

UNICAMP

# Busca de Fontes Pontuais de Raios C3smicos Ultra-Energ3ticos com o Observat3rio Pierre Auger



Rafael Alves Batista, Ernesto Kemp, Rogerio Menezes de Almeida

Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas

rab@ifi.unicamp.br, kemp@ifi.unicamp.br, rma@ifi.unicamp.br

## Resumo

O estudo de anisotropias de raios c3smicos ultra-energ3ticos (UHECRs), em larga e pequena escala, possui grande relev3ncia para a Física, visto que sua origem e seu mecanismo de propagaç3o ainda n3o s3o compreendidos. O Observat3rio de Raios C3smicos Pierre Auger (PAO), situado na Argentina, 3 composto por 1600 detectores Cherenkov e 4 telesc3pios de fluoresc3ncia, e seu objetivo 3 o estudo de UHECRs, cuja energia 3 da ordem de EeV ( $10^{18}$  eV). H3 alguns anos o experimento JANZOS reportou um excesso de raios  $\gamma$  com energia da ordem de 100 TeV em 7 direç3es do c3u, que n3o est3o associadas a nenhuma fonte conhecida. Este trabalho tem por objetivo buscar poss3veis excessos de UHECRs vindos destas regi3es, utilizando dados coletados pelo PAO, visando estabelecer uma correlaç3o entre a produç3o de raios  $\gamma$  e a produç3o de UHECRs.

## 1. Introduç3o

### 1.1 O Observat3rio de Raios C3smicos Pierre Auger

O Observat3rio de Raios C3smicos Pierre Auger 3 uma colaboraç3o internacional de 17 pa3ses, entre eles o Brasil, cujo principal intuito 3 estudar UHECRs. Conforme aumenta-se a escala de energia, o fluxo de raios c3smicos diminui, e para energias da ordem de EeV ( $10^{18}$  eV) o fluxo 3 de 1 part3cula por km<sup>2</sup> por ano. Ou seja, para que haja uma quantidade significativa de eventos de alt3ssima energia, necessita-se de aparatos com 3reas enormes. Por esta raz3o o observat3rio, localizado na prov3ncia de Mendoza, Argentina, 3 composto por 1600 detectores de luz Cherenkov (detectores de superf3cie) cobrindo uma 3rea de 3000 km<sup>2</sup> (figura 1), e 4 estaç3es que cont3m um total de 24 telesc3pios detectores fluoresc3ncia atmosf3rica.



Figura 1: Um dos 1600 detectores de superf3cie do PAO.

### 1.2 O Experimento JANZOS

O experimento JANZOS (Japan Australia New Zealand Observation of Supernova 1987A), na ilha sul da Nova Zel3ndia, foi construído para observar raios  $\gamma$  de alta e alt3ssima energia, emitidos pela supernova 1987A. Em 1993 a colaboraç3o do experimento JANZOS reportou a exist3ncia de 7 regi3es do c3u com excesso de raios  $\gamma$ , n3o associadas a fontes conhecidas, como mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Posiç3es em coordenadas equatoriais das 7 regi3es com excesso de emiss3o de raios  $\gamma$ , com suas respectivas signific3ncias.

#	Ascens3o Reta	Declinaç3o	Excesso( $\sigma$ )
1	01h01'30"	-61,00°	4,72
2	13h46'30"	-17,25°	4,19
3	16h23'00"	-20,25°	4,19
4	00h52'30"	-17,50°	4,12
5	21h09'00"	-22,75°	4,10
6	16h11'00"	-56,75°	4,05
7	08h10'00"	+39,25°	4,05

## 2. Metodologia

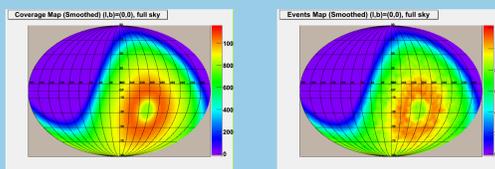
Neste trabalho foi utilizado o *Coverage and Anisotropy Toolkit*, que 3 um conjunto de bibliotecas em C++ desenvolvido por membros da colaboraç3o do Observat3rio Pierre Auger, para estudo de anisotropias. Tamb3m foi utilizado o software cient3fico ROOT, para an3lise de dados. Os dados analisados compreendem o per3odo de janeiro/2004 a abril/2008, e procurou-se por excessos de UHECRs nas 7 direç3es com excesso de emiss3o de raios  $\gamma$ , reportadas pela colaboraç3o do experimento JANZOS. Todos os mapas obt3do foram convolu3dos com um filtro gaussiano de 2°, relacionado 3 resoluç3o angular do observat3rio.

## 3. Determinaç3o do Fundo

A probabilidade de detecç3o de raios c3smicos varia de acordo com suas direç3es de chegada devido 3 exist3ncia de uma regi3o de aceitaç3o para o detector. O mapa de cobertura, que 3 o mapa de eventos distribuídos isotropicamente convolu3do com a aceitaç3o do detector foi produzido utilizando o m3todo semi-anal3tico e um filtro gaussiano de 2° (relacionado 3 resoluç3o angular do detector). Tal m3todo consiste num ajuste da distribuiç3o em 3ngulo zenital  $\theta$  dos eventos e uma posterior integraç3o num3rica:

$$C(\delta) = \int_0^{24h} a[\theta(\alpha, \delta)] d\alpha \quad (1)$$

onde  $C(\delta)$  3 a cobertura em funç3o da declinaç3o e  $a[\theta(\alpha, \delta)]$  3 a aceitaç3o em  $\theta$ . Tal mapa 3 mostrado na figura 2(b), juntamente com o mapa de eventos (figura 2(a)), isto 3, o mapa que cont3m todos os eventos detectados no per3odo considerado.



(a) Mapa de eventos. (b) Mapa de Cobertura.

Figura 2: Mapa de eventos (à esquerda) e de cobertura (à direita), onde a escala de cores indica n3mero de eventos.

## 4. Signific3ncia Estatística

De posse dos mapas de eventos e cobertura, foi poss3vel obter o mapa da diferenç3a, que 3 a diferenç3a entre eles, e que mostra o excesso/d3ficit de raios c3smicos (figura 3).

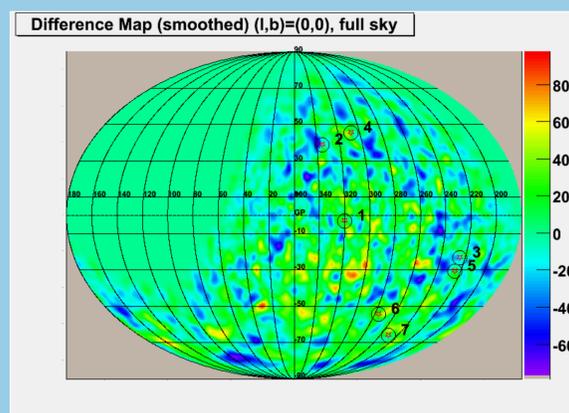


Figura 3: Mapa de excessos/d3ficit de raios c3smicos, com a posiç3o das regi3es consideradas indicadas com um circulo.

Para saber se um excesso observado 3 genu3no ou deve-se a uma simples flutuaç3o estatística do fundo, 3 importante determinar a signific3ncia estatística do mesmo. A fim de estimar a signific3ncia estatística, adotou-se o m3todo de Li e Ma no qual a signific3ncia estatística do resultado observado 3 dada por:

$$S = \sqrt{2} [N_{on} \ln \left( \frac{1 + \kappa}{\kappa} \left( \frac{N_{on}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right) + N_{off} \ln \left( (1 + \kappa) \left( \frac{N_{off}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right)]^{1/2} \quad (2)$$

O mapa das signific3ncias 3 mostrado na figura 4, e o gr3fico da distribuiç3o das signific3ncias 3 mostrado na figura 5.

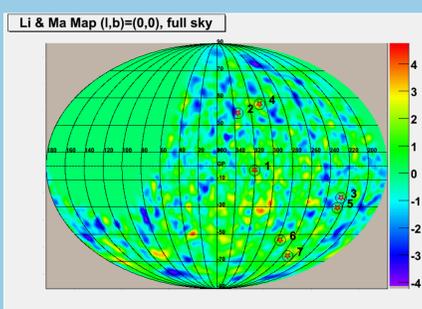


Figura 4: Mapa de excessos/d3ficit de raios c3smicos, com a posiç3o das regi3es consideradas indicadas com um circulo.

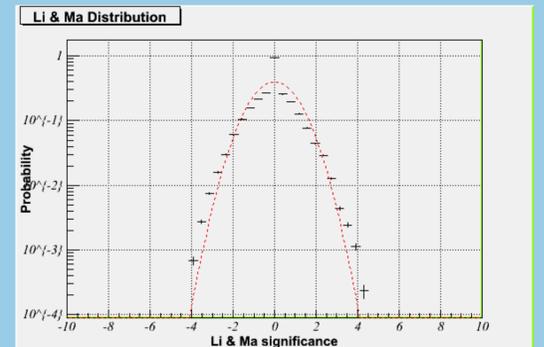


Figura 5: Distribuiç3o das signific3ncias estatísticas.

## 5. Limite Superior de Fluxo

O limite superior do fluxo de raios c3smicos vindos da direç3o da fonte, com um determinado n3vel de confianç3a pode ser obtido do n3mero total de eventos observados e da contribuiç3o do fundo para a contagem de eventos. Utilizando uma aproximaç3o gaussiana  $N(n_{bg} + \mu_s^\beta, n_{bg}/2 + 2\mu_s^\beta/3)$  para a distribuiç3o da contagem de eventos, o n3mero m3ximo de eventos  $\mu_s^\beta$  vindos da fonte, com um n3vel de confianç3a  $\beta$  pode ser extraído da equaç3o:

$$n_{obs} - (n_{bg} + \mu_s^\beta) = C_\beta \sqrt{\frac{n_{bg}}{2} + \frac{2\mu_s^\beta}{3}} \quad (3)$$

Para um n3vel de confianç3a de 95%,  $C_\beta = 1,64$ .

Se a forma do fluxo da fonte 3 a mesma do fluxo geral de raios c3smicos na faixa de energia na qual deseja-se estabelecer o limite superior de fluxo, i.e., se  $\Phi_s(E) \propto \Phi_{CR}(E)$ , onde  $\Phi_{CR}$  3 o fluxo total de raios c3smicos, ent3o a abertura 3 a mesma no c3lculo de ambos os fluxos. Assim, pode-se relacionar o limite superior de fluxo da fonte com o fluxo geral de raios c3smicos atrav3s da raz3o entre  $\mu_s^\beta$  e o fundo esperado. Desta forma, para um filtro gaussiano de par3metro  $\sigma$ :

$$\Phi_s^\beta = \frac{4\pi\mu_s^\beta\Phi_{CR}\sigma^2}{n_{bg}}$$

Assim, pode-se reconstruir a Tabela 1, incluindo os valores das signific3ncias estatísticas do poss3vel excesso de UHECRs e o limite superior de fluxo vindo daquela regi3o, em funç3o do fluxo total de raios c3smicos  $\Phi_{CR}$ , como 3 mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Signific3ncia estatística e limite superior de fluxo, em funç3o do fluxo total de raios c3smicos  $\Phi_{CR}$ , para cada uma das 7 regi3es.

#	Signific3ncia( $\sigma$ )	Fluxo
1	0,22	$2,08\Phi_{CR}$
2	-1,36	$0,34\Phi_{CR}$
3	-1,17	$0,59\Phi_{CR}$
4	1,32	$3,28\Phi_{CR}$
5	0,39	$2,56\Phi_{CR}$
6	1,23	$3,19\Phi_{CR}$
7	0,40	$2,45\Phi_{CR}$

## 6. Conclus3es

Foi poss3vel calcular a signific3ncia estatística dos poss3veis excessos de UHECRs associados 3s 7 regi3es, e estimar o limite superior de fluxo para cada uma destas. N3o foram observados excessos de UHECRs em nenhuma das 7 regi3es com alta emiss3o de raios  $\gamma$ .