1. 9 8 0

76

FOTODENSITOMETRIA NO ESTUDO

DE CASCATAS ELETROMAGNÉTICAS

Jarbas Lopes Cardoso Júnior

Tese de Mestrado

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPIN

A meus pais

8

4

4

A Helena, espo<mark>sa</mark> e

companheira.

Prefacio.

A Colaboração Brasil-Japão (CBJ) dedica-se desde 1962 ao estudo de interações hadrônicas induzidas pela radiação cosmica, usando como detetor extensas câmaras de foto-emulsão e chumbo con<u>s</u> truídas no Monte Chacaltaya (5220m a.n.m.), Bolivia.

A câmara deteta interações ocorridas dentro dela ou na atmosfera. Este trabalho consistiu em estudar as características dos chuveiros compostos (Pb-jatos) produzidos no interior da câmara e determinar as curvas características dos filmes de raio-X em uso pela CBJ. Utilizou-se o método de fotodensitometria microscópica.

No capitulo I ha uma introdução histórica das pesquisas desenvolvidas com a radiação cosmica, destacando-se o papel da Foi feita também uma descrição sucinta dos métodos experi CBJ. mentais em uso pela CBJ. No capítulo II ha uma descrição super ficial da teoria de cascata. Isso se faz necessário para expli carmos o desenvolvimento dos chuveiros foto-eletrônicos nas câma-No capítulo III descreve-se o processo de formação da imaras. gem fotográfica. O capitulo IV trata do método de fotodensitometria utilizado na análise dos eventos. Nesse capitulo, são mostrados também os novos métodos de fotomicrodensitometria desen No capítulo V apresentamos as curvas caracteristicas volvidos. dos diversos filmes de raio-X em uso pela CBJ. No capitulo VI apresentamos os resultados das análises das características dos chuveiros simples e compostos. Apresentamos também métodos que podem ser usados na identificação dos chuveiros. No final de ca da capítulo estão colocadas as referências e as figuras relaciona das com o tema abordado.

• 3 -

O candidato estã desde 1975 no Departamento de Cronologia Raios Cósmicos e Altas Energias, inicialmente como bolsista de In<u>i</u> ciação Científica da FAPESP e posteriormente de Mestrado também pela FAPESP. Quero deixar aqui o meu agradecimento ã FAPESP e a todos os membros da CBJ (professores, bolsistas, funcionários) que colaboraram direta ou indiretamente na realização desse trabalho, Agradecimento especial ao Prof. Armando Turtelli Jr, orientador, que sem ele este trabalho não teria sido realizado. Atualmente fazem parte da CBJ, além do pessoal técnico administrativo, os s<u>e</u> guintes pesquisadores:

J.Bellandi Filho, J.L.Cardoso Jr., J.A.Chinellato, C.Dobrigkeit, C.M.G.Lattes, M.Menon, C.E.Navia O.A, A.M.Oliveira, M.B.C.Santos, E.H. Shibuya, E.Silva, A.Turtelli Jr. (Instituto de Física "Gleb Wataghin", Unicamp), N.M.Amato, J.M.Oliveira Castro (Centro Brasi leiro de Pesquisas Físicas) pelo Brasil.

H.Aoki, Y.Fujimoto, S.Hasegawa, H.Kumano, K.Sawayanagi, H.Semba, Y.Shinoki, T. Tabuki, M.Tamada, K.Tanaka, **S**.Yamashita(Science and Engineering Research Laboratory, Waseda University), N.Arata^{*}, T. Shibata, K.Yokoi (Department of Physics, Ayoma Gakuin University), A. Ohsawa (Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo) pelo Japão.

J.L.C.J., Fevereiro, 1980

* Atualmente no Instituto Niels Bohr, de Copenhagen.

- 4.

Agradecimentos

- O meu muito obrigado ao Armando, orientador e companheiro.
- A meus pais, o agradecimento por tudo que por mim fizeram.
- A Helena, minha esposa, o agradecimento pela compreensão e estímulo durante a realização desse trabalho.
- A FAPESP, pela concessão das bolsas.
- O meu muito obrigado aos companheiros da Colaboração Brasil Japão pela colocação de seus dados a minha disposição e também pelas constantes discussões e incentivos.
- Muito obrigado aos Profs.Lattes, Fujimoto, Hasegawa, Edison e sobretudo ao Ohsawa pelas valiosas críticas e sugestões.
- O meu muito obrigado a Ligia Maria Stella.
- O meu muito obrigado ao Miguel Luksys.
- O meu muito obrigado a Marilena.

Indice

Prefácio	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	3
Capitulo 👘 I -	Introdução	
I.1 -	Apresentação	8
I.2 -	Procedimento experimental	10
, I.2.1 -	As camaras de emulsão nuclear e chumb o	10
I.2.2 -	As interações hadrônicas e os chuveiros foto-ele	
	trônicos	13
I.2.3 -	Busca de eventos	13
I.3 -	Referências	15
I.4 -	Figuras	17
Capītulo II -	Teoria de Cascata	
II.1 -	Introdução	19
II.2 -	Princípios básicos da formação de um chuveiro f <u>o</u>	
	to-eletrônico	20
II.3 -	As aproximações usadas na teoria de cascata	23
II.4 -	Cālculo das curvas de transição de chuveiros fo-	
	to-eletrônicos para as câmaras de emulsão nucle-	
	ar e chumbo	25
II.5 -	Referências	29
II.6 -	Figuras	30
Capītulo III -	Processo Fotogrāfico	
III.1 -	Historico	33
III.2 -	A emulsão Fotográfica	35
III.3 -	Processo de formação da imagem latente	36
III.4 -	Processamento químico	40
III.5 -	Sensibilidade	41
III.6 -	A Gelatina	43
III.7 -	Referências	45
III.8 -	Bibliografia	46
III.9 -	Figuras	4 9
Capitulo IV -	Fotodensitometria microscopica	
IV.1 -	Principios gerais	50
IV.2 -	Determinação da energia	52
IV.3 -	Fotomicrodensitometria com fendas pequenas	54
IV.3.1 -	Introdução	54
IV.3.2 -	Anālise	55
IV.4 -	A razão sinal/ruído para fendas pequenas	57

	¢		
	IV.5	-	Referências
	IV.6	-	Figuras
	Capītulo V	-	Características do material fotossensível em
			uso pela Colaboração Brasil-Japão.
	٧.1	_	Especificações do material fotossensivel 66
	V.2	_	Processamento quimico
	· V.3	-	Curvas caracteristicas dos filmes de raio-X 68
	V.3.1	-	Introdução
	٧.3.2		Correlações entre os filmes de raio-X tipo N e
			RR
	۷.3.3	-	Correlações entre os filmes de raio-X tipo N e
			100 72
	V.3.4	-	Correlações entre os filmes de raio-X tipo RR e
			100
	۷.5		Referências
	۷.6	-	Figuras
	Capitulo VI	-	Interações hadrônicas induzidas no chumbo (Pb-
			jatos)
	VI.1	-	Introdução
	VI.2	-	Medidas de energia 84
	VI.3	-	Morfologia dos Pb-jatos
	VI.3.1	***	Distribuição lateral
	VI.3.2	-	Comportamento longitudinal
	VI.4	•••	Anālise dos Pb-jatos e comparação com os chuve <u>i</u>
			ros simples (gamas simples)
	VI.4.1	-	Mētodo experimental 87
	VI.4.2		Anālise 88
	VI.5	-	Conclusões
	VI.6	-	Referencias
	VI.7	-	Figuras
l	Resumo		
	Indice de Fig	jux	as

I - Introdução

I.1 - Apresentação.

O estudo da radiação cósmica iniciou-se no começo desse século quando C.T.R. Wilson, Elster e Geitel descobriram uma "ra diação muito mais penetrante" do que as radiações naturais dos núcleos atômicos. Desde então, a radiação cósmica proporcionou uma série de descobertas. As primeiras partículas sub-nucleares foram descobertas através do estudo da radiação cósmica (e⁺, μ^{\pm} , $\pi^{0\pm}$, K^{\pm} , λ , Σ). O fenômeno de produção múltipla de pions que é tido como o mais importante processo da física de altas energias, também foi uma descoberta obtida através da radiação cósmica. Os chuveiros extensos e os chuveiros foto-eletrônicos são outros f<u>e</u> nômenos descobertos com a radiação cósmica.

O fluxo da radiação primāria de altas energia que atinge a terra é praticamente constante e isotrópico. Medidas sobre "chuveiros extensos" mostram que o espectro energético das partículas se estende, pelo menos, até 10^{21} eV. No topo da atmosfera predominam os protons, as partículas α e núcleos mais p<u>e</u> sados, com número atômico 2 < Z < 30, na seguinte proporção⁽¹⁾:

 $\phi_{p}: \phi_{\alpha}: \phi_{2} < Z < 30 \simeq 1: \frac{1}{7}: \frac{1}{60}$

Além disso há cerca de 1% de eletrons, positrons, fotons e neutrinos. Todos esses elementos formam, o que chamamos, a r<u>a</u> diação cosmica primária.

- 8-

Na alta atmosfera os hadrons interagem com nucleons in duzindo a produção de mesons os quais por sua vez, através de vá rios processos dão origem a novas partículas que, acrescidos dos nucleons residuais são agrupadas e recebem o nome de radiação cósmica secundária^{*}.

A colaboração Brasil-Japão (CBJ), para o estudo de interações hadrônicas de altas energias (E > 10^{13} eV) induzidas pela radiação cósmica, deve a sua origem a uma sugestão do físico japonês Prof. H.Yukawa ao Prof. C.M.G.Lattes, em 1959⁽²⁾, para o estabelecimento de uma colaboração entre físicos brasileiros e japoneses. O método de deteção utilizado é o de "câmaras de emulsão nuclear e chumbo" expostas no Monte Chacaltaya, Bolívia. Jã em meados de 1962 foram expostas as primeiras câmaras e em 1963, foram apresentados os primeiros resultados⁽³⁾.

Até o presente momento, 19 câmaras de emulsão nuclear e chumbo foram expostas e os resultados obtidos deram uma contr<u>i</u> buição significativa ao estudo das interações hadrônicas de alta energia. Os resultados mais recentes podem ser vistos nas ref. 4, 5,6. A fig. 1 mostra a evolução das câmaras da CBJ. Um a<u>u</u> mento da ārea da câmara, ou um aumento do tempo de exposição (ou mesmo um aumento da profundidade da câmara) corresponde a um aumento na probabilidade de deteção de eventos de maior energia.

O estudo das interações induzidas pela radiação cosmica

* Componentes da radiação cosmica secundária:

- componente hadrônica (ou nucleônica): protons, pions, kaons, hiperons e antipartículas correspondentes.

- componente eletromagnética: eletrons, positrons, fotons, etc.

- componente muônicas: muons.

- componente neutrinica: neutrinos eletrônicos e muônicos e anti-partículas correspondentes.

alcança energias altissimas se comparadas as das grandes māquinas aceleradoras de partículas. As interações induzidas artificialmente tem um māximo de energia na ordem de 3x10¹² eV que corresponde ao limiar mínimo de deteção para as interações induzidas pela radiação cosmica. Embora, estejam sendo projetados grandes aceleradores que deverão alcançar energias equivalentes a da rad<u>i</u> ação cosmica, as vantagens do uso da radiação cosmica tornam-se maiores ainda quando comparamos aspectos do tipo simplificidade e custo operacional. A fig. 2 mostra a evolução dos aceleradores

Comparando-se as fig. 1 e 2, vemos que os coeficientes angulares das retas são aproximadamente iguais, correspondendo a desenvolvimentos semelhantes (um aumento de energia para aceleradores necessita de investimentos de grande monta). Contudo, a originalidade e o ineditismo das descobertas ainda estão com os físicos que trabalham com a radiação cósmica. Trabalhos atuais, tidos como originais pelos físicos de aceleradores, jã eram hã muito tempo, usados pelos físicos de raios cósmicos, ver ref. 7 e 8.

I.2 - Procedimento experimental

I.2.1 - As câmaras de emulsão nuclear e chumbo.

O detetor usado pela CBJ para estudar as interações hadrônicas induzidas pela radiação cósmica é uma "câmara de emulsão nuclear e chumbo", exposta no Monte Chacaltaya.

O Monte Chacaltaya, nos Andes Bolivianos, a 5220m sobre

-10-

o nīvel do mar (540 g/cm² de profundidade atmosférica) ē um local de fācil acesso (cerca de 20Km de La Paz), próximo ao equador ge<u>o</u> magnético. Sua altitude é excelente para experiências desse tipo, pois, é suficientemente alto para se observar um fluxo razoável de eventos produzidos pela radiação cósmica. O laboratório de Física Cósmica, onde ficam instaladas as câmaras de emulsão n<u>u</u> clear e chumbo da CBJ, foi construído em 1951, graças a um acordo, conseguido pelo Prof. Lattes, entre a Universidade Mayor de San Andrés e o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

As câmaras de emulsão nuclear e chumbo são constituídas de blocos compostos alternadamente de envelopes de material foto<u>s</u> sensivel e placas de chumbo, com espessura padronizada. Os bl<u>o</u> cos tem área de 40x50cm² na superfície e tem uma altura variável, de acordo com o tipo de câmara. Podemos ver um esquema da câm<u>a</u> ra na fig. 3.

Os envelopes de material fotossensivel são constituídos de filmes de raio-X e placas de emulsão nuclear (ver especificações no capitulo V). Existem, em geral, dois tipos de envelopes: um que contém dois filmes de raio-X tipo N e um filme de Raio-X tipo RR (alguns desses envelopes contém, ainda, um filme de raio-X tipo 100), outro contém dois filmes de raio-X tipo N e uma placa de emulsão nuclear. As câmaras atuais contém cerca de 10.000 chapas de raio-X e cerca de 2000 placas de emulsão.

Inicialmente as câmaras expostas em Chacaltaya tinham <u>a</u> penas alguns blocos justapostos, a partir de 1968 aumentou-se consideravelmente a ārea. Entretanto, como a distância do topo da atmosfera atē o detetor ē da ordem de seis caminhos livre mē

- 11-

dios de interações^{*}, detetava-se em geral a superposição de mais de uma interação^(7,9).

Surgiu então, a ideia de se colocar um alvo logo acima do detetor, podendo-se assim determinar com razoavel precisão a altura da interação e diminuindo a probabilidade de se detetar interações sucessivas. Começou-se então a usar câmaras de dois andares, separadas por um alvo de piche. O alvo atual tem uma espessura da ordem de um terço do livre caminho médio de inter<u>a</u> ção. O vão livre, com cerca de 150cm de altura e muito menor que um livre caminho médio de interação no ar (em Chacaltaya). Praticamente todos os eventos detetados na câmara inferior foram produzidos no alvo.

Normalmente a câmara inferior e formada por blocos com envelopes que contem emulsões nucleares, enquanto que a câmara superior e formada por blocos com envelopes que contem apenas filmes de raio-X e alguns blocos de envelopes com emulsão nucl<u>e</u> ar (blocos de calibração).

Atualmente, o detetor utilizado pela CBJ consiste de duas câmaras sobrepostas (fig.3) separas por um alvo de piche (câmara superior e câmara inferior). Entre o alvo e a câmara inferior existe um vão livre.

A partir de 1969 a revelação dessas câmaras é feita nas instalações do Departamento de Cronologia, Raios Côsmicos e Altas Energias da UNICAMP.

* 0	caminho li	vre médio	de interação	pēdada por:
λ	$= \frac{A^{1/3}}{N\pi R_0^2}$	ρ	onde	A - número atômico N - número de Avogadro R _o - raio clássico do eletron ρ - densidade do material

-12-

I.2.2 - As interações hadrônicas e os chuveiros foto-eletrônicos.

Nas interações hadrônicas induzidas pela radiação cosm<u>i</u> ca o processo dominante e a produção multipla de mesons. As i<u>n</u> terações podem ocorrer na atmosfera, no alvo, ou, ate mesmo, nas placas de chumbo. Os dados obtidos pela CBJ indicam que a produção multipla se da através da criação de um estado intermediãrio que se desintegra principalmente em pions, havendo também a produção de mesons-eta, mesons-k, etc..^(4,9).

Os pions neutros, com vida média $\sim 10^{-16}$ s, se desintegram em dois fotons. Esses fotons ao passarem perto de núcleos pesados, se materializam formando um par elétron-positron, os quais, por sua vez, dão origem a novos fotons que se materializam outra vez, e assim por diante. Formando-se assim, chuveiros f<u>o</u> to-eletrônicos ou cascatas eletromagnéticas, cujos eletrons e p<u>o</u> sitrons impressionam as chapas e nos permitem reconstruir o eve<u>n</u> to (maiores detalhes, ver capítulo II) (fig. 5).

I.2.3 - Busca dos eventos.

Os chuveiros produzidos por interações na atmosfera são chamados de A-jatos, os produzidos por interações no alvo de piche, C-jatos e os produzidos por interações nas placas de chumbo, Pb-jatos (fig.4).

Dependendo da energia disponível na colisão e da sua a<u>l</u> tura o detetor pode registrar apenas um chuveiro (fig.4). Convencionou-se dar o nome de gama simples ao chuveiro isolado.

A busca dos eventos é feita inicialmente a olho nú nas chapas de raio-X tipo N. As duas chapas de uma mesma profundi-

-13-

dade são superpostas numa superficie de vidro fosco iluminada, de modo que os pontos mais escuros das chapas ficam realçados. Os pontos escuros que aparecem auperpostos nas duas chapas são cons<u>i</u> derados (em princípio) manchas causadas por cascatas eletromagnéticas. Após a busca em todas as profundidades do bloco, é feito um "mapa plano" com o objetivo de traçar a trajetória do chuveiro, (projetada em um plano horizontal) o que permite obter os a<u>n</u> gulos azimutal e zenital.

Nas placas de emulsão nuclear a busca é feita num circ<u>u</u> lo de lcm de diâmetro, com o auxilio de um microscópio. Esse trabalho é extremamente moroso, pois os traços de ionização dos eletrons e positrons são de dificil distinção em relação ao fundo.

Encontrados os eventos podemos medir suas energias atr<u>a</u> vés dos métodos de contagem de traços (Capítulo II) e fotomicrodensitometria (capítulo IV).

De fato, A-jatos, C-jatos e Pb-jatos são eventos do me<u>s</u> mo tipo, a diferença entre eles está na altura em que são detetados. Como a abertura angular do jato é da ordem de 10^{-4} radi<u>a</u> nos, no sistema laboratório, gamas produzidos na mesma altura (π°) aparecem como traços paralelos no mapa. Nos A-jatos, prod<u>u</u> zidos em geral, a centenas de metros acima da câmara, hã uma separação média de alguns centímetros entre os chuveiros detetados. Jã os C-jatos, produzidos a \sim 1,6m acima da câmara inferior, a s<u>e</u> paração média é da ordem de dezenas de microns, separação esta que somente é vista com auxílio do microscópio. Os Pb-jatos são produzidos, em média, a menos de 1 cm acima do material fotossens<u>í</u> vel e portanto seus chuveiros estão tão próximos que a resolução proporcionada pelo filme e pelo microscópio não é suficiente para permitir uma distinção entre eles.

-14-

I.3 - Referências.

- S.Hayakawa "Cosmic Ray Physics" John Willey & Sons, New York, 1969.
- 2. C.M.G.Lattes "Observações sobre a componente eletromagnética de alta energia $(2x10^{11} < E/eV < 10^{14})$ da radiação cosmica através do estudo de cascatas eletromagnéticas detetadas em câ maras de emulsão fotográfica e chumbo, expostas no Laboratório de Física Cosmica de Chacaltaya (5200m de altitude)". Tese de Cátedra, apresentada à USP, 1966.
- 3. M.Akashi et al, C.M.G.Lattes et al "Emulsion Chamber Project of Japan-Brasil Collaboration" - Proc.Int.Conf. on Cosmic Ray, 5, 326 (Jaipur, 1963).
- 4. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "Multiple meson Production in $\Sigma E_{\gamma} > 2 \times 10^{13} \text{eV}$ region" - Proc.Int.Conf. on Cos mic Ray, Kyoto (Japan) <u>6</u>, 362 (1979).
- 5. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "Baryon Pair Production with large decay Q-value" Proc. Int. Conf. on Cosmic Ray, Kyoto (Japan), 6, 350 (1979).
- 6. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "A new type of nuclear interactions in the $\Sigma E_{\gamma} > 10^{14} \text{eV}$ region" Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Kyoto (Japan) <u>6</u>,356 (1979).
- 7. A.Turtelli Jr.-"Produção Múltipla de pions induzidas por partículas da radiação cósmica (E¹ < 240TeV) e comparação com d<u>a</u> dos do ISR-CERN" - Tese de doutoramento apresentada a UNICAMP, 1974.
- 8. E.L.Feinberg "Multiple Production of Hadrons at cosmic Ray

-15-

Energies (Experimental results and Theoretical Concepts)" Physics Reports, <u>5C</u>,237 (1972).

9. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration - "Chacaltaya emulsion Chamber Experiment " - Prog. Theor. Phys., Sup.<u>47</u>, 1 (1971).

-16-







Fig. 3 Câmara de foto-emulsão e chumbo usada pela CBJ



Fotos comparativas de um chuveiro foto-eletronico registrado em emulsão nuclear, filme de raio X tipo N e filme de raio X tipo RR.

II - <u>Teoria de Cascata</u>* (1)

II.1 - Introdução:

Eletrons de alta energia ao atravessarem um meio materi al qualquer emitem fotons devido às interações com o campo coulombiano dos núcleos (radiação de freiamento). Esses fotons também interagem com os núcleos e produzem pares eletron-positron. Na continuidade desses dois processos o número de eletrons (e positrons) e fotons aumenta consideravelmente. Esse fenômeno é chamado de chuveiro foto-eletrônico ou cascata eletr<u>o</u> magnética (fig. 1). As secções de choque desses processos podem ser calculadas com base na teoria de Dirac sobre os eletrons.

Acreditou-se, a princípio, que os eletrons e fotons dos chuveiros provinham da radiação cósmica primária, pois experiênc<u>i</u> as com balões detetavam chuveiros a grandes altitude, mais tarde concluiu-se que a radiação cósmica primária era predominantemente constituida de nucleons e que os eletrons e fotons, entre outros, faziam parte da radiação cósmica secundária. O principal fator de transição é o processo de produção múltipla de mesons: nucleons da radiação cósmica interagem com nucleons da atmosfera produzindo, principalmente pions. Nesse fenômeno, os pions neutros decaem em raios- γ , de acordo com a reação: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Esses raios γ podem produzir chuveiros, daí, a existência de eletrons e

* Daremos aqui uma breve introdução sobre chuveiros foto-eletrôn<u>i</u> cos ou cascatas eletromagnéticas. Aspectos matemáticos não serão abordados. Os artigos originais sobre a "Teoria de cascata" estão mencionados ao longo do capitulo.

- 19 -

fotons na atmosfera, mesmo a grandes altitudes.

II.2. Princípios básicos de formação de um chuveiro foto-eletr<u>ô</u> nico.

Uma particula carregada ao interagir com os eletrons atômicos de um meio, pode excita-los (ou, até, ionizar o atomo). Para tanto, a particula cede parte de sua energia, que é chamada energia perdida por ionização. Para particulas com velocidade próxima a da luz, a energia perdida por ionização é praticamente independente da energia cinética da particula e do meio material atravessado (desde que a espessura seja medida em g/cm²).

Além disso, a partícula carregada também interage com o campo coulombiano dos núcleos atômicos do meio. A interação produz uma perturbação no campo eletromagnético da partícula: a partícula sofre um desvio de sua trajetória inicial e emite um fóton. Dizemos que nesse processo a partícula incidente perde energia por radiação. A"radiação perdida", é proporcional a <u>e</u> nergia da partícula.

Hā, então, dois processos de perda de energia pela pa<u>r</u> tīcula: um ē por ionização e o outro ē por radiação. Em baixas energias o processo dominante ē o de ionização enquanto que o processo de perda de energia por radiação ē mais importante na região de altas energias.

Fotons, ao passarem através da matéria podem ser absorvidos por criação de par eletron-positron ($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$) e sua energia pode ser absorvida por efeito Compton. A seção de choque para efeito Compton diminui com o aumento da energia do foton.

- 20 -

(

Na região de altas energias o efeito Compton torna-se desprezível e o processo de produção de par é dominante.

A teoria sobre o processo de produção de par está rigor<u>o</u> samente ligada ao processo de radiação. De fato a secção de ch<u>o</u> que é aproximadamente igual nos dois processos. Na produção de par ocorre a transição de um eletron de energia negativa para um estado de energia positiva através da absorção de um foton de energia muito alta. No processó de radiação ocorre a transição de um eletron entre dois estados de energia positiva com emissão de um foton de alta energia. Maiores detalhes sobre os processos de ionização, produção de par, radiação e efeito Compton podem ser vistos nas ref. (2,3 e 4). Estudos mais recentes indicam a necessidade de algumas correções nos processos de produção de par e de radiação^(*).

Bethe e Heitler⁽⁴⁾, para calcular a probabilidade do pr<u>o</u> cesso de radiação consideraram **o** efeito de "blindagem" do campo coulombiano devido aos eletrons atômicos. Esse efeito é importante para partículas de alta energia e quando o parâmetro de impacto médio é da ordem de grandeza do raio atômico.

Outro efeito a ser considerado e o efeito conhecido como efeito Landau ou de espalhamento multiplo, ou ainda efeito densidade⁽⁵⁾. A correção consiste em calcular as variações dos desvios angulares sofridos pela partícula no processo de radiação bem como as variações dos ângulos de abertura no processo de produção de par, em relação ao meio que atravessam.

- 21 -

* Ver ref. (1), pag. 4-10.

A teoria de cascata foi desenvolvida pela primeira vez por volta de 1937, por BHABHA e HEITLER e CARLSON e OPPENHEIMER⁽¹⁾ Chuveiros extensos e chuveiros foto-eletrônicos de qualquer energia podem ser descritos por essa teoria, dentro de algumas aprox<u>i</u> mações.

Em teoria de chuveiros e conveniente definir algumas qua<u>n</u> tidades de modo a uniformizarmos os critérios de medida e parâmetros que dependem do material. · Definimos "comprimento de radiação" ou "unidade de cascata" como sendo a distância percorrida na qual a energia perdida por radiação e reduzida de <u>1</u> (e=2,714...).

A energia perdida por um eletron através de radiação é d<u>a</u> da por:

$$\frac{dE}{dX} = X_0^{-1} \cdot E$$

onde <u>E</u> \tilde{e} a energia do eletron e <u>X</u> o caminho percorrido (em g/cm²). X_o \tilde{e} chamado de comprimento de radiação e vale:

$$X_{o}^{-1} = \frac{4}{137} \frac{N}{A} r_{o}^{2} Z (Z-\zeta) \log (183Z^{-1/3})$$

onde: $\begin{cases} N \neq n\bar{u}mero \ de \ Avogadro \\ A \neq peso \ atômico \\ r_o = \frac{e^2}{mc^2} \Rightarrow raio \ clāssico \ do \ eletron \\ Z \neq n\bar{u}mero \ atômico \end{cases}$ e $\zeta = \frac{\log 1440 \ z^{-2/3}}{\log 191 \ z^{-1/3}}$

Em teoria de chuveiros usa-se também uma quantidade, cons tante para cada material, chamada de "energia crítica". Se para um eletron com energia ε_0 , a perda de energia por ionização numa unidade de cascata de um certo material for o próprio valor ε_0 , então, ε_0 é definido como sendo a energia crítica do eletron no material.

O valor de ε_0 para cada material coincide aproximadamente com o valor da energia para o qual a perda de energia por ionização e a perda de energia por radiação são iguais.

Na tabela l, temos os valores de comprimentos de radiação e energia crítica, para alguns materiais.

Em primeira aproximação, Θ_0 é inversamente proporcional ao número atômico, desde que X₀ possa ser expresso como sendo <u>a</u> proximadamente igual a A/Z² onde A/Z assume valores aproximadamente constantes.

II.3 - As aproximações usadas na teoria de cascata.

Se eletrons e fotons têm energia muito maior que a energia crítica no material, o efeito da energia perdida por ionização pode ser desprezado. Então, a teoria de chuveiro pode ser desenvolvida considerando-se apenas os processos de radiação e de produção de par.

Levando-se em conta o efeito de blindagem no calculo das secções de choque de radiação e de produção de par, tem-se a chamada "Aproximação A". Quando alem disso, leva-se em conta também a perda de energia por ionização, tem-se a *Aproximação B".

-23-

Na "Aproximação A", além do efeito de blindagem assumimos que o desvio angular pelas partículas do chuveiro é muito p<u>e</u> queno. Nessa aproximação o número de partículas do chuveiro – tende a aumentar "infinitamente" com a profundidade de matéria <u>a</u> travessada. Essa aproximação da bons resultados apenas para partículas com energia muito maior que a energia crítica, que a "energia de blindagem" (137 Z^{-1/3}m c²) e que a "energia de espalhamento" (\sim 20 MeV).

Na "Aproximação B" leva-se em conta também a perda de <u>e</u> nergia por ionização. Como a energia da partícula que iniciou o chuveiro é distribuida para as partículas secundárias, a energia média delas diminue durante o desenvolvimento e chega a ficar da ordem da energia crítica. Com energias dessa ordem, outros problemas surgem: a blindagem, que antes era completa agora é parcial, a diminuição da probabilidade de produção de par é parcialmente compensada pela contribuição do efeito Compton, a

Esses dois métodos descrevem o desenvolvimento unidime<u>n</u> sional do chuveiro, mas não levam em conta desenvolvimento lateral.

O espalhamento lateral das partículas do chuveiro é d<u>e</u> vido ao ângulo de abertura no processo de produção de par, o ângulo de emissão de foton no processo de radiação e os desvios causados pelo "espalhamento múltiplo coulombiano" (efeito Landau). Entretanto, as contribuições do ângulo de abertura e do ângulo de emissão podem ser desprezadas em relação ao espalhamento múltiplo, desde que o chuveiro não esteja no início do desenvolvimento. Foi, então, elaborado um tratamento tri-dimenssional do chuveiro cons<u>i</u> derando apenas o efeito de espalhamento múltiplo.

- 24 -

Como a teoria tri-dimensional para chuveiros é obtida através da combinação da teoria uni-dimensional e a teoria sobre o espalhamento múltiplo, as limitações dessa teoria são as impostas pelas aproximações A e B, e além disso ela sõ é correta para pequenos ângulos, o que é uma restrição imposta pela te<u>o</u> ria de espalhamento múltiplo. --

Todo formalismo matemático envolvido na teoria de ca<u>s</u> cata e mesmo nessas "aproximações", é bastante complexo. As e<u>x</u> pressões são resolvidas numericamente. Todos os detalhes sobre o formalismo matemático bem como os resultados teóricos p<u>o</u> dem ser encontrados na ref.l.

II.4 - Câlculo das curvas de transição de chuveiros foto-eletr \hat{o} nicos para as câmaras de emulsão nuclear e chumbo.

Os cálculos sobre o desenvolvimento longitudinal e transversal das cascatas eletromagnéticas em câmaras de emulsão nuclear e chumbo foram realizados por Kamata e Nishimura⁽⁶⁾. Eles calcularam como a densidade de eletrons e positron, $\rho(E,r,t)$, varia com a distância (r) ao eixo do chuveiro, com a profundidade (distância, t, do ponto inicial do chuveiro), e com a energia (E) da partícula. Nishimura⁽⁷⁾ recalculou as curvas levando em co<u>n</u> ta o efeito de inomogineidade do material onde a cascata se dese<u>n</u> volve (chumbo, papel, plástico, emulsão etc.) e também a inclinação dos chuveiros cujos eixos não são perpendiculares à superficie do detetor.

A distribuição lateral das partículas do chuveiro se d<u>e</u> ve principalmente, ao espalhamento múltiplo coulombiano que ocorre quando essas partículas atravessam um meio material. O ângu-

-25-

lo de espalhamento \bar{e} inversamente proporcional \bar{a} energia do eletron, daf, a relação existente entre a energia do eletron e a distância ao centro do chuveiro pode ser expressa como: $E \simeq \frac{K}{r}$, onde K \bar{e} a constante de espalhamento (\sim 20 MeV). As partículas de menor energia são rapidamente absorvidas e não mais contribuem para o desenvolvimento do chuveiro.

Se observamos os traços da particula numa área de raio $\sim 50 \ \mu\text{m}$ ($\sim 1.10^{-2}$ unidade de cascata de chumbo), então E $\simeq 2$ GeV, é muito maior que a energia perdida por ionização. Dai,o uso da "aproximação A" nos cálculos. Sabemos que na "aproxim<u>a</u> ção A", o número de particulas $\rho(\text{E,r,t})$ é dado como função apenas da razão E₀/E e da profundidade t, onde E₀ é a energia da particula primária. Então, temos que a distribuição lateral p<u>o</u> de ser expressa com a função de $\frac{E_0 r}{\kappa}$ e de t do seguinte modo:

$$\rho(E_0,r,t) \sim \left(\frac{E_0r}{K}\right)^{s} \frac{1}{r^2}$$

onde, s: \tilde{e} o parâmetro de idade do chuveiro^{*} e r << R, onde R co<u>r</u> responde a unidade de Moliêre^{**} no chumbo (\sim 19,5g/cm² ou \sim 1,7cm).

Nas câmaras de emulsão nulcear e chumbo, o material foto<u>s</u> sensível mais a embalagem correspondem a 0,008 unidades de cascata, portanto, o desenvolvimento do chuveiro ocorre principalmente no chumbo. Os calculos do desenvolvimento do chuveiro em câmaras de emulsão nuclear e chumbo são feitos para chumbo "diluído" e não

* Para s = 1 a densidade de eletrons é máxima.

** A unidade Molière é dada pela relação: <u>K</u> x 1 comprimento E₀
de radiação do material.

-26-

para chumbo "puro". O espalhamento lateral do eletron, nesse caso, é maior do que em camadas homogeneas de chumbo.

Resumindo, as curvas de transição representam o número de eletrons de um chuveiro dentro de um circulo de raio r, concê<u>n</u> trico ao eixo do chuveiro, a uma profundidade t. Exemplos de curvas de transição podem ser vistos na fig.2. Essas curvas são calculadas para diferentes ângulos de incidência. A dens<u>i</u> dade máxima de eletrons (dados através dessas curvas) é proporcional a energia (fig.3). O erro devido às aproximações no calculo numérico é estimado em cerca de 20 $\sim 30\%^{(7)}$.

As medidas experimentais de energia dos chuveiros são feitas contando-se os traços dos eletrons (e positrons) do chuveiro, registrado na emulsão nuclear, num circulo de raio r, em diferentes profundidades. A contagem é feita com auxilio de microscópio com aumento de ordem de 1200X. A seguir, traça-se a curva de transição experimental (fig.2). A densidade máxima de eletrons assim obtida é correlacionada com a energia do chuveiro através da fig.3. Esse método experimental de medida de energia é conhecido como "método de contagem de traços".

Em alguns casos, é necessário comparar também a distr<u>i</u> buição lateral teórica com a experimental. Na fig.4 temos as curvas de distribuiçãolateral calculadas para um chuveiro de 10 TeV (10¹³eV) para várias profundidades.

Os cálculos de Nishimura⁽⁷⁾ dão uma relação de similaridade para a densidade de eletrons. Se $\rho(E_0, r, t)$ é calculada para um chuveiro de energia E_0 , a distribuição lateral de um chuveiro de energia a E_0 (onde <u>a</u> é um número positivo qualquer) pode ser obtido através da relação:

-27-

 $a^{2} \rho(E_{0}, r, t) = \rho(aE_{0}, r/a, t)$

que permite construir as distribuições laterais para chuveiros de qualquer energia.

Integrando (numericamente) as curvas de distribuição l<u>a</u> teral e usando a relação de similaridade podemos construir as curvas de transição teóricas para chuveiros com qualquer energia⁽⁸⁾ Desse modo, não usamos diretamente o formalismo matemático da te<u>o</u> ria de chuveiro. Para eventos um ângulo Θ em relação ã vertical, a profundidade será t/cos Θ , onde t, é a profundidade na vertical.

- 28-

II.5 - Referências.

- J.Nishimura "Theory of Cascade Showers" Handibuch der Physik (Spring - Verlag), 46/II, 1 (Berlin, 1967).
- 2. B.Rossi, K.Geissen "Cosmic Ray Theory" Rev.Mod.Phys., <u>13</u> 240 (1941).
- 3. B.Rossi "High Energy Particles" Precentice-Hall Inc., New Jessey, 1956.
- W.Heitler "The Quantum Theory of the Radiation" Oxford, 1956.
- Ver por exemplo: A.B. Migdal "Bremsstrahlung and Pair Production in Condensed Media at High Energies" - Phys. Rev., 103, 1811 (1956).
- K.Kamata, J.Nishimura "The Lateral and angular structure functions of eletron Showers" - Prog. Theor. Phys., Sup. <u>6</u>, 93 (1958).
- 7. J.Nishimura "Calculation of cascade functions for the emulsion chamber project" - Prog. Theor. Phys., Sup. <u>32</u>. 72 (1964)
 8. A. Ohsawa - Comunicação particular, 1979

- 29-

TABELA 1

8

Materia]	Z	A	Comprime	Energia cr <u>ĭ</u>	
			g/cm ²	cm	tica (MeV)
Н	1	1,008	62,8	7500 (m)	350
C	6	12,010	43,3	16,9(grafite)	79
N	7	14,008	38,6	331 (m)	85
0	3	16,000	34,6	258 (m)	75
A1	13	26,980	24,3	9,10	40
Fe	26	55,85	13,9	1,77	20,7
Br	35	79,916	11,5	3,71	15,7
Ag	47	107,870	9,0	0,86	11,9
Pb	82	207,21	6,4	0,57	7,40
Materiais Compostos Ar $\begin{cases} - N 75,52\% \\ - 0 23,14\% \\ - Ar 1,3 \% \end{cases}$ H ₂ O Emulsão Nuclear (est <u>i</u> mado para alguns ti- pos de emulsão.					
			37,1	308 (m)	81
			36,4	36,4	73,0
			71,4	2,98	16,4

Esquema de formação de um chuveiro foto-eletronico - Processo de produção de par + -Ø ^{Ze} e 🐼 Ze ł - Processo de radiação de freiamento (bremsstrahlung) ee 🔕 Ze e e t + -----Ø Ze ^ر ۲ e e e¯e¯

Fig.1





Fig. 2



- 32 -

III - Processo Fotográfico

III.1 - Histórico⁽¹⁾

A ação da luz em sais de prata é conhecida há muito tem po. Existem referências datada de meados do século XVII. Entretanto, foi Louis Daguerre, por volta de 1839, que desenvolveu um método de reproduzir imagens através de sais de prata colocados sobre uma base de vidro. Essa "chapa fotográfica" marcou o nascimento da fotografia.

Inicialmente, pensava-se que apenas a luz podia produzir modificações nos sais de prata. Niépce de St. Vitor, em 1867, observou que certas fotografias ficavam ligeiramente escurecidas quando colocadas próximas a sais de urânio. Niépce atribuiu esse fenômeno a luminescência dos sais de urânio. Bequ<u>e</u> rel, em 1896, em experiência semelhante observou que chapas foto gráficas, mesmo protegidas com várias camadas de papel preto, f<u>i</u> cavam enegrecidas. Atribuiu esse fato devido aos "raios urânicos". Estava descoberta a radioatividade natural. Estava de<u>s</u> coberta, também, uma nova utilidade para a fotografia. A partir de então, as chapas fotográficas passavam a ser desenvolvidas também para registrar traços de radiações.

Em 1909, O.Mugge registrou pequenos traços pretos na s<u>u</u> perfície de chapas fotográficas que estavam em contato com cristais de zirconio. Eram os primeiros traços de partículas α r<u>e</u> gistrados embora ele não tivesse relacionado os traços registrados com a trajetória das partículas. Foi, em 1910, que Kinosh<u>i</u> ta mostrou que partículas produziam traços em chapas fotográficas.

- 33 -

No ano de 1911, logo após a primeira utilização da "camara de Wilson" tivemos, através de Reiganum, o primeiro registro de uma tragetória individual da partícula α.

Em 1925, M.Blau registrou os primeiros traços individua is de prótons produzidos através de colisões elásticas de particulas α com átomos de hidrogênto. Em 1935, aprimorando-se ainda mais os"meios fotográficos" houve uma maior diversificação – nas pesquisas: A.Schopper inicia pesquisas sobre raios cosmicos com métodos fotográficos. Nessa mesma década, Zhdanov inicia na União Soviética o desenvolvimento de emulsões especiais.

Um fator decisivo ocorreu na decada de 40: a Ilford (uma das maiores industrias de matériais fotográficos da época) se propos a realizar melhoramentos que permitissem a passagem da "fotografia" para a "ionografia (emulsões nucleares)". Surgiram então as "emulsões" com grande concentração de brometo de prata. Nesse mesmo ano, emulsões fotográficas expostas em montanhas per mitiram a descoberta dos Mesons $\pi^{(2)}$, responsáveis pelas forças nucleares, que ja haviam sido previstas por Yukawa.

A partir dessa data a "física das partículas elementares" tomou um grande impulso. As emulsões passaram a ser dese<u>n</u> volvidas de modo a detetarem partículas de altíssima energia. Jã em 1948 as emulsões eram sensíveis aos elétrons rápidos, que permitiram observar a desintegração do muon.

Vārias partīculas elementares foram descobertas atravēs do mētodo fotogrāfico, sendo que muitas delas foram conseguidas com emulsões expostas à radiação cosmica.

Se os dominios da aplicação das emulsões fotográficas tem-se reduzido ultimamemnte, devido ao desenvolvimento de novos tipos de detetores (tais como: cintiladores, de Cerenkov, de se-

-34-

mi-condutores, hodoscópios, câmaras de bolhas e de centelha),pe<u>r</u> maneceram as vantagens do método: maneabilidade, simplicidade,r<u>a</u> pidez e eficiência das medidas, possibilidade de "integrar" as medidas em um período de tempo longo, etc...

III.2 - A emulsão fotográfica^{*}.

A emulsão fotográfica é composta de "grãos" de haleto de prata em suspensão numa gelatina a base de proteina animal.O haleto constitue-se de brometo e pequenas quantidades de iodeto.

A concentração, o tamanho dos grãos de AgBr, bem como a espessura da emulsão podem variar conforme os objetivos experimentais. As emulsões mais espessas possuem uma base rígida (vi dro, "lucite") enquanto que as mais finas, em geral, possuem uma base flexível de polietileno. Os "grãos (microcristais)" de AgBr possuem uma estrutura cristalina cuja celula unitária e do tipo cúbico de face centrada (fig.1).

A rede cristalina pode possuir defeitos como: impurezas químicas (por exemplo: sulfeto de prata), lacunas ou atomos em excesso, ou seja atomos fora de suas posições normais na rede, planos cristalinos deslocados, etc. Recentemente, estudos rea lizados em cristais de haleto de prata mostraram a existência, no interior desses cristais, de micro cristais com orientação ligeiramente diferente, separados por zonas fronteiriças mais ou menos pertubadas (estrutura mosaica).

 * Sobre a preparação das emulsões fotográficas ver, por exemplo:
 P.Demers, "Ionographie-les emulsion nucleares", p.29, Université de Montreal, 1958.

-35-

Os defeitos na rede cristalina do AgBr constituem zonas muito reativas. As teorias atuais sobre o processo fotográfico mostram que esses defeitos tem um papel fundamental na formação da imagem fotográfica.

III.3 - Processo de formação da imagem latente.

(2) A imagem latente pode ser* produzida por diversas manei ras: exposição a luz visível, ação química, tensões mecânicas ou elétricas, passagem de partículas ionizantes, etc...

3 A formação da imagem baseia-se na absorção de energia sob a forma de radiação eletromagnética e de energia cinética de particulas carregadas, entretanto esses mecanismos não são suficientemente conhecidos.

4 Gurney e Mott⁽³⁾, em 1938, pela primeira vez expuseram uma teoria geral sobre o processo fotográfico.

5 (Segundo essa teoria, para que haja a formação da imagem latente é necessário que a energia absorvida seja superior à largura da banda (gap) que separa a banda de valência da banda de condução. Criam-se assim dois portadores de carga dentro da rede cristalina: o par eletron - buraco. A liberação e os deslocamentos de eletrons e de buracos, respectivamente na banda de condução e na banda de valência, fazem com que a condutibilidade dos cristais de AgBr se modifique: de isolante passa a ser um fo to-condutor.

- 36 -
6 Gurney e Mott dividiram esse processo em duas fases: <u>u</u> ma eletrônica e outra iônica. A fig.2 mostra um esquema de c<u>o</u> mo ocorre o processo.

Na fase eletrônica ha a liberação de eletrons na banda de condução e de buracos; os eletrons se movimentam pelo cristal até o seu local de "captura" e os buracos se movimentam até a superfície e formam átomos halogeneos que podem, eventualmente, reagirem com compostos químicos da gelatina. Na fase iônica, centros carregados negativamente (que seriam os locais de "captu ra" dos eletrons) atraem os ions de prata que se combinam com os eletrons capturados. A repetição dessas fases num cristal produz os embriões da imagem latente.

Entre os pontos obscuros dessa teoria estava o proces so de captura dos eletrons. Gurney e Mott supunham que era feita por poços de potencial poucos profundos ou por grupos de moléculas de sulfeto de prata ou mesmo, por grupos de átomos de prata.

Mitchell⁽³⁾, por volta de 1953, complementou a teoria de Gurney e Mott e mostrou que as imperfeições da rede cristalina assumem um papel essencial na formação da imagem latente. E<u>s</u> sas imperfeições cristalinas constituem os locais preferênciais de ocorrência de reações químicas bem como locais de captura el<u>e</u> trônicas e de buracos.

Mitchell usou os mesmos princípios da teoria de Gurney e Mott e esquematizou algumas reações químicas que podem ocorrer na produção da imagem latente. A captura de um buraco pode ocorrer da seguinte maneira:

buraco + $Ag^{+}Br^{-}$ (da rede) $\rightarrow Ag^{+}Br$

- 37-

que pode desencadear novas reações do tipo:

 $Ag^{+}Br + Br^{-}$ (vizinho) $\rightarrow Ag^{+}$ (intersticial) + Br_{2}^{-}

um segundo buraco + $Br_2^- \rightarrow Br_2$ (que é difundido na gelatina).

A captura de um foto-eletron pode ser feita por um ion Ag⁺ intersticial ou uma imperfeição da rede. Entretanto o el<u>e</u> tron não está fortemente ligado ao Ag⁺ intersticial, que foi pr<u>o</u> duzido nas proximidades por uma captura de buraco, podendo haver uma recombinação com o Br. O sulfeto de prata na emulsão tem <u>um papel essencial na captura dos buracos</u>. A sua presença na superfície de um grão favorece a formação nesse local de um embrião da imagem latente:

> buraco + Ag_2S (adsorvido) $\rightarrow Ag_2S^+$ $Ag_2S^+ \rightarrow Ag^+$ (intersticial) + Ag_2S^-

A presença de Ag⁺ intersticial cria um poço de potencial negativo que pode atrair os eletrons de condução do seguinte modo:

Ag⁺ (da rede) + e⁻ + Ag⁺ (intersticial)
$$\rightarrow$$
 Ag⁺₂

que, segundo Mitchell é o início da formação da imagem latente. Porém, essa "pré-imagem" é instável, o eletron pode se recombinar com o buraco. Novamente, o sulfeto de prata atua como ele mento estabilizador, pois, protege esses embriões de imagem latente contra a recombinação.

- 38 -

A adição de um novo eletron de condução e um terceiro ion Ag⁺ intersticial conduz a formação de um grupo tetraédrico de carga positiva do tipo:

 $Ag_3^+ + e^- \rightarrow Ag_3$

 $Ag_3 + Ag^+$ (intersticial) $\rightarrow Ag_4^+$

Essa formação constitue o menor grupo mais estável a temperatura ambiente e é o embrião da imagem latente.

Se a exposição persiste, os pequenos embriões estáveis de imagens latente se transformam êm embriões de grande dimensão. Se o processo continua, isto ē, se hã energia suficiente todo o grão de Ag Br se transforma numa imagem latente.

Resumindo, o fenômeno primārio de formação da imagem latente baseia-se na absorção de energia seguida de liberação de eletrons de condução e ions Ag⁺ intersticiais. O fenômeno secundārio é a combinação dos ions Ag⁺ intersticiais e dos eletrons de condução para formar grupos de átomos de prata nas superfícies externas e internas do cristal.

No caso de particulas ionizantes o mecanismo de formação da imagem latente é semelhante, com apenas uma exceção: os eletrons são levados à banda de condução, não por efeito foto-elétrico mas por ionização devido a interação das particulas inc<u>i</u> dentes comocristal.

As reações de redução ocorridas para a formação da im<u>a</u> gem latente exigem muito pouca energia da radiação incidente. Com um banho químico conveniente a imagem latente, que é uma região altamente reativa, transforma-se em prata metálica.

- 39 -

III.4 - Processamento químico

h As emulsões fotogrāficas apōs a exposição necessitam de um tratamento químico para tornar visível a imagem latente.

 $\sqrt{0}$ processamento químico consiste em 4 banhos químicos $^{\circ}$ "revelador" (meio básico), "freiador" (meio ácido), "fixador" e lavagem. Dependendo da espessura da camada de emulsão pode ser necessário um banho prévio com água desmineralizada de modo a "<u>a</u> molece-la". As fórmulas químicas dessas substâncias variam de acordo com os tipos de emulsões a serem processadas.

 $3 \int 0$ "revelador" torna visível a imagem latente, através de uma reação de redução, transformando os ions de prata do cris tal em prata metalica. O processo de revelação se inicia na imagem latente reduzindo depois os ions Ag⁺ vizinhos mesmo que não tenham imagem latente. Assim, a imagem latente é ampliada com a revelação de todo o grão. Se o banho é prolongado, mais grãos de AgBr sem imagem latente começam a ser revelados. A imagem latente funciona como um elemento catalisador da reação, a reação de redução ocorre mais rapidamente nessa região. O m<u>e</u> canismo da reação ainda não é bem conhecido, mas sabe-se que ele é influenciado por variações das condições de revelação (tempo, temperatura, concentração, agitação, etc..).

Apos o banho redutor, a emulsão e banhada numa solução acida. Isso e feito pa**ra** "freiar" rapidamente o efeito do rev<u>e</u> lador, evitando assim, eventuais gradientes de revelação. Daí, banha-se a emulsão no "fixador". Essa solução remove os grãos

* Processamento químico para diversos tipos de filmes fotográficos podem ser encontrados no Handbook of Chesmestry and Physics p.3297, 40th edition,1958/59 (Chemical Rubber Publishing Co.)

- 40 -

de prata não afetados pela passagem da radiação e que não tenham reagido com o revelador. Finalmente, a emulsão e lavada e sec<u>a</u> da, estando pronta para ser analisada.

III.5 - Sensibilidade.

O limiar de deteção depende de número de pares de ions que a partícula incidente produz num grão de AgBr.

A sensibilidade das emulsões fotográficas aumenta com o tamanho dos grãos de haleto de prata. Isso porque, um grão maior apesar de não necessitar de mais radiação para formar a imagem latente, produz uma imagem maior devido a maior quantid<u>a</u> de de prata.

Uma emulsão de alta sensibilidade (filme rāpido) tem p<u>o</u> der resolutivo menor que o de uma emulsão pouco sensivel (filme lento).

A questão da escolha do material fotossensível a ser utilizado depende dos objetivos experimentais. A Colaboração Brasil-Japão utiliza os dois tipos de emulsões simultaneamente. Os eventos de altíssima energia saturam os filmes mais sensíveis, isto é, a energia cedida pelo evento é maior que a necessária p<u>a</u> ra formar imagem latente em todos os grãos da região de incidência. As medidas efetuadas nessas condições estão subestimadas, daí, a utilidade dos filmes de grão fino. Os filmes de alta sensibilidade facilitam a busca dos eventos, pois, as manchas produzidas estão bem destacadas. Nos filmes de grão fino a im<u>a</u> gem não é visível a olho nu, porém, o estudo pode ser feito mais detalhadamente, devido a alto poder de resolução.

-41-

A ionização produzida por uma partícula em movimento d<u>i</u> minue com o aumento da energia, atingindo um valor mínimo chamado "mínimo de ionização". O valor do "mínimo de ionização" ind<u>e</u> pende da partícula^(5,6). A fig. 3 mostra a correlação entre a energia perdida por ionização e a energia da partícula, em unid<u>a</u> des de massa de repouso. Na fig. 4 temos a correlação entre a energia perdida por ionização e a energia da partícula. Observamos que o valor do mínimo de ionização não depende da partícu-1a, mas, quando ele é atingido depende.

Basicamente, a sensibilidade das emulsões é dependente do tamanho dos grãos, porém, existem alguns fatores externos que podem afetar essa sensibilidade. ^{*}As condições de armazenagem e exposição tem um papel essencial na sensibilidade das emulsões. baixas temperaturas ($\lesssim 0^{\circ}$ C) a ionização dos grãos é muito pe-A quena, enquanto que a altas temperaturas ($\stackrel{>}{\sim}$ 25⁰C) a ionização \tilde{e} muito grande, fazendo com que o fundo (ruído) aumente significativamente. Alem disso podem ocorrer problemas com a gelatina. Para exposições longas (da ordem de centenas de dias) a temperatura deve ser a menor possível. Um dos grandes problemas em longas exposições é a perda de imagem latente (ou fadiga). Essa perda significa uma diminuição da densidade de grãos nos traços revelados. São basicamente dois fatores que causam esse fenôme Um é a rehalogenização da prata, isto é, os ions Ag⁺ podem no. se recompor com os ions Br formando AgBr que restrutura o cris-Outro fator é a presença de agentes oxidantes que dessental. sibilizam os grãos. A fadiga é acelerada em contato com o oxigênio atmosférico e retardada no vácuo ou no nitrogênio. Como a gelatina tem grande capacidade de absorção de água ela própria pode favorecer a perda da imagem latente. Basicamente, a mistu

- 42 -

ra oxigênio e água converte os átomos de prata em ions, de acordo com o esquema:

 $2 \text{ Ag} + 0 + \text{H}_2 0 \rightarrow 2 \text{ Ag}^+ + 2 \text{ OH}^-$

Em geral, essas reações ocorrem-na superficie. A reação faz com que o pH da emulsão aumente, inibindo a reação de revelação (que deve ocorrer com um pH \lesssim 7).

Já dissemos que os microcristais de haleto de prata devem possuir imperfeições ou mesmo impurezas químicas na sua estrutura cristalina. Dissemos também que esses defeitos são regiões bastante reativas. Daí, com o passar do tempo as impurezas tendem a diminuir, por reações físico-químicas internas ao grão, por rearranjos da estrutura cristalina e também pela sua difusão na emulsão. O desaparecimento dessas impurezas inibe o processo de formação da imagem latente, diminuindo a sensibilidade da emulsão, pois há necessidade de mais energia para formar a imagem latente.

Isso significa que quando dois eventos iguais (mesma energia, mesmo ângulo de incidência, etc..), impressionam as chapas fotográficas em épocas diferentes suas imagens serão diferentes, e consequentemente suas energias serão determinadas erradamente.

III.6 - A gelatina.

 \bigwedge A gelatina nas emulsões fotográficas permite ver os traços em três dimensões e protege os grãos, contribuindo para a pe<u>r</u> manência da imagem.

- 43-

 \mathcal{V} A gelatina é um complexo orgânico, obtido a partir da h<u>i</u> drólise da "colagina", uma proteina abundante em certos tecidos <u>a</u> nimais (como no "mocotó" de boi). É de facil aplicação e, esta<u>n</u> do completamente seca, tem um indice de refração aproximadamente igual as bases tanto de vidro como de plásticos. Ela tem uma grande capacidade de absorção de água e é bastante permeável as soluções de processamento químico. Isso faz com que aumente de volume sem alterar de modo significativo a posição relativa dos grãos, ou seja os traços de minimo de ionização causados por particulas de altissima energia, continuam retos depois que as emulsões foram reveladas.

O controle das condições de exposição e armazenagem é de suma importância, pois, variações da temperatura (antes e durante o processamento químico) produzirão erros nas medidas. Em laboratórios de análise onde a umidade do ar não é controlada a espe<u>s</u> sura da emulsão varia significativamente, medidas de traços de pa<u>r</u> tículas nessas condições podem ficar comprometidas e, prolongandose efeito, a emulsão tende a perder a transparência, torna-se "esbranquicada".

- 44-

III.7 - Referências.

- Sobre a história de método fotográfico, ver por exemplo: C.F.
 Powell, P.H. Fowler. D.H.Perkins, "The Study of Elementary Particles by the Photographic Method", Pergamon Press, London, 1959.
- 2. C.M.G. Lattes, H.Muirhead, G.P.S.Occhialini, C.F.Powell Nature, <u>159</u>, 694 (1947).
 C.M.G.Lattes, G.P.S.Occhialini, C.F.Powell - Nature, <u>160</u>,453, 486 (1947).
- 3. W.H. Barkas. "Nuclear Research Emulsions", Vol.1, Academic Press London, 1963.
- L.Avan, M.Avan, D.Blanc, J.L.Teyssier, "Ionographie Emulsions detecteurs solides de traces", Doin, Paris, 1973.
- 5. A. Beiser, "Nuclear Emulsion Technique", Rev. Mod. Phys., <u>24</u>, 273 (1952).
- M.M.Shapiro, "Nuclear Emulsion", Handbuch der Physik (Springer Verlag), 45/II, 342 (Berlin, 1958).

-45-

III.8 - Bibliografia[°].

- W.H.Barkas "Nuclear Research Emulsion", Vol.II, Academic Press, London, 1973.
- 2. P.Demers "New Photographic Emulsion Showing Improves Tracks of Ionizing Particles", Canadian J.Res., 25.A, 223, (1947).
- 3. P.Demers "Photographie Corpusculaire II, Universita de Montreal, 1959.
- 4. L.Voyvodic in Progress in Cosmic Ray Physics, 2, 217 (1954).
- 5. L.Vigneron "Emploi des Emulsions Photographique pour la Detection et l'Étude des Phénomènes Nucleaires" - J.Phys. Radium, 14, 121 (1953).
- W.F.Berg "Photographic Sensitivity" J.Phot.Sc, <u>1</u>, 2 (1953).
- 7. C.Waller "Nuclear Emulsion Techinique" J.Phot.Sc. , 1 , 41 (1953).
- J.W. Mitchell "Photographic Sensitivity" J.Phot. Sc., <u>1</u>
 110 (1953).
- 9. P.Kowaliski "Theorie Photographique Appliquée" Masson et Cie, Paris, 1972.
- * Esta bibliografia juntamente com as referências e as notas ao "pē" das pāginas constituem uma pequena amostra da literatura existente sobre o mētodo fotogrāfico. Procuramos citar os artigos mais gerais. Nos artigos e livros citados hā um gran de numero de referências de publicações originais sobre o pro cesso fotogrāfico e suas aplicações.

- 46 -

- 10. G. Albouy, H.Faraggi "Sur la Mecanisme de l'Effacement de
- l'Image Latente due aux Particles Chargeies" J.Phys. Radium., <u>10</u>, 105 (1949).
- 11. J.H.James "The theory of Photographic Process" 4th edition, Mc Millanm New York, 1977.
- 12. R.W.Beniman "Photographic Sensitivity" (London, Betterworth), 272 (1951).
- 13. E.Moisar et al "Formation and properties of sub-image and latent image silver specks" - J. Photo. Sc., <u>27</u>, 12 e 19 (1979).
- 14. G.C. Farnell "Latent image formation: the contribution of the Research Division, Kodak Limited, Harrow" - J.Photo.Sc., 27, 160 (1979).

-47-



200

Esquema da rede cristalina cúbica de face centrada do AgSr. Cada Ton brometo é cercado por seis fons de prata, formando um octaedro regular ce<u>n</u> trado emisma lon de brometo. A recT-' proca é válida para os fons de prata.





O eletron è capturado na superfície, o buraco produz um Br () neutro absorvido na su perfície



O fon Ag⁺(·) intersticial aproxima-se do eletron for mando o Ag^O



Mais energia é absorvida, o buraco provoca a formação de Br, produzindo um Br₂ na superfície, enquanto que o el<u>e</u> tron se une ao Ag⁰ formando Ag⁻



Um segundo fon Ag^+ intersticial se une ao fon Ag^+ formando Ag_2





- 49 -

IV - Fotodensitometria Microscopica

IV.1 - Princípios Gerais.

O método de fotodensitometria microscópica ou fotomicr<u>o</u> densitometria para a determinação de energia baseia-se na medida de opacidade, isto é, na medida de atenuação de um feixe luminoso ao passar através de um filme de raio-X. A medida da intensidade luminosa é feita comparando-se o feixe de luz incidente e o feixe de luz transmitido^(1,2,3,7).

Seja I_o a intensidade lumiⁿosa incidente e I a intensidade transmitida através da área iluminada do filme de raio-X. A opacidade(D) com respeito a área do filme é dada por:

$$D = \log \frac{I_0}{I}$$

A fig. 1 mostra o esquema do aparelho de fotomicrodensitometria NLM-101 (doado pela FAPESP ao Depto de Cronologia, Raios Cósmicos e Altas Energias - UNICAMP), usado nas experiências da CBJ. Os filmes são colocados no fotomicrodensitometro de tal modo que o centro do evento passe pelo centro da fenda durante o movimento (automático). Nesse aparelho as fendas são retangulares. A fig. 2 mostra uma medida feita. O eixo X representa o movimento do filme e o eixo Y corresponde ao valor da opacidade em função de X. A luz é dividida em dois feixes, um feixe é d<u>i</u> rigido ao filme, o outro é dirigido para uma cunha padrão que se movimenta automaticamente, de modo a igualar a opacidade dos dois feixes, sendo este valor registrado automaticamente no papel. A área iluminada do filme é controlada pela fenda 1 do condensador.

- 50-

A luz transmitida à fotomultiplicadora é controlada pela fenda 2 da objetiva. O ajuste das fendas depende das medidas a serem rea lizadas mas, a fenda l deve ser sempre maior que a fenda 2 para evitar reflexão nas bordas. As lentes usadas, tanto da objetiva como a do condensador tem abertura numérica 0,25, abertura angular 30⁰ e aumento de 10X.

Os filmes de raio-X possuem um fundo devido os compone<u>n</u> tes de baixa energia da radiação cosmica. O valor do fundo ē função do tempo de exposição, das condições de armazenagem, da temperatura, do processamento químico, etc.. Na fig. 3 temos a correlação entre o fundo e a profundidade da câmara. As placas de chumbo absorvem a componente de baixa energia, daí, a diminuição do fundo com o aumento da profundidade. Entretanto, a radia ção natural da terra faz com que as camadas mais profundas da câmara (junto ao solo) tenham um acrescimo no fundo. A opacidade medida pelo aparelho e chamada de opacidade absoluta (D'), pois, estamos considerando o efeito do chuveiro e do fundo (ruído). Para obtermos o valor da opacidade real (D), devemos medir a opacidade devido ao fundo (D_0). O valor de D_0 é obtido fazendo-se m<u>e</u> didas a uma certa distância do evento, essa distância depende do tamanho do evento. O valor de D é dado pela seguinte expressão:

$$D = D' - D_{O}$$

A fig. 2 mostra um exemplo das medidas obtidas pelo fotomicrodensitômetro NLM-101.

Evidentemente, a medida de opacidade depende do tamanho da fenda pois, mede-se a opacidade média nessa área. A fig. 4 mostra as medidas de opacidade efetuadas num mesmo evento com di

- 51-

versos tamanhos de fenda e a várias profundidades.

IV.2 - Determinação de energia.

Os resultados da fig.5 mostram que a opacidade \bar{e} propo<u>r</u> cional \bar{a} densidade de eletrons at \bar{e} , aproximadamente, 10⁷ eletrons/ cm² para o tipo N e, 10⁸ eletrons/cm² para o tipo RR^(2,3,4). Acima desses valores começa haver a "saturação" dos filmes. Obt<u>e</u> ve-se a seguinte relação empírica:

$D = D_{x} (1 - exp^{-Sp})$

onde: $D_{\chi} \ \bar{e}$ o māximo de opacidade obtido com um filme de raio-X (dependente evidentemente, das condições de armazenamento, exposição e do processamento químico, no caso da fig. 5 o valor de D_{χ} \bar{e} aproximadamente 11), ρ \bar{e} a densidade de eletrons e <u>s</u> \bar{e} a secção de choque dos grãos de AgBr (varia conforme as características do filme). Essa expressão \bar{e} conhecida como curva característica do filme de raio-X.

A relação da opacidade com a densidade de eletrons pe<u>r</u> mite determinarmos a energia do chuveiro usando os conceitos de teoria de chuveiros^(2,3,5,7). A fig.6 mostra os resultados teóricos obtidos. As curvas de transição para fotometria relacionam a op<u>a</u> cidade com o desenvolvimento dos chuveiros foto-eletrônicos na câmara.

De modo mais simples⁽⁶⁾, podemos construir as curvas de transição para fotometria, integrando (numericamente) as curvas de distribuição lateral (fig. 4, capītulo II - Teoria de cascata),

- 52-

usando a relação de similaridade e comparando a densidade de el<u>e</u> trons obtida com o valor da opacidade dado pela fig. 5. Para eventos com um ângulo Θ em relação à vertical a profundidade serã <u>t</u> onde, t e a profundidade na vertical.

Feitas as medidas Dxt, traçamos as curvas que melhor concordam com os pontos experimentais e obtemos o valor da opac<u>i</u> dade máxima (D_{max}) para cada chuveiro. As medidas de opacidade de fato variam para cada câmara, pois, o "escurecimento" dos fi<u>l</u> mes depende também do tempo de exposição, do processamento quím<u>i</u> co, etc...

Então a relação entre $D_{m\bar{a}x}$ e densidade de eletrons (ou energia do chuveiro) varia de câmar^aa para câmara.

Para levar em conta essa variação é feita uma calibração para cada câmara. Para isso são selecionados eventos de f<u>á</u> cil medida (número de traços não muito grandes, inclinação conv<u>e</u> niente, etc...) e determinamos sua energia (E₀) através do método contagem de traços. A seguir, através da fotomicrodensitom<u>e</u>tria, determinamos o D_{máx} para cada chuveiro e, desse modo, con<u>s</u> truimos a curva de calibração D_{máx} x E₀ (fig.7). A relação te<u>ó</u> rica entre D_{máx} e E₀ é dada pela expressão:

 D_{max} (E₀, R) $\alpha(\frac{R}{E_0})^{-\beta}$, onde R \tilde{e} o raio da fenda e $\beta=0,85\pm0,005$ ⁽²⁾

ē a inclinação da reta (em papel log-log) que concorda satisfat<u>o</u> riamente com os resultados experimentais. A constante de proporcionalidade da expressão acima depende de cada câmara pelos mesmos motivos jã mencionados.

Os erros desse método estão estimados em torno de 20 a 30%. A grande vantagem desse método é a rapidez com que as medidas são feitas. Evitam-se também os erros subjetivos que po-

- 53 -

dem ocorrer com o método de contagem (a contagem de traços pode ser diferente para pessoas diferentes). Esse método não é usado para C-jatos pois nesse caso os chuveiros individuais estão muito próximos e o filme de raio-X não permite uma boa resolução entre os vārios chuveiros.

IV.3 - Fotomicrodensitometria para fendas pequenas⁽⁸⁾

IV.3.1 - Introdução

Os filmes de raio-X usados nas câmaras de emulsão nucle ar e chumbo da CBJ, tem um suporte de polietileno com emulsão fotossensivel em ambos os lados, assim sendo, um chuveiro foto-eletrônico é registrado nos dois lados do filme (fig.8). Ohta⁽²⁾ estudou o efeito das duas manchas e mostrou que a opacidade máxima (D_{mãx}) do chuveiro, medida com as duas manchas varia linearme<u>n</u> te com o raio da fenda até que este atinja um valor mínimo, chama do de "raio critico", abaixo do qual, a relação não é mais linear. Para fendas cujos raios são maiores que o raio crítico, é válida a seguinte relação: $D_2 = 2D_1$, onde D_2 é a opacidade medida com as duas manchas e D_1 \vec{e} a opacidade medida com apenas uma mancha. As curvas de calibração são construídas levando-se em consideração o efeito das duas manchas. Evidentemente, o valor do "raio crítico" depende do ângulo de incidência (zenital) do chuveiro. Pode-se obter então, um tamanho de fenda, para a qual, a opacida de medida ē o dobro da real. As fendas mais usadas pela CBJ tem āreas equivalentes a cīrculos de raio 150 e 200 μm. Uma fenda dessa dimensão é bem maior que as duas manchas deixadas pelo chu

- 54 -

veiro no filme de raio-X, por isso, a opacidade medida serã maior do que a obtida com apenas uma mancha. Com fendas dessa magnit<u>u</u> de, perdemos muito detalhes de possíveis estruturas das manchas deixadas pelos chuveiros, jã que a opacidade medida serã a opacidade média nessa área.

Com fenda pequena e, dependendo da inclinação do chuveiro, podemos observar o efeito da "mancha de cima" e da "mancha de baixo". A fig. 9A mostra um evențo medido num filme de raio X normal. A fig. 9B, mostra o mesmo evento medido com a mesma fenda no mesmo filme de raio-X, mas com a "parte de baixo" removida.

O fato de existirem duas manchas na chapa de raio-X influi nas medidas de opacidade e, consequentemente, as medidas de energia do chuveiro também são afetadas. Essa influência é est<u>u</u> dada aqui, removendo-se a emulsão de um dos lados do suporte plá<u>s</u> tico e medindo-se novamente a opacidade^(*).

Na fig. 10 vemos as curvas de transição para opacidade medida com fenda pequena em filmes de raio-X com as duas manchas (D_2) e com uma mancha (D_1) . Os $D_{m\bar{a}x}$ encontrados se relacionam com a energia do chuveiro através da curva de calibração (Fig.7). Como podemos observar, a relação estabelecida por Ohta, não é vãlida para esse tamanho de fenda.

IV.3.2 - Anālise.

Localizados os chuveiros nos filmes de raio-X fazíamos

* Para a remoção da emulsão fotográfico, usa-se uma solução de <u>a</u> cido cloridrico 20%. as medidas com o fotomicrodensitometro paralelamente à direção de incidência do evento. Repetiamos o processo duas vezes: uma com o filme de raio-X com emulsão em ambos os lados, a outra, o mesmo filme de raio-X mas com a emulsão de um dos lados removida.

Foram feitas diversas correlações para estudar a influên cia das duas manchas nas medidas do evento. Para estudar a dependência do efeito da mancha de baixo com o ângulo de incidência dos eventos, eles foram divididos em três faixas: $0 < tg\theta < 0,25$; $0,25 < tg\theta < 0,75 e 0,75 < tg\theta < 1,25$. A fig. 11 mostra os resul tados obtidos quando a opacidade é medida com as duas manchas (D_2) e com uma so (D_1) . Na fig. 12 está a razão $\frac{D_2}{D_1}$ x tg θ , onde se verifica melhor a dependência do efeito da mancha de baixo com a inclinação do chuveiro.

A fig. 13 mostra como o efeito das duas manchas varia com a energia do evento. Observa-se que essa variação é pequena, havendo uma variação significativa apenas na região de opacidade pequena. Nessa região, a razão sinal/ruido dificulta a determinação da opacidade pois, a pequena ionização causado pelo chuveiro se confunde com o fundo (fig. 14).

Os resultados aqui obtidos levam a conclusão que, dependendo do ângulo zenital do chuveiro foto-eletrônico e de sua ene<u>r</u> gia (que nos filmes de raio-X pode ser traduzido como "tamanho" do chuveiro) torna-se necessário corrigir o valor da densidade o<u>́p</u> tica (opacidade) medida.

O problema se resume nas manchas estarem ou não superpo<u>s</u> tas. Para eventos com incidência vertical as manchas estão perfeitamente superpostas independente da energia chuveiro. Para eventos com ângulo zenital diferente de zero, as manchas não mais estarão superpostas. Dependendo do ângulo de incidência e da e-

- 56 -

nergia do chuveiro as duas manchas podem estar total ou parcialmente superpostas. Daï, apenas a curva de calibração não é suficiente para a correção das medidas (nesse caso, as correlações ângulo-energia-opacidade não são lineares). A teoria da fotodensitometria microscópica é baseada na medida de opacidade de <u>a</u> penas uma mancha e, mesmo assim, para chuveiros de incidência vertical. Para eventos inclinados as funções de estrutura⁽²⁾ são estendidas, obedecendo a relação t = $t_0/\cos \theta$, onde, t_0 é a profundidade medida na vertical e <u> θ </u> o ângulo de incidência. Essa relação funciona razoavelmente bem, desde que meçamos apenas uma mancha ou, ainda, para duas manchas mas com fendas cujos raios sejam bem maiores que o raio crítico.

Concluímos também que, para observações de possíveis e<u>s</u> truturas em manchas de chuveiros compostos, há a necessidade de o fazermos com fendas pequenas e sem a "mancha de baixo" pois, ela pode produzir efeitos diversos (fig. 9).

IV.4 - A razão sinal/ruído para fendas pequenas.

A fotomicrodensitometria nos da a atenuação média da luz ao atravessar certa área do filme. O limiar de deteção, evidentemente será função da razão sinal/ruído nesse filme. O "ruído" ou "fundo" nos filmes de raio-X, depende das condições de armazenagem, exposição e processamento químico, provocando um escurecimento maior em toda a extensão da chapa.

Os filmes de raio-X, tipo N, aqui utilizados são de alta sensibilidade. Os grãos de haleto de prata, nesses filmes, apõs o processamento químiço tem um tamanho médio da ordem de

- 57 -

 $25 \ \mu m^{(2)}$. Os eventos com energia próxima ao limiar ionizam alguns grãos produzindo algumas regiões "um pouco mais escuras", co<u>n</u> tribuindo assim para o aumento do ruído. Ao fazermos as medidas com fenda pequena, toda essa "estrutura granular" do filme de raio X vai produzir grandes flutuações na medida do fundo (fig. 14).

Quando o evento e de alta energia a sua mancha e bem destacada, (fig. 14A). Quando o evento e de baixa energia, quando o sinal do chuveiro pode ser confundido com a flutuação do fundo (Fig. 14B).

58 -

IV.5 - Referências.

- H. Piller "Microscope Photometry" Springer Verlag, Berlim, 1977.
- I.Ohta, "Photometric Method in Energy Determination of Cosmic Ray Showers in Emulsion Chamber" - Prog. Theor. Phys., Sup. 47, 271 (1971).
- 3. I.Ohta, A. Ohsawa et al "Further Study of the Photometric Method for Energy Determination of High Energy Cascade Showers observed in the Emulsion Chamber" - preprint, CKJ Report, 10.

I.Ohta, A.Ohsawa et al - "Characteristic of X-ray films used in emulsion chamber and energy determination of cascade showers by photometric method" - 14th Int. Cosmic Ray Conf. (München, Germany) <u>9</u>, 3154 (1975).

- 4. I.Ohta, A. Ohsawa et al "Characteristic Curves of Photometric Material Used in Emulsion Chamber" - Nuc.Inst. Meth., <u>161</u>,35 (1979).
- 5. T.Yuda et al "Electron induced cascade showers in lead, copper and aluminium" Nuovo Cim. <u>65A</u>, 205 (1970).
- 6. A. Ohsawa comunicação particular, 1979.
- 7. L.T.Baradzei; E.A.Kanevskaya, Yu.A.Smorodin, M.V.Soloviev "Método mais preciso de fotometria para determinação da energia de cascatas eletrofotônicas em câmaras de emulsões com filmes de raios X". - Preprint n.65 (em russo) - Instituto de Física P.N. Lebedev (Lab. de Raios Cósmicos).
- 8. J.L.Cardoso Jr., A.Turtelli Jr. "Observações sobre a medida da energia de uma cascata eletromagnética em câmaras de fotoemulsão e chumbo (parte II) - Ciência e Cultura, Sup.<u>30</u>,238 (1978).



B



Exemplos dos registros das medidas de fotometria, com várias fendas

Fig. 2



Fig. 3





62-

£13' 9











- 64 -







-65-

V - <u>Caracterização do material fotossensivel em</u> uso pela Colaboração Brasil-Japão (CBJ).

V.1 - Especificações.

A Colaboração Brasil-Japão estuda as interações induzidas pela radiação cósmica e para tanto, usa câmara de emulsão nuclear e chumbo como detetores fotográficos.

O material fotossensivel consiste em placas de emulsão nuclear do tipo ET7B (Fuji) e filmes de raio-X industrial dos tipos RR e N (Sakura) e 100 (Fuji). A emulsão tem uma base de "lucite" enquanto que os filmes tem uma base flexivel de polietileno (tabela l).

Emulsões Nucleares ET7B^{*}: são emulsões fotográficas com alta concentração de AgBr. Os grãos extremamente finos mais a alta concentração do AgBr fazem com que tenhamos alta sensibilidade e excelente resolução. São sensíveis a partículas de mínima ionização. Essas emulsões são estáveis, podendo-se desprezar o efej to da perda de imagem latente e da perda de sensibilidade para ex posição de até 1,5 anos⁽¹⁾ (atualmente, tantos grupos brasileiros como japoneses, da CBJ tem estudado com maiores detalhes as caract<u>e</u> rísticas do material fotossensível). Pelo fato da emulsão ter um grão extremamente fino, a busca de eventos se faz com o auxílio do

* Sobre as características das emulsões, ver por exemplo: A.Ohsawa, "Sobre a qualidade das emulsões". Universidade de Tõkyo (Tradução do autor). ICR 27.78.4, "separata" japonesa com gráficos e correlações em inglês.

- 66 -

microscópio. As emulsões nucleares são extremamente sensíveis as variações de umidade e temperatura,exigindo cuidados especiais durante a exposição e a armazenagem.

Filmes de raio-X: Nessas chapas,as películas fotossensíveis são aplicadas em ambos os lados da base. Os filmes do tipo N são altamente sensíveis (filmes rapidos). Devido ao tamanho de seus grãos os eventos são facilmente diferenciados numa busca a olho nu. Ja os filmes tipos RR e 100 são menos sensíveis que os do tipo N, porém mais sensíveis que a emulsão (são filmes de velocidade média - intermediarios entre a emulsão e o tipo N). Eles são bastantes úteis no estudo de eventos de alta energia que devido o seu tamanho podem saturar os filmes do tipo N. Os filmes de raio-X são bem mais resistentes aos efeitos mecânicos e químicos do que a emulsão.

V.2 - Processamento químico do material fotossensível da CBJ.

Os tempos dos vários banhos químicos variam conforme as condições da câmara (por exemplo, temos a exposição, "radiação de fundo", etc..), para tanto, fazem-se testes para se determinar as melhores condições.

- Soluções: (temperatura controlada a 20⁰C)

Emulsão Nuclear.

Banho prēvio - āgua desmineralizada - 10min. Revelador (15min.) Revelador - 6,7g amidol - 3,0g em um litro de āgua desmineralizada

- 67-

Freiador - ācido acético glacial-5cc/l - 10min. Fixador (80min.) Fixador - āgua corrente de sodio - 30g em um litro de āgua. Iavagem - āgua corrente (120min.). <u>Filmes de raio-X - (tipos N,RR e 100)</u> Revelador - Konidol (6min.) Freiador - ācido acético glacial - 30cc/l - (4min.) <u>Solução A:</u> tiossulfato de sodio - 250g em 600 cc de āgua a 50°C <u>Solução B</u>:

Fixador (12 min.) Solução A: *tiossulfato de sódio - 250g em 600 cc de água a 50°C Solução B: Sulfito de sódio anidro - 15g acido acético (23%) - 58 cc alumem de potássio - 15g em 200 cc de água a 50°C <u>Solução A</u> + <u>Solução B</u> + <u>Água</u> = = 1 litro de solução.

Lavagem - agua corrente - (40min.).

V.3 - Curvas características dos filmes de raio-X.

V.3.1 - Introdução.

A partír de 1976, a CBJ começou a utilizar em suas câma

- 68-

ras um novo tipo de filme: tipo 100. Tornou-se pois necessário um cuidadoso estudo para fazer a "Calibração" desse filme. Os primeiros estudos realizados por Ohta ⁽²⁾ foram feitos com filmes de raio→X irradiados com particulas aceleradas artificialmente, o que quer dizer que os trabalhos foram realizados com filmes "novos" (pouco tempo de exposição) e, em princípio, seus resultados não são aplicáveis aos filmes da CBJ.

Os resultados aqui apresentados baseiam-se em filmes de raio-X com larga exposição (∿ 2 anos), da câmara 19. Os eventos estudados são os chuveiros foto-eletrônicos produzidos nas câmaras.

O processamento químico dos filmes de raio-X analisados foi idêntico aos demais filmes da câmara 19.

Utilizando-se a fotomicrodensitometria na determinação das curvas características dos filmes de raio-X, usamos o método descrito por Ohta⁽²⁾ para filmes de tipos N e RR e, determinamos as curvas características dos filmes de tipo 100.

Primeiramente tomamos apenas a opacidade māxima da mancha deixada pelo chuveiro no filme de raio-X, isto ē, medimos a diferença māxima entre o sinal e o ruīdo, a qual chamamos de D. A seguir,analisamos tambēm a opacidade integrada (D_{int}, cujo v<u>a</u> lor corresponde a ārea sombreada da fig. 2 no capītulo IV).

O estudo das características dos filmes de raio X restri<u>n</u> giu-se apenas aos filmes da câmara 19 pelo fato desta câmara ser a mais nova da CBJ e também por ser a câmara que mais possue chapas de raio X tipo 100. Quando estudamos as características dos filmes de raio X, o tempo e as condições de exposição e o process<u>a</u> mento químico tem uma grande influência daí, se tomamos câmaras d<u>i</u> ferentes temos que levar em conta esses fatores.

- 69 -

A câmara 19 em suas partes superiores tem chapas de raio X tipo N em todos as camadas e chapas de raio X tipo RR e 100 em determinados blocos e nas profundidades t = 04 e 10 uc.

As curvas características dos filmes de raio X foram estabelecidas medindo-se a opacidade das manchas deixadas pelos chuveiros nos três tipos de filme e nas várias profundidades.

As medidas foram feitas com fendas quadradas de āreas equivalentes ās fendas de raio maior que o raio crītico, de modo a minimizar o efeito das duas manchas.

V.3.2 - Correlações entre os filmes de raio X tipo N e RR.

A fig. 1 mostra a relação entre as medidas de opacida de nos filmes de raio X tipo N (D_N) e as medidas nos filmes de raio X, tipo RR (D_{RR}), feitas com duas fendas de tamanhos dife-Observa-se que a correlação D_N x D_{RR} depende da prorentes. Tal dependência se deve ao fato de que no início os fundidade. eletrons do chuveiro estarem bem concentrados em torno do eixo da direção de incidência, isto é, devido a alta energia dessas partículas, elas não estão espalhadas; enquanto que a profundi dades maiores, os chuveiros tem uma distribuição mais uniforme (t \gtrsim 10 uc). Dependendo da energia do chuveiro, nos primeiros estágios de desenvolvimento pode haver saturação no filme de raio X tipo N e o mesmo não ocorre no de tipo RR. Obtemos duas relações, que são independentes do tamanho da fenda, uma para ^DN em 4 uc ē 4,2 t = 4 uc e outra para t = 10u c. A razão -D_{RR} e em 10 uc é 7,1.

- 70-

Ohta em trabalho semelhante⁽²⁾ obteve os seguintes resultados para um determinado tamanho de fenda (raio 200 µm): a razão $\frac{D_N}{D_R}$ é 4,3 para t = 4,6 e 8 uc e 5,1 para t = 12 e 14 uc (fig.2).^DRR Esses valores são resultantes de uma média pois, para t = 4,6 e 8 uc temos chuveiros em várias etapas de desenvo<u>l</u> vimento, embora todas elas estejam no início, enquanto que para t = 12 e 14 uc os chuveiros estão bem mais espalhados que em t = 10 uc, que equivale ao fato dos eletrons componentes do chuve<u>i</u> estarém com menor energia em t = 12 e 14 do que em t = 10 uc.

A fig. 3 mostra a correlação entre D e D_{int} para o filme de raio X tipo N. como podemos ver, a relação é linear dentro da região estudada. Para um determinado valor de D vemos que hã uma grande variação de D_{int}, principalmente para a região de menor opacidade. Isso deve-se ao fato que nem todos os chuveiros tem mesma inclinação. Quanto maior a inclinação maior a largura da curva de fotometria (note que fazemos as medidas com as duas manchas). Para a região de mais baixa opacidade as fl<u>u</u> tuações são maiores, pois, é aí que a influência da inclinação do chuveiro é maior: as manchas são menores e estão mais **s**eparadas nas duas camadas do filme.

Aqui também se observa o mesmo tipo de dependência com a profundidade, porém, bem menos acentuada : $\frac{D_{int}}{D} \cong 2,8$ para t = 4 uc e $\frac{D_{int}}{D} \cong 3,1$ para t = 10 uc. Isso era de se esperar pois, como jã vimos, em 10 uc o chuveiro estã mais espalhado.

A fig. 4 mostra o mesmo tipo de correlação entre o D e D_{int} para o filme de raio X tipo RR. Os resultados obtidos são semelhantes aos da fig. 3. Hã o mesmo tipo de dependência com

- 71-

a profundidade e as mesmas flutuações devido a inclinação do ch<u>u</u> veiro. A razão $\frac{D_{int}}{D}$ para t = 4 uc \tilde{e} 2,0 e para t = 10 uc \tilde{e} 2,3.

A diferença de valores observada entre os filmes de raio X tipos N e RR nas figs. 3 e 4, respectivamente, mostra a sensib<u>i</u> lidade do filme. O filme do tipo N é mais sensível, as partículas mais espalhadas do chuveiro (é portanto de menor energia) podem ser detetadas nesses filmes e não nos do tipo RR, que é menos sensível. Daí, o valor de D_{int} para o tipo N corresponder a um valor maior que o D_{int} para o tipo RR em relação aos respectivos D's.

Na fig. 5 temos a correlação entre o D_{int} para o filme de raio X tipo RR (D_{int}^{RR}) e o D_{int} para o de tipo N (D_{int}^{N}). Os resultados obtidos são semelhantes ãs demais correlações jã obtidas. A razão $\frac{D_{int}^{N}}{D_{int}}$ para t = 4 uc é 5,2 e para t = 10 uc é 8,6. D_{int}^{RR}

As correlações apresentadas nas figs. 1 e 5 indicam que as medidas D e D_{int} são equivalentes, embora para D_{int} a flutuação seja mais significativa. Se traçamos as curvas de transição vemos que na profundidade em que D ē maximo (D^{max}) ē aproximadamente a mesma em que D_{int} ē māximo (fig. 7). As correlações das figs. 1 e 5 mais as da fig. 6 nos levam a concluir que tanto D como D_{int} são equivalentes para representar o desenvolvimento do chuveiro.

V.3.3 - Correlações entre os filmes de raio X tipos N e 100.

Realizamos, nos filmes de raio X tipo 100, análises an<u>a</u> logas as realizadas no item V.3.2. Os filmes do tipo 100 somen

- 72 -
te agora (mais precisamente nas duas ultimas câmaras da CBJ) e que estão sendo usados como possíveis substitutos para o de tipo RR. Suas especificações são semelhantes as do tipo RR, mas suas curvas características foram determinadas pela primeira vez nesse trabalho^{*}.

A fig. 7 mostra as correlações entre as medidas de opac<u>i</u> dade nos filmes de raio X tipo N (D_N) e 100 (D_{100}). Os resultados obtidos são semelhantes aos da fig. 1 ($D_N \times D_{RR}$). A razão $\frac{D^N}{D_{100}}$, para t = 4 uc é 4,8 e para t = 10 uc é 8,3. A diferença para os valores obtidos com os filmes de tipo RR é da ordem de 16%.

A fig. 8 mostra a correlação, para os filmes de tipo 100, entre D e D_{int} . A razão $\frac{D_{int}}{D}$ para t = 4 uc é 2,0 e para t = 10 uc é 2,2. Comparando-se com a fig. 4 vemos que as correlações são bastante semelhantes. Agora, comparando-se esses resultados com os obtidos com o tipo N (fig.3) podemos dizer que o filme de raio X tipo 100 tem características semelhantes ao do tipo RR.

A correlação $D_{int}^{N} \times D_{int}^{100}$ (fig. 9) nos mostra que os valores de $\frac{D_{int}^{N}}{D_{int}^{100}}$ para t = 4 uc é 5,0 e para t = 10 uc é 9,1. Comparando-se com os resultados obtidos para $D_{int}^{N} \times D_{int}^{100}$ (fig.5) vemos que eles diferem cerca de 6%.

* Entende-se aqui por "especificações dos filmes de raio X" os detalhes técnicos desses filmes, tais como: sensibilidade, tamanho dos grãos de AgBr, espessura da camada de material fotossensível, "vida útil", etc... Chamamos de curvas carac terísticas à variação da razão sinal/ruído com a energia da cascata, com a profundidade e com as condições de armazenagem e exposição (tempo, temperatura, umidade, etc..).

- 23-

As correlações até aqui analisadas, sugerem que os filmes de raio X, tipos RR e 100 são equivalente. Para comprovarmos vamos construir as correlações entre os filmes de tipos RR e 100.

V.3.4 - Correlações entre os filmes de raio X tipos RR e 100.

O estudo das correlações entre os filmes de tipos RR e 100 ē anālogo aos realizados em V.3.2 e V.3.3.

A fig. 10 mostra as correlações entre as medidas de op<u>a</u> cidade nos filmes de raio X tipos RR (D_{RR}) e 100 (D_{100}). Os resultados obtidos mostram que os dois tipos de filmes são equivalentes. A razão $\frac{D_{RR}}{D_{100}}$ vale 1,25 para t = 10 uc e 1,16 para t = 4 uc.

A fig. 11 mostra a correlação entre D_{int}^{RR} e D_{int}^{100} cujos resultados indicam que a razão $\frac{D_{int}^{100}}{D_{int}^{RR}}$ é aproximadamente igual D_{int}^{RR}

a 1 tanto em t = 4 uc como em t = 10 uc.

Podemos concluir que os filmes tipo 100 são equivalentes aos de tipo RR pois, os resultados aqui obtidos confirmam os resultados obtidos nos itens anteriores quando comparamos os filmes tipos RR e 100 com os de tipo N.

- 74-

V.5 - Referências.

- M. Akashki et al "Observation of High Energy jets with Emulsion Chamber " - Prog. Theor. Phys., Sup. <u>32</u>, 67 (1964).
- 2. I.Ohta, A.Ohsawa et al "Characteristics Curves of Photome tric Material Used in Emulsion Chamber" - Nuc. Inst. Meth., <u>161</u>, 35 (1979).

- I.Ohata, A.Ohsawa et al - "Futher Study of the Photometric Method for Energy Determination of High Energy Cascade Showers Observed in the Emulsion Chamber" - Preprint, CKJ Report 10, Cosmic Ray Laboratory, University of Tokyo, 1974.

75-

Especificação do materíal fotossensível

, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	diametr	o mědio	esbessura da	espessura d
Material foto	dos grād	os (ະຫ)	emulsão (µm)	base (um)
grāfico	antes da	Após a		
	revelação	revelação		
filmes de Raio-X		and a second provide a se		
¢ bo N	- - - -	5,64	52	175
tipo R	0,53	1,43	50	175
tipe 100				175
ะพบไรลับ กนุ่ตโคลท				
14 14 10	0,26	0,94	0	1500





76



- 77 -



- 78 -



- 79 -







Fig. 11

VI. <u>Análise dos Pb-jatos/e comparação com gamas simples.</u>

VI.1 - Introdução.

Os Pb-jatos são chuveiros produzidos por interações hadrônicas ocorridas no chumbo. Nessas interações, ocorridas a alguns centimetros do detetor, os chuveiros estão sobrepostos, sendo indistinguiveis uns dos outros (o ângulo de abertura no sistema laboratorio é da ordem de 10⁻⁴ radianos). Por isso, n<u>u</u> ma primeira aproximação, os Pb-jatos e gamas simples não podem ser diferenciados uns dos outros.

O caminho livre médio de interação no chumbo é da ordem de 17 cm^(1,2,3,4) daí, a possibilidade de ocorrer interações sucessivas numa placa de chumbo é desprezível. O comprimento de radiação para um gama no chumbo é aproximadamente 0,57cm, isso faz com que a probabilidade de um chuveiro ser produzido por um gama após 3cm de chumbo seja menor que 1%. Desse modo, podemos, na prática, estabelecer uma profundidade limite para a deteção de gamas simples, de tal modo que qualquer chuveiro iniciado abaixo dessa profundidade limite é considerado como sendo um Pb-jato.

De acordo com os critérios adotados pela CBJ, os chuveiros iniciados abaixo de 5cm de chumbo são considerados Pb-jatos, e os que se iniciam antes são considerados gamas simples. É cl<u>a</u> ro que muitos desses gamas simples podem ser Pb-jatos^(2,4).

A fig.l indica a probabilidade dos raios gamas primārios e dos hadrons atingirem uma profundidade <u>t</u> sem interagir. Essa figura pode, também, ser interpretada como a distribuição dos po<u>n</u> tos de início dos chuveiros e, como podemos ver, as distribuições

- 82 -

para os chuveiros simples e para os chuveiros compostos é bem di<u>s</u> tinta^{*}. No início da câmara, isto é, a pouca profundidade, os <u>ga</u> mas tem maior probablidade de interagir enquanto que os Pb-jatos tem uma probabilidade bem menor. Já a profundidades maiores vemos que praticamente so existem hadrons, pois, todos os gamas foram absorvidos.

Dados recentes de simulação⁽⁵⁾ indicam que cerca de 30% do numero total de eventos nas primeiras camadas da câmara (tidos como gamas simples) são Pb-jatos.

Nessa região o problema de diferenciação e de suma impor tância na análise de eventos do tipo "Centauro"⁽⁶⁾ (onde ocorre a produção multipla de barions) e do,tipo "Geminion"⁽⁷⁾ (onde ocorre a produção de par de barions). Os eventos do tipo "Centauro" são detetados na câmara superior e na câmara inferior. Muitas dessas interações ocorrem logo nas primeiras camadas do detetor (portanto, acima da profundidade limite estabelecida pela CBJ) e de crucial importância distinguir se são gamas simples ou Pb-jatos.

* Se assumimos que:

N(t) x exp
$$(-\frac{t}{\lambda})$$

onde, N(t), \vec{e} o número de particulas na profundidade t e $\lambda \vec{e}$ o caminho livre médio de interação, então o que obtemos da reta \vec{e} o número de particulas sobreviventes a uma dada profundidade, isto \vec{e} , na profundidade t, temos: N(O) - N(t) particulas (N(O): número total de particulas).

- 83-

VI. 2 - Medida de energia dos Pb-jatos.

O procedimento experimental para o obtenção das medidas de ângulo e energia são as mesmas jã apresentadas no capítulo I.

Dentro de certas condições, podemos usar as mesmas curvas de transição tanto para gamas simples como para Pb-jatos mas, para certas faixas de energia algumas correções devem ser feitas^(3,8), entretanto, esse tema não serã abordado nesse trabalho.

Como os Pb-jatos são constituídos de cascatas eletromagnéticas superpostas, qualquer medida feita em cima da mancha deixada pelo evento estará substimada. No caso da medida de energia o valor obtido é chamado de "energia nominal" pois, está aquém do valor real. Quanto maior for a energia do Pb-jato maior será a diferença entre a energia real e a energia nominal. Pelos métodos experimentais em uso pela CBJ ainda não se tem idéia do valor do erro que se comete, entretanto, dados de simulação⁽³⁾ rev<u>e</u> lam que esse erro é da ordem de 20 a 30% (dependendo da faixa de energia).

A seguir serã feito um estudo comparativo entre as medidas de opacidade para γ e Pb-jatos. Para isso selecionamos γ s e Pb-jatos que tenham aproximadamente a mesma opacidade e o mesmo ângulo zenital.

VI.3 - Morfologia dos Pb-jatos.

VI.3.1 - Distribuição lateral.

A distribuição lateral dos eletrons de um Pb-jato pode ser aproximada pela distribuição de um gama simples^(8,9). O resul

- 84 -

tado numérico obtido mostrou que o erro nesta aproximação é desprezível a uma distância de 20 μ m ou mais do centro do chuveiro, desde que o chuveiro esteja próximo ao estágio de máximo de desenvolvimento.

Dentro dessa aproximação toda a formulação sobre a teoria de chuveiro poderia ser utilizada para Pb-jatos (chuveiros compostos). Assim, um Pb-jato com energia ΣE_{γ}^{*} e um chuveiro simples com energia $E_{0} = \Sigma E_{\gamma}$ podem ser tratados da mesma maneira. É poss<u>i</u> vel estabelecer correções que levem em conta a diferença existente entre chuveiros simples e compostos^(3,10). Observa-se que as cor reções são significativas para chuveiros de baixa energia (de 30 a 40%) pois, os chuveiros simples do Pb-jato se difundem mais rapid<u>a</u> mente do que um chuveiro simples semelhante ao Pb-jato.

VI.3.2 - Comportamento longitudinal.

Nas interações hadrônicas em que ocorre a produção de pions, hã a produção de cerca de 6 gamas (4,11), provenientes do decaimento dos π^0 's. Dos A-jatos e C-jatos, podemos ter uma ideia de como ocorre a distribuição de energia entre os diversos componentes desses "jatos" (fig.2). A energia do Pb-jato, sob a forma de gamas e distribuida entre os vários gamas que produzem chuveiros. Teremos então, diversos chuveiros "pequenos" iniciando e terminando em diversos pontos ao longo da trajetória. Assim se<u>n</u> do, o comportamento longitudinal do Pb-jato dependera, entre outras coisas, do seguinte:

* ΣE_{γ} : energia total liberada sob a forma de gamas na interação hadrônica.

a) como a energia do Pb-jato (sob a forma de gamas)e distribuida entre os vários chuveiros.

b) inicio de materialização dos diversos chuveiros

c) distribuição angular dos gamas que iniciam os vários chuveiros.

O processo de desenvolvimento longitudinal de um chuvei ro composto é diferente do processo de desenvolvimento de um chuveiro simples com mesma energia e mesmo angulo zenital.

Se pudessemos individualizar os chuveiros, provavelmente teriamos algo semelhante aos esquemas das fig. 3 e 4. Na fig. 3 temos o esquema dos chuveiros dentro da câmara. Na fig. 4 vemos os diversos chuveiros representados por suas curvas de transição. As fig. 3a e 4a correspondem a um gama simples e as fig. 3b e 4b a um Pb-jato.

Devido à flutuação na distribuição de energia entre os gamas do Pb-jato, pode ocorrer que Pb-jatos com energias e ângulos zenitais iguais apresentem desenvolvimentos distintos. Pode oco<u>r</u> rer que uma grande parte da energia , sob a forma de gamas, de um Pb-jato seja dada para um único gama, enquanto que a energia restante, distribuida para os demais gamas está abaixo do limiar mín<u>i</u> mo de deteção. O que se tem então, e um Pb-jato com característ<u>i</u> cas de gama simples. Além disso dois Pb-jatos, com energia e ângulo zenital iguais e mesma distribuição da energia podem apresentar desenvolvimentos diferentes, devido aos pontos iniciais de cada materialização dos gamas.

Esses dados levam a crer que um método de aprimorar a d<u>i</u> ferenciação de Pb-jatos e gamas simples deva levar em conta o comportamento longitudinal dos Pb-jatos, jã que os trabalhos realizados por membros da CBJ mostraram que a distribuição lateral dos Pbjatos e gamas simples não apresentam diferença significativa.

- 86 -

VI.4 - Análise dos Pb-jatos e comparação com chuveiros simples.

VI.4.1 - Método experimental.

Usamos a fotomicrodens-itometria para estudar as caract<u>e</u> rísticas dos Pb-jatos (chuveiros compostos). Foram feitas dive<u>r</u> sas medidas de opacidade usando seis tamanhos diferentes de fendas (Tabela I).

As medidas foram feitas em filmes-de raio X tipo N que teve a "parte de baixo" removida. Percorremos a mancha deixada pelo chuveiro paralelamente a direção de incidência e determinamos os valores D e D_{int}a cada profundidade. O fundo foi medido nas proximidades do evento.

As medidas feitas com diversas fendas nos permite obter a variação da distribuição lateral dos eventos ao longo de sua trajetória. As fendas nºs 1,2 e 3 são consideradas pequenas, sendo em alguns casos menores que a mancha deixada pelos eventos (o tamanho da mancha está associado à energia do chuveiro). A fenda nº 6, a maior delas, pode ser considerada grande (maior que o raio crítico estabelecido por Ohta⁽⁸⁾).

Primeiramente selecionamos um conjunto de Pb-jatos (ca<u>s</u> catas que começam depois de 10 uc) e um conjunto de gamas simples. As amostragens abrangeram diversas câmaras procurando assim, de<u>s</u> caracterizar possíveis influências das condições de exposição a que cada câmara está sujeita.

Para tentarmos identificar as diferenças existentes entre os Pb-jatos e gamas simples comparamos eventos (Pb-jatos e gamas simples) de mesma energia e mesmo ângulo zenital, ou ainda, de mesma opacidade. Quando falamos de energia, entende-se que ē

- 87 -

o valor da energia do chuveiro obtido pelo"metodo de contagem de traços".

As figs. 5 e 6 mostram, para Pb-jatos e gamas simples, as medidas de opacidade numa mesma camada realizadas com várias fendas (fig.5) e as medidas em todas as camadas da câmara, com uma mesma fenda (fig.6).

As retas foram traçadas pelo metodo dos minimo quadrados⁽¹²⁾.

No estudo comparativo de Pb-jatos e gamas simples real<u>i</u> zamos medidas também com C-jatos pois, suas características são semelhantes às dos Pb-jatos. As medidas de opacidade com fenda pequena tiveram que ser realizadas com muito cuidado pois, há mu<u>i</u> tas dificuldades para analisarmos os C-jatos de alta energia e/ou grande multiplicidade.

VI.4.2 - Anālise.

Primeiramente, medimos cada mancha deixada pelo evento ao longo de sua trajetória pela câmara. Essa técnica foi escolhida para observarmos uma possível estrutura nas manchas dos Pbjatos. A primeira vista pareceu-nos que poderíamos obter resultados, entretanto, as flutuações nas medidas devido as caracterís ticas dos Pb-jatos mostraram que as diferenças entre Pb-jatos e gamas simples e mesmo entre C-jatos não eram significativas.

Construimos as curvas de transição para 6 tamanhos diferentes de fenda (fig. 7), a seguir, procuramos observar o espalh<u>a</u> mento lateral dos chuveiros ao longo da trajetoria, isto e, proc<u>u</u> ramos observar a distribuição lateral dos chuveiros em função de

- 88 -

<u>t</u>. Para tanto, tomamos a diferença de opacidade medida com duas fendas diferentes. Sejam $D_i \in D_{i+1}$ as opacidades medidas com as fendas nºs <u>i</u> e <u>i+1</u> respectivamente, então, a diferença de opacidade (ΔD) serã o valor $D_i - D_{i+1}$. Os resultados obtidos estão na fig.8. O valor de ΔD pode ser melhor entendido se olharmos a fig. 9. Ele corresponde a medida de opacidade realizada na area assombreada.

Normalizando os inícios de Pb-jatos e gamas simples, po demos comparar mais precisamente as curvas de transição. Tom mos o D_{max} de cada evento e a profundidade correspondente. Com o início normalizado, construímos a correlação D_{max} x t para Pbjatos e gamas simples (fig. 10) para determinado ângulo zenital, de modo que podemos constatar que os Pb-jatos "demoram" mais para atingir o maximo. Teoricamente esse resultado era esperado,pois os chuveiros nos diversos estágios de desenvolvimento atingem o māximo a diferentes profundidades, essas contribuições se somam e dão a opacidade total do chuveiro composto. Se todos os chuveiros simples de um Pb-jato iniciassem numa mesma profundidade, os Pb-jatos chegariam ao máximo mais rápido que os gamas simples⁽¹³⁾. Para ilustrar, suponhamos que um Pb-jato seja produzido através de um estado intermediário ("bola de fogo mirim") onde há a produção de cerca de 6 gamas com energia total ΣE_{γ} ; em média, cada gama inicial tem energia da ordem $\frac{\Sigma E_{\gamma}}{6}$. Construímos uma curva de transição para um chuveiro simples com energia $E_0 = \Sigma E_{\gamma}$ e outra para um chuveiro simples com energia $\frac{\Sigma E_{\gamma}}{6}$, ambas iniciando numa mesma profundidade (fig. 11). Se os 6 chuveiros de energia $\frac{\Sigma E_{\gamma}}{\Gamma}$ iniciarem numa mesma profundidade teremos um chuveiro composto de energia ΣE_{γ} com o máximo a mesma profundidade que o de energia $\Sigma E_{\gamma}^{\prime}/6$ e, portanto, antes que o chuveiro simples com energia E_{ρ}^{\prime}

```
- 89-
```

(fig. 11). Entretanto, não é isso o que ocorre.

Como podemos ver, os resultados da fig. 10 mostram que e<u>s</u> se método de diferenciação entre Pb-jatos e gamas simples é razoavelmente bom para eventos com energia acima de 20 TeV. Na faixa de mais baixa energia, 3 < E /TeV < 15, justamente a de maior número de Pb-jatos, não é possível uma identificação segura. Nessa região, muitos gamas de um Pb-jato podem estar abaixo do limiar de deteção fazendo com que apenás um ou dois dos gamas produzidos sejam registrados, o que darã características de chuveiro simples ao Pb-jato. Além disso, vários chuveiros classificados como gama simples podem ser na verdade Pb-jatos, contribuindo assim para aumentar a flutuação nessa região. Na região de mais alta energia a probabilidade de classificarmos erroneamente os eventos é menor. Pb-jatos de grande energia, so ocorrem a grandes profundidades.

As correlações entre densidade de opacidade $\left(\begin{array}{c} D\\ S\end{array}\right)$, onde <u>S</u> é a área da fenda) e a área da fenda (fig. 12) mostram como Pbjatos e gamas simples variam com o tamanho da fenda. A curva o<u>b</u> tida pode, aproximadamente, ser decomposta em duas retas que mostram mais claramente o comportamento do chuveiro. Evidentemente, os coeficientes angulares dessas retas dependem da energia e do â<u>n</u> gulo de incidência do chuveiro.

A distribuição lateral ao longo da direção de incidência do Pb-jato deve ser diferente da de um gama simples. Foi pensa<u>n</u> do nisso que construímos a correlação entre a densidade da variação de opacidade e a variação de área da fenda. Entende-se aqui por densidade da variação de opacidade a razão $\Delta D/\Delta S$ onde $\Delta S =$ $= S_{i+1} - S_i$ é a variação de área (S_i representa a área da fenda nº i). A parte em destaque na fig. 9 representa a área ΔS onde se obtem a medida ΔD . Os resultados obtidos podem ser vistos na fig. 13.

- 90 -

Considerando agora as medidas de D_{int}, cujo método foi desenvolvido no capítulo anterior, construímos as correlações D_{int} x t para Pb-jatos, gamas simples e C-jatos. Essas correlações são equivalentes ãs curvas de transição. Os resultados obtidos podem ser vistos na fig. 14. Realizamos essa análise apenas com um tamanho de fenda, o menor deles pois, possíveis estruturas na mancha poderiam ficar destacadas.

Integramos as manchas deixadas pelo evento nas diversas camadas da câmara e superpomo-las de modo que um dado valor x p<u>a</u> ra o qual a opacidade é máxima e a fenda em cada profundidade coincidissem. A fig. 15 mostra os resultados obtidos. Esse mé todo pode dar bons resultados se temos uma ótima resolução na e<u>s</u> trutura dos chuveiros compostos pois, nesse caso mesmo que o sinal seja pequeno, haverá uma integração de pequenos sinais em t<u>o</u> das as profundidades e ficarão mais destacados, enquanto que fl<u>u</u> tuações devidas ao fundo serão canceladas, por serem ora acima ora abaixo do ruído normalizado.

Como podemos notar, a viabilidade do método depende da capacidade de resolução do filme de raio-X. Na fig. 15 podemos ver também os resultados obtidos com a integração dos valores de D_{int} ao longo do eixo x.

Integrando as medidas de D_{int} em cada profundidade obt<u>e</u> mos também a opacidade total do chuveiro (ou seja, o número total de eletrons produzidos no chuveiro). Seja $D_{int}(t)$ a opacidade integrada na profundidade t, então, a opacidade total do chuveiro é dada pela expressão $D_t = \sum_{t} D_{int} {t \choose t}$. Os resultados obtidos dependem da energia e do ângulo zenital do chuveiro. No<u>r</u> malizando D_t e o início dos diversos chuveiros de energia difere<u>n</u> te porém, com ângulo zenital semelhante, cujos resultados na fig.

- 91-

16, mostram que os Pb-jatos desenvolvem-se mais lentamente que os gamas simples. Esses resultados coincidem com os da fig. 10. O processo de desenvolvimento de um C-jato é intermediário ao do Pbjato e do gama simples. Embora, esse método ainda tenha regiões onde a identificação de Pb-jatos e gamas simples seja mais difícil, ele dã uma imagem maior de segurança na identificação mesmo considerando as flutuações inerentes ao comportamento do Pb-jato.

Aplicamos a correlação D x D_{int}, desenvolvida no capit<u>u</u> lo anterior para filmes de raio X tipo N, para auxiliar a ident<u>i</u> ficação dos Pb-jatos. Os resultados obtidos (Fig. 17) não são significativos pois hã uma diferença da ordem de 10% entre o**s** Pbjatos e gamas simples, que estã dentro dos erros das medidas experimentais. Se hã alguma diferença nessas correlações a distr<u>i</u> buição lateral dos Pb-jatos seria diferente da dos gamas simples, tal fato jã foi estudado pelas ref. 8 e 9, cujos resultados mostraram que a distribuição lateral dos Pb-jatos é semelhante a chuveiros simples. As correlações da fig. 17 podem ser consideradas como confirmação daqueles resultados.

VI. 5 Conclusões.

Desenvolvemos aqui alguns métodos com o objetivo de enco<u>n</u> trarmos as diferenças significativas entre os chuveiros simples (gamas simples) e compostos (Pb-jatos). Tais métodos não aprese<u>n</u> taram resultados significativos, isto é, as correlações construi-

- 92 -

das foram insuficientes para fazer uma identificação segura dos dois tipos de chuveiros.

Consideramos que os resultados obtidos não foram signif<u>i</u> cativos por causa, essencialmente, dos seguintes motivos:

a) Contaminação das amostras: <u>P</u>ara estudarmos as características dos chuveiros simples e compostos coletamos uma amostragem desses eventos. Essa amostragem não é totalmente confiável porque a amostragem de gamas simples pode conter também Pb-jatos. Dados de simulação indicam que essa contaminação é da ordem de 30%⁽⁵⁾.

b) Distribuição de energia sob a forma de gamas: A energia do Pbjato, sob a forma de gamas, é distribuida aleatoriamente entre os vários gamas que produzem chuveiros. Dependendo dessa distribui ção podemos ter praticamente toda essa energia distribuída para um gama, então, teremos Pb-jatos com características de gama simples que podem também contaminar os resultados.

c) Baixo número de eventos e grandes flutuações: Os diversos métodos de fotomicrodensitometria que foram estudados exigem um si<u>s</u> tema de medidas bastante longo e trabalhoso, ou seja, para um determinado evento temos diversas camadas de chapas de raio X (ao longo do desenvolvimento do chuveiro) preparadas^{*} daí, fazemos a fotometria com seis tamanhos diferentes de fendas em cada profundidade (um filme de raio X para cada profundidade; em média, cada chuveiro é detetado em \sim 5 chapas de raio X), analisamos as curvas obtidas e construímos as diversas correlações já apresentadas.

-93-

^{*} A preparação das chapas de raio X consiste em remover uma das camadas do filme fotográfico.

d) Resolução dos filmes de raio X: A tentativa de observarmos uma eventual estrutura das manchas dos eventos depende fundamental mente da resolução dos filmes de raio X. São utilizados os filmes de raio X tipo N por serem bastante sensiveis mas o tamanho dos grãos de AgBr desse filme não permite uma boa resolução. 0 s filmes de raio X tipo RR e 100 permitem uma resolução melhor (os grãos são menores) porém com menor sensibilidade. Na nossa anālise escolhemos o filme de alta sensibilidade para podermos detetar informação de maior número possível dos componentes do chuvei Usando filmes menos sensíveis estaríamos detetando ro composto. menos gamas do chuveiro composto, tomando-o assim mais semelhante ainda a cascata simples. Existem, entretanto, alguns métodos que são eficientes na diferenciação entre Pb-jatos e gamas simples Como é o caso do metodo da em apenas algumas faixas de energia. fig. 10 onde vemos que os Pb-jatos "demoram mais" que os gamas simples para atingirem o máximo da cascata porém, uma identificação segura so é possível para eventos com energia acima de 15 TeV. Já a correlação da fig. 16 amplia a possibilidade de identificação persistindo porém, a dificuldade na faixa de mais baixa energia. Ambas as correlações indicam que os chuveiros simples se desenvol vem mais rapidamente que um Pb-jato de mesma energia e mesmo ângu lo zenital e so podemos usá-las com precisão em eventos de mais alta energia.

-94-

Referências.

- 1. C.M.G. Lattes "Observações sobre a componente eletromagnéti ca de alta energia $(2x10^{11} < E/eV < 10^{14})$ da radiação cosmica através do estudo de cascatas eletromagnéticas detetadas em câmaras de emulsão fotográfica e chumbo, expostas no Laborat<u>ó</u> rio de Física Cósmica de Chacaltaya (5200m de altitude) - "T<u>e</u> se de Cátedra, apresentada à USP, 1966
- 2. M.Luksys "Caminho livre médio de hadrons de alta energia da radiaçao cosmica para a produção multipla de jatos em chumbo" Tese de Mestrado apresentada à UNICAMP, 1976
- 3. C.Santos "Estudo de cascatas eletromagnéticas detetadas em câmaras de emulsões nucleares e chumbo expostas a 5220m de al titude e morfologia da radiação cósmica".- Tese de Doutoramen to apresentada à UNICAMP,, 1972.
- Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "Chacaltaya Emul sion Chamber Experiment" - Prog. Theor. Phys., Sup. <u>47</u>, 1, (1971).
- 5. M.B.C. Santos, A.Turtelli Jr. -"H.Quantum simulation of the high energy nuclear interactions detected by Chacaltaya emulsion chamber" - Proc. 16th Int. Conf, on Cosmic Ray, Kyoto (Japan), 6, 274 (1979).
- 6. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "A new type of nuclear interactions in the $\Sigma E_{\gamma} > 10^{14}$ eV region" Proc.Int. Conf. on Cosmic Ray, Kyoto (Japan), 6, 356 (1979).
- 7. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "Baryon pair production with large decay Q-value" - Proc.Int. Conf. on Cosmic Ray, Kyoto (Japan), 6, 350 (1979).

- 8. I. Ohta "Photometric method in energy determination of cosmic ray showers in emulsion chamber" - Prog. Theor. Phys., Sup.<u>47</u>, 271 (1971)
- 9. S.Dake "On the measurement of energy flow Pb-jets" notas mimeografadas - Kobe University (Japan), 1964
- 10. S.Dake "Cascade shower originated in jet_shower" Proc. 14th Int. Cosmic Ray Conference (Munchen, Germany), <u>7</u>, 2670 (1975)

- S.Dake et al - "Cascade shower induced by 400 GeV proton in the emulsion chamber" - Proc. 15th Int. Cosmic Ray Conference (Plovdiv, Bulgaria), 7, 322 (1977).

- 11. Brasil-Japan Emulsion Chamber Collaboration "Multiple meson production in $\Sigma E_{\gamma} > 2.10^{13}$ eV region" - Proc.Int.Conf. on Cosmic Ray, Kyoto (Japan), 6, 362 (1979).
- 12. R.J.Wonnacott, J.H.Wonnacott "Introductory Statistcs" -John Wiley, New York, 1969.
- 13. A. Ohsawa, comunicação particular, 1979

- 96 -

TABELA 1

fenda (n	92) do fotomic (quadrada)	equivale a uma fenda circular	
NQ	lado (ym)	ären (1107 2)	de raio (µm)
	36	1,3 x 10 ³	20,3
2	60	$3,6 \times 10^3$	33,9
. 3	100	10,0 x 10 ³	56,4
4	144	20.7×10^3	81,2
5	168	$28,2 \times 10^3$	94,8
1 6	200	40.0×10^3	113

Y.

A









- 98-

Fig. 2





- 99 -



Fig. 6.B



- 100 -



-101-



t (uc)



A ârea sombreada na figura corresponde à diferença de opacidade entre as duas Me<u>n</u> das



- 102 -



- 103 -



104-6,000



- 105 -

- 106 -

Resumo

A Colaboração Brasil-Japão (CBJ) usa as medidas de opaci dade óptica (fotodensitometria) para estudar algumas característi cas das interações hadrônicas induzidas pela radiação cósmica. São usadas câmaras de foto-emulsão e chumbo separadas por uma camada de piche (alvo) e montadas no alto do Monte Chacaltaya (5220 m acima do nível do mar). Comparando-se o desenvolvimento longi tudinal de uma cascata eletromagnética simples (ver texto) com o de cascatas compostas (Pb-jatos) conclui-se que é possível uma di ferenciação entre essas cascatas desde que a energia seja acima de 15 TeV. Paralelamente estudam-se as curvas características dos diversos filmes de raio-X utilizados nas câmaras da CBJ.

Abstract: Photodensitometry in the study of photoelectronic cascade.

Huge multilayered photo-emulsion lead chambers are assembled by Brasil-Japan Collaboration at M. Chacaltaya (Bolivia, 5220m a.s.l.) for detecting the products of hadronic interactions in the atmosphere or in the chamber itself. Photodensitometry is the method used by our Collaboration to determine the energy and to study the lateral and longitudinal characteristics of photoelec tronic cascades and hadronic interactions induced by cosmic radiation. In order to distinguish between single and composed cascade showers we analyse hereafter some characteristics of their longi tudinal structure; according to our method we are able to distinguish between them, under certain boundary conditions.

-107-

Indice das Figuras

	17
	17
1. Evolução das câmaras de emulsão nuclear e chumbo da CBJ	
2. Evolução dos aceleradores de particulas	
3. Camara de Emulsão Nuclear e Chumbo	
4. Esquema das Interações Hadrônicas detetadas pela câmara	
5. Exemplos de traços de chuveïros registrados em emulsões e	
em filmes de raio X	
Capitulo II	30
l. Esquema de formação de um chuveiro foto-eletrônico	
2. Curvas de transição teórica e uma experimental	
3. Curva de calibração	
4. Distribuição lateral dos eletrons num chuveiro	
	48
1. Estrutura cristalina do AgBr	
2. Esquema de formação da imagem fotografica	
3. Energia perdida por ionização x Energia cinetica da parti-	
cula (em unidades de massa de repouso)	
4. Energia perdida por ionização x Energia cinética da parti-	
CUIA *	
Capītulo IV	60
l. Esquema do Fotomicrodensitometro	•
2. Exemplos de medidas obtidas com o fotomicrodensitometro	
3. O ruído nos filmes de raio X em função da profundidade	
4. Curvas de transição experimentais para diversas fendas	
5. Curva de calibração (opacidade x densidade de eletrons)	
6. Curvas de transição teóricas	
7. Curva de calibração (opacidade x energia)	
8. Corte lateral de um filme de raio X	
9. Medidascom filme de raio X com duas camadas (A) e com uma	
camada (B)	
10. Curvas de transição	
11. Medidas de opacidade D ₁ ×D ₂	
12. Medidas da razão D_2/D_1 em função da tg θ	
13. Medidas da razão D ₂ /D ₁ em função da energia	
14. Medidas de fotomicrodensitometria com fendas pequenas	
Capitulo 76 1. Correlação D_N x D_{RR} 2. Correlação $D_N \times D_{RR}^{(2)}$ obtida por I.Ohta⁽²⁾ 3. Correlação D x D_{int} para filmes de raio X tipo N 4. Correlação D x D para filmes de raio X tipo RR 5. Correlação D^{RR} x D^Nint 6. Curvas de transição (Dxt e D_{int} x t) 7. Correlação D_N × D₁₀₀ 8. Correlação D x D para filmes de raio X tipo 100 9. Correlação D_{int}^{N} x D int10. Correlação D_{RR} × D₁₀₀ 11. Correlação D_{int}^{RR} x D_{int}^{100} Capitulo VI 97 1. Distribuição dos inícios de visuálização dos eventos 2. Distribuição da energia fracionária 3. Esquema de chuveiro simples e composto 4. Esquema das curvas de transição para chuveiros simples e com compostos 5. Medidas de fotomicrodensitometria para vārias fendas 6. Medidas de fotomicrodensitometria para vārias profundidades 7. Curvas de transição 8. Variação da opacidade em função da profundidade 9. Esquema da técnica usada para medirmos a variação da opacida de 10. Correlação D_{max} x t 11. Esquemas suposto de curvas de transição para Pb-jatos 12. Correlação ∆D/S x S 13. Correlação ∆D/∆S x ∆S 14. Correlação D_{int} x t 15. Correlações $D_{int} \times \times e^{-\Sigma D_{int} \times \times}$ 16. Correlação $\Sigma D_{int}(t) \times t$ 17. Correlação D_{max} x O int

- 109 -