

# IX FÍSICA NAS FÉRIAS VII ESCOLA AVANÇADA DE FÍSICA

◻ QUE EXISTE ALÉM DE PRÓTONS, ELÉTRONS E  
NÊUTRONS?  
UMA INTRODUÇÃO ÀS PARTÍCULAS  
ELEMENTARES

Um pouco sobre raios cósmicos

RAFAEL ALVES BATISTA

# A descoberta da radiação cósmica



- No final do séc. XIX e início do séc. XX foram descobertos diversos elementos radioativos.
- 1900: Elster e Geitel notam a existência de uma radiação ionizante no ambiente.
- Isto foi atribuída à existência de materia radioativo em todos os lugares.
- 1912: Victor Hess realiza experimentos com balões para verificar a origem da radiação ionizante. Ele verifica que o poder ionizante da radiação aumenta com a altitude.
- 1925: Millikan verifica que o poder da radiação ionizante diminui com a profundidade.

# A descoberta da radiação cósmica

Se o poder ionizante está aumentando com a altitude, então em lugares mais altos deve haver mais radiação... Se lugares mais altos tem mais radiação, então esta radiação não deve vir da Terra, e sim do espaço!!!!

- No final do séc. XIX e início do séc. XX foram descobertos diversos elementos radioativos.
- 1900: Elster e Geitel notam a existência de uma radiação ionizante no ambiente.
- Isto foi atribuída à existência de materia radioativo em todos os lugares.
- 1912: Victor Hess realiza experimentos com balões para verificar a origem da radiação ionizante. Ele verifica que o poder ionizante da radiação aumenta com a altitude.
- 1925: Millikan verifica que o poder da radiação ionizante diminui com a profundidade.



# A descoberta da radiação cósmica

Se o poder ionizante está aumentando com a altitude, então em lugares mais altos deve haver mais radiação... Se lugares mais altos tem mais radiação, então esta radiação não deve vir da Terra, e sim do espaço!!!!

- No final do séc. XIX e início do séc. XX foram descobertos diversos elementos radioativos.
- 1900: Elster e Geitel notam a existência de uma radiação ionizante no ambiente.
- Isto foi atribuída à existência de materia radioativo em todos os lugares.
- 1912: Victor Hess realiza experimentos com balões para verificar a origem da radiação ionizante. Ele verifica que o poder ionizante da radiação aumenta com a altitude.
- 1925: Millikan verifica que o poder da radiação ionizante diminui com a profundidade.

*"É uma evidência indubitável da existência destes raios etéreos duros de origem cósmica penetrando na atmosfera uniformemente em todas as direções."*

# A descoberta da radiação cósmica



Victor Hess em um de seus famosos vôos com balões.

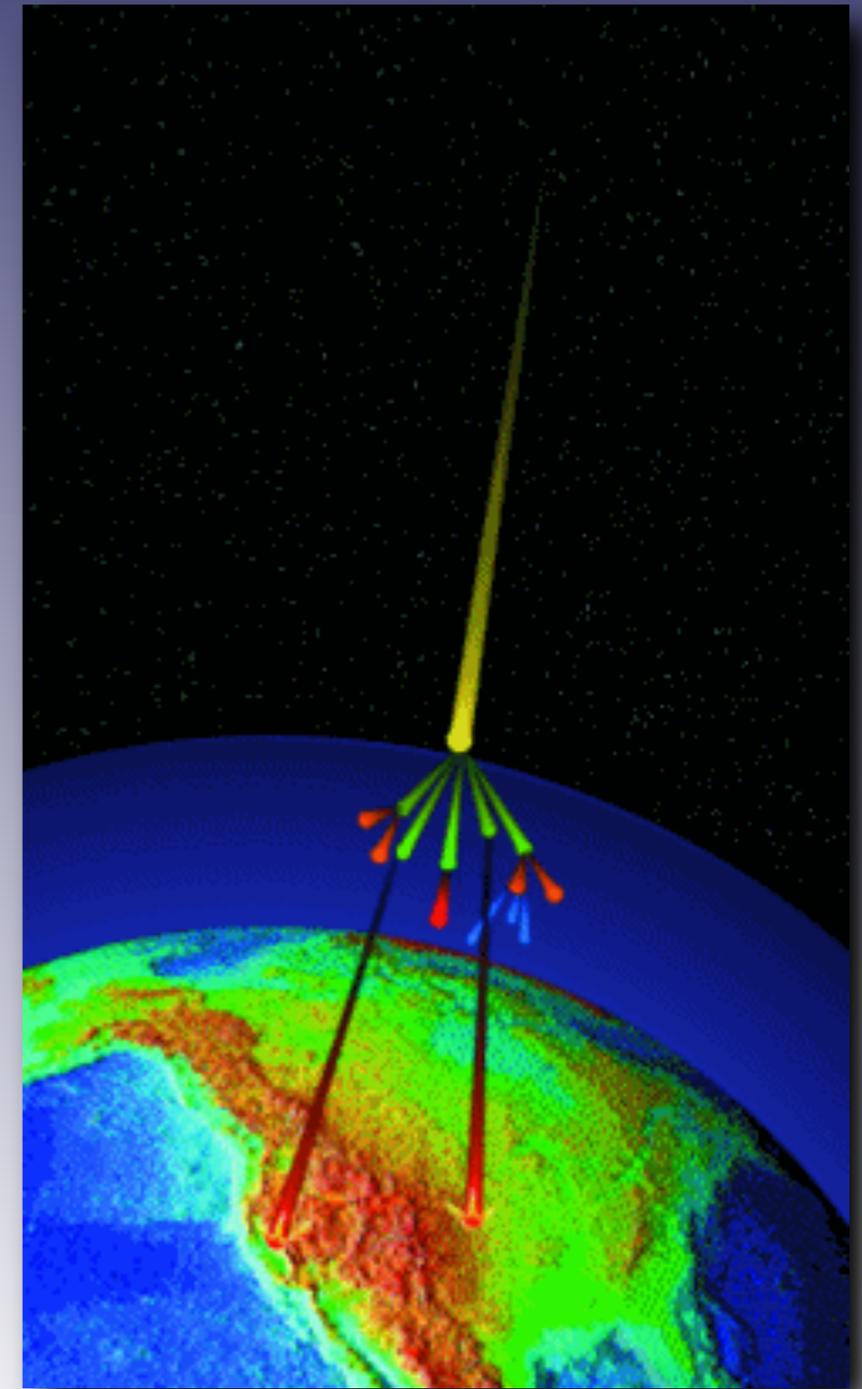
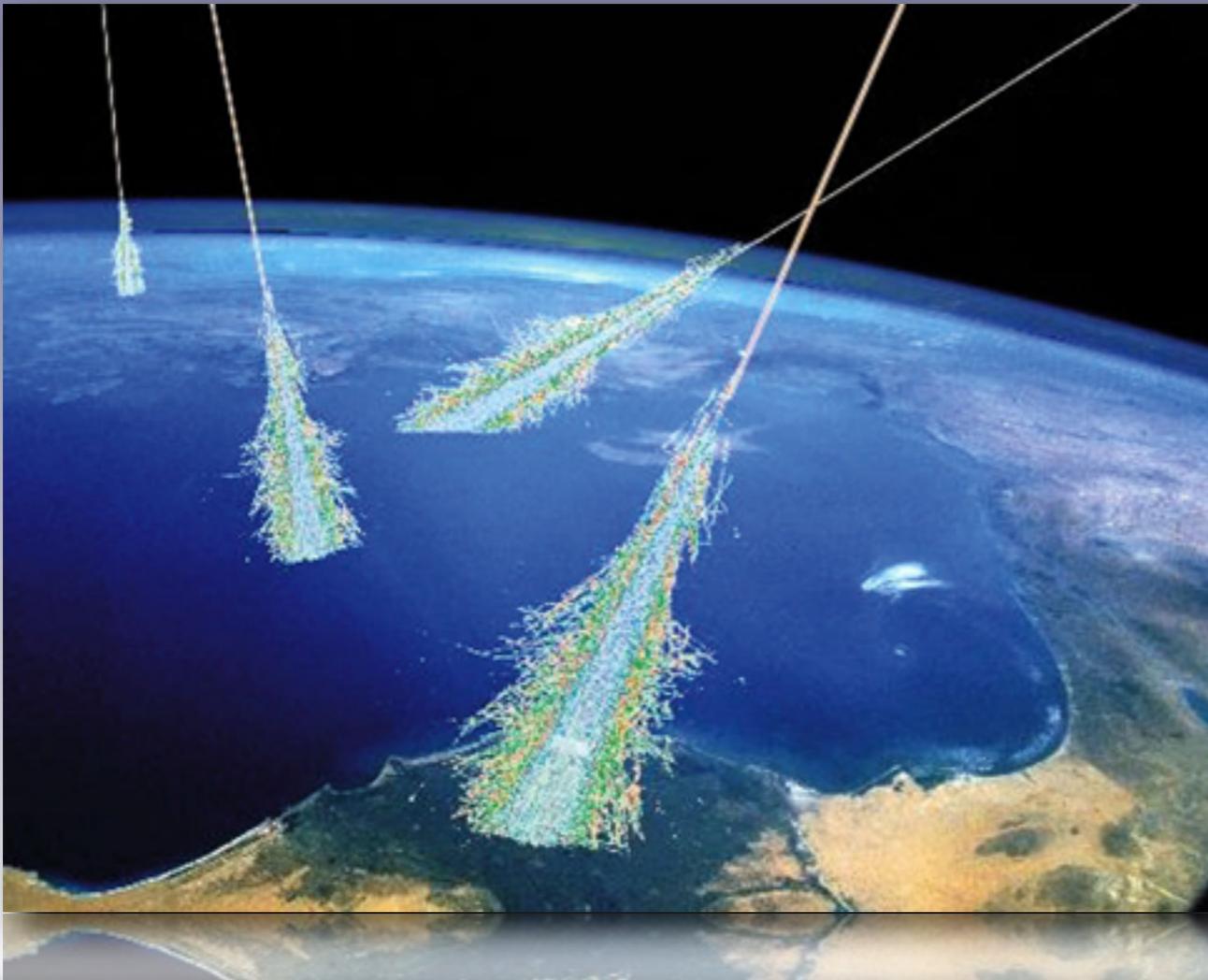
# (Millikan e a carga elementar do elétron)



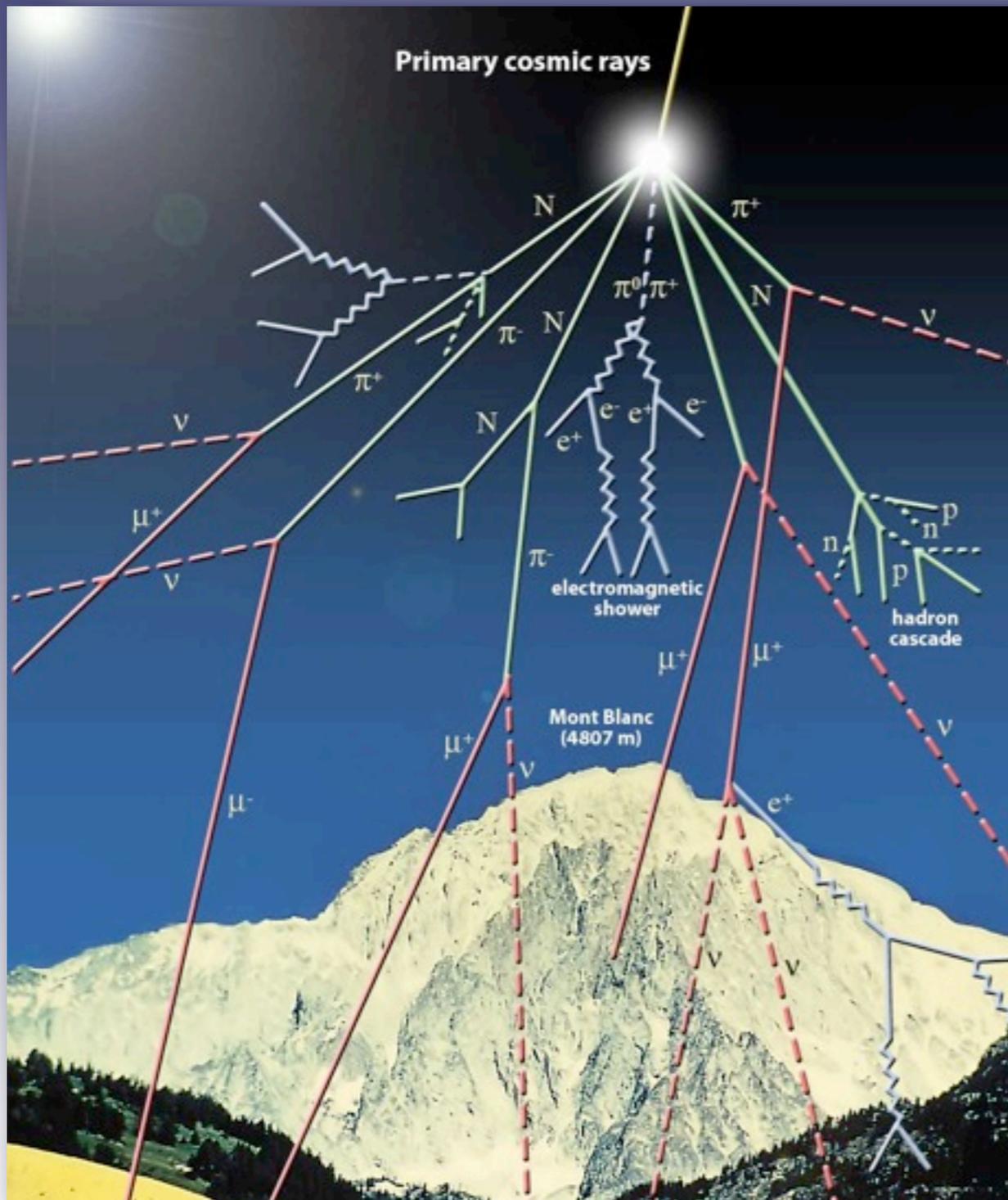
Experimento de Millikan para determinação da carga elementar do elétron.

# O que são os raios cósmicos?

- Pode ser um elétron, um núcleo atômico ou um raio gama.
- Podem vir do Sol, de outras partes da galáxia, outras estrelas, outras galáxias, etc.
- São as partículas mais energéticas conhecidas.



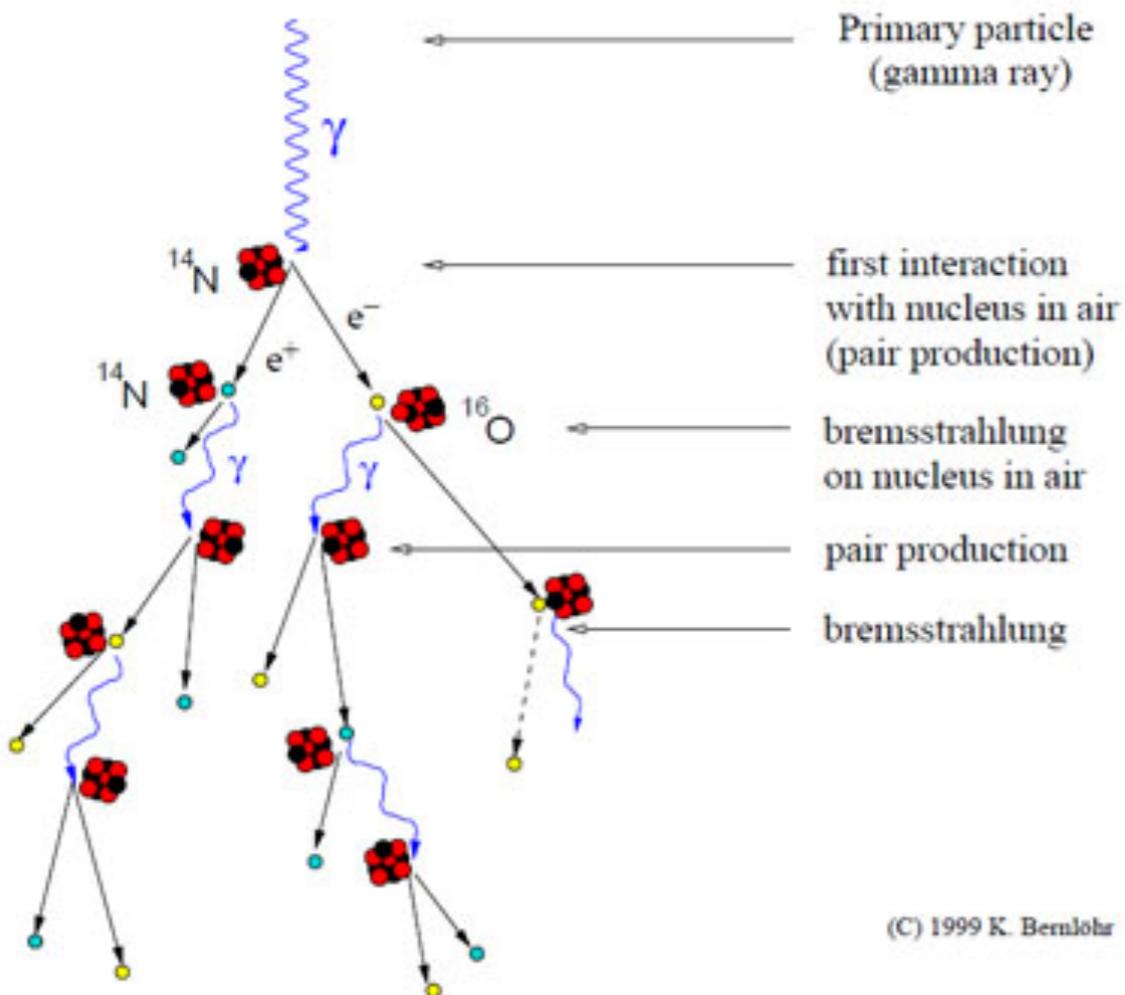
# Chuveiros atmosféricos extensos



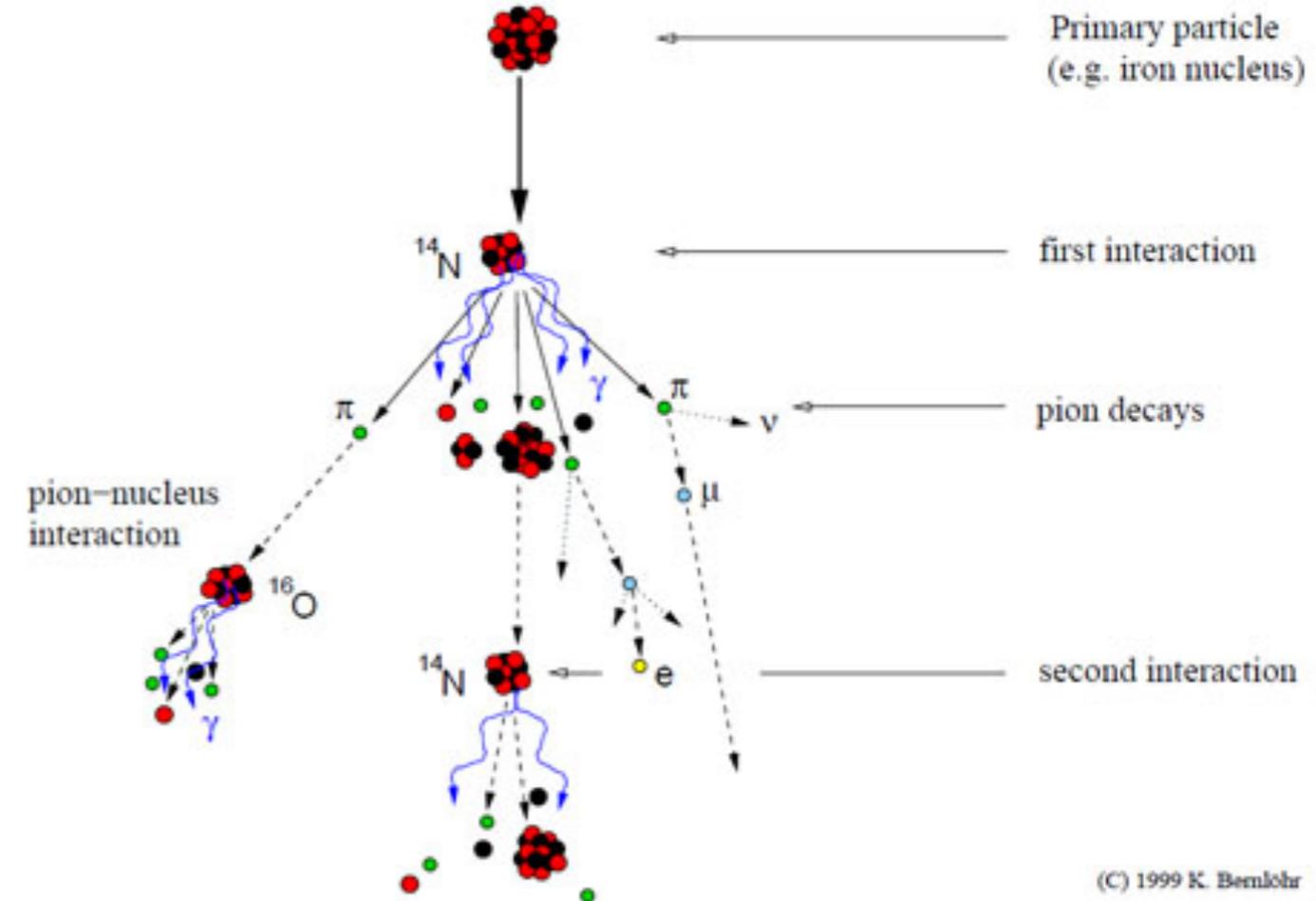
- 1939: Pierre Auger
- Conhecido como EAS (extensive air shower).
- Interação da partícula primária com moléculas presentes na atmosfera resulta em outras partículas, que por sua vez interagem e resultam em outras partículas, criando uma cascata de partículas.

# Chuveiros atmosféricos extensos

Development of gamma-ray air showers



Development of cosmic-ray air showers



Desenvolvimento do chuveiro atmosférico extenso na atmosfera no caso de raios gama (à esquerda) e raios cósmicos (à direita).

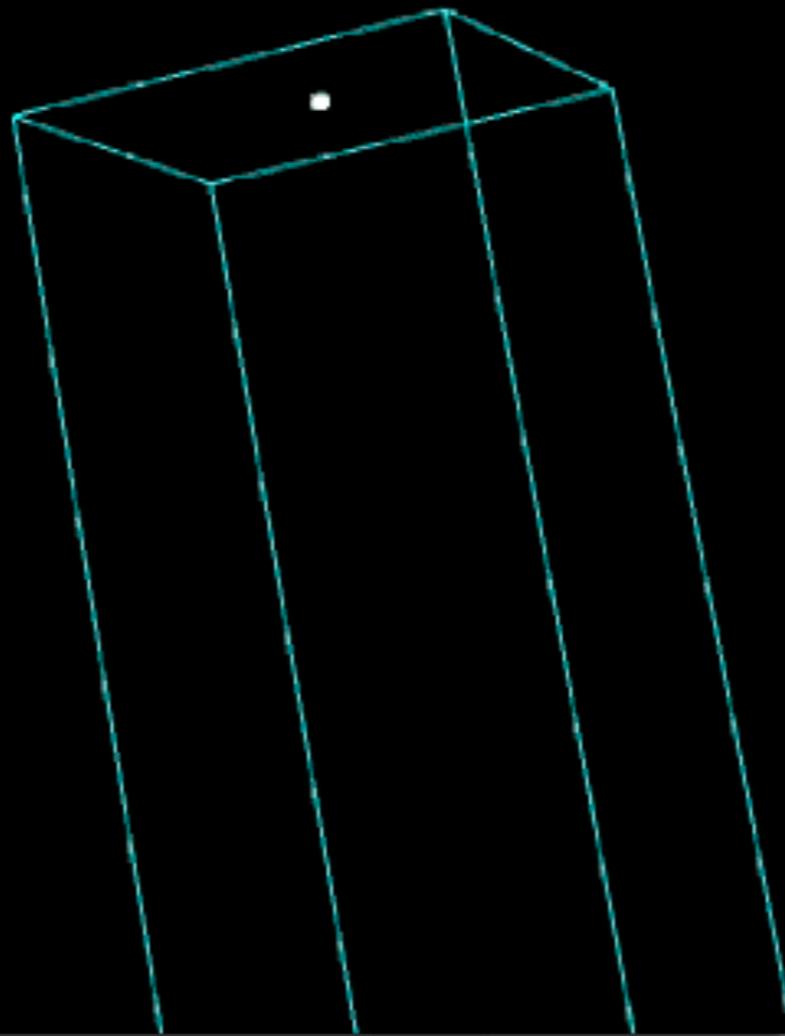
Alguns autores não consideram raios gama como raios cósmicos. Consideramos aqui que raios cósmicos são todas as partículas e formas de radiação eletromagnética provenientes do espaço, que penetram na atmosfera e têm energia superior a 1 GeV.

# Chuveiros atmosféricos extensos

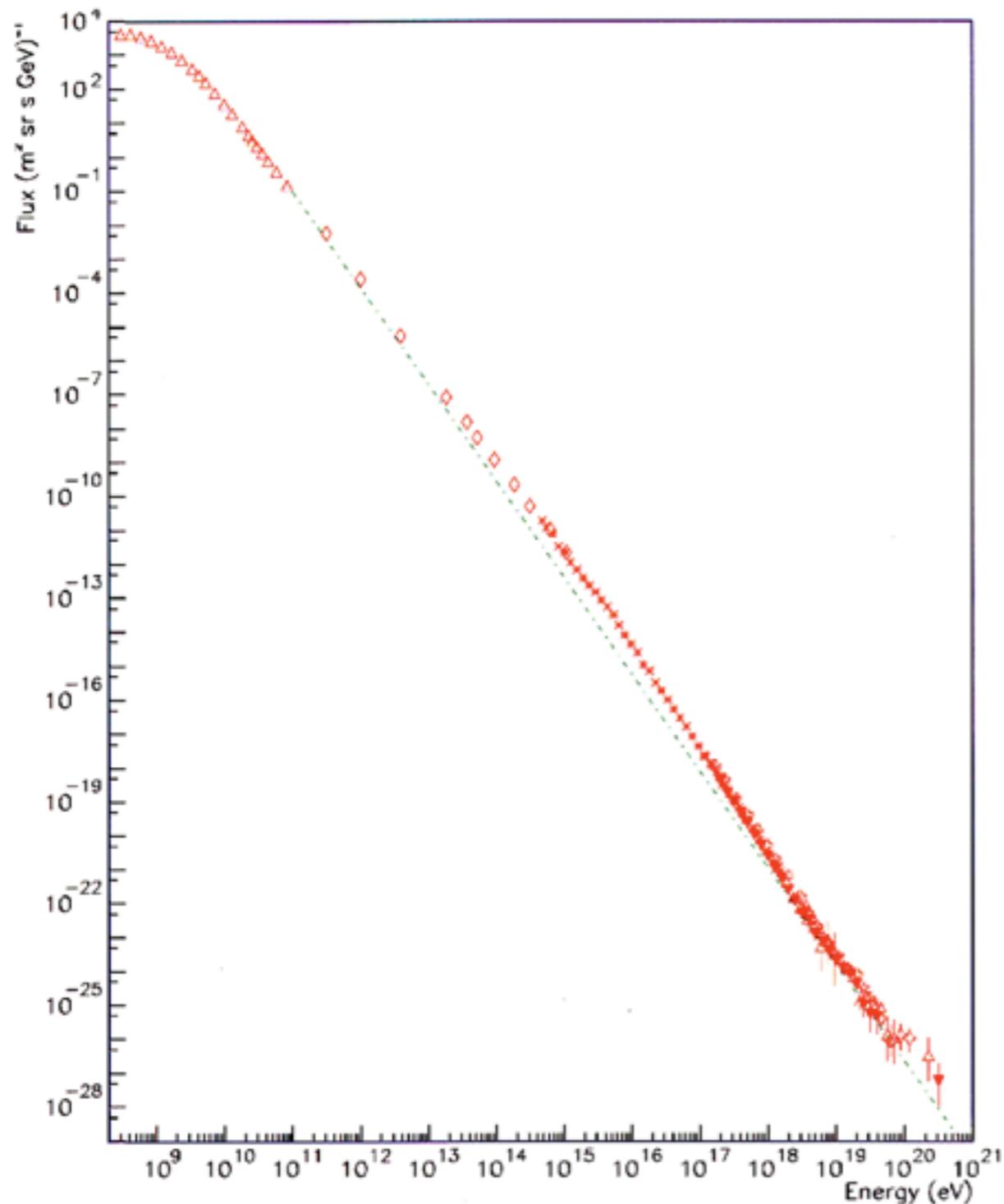
Créditos: COSMUS, Sergio Sciutto

# Chuveiros atmosféricos extensos

Créditos: COSMUS, Sergio Sciutto

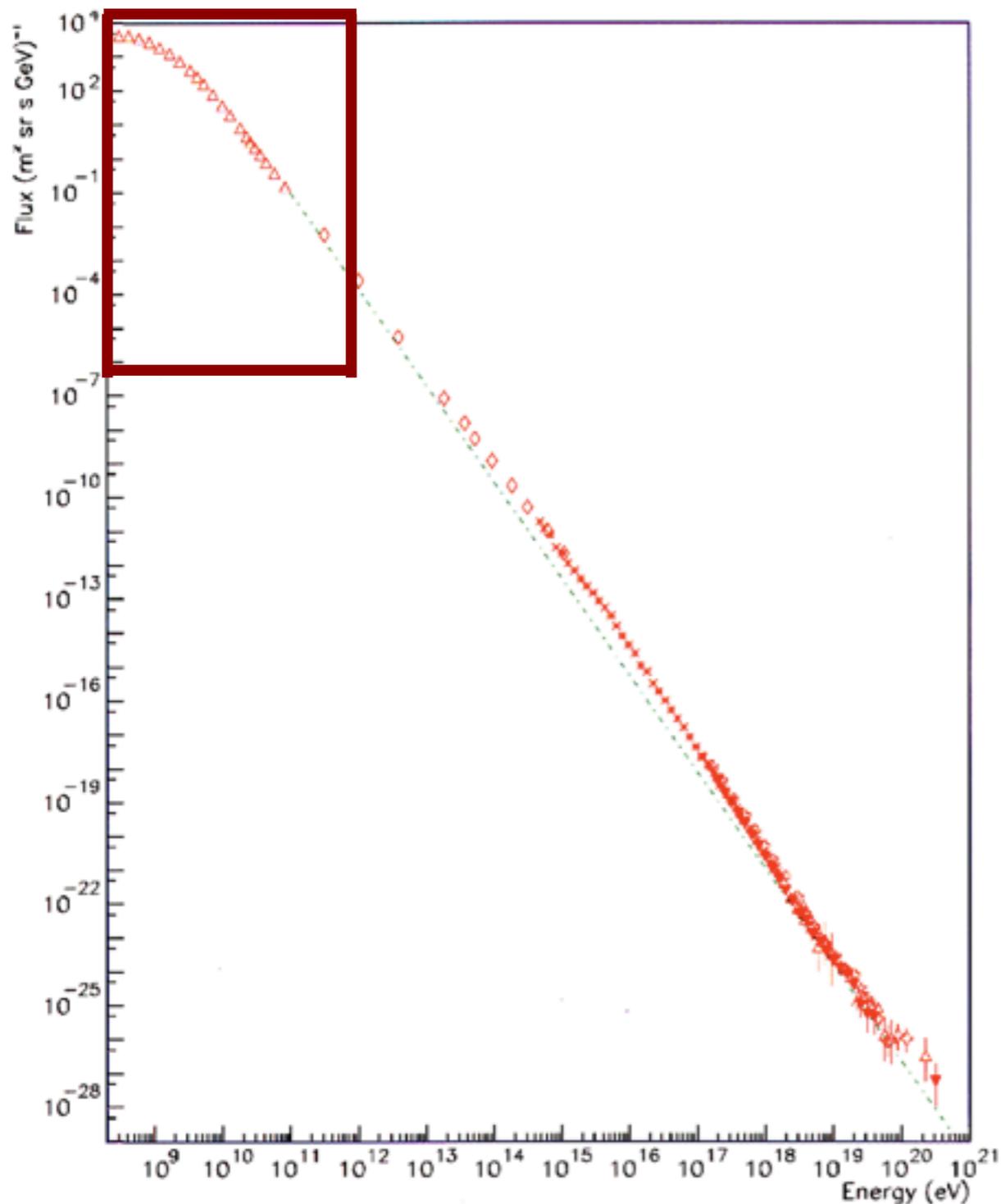


# O espectro de raios cósmicos



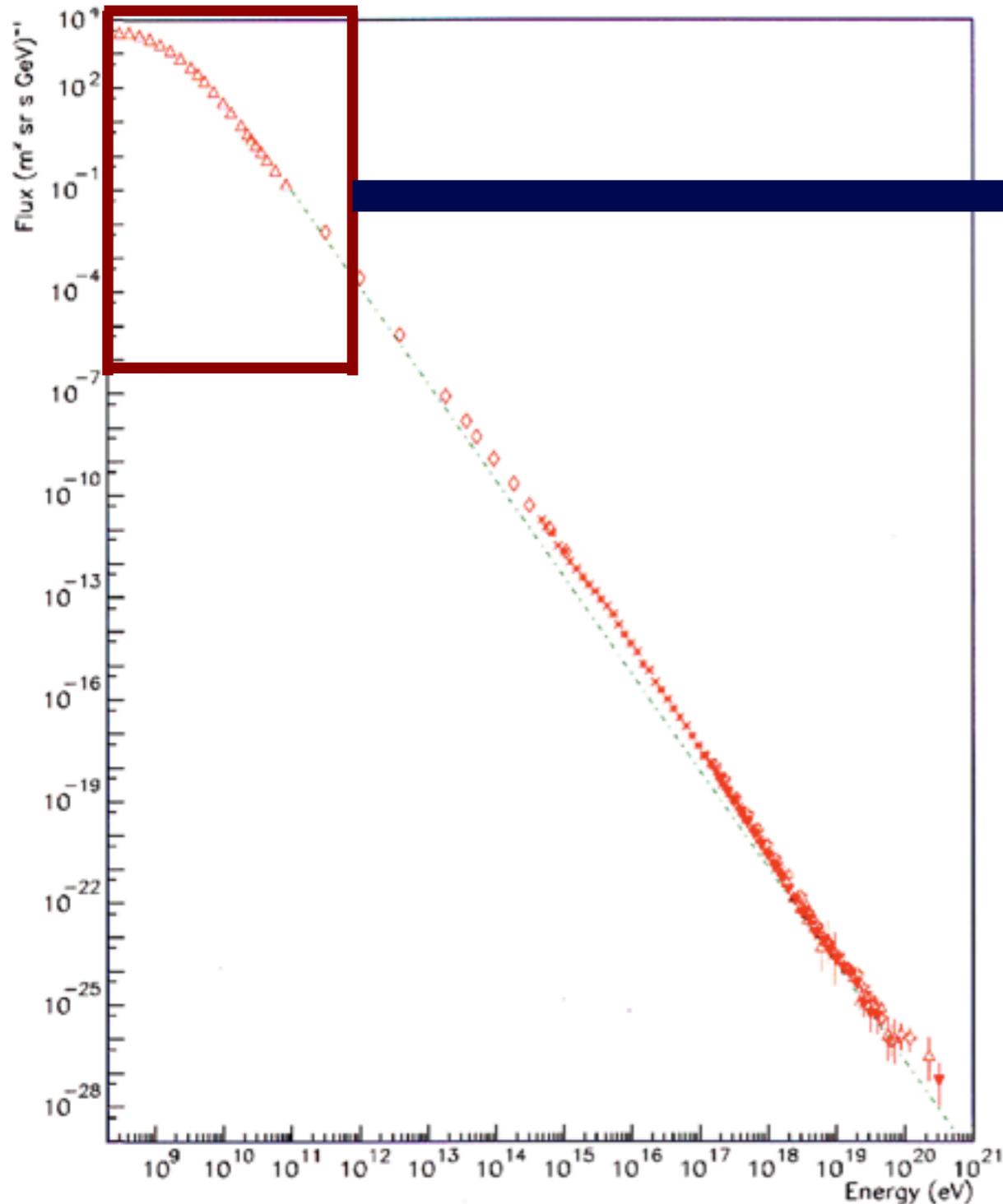
Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# O espectro de raios cósmicos



Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

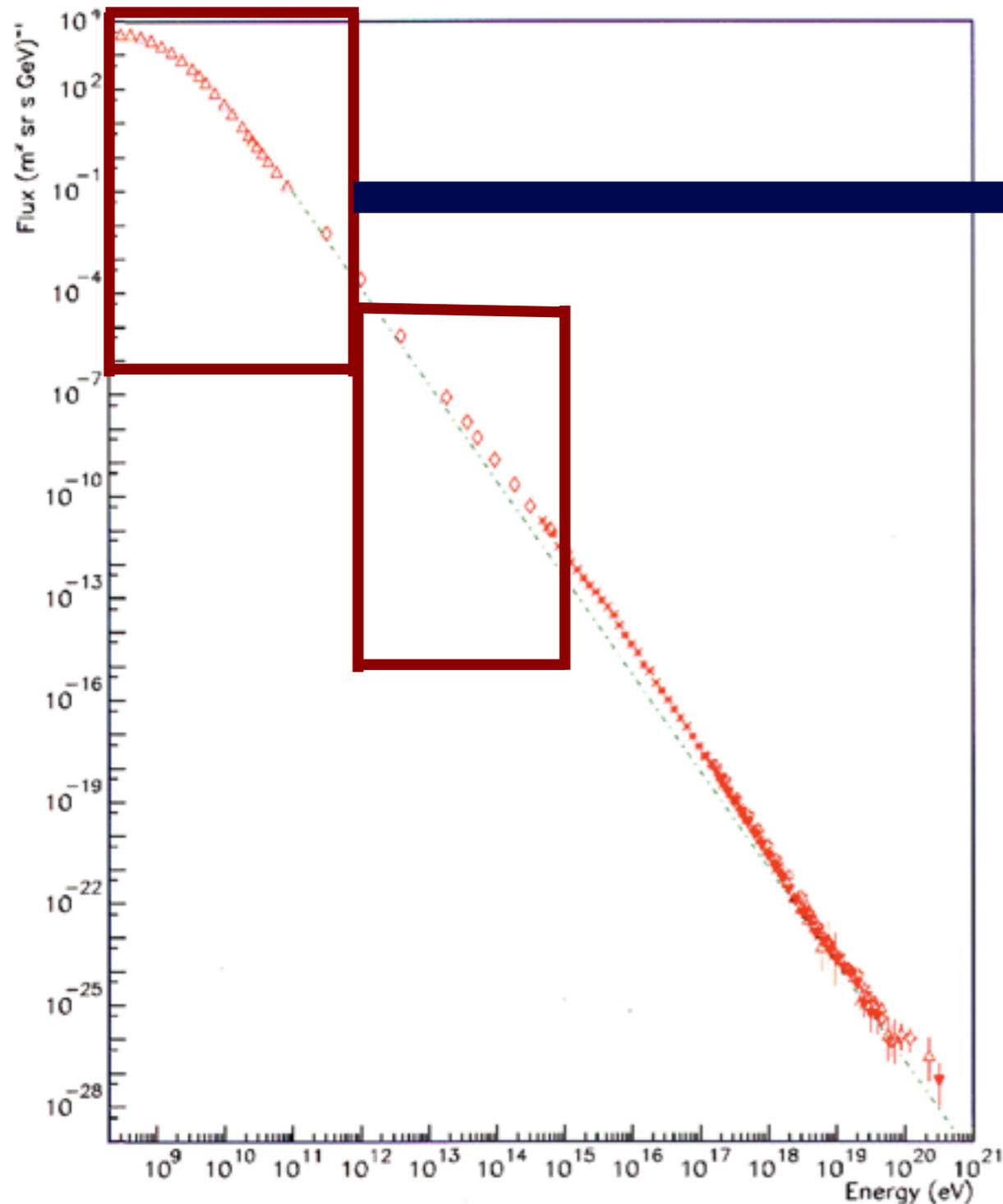
# O espectro de raios cósmicos



10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

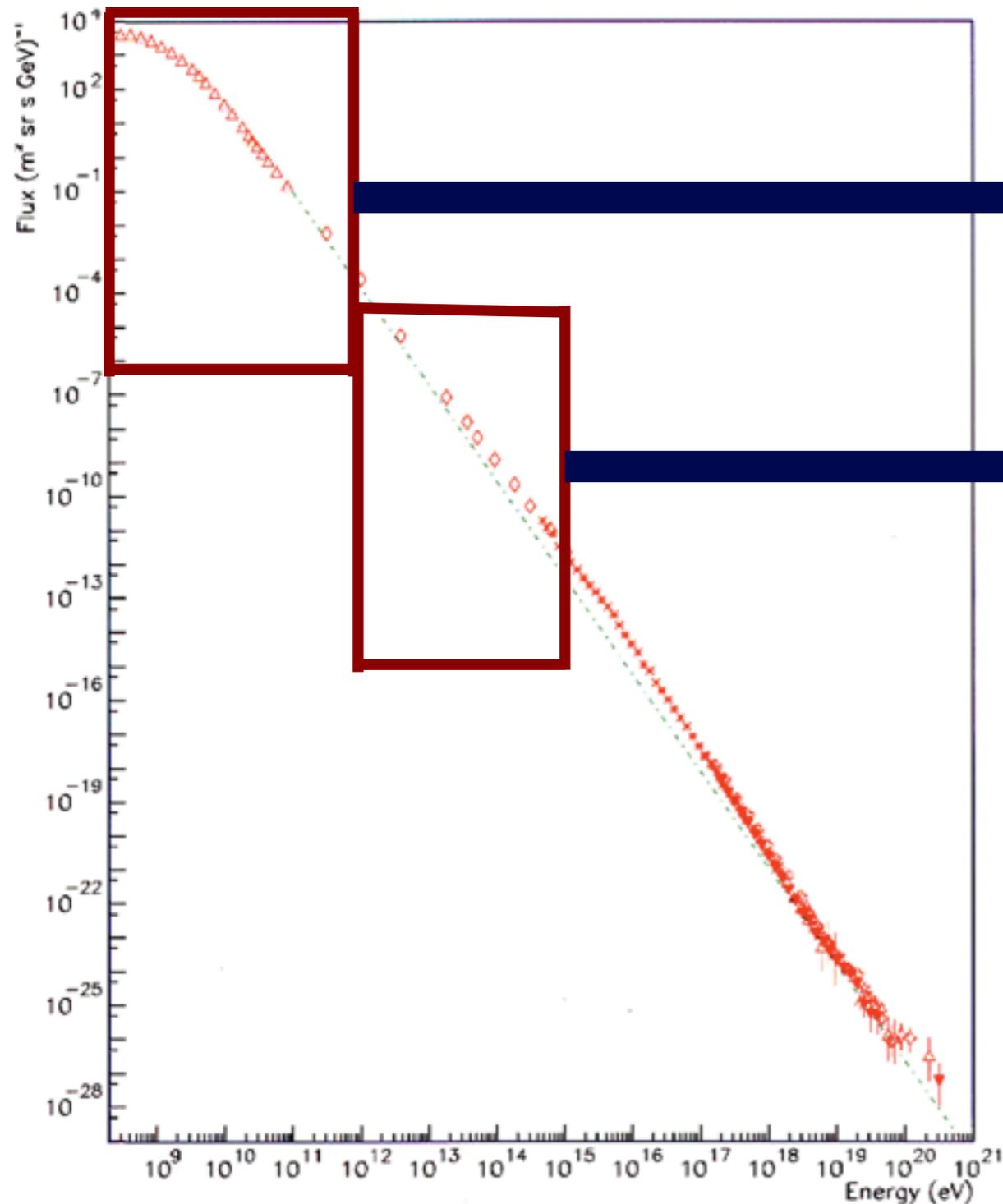
# O espectro de raios cósmicos



$10^9 - 10^{12}$  eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# O espectro de raios cósmicos

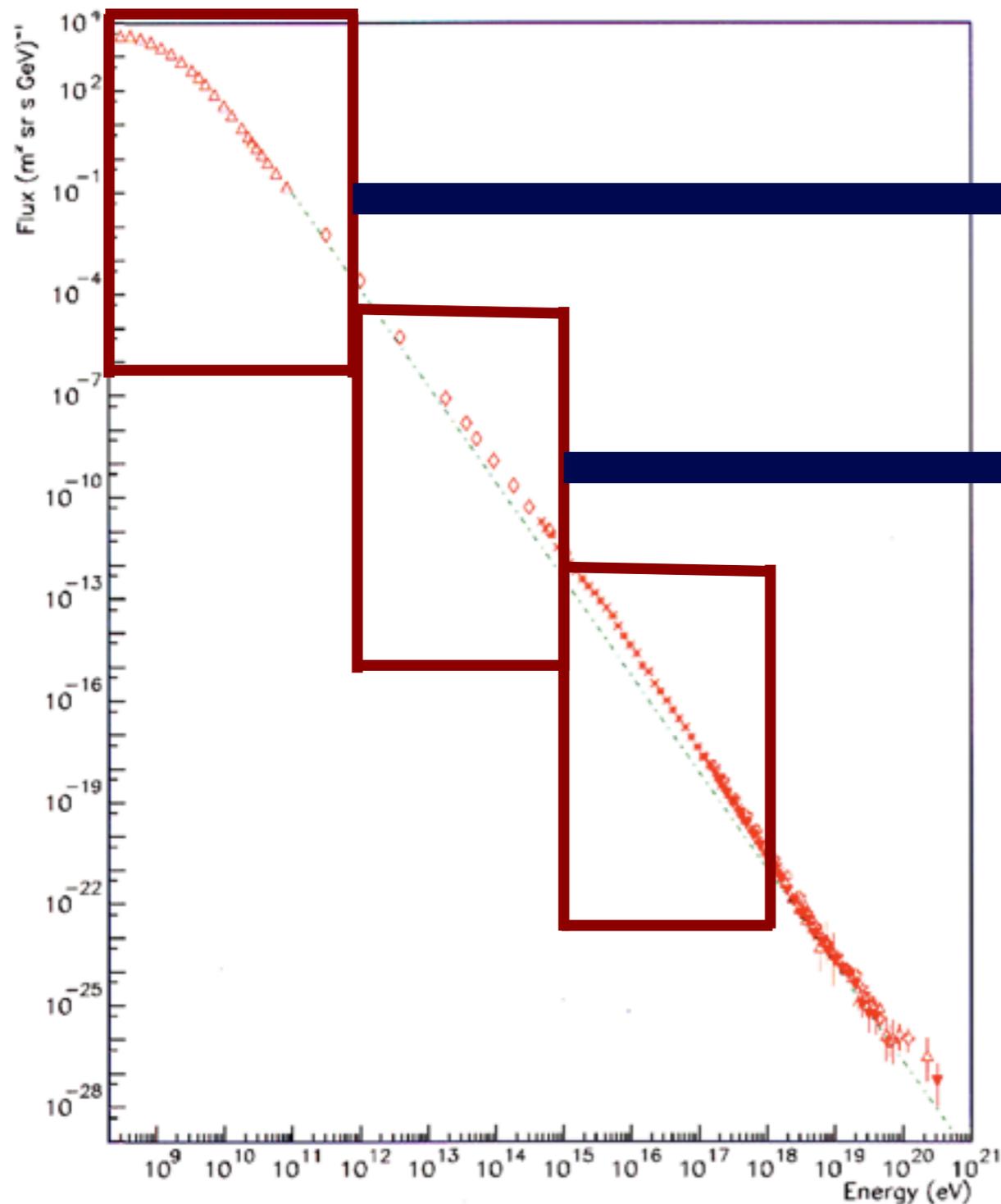


$10^9 - 10^{12}$  eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

$10^{12} - 10^{15}$  eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# O espectro de raios cósmicos

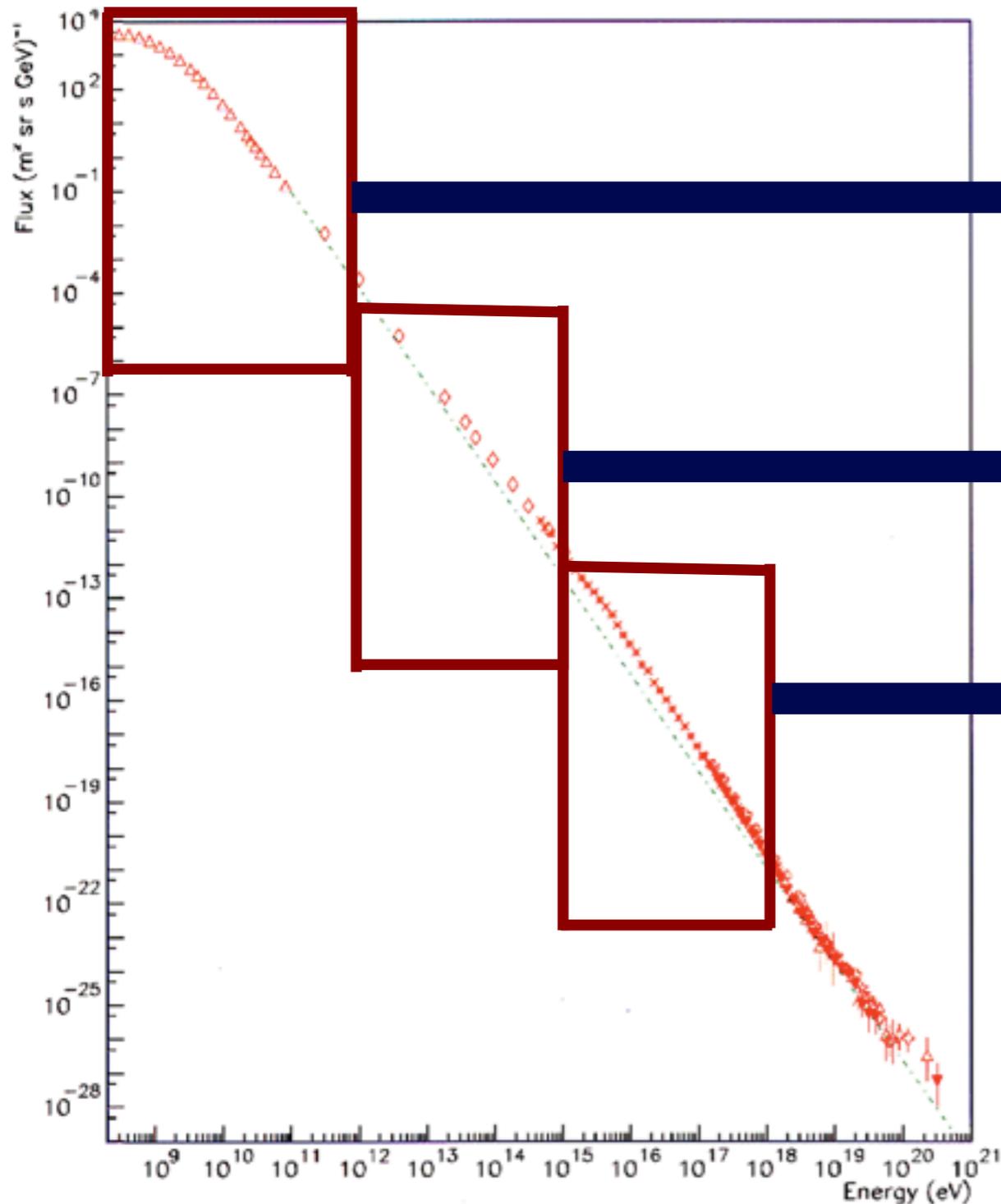


10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

10<sup>12</sup> - 10<sup>15</sup> eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# O espectro de raios cósmicos



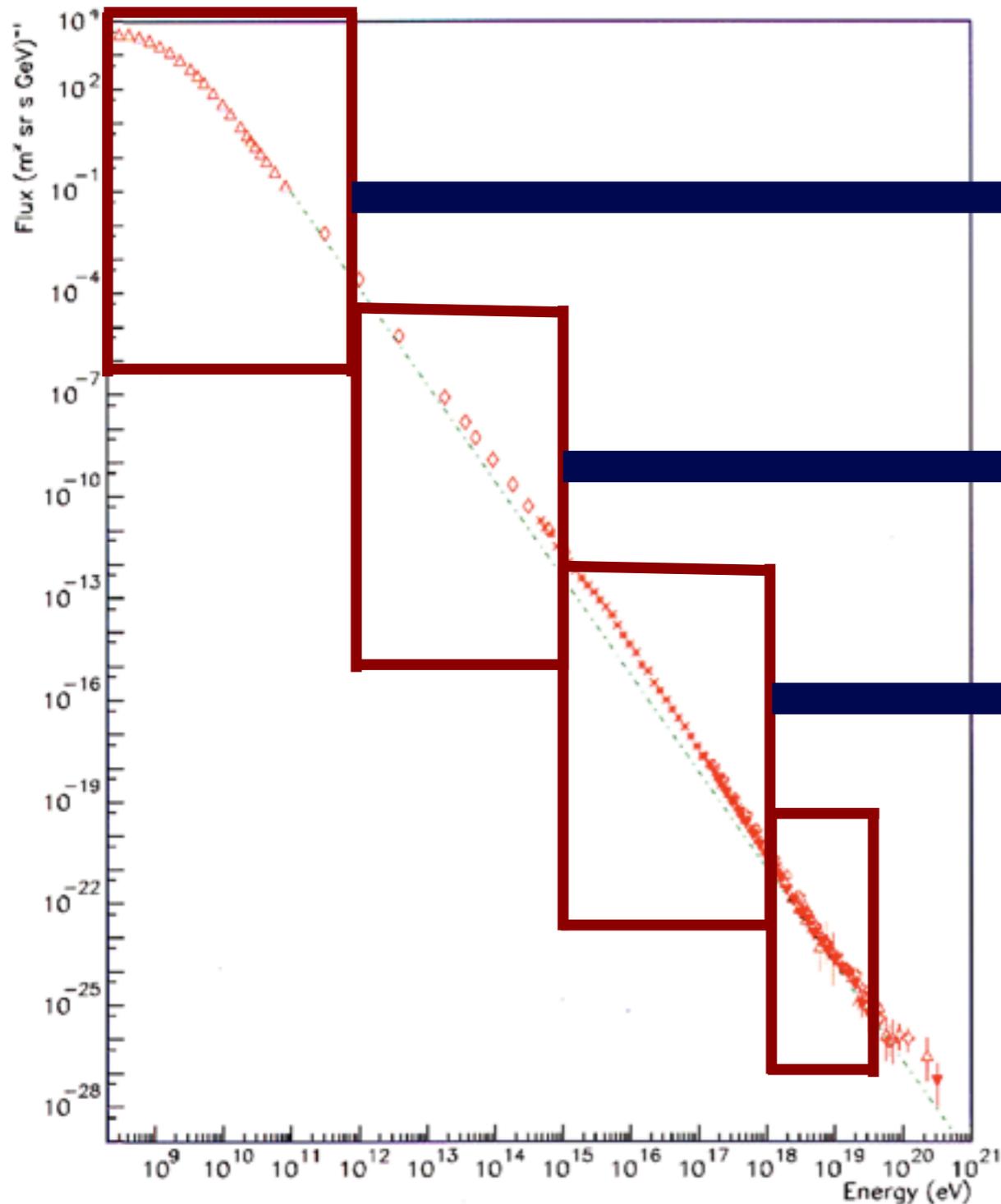
10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

10<sup>12</sup> - 10<sup>15</sup> eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

10<sup>15</sup> - 10<sup>18</sup> eV: raios cósmicos galácticos, provavelmente acelerados por supernovas.

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# O espectro de raios cósmicos



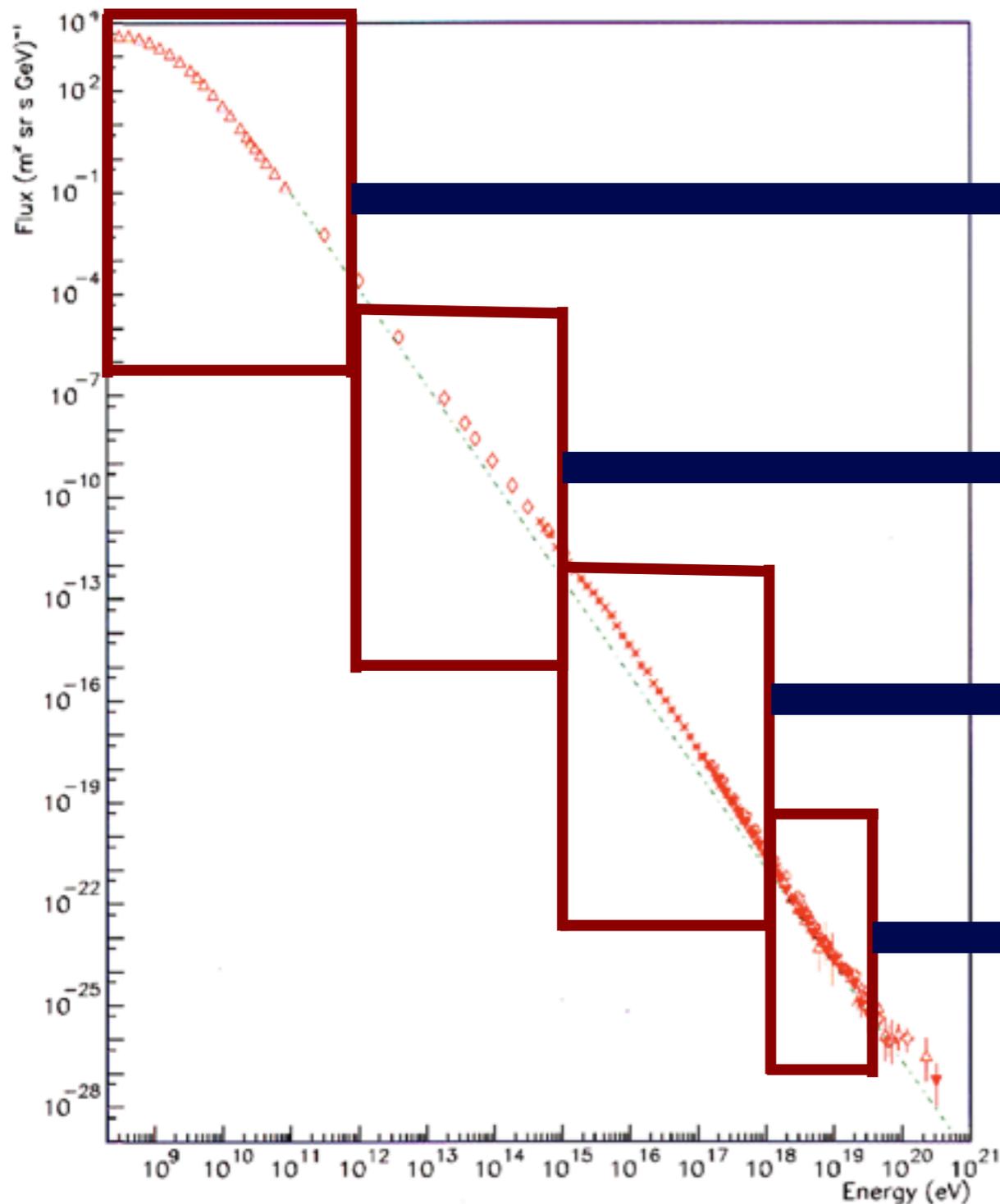
Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

10<sup>12</sup> - 10<sup>15</sup> eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

10<sup>15</sup> - 10<sup>18</sup> eV: raios cósmicos galácticos, provavelmente acelerados por supernovas.

# O espectro de raios cósmicos



Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

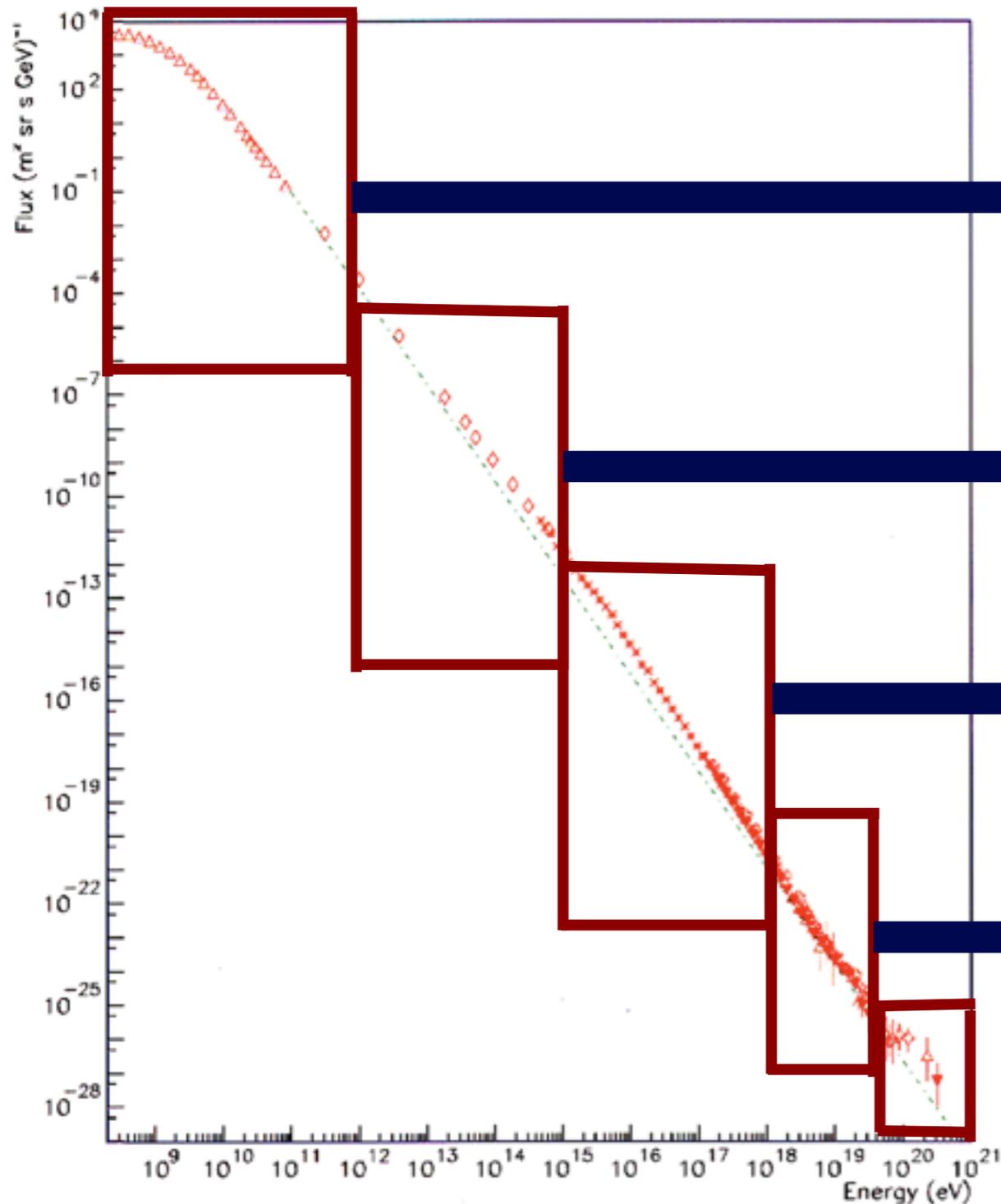
10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

10<sup>12</sup> - 10<sup>15</sup> eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

10<sup>15</sup> - 10<sup>18</sup> eV: raios cósmicos galácticos, provavelmente acelerados por supernovas.

10<sup>18</sup> - 10<sup>20</sup> eV: não sabemos quase nada

# O espectro de raios cósmicos



Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

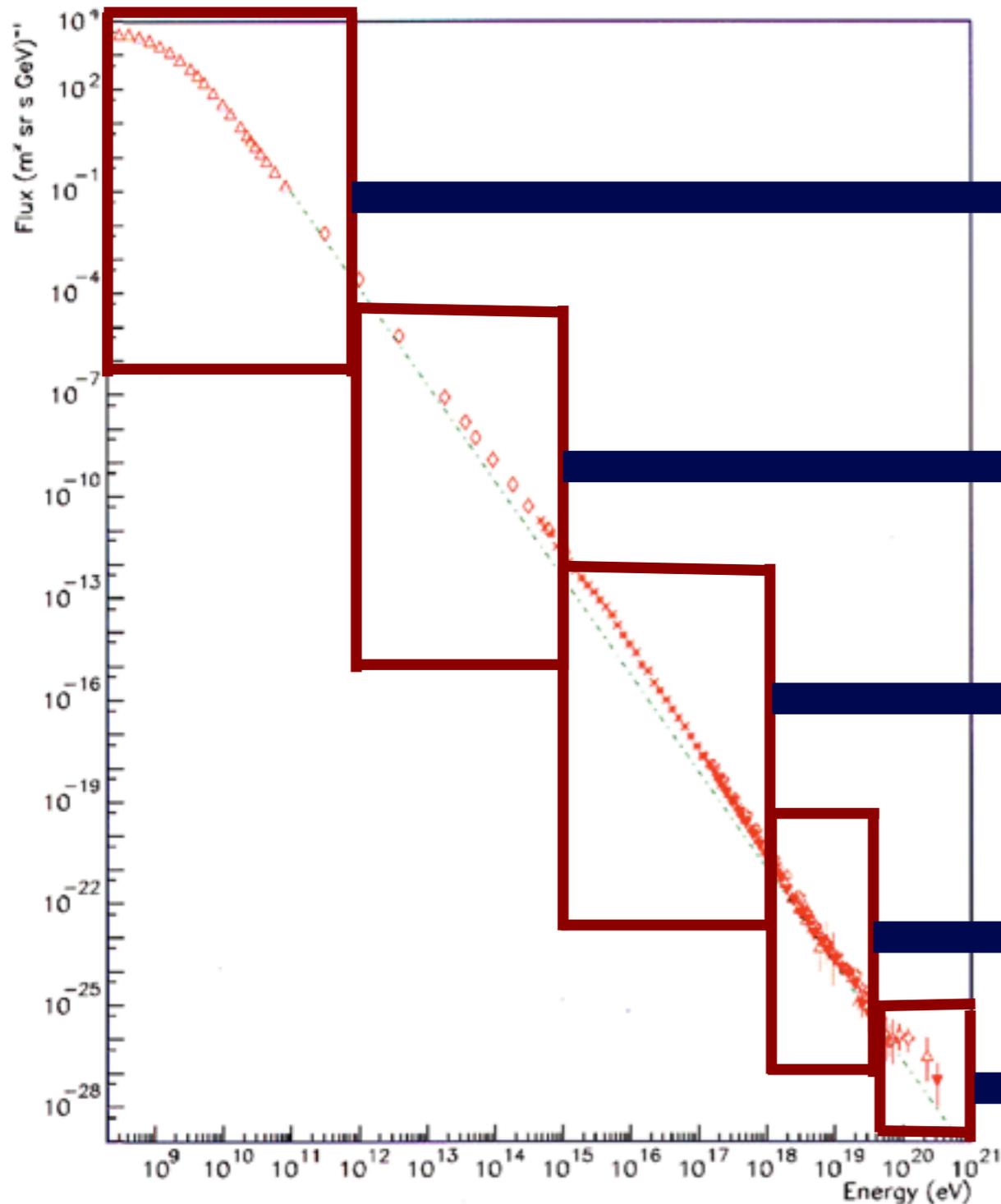
10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

10<sup>12</sup> - 10<sup>15</sup> eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

10<sup>15</sup> - 10<sup>18</sup> eV: raios cósmicos galácticos, provavelmente acelerados por supernovas.

10<sup>18</sup> - 10<sup>20</sup> eV: não sabemos quase nada

# O espectro de raios cósmicos



Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

10<sup>9</sup> - 10<sup>12</sup> eV: raios cósmicos em sua maioria proveniente do Sol

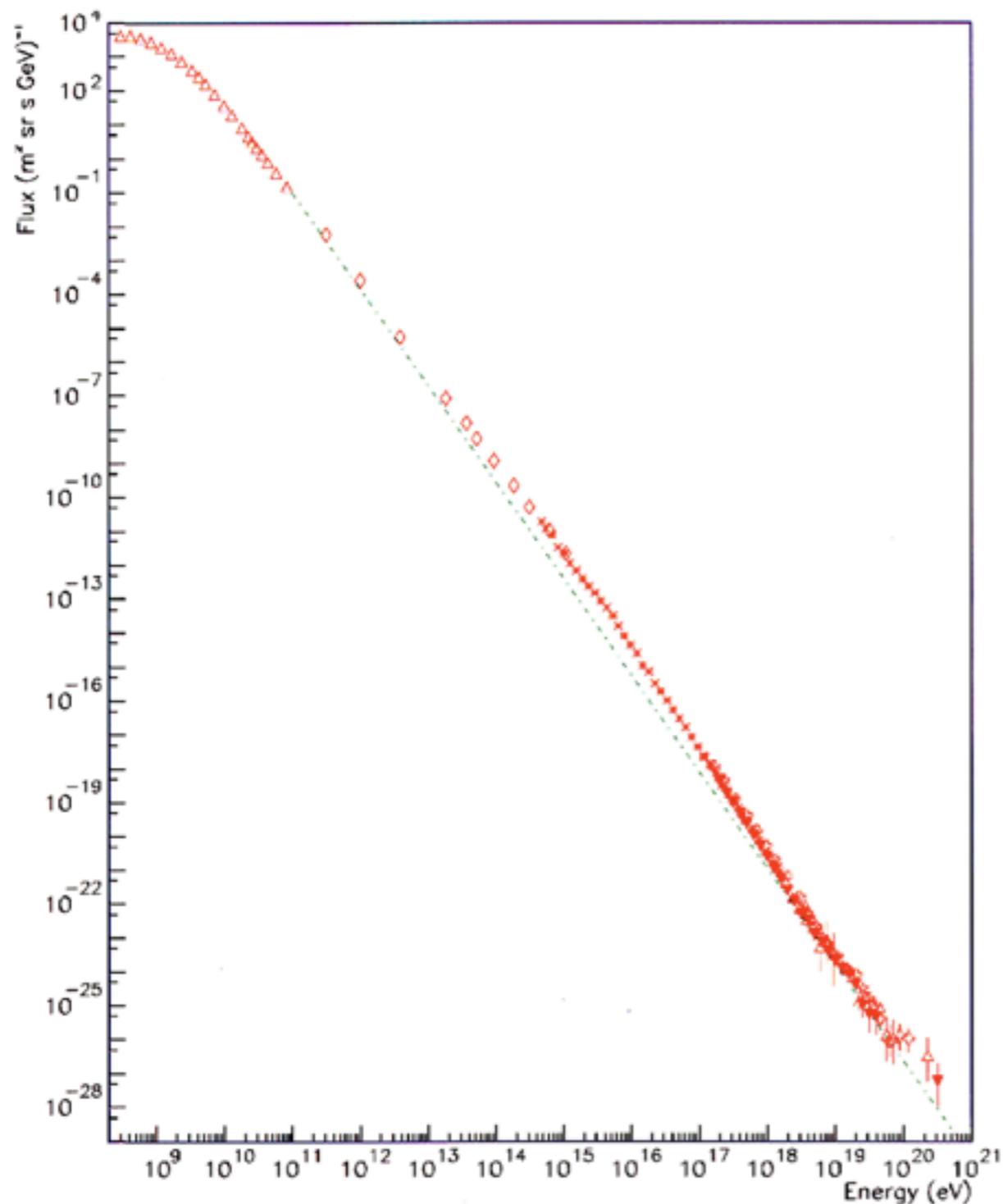
10<sup>12</sup> - 10<sup>15</sup> eV: raios cósmicos provenientes de outras regiões da galáxias.

10<sup>15</sup> - 10<sup>18</sup> eV: raios cósmicos galácticos, provavelmente acelerados por supernovas.

10<sup>18</sup> - 10<sup>20</sup> eV: não sabemos quase nada

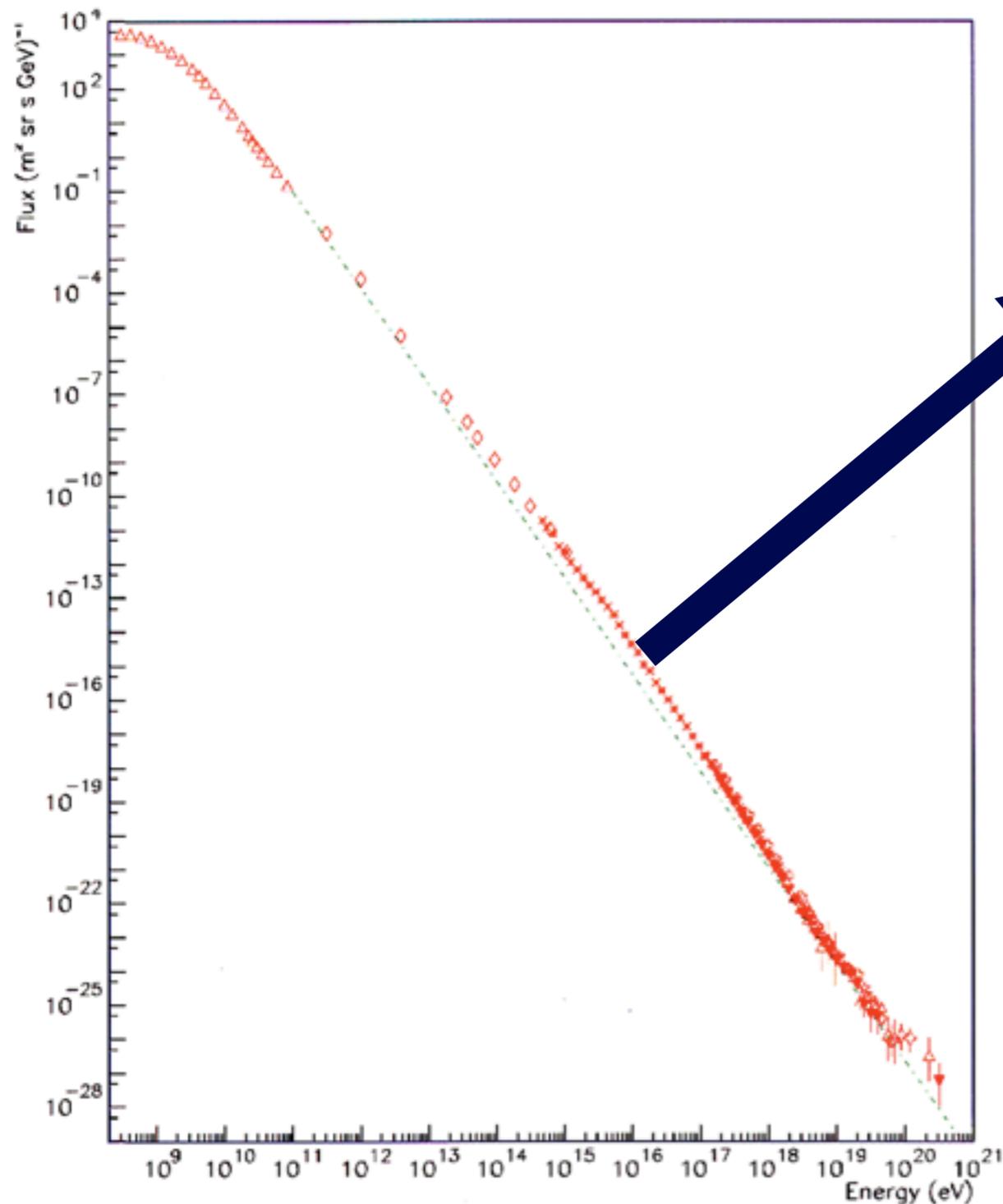
> 10<sup>20</sup> eV: será possível?

# O espectro de raios cósmicos



Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

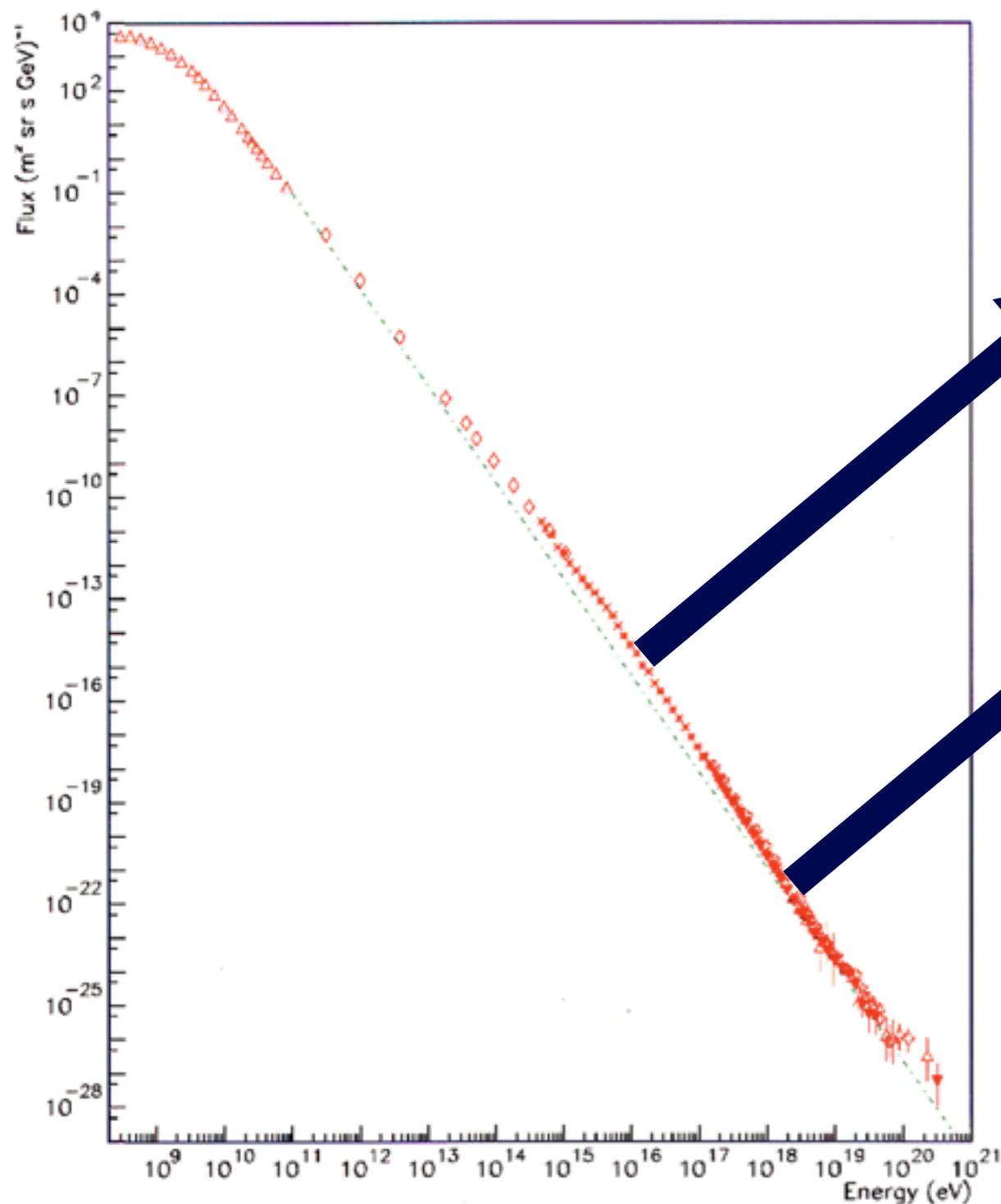
# O espectro de raios cósmicos



3x10<sup>15</sup> eV: "joelho"

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# O espectro de raios cósmicos



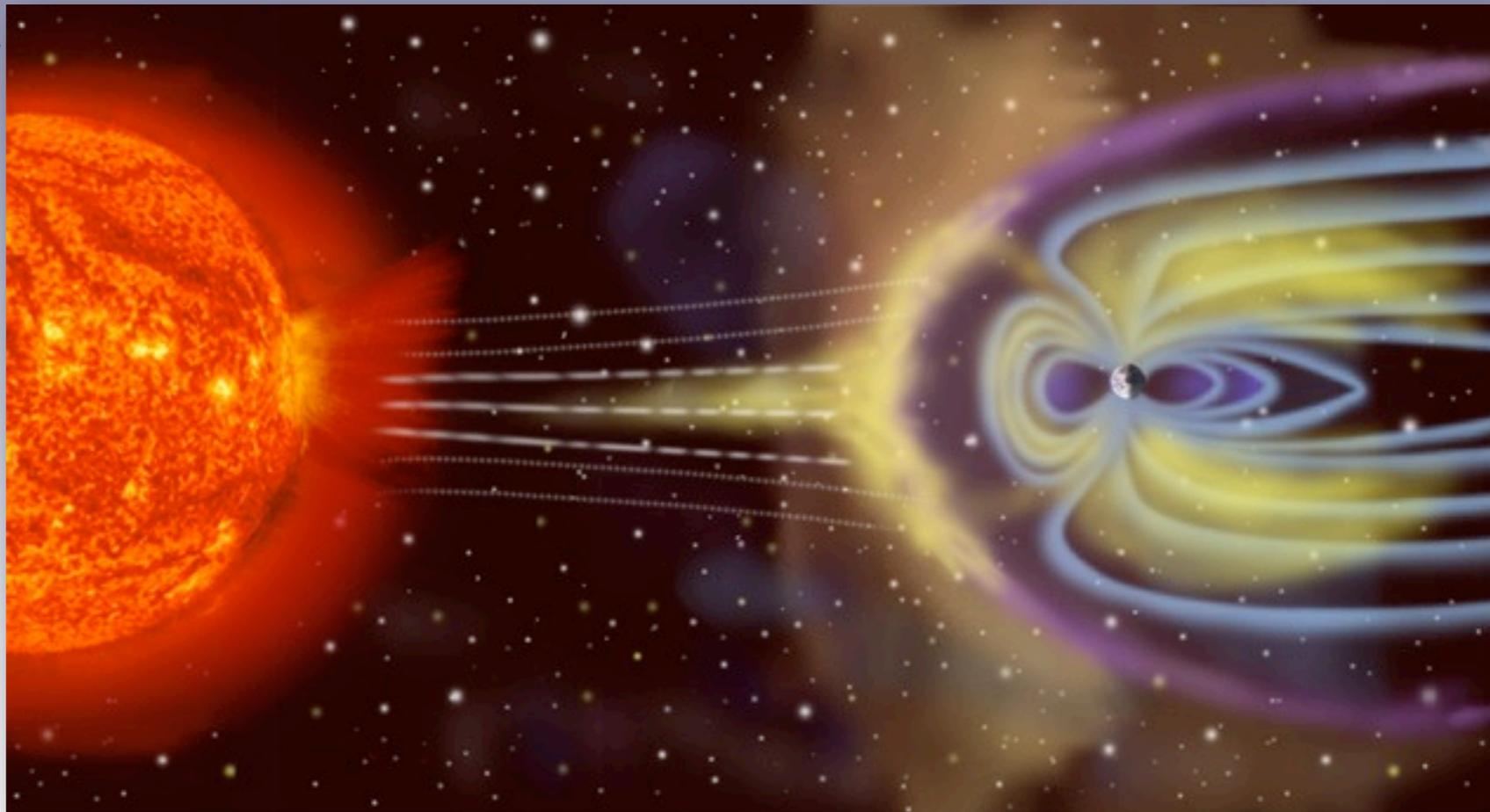
$3 \times 10^{15}$  eV: "joelho"

$3 \times 10^{18}$  eV: "tornozelo"

Fonte: Gaiser, Swordy, Cronin

# Raios cósmicos solares

- O Sol está constantemente produzindo diversas partículas.
- Várias destas partículas são carregadas em direção à Terra pelos ventos solares.
- 1 milhão de toneladas destas partículas provenientes do Sol atingem a Terra a cada segundo.
- Os ventos solares deformam a magnetosfera terrestre e podem ocasionar tempestades magnéticas, que afetam a comunicação e navegação, além de causar danos a satélites.
- O vento solar é muito “leve”, de forma que próximo da Terra a densidade de aproximadamente 1 partícula a cada  $\text{cm}^3$  (a densidade de moléculas de ar no nível do mar é aproximadamente  $10^{19}$  moléculas/ $\text{cm}^3$ ).



# Raios cósmicos solares



# Raios cósmicos solares



# Raios cósmicos solares



# Raios cósmicos solares

Fonte: Don Pettit, ISS, NASA



# Raios cósmicos solares



Fonte: I. A. Dagleis

# Raios cósmicos galácticos



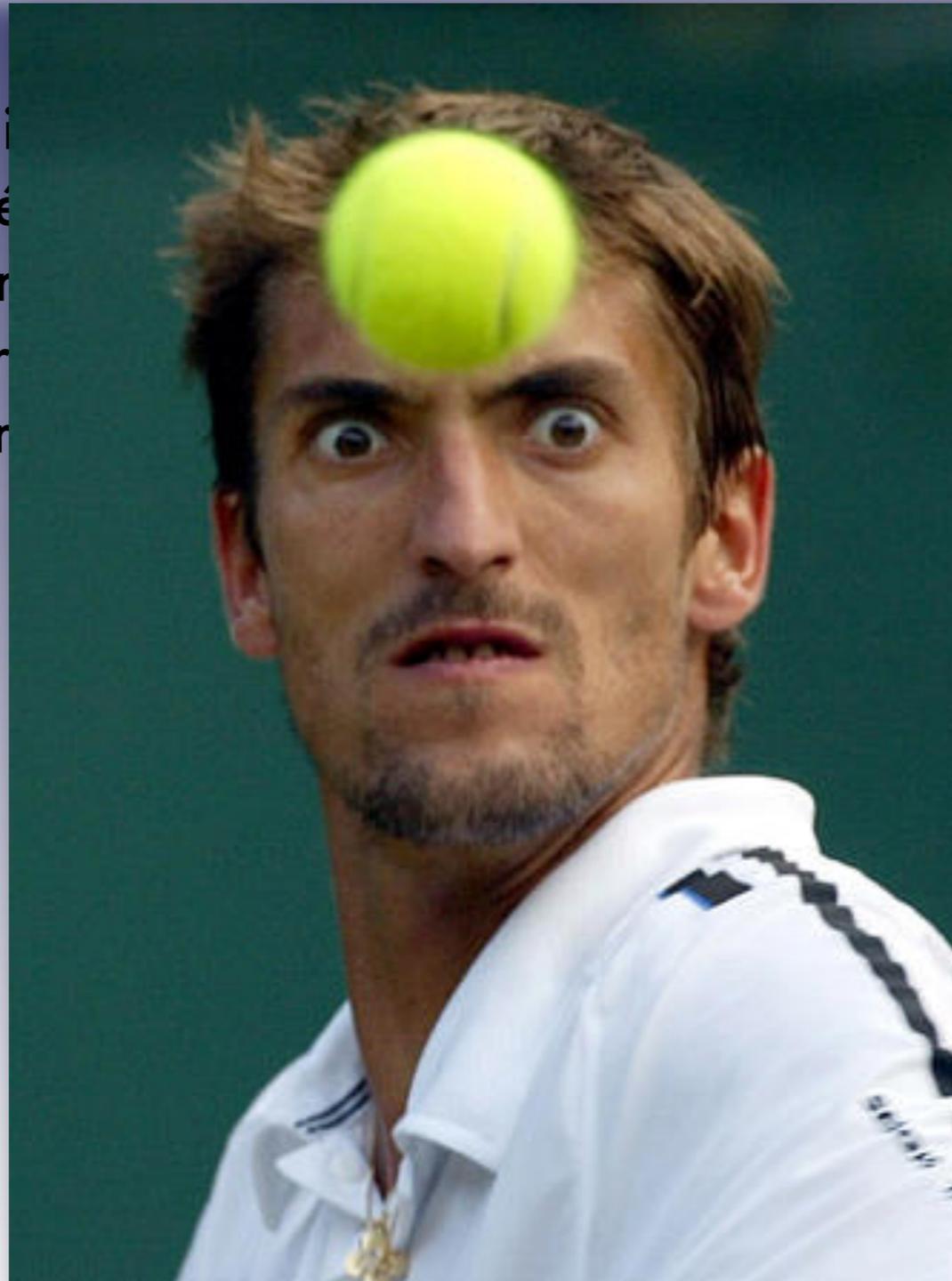
- Acelerados em ondas de choque de Supernovas.
- São “embaralhados” pelos campos magnéticos que permeia a galáxia e pelo campo magnético terrestre.
- Cerca de 90% são prótons, 9% partículas alfa, e 1% núcleos mais pesados.

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs = raios cósmicos ultra-energéticos (ultra-high energy cosmic rays).
- Partículas mais energéticas da natureza
- 1ª observação de partículas com estas energias - Volcano Ranch, EUA, 1962.
- Partícula com a maior energia já detectada ( $3 \times 10^{20}$  eV) - Fly's Eye, 1991.
- Se 1 próton ultra-energético atingisse sua testa, seria como se fosse uma bola de tênis a 120 km/h.

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs = raios cósmicos ultra-energéticos
- Partículas mais energéticas
- 1ª observação de partícula ultra-energética
- Partícula com a maior energia conhecida
- Se 1 próton ultra-energético atingisse uma bola de tênis a 120 km/h.



(by cosmic rays).

Ranch, EUA, 1962.

ly's Eye, 1991.

se fosse uma bola de

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs = raios cósmicos ultra-energéticos (ultra-high energy cosmic rays).
- Partículas mais energéticas da natureza
- 1ª observação de partículas com estas energias - Volcano Ranch, EUA, 1962.
- Partícula com a maior energia já detectada ( $3 \times 10^{20}$  eV) - Fly's Eye, 1991.
- Se 1 próton ultra-energético atingisse sua testa, seria como se fosse uma bola de tênis a 120 km/h.

NÃO SE ENDOU?

IMPRESSIONOU?

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs = raios cósmicos ultra-energéticos (ultra-high energy cosmic rays).
- Partículas mais energéticas da natureza
- 1ª observação de partículas com estas energias - Volcano Ranch, EUA, 1962.
- Partícula com a maior energia já detectada ( $3 \times 10^{20}$  eV) - Fly's Eye, 1991.
- Se 1 próton ultra-energético atingisse sua testa, seria como se fosse uma bola de tênis a 120 km/h.

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs = raios cósmicos ultra-energéticos (ultra-high energy cosmic rays).
- Partículas mais energéticas da natureza
- 1ª observação de partículas com estas energias - Volcano Ranch, EUA, 1962.
- Partícula com a maior energia já detectada ( $3 \times 10^{20}$  eV) - Fly's Eye, 1991.
- Se 1 próton ultra-energético atingisse sua testa, seria como se fosse uma bola de tênis a 120 km/h.
- Se 1 próton ultra-energético tivesse a mesma massa de uma bolinha de tênis, sua energia seria equivalente à de 10 bilhões de bombas nucleares!!!!!!!

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs =
- Partículas
- 1ª observ
- Partícula
- Se 1 prót
- Se 1 prót
- sua energ



1962.

bola de

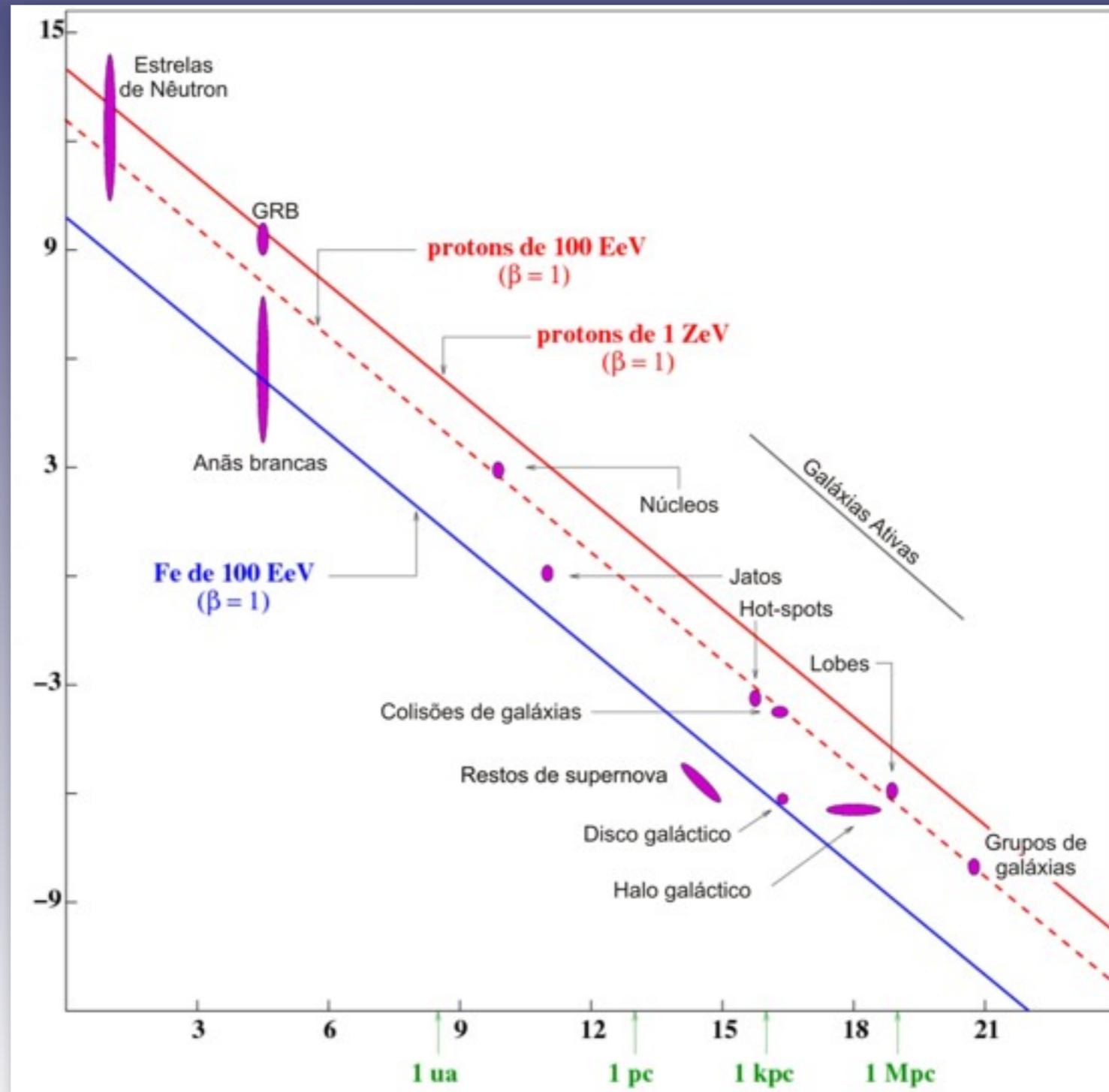
de tênis,

# Raios cósmicos ultra-energéticos

- UHECRs = raios cósmicos ultra-energéticos (ultra-high energy cosmic rays).
- Partículas mais energéticas da natureza
- 1ª observação de partículas com estas energias - Volcano Ranch, EUA, 1962.
- Partícula com a maior energia já detectada ( $3 \times 10^{20}$  eV) - Fly's Eye, 1991.
- Se 1 próton ultra-energético atingisse sua testa, seria como se fosse uma bola de tênis a 120 km/h.
- Se 1 próton ultra-energético tivesse a mesma massa de uma bolinha de tênis, sua energia seria equivalente à de 10 bilhões de bombas nucleares!!!!!!!

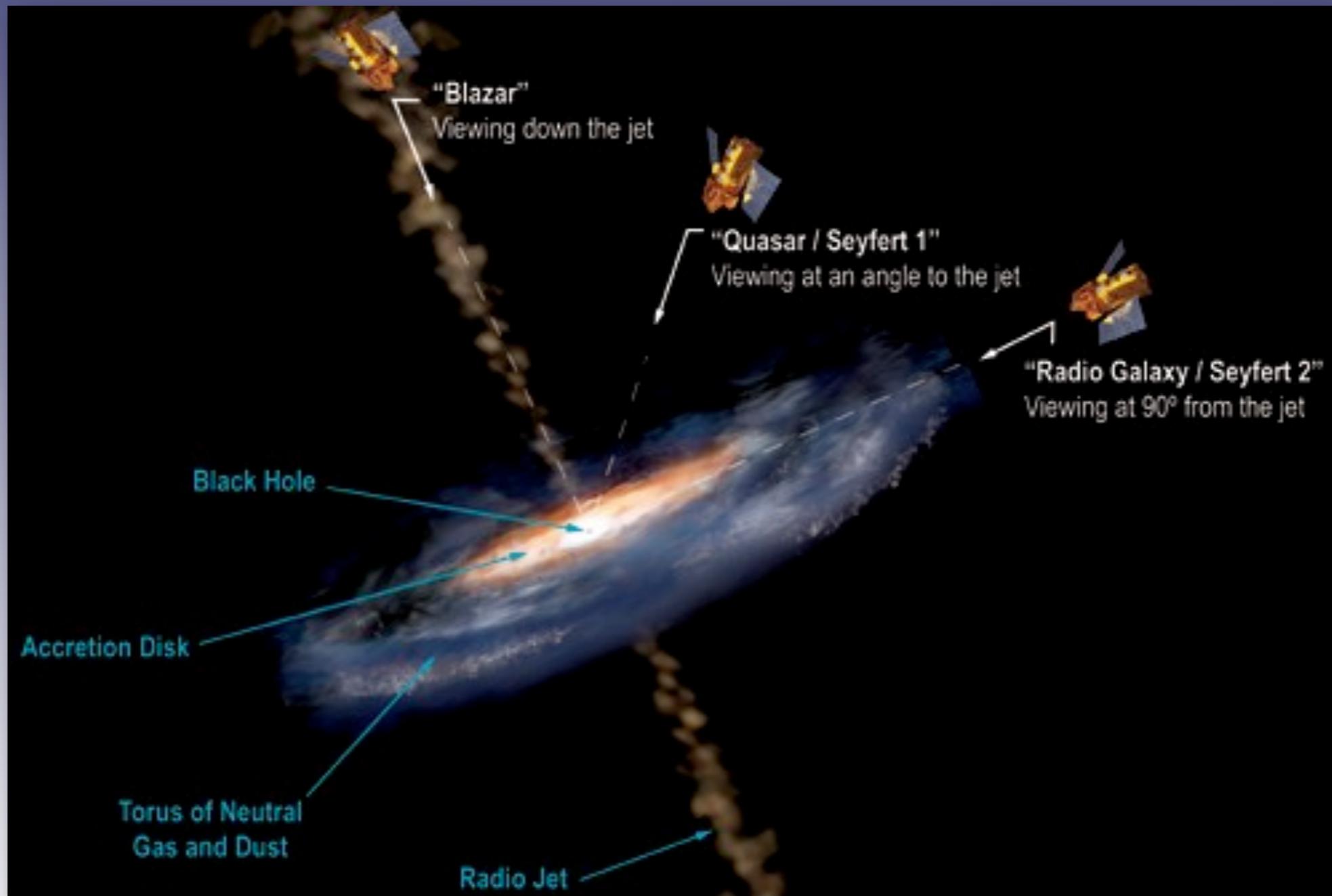
# Qual a origem destes UHECRs?

Fonte: Tese de doutorado - Rogério de Almeida



# Qual a origem destes UHECRs?

<http://web.hallym.ac.kr/~physics/course/a2u/agn/agn.htm>



AGN (Núcleo Galáctico Ativo)

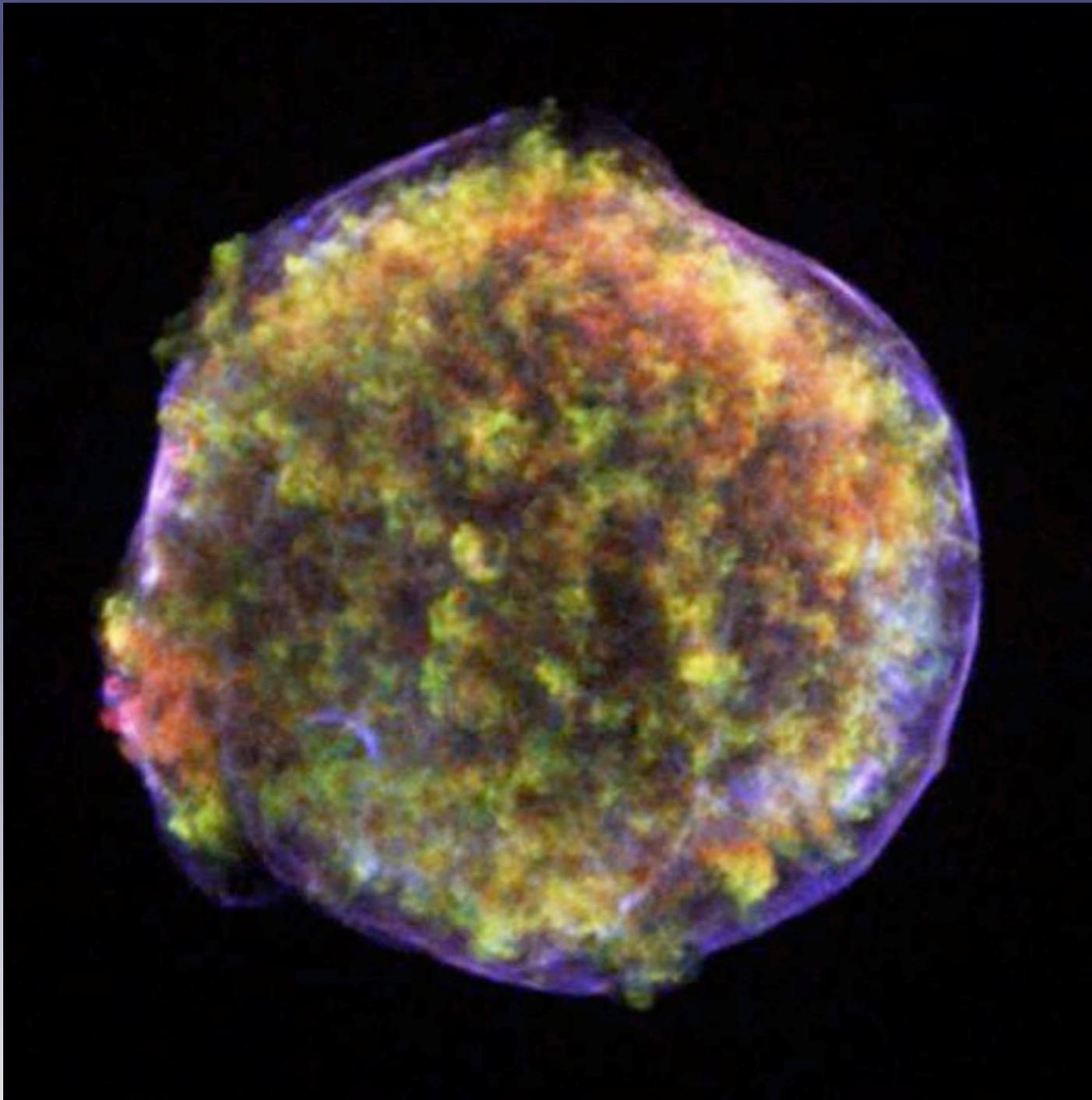
# Qual a origem destes UHECRs?



particulas.cnea.gov.ar

Centaurus A - o mais famoso AGN (Núcleo Galáctico Ativo)

# Qual a origem destes UHECRs?

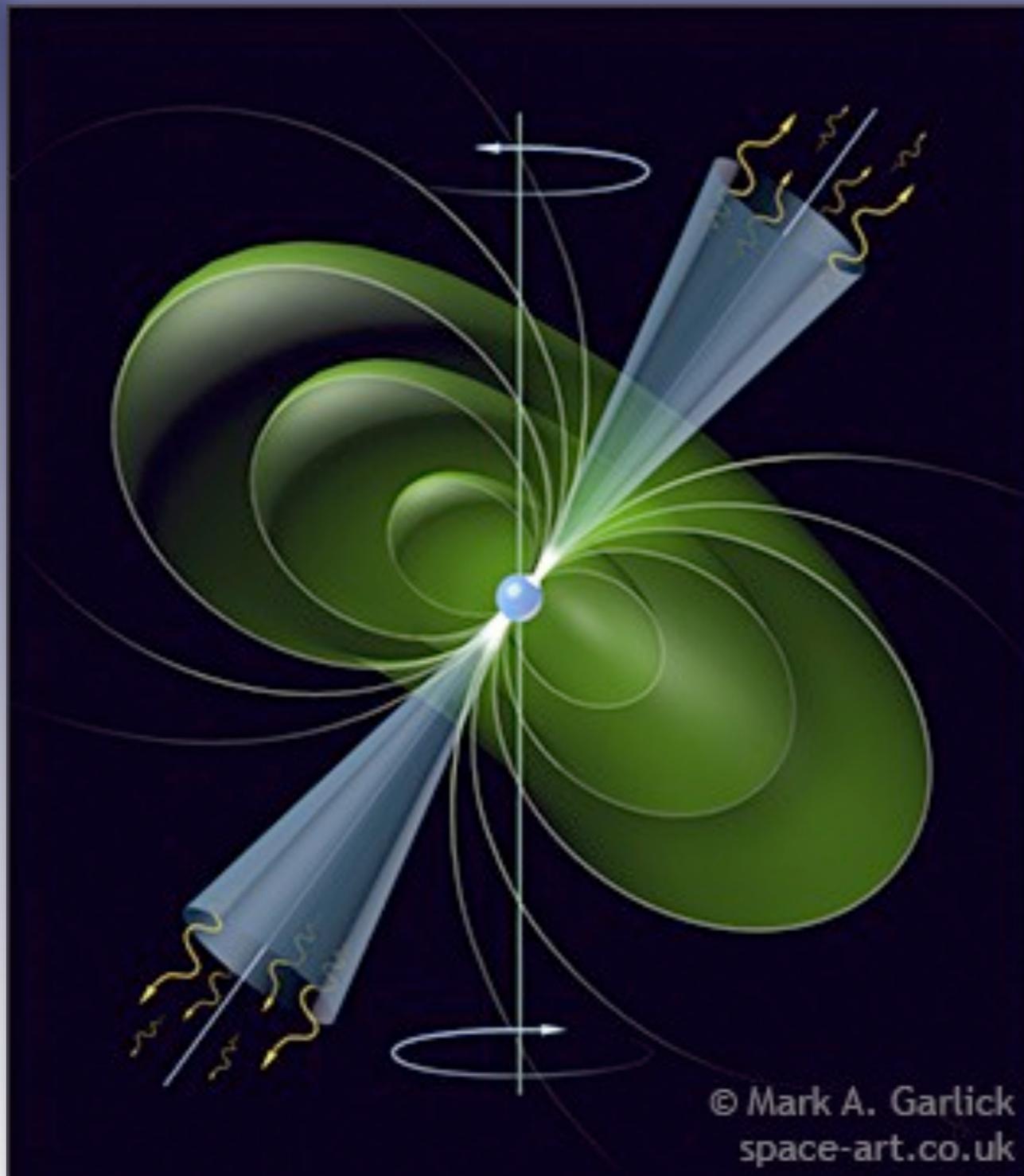


Fonte: Chandra Experiment

- Apesar das controvérsias, alguns modelos prevêem a aceleração de UHECRs por algumas supernovas através de mecanismos ainda não compreendidos.

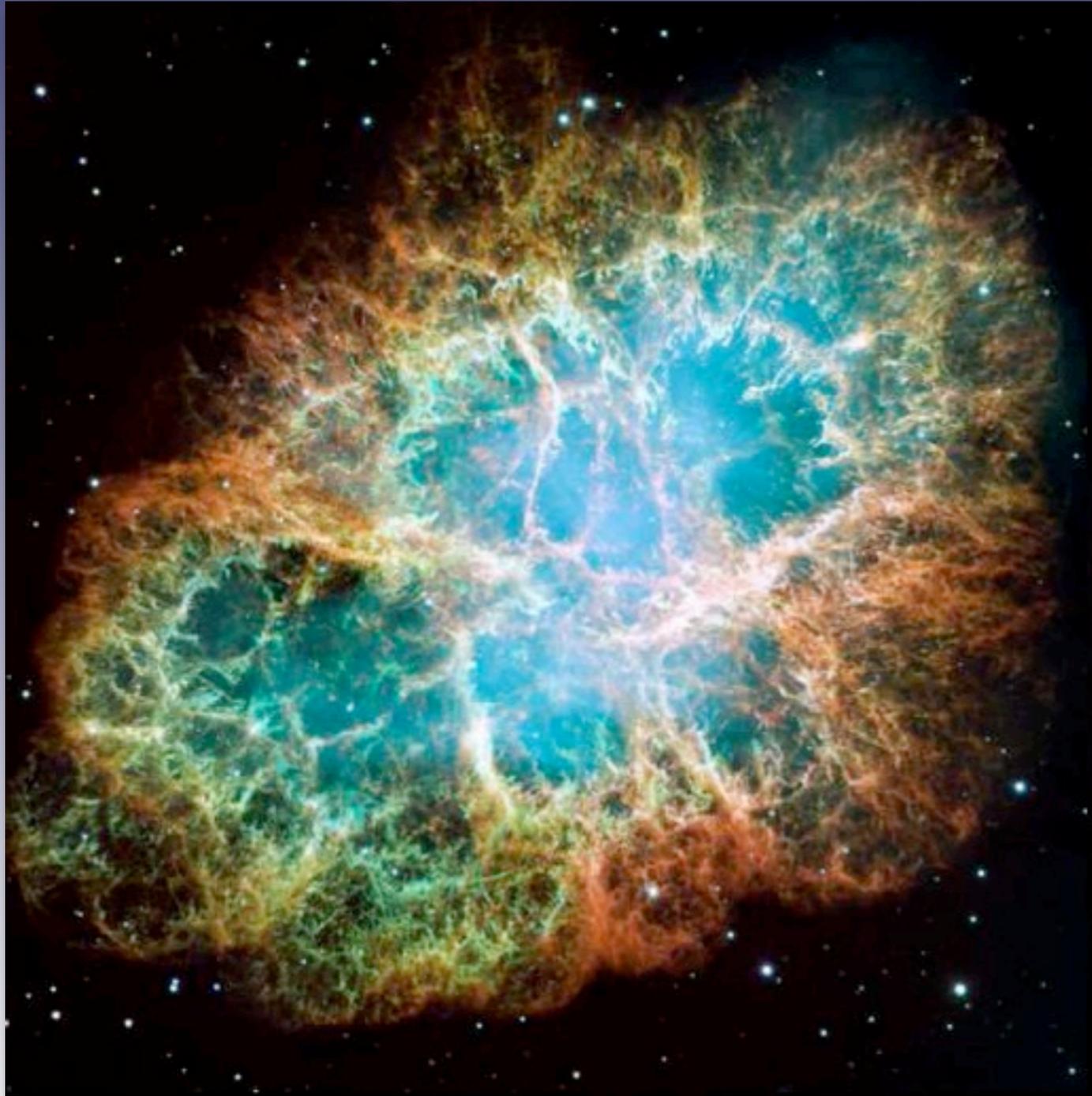
Remanescente da  
supernova de Tycho

# Qual a origem destes UHECRs?



Concepção artística de um pulsar em rápida rotação sobre o eixo mostrado. A região verde indica as linhas de campo magnético e a região azulada é o cone de emissão (jato).

# Qual a origem destes UHECRs?

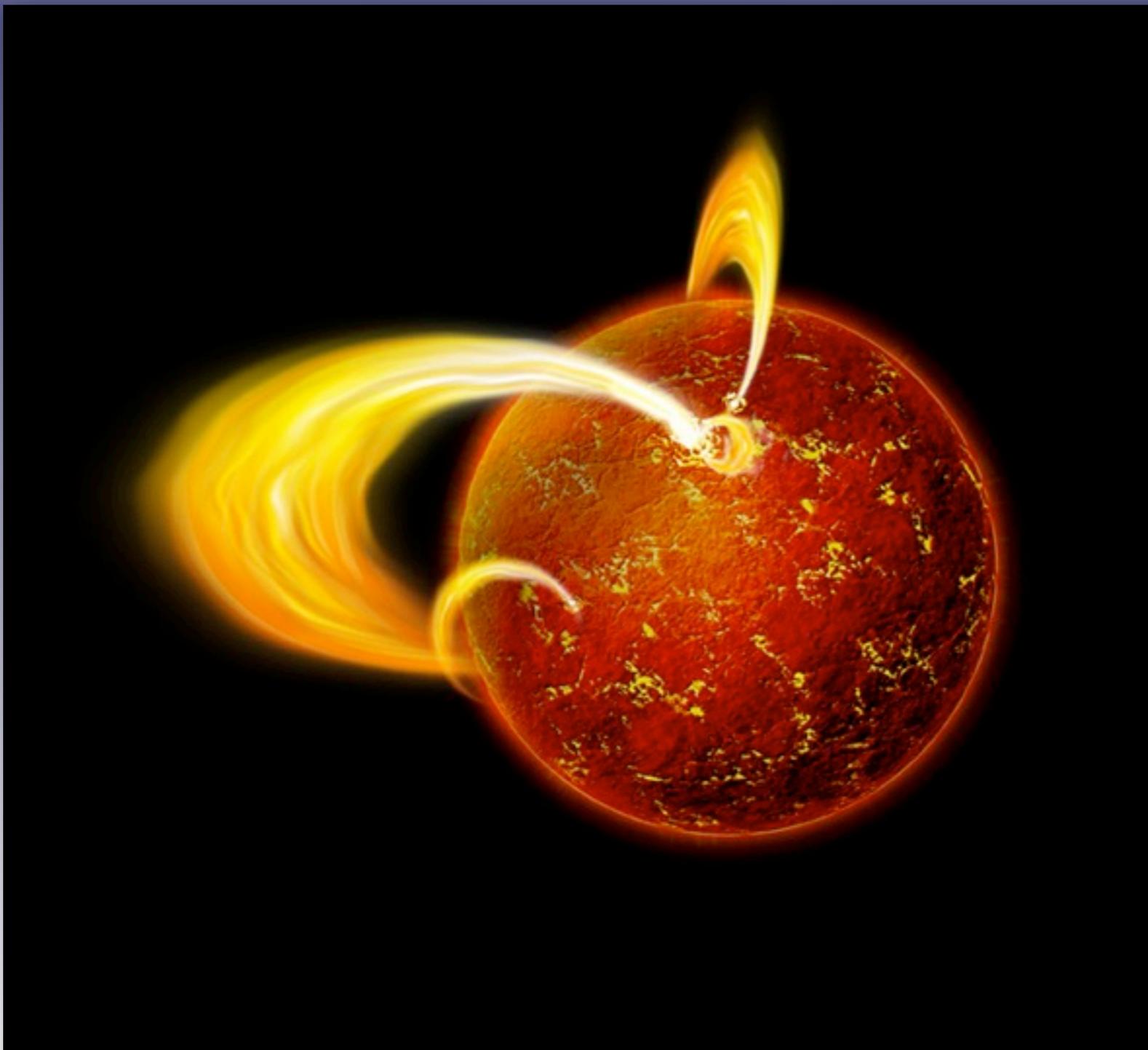


- Apesar das controvérsias, alguns modelos prevêem a aceleração de UHECRs por algumas supernovas através de mecanismos ainda não compreendidos.

Nebulosa do Carangueijo - remanescente de supernova com um pulsar no centro.

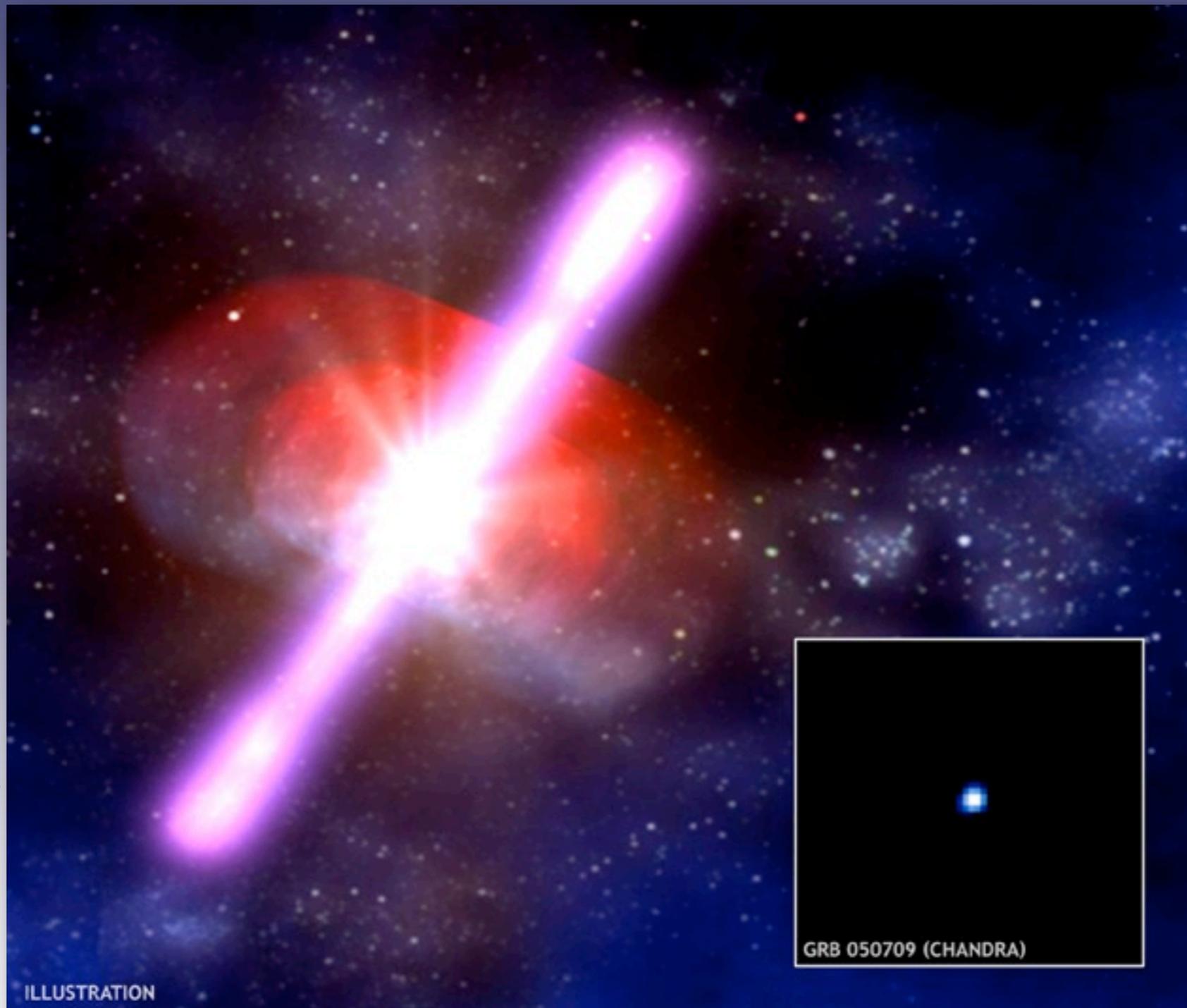
# Qual a origem destes UHECRs?

[jicconwell.wordpress.com/2009/03/12/extreme-universe-magnetic-fields-and-magnetars/](http://jicconwell.wordpress.com/2009/03/12/extreme-universe-magnetic-fields-and-magnetars/)



Concepção artística  
de um magnetar

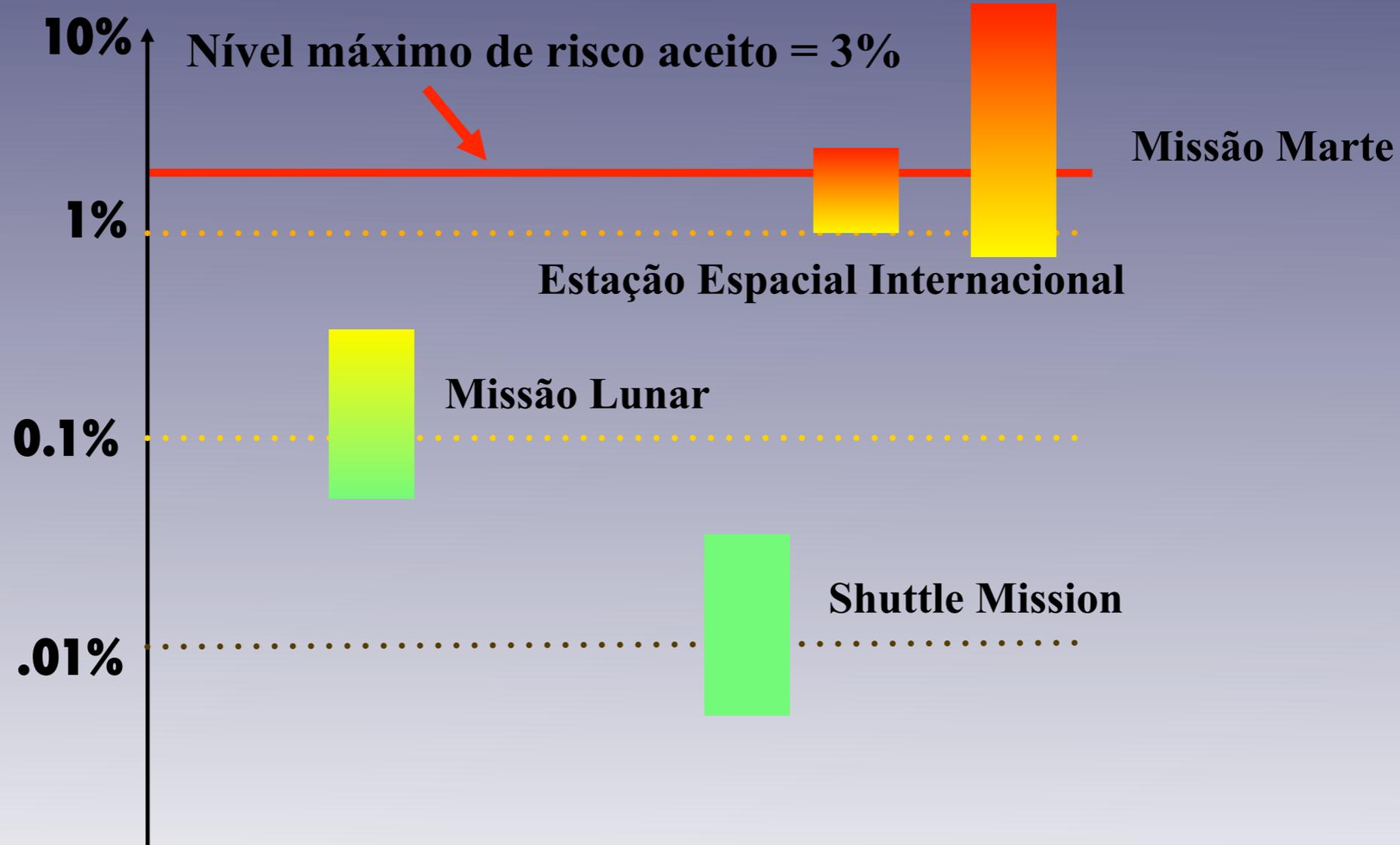
# Qual a origem destes UHECRs?



- Atualmente as grandes explosões de raios gama (GRBs, do inglês gamma ray bursts) são os candidatos mais promissores a acelerarem UHECRs.

Concepção artística de um GRB + imagem obtida pelo experimento Chandra.

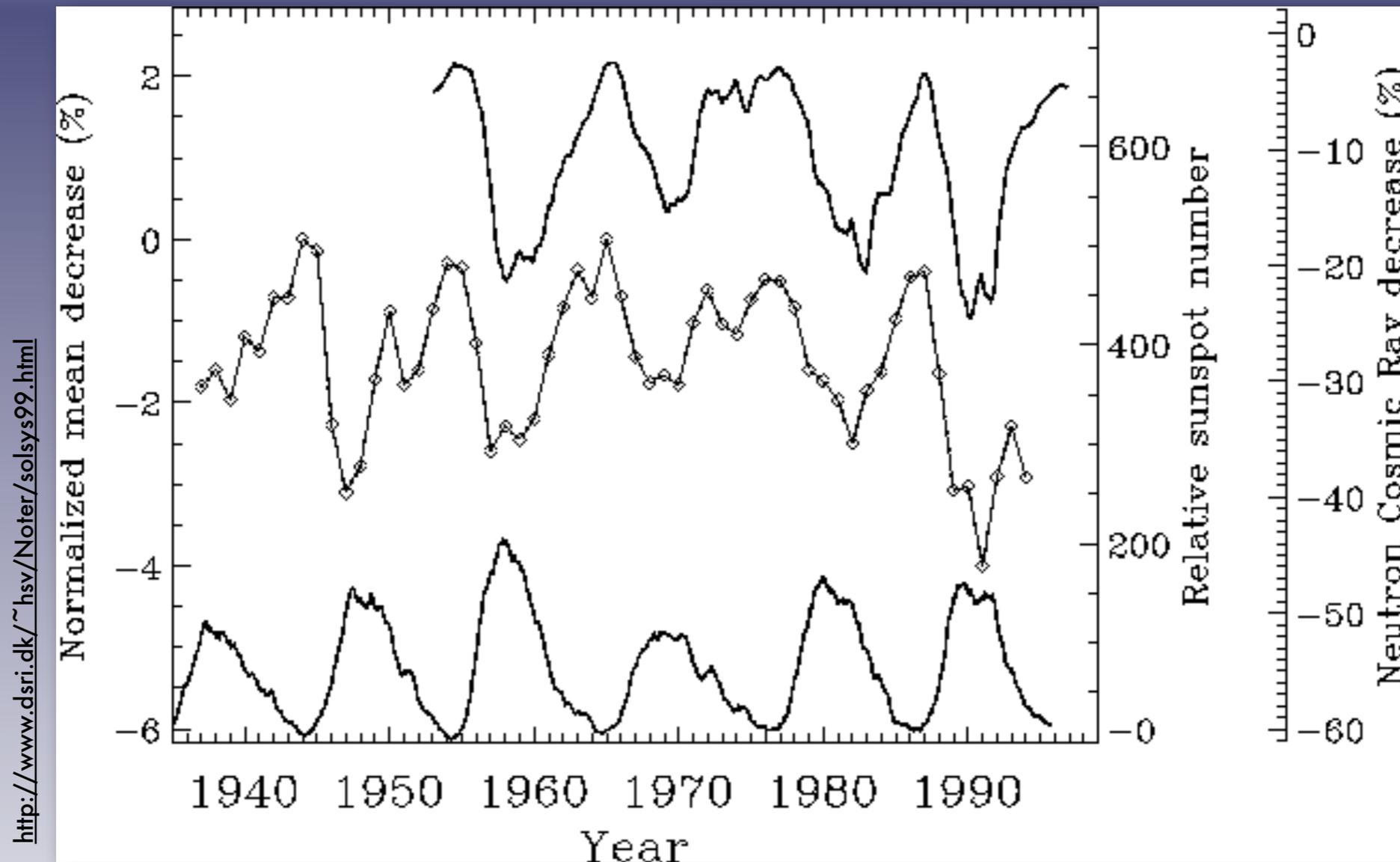
# Raios cósmicos e os riscos aos astronautas



# Raios cósmicos e o clima na Terra

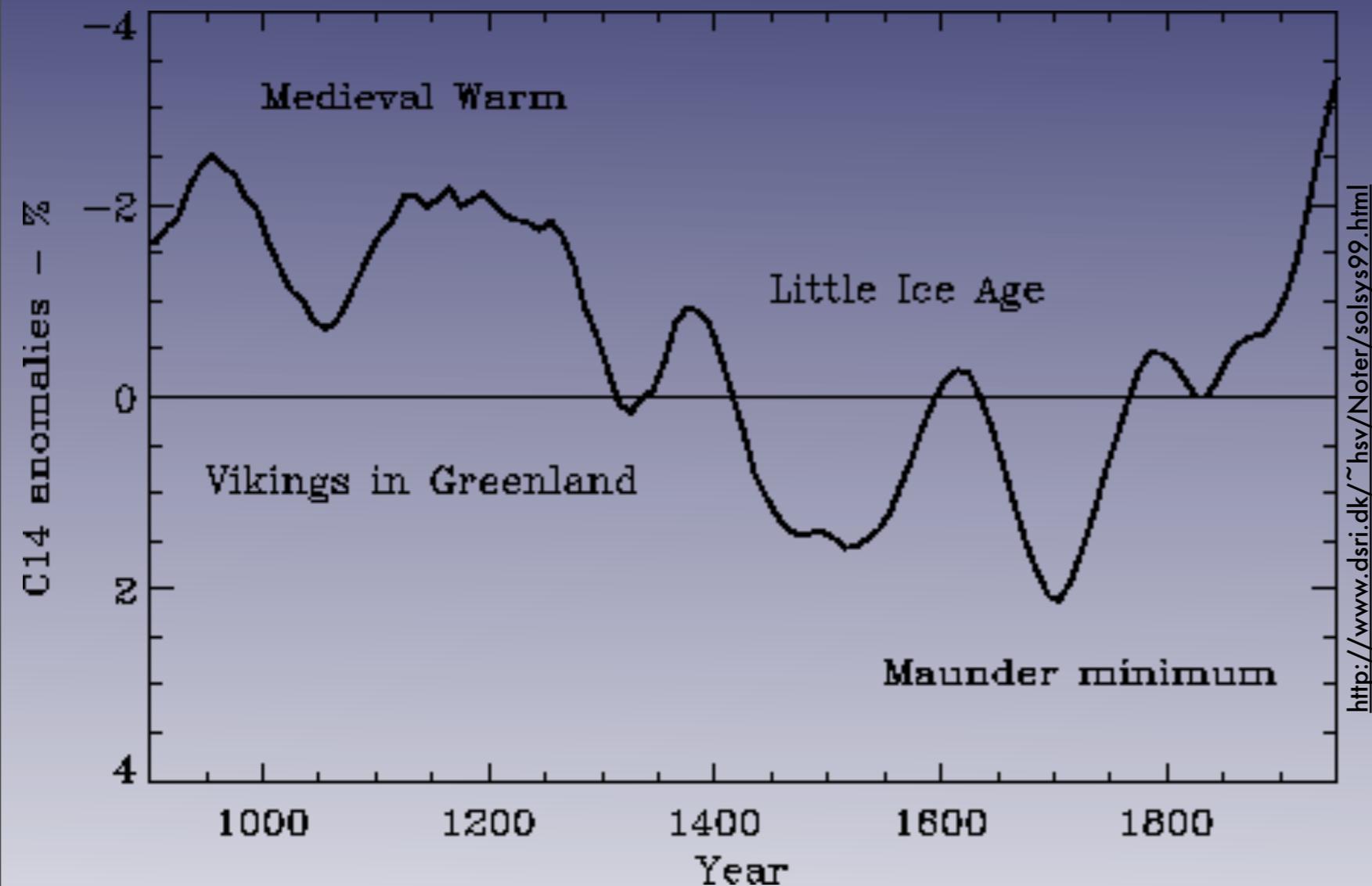
- Múons de chuviros atmosféricos causam a maior parte da ionização na baixa atmosfera.
- O múon ioniza uma molécula, extraindo um elétron; a molécula logo captura um elétron de outra molécula, ou elétrons livres presentes no meio (recombinação).
- Existe um equilíbrio entre ionização e recombinação.
- Existe uma quantidade aproximadamente fixa de íons positivos e negativos na atmosfera.
- Existem diferenças entre os tipos de moléculas que se tornam íons positivos e negativos.
- Os íons negativos se movem mais facilmente pela atmosfera, resultando em um campo elétrico nesta.
- Num dia normal o campo elétrico é aproximadamente 100 V/m.
- Quando uma tempestade se forma, íons positivos sobem e íons negativos descem, alterando o campo elétrico da Terra para dezenas de milhares de Volts por metro.
- Quando o campo elétrico é intenso, ocorre uma descarga elétrica, o relâmpago.
- Então existe uma relação clara entre ionização (causada por múons) e relâmpagos.

# Raios cósmicos e o clima na Terra



As duas curvas superiores são o fluxo de raios cósmicos medido por dois experimentos distintos. A curva inferior é o número de manchas solares registrados no período.

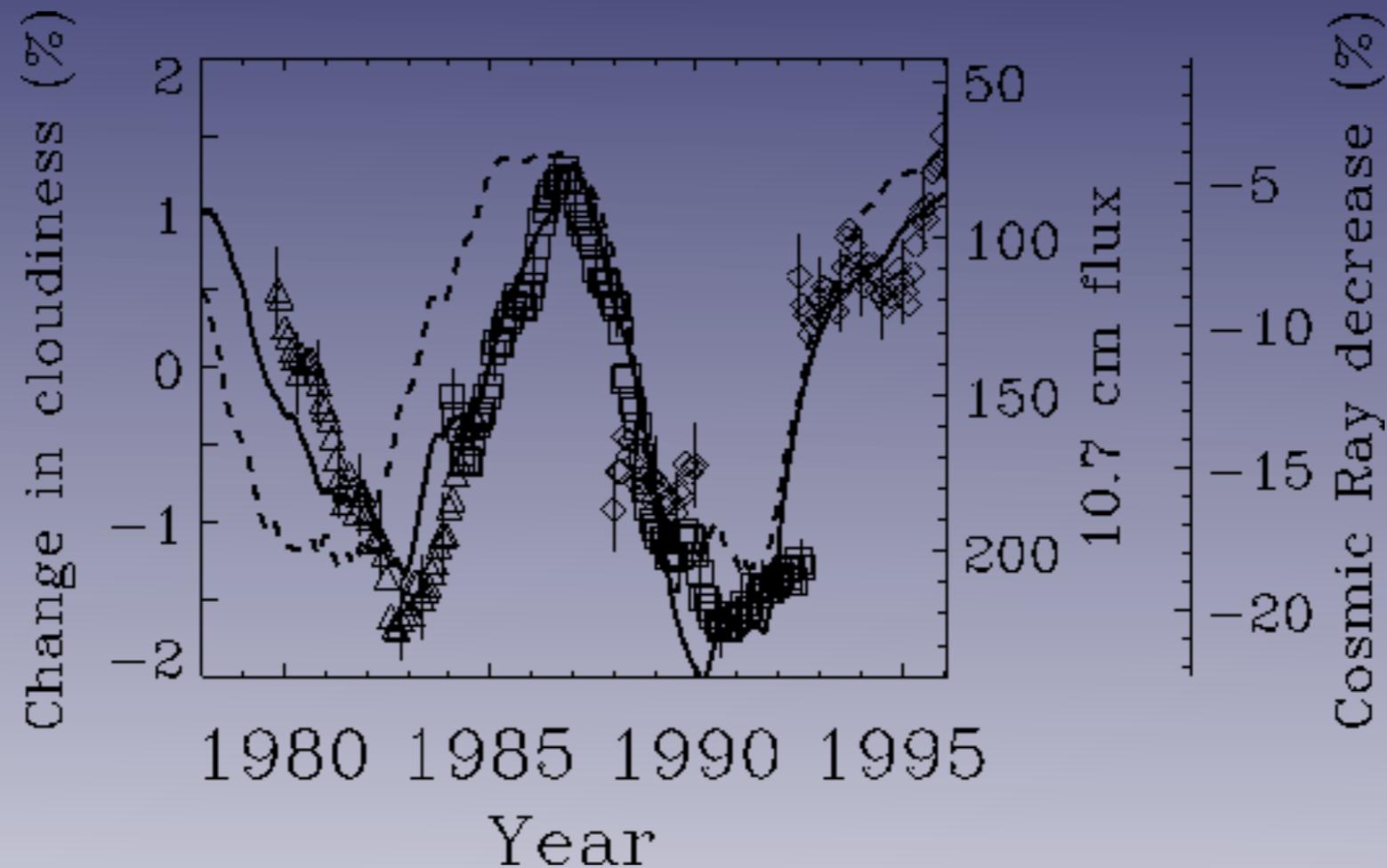
# Raios cósmicos e o clima na Terra



Variação da produção de Carbono-14 no último milênio. Esta variação é devido à atividade solar.

- Quando a atividade solar é alta, o vento solar está protegendo a Terra de raios cósmicos galácticos e a produção de Carbono-14 é baixa.
- O mínimo de Maunder refere-se a 1645-1715, quando poucas manchas solares eram observadas.

# Raios cósmicos e o clima na Terra



<http://www.dsri.dk/~hsv/Noter/solsys99.html>

A linha sólida indica a cobertura por nuvens da superfície terrestre. A linha pontilhada indica o fluxo de raios cósmicos solares e os demais pontos são dados experimentais para a cobertura da superfície por nuvens.