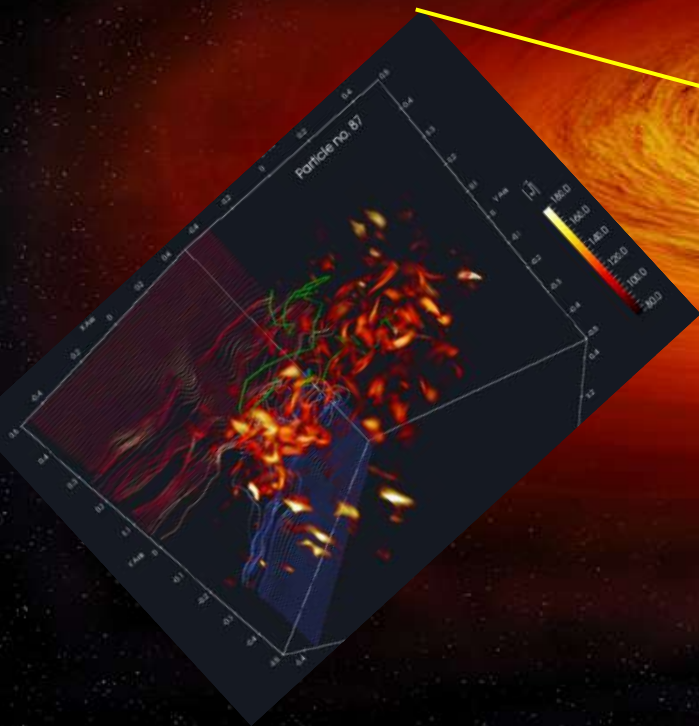


Aceleradores Cósmicos de Partículas: Buracos Negros e Jatos Supersônicos

→
Elisa Bete de Gouveia Dal Pino
IAG - Universidade de São Paulo

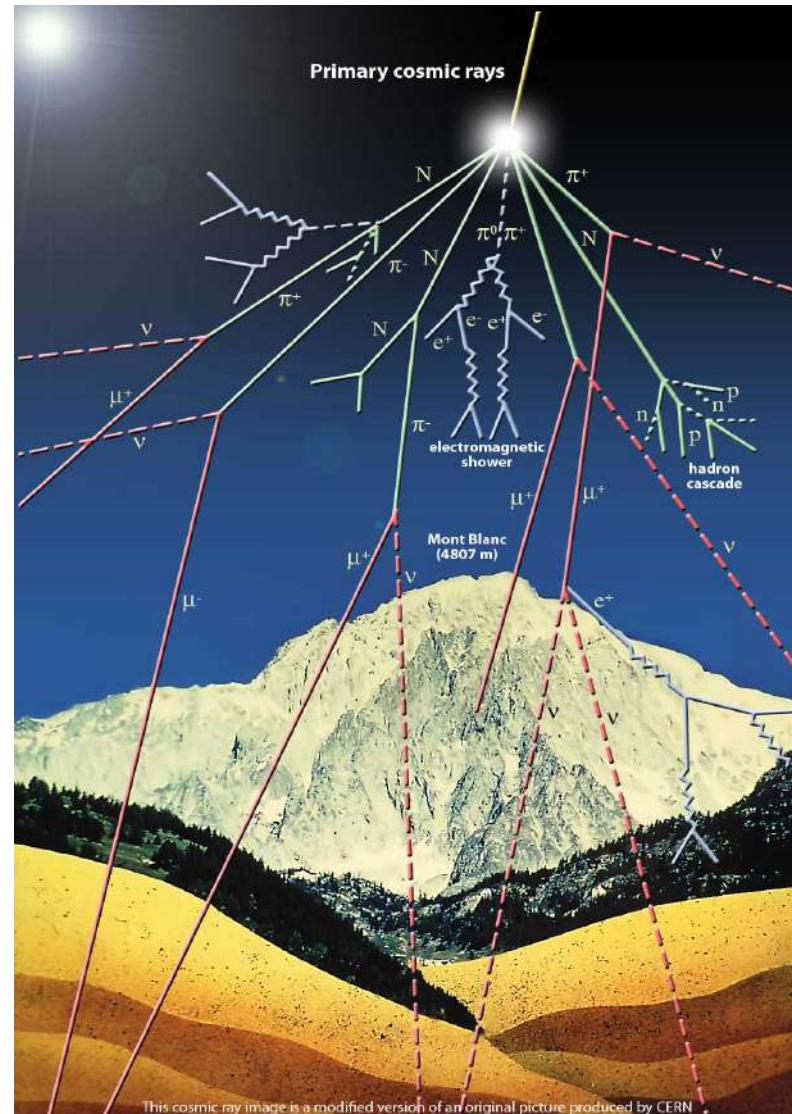


Física em Casa, 16 de julho, 2020

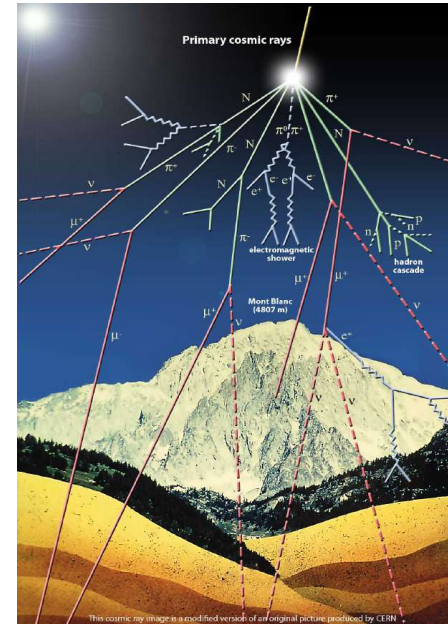
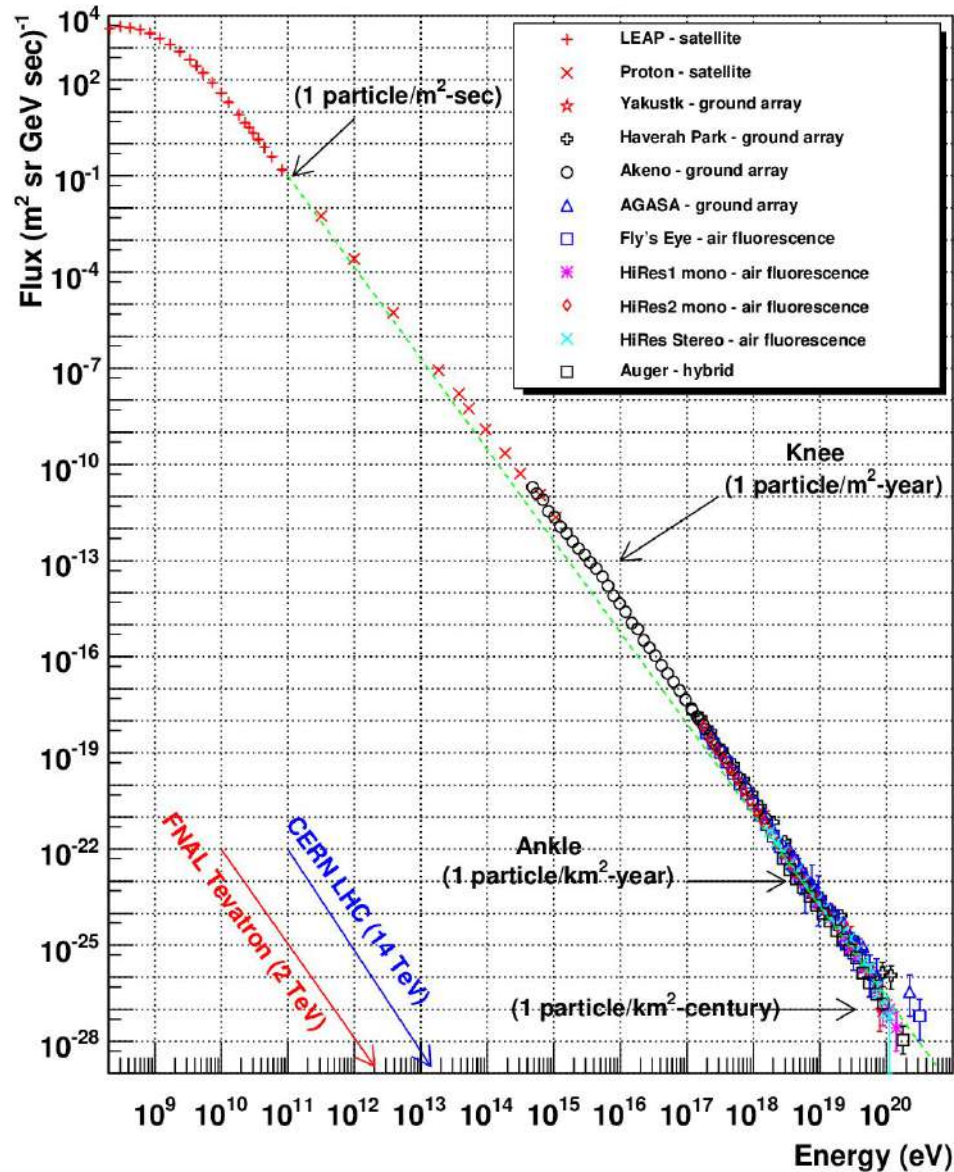
Aceleradores Cósmicos de Partículas: Buracos Negros e Jatos Supersônicos



Raios Cósmicos: partículas relativísticas do Espaço

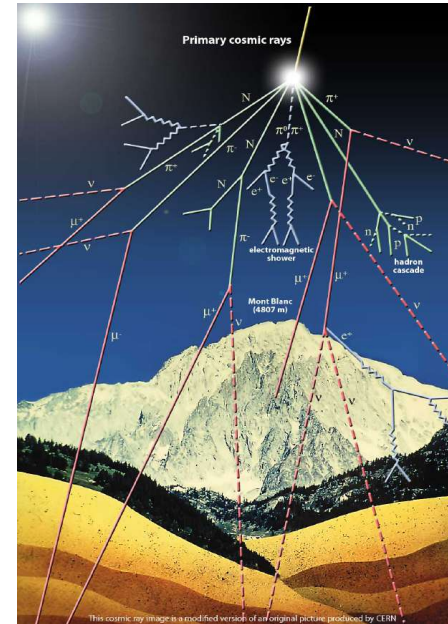
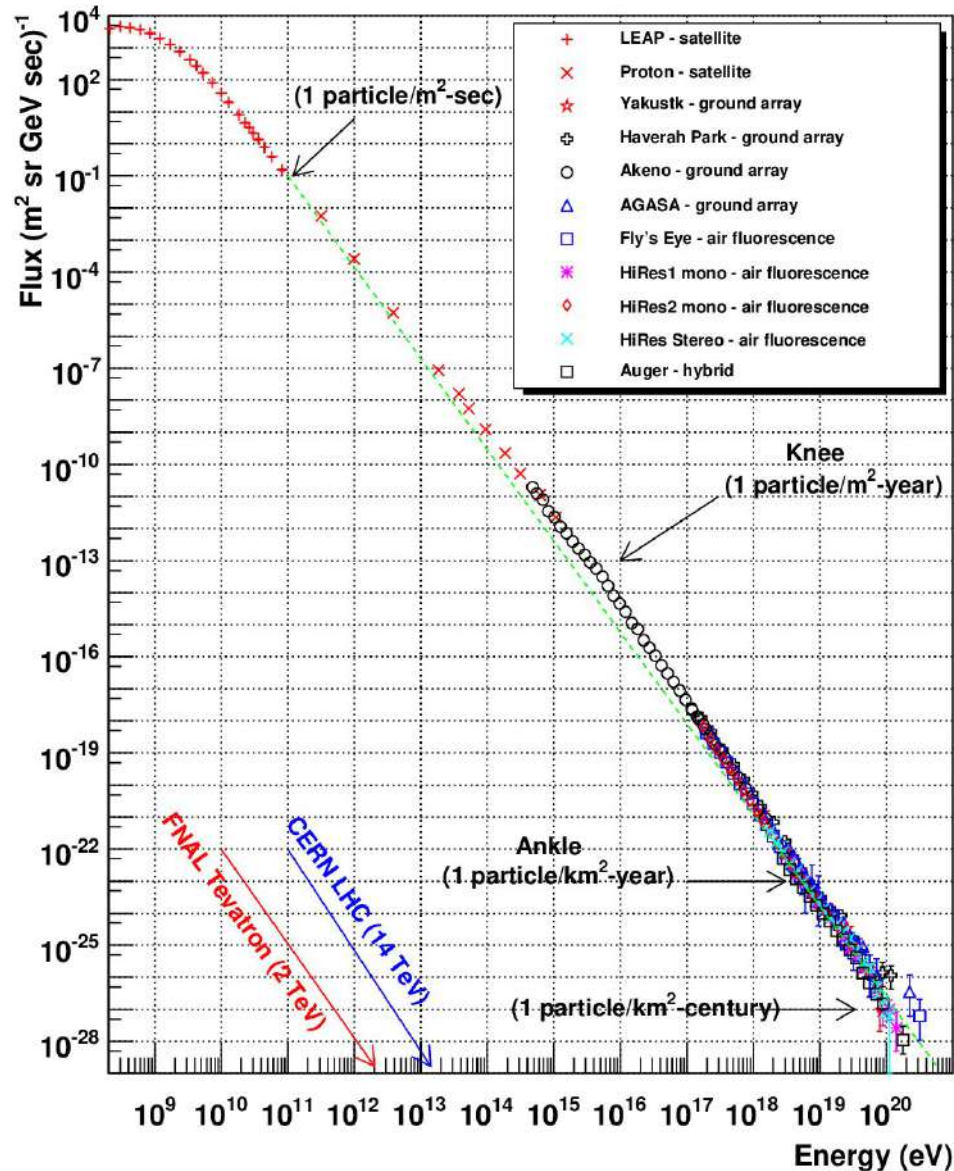


Raios Cósmicos: partículas relativísticas do Espaço



60% prótons (núcleos H)
 25% núcleos He
 15% núcleos de N, C, O e Fe
 elétrons

Raios C3smicos: part3culas relativ3sticas do Espao



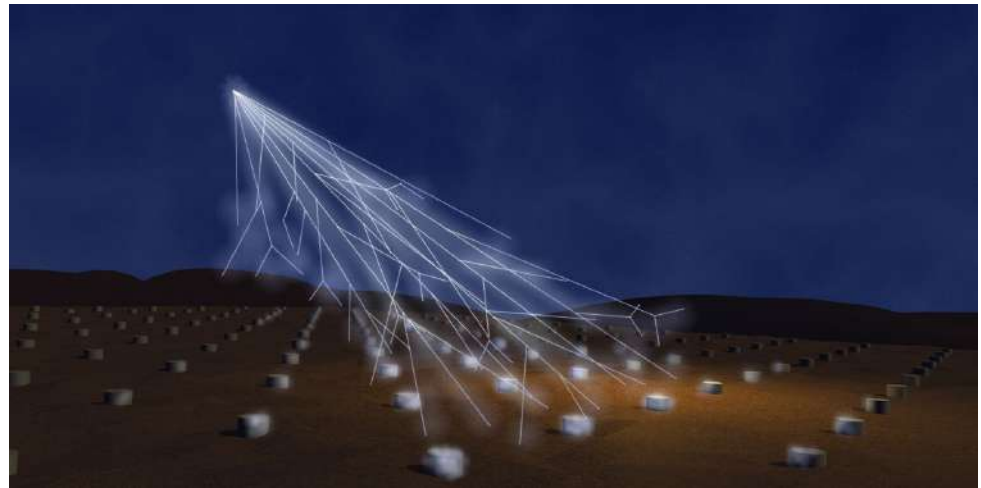
O maior acelerador de part3culas da Terra: acelera somente at3 10^{14} eV

Uma part3cula com $6,2 \cdot 10^{18}$ eV $\sim$ energia que lâmpada de 1 W produz em 1 segundo: $1\text{Ws} = 6,2 \cdot 10^{18}$ eV

Raios Cósmicos descobertos há mais de 100 anos

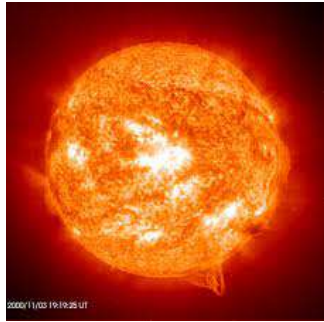


Descobertos por **Victor HESS** em 1911-1912 a bordo de um balão

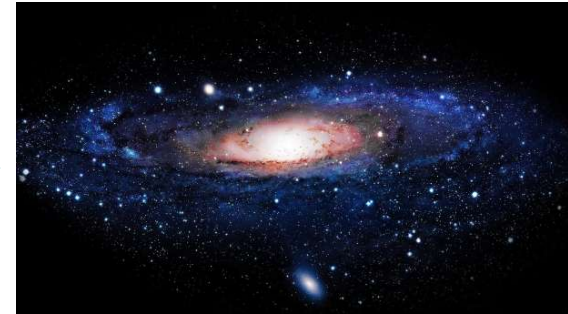
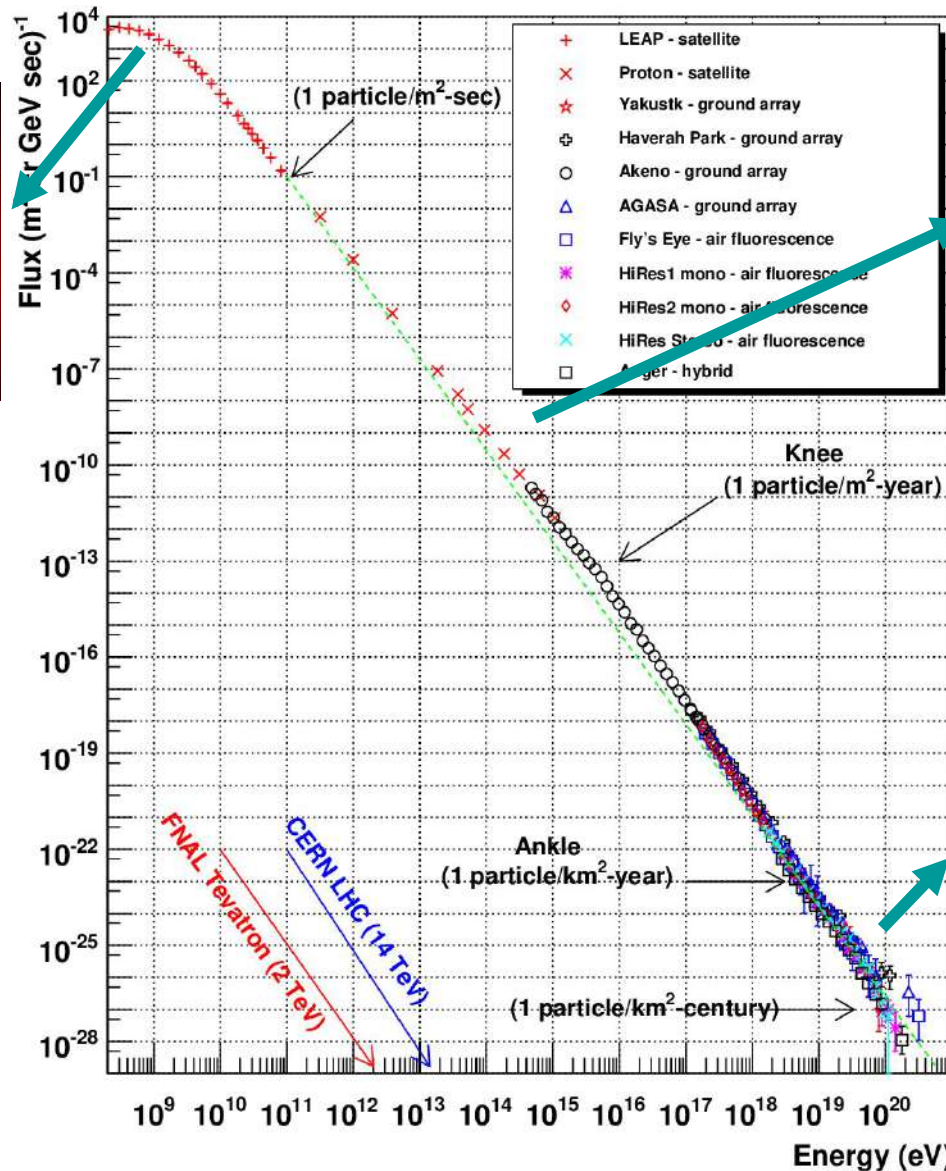


Hoje: **Observatório AUGER** (3000 km²)
Detecção de raios cósmicos ultra-energéticos (até 10²¹ eV)
(Brasil é membro fundador)

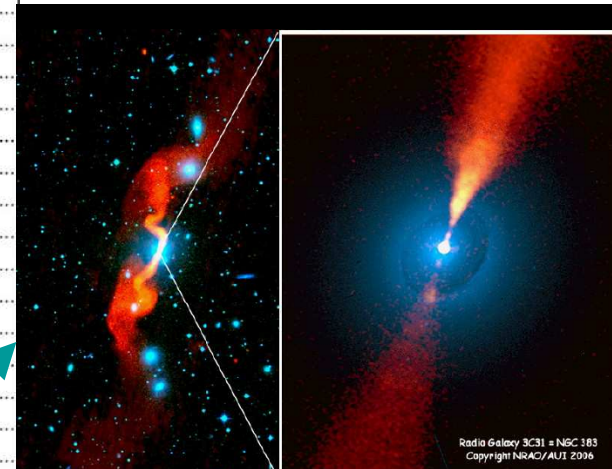
Raios C3smicos: de onde vem?



Sol

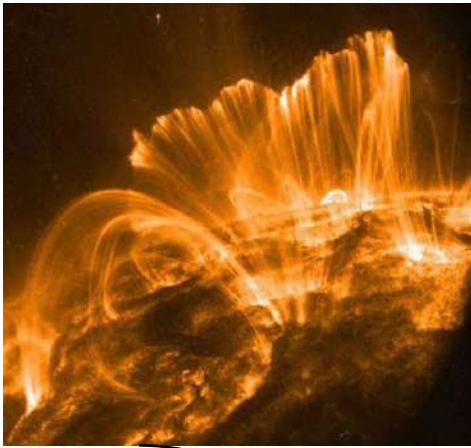


Nossa Gal3xia: Via L3ctea



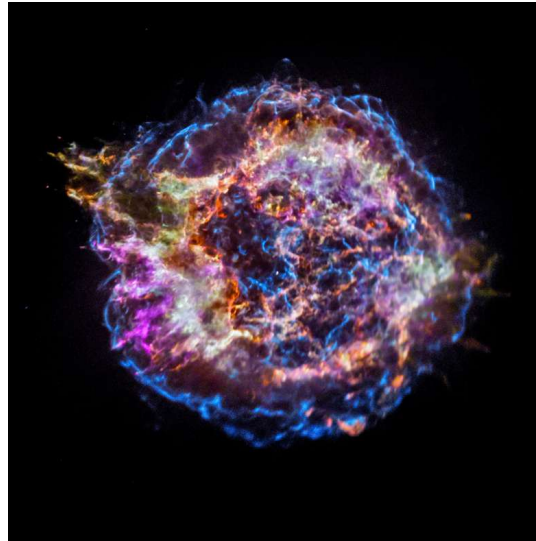
Gal3xias distantes

Raios Cósmicos: como são produzidos?



Reconexão Magnética:

No sol e arredores de Buracos Negros



Choques:

Em remanescentes de supernovas (em nossa Galáxia)

e em jatos de Buracos Negros

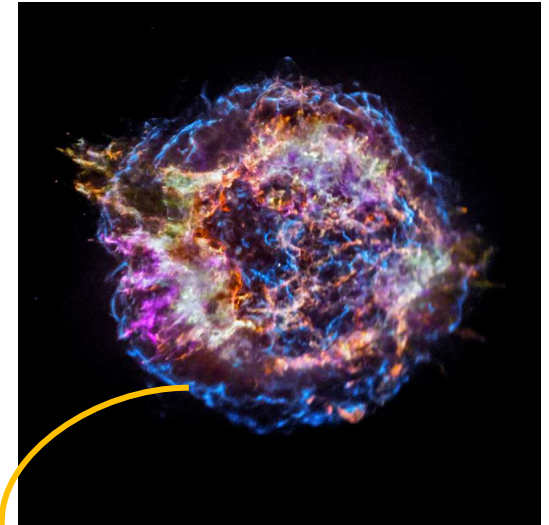


Raios Cósmicos acelerados em CHOQUES



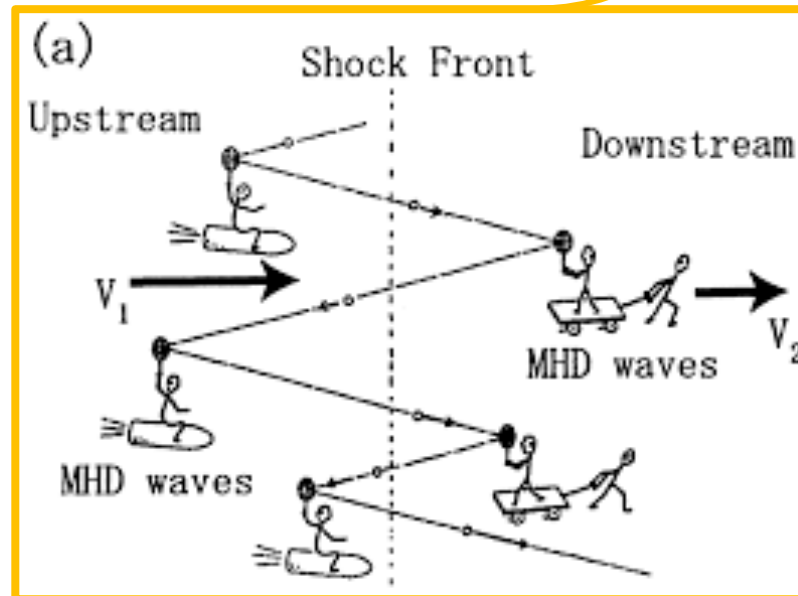
Remanescentes de supernovas

Raios Cósmicos acelerados em CHOQUES



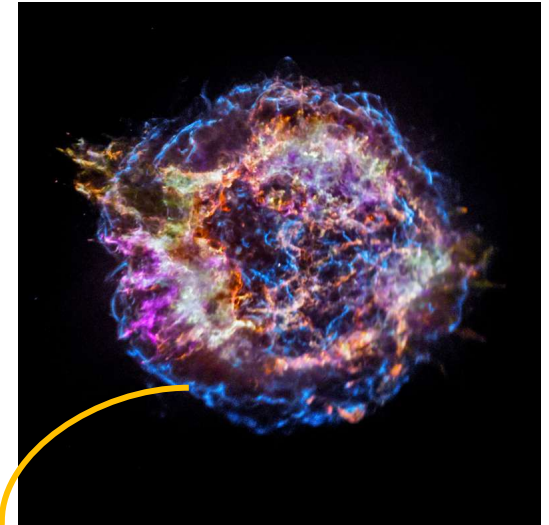
Remanescentes de supernovas

Onda de Choque



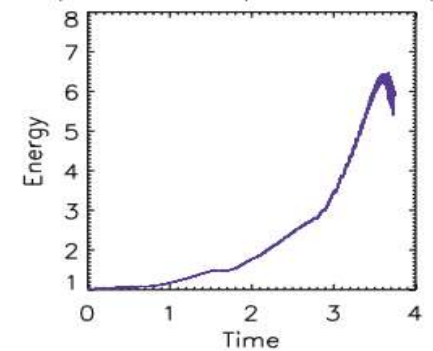
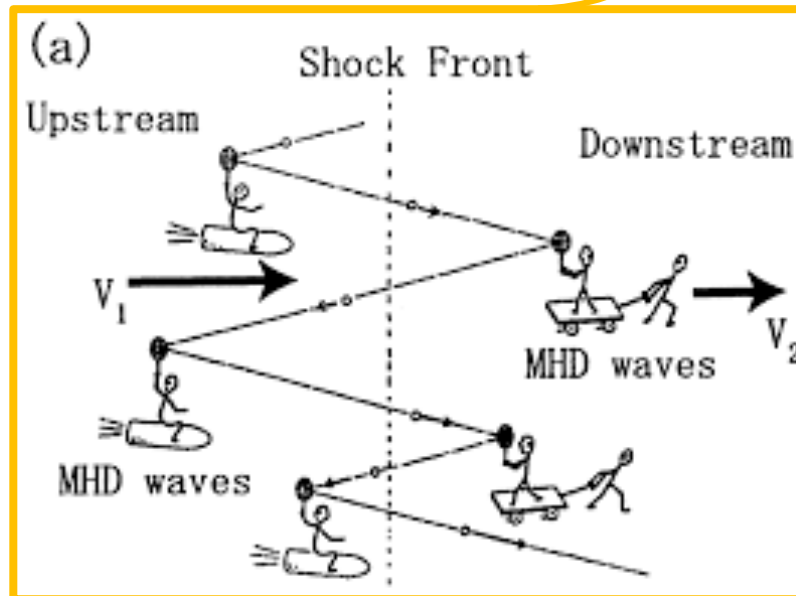
$$\langle \Delta E/E \rangle \sim v_c/c$$

Raios Cósmicos acelerados em CHOQUES



Remanescentes de supernovas

Onda de Choque

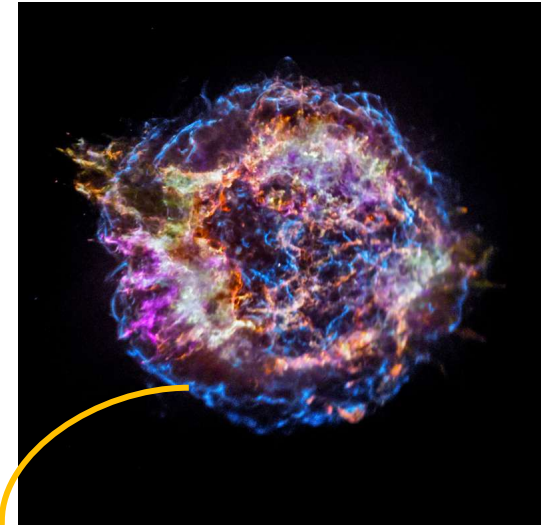


$$\langle \Delta E/E \rangle \sim v_c/c$$

Raios Cósmicos acelerados em CHOQUES

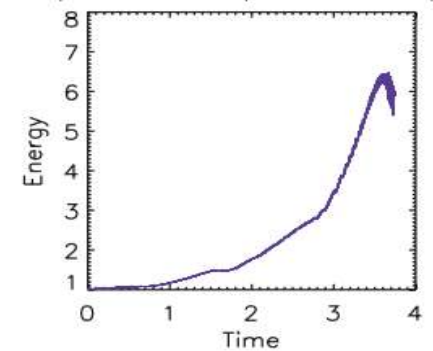
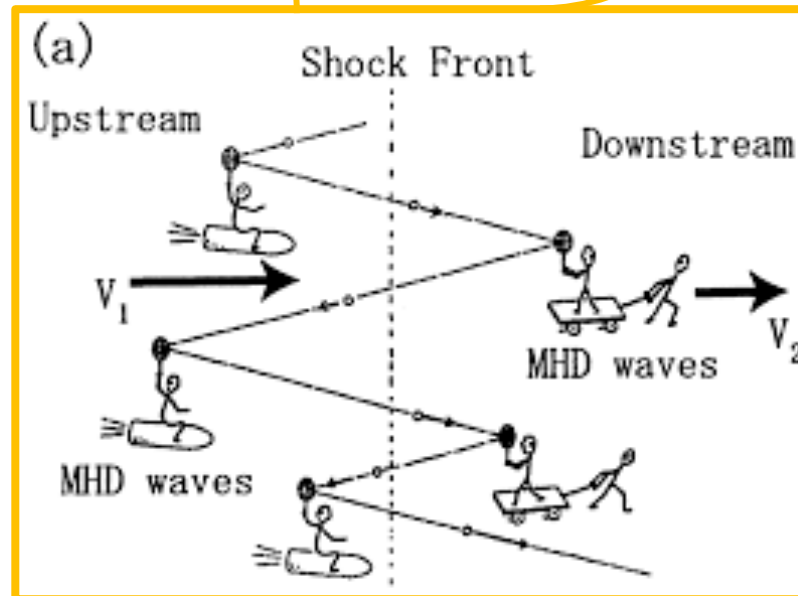


Jatos relativísticos de Buracos Negros

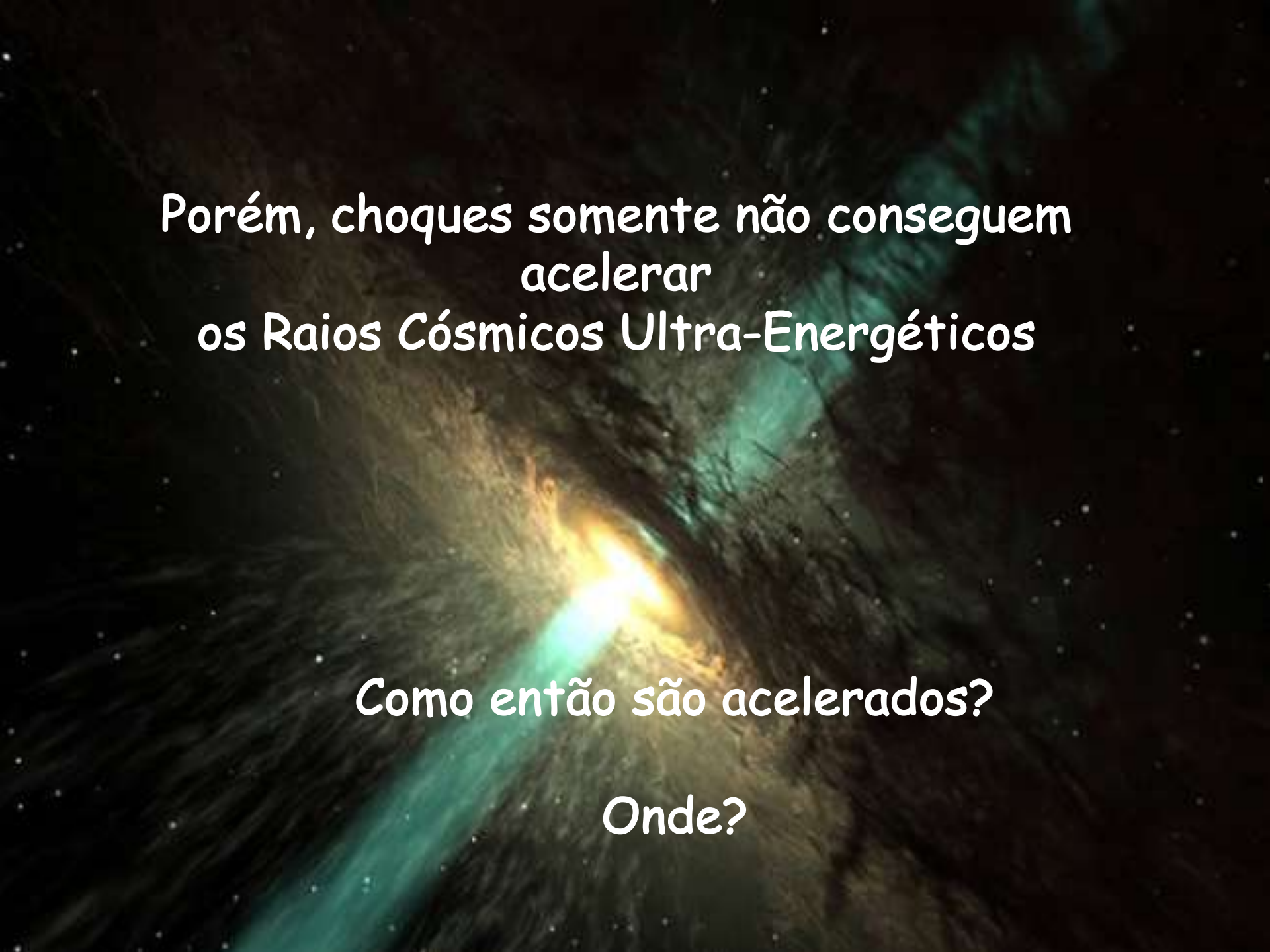


Remanescentes de supernovas

Onda de Choque



$$\langle \Delta E/E \rangle \sim v_c/c$$

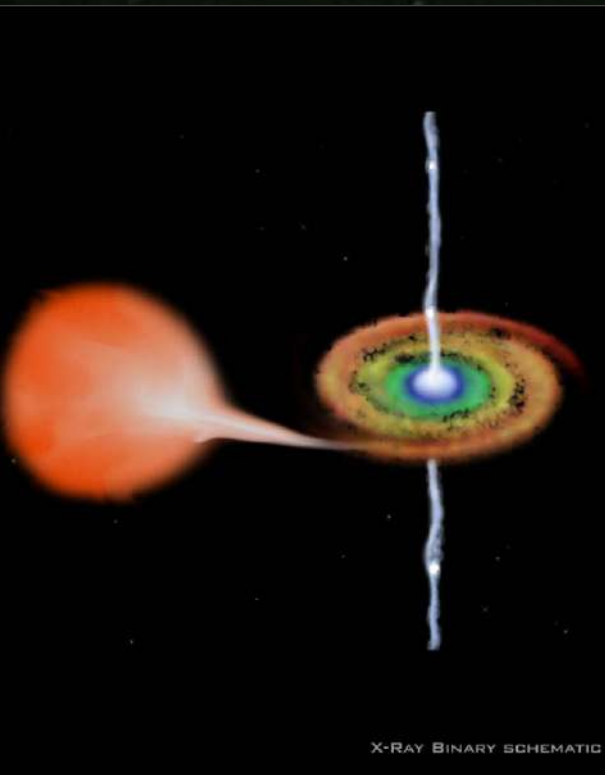


Porém, choques somente não conseguem
acelerar
os Raios Cósmicos Ultra-Energéticos

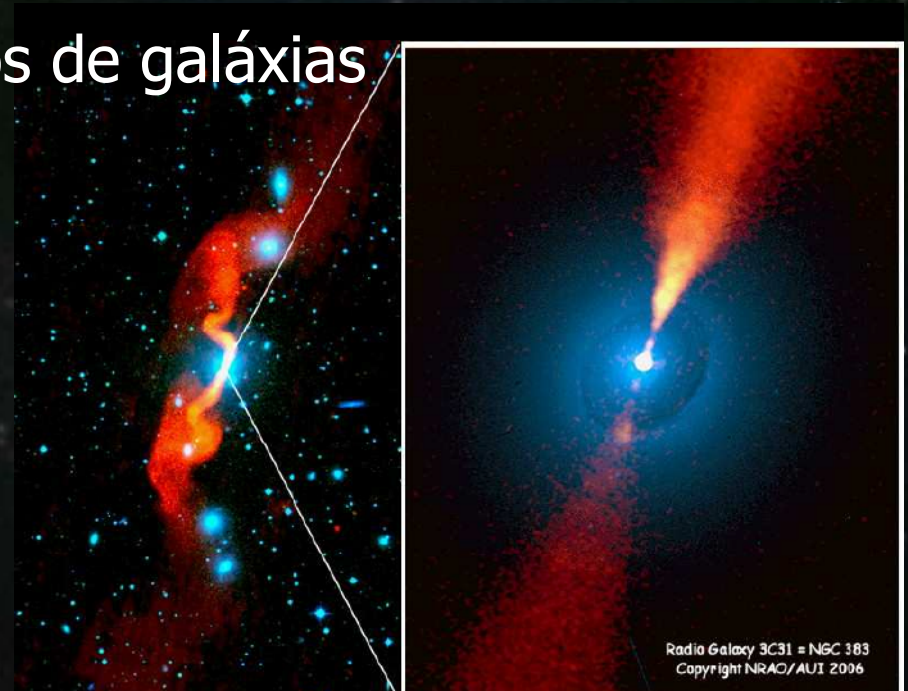
Como então são acelerados?

Onde?

Buracos Negros: Aceleradores Cósmicos e produtores de fenômenos super energéticos

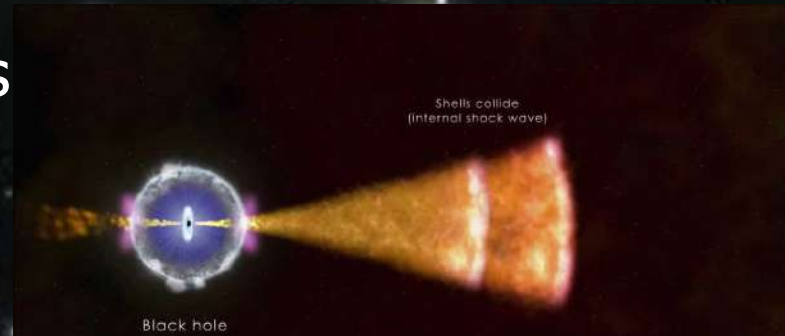


Núcleos de galáxias

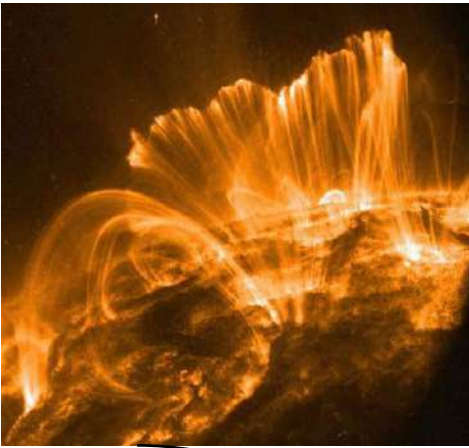


Sistemas Binários com Buracos Negros (Microquasars)

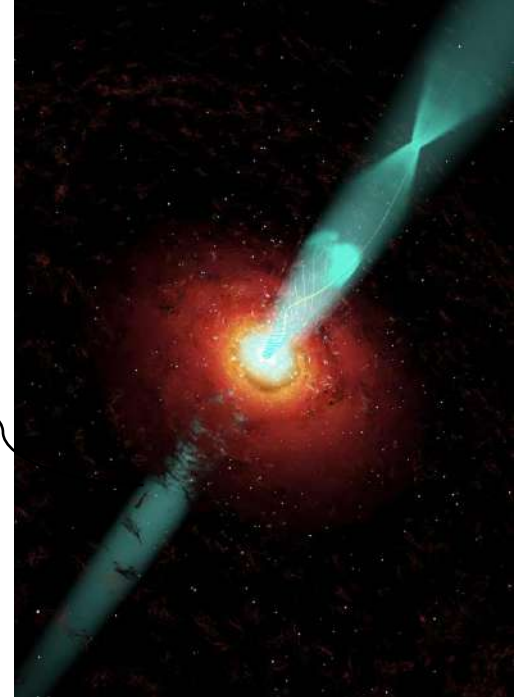
Gamma-Ray Bursts - GRBs



Raios Cósmicos podem ser acelerados por

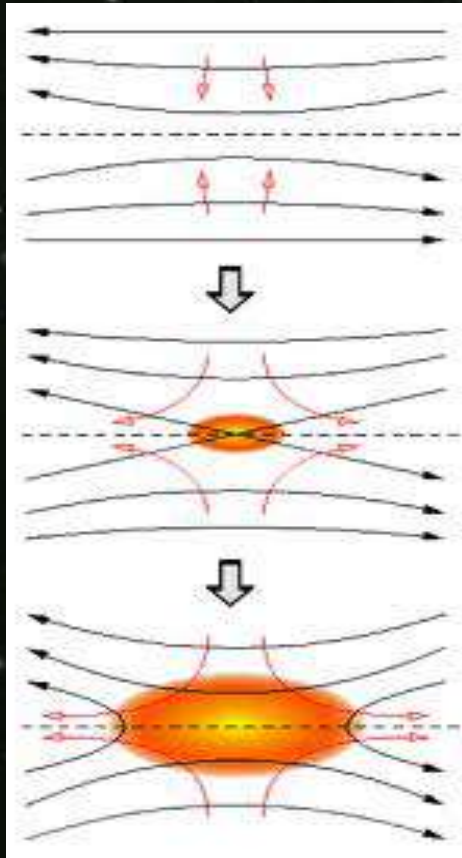


Reconexão Magnética:
No sol e arredores de Buracos Negros



O que é reconexão magnética ?

Quando 2 tubos de linhas de campo magnético de polaridade oposta se encontram: **RECONNECTAM!**



Magnetocauda da Terra

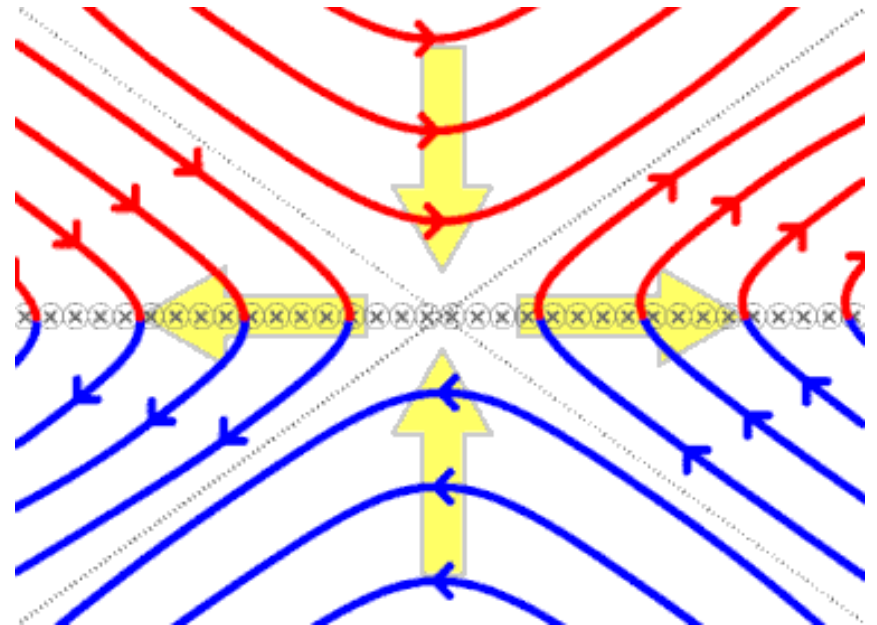


Coroa solar



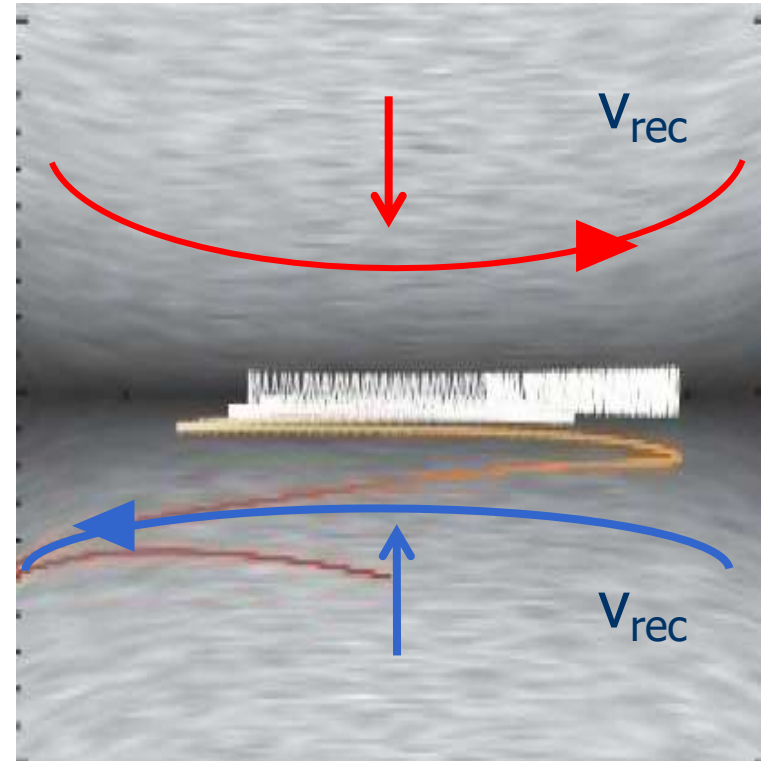
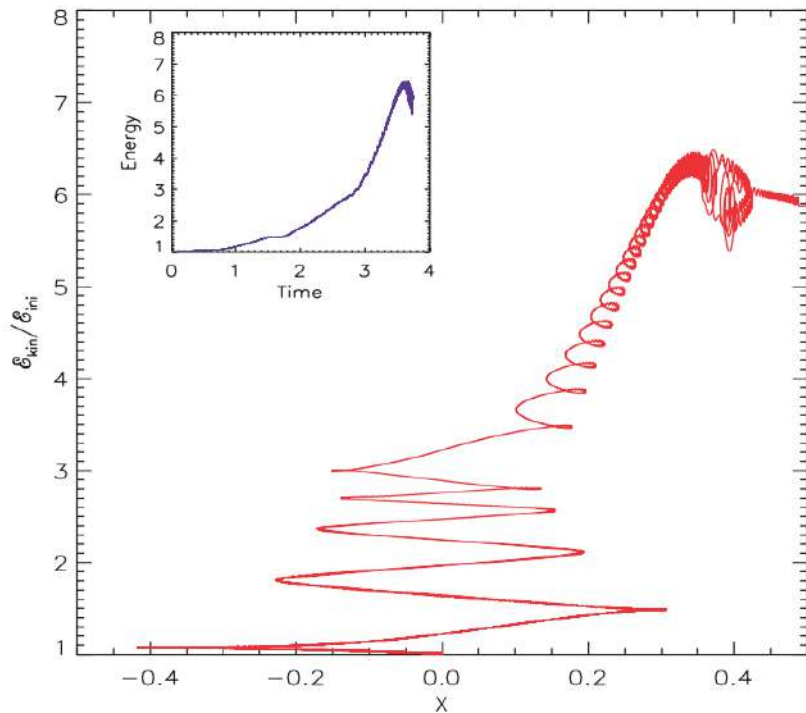
Como as partículas são aceleradas por reconexão magnética?

(de Gouveia Dal Pino & Lazarian, A&A 2005)



Como as partículas são aceleradas por reconexão magnética?

(de Gouveia Dal Pino & Lazarian, A&A 2005)

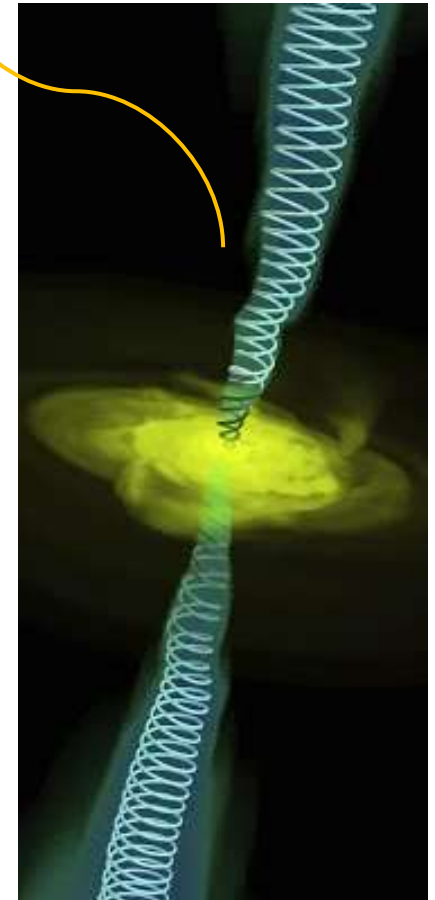
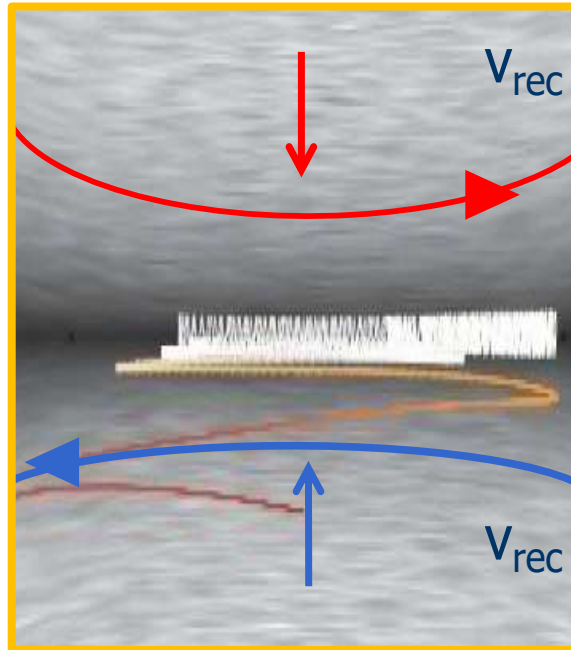


$$\langle \Delta E/E \rangle \sim v_{\text{rec}}/c$$

(Kowal, de Gouveia Dal Pino & Lazarian, ApJ 2011; PRL 2012)

Aceleração por reconexão magnética

Sol



Buracos Negros

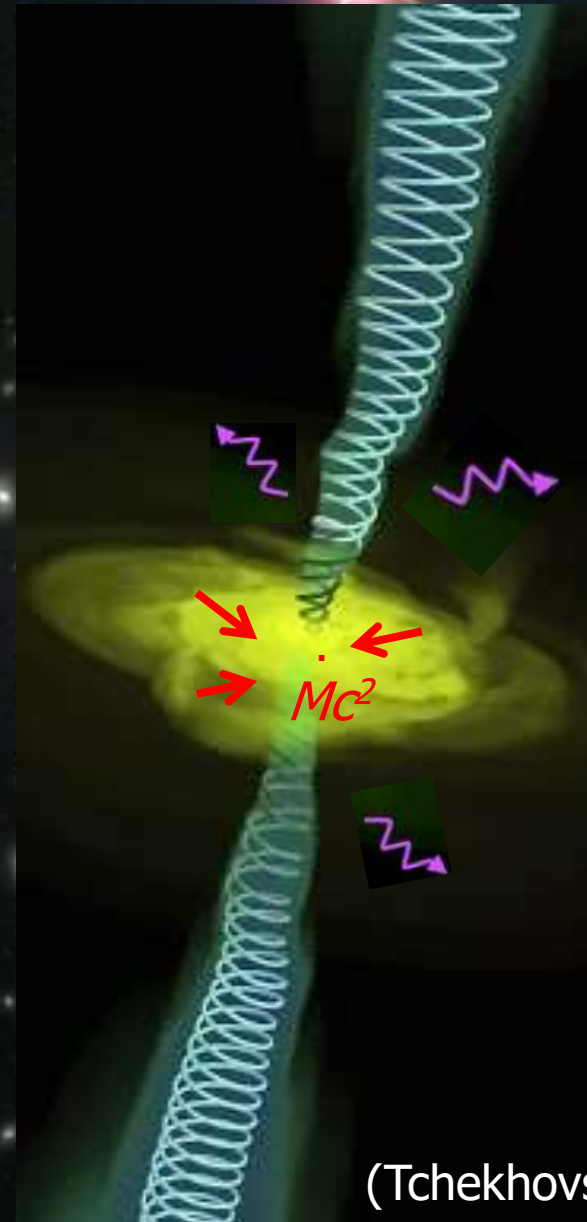
Fenômenos de Altas Energias em Buracos Negros

Jatos
&
Discos de acreção

Com campos magnéticos

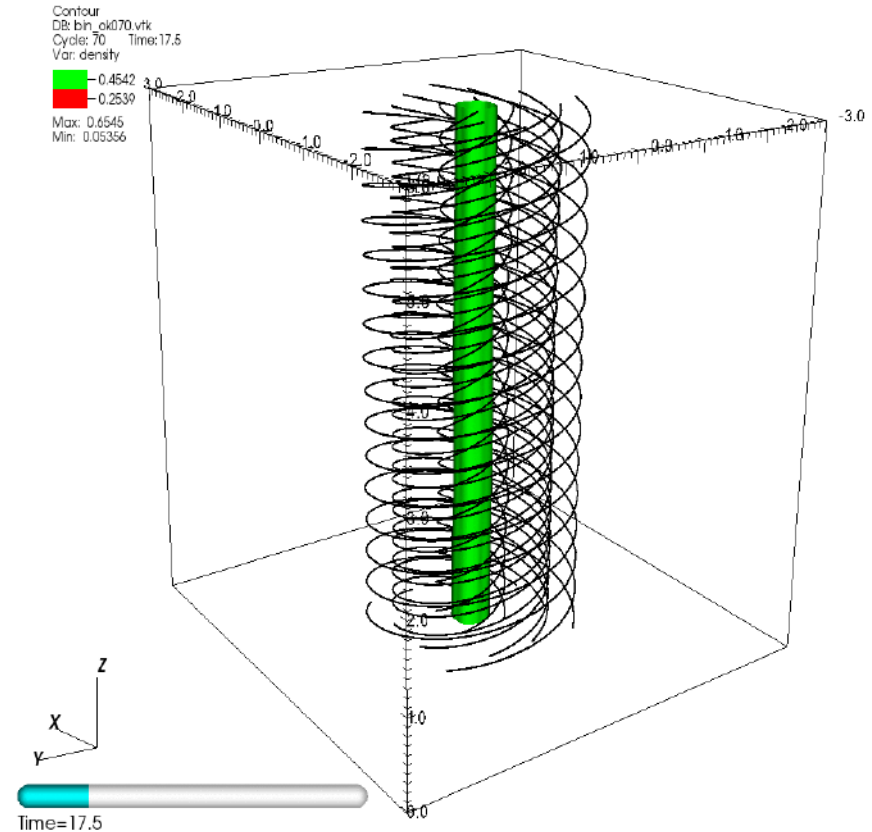
COMBINAÇÃO PERFEITA
para RECONEXÃO
MAGNÉTICA!

(de Gouveia Dal Pino & Lazarian 2005)



(Tchekhovskoy 2015)

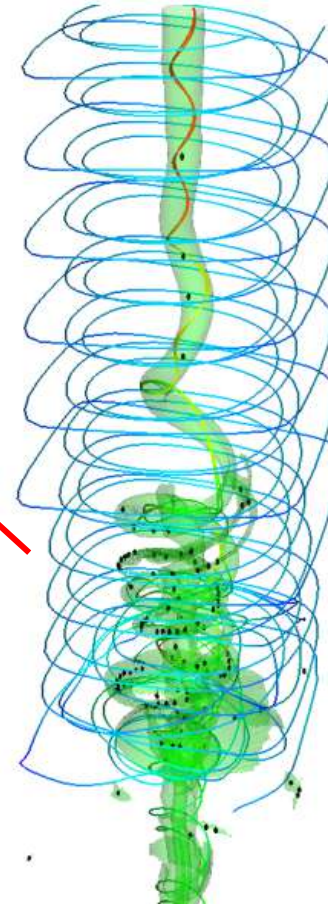
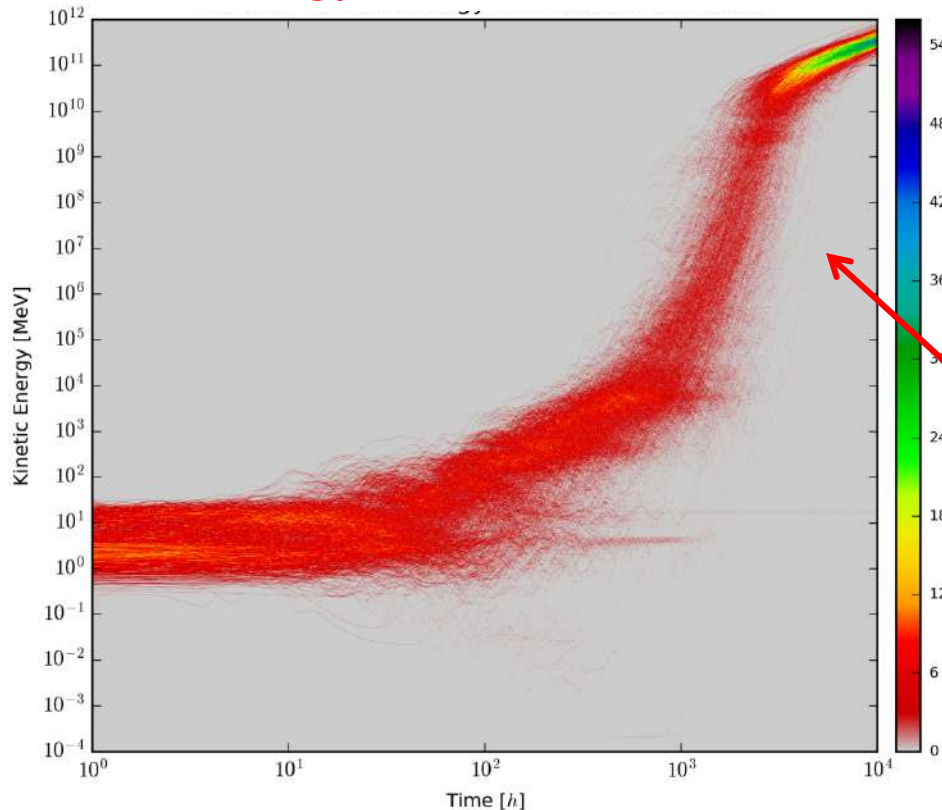
Reconexão Magnética em Jatos de Buracos Negros: Simulações numéricas



Singh, Mizuno, de Gouveia Dal Pino, ApJ 2016
Kadowaki et al. 2019

Raios Cósmicos acelerados no Jato por Reconexão Magnética

CR energy distribution evolution

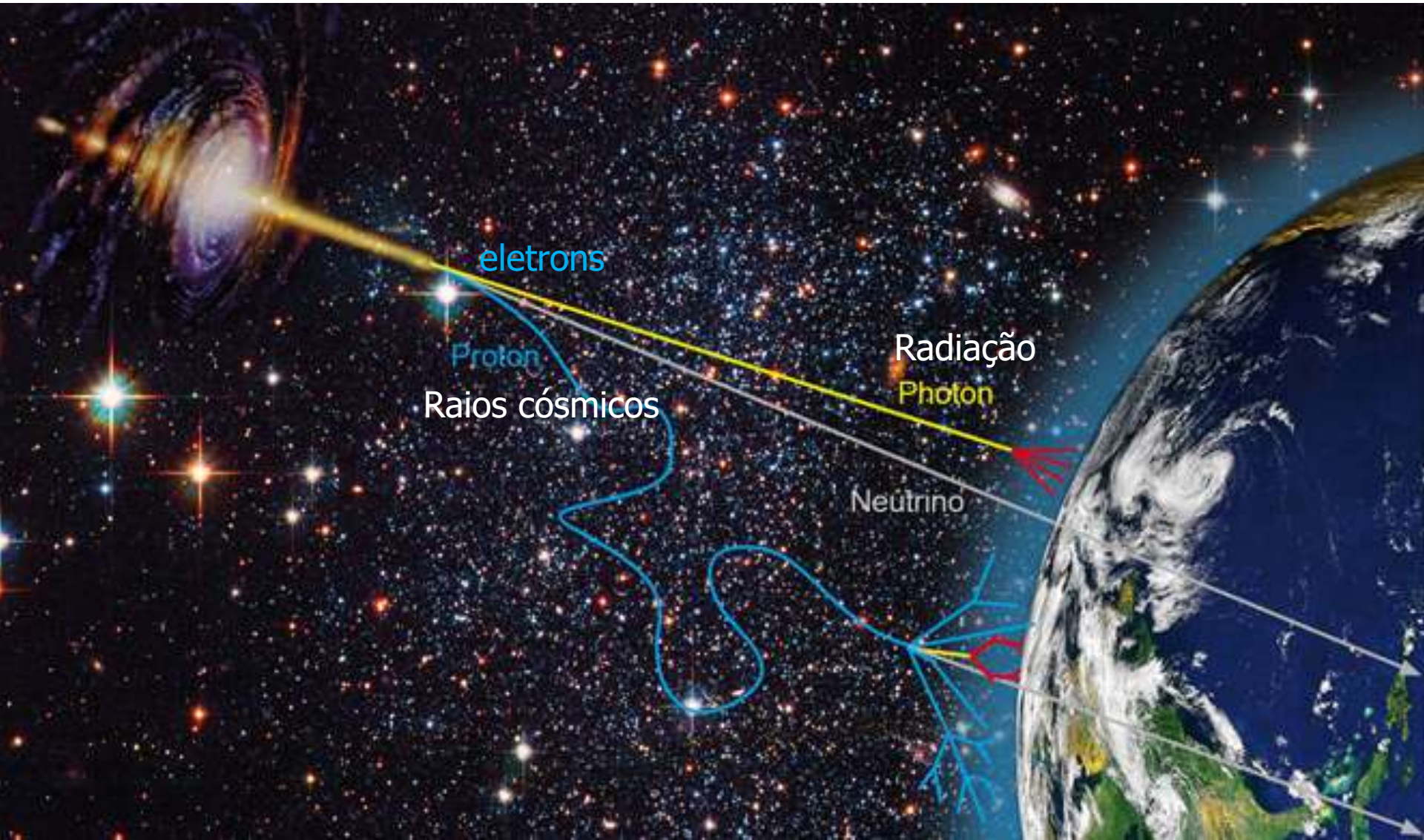


Partículas
injetadas
aceleradas a
energias:

$10^{17} - 10^{19}$ eV

Esse raio cósmico -> energia suficiente para produzir
Raios Gama e Neutrinos !!

Buracos Negros produtores dos raios cósmicos mais energéticos: emitem raios-gama e neutrinos



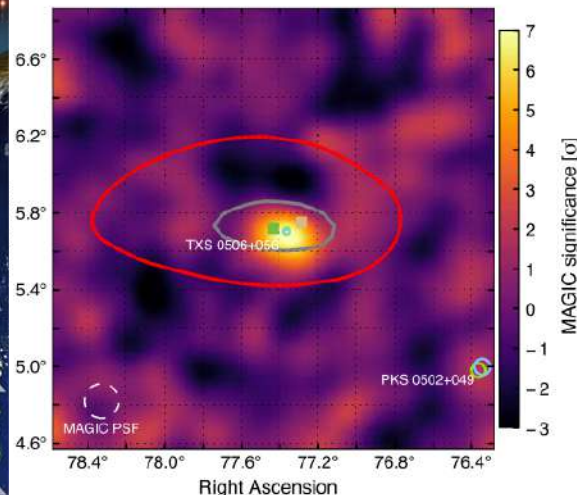
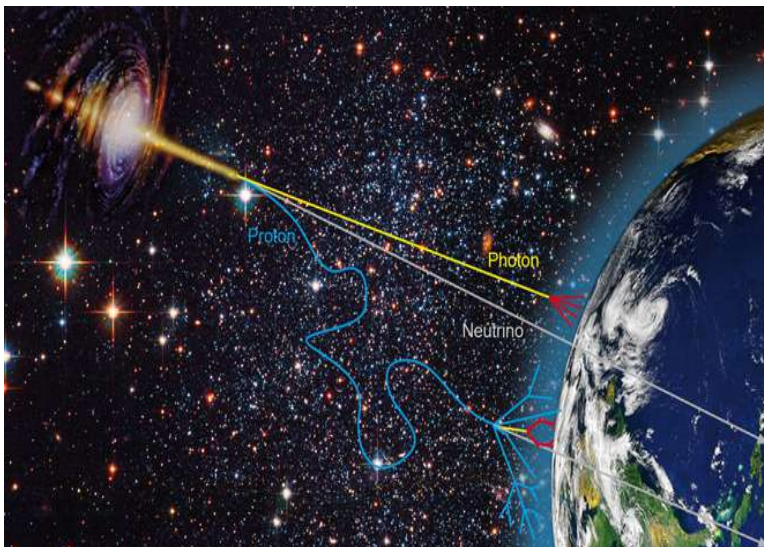
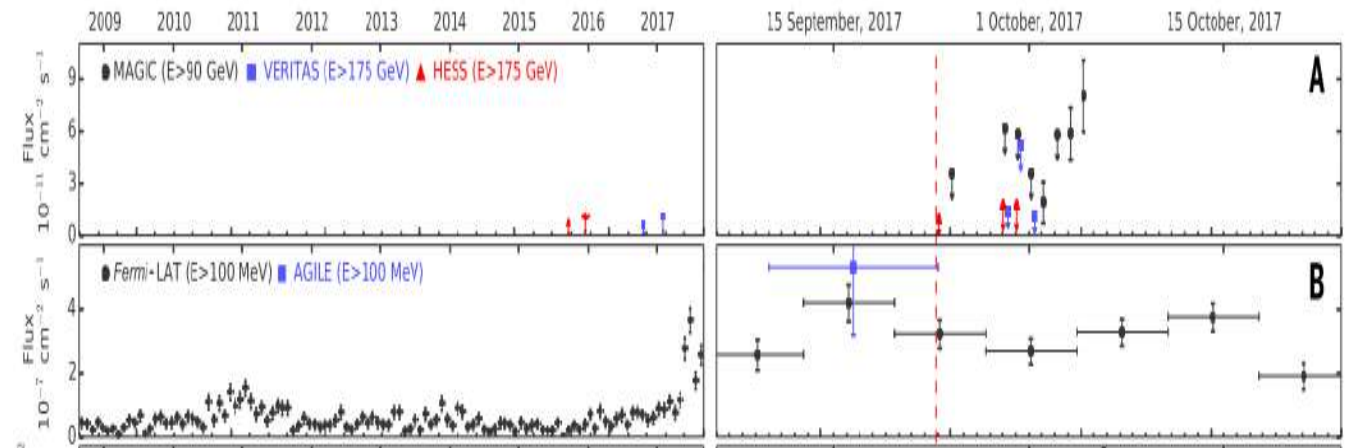
Descoberta 1a. fonte de raios cósmicos fora da Via Láctea através dos raios-gama e neutrinos do jato super-relativístico TXS 0506+056

Neutrinos e raios-gama produzidos por raios cósmicos ultra-energéticos

$p + \text{photons} \rightarrow \pi + p$

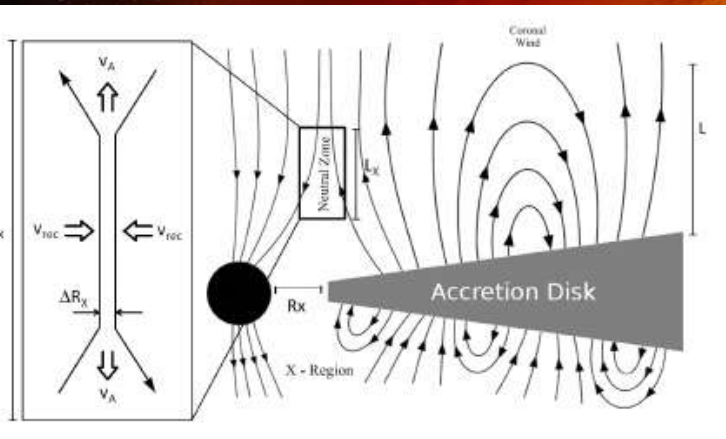
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu$

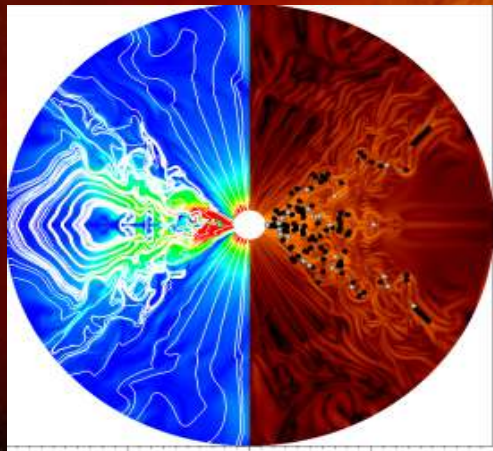


✓ Observado pelo
IceCube,
Fermi -LAT,
MAGIC, HAWC,
H.E.S.S, VLA, etc
(Science 2018)

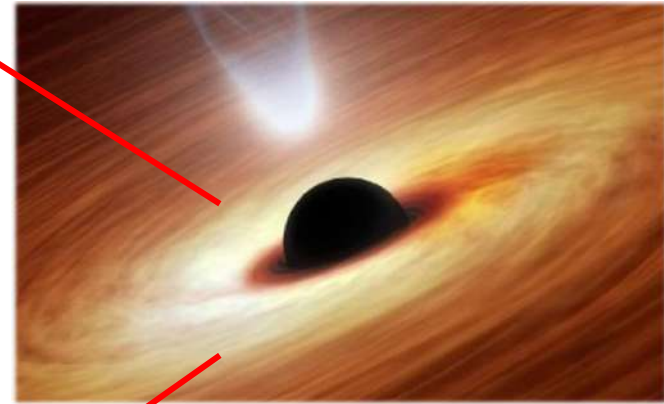
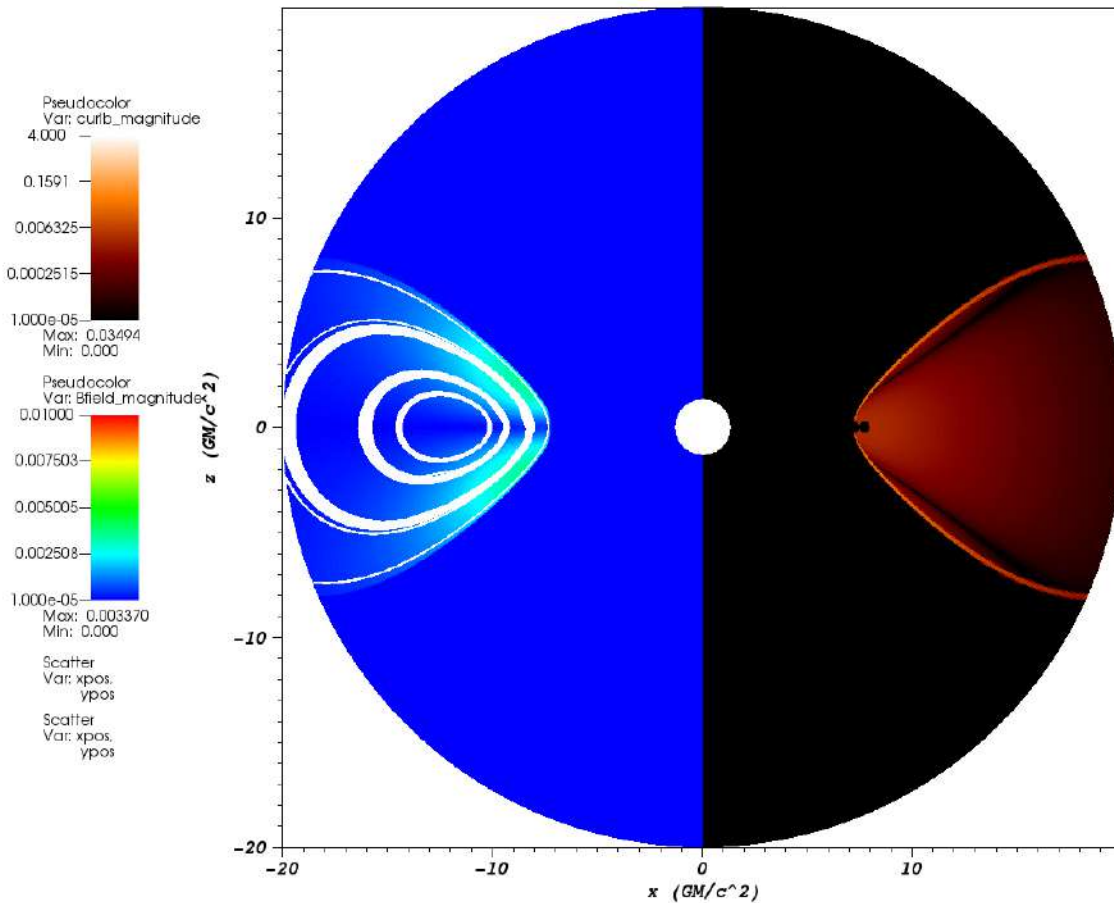
Raios C3smicos e Raios Gama tamb3m
podem ser produzidos bem nas
vizinhan7as do Buraco Negro



Raios Cósmicos e Raios Gama também
podem ser produzidos bem nas
vizinhanças do Buraco Negro



Reconexão Magnética no disco de acreção do Buraco



Pode acelerar
Raios Cósmicos e produzir
Raios gama

de Gouveia Dal Pino & Lazarian A&A 2005;
Kadowaki, de Gouveia Dal Pino, Torrejon+ 2019

Emissão Gama devido a Raios Cósmicos nos arredores do Buraco Negro

Combinamos 3 técnicas em simulações por computador:

GRMHD:

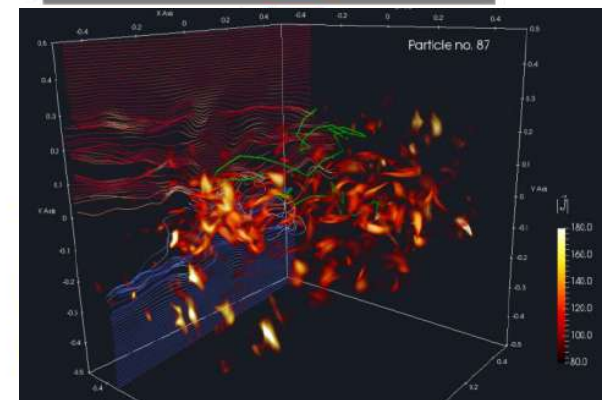
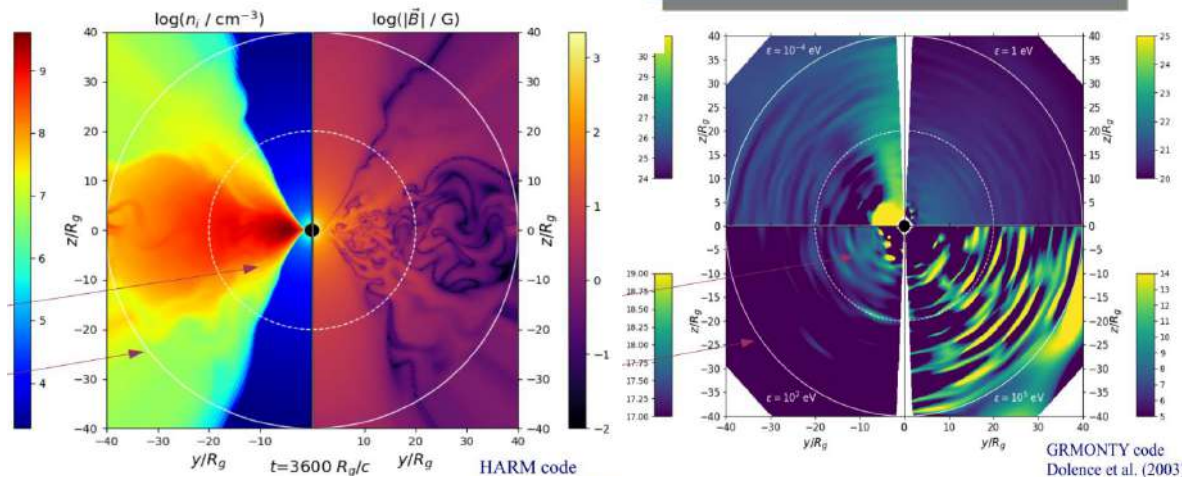
Axi-symmetric
HARM code
Gammie et al. (2003)

Radiative Transfer:

GRMONTY code
Dolence et al. (2009)

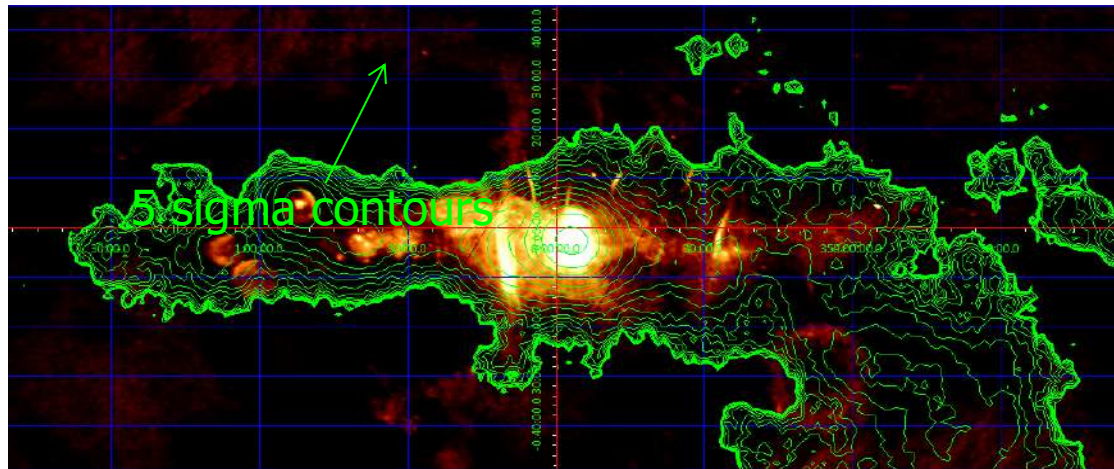
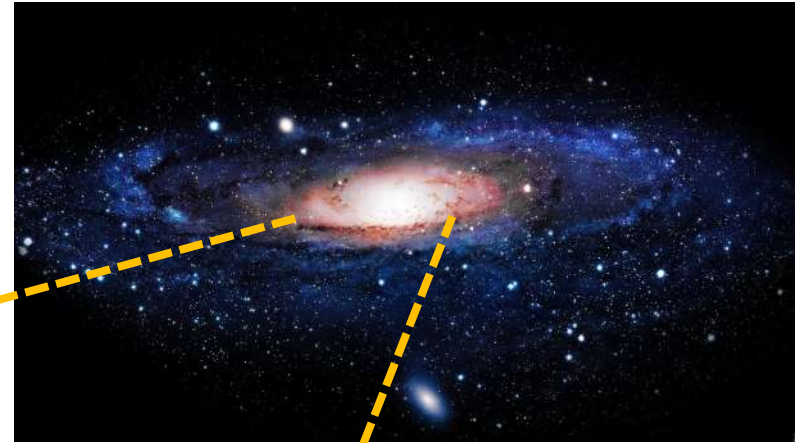
**Propagation of CR
Accelerated by
Reconnection :**

CRPropa3 code
Alves Batista
et al. (2016)



Rodriguez-Ramirez, de Gouveia Dal Pino, Alves-Batista, ApJ 2019

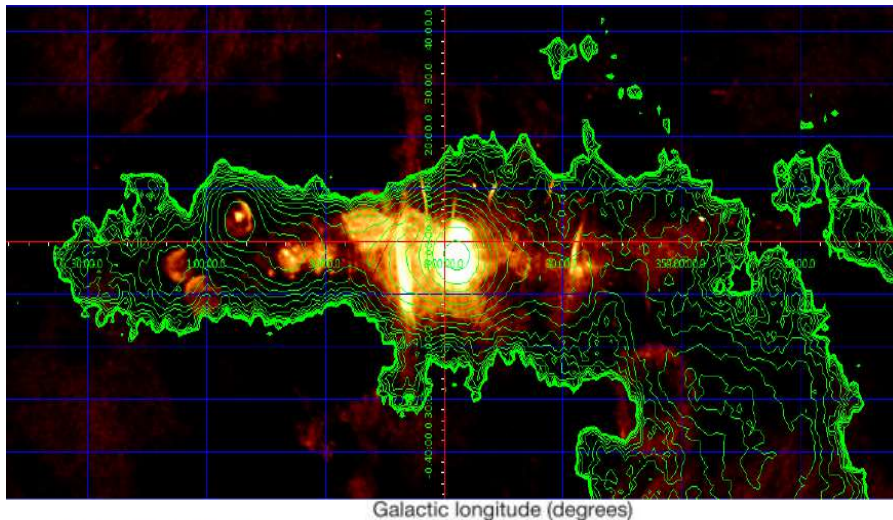
Emissão de Raios Gama no Centro da nossa Galáxia por raios cósmicos



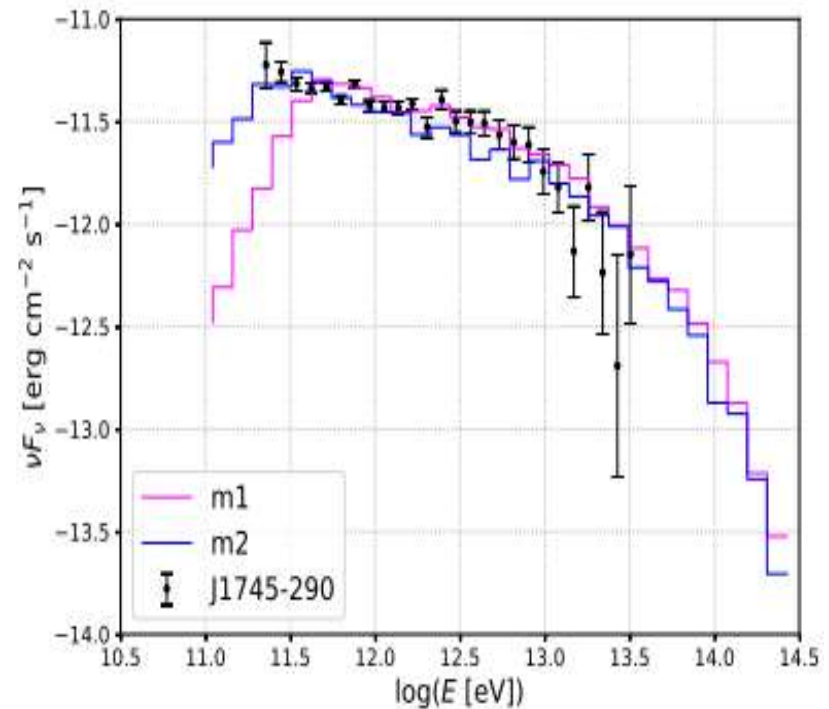
Observatório HESS

Radiação Gama no Centro da nossa Galáxia calculada por simulações numéricas e comparada com observações

VHE emission at the galactic centre HESS J1745-290



H.E.S.S. Nature 2016



Rodriguez-Ramirez, de Gouveia Dal Pino, Alves-Batista, ApJ 2019

Grupo GAPAE @ IAG-USP

