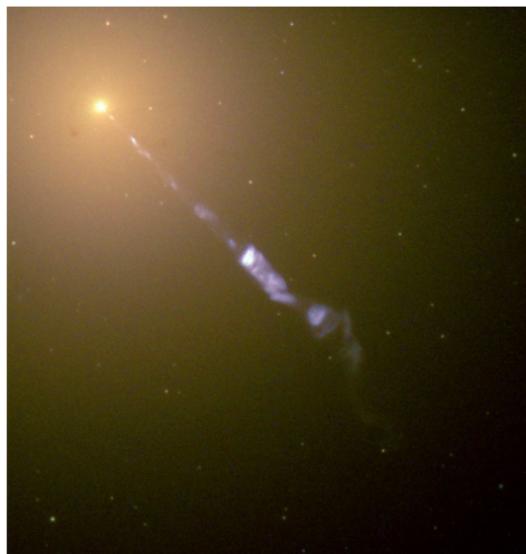
O toro consegue explicar as diferenças observadas no espectro das Seyferts e os cones de ionização.



A maior parte das fontes extragalácticas de raios gama são blazares.



Os blazares são dominantes em altas energias por conta dos efeitos de *beaming* + Compton inverso.



Exemplo do efeito de *beaming* atenuando um dos jatos da galáxia M87 (que não classificamos como blazar).

Fonte: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

# Resumo

1. Síncrotron, SSC e efeitos relativísticos.
2. AGN: objetos compactos, de alta luminosidade, variáveis e com ampla cobertura espectral.
3. Discos de acreção em torno de um buraco negro em rotação como força motriz.
4. Modelo unificado dos AGN.
5. Aplicação dos efeitos relativísticos aos jatos.