

Tópicos de Física II: Física de Astropartículas

A tale of cosmic rays narrated in gamma rays by Fermi

Pedro Henrique Oliveira da Silva

2024

- 1 INTRODUÇÃO
- 2 ACELERAÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS EM REMANESCENTES DE SUPERNOVAS
- 3 RAIOS CÓSMICOS EM REGIÕES DE FORMAÇÃO ESTELAR MASSIVA
- 4 PROPAGAÇÃO EM LARGA ESCALA DE RAIOS CÓSMICOS NA VIA LÁCTEA
- 5 RAIOS CÓSMICOS EM GALÁXIAS EXTERNAS E ALÉM
- 6 REFERÊNCIAS

33RD INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, RIO DE JANEIRO 2013  
THE ASTROPARTICLE PHYSICS CONFERENCE

ICRC  
2013

## A tale of cosmic rays narrated in $\gamma$ rays by *Fermi*

LUIGI TIBALDO<sup>1</sup> FOR THE *Fermi* LAT COLLABORATION.

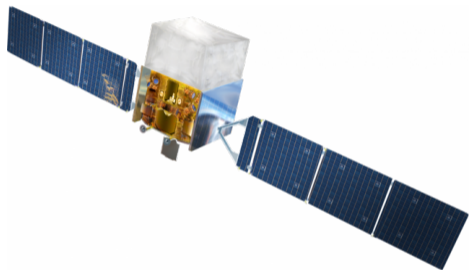
<sup>1</sup> *Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory*

[ltibaldo@slac.stanford.edu](mailto:ltibaldo@slac.stanford.edu)

## Breve revisão de conceitos conhecidos:

- Raios cósmicos são produtos de processos muito energéticos;
- São constituintes fundamentais do meio interestelar;
- Questões:
  - Como são acelerados?
  - Mecanismo de propagação?
  - Interação com o meio interestelar?

- Campos magnéticos alteram a trajetória de raios carregados → dificulta a identificação direta de seu lugar de origem;
  - Interações com meios produzem canais secundários neutros → detectados e traçados
- ⇒ **Raios gama** com um papel importante. Produzidos *principalmente* em:
- ① colisões inelásticas entre núcleons de alta energia e núcleos de gás;
  - ② bremsstrahlung de elétrons de alta energia nos núcleos de gás;
  - ③ espalhamento Compton inverso.



## Fermi Gamma-ray Space Telescope (Gamma-ray Large Area Space Telescope):

- Lançado em 11 de junho de 2008;
- Altitude:  $\sim 565$  km  $\rightarrow$   $\sim 550$  km;
- Alcance: 20 MeV  $\sim$  300 GeV

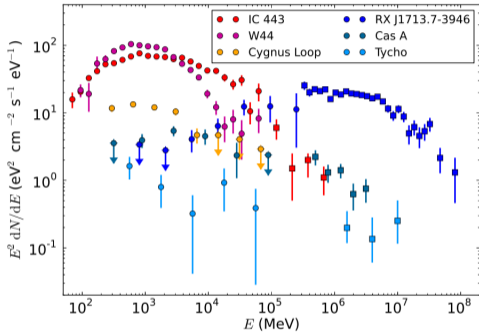
# ACELERAÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS EM REMANESCENTES DE SUPERNOVAS

SNRs são consideradas como as mais prováveis fontes de raios cósmicos;

- *Theory/model of nonlinear diffusive shock acceleration* (NDSA)
- Porém, ainda faltam resultados sobre a aceleração de prótons.
  - Como elétrons de alta energia também emitem raios gama (bremsstrahlung e IC), a identificação se torna difícil.
- (2013) Fermi-LAT detecta raios gama do decaimento de pions em duas SNRs.

Qual o limite de energia das partículas aceleradas em uma SNR?

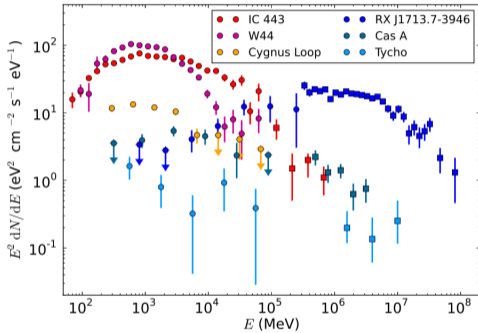
- (2012) LAT mediu o espectro de raios gama na SNR Tycho: prótons acelerados a  $\sim 500$  TeV.



Fermi-LAT possui uma resolução angular melhorada com relação aos antecessores:

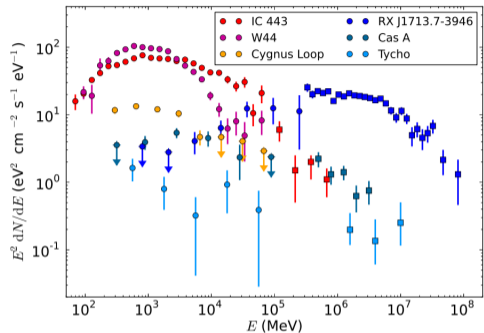
- detecção de muitos SNRs;
- consegue mostrar com clareza a associação entre emissão de raios gama e a região de choque;

Figura: espectro de raios gama das SNRs combinando resultados do LAT com *imaging atmospheric/air Cherenkov telescopes* (HESS, VERITAS, MAGIC).



- SNRs de meia-idade ( $\gtrsim 10^4$  anos) interagindo em meio interestelar denso são as mais luminosas dentro da faixa de energia do LAT
  - Com a mesma idade, porém em meios menos densos, a luminosidade é menor (Cygnus Loop).
- Há uma quebra no espectro na ordem de GeV:
- E há uma curvatura (de origem não clarificada):
  - envelhecimento da onda de choque;
  - evolução das propriedades das partículas que escapam;
  - interações da onda de choque com o meio neutro circundante.





SNRs jovens (idade de alguns séculos a  $10^3$  anos) expandindo em meios pouco densos possuem um espectro que se estende até TeV.

- Segundo a NDSA, a eficiência máxima de aceleração ocorre perto do fim da fase de expansão livre ( $\sim 10^3$  anos);
- Modelos onde raios gamas são predominantemente produzidos por IC são mais adequados.

Até a data do artigo, 12 SNRs emissoras de raios gama foram **identificadas** e mais de 40 eram candidatas.

20% dos CRs são acelerados em regiões de formação estelar massiva;  
Cerca de 80% das supernovas resultam do colapso de núcleos de estrelas massivas, frequentemente em aglomerados de estrelas massivas;

- CRs são acelerados em regiões de formação estelar massiva pela ação repetida de ondas de choque de SNR e ventos estelares.

Independente do método, o ambiente (turbulento) tem forte influência:

- Ventos supersônicos, frentes de ionização, campos de radiação intensificados

Na região de formação Cygnus X (na constelação de Cisne), o LAT encontrou um excesso na emissão de raios gama.

O espectro desses raios em excesso é compatível com o de nuvens interestelares locais próximas do Sistema Solar.

- (2011) A morfologia desses raios se parece com a de raios presentes em cavidades de 50 pc (abertas por ventos estelares) em Cygnus.
- O espectro "duro" dificulta a identificação com outros processos;
  - Porém o espectro indica que os CRs foram recentemente acelerados
  - As cavidades são casulos de CRs "jovens".
  - Aceleradas por SNRs?

Mais dados precisam ser coletados, mas já sugerem que essas regiões são bons testes sobre a propagação de CR.

A busca pela origem desse excesso ainda está aberta (até a data do artigo):

- Milagro  $\sim$  TeV
- ARGO  $\sim$  600 GeV
- Ambas mediram um fluxo significativamente maior do que IACTs.

Existem mais regiões como essa na Via Láctea e novas observações do LAT em conjunto com outros telescópios podem fornecer um melhor entendimento sobre aceleração e propagação de CRs nesses ambientes.

É conhecido que a propagação em larga escala de raios cósmicos no meio interestelar é dominada pela difusão de campos magnéticos desordenados.

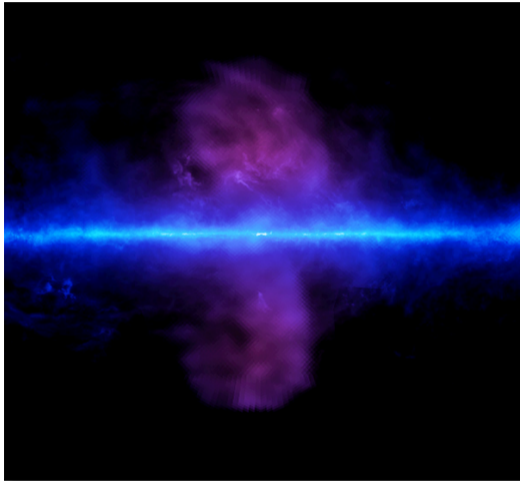
- A abordagem, então, tem sido feita usando códigos numéricos (ex: GALPROP) baseados em modelos simplificados da Via Láctea.
  - Porém os parâmetros de entrada podem ser incertos.
- Emissões de raios gama interestelares podem caracterizar algumas dessas propriedades (ex: densidade, espectro).

Emissividade rastreia a densidade dos CRs e codifica informações sobre o seu espectro;

- Assim, a emissividade local pode ser usada para inferir o espectro interestelar local de CRs;
- Pode ser usada para interpretar medidas de raios gama em termos das propriedades dos CRs;

(2012) Propriedades de larga escala da emissão de raios gama difusos  $\times$  modelos GALPROP:

- Concordância de  $\sim 30\%$ ;
- Desvios significativos (ex: influência de peculiaridades locais, como os casulos onde CRs eram acelerados);
- Mostra as limitações dos modelos atuais.



## Bolhas de Fermi:

- Estruturas que se estendem acima e abaixo do plano da Via Láctea;
- 50 mil anos luz de ponta a ponta;
- Aparentemente emanam do centro da galáxia;
- Provavelmente são abastecidas pela atividade próxima do (ou no) centro, como do buraco negro;
- Emitem raios gama de maior energia que o disco galáctico.

Raios gama interestelares são produzidos em galáxias externas da mesma maneira que na Via Láctea.

- Sem complicações de enxergar a galáxia por dentro;
- É possível ver sua emissão como um todo.

Porém a resolução angular dos telescópios dificulta separar a emissão de objetos das galáxias e emissão interestelar.



## Contribuições do Fermi-LAT:

- Estudou com boa resolução algumas galáxias próximas;
- Dados da Grande Nuvem de Magalhães: intensidade de raios gama tem um pico em 30 Doradus:
  - Nebulosa de Tarântula: a maior e mais massiva região de formação estelar conhecida no Grupo Local.
- Revelou uma relação quase linear entre luminosidades em raios gama e IR ou rádio;
  - Usando dados de galáxias próximas e galáxias starburst mais distantes, independente de núcleo ativo.
  - Galáxias como calorímetros: energia injetada por CRs leptônicos são dissipadas como radiação em outros comprimentos de onda.
- O mesmo não acontece para CRs hadrônicos: é possível que eles escapem para o meio interestelar (faltam dados).

- [1] Tibaldo, L. (2014). A tale of cosmic rays narrated in  $\gamma$  rays by Fermi. *Braz. J. Phys.*, 44, 600–608.
- [2] Spurio, M. (2014). *Particles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach*. Springer International Publishing.