

Tese de Doutorado

OBSERVAÇÕES SOBRE INTERAÇÕES NUCLEARES
PRODUZIDAS POR RAIOS CÓSMICOS DE
ENERGIA $\sum E_\gamma > 10^{12} \text{ eV}$ DETECTADAS EM
CÂMARAS DE EMULSÃO EM CHACALTAYA

por

NEUSA AMATO

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Rio de Janeiro, Abril de 1996

A meus filhos

Sandra e Sergio,

pelo constante carinho e incentivo recebidos

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cesar Lattes pelo estímulo constante, bem como pelos inúmeros ensinamentos recebidos desde o início de minha carreira científica até a realização desse trabalho, para o qual contribuiu com valiosas discussões, críticas e sugestões.

Aos professores Y. Fujimoto, S. Hasegawa, A. Ohsawa, N. Arata e demais membros da Colaboração Brasil-Japão pelas discussões durante todos esses anos.

Aos colegas Alfredo Marques de Oliveira e Anna Maria Endler pela amizade demonstrada durante esse longo período de nossa convivência, e pelo grande incentivo recebido para que eu realizasse esse trabalho.

Ao diretor do CBPF, professor Amós Troper, ao Coordenador de Formação Científica do CBPF, professor Francisco Caruso Neto e ao professor J.J. Giambiagi (in memoriam) pelo apoio e encorajamento recebidos para a realização desse trabalho.

A Terezinha T. Villar pelo trabalho de microscopia, além do estímulo durante a realização desse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados resultados obtidos pela Colaboração Brasil-Japão (da qual participo) em suas câmaras de emulsão expostas aos raios cósmicos em Chacaltaya, Bolívia.

Na região de energia (visível em gamas) de $10 - 100 \text{ TeV}$ a Colaboração Brasil-Japão (CBJ) analisou as interações nucleares ocorridas na camada produtora da câmara, os chamados *C*-jatos, e estudou as características da produção de mesons, em termos de multiplicidade, ângulo de emissão, energia e momento transversal dos raios- γ produzidos. Através desse estudo foram encontradas algumas características, na produção de pions (em $E_0 \sim 135 \text{ TeV}$), distintas daquelas que seriam esperadas, por exemplo, a partir dos resultados de experiências de aceleradores em região de energia mais baixa (até a região de $E_0 = 1.5 \text{ TeV}$ do ISR). Essas características podem ser interpretadas como devidas ao aparecimento na região de energia mais alta, de bolas de fogo mais pesadas (Açu) que são diferentes das bolas de fogo pequenas (Mirim) para as quais vale a lei de similaridade (scaling). Esses resultados experimentais nesta região de energia foram confirmados pelas experiências com o acelerador $Spp\bar{S}$ do CERN.

Na região de energia $\sum E_\gamma = 100 - 1000 \text{ TeV}$ a CBJ estudou os *A*-jatos, que são as interações ocorridas na atmosfera. No que diz respeito à produção de pions, as características seguem a linha que se obtém extrapolando os resultados encontrados no estudo dos *C*-jatos. Encontrou-se, porém, um novo tipo de fenômeno, chamado “família de Centauro”. Foram encontrados quatro membros na família: Centauro do tipo original, Mini-Centauro, Chiron e Geminion, que têm em comum a ausência de emissão de raios γ (π^0) na interação. Estes aspectos exóticos até agora só foram observados em experiências de raios cósmicos.

Na região de energia super-alta, $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$, a CBJ observou alguns

eventos em que na parte central (região angular muito para frente) está concentrada uma grande fração da energia total, fazendo aparecer nos filmes de raios-X uma grande mancha escura, que é chamada “halo”. Do estudo dessas famílias de $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$, que são chamadas superfamílias, concluiu-se que um de seus aspectos importantes é a emissão de grande quantidade de energia, tanto na direção longitudinal como na transversal.

Os grupos de Pamir, Mt. Fuji e Kambala também observaram eventos com halo em suas câmaras de emulsão expostas em montanha.

ABSTRACT

Results obtained by Brasil-Japan Collaboration (BJC) with the emulsion chambers exposed at Mt. Chacaltaya, Bolívia, are presented here.

In the visible energy region $\sum E_\gamma = 10 - 100 \text{ TeV}$, the BJC has analysed the nuclear interactions which occurred in the target layer (*C*-jets) of two-storied chambers; the characteristics of meson production could be studied. The distribution of γ -rays was constructed on their energy, emission angle and transverse momentum, and a comparison was made with the results from simulation calculations, based on accelerator events (FNAL and ISR), at lower energy. It was found that some features in the region of the *C*-jets ($E_0 \sim 135 \text{ TeV}$) are different from those at $\sim 1.5 \text{ TeV}$ (ISR energies), showing a clear indication of violation of similarity law (Feynman scaling). These results obtained through such *C*-jet study were quantitatively confirmed by experiments with the accelerator $S\bar{p}\bar{p}S$ at CERN. The cosmic-ray events were classified in two types, Mirim-jets and Açú jets, with nearly equal frequency of production. Mirim-jets are on the scaling extrapolation from the lower energy region of accelerators, while an increasing rate, with energy, of Açú-jets, is causing the scaling break.

In the visible energy region $\sum E_\gamma = 100 - 1000 \text{ TeV}$, the BJC has studied the *A*-jets, i.e., interactions which occurred in the atmosphere. For the meson production, they studied the gross features of the phenomena and found that the violation of scaling grows continuously from the lower energy region of the *C*-jets ($10 - 100 \text{ TeV}$) to this region; the frequency of production of heavier fire-balls is growing here. In this new region, the BJC also found events with larger multiplicity and higher p_T , which are called Guaçu-jets. In this region, the BJC has observed a new unusual type cosmic-ray family phenomena, the "Centauro-families". They were classified into four categories, as Centauro of original type, Mini-Centauro, Chiron and Geminion, according to their multiplicity, $\sum p_T$ and

$\langle p_T \rangle$. Their common feature is the low π_0 emission in the interaction. Until now these exotic features have been observed only in the cosmic-ray experiments.

In the super-high energy region, $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$, the BJC has observed some events (called superfamilies) in which the common feature is the presence of a general darkening of the X-ray films in the central part of the family which is called as "halo". These events are called halo events. The emulsion chamber experiments at Pamir, Mt. Fuji and Kambala have also observed halo events.

ÍNDICE

	Pág.
Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 - A Colaboração Brasil-Japão	4
1.1 - Histórico	4
1.2 - Método Experimental	5
1.3 - <i>A</i> -jatos, <i>C</i> -jatos e <i>Pb</i> -jatos	8
1.4 - Produção Múltipla de Pions na Região de $\sum E_\gamma = 10^{12} - 10^{14} eV$	10
1.4.1 - Características Gerais dos <i>C</i> -jatos	10
1.4.2 - Testes de “Scaling”. Comparação com Dados do FNAL e do ISR	11
1.4.3 - Comparação com Resultados do <i>Spp̄S</i>	14
1.5 - Produção Múltipla de Pions na Região de $\sum E_\gamma \simeq 100 TeV$	16
1.5.1 - Dois tipos de <i>C</i> -jatos: Mirim e Açú	16
1.5.2 - Outro tipo de Produção Múltipla de Pions: Guaçu	19
1.6 - Estado Intermediário (E.I.)	21
1.6.1 - Espectro de Massa das Bolas de Fogo	22

CAPÍTULO 2 - Interações Exóticas Observadas na Radiação Cósmica	25
2.1 - Características, Classificação	25
2.2 - Interações de Centauro do Tipo Original	26
2.3 - Interações do Tipo Mini-Centauro	29
2.4 - Interação Nuclear Tipo Chiron	30
2.5 - Interação Tipo Geminion	31
2.5.1 - Famílias do Tipo Binocular	31
2.5.2 - O Evento Castor-Pollux	33
2.6 - <i>C</i> -jatos e <i>Pb</i> -jatos Exóticos	34
2.6.1 - <i>C</i> -jatos Exóticos	34
2.6.2 - <i>Pb</i> -jatos Inferiores Exóticos	35
CAPÍTULO 3 - SUPERFAMÍLIAS	37
3.1 - Resultados Obtidos em $\sum E_\gamma < 1000 \text{ TeV}$	37
3.2 - Descrição de Superfamílias	38
3.3 - Resultados Experimentais no Halo	39
3.3.1 - Densidade de Eletrons e Número Total de Eletrons	39
3.3.2 - Curva de Transição do Número Total de Eletrons. Determinação da Energia do Halo	40
3.4 - Resultados Experimentais nos Chuveiros Individuais	42
BIBLIOGRAFIA	44
REPRODUÇÕES DE TRABALHOS PUBLICADOS	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Desenvolvimento de uma Cascata Eletromagnética na Câmara de Emulsão	6
1.2 - Câmara de 2 Andares com os 3 Tipos de Interção	9
1.3 - Distribuição de Energia Fracionária dos Raios- γ	12
1.4 - Distribuição Angular dos Raios- γ na Escala $\log \tan \theta$	13
1.5 - Distribuição de p_T dos Raios- γ	14
1.6 - Distribuição de Pseudo-Rapidez, η , no s.c.m.	15
1.7 - Correlação entre n_γ e $\langle p_T \rangle$ de Raios- γ	18
1.8 - Variação de $\sum_\theta p_T$ com $\theta_\gamma \sum E_\gamma$ para 3 Eventos Guaçu. A Região Riscada Representa os Eventos Açú	21
1.9 - Distribuição de Massas Invariantes das Bolas de Fogo Liberadas em Raios- γ	23
2.1 - Ilustração do Evento Centauro I	27
2.2 - Diagrama do Número de Hadrons, N_h , e Fração da Energia Ocupada pelos Hadrons	28
2.3 - Possível Interpretação de Famílias Binoculares (Geminion)	33
3.1 - Distribuições Laterais de $\rho(r, t)$, em Diferentes Profundidades t da Câmara, para o Evento P06	40
3.2 - Transições dos Números de Eletrons para a Parte do Halo de Seis Superfamílias	41

LISTA DE TABELAS

	Pág.
1.1 - Classificação dos Jatos e suas Características	24
2.1 - Características dos Eventos Tipo Centauro	26

INTRODUÇÃO

Desde sua descoberta, no início do século, a radiação cósmica vem sendo estudada em várias de suas manifestações. O estudo das interações produzidas pelos raios cósmicos de energia extremamente alta recebeu particular atenção, pois constitui uma sonda para o comportamento da matéria e seus constituintes elementares.

Muitas partículas foram descobertas através daqueles estudos; podemos citar o positron, e^+ , descoberto por Anderson [1], em 1932, o processo $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, por Blacket e Occhialini [2], em 1933, o mesotron (muon atualmente) por Anderson, Neddermeyer [3] e, independentemente, por Street e Stevenson [4], em 1937. As emulsões nucleares desempenharam um papel destacado nessas pesquisas. Podemos ressaltar a descoberta do meson π e sua desintegração em mesotron (muon) + neutretto, em 1947, por Lattes, Occhialini e Powell [5], confirmando previsões teóricas de Yukawa [6], em 1935, e Sakata [7], em 1942.

Em 1940 experiências realizadas no Brasil por Wataghin, Souza Santos e Pompeia [8] levaram à importante descoberta dos chuveiros penetrantes.

Sala e Wataghin [9], em 1944, usando alvo localizado de água, mostraram que há produção de partículas em colisões de nucleons com protons, e conseqüentemente, a produção dos secundários não se dá só em colisões sucessivas do primário energético dentro do núcleo (produção plural), como muitos pensavam, mas sim em colisões individuais (produção múltipla). As partículas produzidas eram pions, porém eles não sabiam, porque o meson π só foi identificado em 1947. Eles escreveram também, nesse trabalho, que parecia haver mais de um tipo de partícula penetrante.

A produção múltipla de partículas foi prevista por Wataghin [10], em 1934, antes do meson de Yukawa.

As informações experimentais obtidas com raios cósmicos desenvolvem-se lentamente: de um lado o fluxo de primários da radiação cósmica decresce rapidamente quando a energia aumenta e, de outro, há problema instrumental das técnicas de medida para separar, identificar e medir a energia de secundários de energia cada vez mais alta. Em 1956 um grupo japonês tentou uma solução elevando câmaras detectoras de chumbo e emulsão nuclear em vôos de balão [11]. Um aspecto importante que contribuiu para o sucesso do projeto foi o da aplicação, pela primeira vez, dos cálculos de Kamata-Nishimura [12] às cascatas observadas nas emulsões nucleares, estabelecendo bases para as estimativas de energia de raios γ e e^\pm de altíssimas energias. Essa teoria apresentou soluções muito convenientes para observações envolvendo o desenvolvimento de cascatas eletromagnéticas, e vem sendo empregada, aperfeiçoada (efeito LPM + simulação de Shibata e Okamoto), para o estudo de interações nucleares de energia extremamente alta.

Em 1948, P. Freier, E.P. Ney, F. Oppenheimer [13], expondo emulsões e câmara de Wilson em balão a aproximadamente 30 km de altura, descobriram núcleos pesados, inclusive Fe , na radiação cósmica primária.

No final dos anos 50, o projeto ICEF [14] (International Cooperative Emulsion Flight), por iniciativa de M. Schein, expos 80 litros de pilhas de emulsões nucleares em vôos de balão para estudar a produção múltipla de partículas; desse projeto fizeram parte 15 países, inclusive o Brasil, através do grupo de Lattes, na USP.

Esses projetos permitiram obter informações confiáveis sobre as interações nucleares produzidas por primários da radiação cósmica com energias entre 1 e 10 TeV ; acima dessas energias, e mesmo nas vizinhanças de seu limite superior, as medições

eram inexistentes ou insatisfatórias, demandando outras formas de observação. De particular interesse era a ampliação do limite superior do intervalo de energias, para obter informações até pelo menos 100 TeV, já alcançadas nos dispositivos de Chuveiros Atmosféricos Extensos. Uma análise dos sucessos e dificuldades anteriores, e a comparação com os resultados usando a técnica dos chuveiros extensos, levaram à conclusão que as observações deveriam envolver detectores com muito maior área sensível e tempos de exposição maiores, o que levava inevitavelmente ao uso de dispositivos instalados em montanhas.

No Capítulo 1 são apresentados os trabalhos desenvolvidos pela Colaboração Brasil-Japão - CBJ, da qual participo há mais de 30 anos. São descritos os detectores usados em Chacaltaya, o método experimental utilizado, bem como os diferentes tipos de interação detectados nas câmaras de emulsão. São feitas comparações dos resultados da CBJ com os de aceleradores.

No Capítulo 2 é apresentado um estudo das chamadas interações exóticas observadas na radiação cósmica.

No Capítulo 3 são dadas as características e métodos utilizados no estudo das famílias de energias observadas $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$, as chamadas “superfamílias”.

No final desta tese são anexadas cópias de alguns de nossos trabalhos relacionados com os assuntos aqui apresentados.

CAPÍTULO 1

A COLABORAÇÃO BRASIL-JAPÃO

1.1 Histórico

As limitações em altitude dos laboratórios em montanhas, disponíveis para os cientistas japoneses (Monte Norikura, Monte Fuji, com acesso ao transporte de materiais), levaram um grupo de físicos a pedir a intervenção do Prof. Yukawa, para propor a Lattes uma colaboração envolvendo os eventos de altas energias, a ser desenvolvida em Chacaltaya, Bolívia, a 5220 m, onde Lattes expusera anos antes as emulsões que levaram à descoberta do meson- π . Assim, em 1959, o Prof. Yukawa remeteu a Lattes uma carta expondo sua opinião sobre o assunto. Na Conferência Internacional de Raios Cósmicos realizada em Toquio, em 1961, Fujimoto, Koshiba, Lattes e Occhialini acertaram o projeto da Colaboração Brasil-Japão que continua até hoje. Em 1962 nascia, como consequência desses entendimentos, a Colaboração Brasil-Japão - CBJ, com o objetivo de estudar as interações de altíssimas energias, produzidas pela radiação cósmica, e detectadas em “câmaras de emulsão nuclear” expostas no Monte Chacaltaya, Bolívia. Da CBJ participaram, no Brasil, a USP, o CBPF, a UNICAMP e a UFF, e no Japão diversas universidades e centros de pesquisas.

Durante os primeiros anos da CBJ duas personalidades desempenharam papéis da maior relevância. No Brasil, o Prof. Mario Schönberg e no Japão o Prof. Mituo Taketani empenharam o prestígio científico de que gozavam nas respectivas comunidades para garantir a instalação e a consolidação dos grupos, além do respaldo científico nas

diffíceis decisões iniciais. Em 1984 aderiram também à CBJ, grupos da URSS e Polônia.

Em seus mais de trinta e três anos de duração foram expostas no Monte Chacaltaya 24 câmaras com as quais a CBJ, juntamente com grupos da URSS e Polônia, estudou os principais aspectos relativos à produção múltipla de partículas na região de energia cobrindo o intervalo $10^{13} - 10^{17} eV$.

1.2. Método Experimental

As câmaras de emulsões, usadas como detectores das interações, são formadas por vários blocos, cada um dos quais é constituído de placas de chumbo (de 1 cm de espessura) alternadas com envelopes contendo material foto-sensível (filmes de raios-X justapostos a placas de emulsões nucleares). Os blocos têm dimensões 40 cm \times 50 cm, sendo que a profundidade da câmara varia de uma para outra.

Quando uma partícula da radiação cósmica incide na atmosfera terrestre, pode colidir, após um intervalo de vôo livre, com um núcleo dos gases constituintes dela, produzindo principalmente pions. Entre essas partículas os pions neutros, π^0 , se desintegram (com uma vida média de repouso de 10^{-16} s) em dois raios- γ . Cada raio- γ , de elevadíssima energia, incidindo na câmara de emulsões, experimenta sucessivas interações eletromagnéticas com núcleo das placas de chumbo, produzindo, nas diversas profundidades da câmara, um grande número de novos raios- γ , elétrons e pósitrons, através da emissão de radiação de freiamento (Bremsstrahlung) e da criação de pares de partículas, constituindo a chamada *cascata eletromagnética* (c.e.m.). A Figura 1.1 apresenta um esquema do desenvolvimento de uma c.e.m. na câmara de emulsão. Quando a energia desenvolvida na cascata é maior que o limiar de sensibilidade do dispositivo (1 TeV nos filmes de raios-X; 0.2 TeV nas emulsões nucleares) a c.e.m. é detectada.

Nos filmes de raios-X a c.e.m. se mostra como uma mancha escura, visível a olho nu, enquanto que nas placas de emulsões nucleares, aparece ao microscópio como um conjunto de traços paralelos (imagens das trajetórias de elétrons e pósitrons ($e^- e^+$)).

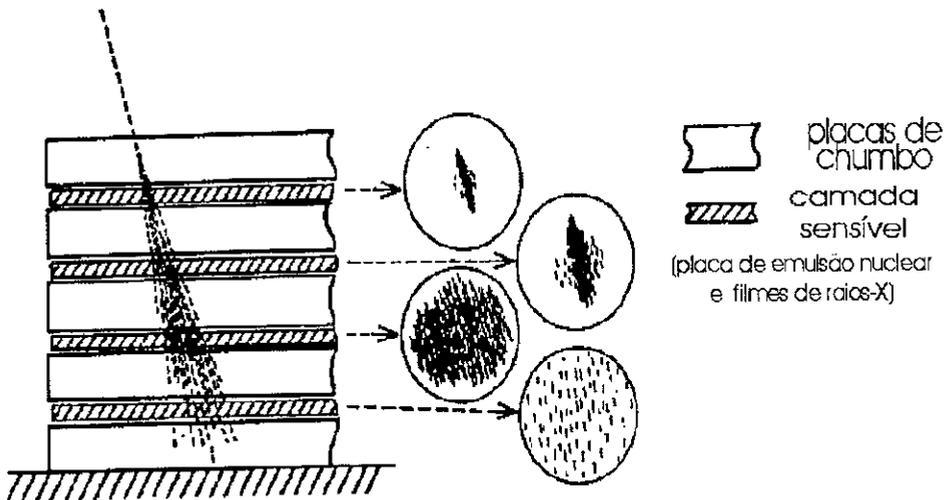


Fig. 1.1 - Desenvolvimento de uma cascata eletromagnética na câmara de emulsão

Cada bloco é analisado segundo o seguinte procedimento: 1) busca-se nas placas de raios-X, a olho nu, a localização das manchas acusando a passagem das c.e.m.; 2) superpondo o filme de raios-X à placa de emulsão a ele adjacente, localizam-se as posições da passagem das c.e.m., marcando essas posições; 3) no microscópio focalizam-se essas regiões e observam-se os traços dos elétrons e pósitrons. Esse procedimento é repetido para os filmes localizados em todas as profundidades na câmara. Para as c.e.m. assim encontradas, mede-se o ângulo azimutal Φ entre a projeção horizontal dos traços da componente ($e^- e^+$) e um eixo arbitrário de referência. Superpondo-se os filmes de raios-X (nas diferentes profundidades), um a um, numa folha de papel milimetrado, marcam-se as posições dos eventos (c.e.m.) e constroi-se o “mapa do bloco”, que representa as projeções horizontais das direções de incidência dos eventos, e dá também o ângulo zenital θ .

Em alguns casos obtém-se um grupo de c.e.m. paralelas, correspondendo à incidência, na câmara, de raios γ originados em eventos nucleares na atmosfera: este grupo constitui uma “família” de raios- γ . A análise das famílias dá informações sobre as interações das quais resultam. Para analisar uma família deve-se determinar as posições e as energias dos raios- γ que a constituem.

Pode-se determinar a energia das c.e.m. por dois métodos diferentes: 1) contagem de traços da componente ($e^- e^+$) nas chapas de emulsão nuclear; 2) medida da opacidade nos filmes de raios-X.

No primeiro caso conta-se ao microscópio o número de traços ($e^- e^+$) observados numa área padrão das emulsões em diferentes profundidades, t , da câmara. Os pontos assim observados são representados em escala semi-log tendo como abcissas os valores das profundidades, t (em “unidades de cascata”, u.c.), e como ordenadas as contagens ($e^- e^+$), N_e . Dentre as curvas de transição ($N_e \times E$) teóricas obtidas da teoria de Kamata-Nishimura [12], escolhe-se aquela que melhor se ajusta aos valores observados. Sabendo-se que o número **máximo** de partículas na componente ($e^- e^+$) é proporcional à energia da c.e.m., esta fica determinada através de uma curva de calibração $N_e (\text{max}) \times E$

No segundo caso mede-se o escurecimento da mancha produzida pela c.e.m. nos filmes de raios-X. Para tal, com auxílio do fotomicrodensitômetro e um tamanho conveniente de fenda (em geral $\sim 200 \mu$), mede-se a opacidade do filme de raios-X na região da c.e.m.. A opacidade é definida pela relação $D = \log_{10}(I_0/I)$ onde I é a leitura de corrente elétrica correspondendo ao centro da mancha devida à c.e.m., e I_0 é a que corresponde à transmissão luminosa das vizinhanças (fundo). Para cada c.e.m. determinam-se os valores D nas diferentes profundidades, t , e então representa-se em escala semi-log a opacidade contra a profundidade ($D \times t$). Em seguida escolhe-se, por tentativa e erro, a

curva de transição teórica que melhor se ajusta aos dados experimentais, de onde resulta o valor máximo de D ; este é convertido em energia mediante uma curva de calibração, $D_{\max} \times E$.

1.3. *A-jatos*, *C-jatos* e *Pb-jatos*

Buscando otimizar custos e o desempenho das câmaras, sua geometria tem apresentado alguma variação, ao longo do tempo. Em suas linhas gerais as câmaras da CBJ foram de dois tipos. O primeiro, denominado *câmara simples*, foi projetado para detectar principalmente os eventos produzidos na atmosfera acima dela (*A-jatos*); o segundo tipo, câmara de dois andares, é constituído de câmara superior, camada alvo, espaço vazio e câmara inferior. Desde a câmara número 15 a estrutura adotada é a de dois andares, com área total de 40 m². Até a câmara número 21, a camada alvo era constituída de 23 cm de pixe ($\simeq \frac{1}{3}$ do livre caminho médio de interação de hadrons comuns). Da câmara 22 em diante o pixe foi substituído por plásticos que permitem maior controle da uniformidade da espessura do alvo. A câmara superior funciona como detector e como absorvente de eventos atmosféricos, os *A-jatos*. A câmara inferior, além da continuação de eventos da câmara superior, detecta principalmente os chamados *C-jatos*, que são as interações ocorridas na camada alvo. O espaço vazio entre o alvo e a câmara inferior permite que os raios- γ provenientes dos π^0 produzidos nos *C-jatos* cheguem à câmara inferior razoavelmente separados uns dos outros, possibilitando as medidas individuais. Usualmente um *C-jato* é visto a olho nu no filme de raios-X como uma mancha escura, enquanto na emulsão nuclear vários chuviros são vistos ao microscópio. Além dos *C-jatos* e *A-jatos*, a câmara de emulsão detecta também os *Pb-jatos*, que são interações hadrônicas que ocorrem nas placas de chumbo das câmaras. Se ocorrem na câmara superior são denominados *Pb-jatos superiores* e, se na câmara inferior, são *Pb-jatos*

inferiores. Usualmente um *Pb*-jato é registrado como uma mancha escura nos filmes de raios-X e como chuviros superpostos nas placas de emulsão.

A Figura 1.2 mostra esquematicamente uma câmara de dois andares (câmara 18) com os três tipos de interações mencionadas acima.

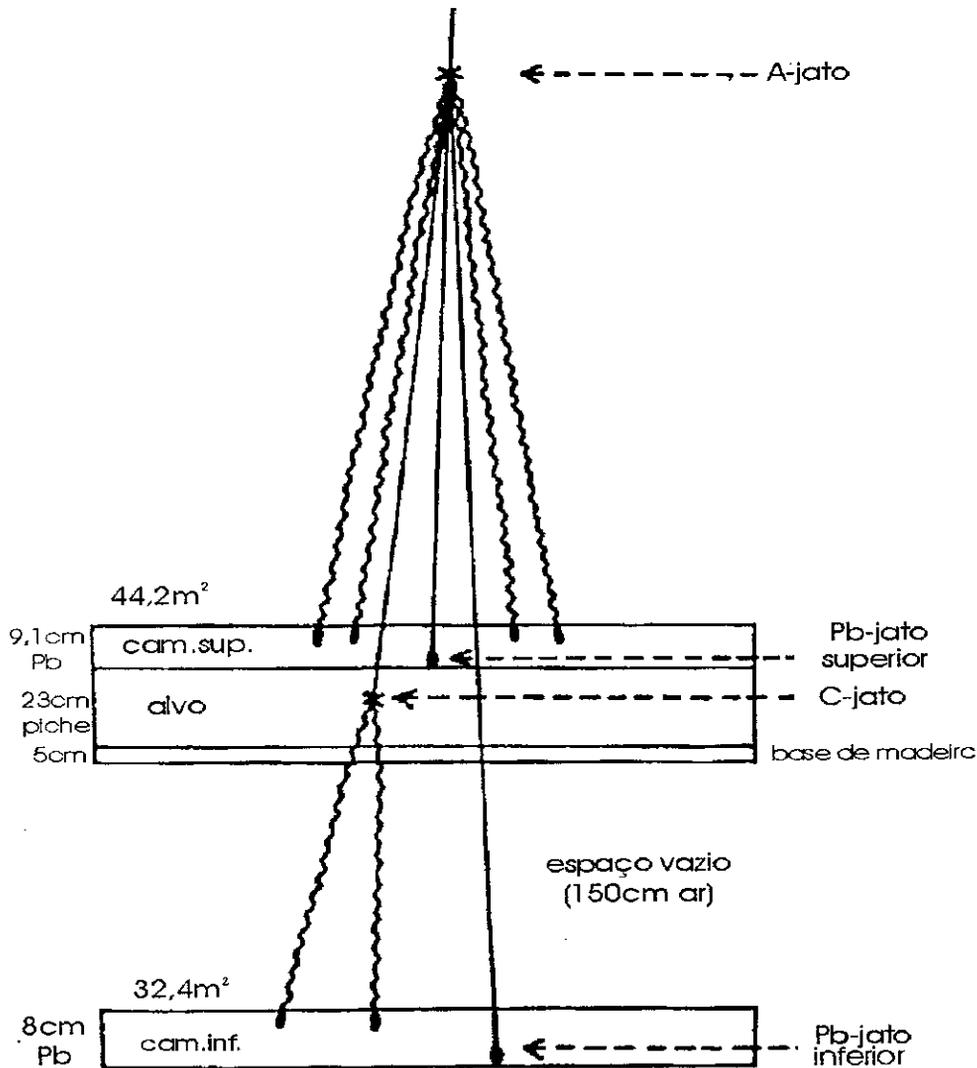


Fig. 1.2 - Câmara de 2 andares com os 3 tipos de interação

1.4. Produção Múltipla de Pions na Região de $\sum E_\gamma = 10^{12} - 10^{14} \text{ eV}$

1.4.1. Características Gerais dos C -jatos

A CBJ encontrou as características gerais da produção de pions na região de $\sum E_\gamma = 10^{12} - 10^{14} \text{ eV}$ através do estudo dos C -jatos. Foi feito um estudo sistemático em 80 C -jatos de Chacaltaya satisfazendo o critério de seleção de $\sum E_\gamma \geq 20 \text{ TeV}$, e em 9 C -jatos da experiência de Sato, Sujimoto e Saito [15], usando balões. Foram feitas distribuições de energia usando a energia fracionária $f_\gamma = E_\gamma / \sum E_\gamma$, distribuições angulares na escala de $\log \text{tg } \theta_\gamma$, e distribuições de momento transversal p_T^γ . Foi encontrado um bom acordo, nas três distribuições, entre os γ 's dos C -jatos de Chacaltaya e os γ 's da experiência de balão [16]. Os C -jatos de Chacaltaya têm $\sum E_\gamma = 20 - 100 \text{ TeV}$, (com energia média de interação $\langle \sum E_\gamma \rangle \sim 40.4 \text{ TeV}$), enquanto os eventos de balão tem $\sum E_\gamma = 0.6 - 5 \text{ TeV}$ (com energia média de interação $\langle \sum E_\gamma \rangle = 2.2 \text{ TeV}$). Da energia medida $\sum E_\gamma$ obtém-se a energia do hadron incidente, E_0 , pela relação $E_0 = \sum E_\gamma / K_\gamma$ onde K_γ é a inelasticidade em γ . Tomando-se para K_γ o valor 0.3 computado por Tabuki [17], a energia média dos hadrons incidentes produtores dos C -jatos é $\langle E_0 \rangle \sim 135 \text{ TeV}$ para Chacaltaya e $\sim 7 \text{ TeV}$ para a experiência de balão.

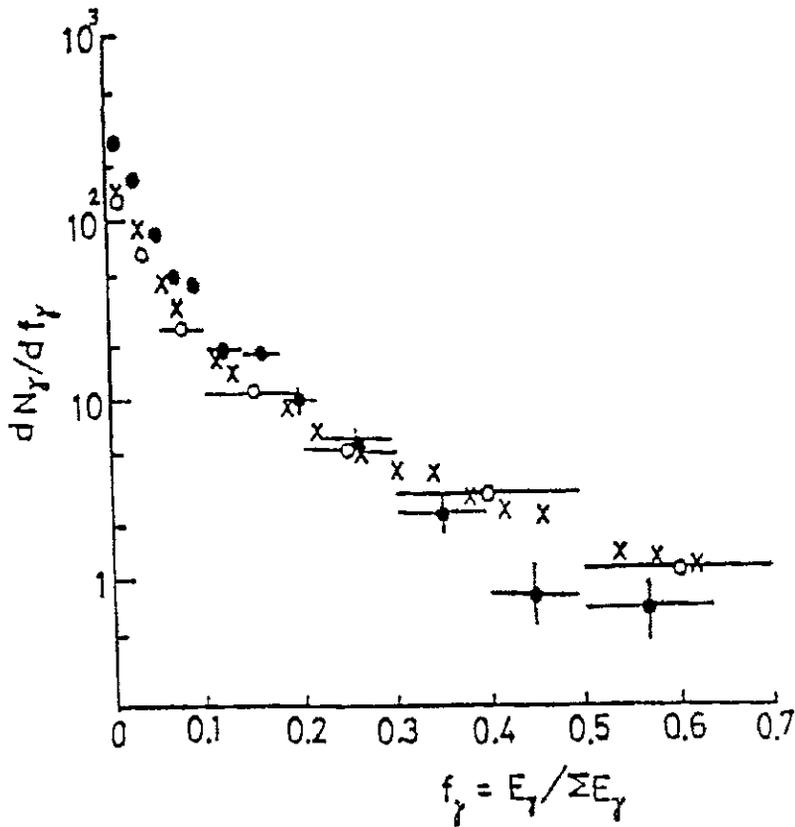
Os resultados obtidos mostram que, no intervalo de energia de $E_0 = 10^{13} - 10^{14} \text{ eV}$, pode-se concluir que o mecanismo da produção múltipla de pions permanece inalterado, e a diferença nos fenômenos surge somente de um fator cinemático que pode ser removido por uma transformação de Lorentz. Esta é conhecida, desde 1967, como "lei da similaridade" [18, 19].

1.4.2. Testes de “Scaling”. Comparação com Dados do FNAL e do ISR

Foi verificado que na produção múltipla de hadrons em aceleradores, na região de energia (no sistema do laboratório) até $E_0 \simeq 2 \text{ TeV}$ (correspondente à energia do ISR, $\sqrt{s} = 63 \text{ GeV}$), era válida a propriedade de similaridade (“scaling”) [20]. Para ver se a similaridade verificada entre os C -jatos de Chacaltaya e de balão significava a validade dessa regra de “scaling” até a região de energia dos C -jatos dos raios cósmicos, foram feitos cálculos de simulação por Tabuki [17] e Arata [21], baseados na extrapolação dos dados de aceleradores supondo válido o “scaling”. Tabuki tomou eventos reais de colisões pp de 205 GeV observados em câmaras de bolha no FNAL, e construiu eventos de raios cósmicos simulados sob a hipótese do “scaling”, para comparar com os dados dos 80 C -jatos observados na câmara de Chacaltaya ($\langle E_0 \rangle \sim 135 \text{ TeV}$). Arata fez um outro teste de “scaling” baseado em eventos de colisões pp de $\sqrt{s} = 53 \text{ GeV}$ (correspondente a $E_0 \sim 1.5 \text{ TeV}$) no ISR do CERN. Os resultados da comparação entre os eventos de raios cósmicos da experiência de Chacaltaya e os eventos simulados do ISR e do FNAL são apresentados nas Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 nas formas de distribuição de energia fracionária $f_\gamma = E_\gamma / \sum E_\gamma$, ângulos de emissão na escala $\log \text{tg } \theta_\gamma$ e momento transversal p_T^γ , respectivamente [22].

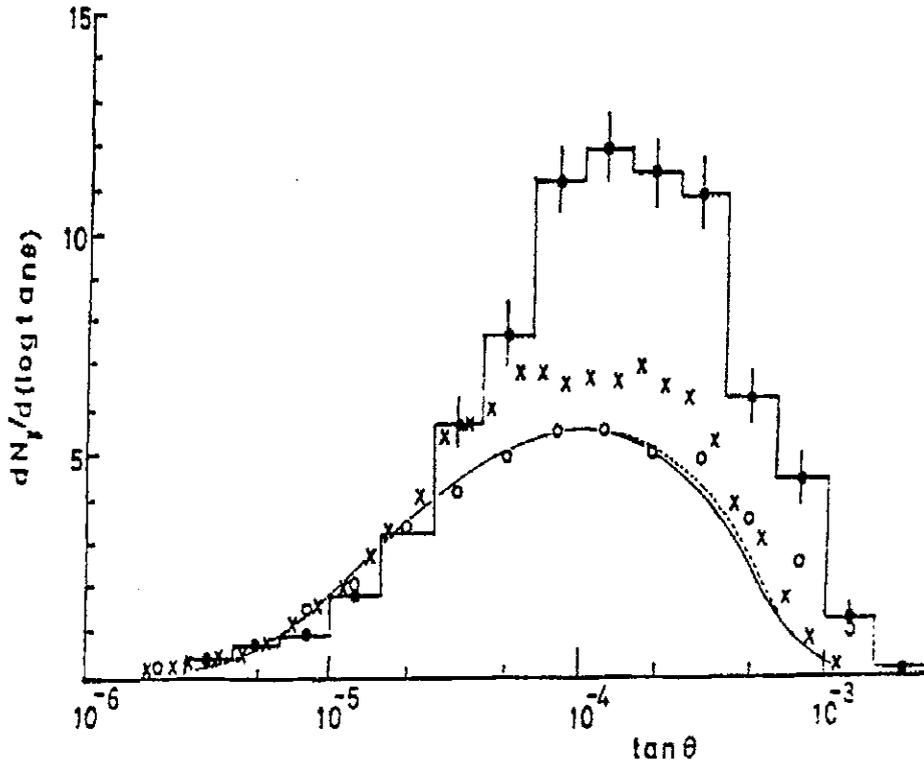
Das 3 figuras vê-se que a simulação ISR dá resultados quase idênticos aos da simulação FNAL e ambos são significativamente diferentes dos resultados da experiência de C -jatos dos raios cósmicos. Na Figura 1.3 vê-se uma diferença na inclinação do espectro de f_γ , mostrando que a energia disponível é dividida em um número maior de partículas nos C -jatos dos raios cósmicos do que seria esperado da extrapolação dos dados de aceleradores supondo válido o “scaling”. A Figura 1.4 mostra que o número médio de γ 's no plateau, por unidade de rapidez, aumenta por um fator igual a 2.5 nos C -jatos dos raios cósmicos em relação aos eventos de aceleradores. Na Figura 1.5

vê-se que a distribuição de p_T dos raios cósmicos tem maior prolongamento na região de alto p_T , mostrando um aumento de $\langle p_T \rangle$. Das 3 figuras pode-se, pois, concluir que os resultados dos C -jatos dos raios cósmicos de $\langle E_0 \rangle \sim 130 \text{ TeV}$, não estão na extrapolação dos resultados de acelerador em baixa energia, (até $E_0 \simeq 2 \text{ TeV}$), sob a hipótese de “scaling”. Os eventos dos raios cósmicos têm, em média, maior multiplicidade e maior p_T que os esperados pela hipótese do “scaling”.



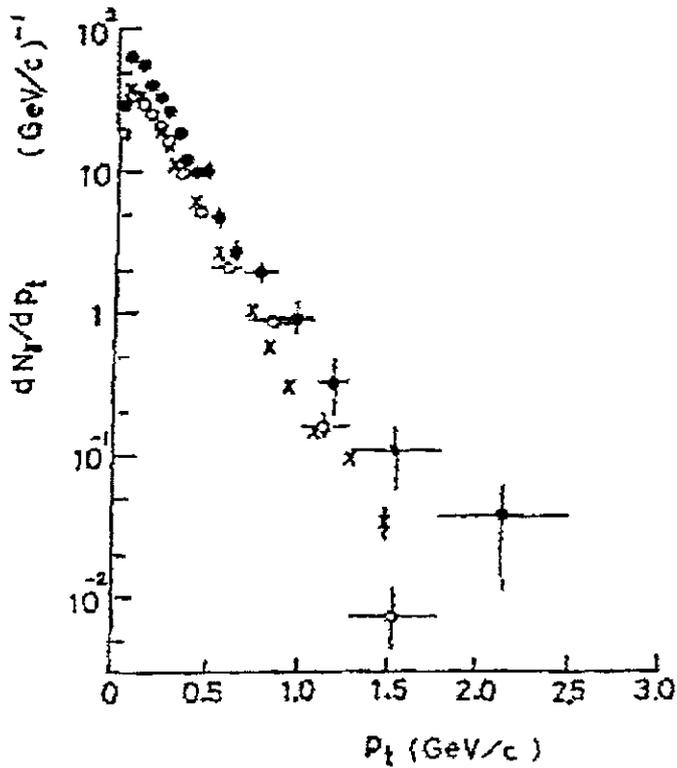
- 80 C -jatos de Chacaltaya com $\sum E_\gamma > 20 \text{ TeV}$
- eventos da câmara de bolha (FNAL)
- × eventos de ISR (CERN)

Fig. 1.3 - Distribuição de energia fracionária dos raios- γ



- 80 C-jatos de Chacaltaya com $\sum E_\gamma > 20 \text{ TeV}$
- eventos da câmara de bolha (FNAL)
- × eventos de ISR (CERN)

Fig. 1.4 - Distribuição angular dos raios- γ na escala $\log \tan \theta$



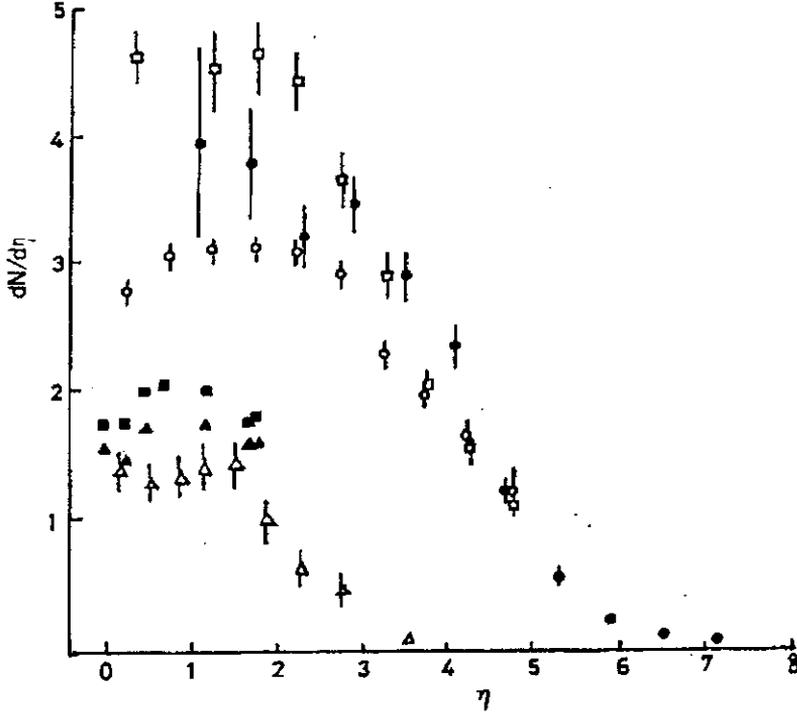
- 80 *C*-jatos de Chacaltaya com $\sum E_\gamma > 20 \text{ TeV}$
- eventos da câmara de bolha (FNAL)
- × eventos de ISR (CERN)

Fig. 1.5 - Distribuição de p_T dos raios- γ

1.4.3. Comparação com resultados do $Spp\bar{S}$

Após ter entrado em operação o $Spp\bar{S}$ do CERN, em 1981, foi possível estudar a produção múltipla de partículas em $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$, que corresponde à energia $E_0 = 146 \text{ TeV}$ no sistema de laboratório. Os resultados obtidos podem ser comparados diretamente com os dados dos 80 *C*-jatos de Chacaltaya, cuja energia de interação

média vimos ser $\langle \sum E_\gamma \rangle \sim 40 \text{ TeV}$, que corresponde à energia de hadrons primários $\langle E_0 \rangle \sim 135 \text{ TeV}$.



- raios- γ de 80 C-jatos de Chacaltaya ($\sqrt{s} \sim 520 \text{ GeV}$, $E_0 = 135 \text{ TeV}$)
- raios- γ de $Spp\bar{S}$ ($\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$, $E_0 = 146 \text{ TeV}$)
- hadrons carregados de $Spp\bar{S}$ ($\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$, $E_0 = 146 \text{ TeV}$)
- raios- γ de ISR ($\sqrt{s} = 53 \text{ GeV}$, $E_0 = 1,4 \text{ TeV}$)
- ▲ raios- γ de ISR ($\sqrt{s} = 45 \text{ GeV}$, $E_0 = 1 \text{ TeV}$)
- △ raios- γ de FNAL ($\sqrt{s} = 19,7 \text{ GeV}$, $E_0 = 0.2 \text{ TeV}$)

Fig. 1.6 - Distribuição de pseudo-rapidez, η , no s.c.m.

A Figura 1.6 mostra a distribuição de pseudo-rapidez dos raios- γ dos C-jatos no sistema centro de massa, junto com os resultados de acelerador [21], incluindo os do $Spp\bar{S}$. Na figura aparecem também os resultados de partículas carregadas em $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$. Vê-se que os resultados dos C-jatos estão em bom acordo com os do $Spp\bar{S}$, e que a densidade dos hadrons (número de hadrons por unidade de rapidez) produzidos está

aumentando nitidamente com a energia. Por exemplo, a densidade por rapidez aumenta por um fator 2 quando a energia passa de $E_0 = 1 \sim 2 \text{ TeV}$ a $E_0 = 120 \sim 150 \text{ TeV}$. Pode-se portanto concluir que a simples regra de “scaling” (ou lei de similaridade), com densidade constante, não funciona na região de energia aqui considerada.

1.5. Produção Múltipla de Pions na Região $\sum E_\gamma \geq 100 \text{ TeV}$

1.5.1. Dois Tipos de C -jatos - Mirim e Açu

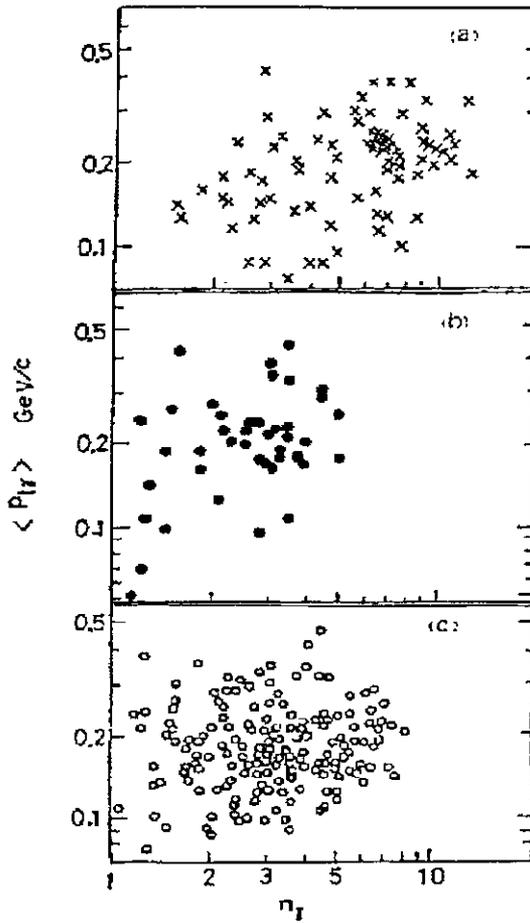
As câmaras expostas em Chacaltaya até 1969 eram de pequeno tamanho, e a observação era restrita a energias mais baixas, da ordem de $\sum E_\gamma = 3 \sim 15 \text{ TeV}$ para C -jatos. Observou-se que havia uma similaridade [18, 19] dos fenômenos de produção múltipla em diferentes intervalos de energia, isto é, que as distribuições de p_T e de energia fracionária $f_\gamma = E_\gamma / \sum E_\gamma$ se mantinham inalteradas. Além disso, ambas as distribuições, de p_T e de f_γ , podiam ser descritas por uma função exponencial. A similaridade acima é exatamente o que se deveria esperar da criação e decaimento de um estado intermediário isotrópico com energia de repouso e $\langle p_T \rangle$ constantes, independentemente da grandeza da energia de interação. Assim, todos os C -jatos observados pareciam ser de um único tipo.

Por outro lado, os físicos de aceleradores encontravam, em suas experiências, uma característica chamada “scaling”, que significava a possibilidade de descrever a produção múltipla de pions por uma única função de distribuição universal, independentemente da energia da colisão. Aí eles usavam as duas variáveis, p_T e $x = E_\pi / E_0$. Esse “scaling” encontrado pelos físicos de acelerador nada mais é que a velha lei de similaridade da distribuição de p_T e $f_\gamma = E_\gamma / \sum E_\gamma$, pois sendo $E_0 = (1/K_\gamma) \sum E_\gamma$ resulta $x = K_\gamma f_\gamma$. Esse acordo fez pensar que o mecanismo de produção múltipla de mesons se mantinha

essencialmente inalterado ao longo de um grande intervalo de energias, desde algumas dezenas de GeV dos aceleradores até a região dos raios cósmicos de $\sum E_\gamma \sim 10 TeV$.

Já em 1967 teve-se indicação de quebra de “scaling”, quando foram encontrados eventos [18, 19] com grande multiplicidade e alto p_T , em interações atmosféricas (A -jatos) na região de energia mais alta, de $\sum E_\gamma \geq 100 TeV$. Como o estudo de A -jatos não é tão claro como o de C -jatos, resolveu-se aumentar o tamanho das câmaras de dois andares de Chacaltaya, e com isto foi possível observar um número de eventos de C -jatos com maior energia, e alguns deles apresentavam grande multiplicidade e alto p_T .

Os jatos (eventos de produção múltipla de pions) passaram a ser classificados em dois tipos: Mirim e Açú. Os eventos do tipo Mirim são aqueles com valores comuns de p_T e multiplicidade, e que estão na extrapolação de eventos de aceleradores em baixa energia, sob a hipótese de “scaling”. Os eventos tipo Açú são os de p_T mais alto e maior multiplicidade que os valores obtidos supondo a regra de “scaling”. Com estes nomes fenomenológicos dos jatos, podemos exprimir a quebra de “scaling”, vista anteriormente, como aparecimento de jatos tipo Açú na região de energia mais alta, $\sum E_\gamma \geq 100 TeV$. Afim de ver quantitativamente essa classificação fenomenológica, representamos na Figura 1.7 o diagrama de $\langle p_T^\gamma \rangle$ e n_γ , que é o número médio de γ 's por intervalo de rapidez [22]. Vê-se que os pontos experimentais se dispersam muito no diagrama, mas pode-se reconhecer um grupo de eventos em torno de $n_\gamma \sim 7$ e $\langle p_T^\gamma \rangle \sim 250 MeV/c$. Para comparação, a Figura 1.7 apresenta também resultados de cálculos de simulação de Tabuki [17] e Arata [21], com aplicação de extrapolação, supondo “scaling”, aos eventos do FNAL e do ISR, respectivamente.



- (a) 80 C -jatos de Chacaltaya com $\sum E_\gamma > 20 \text{ TeV}$
 (b) Eventos de câmara de bolha (FNAL)
 (c) Eventos de ISR (CERN)

Fig. 1.7 - Correlação entre n_γ e $\langle p_T^\gamma \rangle$ de raios- γ

Comparando as figuras, vê-se que o grupo difuso de eventos com $n_\gamma = 2 - 4$ é de fato o esperado da extrapolação supondo “scaling”. Esses eventos são do tipo que chamamos Mirim. O grupo colimado de C -jatos de alta multiplicidade, com $n_\gamma = 6 - 8$, que é visto na Figura 1.7a não é encontrado nos eventos simulados, supondo “scaling”. Esses são C -jatos de um tipo novo que aparece somente na região de energia dos raios cósmicos, e são portanto responsáveis pela quebra do “scaling”. São eventos do tipo chamado Açu.

1.5.2. Outro Tipo de Produção Múltipla de Pions - Guaçu

Um número de experiências de raios cósmicos a energias muito altas, em chuveiros atmosféricos extensos e também em famílias de eletrons e gamas davam a indicação de que a quantidade de energia transportada por uma partícula primária era distribuída entre um número maior de hadrons secundários, cuja multiplicidade aumentava mais rapidamente, com a energia, do que seria esperado da lei logaritmica. Porém, a maioria das experiências de raios cósmicos estavam observando somente o produto final de processos de grandes cascatas nucleares e eletromagnéticas através da atmosfera e não traziam informação direta da colisão nuclear de energia extremamente alta. Por isso, as conclusões eram sempre obscurecidas por algumas ambiguidades. Por exemplo: indagava-se se a composição química dos raios cósmicos primários poderia estar mudando na região de energia extremamente alta e o predomínio de primários pesados poderia ser responsável por tais características dos fenômenos nesta região de energia.

Assim, um dos principais objetivos do estudo de raios cósmicos usando emulsões nucleares passou a ser a observação direta de interações com multiplicidade de pions muito grande. Um exemplo desse tipo foi o evento chamado "Texas Lone Star" de Perkins e Fowler [23], que é um conjunto de mais de 200 raios- γ com $\sum E_{\gamma} \simeq 140 \text{ TeV}$ produzido por uma interação nuclear fora da pilha de emulsão nuclear exposta em balão. Contudo, como os próprios autores admitiram, existe a possibilidade de que a partícula incidente pudesse ser uma partícula alfa e não um proton, daí a grande multiplicidade.

Nas câmaras de emulsão de Chacaltaya foram observados, tempos depois, alguns eventos que apresentam diretamente interações nucleares de multiplicidade excepcionalmente grande. Dois são *A*-jatos limpos, perto da câmara, e o terceiro é um *C*-jato. Uma interação nuclear com multiplicidade muito grande, bem maior do que do tipo *A*çu, é

chamada de “Guaçu”.

O primeiro exemplo foi uma família observada na câmara 17 superior, e cujo estudo detalhado foi realizado por Semba [24]. A família (17-112S) contém 141 chuveiros com energia total $\sum E_\gamma = 878 \text{ TeV}$, espalhada sobre uma região de 3 cm de raio. Um exame, ao microscópio, dos chuveiros detectados na emulsão nuclear leva à conclusão de que as partículas da família são na maioria raios- γ diretos da interação ou pares de elétrons gerados perto da câmara. Semba fez um cálculo de simulação, e comparando com os dados experimentais, concluiu que a altura de interação era $250 \pm 80 \text{ m}$.

O segundo exemplo, (19-191S), foi uma família semelhante encontrada na câmara 19, e Semba [25] aplicando o mesmo método de análise, estimou a altura de interação como $320 \pm 80 \text{ m}$. O terceiro exemplo, (17-153I), foi um *C*-jato encontrado na câmara 17, com 41 chuveiros e energia $\sum E_\gamma = 42 \text{ TeV}$, espalhados sobre uma área circular de raio aproximadamente 5 mm na emulsão nuclear da câmara inferior. Ele é distinto de todos os *C*-jatos até então encontrados, pelo seu grande espalhamento lateral e grande multiplicidade, e sua análise detalhada foi realizada por Arata [26].

A Figura 1.8 dá a variação de $\sum_\theta p_T$ com o ângulo de emissão θ para os três jatos Guaçu de Chacaltaya. A inclinação, representando a variação do momento transversal, é cerca de 6-8 vezes maior que o caso de jatos Açu.

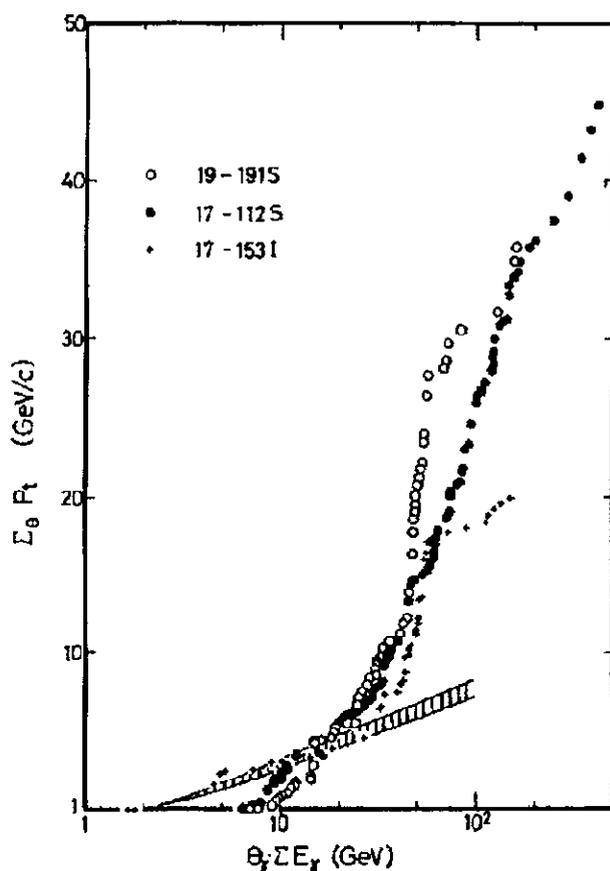


Fig. 1.8 - Variação de $\sum_\theta p_T$ com $\theta_\gamma \sum E_\gamma$ para 3 eventos GUAÇU. A região riscada representa os eventos AÇU

1.6. Estado Intermediário (EI)

A bola de fogo [27] é uma das idéias tradicionais nos estudos de raios cósmicos, e representa o estado intermediário na colisão de hadrons. Supõe-se que na colisão são produzidos um ou mais estados intermediários e estes então decaem isotropicamente em hadrons. A massa invariante do estado intermediário resulta ser constante, para cada

tipo, e independente da energia de interação; popularmente o estado intermediário é chamado bola de fogo.

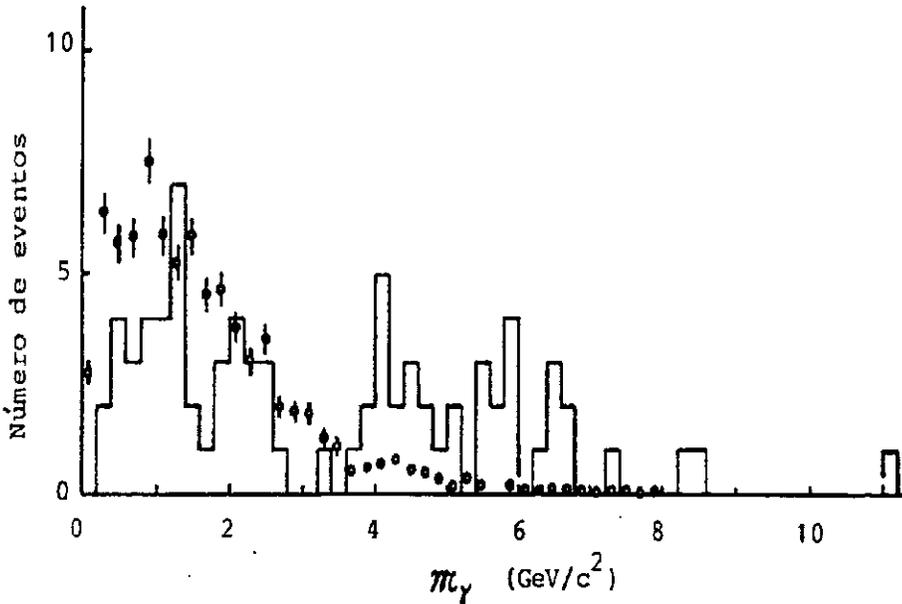
1.6.1. Espectro de Massa das Bolas de Fogo

Para um grupo de raios- γ originados do decaimento isotrópico de uma bola de fogo, podemos estimar a energia de repouso ou por sua massa invariante $\mathcal{M}_\gamma c^2 = (\sum E_i \sum E_i \theta_i^2)^{\frac{1}{2}}$ ou pela soma dos momentos transversais dos γ 's: $\sum p_T = \sum E_i \theta_i$ porque existe a relação entre os dois, válida em média, $\mathcal{M}_\gamma c = (4/\pi) \sum p_T$. Aqui a soma é extendida sobre todos os γ 's originados da bola de fogo.

Na aplicação prática aos eventos de raios cósmicos, surge o problema, que a bola de fogo nem sempre é produzida isolada, mas, em muitos casos, são produzidas várias na direção longitudinal. Por isso, os grupos de raios- γ se superpõem parcialmente uns aos outros. Assim, tem-se que encontrar um método para definir o grupo de raios- γ correspondendo a uma dada bola de fogo, para estimar sua massa invariante. Primeiro, toma-se um grupo de raios- γ com $\theta_i < \theta$ em um C -jato e constroi-se as duas quantidades, a massa invariante $\mathcal{M}_\gamma(\theta)$ e a soma $\sum_\theta p_T$, variando-se θ . A computação pode ser feita com aplicação das fórmulas acima para $\mathcal{M}_\gamma c^2$ e para $\sum p_T$, onde a soma é limitada a $\theta_i < \theta$. No início, para pequenos valores de θ , a expressão $\mathcal{M}_\gamma(\theta)c$ é menor que $(4/\pi) \sum_\theta p_T$. Adicionando raios- γ com maiores ângulos de emissão, à medida que θ aumenta, chega-se ao ponto de cruzamento, onde a relação, $\mathcal{M}_\gamma c = (4/\pi) \sum p_T$ é satisfeita. O grupo de raios- γ assim definido por esta relação é consistente em sua forma com um grupo originado de uma bola de fogo isotrópica, e supõe-se que o valor $\mathcal{M}_\gamma(\theta)$ nesse ponto dê a massa invariante da bola de fogo. Continuando-se a aumentar θ além do ponto de cruzamento, o valor $\mathcal{M}_\gamma(\theta)c$ torna-se maior que $(4/\pi) \sum_\theta p_T$.

A Figura 1.9 apresenta o histograma de massas invariantes das bolas de fogo, M_γ , obtido dos 80 C -jatos da experiência de Chacaltaya, com $\sum E_\gamma \geq 20 \text{ TeV}$ aplicando o método descrito acima. O histograma mostra a existência de dois picos: o primeiro com $\langle M_\gamma \rangle = 1.38 \pm 0.11 \text{ GeV}/c^2$ vem dos jatos Mirim, e o segundo com $\langle M_\gamma \rangle = 5.40 \pm 0.25 \text{ GeV}/c^2$ vem dos jatos Açu.

Na Figura 1.9 é apresentada também a distribuição dos eventos do ISR (CERN), que vemos ser consistente com os C -jatos do tipo Mirim.



▬ C -jatos de Chacaltaya

○ dados de ISR (CERN)

Fig. 1.9 - Distribuição de massas invariantes das bolas de fogo liberadas em raios- γ

A massa invariante M_γ estimada acima é a parte da massa da bola de fogo que vai em pions neutros e então em raios- γ . A massa invariante total, M , é obtida multiplicando-se o valor acima de M_γ por um fator, para incluir a parte restante. Supondo-se que os pions são a maioria das partículas produzidas no decaimento da bola de fogo, e

admitindo-se a independência de carga, espera-se que o valor a se multiplicar seja 3, mas o método de detecção dos C -jatos favorece os eventos ricos em raios- γ , e por isso, para estimativa do fator correto, é necessário um cálculo de simulação. O resultado mostra que o fator é mais perto de 2 do que de 3 para o caso de pequena multiplicidade.

Resumindo, a Tabela 1.1 apresenta a classificação dos jatos e suas características.

Tabela 1.1: *Classificação dos Jatos e suas Características*

Tipo de jato	Massa (GeV/c^2)		$\langle p_T^\gamma \rangle$ (MeV/c)	Multiplicidade N_γ
	em γ	Total		
Mirim	1.38	2 ~ 3	140	8
Açu	5.40	20 ~ 30	250	30
Guaçu	30 ~ 80	100 ~ 300	400 ~ 500	

CAPÍTULO 2

INTERAÇÕES EXÓTICAS OBSERVADAS NA RADIAÇÃO CÓSMICA

2.1 Características, Classificação

Os eventos que são descritos neste capítulo estão sujeitos a dois problemas no que se refere à sua interpretação: o primeiro é a flutuação estatística e o segundo é o vício experimental (bias). Por esse motivo apresentamos dados brutos e uma interpretação semi-fenomenológica, que poderá ser revista diante de resultados novos e de uma análise estatística que procure identificar, de um lado, as flutuações, e de outro, os vícios experimentais.

Nas experiências com câmaras de emulsão em Chacaltaya foram observadas famílias de raios cósmicos cujas características dificilmente podem ser explicadas por simples extrapolação dos processos conhecidos de produção múltipla de pions na região de energia mais baixa, como nas experiências de aceleradores. Essas famílias são caracterizadas por produção múltipla de hadrons sem emissão de pions neutros, e são chamadas “famílias exóticas” [16, 28, 29].

Após a primeira interação exótica, observada em 1972, o chamado “Centauro I” [30], várias outras famílias têm sido encontradas, que foram classificadas, de acordo com sua multiplicidade e momento transversal, nas seguintes categorias fenomenológicas: centauro (tipo original), mini-centauro, chiron e geminion, e que são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - *Características dos Eventos Tipo Centauro*

<i>Nome</i>	$M(GeV/c^2)$	$\langle p_T \rangle (GeV/c)$	N_h
Centauro	200 – 300	1 ~ 2	100
Mini-Centauro	20 – 30	1 ~ 2	15 – 20
Chiron	$\simeq 200$	7 – 10	$\simeq 20$
Geminion	15 – 30	7 – 10	2

A seguir é dada uma descrição das diversas categorias.

2.2. Interações de Centauro do Tipo Original

O primeiro exemplo claro de interação exótica foi o chamado Centauro I, encontrado na câmara 15 em 1972 [30]. A energia observada desse evento é de $\sum E_\gamma = 230 TeV$; a interação emite cerca de 50 hadrons, praticamente sem a presença de raios $\gamma(\pi^0)$. Por medida de triangulação das direções dos chuveiros foi possível estimar a altura da interação que deu $H = 50 \pm 15 m$ acima da câmara.

A Figura 2.1 dá a ilustração do evento. A altura estimada acima permite calcular o p_T dos hadrons secundários produzidos resultando para a parte visível, o valor $\langle p_T^\gamma \rangle = 0.35 \pm 0.5 GeV/c$; levando em conta o valor da inelasticidade em γ , $\langle K_\gamma \rangle = 0.2$, na interação desses hadrons secundários, resulta para o p_T médio do hadron produzido o valor $\langle p_T \rangle = 1 \sim 2 GeV/c$, que é muito maior que o p_T na produção ordinária de pions.

Após a observação do Centauro I, uma procura sistemática foi feita nas câmaras expostas em Chacaltaya pela Colaboração Brasil-Japão, e encontrou-se mais 6 exemplos de eventos com características semelhantes às do Centauro I, produzidos em alturas

não muito perto da câmara, e por isso esses eventos são modificados pelos efeitos atmosféricos secundários; eles são acompanhados por γ 's de mais baixa energia produzidos por interações das partículas secundárias durante sua passagem através da atmosfera.

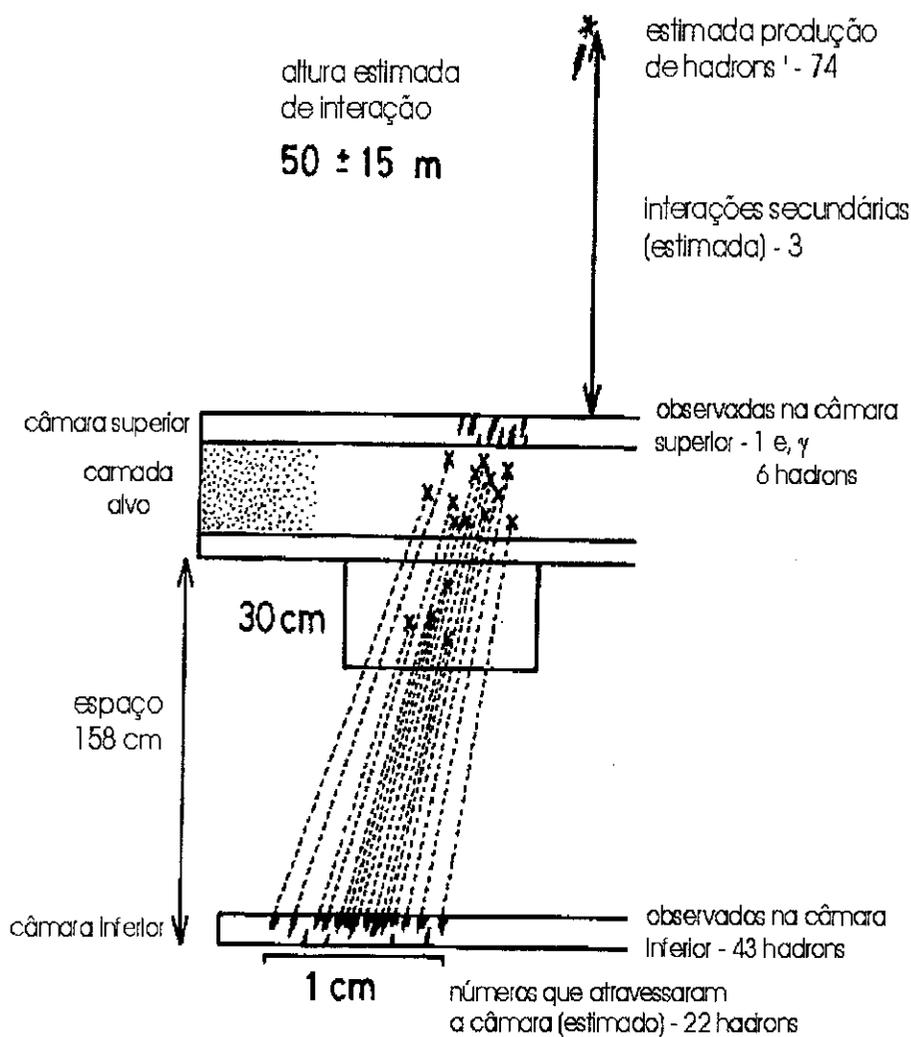
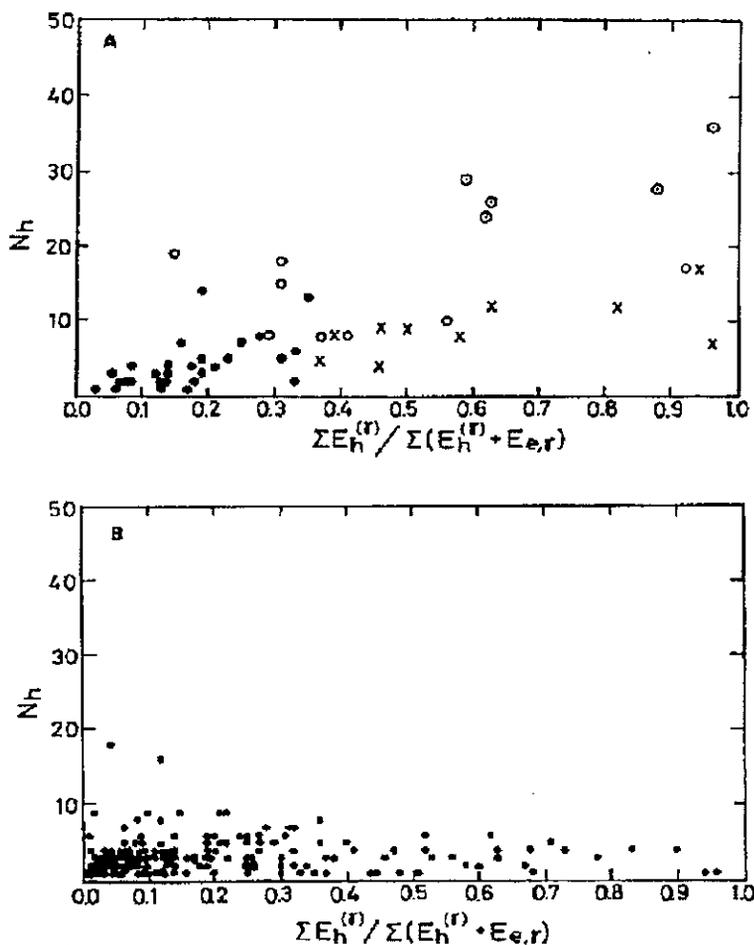


Fig. 2.1 - Ilustração do evento Centauro I

Cálculos de simulação foram feitos para ver se os eventos tipo Centauro poderiam surgir de flutuações acumuladas de interações do tipo normal dos hadrons produzidos durante sua propagação desde o topo da atmosfera até a altitude de Chacaltaya.



(a) Resultados experimentais: famílias ordinárias de Chacaltaya; Centauros de Chacaltaya; Mini-Centauros de Chacaltaya; Centauros de Pamir

- famílias ordinárias de Chacaltaya
- ⊙ Centauros de Chacaltaya
- × Mini-Centauros de Chacaltaya
- Centauros de Pamir

(b) Resultados de simulação de Tabuki

Fig. 2.2 - Diagrama do número de hadrons N_h e fração da energia ocupada pelos hadrons.

A Figura 2.2a mostra o diagrama de N_h , número de hadrons na família, contra $Q_h = \sum E_h / \sum E_{fam.}$, isto é, a fração da energia total da família, ocupada por esses hadrons. Nesta figura são apresentados os dados dos eventos tipo Centauro, como também dos mini-centauros, que serão descritos na próxima sessão. A Figura 2.2b é o mesmo diagrama para famílias simuladas por Tabuki, que seriam esperadas na câmara de Chacaltaya sob a hipótese de produção múltipla normal de pions.

Vê-se, por comparação das duas figuras, que os eventos tipo Centauro estão numa região fora da ocupada pelos eventos simulados; concluímos que os candidatos a Centauro não podem ser explicados simplesmente como flutuação de interações ordinárias.

A Colaboração Brasil-Japão propôs a hipótese de que na interação nuclear é produzido um tipo especial de estado intermediário com grande massa invariante, cerca de $200 \text{ GeV}/c^2$, e esta em seguida decai em $N_h = 80$ barions (e/ou antibarions).

Será preciso, nas experiências de raios cósmicos aumentar a estatística de eventos de alta qualidade, e depois esclarecer a natureza das partículas secundárias.

2.3. Interações Tipo Mini-Centauro

Um outro tipo de interação exótica foi encontrado, caracterizado pela mesma predominância de hadrons entre seus secundários, como nos eventos tipo Centauro original, diferindo desses pela menor multiplicidade de hadrons $N_h = 10 - 20$. Esses eventos foram chamados “mini-centauro” [28]. Na Figura 2.2a são vistos alguns exemplos desse novo tipo de interação. De 2 casos onde foi possível determinar a altura da interação, pode-se calcular o momento transversal médio, visível em γ , dos hadrons secundários, resultando $\langle p_T^\gamma \rangle = 0.35 \text{ GeV}/c$, e portanto, para os hadrons produzidos, o valor $\langle p_T \rangle = 1 \sim 2 \text{ GeV}/c$, consistente com o valor encontrado nos eventos tipo Cen-

tauro original. Analogamente ao caso do evento tipo Centauro, foi proposta a hipótese da produção e posterior decaimento de um estado intermediário, tipo mini-centauro; a massa invariante desse estado intermediário é estimada em $\simeq 30 \text{ GeV}/c^2$, com valor aproximado de multiplicidade média $\langle N_h \rangle = 13 \pm 3$.

2.4. Interação Nuclear Tipo Chiron

Na procura sistemática de eventos tipo Centauro foi encontrada, em 1979, na câmara 19, uma família atmosférica “limpa” de tipo exótico, com grande espalhamento, que recebeu o nome de Chiron I [28]. A energia total visível dessa família é de cerca 400 TeV . Pelo método de triangulação, foi determinada a altura da interação $H = 330 \pm 50 \text{ m}$, da qual resultou o momento transversal médio, em γ 's, $\langle p_T^\gamma \rangle = 1.5 \text{ GeV}/c$. Mais tarde foram encontrados dois eventos com distribuições semelhantes de grandes p_T , e nos quais foi possível também determinar as alturas das interações. Da distribuição dos valores de p_T^γ para os 3 eventos resultou $\langle p_T^\gamma \rangle = 1.5 - 2.0 \text{ GeV}/c$, valor extremamente alto quando comparado ao valor normal para hadrons $\langle p_T^\gamma \rangle \simeq 0.2 \text{ GeV}/c$. Os chuveiros de alta energia dessas famílias eram ou de estrutura simples ou consistiam de agrupamentos (clusters) de dimensões laterais da ordem de 1 mm, semelhantes ao espalhamento de cascatas eletromagnéticas atmosféricas; a diferença desses “clusters” para as cascatas eletromagnéticas atmosféricas é que eles contêm hadrons e são fortemente penetrantes - são os chamados “mini-clusters”. Dos resultados das observações, pode-se dizer que são as seguintes as características da interação tipo Chiron:

- 1) As partículas secundárias são produzidas com grandes valores de p_T , da ordem de $\simeq 1.5 - 2.0 \text{ GeV}/c$ liberado em γ . Supondo que a inelasticidade em γ , K_γ , tem o mesmo valor que nas colisões normais, isto é, $K_\gamma \simeq 0.2$, resulta para p_T os valores $7 - 10 \text{ GeV}/c$.

- 2) Os chuviros de alta energia constituintes da família, tanto os simples como os “clusters” de pequeno espalhamento, dificilmente podem ser interpretados como produzidos por γ 's originados de decaimento de π^0 como nas interações de tipo ordinário, isso pelo grande valor de p_T e também pelo forte poder de penetração.
- 3) De 1) e 2) conclui-se que os “clusters” de chuviros de alta energia não podem ser cascatas eletromagnéticas atmosféricas puras, mas representam um novo tipo de fenômeno de pequeno p_T (da ordem de $10 - 20 \text{ MeV}/c$) de origem hadrônica; deu-se a eles o nome de “mini-clusters”.
- 4) Verificou-se que o livre caminho médio de atenuação das partículas secundárias tanto nos materiais da câmara como na atmosfera é menor que o valor geométrico ($\lambda_{at} \simeq 0.5 \lambda_{geo}$), que seria o valor esperado para hadrons normais.

2.5. Interação Tipo Geminion

2.5.1. Famílias do Tipo Binocular

Em câmaras de emulsão expostas em montanha foram encontradas algumas famílias constituídas de apenas dois “clusters” de chuviros de alta energia (algumas dezenas de TeV), com distância muito grande entre eles (as vezes mais de 20 cm) [16], pelo seu aspecto, essas famílias são chamadas de tipo binocular.

Para um estudo quantitativo de tais famílias binoculares passa-se a descreve-las pelas seguintes quantidades. Seja E_ν a soma das energias observadas dos chuviros no grupo ν (ν toma os valores 1 e 2), e $\langle r \rangle_\nu$ o espalhamento lateral médio do grupo ν , definido por $\langle r \rangle_\nu = \sum E_i r_i / \sum E_i$, onde E_i é a energia observada do i^{mo} chuviro no grupo ν , e r_i é a sua distância ao centro pesado de energia do grupo ν . A soma é feita sobre todos os chuviros do grupo ν . Sendo R_{12} a distância entre os centros

dos dois grupos da família, define-se a quantidade $\chi_{12} = (E_1 E_2)^{\frac{1}{2}} R_{12}$ que descreve o espalhamento entre os dois grupos eliminando o fator cinemático dependente da energia.

É feita uma análise de famílias binoculares selecionadas sob os seguintes critérios:

- 1) $\frac{R_{12}}{\langle r \rangle_{maior}} \geq 5$, onde $\langle r \rangle_{maior}$ é o maior entre $\langle r \rangle_1$ e $\langle r \rangle_2$
- 2) $\chi_{12} \geq 100 \text{ TeV cm}$.

Estas condições significam que os eventos considerados têm energias elevadas e dois grupos bem separados.

Observa-se que os dois grupos de chuviros têm estruturas semelhantes a famílias normais de raios- γ da mesma região de energia, e com alturas de produção não muito grandes, permitindo na maioria dos casos fazer a reconstrução de cada grupo à sua interação atmosférica original.

Supõe-se que na colisão é formado um estado intermediário, o “geminion”, com massa M_{gem} , que decai com vida média muito curta, em dois “barions”. Quando um “geminion” é produzido em grande altitude na atmosfera, e os dois barions em que ele decai atravessam uma longa distância antes de produzirem interações secundárias, espera-se observar eventos atmosféricos de tal tipo binocular, como é ilustrado na Figura 2.3.

Sob a hipótese de geminion, tem-se a seguinte relação cinemática para a altura de produção H de um geminion e a distância R_{12} entre os dois grupos:

$$H M_{gem} c^2 = R_{12} (E_{N_1} E_{N_2})^{\frac{1}{2}}$$

onde E_{N_1} e E_{N_2} são as energias dos dois barions. Introduzindo-se a inelasticidade em γ , K_γ , tem-se $\chi_{12} = H K_\gamma M_{gem} c^2$. Da distribuição observada de χ_{12} , e levando em conta o critério de seleção $\chi_{12} \geq 100 \text{ TeV cm}$, pode-se estimar a massa de um geminion, a partir do valor médio $\langle \chi_{12} \rangle$, que resulta $K_\gamma M_{gem} c^2 = 4.8 \pm 1.2 \text{ GeV}$. Fazendo $K_\gamma = 0.2 - 0.3$, tem-se para a massa do geminion o valor $M_{gem} = 16 - 24 \text{ GeV}/c^2$.

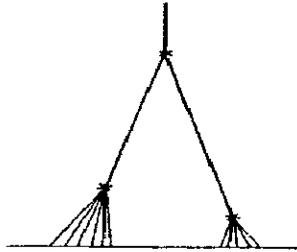


Fig. 2.3 - *Possível interpretação de famílias binoculares (Geminion)*

Tabuki fez uma simulação para famílias com a hipótese de geminion e derivou a distribuição de χ_{12} aplicando para as famílias simuladas os mesmos critérios que os usados para selecionar as do tipo binocular. Supondo que o momento transversal no ponto da produção do geminion segue uma lei exponencial com $\langle p_T \rangle = 10 \text{ GeV}/c$, obteve distribuição de χ_{12} concordante com a das famílias binoculares, resultando o mesmo valor de $\langle M_{gem} \rangle$.

2.5.2. O Evento “Castor-Pollux”

Na parte inferior da câmara 17 foi encontrado um evento formado por dois grupos de chuveiros, com energias visíveis $11 \pm 1.0 \text{ TeV}$ e $8.0 \pm 1.0 \text{ TeV}$ separados por uma distância de cerca 1.6 mm. Neste evento, que foi apelidado de “Castor-Pollux” [16], foi possível fazer medida de triangulação para determinar a altura da interação, que resultou $H = 3.0 \pm 0.2 \text{ m}$ acima da câmara. O momento transversal de cada chuveiro em relação à direção do centro pesado de energia é $2.5 \pm 0.4 \text{ GeV}/c$. Supondo que a inelasticidade em γ , K_γ , de ambas as interações seja igual a 0.2–0.3, chega-se a conclusão que os dois “barions” são emitidos com momentos transversais de 7 – 13 GeV/c . Supondo-se que

os dois “barions” são o resultado do decaimento de um geminion, tem-se $K_\gamma M_{gem} = 5.0 \pm 0.8 \text{ GeV}/c^2$ para a massa de repouso neste caso do Castor-Pollux.

A hipótese de geminion agora torna-se plausível depois de ver-se uma semelhança morfológica dos eventos binoculares atmosféricos com o evento “Castor-Pollux”, ambos tendo quase o mesmo valor estimado da massa, $K_\gamma M_{gem} = 5 \text{ GeV}/c^2$; com o valor $K_\gamma = 0.2 - 0.3$, resulta para massa do geminion o valor $15 - 30 \text{ GeV}/c^2$.

2.6. *C*-jatos e *Pb*-jatos Exóticos

Alguns exemplos de *C*-jatos e *Pb*-jatos inferiores foram encontrados que dificilmente podem ser interpretados como simples flutuação de produção múltipla ordinária de pions. Isto deu a motivação para se fazer uma procura sistemática desses *C*-jatos e *Pb*-jatos.

2.6.1. *C*-jatos Exóticos

Inicialmente, um estudo sistemático foi estendido aos *C*-jatos das câmaras 19 e 21 de Chacaltaya, procurando-se interações exóticas de características semelhantes às interações atmosféricas até então observadas. O estudo tem dois aspectos importantes. O primeiro é que nos *C*-jatos sabe-se aproximadamente os limites da posição da interação, o que não ocorre nas interações atmosféricas. Em segundo lugar, o estudo cobre regiões de energia mais baixas, e a informação poderá ser útil para localizar a energia limiar de produção dos eventos tipo Centauro.

De fato, o estudo dos *C*-jatos, como já foi visto anteriormente, está na região de energia que se superpõe à do *Sp \bar{p} S*. O critério adotado para um *C*-jato ser considerado

exótico foi o de que não se encontrasse nenhum par de chuveiros que viessem do decaimento de um pion neutro produzido na camada alvo, dentro dos erros experimentais, ou seja, $90 < m_{ij} < 200 \text{ MeV}/c^2$, onde m_{ij} é a massa invariante do par de chuveiros [28]. Entre 190 C -jatos de energia visível maior que 9 TeV foram encontrados 14 C -jatos, com 3 ou mais chuveiros, para os quais a massa invariante de todos os pares de chuveiros excedia $200 \text{ MeV}/c^2$. Verificou-se que a multiplicidade média e os momentos transversais médios dos secundários desses C -jatos exóticos são consistentes com os observados nas interações atmosféricas tipo mini-centauro, cujas energias visíveis são muito mais elevadas. Supondo que os secundários desses C -jatos sejam barions normais, a energia média incidente é estimada em $100 - 200 \text{ TeV}$. Isto dá uma estimativa da energia limiar de produção dos eventos tipo mini-centauro, que poderíamos estabelecer a partir das observações de raios cósmicos.

2.6.2. Pb -jatos Inferiores Exóticos

Foram encontrados alguns casos de 2, de 3 e até de 4 chuveiros muito próximos na câmara inferior, cujas distâncias aumentavam apreciavelmente com a profundidade; isso indica que sua origem está nos materiais da câmara muito próximo ao nível de observação e que é grande o valor de p_T . A estimativa do ângulo entre os chuveiros pode ser feita, obtendo-se assim o momento transversal e a massa invariante. Os eventos encontrados com tais características são considerados Pb -jatos inferiores exóticos, no sentido de que o momento transversal e/ou a massa invariante estão acima do que se poderia esperar da produção múltipla ordinária de pions.

Anexados, no final desta tese, estão as reproduções dos seguintes trabalhos, relacionados com este capítulo:

- "A Binocular-type Atmospheric Interaction Generating Sequential Exotic Features" - N.M. Amato, N. Arata, R.H.C. Maldonado, *Proc. 19th ICRC (La Jolla)*, 6, (1985) 324.
- "Cosmic-Ray Induced Interactions with Lead at around 10 TeV" - N.M. Amato, N. Arata, *Proc. 5th Intern. Symp. V.H.E.C.R. Inter. (Lodz)*, (1988) 49.

CAPÍTULO 3

SUPERFAMÍLIAS

3.1. Resultados Obtidos em $\sum E_\gamma < 1000 \text{ TeV}$

Na região de energia visível $10 - 100 \text{ TeV}$ estudou-se sistematicamente a produção múltipla de pions nos C -jatos, onde os detalhes dos fenômenos podem ser estudados com boa precisão. Viu-se então uma violação do “scaling” de Feynman [22]. Esses resultados foram confirmados por experiências de $Spp\bar{S}$ do CERN [31]. Desde que o “scaling” é bem descrito em termos de produção e decaimento de bolas de fogo pequenas (mirim), a violação do “scaling” requer um novo mecanismo ou a produção de bolas de fogo mais pesadas.

Na região de energia visível $100 - 1000 \text{ TeV}$ estudou-se as interações ocorridas na atmosfera. No estudo das características gerais dos fenômenos de produção de pions, verificou-se que a violação do “scaling” cresce continuamente da região de energia mais baixa ($10 - 100 \text{ TeV}$) até esta nova região ($100 - 1000 \text{ TeV}$) [32, 33], e que a frequência de produção de bolas de fogo mais pesadas (Açu) também cresce [34]. Nesta região viu-se, também, o aparecimento de eventos exóticos chamados “família de Centauro” [16, 28], que são interpretados como fenômenos de produção múltipla de barions e anti-barions ou hadrons novos desconhecidos.

3.2. Descrição de Superfamílias

Baseados nos estudos descritos na sessão anterior espera-se que novos fenômenos possam ocorrer no domínio de energia mais alta, ou seja, de $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$. Eventos com $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$ são denominados superfamílias. A Colaboração Brasil-Japão já divulgou informações experimentais detalhadas sobre seis famílias desse alcance de energia, observadas nas câmaras de emulsão expostas em Chacaltaya. Os grupos experimentais de Fuji [35], Pamir [36] e Kambala [37] também publicaram trabalhos sobre superfamílias obtidas em suas câmaras de emulsão expostas em montanhas. Através da análise das famílias citadas acima, estudou-se os fenômenos de raios cósmicos de energia total acima de 10.000 TeV , o que até então só foi possível com experiências de chuueiros atmosféricos extensos; a vantagem das experiências com câmaras de emulsão expostas em montanhas altas é que nesse caso pode ser obtida informação detalhada em eventos individuais, que não é disponível através das experiências com chuueiros atmosféricos extensos.

O primeiro evento observado desse tipo foi a “Andromeda” [19, 38, 39], detectado na câmara 14, em 1969, e é até agora o de mais alta energia observada, 21.000 TeV , usando câmara de emulsão. Os outros 5, com informação experimental detalhada, são: Ursa Maior [39, 40], Mini-Andromeda I (M.A.I) [39, 41], Mini-Andromeda II (M.A.II) [39], Mini-Andromeda III (M.A.III) [39, 42] e P06 [43]. Uma característica comum a essas seis famílias e a quase todas as superfamílias já detectadas, é a forte concentração de energia na parte central, e que aparece nos filmes de raios-X como uma área escurecida. Essa área escurecida é chamada “halo”, e os eventos correspondentes são os chamados eventos com halo. Em alguns casos, vê-se que o halo é feito da superposição de escurecimentos periféricos de manchas de chuueiros difusos, os quais são populados densamente na região central da família. Em outros casos, especialmente naquelas famílias extrema-

mente energéticas, o halo torna-se completamente preto e não se pode ver a existência de manchas individuais de chuviros, no fundo opaco. Porém, com filmes de raios-X menos sensíveis, ou com as emulsões nucleares, pode-se observar, ao microscópio, as manchas dos chuviros individuais na região do halo.

3.3. Resultados Experimentais no Halo

3.3.1. Densidade de Eletrons e Número Total de Eletrons

Através da medida geral de opacidade do halo nos filmes de raios-X, pode-se definir o tamanho lateral do halo e estimar sua energia total. Usando o fotomicrodensitômetro com fenda de dimensões $200\mu \times 200\mu$, mede-se a opacidade $D(r, t)$ na distância lateral r e na profundidade t da câmara. Na prática, toma-se o ponto de máximo escurecimento como o centro do halo, e para ter $D(r, t)$ faz-se a média dos valores das opacidades, na distância r , em várias direções azimutais. A densidade de eletrons $\rho(r, t)$ é obtida de $D(r, t)$ com ajuda da curva característica dos filmes de raios-X. A Figura 3.1 mostra, por exemplo, as distribuições laterais de $\rho(r, t)$, em diferentes profundidades t da câmara superior, para o caso do evento P06 por nós estudado [43]. Integrando $\rho(r, t)$ com respeito a r , tem-se o número total de eletrons no halo, na profundidade t ,

$$N_e(t) = \int_0^{\infty} \rho(r, t) 2\pi r dr.$$

Como não se tem os valores de $\rho(r, t)$ a grandes distâncias r , faz-se uma extração, supondo um decréscimo exponencial, $\rho(r, t) = \rho_0 \exp(-\frac{r}{r_a})$ a grandes r . Os valores dos parâmetros, ρ_0 e r_a , são obtidos dos dados observáveis na região $r < 3 \text{ cm}$,

onde a função exponencial pode reproduzir bem os dados experimentais.

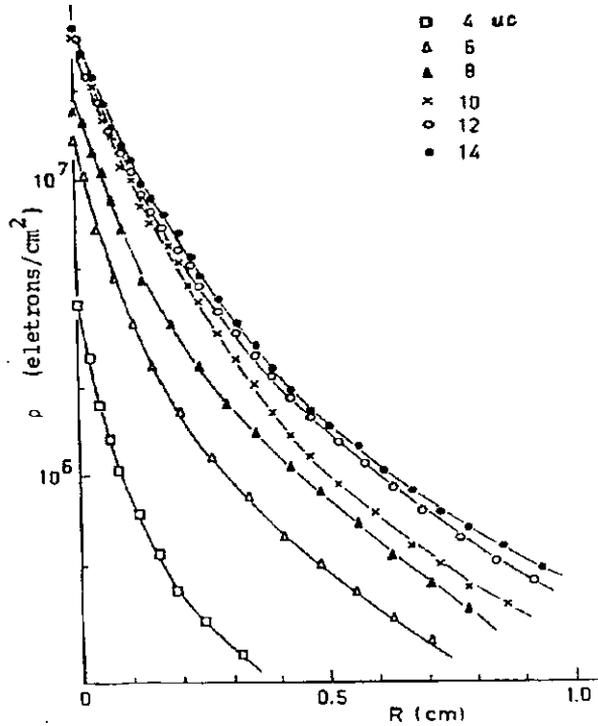


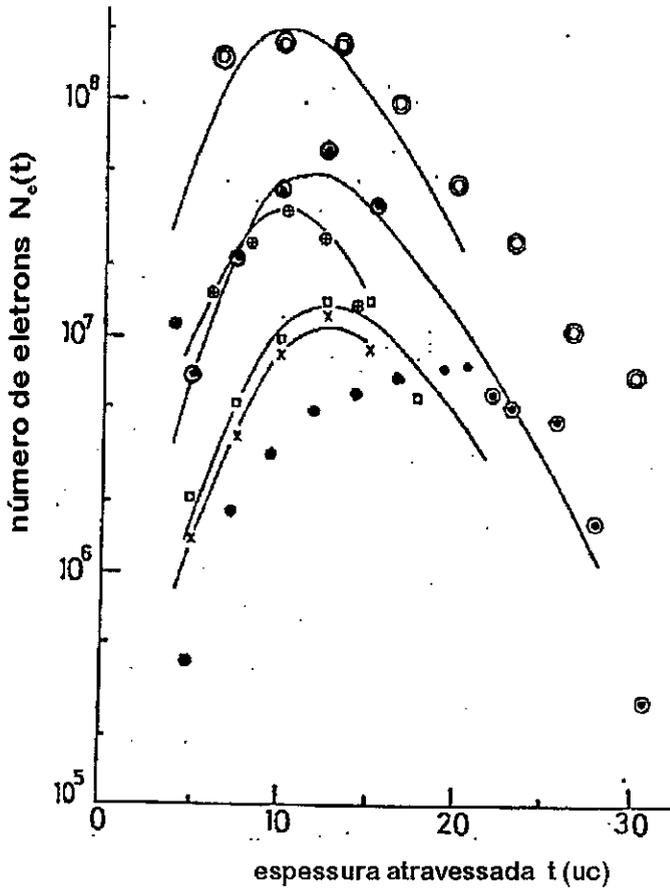
Fig. 3.1 - Distribuições laterais de $\rho(r, t)$ em diferentes profundidades t da câmara, para o evento P06

3.3.2. Curva de Transição do Número Total de Elétrons. Determinação da Energia do Halo

A Figura 3.2 dá a dependência do número de elétrons $N_e(t)$ com a profundidade t do evento P06 por nós estudado, junto com os outros cinco eventos cujos resultados já tinham sido antes divulgados. No caso do P06, a transição de $N_e(t)$ alcança seu máximo em 14 – 16 uc. Tomando-se a definição de raio do halo como a distância lateral (na profundidade máxima do chuva) do centro ao ponto onde a densidade de elétrons é $10^6 \text{ el}^s/\text{cm}^2$, obtem-se, da Figura 3.1, para o raio do halo do evento P06 o valor

$R_{halo} = 0.65 \text{ cm}$. Integrando o número de eletrons $N_e(t)$ com respeito a t , obtem-se o comprimento total da trajetória dos eletrons do halo

$$Z = \int_0^{\infty} N(t) dt.$$



- ⊙ Andromeda (só a parte eletromagnética)
- ⊗ M.A.III (só a parte eletromagnética)
- ⊕ M.A.I
- M.A.II
- × Ursa Maior
- P06

Fig. 3.2 - Transições dos números de eletrons para a parte do halo de seis superfamílias

Também aqui, tem-se os dados somente na região observada, e é necessário fazer uma extrapolação na região de maiores valores de t para se fazer a integração. Usando a energia crítica do chumbo $\varepsilon (= 7.4 \text{ MeV}/uc)$, pode-se estimar a energia total do halo, E_{halo} , usando a relação $E_{halo} = \varepsilon Z$.

3.4. Resultados Experimentais nos Chuveiros Individuais

Para as quatro famílias, Andromeda, Ursa Maior, M.A.III e P06, em que os dados de hadrons eram também disponíveis, foram determinadas a multiplicidade e a energia dos chuveiros, tanto na parte externa como na interna do halo. Estas medidas foram possíveis porque nos blocos onde essas famílias foram encontradas, além dos filmes de raios-X, havia também emulsões nucleares, que puderam ser examinadas ao microscópio. Fazendo-se comparação entre a energia contida no halo e a energia total dos chuveiros observados individualmente (manchas escuras), viu-se que no caso dos eventos Ursa Maior e P06 ambas energias têm valores não muito diferentes, significando que o halo é, em grande parte, constituído de manchas difusas dos chuveiros espalhados. Nos outros casos, Andromeda e M.A.III, o halo contém uma parte extra de energia, além da soma das energias dos chuveiros individualizados (manchas escuras); essa diferença vem da presença de numerosos eletrons e γ 's com energia inferior ao limiar de detecção das manchas. Assim, a associação do halo pode fornecer alguma informação sobre esses γ 's de energia mais baixa. Constatou-se que essas quatro famílias são muito mais ricas em hadrons que as famílias de energia mais baixa, com $\sum E_{\gamma} = 100 - 1000 \text{ TeV}$. Viu-se também que nas quatro famílias existe uma diferença entre o espectro integral de energia para os hadrons e o espectro da componente eletromagnética. O espectro hadrônico é quase de simples potência, enquanto a componente eletromagnética tem espectro que se torna mais inclinado a medida que a energia cresce; β_{γ} é sempre maior que β_h , a

diferença aumentando quando a energia se torna maior. Esse comportamento também é diverso do encontrado nas regiões de energia mais baixa, onde existe um paralelismo entre as duas componentes.

Reproduções dos seguintes trabalhos referentes ao assunto deste capítulo são apresentadas no final da tese:

- "A Cosmic-Ray Nuclear Event with an Anomalously Strong Concentration of Energy and Particles in the Central Region" - N.M. Amato, N. Arata, R.H.C. Maldonado, *N. Cim.* 10C, (1987) 559.
- "Some Results on Cosmic-Ray Interactions in the Energy Region $\sum E_\gamma > 1000 \text{ TeV}$ Detected at Chacaltaya" - N.M. Amato, E. Shibuya, R.H.C. Maldonado, H.M. Portella, *J. Phys. G*, 20 (1994) 829.
- "A Double-core Event Detected at Chacaltaya" - N.M. Amato, R.H.C. Maldonado, H.M. Portella, *Proc. 24^a ICRC (Roma)*, 1 (1995) 84.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C.D. Anderson - *Science* 76 (1932) 238; *Phys. Rev.* 43 (1933) 491.
- [2] P.M.S. Blacket, G.P.S. Occhialini - *Proc. Roy. Soc. A* 139 (1933) 699.
- [3] S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson - *Phys. Rev.* 51 (1937) 884; 54 (1938) 88.
- [4] J.C. Street, E.C. Stevenson - *Phys. Rev.* 52 (1937) 1003.
- [5] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell - *Nature* 160 (1947) 453 e 486.
- [6] H. Yukawa - *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* 17 (1935) 48.
- [7] S. Sakata - *Rep. of the Symp. on Meson Theory* (1943).
- [8] G. Wataghin, M.D. Souza Santos, P.A. Pompeia - *Phys. Rev.* 57 (1940) 61, 339.
- [9] O. Sala, G. Wataghin - *Phys. Rev.* 67 (1945) 55.
- [10] G. Wataghin - *Z. Phys.* 88 (1934) 92.
- [11] J. Nishimura - *Soryushiron Kenkyu* 12 (1956) 24 (em japonês); O. Minakawa et al, *N. Cim. Suppl.* 11 (1959) 125.
- [12] K. Kamata, J. Nishimura - *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 6 (1958) 93.
- [13] P. Freier et al - *Phys. Rev.* 74 (1948) 213.
- [14] ICEF Collaboration - *N. Cim. Suppl.* 1 (1963) 1039.
- [15] Y. Sato, H. Sujimoto, T. Saito - *J. Phys. Soc. Japan* 41 (1976) 1821.
- [16] C.M.G. Lattes, Y. Fujimoto, S. Hasegawa - *Phys. Rep.* 65 (1980) 151.
- [17] T. Tabuki - *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 76 (1983) 40.
- [18] M. Akashi et al. - *Can. J. Phys.* 46 (1968) 660.
- [19] C.M.G. Lattes et al. - *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 47 (1971) 1.

- [20] R.P. Feynman - *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 1415.
- [21] N. Arata - *Nucl. Phys. B* 211 (1983) 189.
- [22] J.A. Chinellato et al. - *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 76 (1983) 1.
- [23] D.H. Perkins, P.H. Fowler - *Proc. Roy. Soc. A* 278 (1964) 401.
- [24] H. Semba - *N. Cim.* 49A (1979) 247.
- [25] H. Semba - *Proc. 17^a ICRC* 11 (1981) 95.
- [26] N. Arata - *N. Cim.* 43A (1978) 455.
- [27] G. Cocconi - *Phys. Rev.* 111 (1958) 1699.
- [28] S. Hasegawa - *ICR Report No* 151-87-5 (1987).
- [29] L.T. Baradzei et al., Chacaltaya and Pamir Collaboration - *Nucl. Phys. B* 370 (1992) 365.
- [30] C.M.G. Lattes et al. - *Proc. 13^a ICRC* (Denver), 4 (1973) 2671.
- [31] UA5 Collab. CERN EP/82-60 - *Phys. Lett.* 107B (1981) 310; 123B (1983) 108.
UA1 Collab. *Phys. Lett.* 118B (1982) 167.
- [32] Pamir Collab., Mt. Fuji Collab. and Chacaltaya Collab. - *Nucl. Phys. B* 191 (1981) 1.
- [33] N.M. Amato, N. Arata, R.H.C. Maldonado - *Proc. 18^a ICRC* 11 (1983) 145.
- [34] H. Semba - *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 76 (1983) 111.
- [35] Mt. Fuji Collab. - *N. Cim.*, Ser. 11, 67A (1982) 221.
- [36] Pamir Collab. - *Proc. 17^a ICRC* 5 (1981) 290; *Proc. 18^a ICRC* 5 (1983) 437.
- [37] Mt. Kambala Collab. - *Proc. Int. Symp. on C.R. and Particle Physics* (Tokyo), (1984).

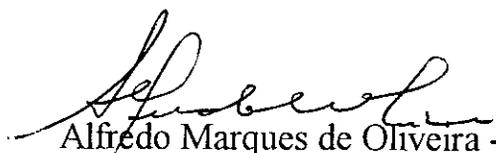
- [38] A. Ohsawa - *ICR Report* No 112-83-6 (1983) 65.
- [39] S. Yamashita - *J. Phys. Soc. Japan* 54 (1985) 529.
- [40] J.A. Chinellato - *Tese de Doutorado*, UNICAMP (1981).
- [41] J. Kato, M. Yoshioka - *Uchusen Kenkyu* 22 (1977) 43 (em japonês).
- [42] S. Yamashita, A. Ohsawa, J.A. Chinellato - *ICR Report* No 112-83-6 (1983) 123.
- [43] N.M. Amato, N. Arata, R.H.C. Maldonado - *N. Cim.* 10C, No 5 (1987) 559.

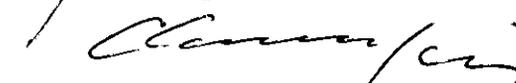
REPRODUÇÕES DE TRABALHOS PUBLICADOS

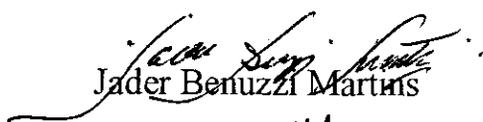
**“OBSERVAÇÕES SOBRE INTERAÇÕES NUCLEARES PRODUZIDAS
POR RAIOS CÔSMICOS DE ENERGIA $\Sigma E_{\gamma} > 10^{12}$ eV DETECTADAS
EM CÂMARAS DE EMULSÃO EM CHACALTAYA”**

Neusa Amato

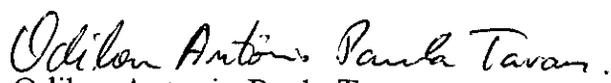
Tese de Doutorado apresentada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, fazendo parte da Banca Examinadora os seguintes professores:


Alfredo Marques de Oliveira - Presidente


Carlos Alberto Aragão de Carvalho Filho


Jader Benuzzi Martins


João Carlos Costa dos Anjos


Odilon Antonio Paula Tavares

Rio de Janeiro, 19 de abril de 1996