



Mary Lucía Díaz Castro

**Flutuações Intrínsecas de Chuveiros
Atmosféricos Extensos e Composição
Química de Raios Cósmiticos
Ultra-Energéticos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do
Departamento de Física da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Física

Orientador : Prof. Ronald Cintra Shellard
Co-Orientador: Prof. Eivaldo Moura Santos

Rio de Janeiro
Abril de 2012



Mary Lucía Díaz Castro

**Flutuações Intrínsecas
de chuveis atmosféricos extensos e
composição química de raios cósmicos ultra-energéticos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ronald Cintra Shellard
Orientador
CBPF

Prof. Edivaldo Moura Santos
Co-Orientador
UFRJ

Profa. Carla Göbel Burlamaqui de Mello
Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Luiz Vitor de Souza Filho
USP-São Carlos

Profa. Carla Brenda Bonifazi
UFRJ

Prof. Hiroshi Nunokawa
Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de abril de 2012.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Mary Lucía Díaz Castro

Graduou-se em Física na Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador. Trabalhou como pesquisador e professor assistente no Observatório Astronómico de Quito.

Ficha Catalográfica

Díaz Castro, Mary Lucía

Flutuações Intrínsecas de Chuveiros Atmosféricos Extensos e Composição Química de Raios Cósmicos Ultra-Energéticos / Mary Lucía Díaz Castro; orientador: Ronald Cintra Shellard; co-orientador: Edivaldo Moura Santos. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Física, 2012.

v., 102 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Raios Cósmicos Ultra-Energéticos. 3. Chuveiros Atmosféricos Extensos. 4. Composição Química. 5. Função de Distribuição Lateral. 6. Observatório Pierre Auger. I. Shellard, Ronald Cintra. II. Santos, Edivaldo Moura. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. IV. Título.

CDD: 510

Este trabajo está enteramente dedicado a mis compañeros de todas las batallas ganadas y perdidas, mi soporte y la parte mas importante de mi vida: mi mami Mariana y mis hermanos Silvana, Ramiro y Cocho.

Agradecimentos

A Deus Criador de tudo.

Ao meu orientador, Prof. Ronald Shellard pela oportunidade de ter vindo fazer meu Doutorado, e pela ajuda e facilidades no desenvolvimento do mesmo.

Ao meu co-orientador, Prof. Edivaldo Santos, pela ajuda, idéias, amizade, mas principalmente pela paciência infinita. Obrigada Edivaldo, sem você este trabalho não teria sido realizado.

À Profa. Carla Bonifazi pelas boas idéias e dicas, em particular por toda a ajuda com o Mac e o CDAS.

Aos professores do Departamento de Física da PUC-Rio pelas boas aulas e abertura para responder minhas perguntas e dúvidas.

Ao pessoal do Auger-Rio por ter me aturado nas nossas Cocadas.

Ao pessoal do Departamento de Física da PUC-Rio, pelo apoio e ajuda, em particular à Giza e Julinho.

Ao Prof. Vitor de Souza pelo tempo de uso no cluster na USP-São Carlos (FAPESP, processo 2008/042590).

Ao pessoal da UFRJ e CBPF por ter me acolhido nestes últimos anos.

Ao Centro Latino Americano de Física (processo 142363/2007-3) e o CNPq (processo 311693/2011-3) pelo suporte financeiro.

À minha família no Equador por ter acreditado e torcido por mim sempre, especialmente aos meus queridos cunhados: Lucy y Angel, e meu sobrinho José Ignacio.

A Kelly de Carvalho e Vanessa Luz, minha família no Rio. Obrigada meninas pela amizade e boa convivência, mas principalmente por ter me aguentado neste anos.

A Paulina Romero e Fernando Mejía, pela amizade incondicional e por ter matado saudades junto comigo de nossa terra.

Aos amigos do antigo Cavernão: Rafael S., Rafael C., Lucas, Paula, Erick, Elizandra, André e Leila, pela ajuda, amizade, risadas, etc.

Aos amigos e colegas da PUC-Rio que contribuíram direta ou indiretamente no bom desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo Rogerio Menezes de Almeida por toda a ajuda para usar o cluster, tirar dúvidas de programação e bater papo de futebol.

Aos Wilburys, fonte constante de inspiração e alegria.

Resumo

Díaz Castro, Mary Lucía; Shellard, Ronald Cintra; Santos, Edivaldo Moura. **Flutuações Intrínsecas de Chuveiros Atmosféricos Extensos e Composição Química de Raios Cósmicos Ultra-Energéticos**. Rio de Janeiro, 2012. 102p. Tese de Doutorado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Observatório Pierre Auger é um detector de raios cósmicos ultra-energéticos ($E \geq 10^{18}$ eV) com características híbridas, que combinam detectores de superfície e de fluorescência. A determinação da composição química primária destes raios cósmicos é um dos seus principais objetivos. Há indícios de que os primários dos raios cósmicos com $E > 10^{18.5}$ eV tem massa maior, conclusão baseada nos resultados recentes sobre a evolução dos chuveiros atmosféricos extensos (cascatas de partículas formadas quando da colisão do raio cósmico primário no topo da atmosfera com moléculas de N_2 ou O_2). Encontrar parâmetros, que caracterizam o chuveiro, no processo de sua reconstrução e que forneçam informações associadas a este resultado, são essenciais para validar esta conclusão. Nesta tese estuda-se a evolução como função da energia, de parâmetros que caracterizam os chuveiros, que sejam sensíveis à sua composição primária. Mais especificamente aqueles determinados pelo detector de superfície, pois há uma estatística de chuveiros detectados significativamente maior. Damos especial atenção às flutuações intrínsecas – chuveiro-a-chuveiro – do parâmetro de inclinação (β) da Função de Distribuição Lateral, que descreve a variação da densidade de partículas ao longo da direção perpendicular ao eixo do chuveiro, como função da distância a esse eixo. Os resultados indicam que a flutuação intrínseca em β , para eventos inclinados ($45-60^\circ$) com $E > 10^{18.5}$ eV, possui uma tendência de diminuição com a energia até valores em torno de $10^{19.8}$ eV. Este resultado é consistente com o encontrado anteriormente em análises de composição química sobre a evolução com a energia da profundidade de máximo (X_{max}) dos chuveiros atmosféricos extensos medida pelos detectores do Auger em modo híbrido, em que em energias acima de $10^{18.5}$ eV, observa-se que os chuveiros tendem a atingir seu máximo numa região mais bem definida da atmosfera, levando, por conseguinte, a flutuações menores no sinal no solo.

Palavras-chave

Raios Cósmicos Ultra-Energéticos; Chuveiros Atmosféricos Extensos; Composição Química; Função de Distribuição Lateral; Observatório Pierre Auger;

Abstract

Díaz Castro, Mary Lucía; Shellard, Ronald Cintra; Santos, Edivaldo Moura. **Intrinsic Fluctuations of Extensive Air Showers and the Chemical Composition of Ultra High Energy Cosmic Rays**. Rio de Janeiro, 2012. 102p. Doctoral Thesis — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Pierre Auger Observatory is an ultra high energy cosmic ray detector ($E \geq 10^{18}$ eV) which has hybrid characteristics combining surface and fluorescence detectors. Determining the cosmic rays chemical composition is one of its most important challenges. There are evidences that cosmic ray primaries with energy above $10^{18.5}$ eV are heavy and this conclusion is based on recent results on the evolution of extensive air showers (cascades of particles formed by the collision of primary cosmic rays in the top of the atmosphere with nitrogen and oxygen molecules). Therefore, it is mandatory to find additional parameters supporting that conclusion. In this thesis, the evolution with energy of parameters characterizing the shower and with sensitivity to chemical composition are studied. More specifically, parameters determined by the surface detector are analyzed due to the high statistics in this operation mode. Special attention is given to the intrinsic - shower to shower - fluctuations of the slope parameter (β) of the Lateral Distribution Function which describes the particles density variation in the plane perpendicular to the shower axis as a function of distance to that axis. The results show that the intrinsic fluctuation of β , for inclined showers ($45-60^\circ$) with energy above $10^{18.5}$ eV, where the detector resolution is small compared to the total fluctuation, has a trend to decrease with energy up to $\sim 10^{19.6}$ eV. This result is consistent with recent results on the energy evolution of the depth of shower maxima (X_{max}) of extensive air showers, where above $10^{18.5}$ eV, the distributions of X_{max} show less fluctuations, leading, in turn, to less fluctuations on the ground level.

Keywords

Ultra High Energy Cosmic Rays; Extensive Air Showers; Chemical Composition; Lateral Distribution Function; Pierre Auger Observatory;

Sumário

1	Introdução	16
2	Raios cósmicos ultra-energéticos (UHECR)	19
2.1	Espectro	21
2.2	Aceleração de raios cósmicos	24
2.3	Direção de chegada	29
2.4	Física dos Chuveiros Atmosféricos Extensos	30
3	Observatório Pierre Auger	36
3.1	Detectores de Fluorescência	37
3.2	Detectores de Superfície	41
3.3	AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array)	55
4	Reconstrução da LDF com dados do Observatório Pierre Auger	56
4.1	Resíduos	56
4.2	Minimização do viés de seleção por meio de corte fiducial	58
4.3	Modelo para o erro no sinal	61
4.4	Impacto do corte fiducial nos parâmetros reconstruídos	66
4.5	Testes estatísticos adicionais de qualidade de ajuste	68
5	Flutuação intrínseca chuveiro a chuveiro	72
5.1	Profundidade atmosférica de máximo desenvolvimento	72
5.2	Flutuações de parâmetros determinados pelo SD	73
6	Conclusões	93
A	Apêndice	102
A.1	Estações Silenciosas	102
A.2	Estações Saturadas	102

Lista de figuras

2.1	Espectro diferencial de energia de raios cósmicos de alta energia obtido por vários experimentos. Extraído da referência [16].	21
2.2	Energia de um próton, com aproximação de perda contínua de energia, como função da distância de propagação através da CMBR para várias energias iniciais. Extraída da referência [26].	23
2.3	Comparação entre os fluxos medidos pelo Observatório Auger e Hires. Extraído da referência [28].	24
2.4	Esquema do Mecanismo de Aceleração de Fermi de segunda ordem. Extraído da referência [30].	25
2.5	Esquema do Mecanismo de Aceleração de Fermi de primeira ordem. Modificado da referência [30].	26
2.6	Diagrama de Hillas: Relação do tamanho e campo magnético das possíveis fontes de aceleração de raios cósmicos. Objetos abaixo da linha tracejada não poderiam acelerar em princípio prótons até energias de 10^{20} eV. Extraído da referência [17].	27
2.7	Limite superior na fração de fótons obtido no fluxo integrado de raios cósmicos para vários experimentos. Em preto limites obtidos pelo detector de superfície do Observatório Auger, e em azul limites obtidos acima de 2, 3, 5 e 10 EeV (modo híbrido do Observatório Pierre Auger). As linhas apresentam previsões para modelos Top-Down. Extraída da referência [35].	28
2.8	69 eventos de maior energia ($E > 55$ EeV) medidos pelo Observatório Auger (círculos pretos) até o 31 de dezembro do 2009. A linha sólida representa o limite do campo de visão do Observatório Auger para ângulos zenitais menores a 60° . Os círculos azuis, de raio 3.1° , estão centrados na posição de 318 AGNs segundo o catálogo Veron-Cetty-Veron para uma distância de 75 Mpc e dentro do campo de visão do Observatório. [6–8]. Extraído da referência [8].	29
2.9	Componentes de um chuva atmosférico extenso (EAS).	30
2.10	Chuveiros atmosféricos extensos segundo o Modelo de Heitler. a) chuva EM, b) chuva hadrônica. Extraída da referência [38].	32
3.1	Disposição dos detectores de superfície (pontos vermelhos) e dos detectores de fluorescência (Leones, Morados, Loma Amarilla e Coihueco) na periferia do arranjo SD, especificamente neste caso mostra-se também o campo de visão de cada um dos telescópios de fluorescência (linhas verdes).	37
3.2	Vista esquemática de um dos olhos de fluorescência com seus 6 telescópios. <i>Superior direita</i> : um dos telescópios de fluorescência. Extraído da referência [39].	38
3.3	Esquema da detecção de um evento híbrido, ou seja, um evento medido simultaneamente pelos SD e FD do Observatório Auger.	39
3.4	Reconstrução geométrica de um chuva para o FD. Extraída da referência [39].	39

- 3.5 Perfil de energia reconstruído para um chuva de $3.0 \pm 0.2 \times 10^{19}$ eV, a linha representa o ajuste de Gaisser-Hillas. Extraída da referência [39]. 41
- 3.6 Detector de superfície do Observatório Auger e seus componentes principais: tanque plástico com 12 toneladas de água, bateria, fotomultiplicadoras, painéis solares, GPS, antena de comunicação e eletrônica do tanque. Extraído da referência [46]. 42
- 3.7 Esquema da hierarquia de disparo do detector de superfície do Observatório Auger. Extraída da referência [47]. 43
- 3.8 Gatilhos T3. *Esquerda:* $ToT2C_1 \& 3C_2$. *Direita:* $2C_1 \& 3C_2 \& 4C_4$. C1 até C4 correspondem da primeira até quarta coroa, com distâncias de 1.5, 3, 4.5, e 6 km em relação a um determinado detector. Extraída da referência [47]. 44
- 3.9 Esquema da hierarquia de seleção de eventos do detector de superfície do Observatório Auger. Extraída da referência [47]. 44
- 3.10 (a) Duas possíveis configurações de 3ToT. (b) Três configurações mínimas de $4C_1$. Extraída da referência [48]. 45
- 3.11 (a) Esquema de direção de chegada com frente plana. (b) Esquema de direção de chegada com frente esférica. Extraído da referência [48]. 47
- 3.12 Função de Distribuição Lateral (LDF), a qual descreve a variação do sinal medido nos detectores de superfície participantes de um evento, como função da distância a seu eixo. Pontos azuis representam o sinal medido nos diferentes detectores que dispararam no evento, e a linha verde o ajuste da LDF para uma dada parametrização. Evento com energia de 51.5 EeV e ângulo zenital de $\sim 36^\circ$. Extraído da referência [53]. 49
- 3.13 Correlação entre $\log S_{38}$ e $\log E_{FD}$ para 661 eventos híbridos. A linha azul representa o melhor ajuste dos dados. A figura superior esquerda, apresenta o histograma da diferença das energias reconstruídas pelo FD e SD destes eventos. Extraída da referência [28]. 53
- 3.14 Configuração do Super-Hexágono: 12 dupletos e 7 tripletos, onde a separação entre tanques é ~ 11 m. *Inferior direita:* localização do super-hexágono no arranjo, com um evento disparando estações nele. 54
- 3.15 *Esquerda:* localização de AMIGA dentro de arranjo SD. *Direita:* detalhe dos detectores pertencentes a AMIGA. Extraída da referência [42]. 55
- 4.1 *Esquerda:* resíduo como função da distância ao eixo do chuva, obtido com a LDF LogXmax para eventos com $E \geq 10$ EeV. *Direita:* histograma associado. 57
- 4.2 *Esquerda:* resíduo como função da distância ao eixo do chuva, obtido com a LDF NKG para eventos com $E \geq 10$ EeV. *Direita:* histograma associado. 57
- 4.3 Resíduo como função da distância ao eixo do chuva, obtido com a LDF LogXmax para eventos com $E \geq 10$ EeV. *Esquerda:* para estações que atingiram o nível de gatilho TH. *Direita:* para estações que atingiram o nível de gatilho ToT. 58

- 4.4 Resíduo como função da distância ao eixo do chuveiro e seu histograma associado, obtido com a LDF LogXmax para eventos com $E \geq 10$ EeV. *Acima para abaixo:* $S_{cut} = 2, 3, 4, 6$ VEM. 60
- 4.5 Resíduo como função da distância ao eixo do chuveiro e seu histograma associado, obtido com a LDF LogXmax para eventos com $E \geq 10$ EeV e $S_{cut} = 3$ VEM. 61
- 4.6 Resíduo como função da distância ao eixo do chuveiro e seu histograma associado, obtido com a LDF NKG para eventos com $E \geq 10$ EeV e $S_{cut} = 3$ VEM. 61
- 4.7 Distribuição de distâncias ao eixo do chuveiro para dubletos do super-hexágono. Após uma distância de 300 m ainda tem-se mudanças abruptas no sinal dos dubletos ($\Delta S > 60$ VEM), o que poderia afetar o processo de minimização. 64
- 4.8 Resíduo como função da distância ao eixo do chuveiro e seu histograma associado, obtido com a LDF LogXmax, corte fiducial e a nova parametrização do erro medido no sinal (eq. 4-7), eventos com $E \geq 10$ EeV. 65
- 4.9 Resíduo como função da distância ao eixo do chuveiro e seu histograma associado, obtido com a LDF LogXmax, corte fiducial e a novo modelo de erro do sinal, dependente do *tracklength* (eq. 4-11), eventos com $E \geq 10$ EeV. 65
- 4.10 Distribuição dos resíduos para os três modelos de erro. *Esquerda acima:* modelo com a nova parametrização dos parâmetros a e b , equação 4-7. *Direita acima:* modelo com dependência do *tracklength*. *Abaixo:* modelo original implementado no código de reconstrução de eventos (equação 4-5). 67
- 4.11 Comparação, para parâmetros da parte Geométrica e da LDF, entre a reconstrução Normal (atualmente implementada no código de reconstrução de eventos) e a LDF LogXmax com corte fiducial para eventos com $E \geq 3$ EeV. 68
- 4.12 Distribuições de probabilidade dos χ^2 da parte geométrica (direita), e da LDF (esquerda) correspondente às estações disparadas. 70
- 4.13 Distribuições de probabilidade com corte nas probabilidades do χ^2 menores a 0.01, tanto da parte geométrica, como da LDF correspondente às estações disparadas. 71
- 4.14 χ^2 reduzido da LDF das estações disparadas. *Esquerda:* amostra total de eventos. *Direita:* eventos com probabilidade de χ^2 muito pequena (menor a 0.01) 71
- 4.15 χ^2 reduzido da contribuição geométrica. *Esquerda:* amostra total de eventos. *Direita:* eventos com probabilidade de χ^2 muito pequena (menor a 0.01) 71
- 5.1 Perfis longitudinais para simulações de Monte Carlo de primários tipo ferro e prótons. 73
- 5.2 $\langle X_{max} \rangle$ e $RMS(X_{max})$ medidos pelo Observatório Auger em modo híbrido comparados com simulações de chuveiros [65], utilizando extrapolações de modelos de interação hadrônica [66–69]. Extraída da referência [9]. 74

5.3	Seção de choque próton-próton medida por diferentes experimentos e extrapolada para vários modelos de interação hadrônica. Figura produzida por <i>R.Ulrich, R. Engel, M. Unger</i> .	74
5.4	Valor médio do parâmetro de inclinação da LDF $\text{Log}X_{\text{max}}(\beta)$ como função do cosseno do ângulo zenital ($\cos\theta$).	75
5.5	Média do parâmetro de inclinação da LDF (β) como função da energia, por bins de ângulo zenital (0 - 60 graus).	76
5.6	Histogramas do β para os bins 1 (superior), 2 (meio) e 3 (inferior) de θ e energia (Conjunto 1).	77
5.7	Histogramas do β para os bins 4 (acima) e 5 (abaixo) de θ e energia (Conjunto 1).	78
5.8	Histogramas do β para os bins 1 (superior), 2 (meio) e 3 (inferior) de θ e energia (Conjunto 2).	79
5.9	Histogramas do β para os bins 4 (acima) e 5 (abaixo) de θ e energia (Conjunto 2).	80
5.10	Topologia do evento 200805701403 reconstruído com cada par do dubleto (vermelho=reconstrução 1 e azul=reconstrução 2). <i>Parte inferior direita</i> : Event Display do código de reconstrução para a distribuição de estações disparadas no evento.	84
5.11	Distribuição dos pontos de impacto para as duas reconstruções independentes dentro do super-hexágono. <i>Esquerda acima</i> : caso A (72 eventos). <i>Direita acima</i> : caso B (74 eventos). <i>Esquerda abaixo</i> : caso C (61 eventos). <i>Direita abaixo</i> : caso D (65 eventos).	85
5.12	Diferença entre parâmetros das duas reconstruções independentes dentro do super-hexágono (Caso D).	86
5.13	Histogramas do resíduo do β para os 4 casos exibidos. <i>Esquerda acima</i> : reconstrução normal e modelo antigo do erro. <i>Direita acima</i> : reconstrução normal e nova parametrização do erro. <i>Esquerda abaixo</i> : reconstrução considerando o corte fiducial e com modelo antigo do erro. <i>Direita abaixo</i> : reconstrução considerando o corte fiducial e com nova parametrização do erro.	87
5.14	<i>Conjunto 1</i> : flutuação de parâmetro β como função da energia, por bins de ângulo zenital (0 - 60 graus). Flutuação total (pontos azuis), e resolução do detector (pontos vermelhos).	88
5.15	<i>Conjunto 2</i> : flutuação de parâmetro β como função da energia, por bins de ângulo zenital (0 - 60 graus). Flutuação total (pontos azuis), e resolução do detector (pontos vermelhos).	89
5.16	<i>Conjunto 1</i> : flutuação de parâmetro β como função da energia, por bins de ângulo zenital (45 - 60°). Flutuação total (pontos azuis), resolução do detector (pontos vermelhos) e flutuação intrínseca (pontos pretos).	90
5.17	<i>Conjunto 2</i> : flutuação de parâmetro β como função da energia, por bins de ângulo zenital (45 - 60°). Flutuação total (pontos azuis), resolução do detector (pontos vermelhos) e flutuação intrínseca (pontos pretos).	90
5.18	<i>Conjunto 1</i> : flutuação de parâmetro β como função do $\cos\theta$, por bins de energia ($\log_{10}(E/eV)$: 18.8– > 19.7). Flutuação total (pontos azuis), e resolução do detector (pontos vermelhos).	91

- 5.19 *Conjunto 2*: flutuação de parâmetro β como função do $\cos\theta$, por bins de energia ($\log_{10}(E/eV) : 18.8 - 19.7$). Flutuação total (pontos azuis), e resolução do detector (pontos vermelhos). 92

Lista de tabelas

4.1	Número de eventos para cada corte considerado na análise (o corte fiducial 1 e corte fiducial 2 serão explicados nas próximas seções).	62
4.2	Valores da Média e do RMS do histograma do resíduo como função da distância ao ponto de impacto para a LDF LogXmax com corte fiducial, e com os diferentes modelos de erro discutidos.	66
5.1	<i>Conjunto 1</i> : informação do número de eventos, média da energia, β , flutuação total do β ($RMS(\beta)$), e a resolução do detector.	81
5.2	<i>Conjunto 2</i> : informação do número de eventos, média da energia, β , flutuação total do β ($RMS(\beta)$), e a resolução do detector.	82
5.3	Valores para o RMS e seu erro para os histograma do resíduo do β , obtidos por meio das duas reconstruções independentes do super-hexágono.	86

*"São nossas escolhas que revelam o que
realmente somos"*

Harry Potter e a Câmara Secreta