

RELATÓRIO FINAL  
F 590 - Iniciação Científica I

Relatório Elaborado em 10/06/2005

Aluno:

Walan Cesar Grizolli RA 017582  
Curso: Bacharelado em Física, IFGW/UNICAMP

Orientador:

Prof. Dr. Anderson Campos Fauth  
Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP

Título:

Estudo de chuveiros atmosféricos extensos para calibração do tanque Auger



## Resumo do projeto inicial

Estudo da física de raios cósmicos de altas energias,  $E_0 > 10^{14}$  eV através de livros e artigos científicos atuais. Após esta fase têm início as atividades experimentais que são realizadas no laboratório de Léptons do IFGW. São utilizados doze detectores de partículas construídos com placas de cintilador plástico de  $100 \times 80 \times 2,5$  cm<sup>3</sup>. Estes detectores cobrem uma área de aproximadamente  $20 \times 20$  m<sup>2</sup> e detectam chuviros atmosféricos extensos -CAE's. Com medidas de tempo, carga e contagem das partículas dos CAE's será realizada a reconstrução de eventos. A obtenção das características (direção de chegada e função de distribuição lateral de partículas carregadas) de cada CAE permitirá estudar a resposta do tanque Auger que está instalado na parte externa do laboratório e dentro da área coberta pelos cintiladores. Este tanque, idêntico aos instalados no Observatório P.Auger (Argentina), usa 12000 litros de água (1,2 metros de altura, 10 m<sup>2</sup> de base) aonde as partículas produzem luz Cerenkov.

## Resumo do cronograma de trabalho inicial

1ª etapa: **Introdução à física dos raios cósmicos e CAE's** - estudo da bibliografia sobre experimentos de raios cósmicos e instrumentação para física de altas energias. Física de raios cósmicos de altas energias ( $E_0 > 10^{14}$  eV, composição primária, espectro de energia, interação de partículas com a matéria, desenvolvimento longitudinal e lateral de CAEs) Neste item serão utilizados livros e artigos científicos disponíveis na biblioteca do IFGW (<http://www.ifi.unicamp.br/bif>). Referências: [1] a [3];

2ª etapa: **Técnicas experimentais de altas energias** - estudo dos detectores do EASCAMP, uso de eletrônica rápida (ns), lógica de disparo (*trigger*) da eletrônica, códigos de aquisição de dados (sistema NIM, CAMAC e GPIB), formato de registro dos dados brutos, calibração da leitura de tempo e carga. Serão utilizadas as instalações do laboratório de Léptons do DRCC/IFGW (bastidores NIM, CAMAC, módulos TDC, ADC, Scaler, fontes alta voltagem, osciloscópios digitais, ferramentas). Referências: [4] a [6];

3ª etapa: **Análise dos dados registrados de CAE's** - determinação da **direção de chegada** e centro do CAE. Estudo das técnicas de reconstrução de CAE's (tempo de voo). Referências: [2], [7],[8];

4ª etapa: determinação do **tamanho do chuviro** e densidade de partículas em função da distância ao centro do CAE. Função de distribuição lateral Nishimura-Kamata-Greisen da teoria de cascata eletromagnética. Referências: [2], [9]

5ª etapa: **Determinação das partículas incidentes no tanque-teste** -determinação da direção de chegada e densidade de partículas no **tanque-teste**;

6ª etapa: **Conclusão do plano de pesquisa** - análise dos resultados e preparação de material para apresentação em congresso e relatório final.

## Resumo das atividades realizadas

O projeto foi iniciado com o estudo da biografia e, apesar de termos planejado um período de dois meses para essa etapa, o estudo está ocorrendo de modo contínuo durante a execução do projeto.

Os assuntos estudados e as referências utilizadas foram:

- I. Introdução ao estudo de radiação cósmica, chuviros atmosféricos extensos e experimentos de detecção de raios cósmicos. Referências [1] e [2].
- II. Aprofundamento no estudo de chuviros atmosféricos, tratamento matemático do fenômeno, estudo da função de distribuição lateral de partículas, desenvolvimento lateral e longitudinal do CAE. Referências [2], [3] e [4].
- III. Passagem de radiação pela matéria. Referências [5], [6] e [10].
- IV. Processo de cintilação e características gerais dos detectores. Referências [5] e [6].
- V. Métodos de determinação da direção de chegada do CAE. Referências [7], [8] e [9].
- VI. Guias de referência de linguagem de programação. Referências [11] e [14].

Os dois primeiros assuntos referem-se ao estudo da fenomenologia dos CAE's e dos modelos físicos que descrevem o fenômeno.

Os assuntos II e III dizem respeito ao estudo e entendimento dos métodos de detecção de radiação.

Sobre os dois últimos itens não foi feito um estudo sistemático das referências, sendo estas utilizadas como guias de trabalho.

Após a fase de estudo, demos início à fase de aprendizado dos métodos experimentais. Esta fase ocorreu simultaneamente à reativação do experimento, que se encontrava fora de atividade e necessitava de uma nova calibração. Esta fase foi executada juntamente com o pesquisador Dr. Helio Nogima. Esta calibração/reativação consistiu em medir os atrasos intrínsecos e a relação carga integral do sinal do detector por partícula que o atravessa.

Também durante o período fui responsável pela operação e manutenção do experimento, fazendo com que ele operasse pelo maior tempo possível e solucionando os problemas apresentados durante o período contando com a participação dos pesquisadores do grupo.

Sendo a operação do experimento através de programas computacionais, desde esta fase teve início o processo de familiarização com a linguagem C++ e ROOT [11] que será necessária para a futura análise de dados e que, até o momento, foi o processo no qual tive maior dificuldade. Aprendi a utilizar a linguagem *bash* e elaborei um código que transfere automaticamente os dados adquiridos do computador da aquisição para o computador aonde são realizadas as análises dos dados.

Finalmente demos início ao estudo dos métodos de caracterização de CAE's. Iniciando, como planejado, com o método de tempo de voo para determinação da direção de chegada da frente de partículas do CAE.

# Desenvolvimento do projeto

## Introdução

O projeto desenvolvido baseia-se em um trabalho de estudo, detecção e caracterização de chuviros atmosféricos extensos (CAE's) com energias acima de  $10^{14}$ eV.

Nesse trabalho utilizam-se detectores de partículas que são constituídos por placas de material cintilador e fotomultiplicadoras acomodados em uma estrutura que os mantém isolados da luz externa.

Todo detector de partícula é baseado nas reações que ocorrem entre radiação e matéria e o efeito produzido por essas reações. Por isso é necessário conhecer estes processos para entender o funcionamento dos detectores.

Porém, esses processos também podem causar interferência na medida do detector por distúrbio no estado físico da radiação, como por exemplo: causando perda de energia da radiação ou desviando a partícula de seu caminho original.

Portanto, o conhecimento destes processos é de suma importância para o desenvolvimento e utilização de um detector.

Alem de conhecer o detector utilizado é necessário que se conheça ao máximo os fenômenos que estamos estudando e os métodos para caracterizá-los.

Portanto, antes de descrever as atividades experimentais realizadas, farei uma síntese sobre os tópicos e as informações mais relevantes para o desenvolvimento do projeto: a radiação cósmica, os chuviros atmosféricos extensos, passagem da radiação pela matéria, processos de cintilação e o método de tempo de vôo, que é necessário para caracterizar a direção de chegada do CAE. A seguir darei início à descrição do experimento e das atividades experimentais.

## Raios cósmicos

Partículas de raios cósmicos se chocam contra a atmosfera terrestre com uma frequência de 1000 partículas/m<sup>2</sup>seg. Elas são núcleos ionizados (~90% prótons, ~9%partículas alfa e o restante são núcleos pesados, veja a Tab.1) e se destacam pela sua alta energia. A maioria dos raios cósmicos são relativísticos e alguns chegam a ser ultra-relativísticos, com energia superior a  $10^{20}$ eV (fig 1).

<i>Z</i>	<i>Elemento</i>	Fluxo
1	H	540
2	He	26
3-5	Li-B	0,40
6-8	C-O	2,20
9-10	F-Ne	0,30
11-12	Na-Mg	0,22
13-14	Al-Si	0,19
15-16	P-S	0,03
17-18	Cl-AR	0,01
19-20	K-Ca	0,02
21-25	Sc-Mn	0,05
26-28	Fe-Ni	0,12

**Tabela 1 – Abundância relativa *F* de raios cósmicos à 10,6GeV/nucleon normalizado para o oxigênio(=1). O fluxo de oxigênio à energia cinética de 10,6GeV/nucleon é  $3,26 \times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} (\text{Gev/nucleon})^{-1}$ .**

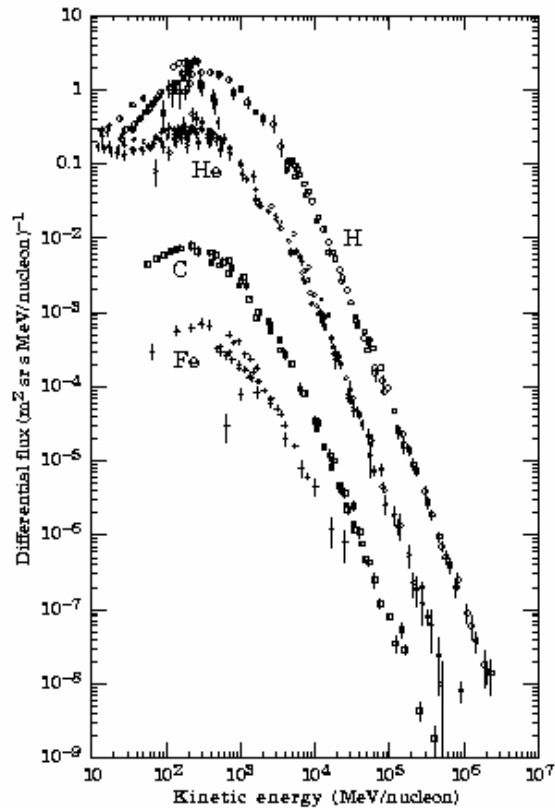


Figura 1 – Espectro de energia de alguns componentes da radiação cósmica primária

## Chuveiros Atmosféricos Extensos – CAE's

O nome Chuveiros Atmosféricos Extensos é usado para identificar a cadeia de eventos que é iniciada por uma partícula de energia ultra-relativística que interage com as moléculas da alta atmosfera.

Os produtos da primeira interação (partícula primária  $\Rightarrow$  molécula de ar) movem-se praticamente na mesma direção do primário dando origem a uma cascata de outras interações podendo atingir um número de produtos (os chamados secundários) superior à  $10^6$  partículas.

Esses secundários também são partículas relativística ( $v_{\text{partícula}} \sim c$ ) e formam um disco (na realidade uma calota) de partículas que chegam praticamente ao mesmo tempo sobre um plano perpendicular à direção de chegada do primário (o chamado eixo do chuvaire).

Enquanto os secundários, de um CAE iniciado por um raio cósmico de  $10^{15}$  eV, se propagam pela atmosfera eles são “espalhados” em torno do eixo até distâncias da ordem de 100 m, cobrindo uma área circular de  $\sim 100\text{m}^2$  com maior densidade de partículas no centro.

Das partículas presentes nos CAE's, em media 95% são elétrons-pósitrons e fótons,  $\sim 4\%$  são múons e apenas  $\sim 1\%$  são hádrons (partículas que sofrem ação da força forte).

A primeira colisão produz em sua maioria mésons pi neutros e carregados ( $\pi^0$ ,  $\pi^+$  e  $\pi^-$ ), apesar de também produzir hádrons (K-méson, prótons, nêutrons e suas antipartículas). O número médio de partículas produzidas nessa interação depende da energia do primário e do parâmetro de impacto.

A distribuição angular da trajetória do secundário é extremamente estreita devido à

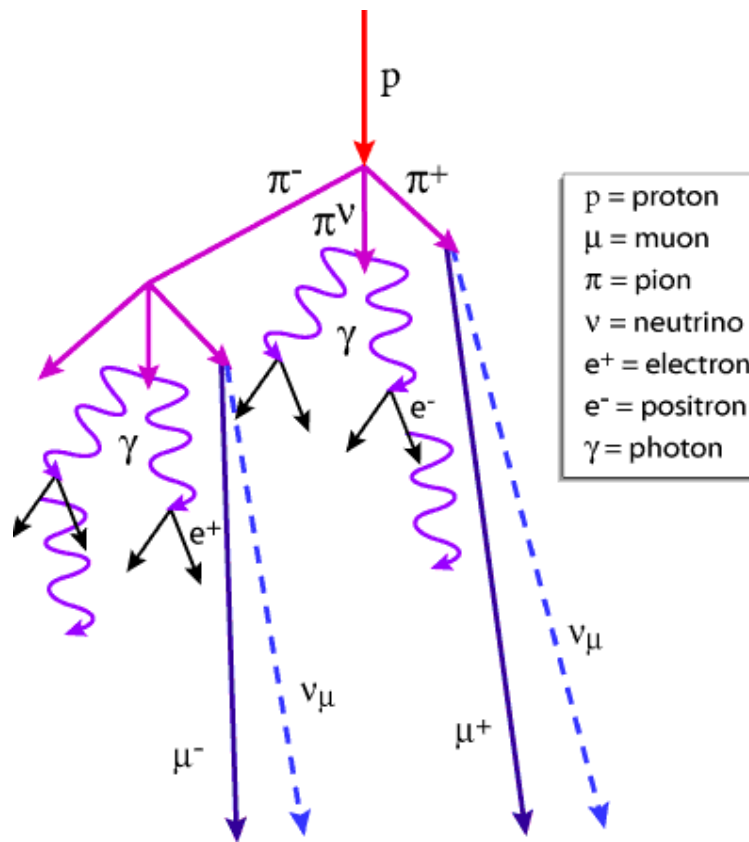


Figura 2 – Representação de um chuveiro atmosférico extenso e seu componentes

alta velocidade do centro de massa ( $\Theta \sim 5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ).

A energia dos secundários é, em média, menor que a do primário por um fator 3, sendo que a colisão não é fortemente inelástica.

O desenvolvimento seqüente da produção de partículas depende de seus respectivos tempos de meia-vida  $\tau$  e tipo de interação.

$\Rightarrow$  as partículas com  $\tau < 10^{-9}$  em geral decaem antes de interagirem com as moléculas de ar, transferindo toda sua energia para os produtos do decaimento;

$\Rightarrow$  as partículas com  $\tau > 10^{-9}$  irão produzir novas interações no ar e propagar uma cascata de interações hadrônicas (a cascata hadrônica).

A parte central da cascata hadrônica é o centro do chuveiro e contém as partículas mais enérgicas, sendo responsável pela propagação do chuveiro. Entre as partículas criadas nas interações hadrônicas, o  $\pi^0$  representa de 20 a 30% dessas partículas e que, devido ao seu breve tempo de meia-vida ( $\sim 10^{-15}$  seg), rapidamente decai em seu principal canal de decaimento (98% dos  $\pi^0$  decaem dessa forma):

$$\pi^0 \Rightarrow \gamma + \gamma$$

Esses  $\gamma$  geram o que é conhecido como cascata eletromagnética (CEM): uma produção sucessiva de pares de elétrons e fótons de *bremsstrahlung*.

A CEM é mais desenvolvida do que a cascata hadrônica e na superfície da Terra os elétrons e fóton no chuveiro são mais abundantes do que os hádrons por um fator 20.

Os mésons  $\pi^0$  e boa parte dos  $K^0$  que decaem antes de interagir originam os mésons  $\mu$  que, devido sua pequena seção de choque e longo tempo de meia-vida ( $\sim 2 \times 10^{-6}$  s), praticamente atravessam a atmosfera sem interagir e sem sofrerem distúrbios e que correspondem à cerca de 10% do número de elétrons do CAE.

Devido a predominância numérica dos elétrons e fótons em um chuveiro, um CAE pode ser interpretado e descrito como uma cascata eletromagnética.

Para isso, os processos hadrônicas que normalmente originam o CAE, são

desconsiderados e o chuvaire pode, em primeira aproximação, ser tratado como uma cascata eletromagnética.

## Passagem de partícula pela matéria

### **Perda de Energia de Partículas Carregadas**

Em geral dois aspectos caracterizam a passagem de partícula carregada pela matéria: a perda de energia da partícula e a deflexão da partícula de sua direção incidente. Estes efeitos são consequência principalmente de dois processos:

- 1) colisão inelástica com elétrons atômicos do material;
- 2) espalhamento elástico com o núcleo.

Mas estes processos não são os únicos processos que podem ocorrer. Há também a emissão de radiação Cerenkov, as reações nucleares e a radiação de *bremstrahlung* (freimento), que são processos raros em comparação aos primeiros.

Dos dois processos eletromagnéticos citados, a colisão inelástica é praticamente a única responsável pela perda de energia da partícula na matéria. Nessas colisões ( $\sigma = 10^{-17} \text{ cm}^2$ ) a energia é transferida da partícula para o átomo causando uma ionização ou excitação deste átomo. A energia transferida em cada colisão é geralmente uma fração muito pequena da energia cinética total da partícula, no entanto, uma partícula que atravessa um material denso sofre um número tão alto de colisões que, mesmo em um material fino, observamos uma perda substancial de energia. Um próton de 10 MeV de energia, por exemplo, perde toda essa energia em apenas 0,25 mm de cobre.

As colisões são divididas em dois grupos:

colisões suaves (*soft*): resulta apenas na excitação do átomo;

colisões "duras" (*hard*): resulta em uma ou mais ionizações.

Perda de energia por espalhamento elástico com o núcleo é irrelevante devido a grande massa do núcleo comparada à da partícula incidente. Nos casos em que a massa da partícula é comparável à do núcleo (partículas alfa em hidrogênio, por exemplo) alguma energia é perdida nesse processo, porém a maior parte ainda é perdida por colisões com elétrons.

### **Perda de energia de partículas carregadas por colisão atômica**

A perda de energia de uma partícula de massa  $M \gg m_e$  por unidade de comprimento de material atravessado é descrita pela fórmula de Bethe-Bloch:

$$\frac{dE}{dx} = -Z^2 \rho \frac{z}{A} f(v, I)$$

onde  $Z$  é a carga e  $v$  a velocidade da partícula;  $\rho$  é a densidade,  $A$  o peso atômico e  $I$  o potencial de meia excitação do material. O valor de  $I$  para cada material pode ser encontrado em tabelas como em [6] Tab – 2.1.

Para partículas atravessando o mesmo material, podemos escrever a fórmula de Bethe-Bloch como:

$$\frac{dE}{dx} = -Z^2 f(v)$$

Sendo a velocidade uma função da energia cinética dividida pela massa  $M$ , temos que:

$$\frac{dE}{dx} = -Z^2 g\left(\frac{T}{M}\right)$$

Desse modo, conclui-se que a perda de energia  $dE/dx$  depende do material, da carga, da energia e massa da partícula. Na figura 3 mostro um gráfico de  $dE/dx$  em

função da energia cinética para varias massas.

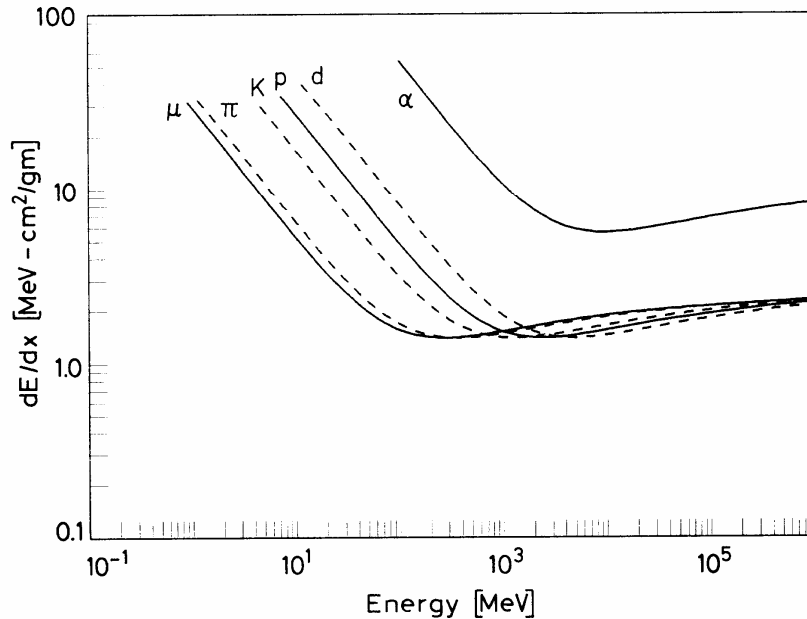


Figura 3 – Gráfico de dE/dx em função da energia

Deve-se levar em conta, porém, que a fórmula de Bethe-Bloch não é válida para pequenos valores de beta pois é necessária uma correção no modelo quando a velocidade da partícula incidente se torna comparável à dos elétrons ligados. Um tratamento mais rigoroso pode ser visto em [2].

### Perda de energia de elétrons e pósitrons

Assim como as partículas pesadas, elétrons e pósitrons também sofrem perda de energia por colisões ao atravessarem a matéria. Porém, devido sua pequena massa, há um processo adicional de perda de energia: a emissão de radiação produzida pelo espalhamento no campo eletromagnético do núcleo (*bremstrahlung*). Classicamente isto pode ser entendido como uma radiação produzida pela aceleração de um elétron (ou pósitron) quando sua trajetória é desviada de seu curso pela atração elétrica do núcleo.

Para energias de poucos MeV, ou menos, este processo é irrelevante. Porém, para algumas dezenas de MeV a probabilidade de ocorrer *bremstrahlung* aumenta rapidamente, de modo que a perda de energia por *bremstrahlung* torna-se comparável ou maior do que a perda de energia por colisão.

Portanto, a perda de energia de elétrons/pósitrons deve ser calculada pela soma:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{total} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{colisão} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{bremstrahlung}$$

Uma síntese dos resultados matemáticos mais relevantes pode ser vista em [6] (Cap.2.4) e em [10] (Seção 27.4.2).



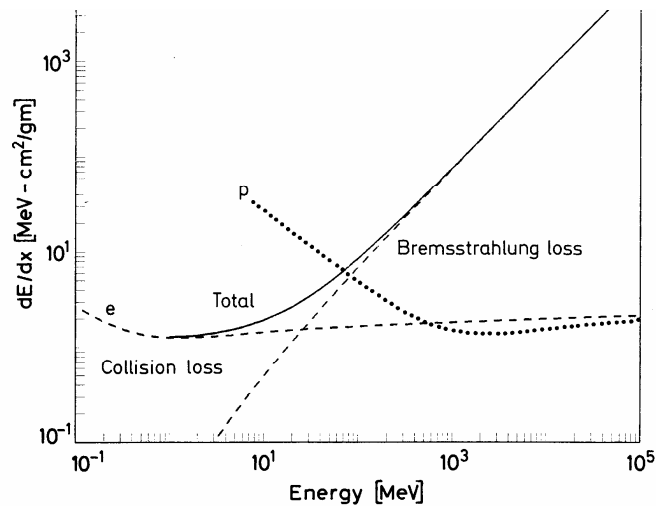


Figura 4 – Perda de energia total do elétron através do cobre. Em pontilhado as perdas de energia por radiação e por colisão. A perda de energia do próton é mostrado para comparação.

As ocorrências de outros processos (espalhamento Moller, espalhamento de Bhabha, aniquilação) a baixas energias são irrelevantes, como pode ser visto na fig. 5.

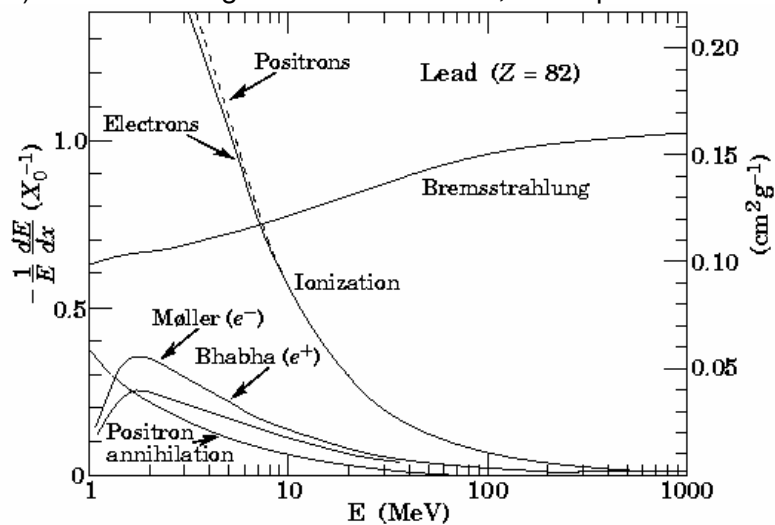


Figura 5 – Perda de energia do elétron/pósitron por diversos processos

## O processo de cintilação em um cintilador orgânico

Um cintilador é definido como sendo um material transparente que produz luz devido à passagem de uma partícula carregada.

Um cintilador orgânico possui como característica a transparência à sua própria radiação, curto tempo de decaimento, espectro de emissão na faixa de trabalho das fotomultiplicadoras e sua fácil adaptabilidade.

O mecanismo de cintilação depende fortemente da estrutura molecular do meio. Após a passagem de uma partícula carregada, muito dos átomos do meio são excitados. A maior parte da energia de excitação é consumida em calor e vibração, mas nos cintiladores parte da energia é liberada na forma de radiação.

A eficiência (quantidade de energia depositada convertida em radiação) dos cintiladores é baixa: 3,5% para o Anthracene, que é o melhor material cintilador orgânico.

A presença de impurezas reduz a eficiência.

A emissão de luz é governada pela transição eletrônica nas moléculas. Os níveis eletrônicos têm uma diferença de energia típica de  $\sim 4$  eV. Os níveis de vibração da molécula também participam do processo.

A luz emitida não é absorvida pelo meio por causa da forma diferente entre os níveis de energia dos estados excitados e fundamental em função dos espaços interatômicos.

Como os átomos de uma moléculas não mudam suas distâncias internucleares durante uma transição eletrônica, a transição  $A \Rightarrow B$  (fig. 6) do estado fundamental para o excitado ocorre sem alterações das distâncias atômicas. A molécula se encontra fora de seu estado de equilíbrio e rapidamente perde energia por vibração para se manter no estado CD. Depois de um curto período de tempo a molécula decairá para algum nível de vibração do estado fundamental ( $D \Rightarrow E$ )

O resultado dessas interações é que a energia absorvida em  $A \Rightarrow B$  é diferente da emitida em  $D \Rightarrow E$ .

Como a energia de excitação é maior que a de emissão, ocorre que um fóton emitido não tem energia suficiente para ser absorvido por outro átomo, tornando o material transparente para esse fóton.

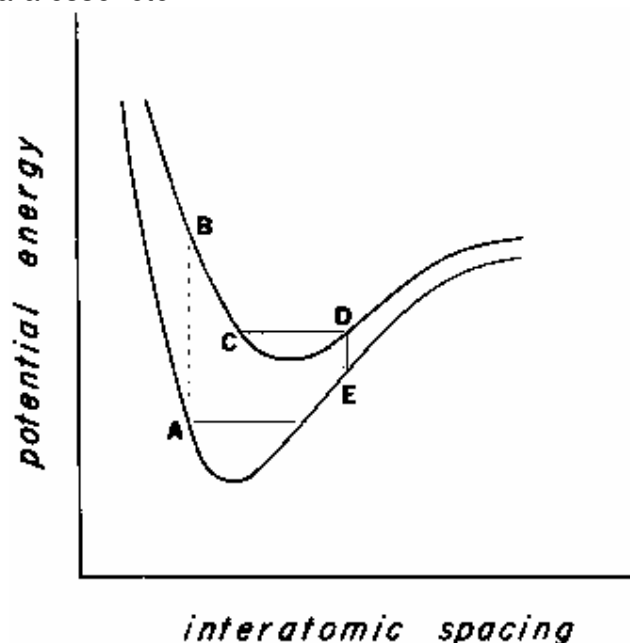
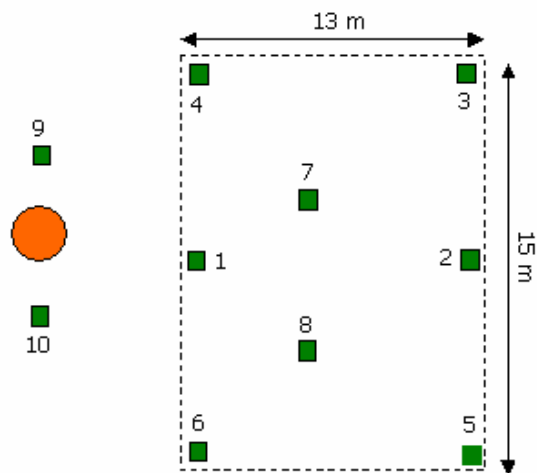


Figura 6 – Energia potencial em função do espaço interatômico

## O DETECTOR DE CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

O detector de chuviros atmosféricos extensos utilizado é constituído de estações cintiladoras espalhadas em torno do laboratório de Léptons do Instituto de Física Gleb Wataghin-UNICAMP. Este conjunto está distribuído em uma área de aproximadamente  $20 \times 20 \text{m}^2$ , conforme a fig.7. A base da detecção é um cintilador plástico do tipo NE102 de  $0,8 \text{m}^2$ . A luz produzida no cintilador pela passagem de partículas carregadas, é lida pelos tubos fotomultiplicadores instalados no vértice de uma estrutura piramidal. O limiar inferior de detecção de CAE's deste arranjo de detectores é de aproximadamente  $10^{14}$  eV, para ao menos quatro detectores disparados.



**Figura 7 – Disposição dos detectores pelo laboratório. Os quadrados representam os cintiladores e o círculo representa o tanque-teste**

A determinação da direção de chegada do CAE é feita através da técnica de tempo de voo. Para tanto, cada estação deve registrar o tempo de chegada da frente de partículas, com precisão próxima a 1ns.

Para obter o número total de partículas carregadas do chuvaeiro, que é uma primeira aproximação para sua energia, usamos o número de partículas registrado por cada detector. Através da carga registrada pelas fotomultiplicadoras das pirâmides e sabendo que, para a faixa de energia das partículas do CAE, a quantidade de luz produzida no cintilador é proporcional ao número de partículas que nele incide, obtemos o número de partícula usando a relação (carga integral do sinal)/(carga de uma partícula) previamente calibrado. Sabendo a área de cada detector temos amostragens de densidades de partículas que, ajustada a uma função de distribuição lateral, fornece parâmetros que caracterizam o chuvaeiro.

Farei agora a descrição do sistema de aquisição de dados e do trabalho de calibração dos detectores.

### **Sistema de Aquisição de Dados**

A eletrônica utilizada no sistema de aquisição de dados do detector de chuvaeiros é baseada no padrão NIM/CAMAC. O sinal de cada pirâmide é levado a este sistema através de cabos coaxiais com 100 m de comprimento, o que impõe um atraso sistemático de 500 ns em cada pirâmide. Com o uso de ramificações cada estação tem o seu sinal levado a um discriminador e também a uma linha de atraso analógico. O sinal é discriminado gerando um pulso lógico NIM fixo de 150 ns de largura. A saída discriminada de cada estação é então levada a uma unidade lógica de coincidência programável. Quando o número de estações em coincidência temporal é maior que o número ajustado ( $\geq 4$ ), um sinal de largura fixa de 140 ns é gerado pela unidade. Esta saída dispara os módulos CAMAC's ADC (LeCroy 2249A) e TDC (LeCroy 2228) responsáveis pela digitalização das cargas e tempos dos detectores. O sinal ramificado de cada estação passa pela linha de atraso e é retardada em 150 ns. É então novamente dividido em dois, um deles indo para um outro discriminador cujos pulsos de saída são contados por um módulo Scaler também no barramento CAMAC. A outra saída, que é o sinal analógico (um para cada pirâmide) da fotomultiplicadora, é enviada a um dos canais do ADC que mede a carga. O atraso de 150 ns é feito através de cabo coaxial e tem por função compensar o tempo de trânsito na eletrônica de processamento de *trigger*. Desta forma, quando a unidade lógica dispara o ADC a carga a ser amostrada chega alguns ns depois para ser medida.

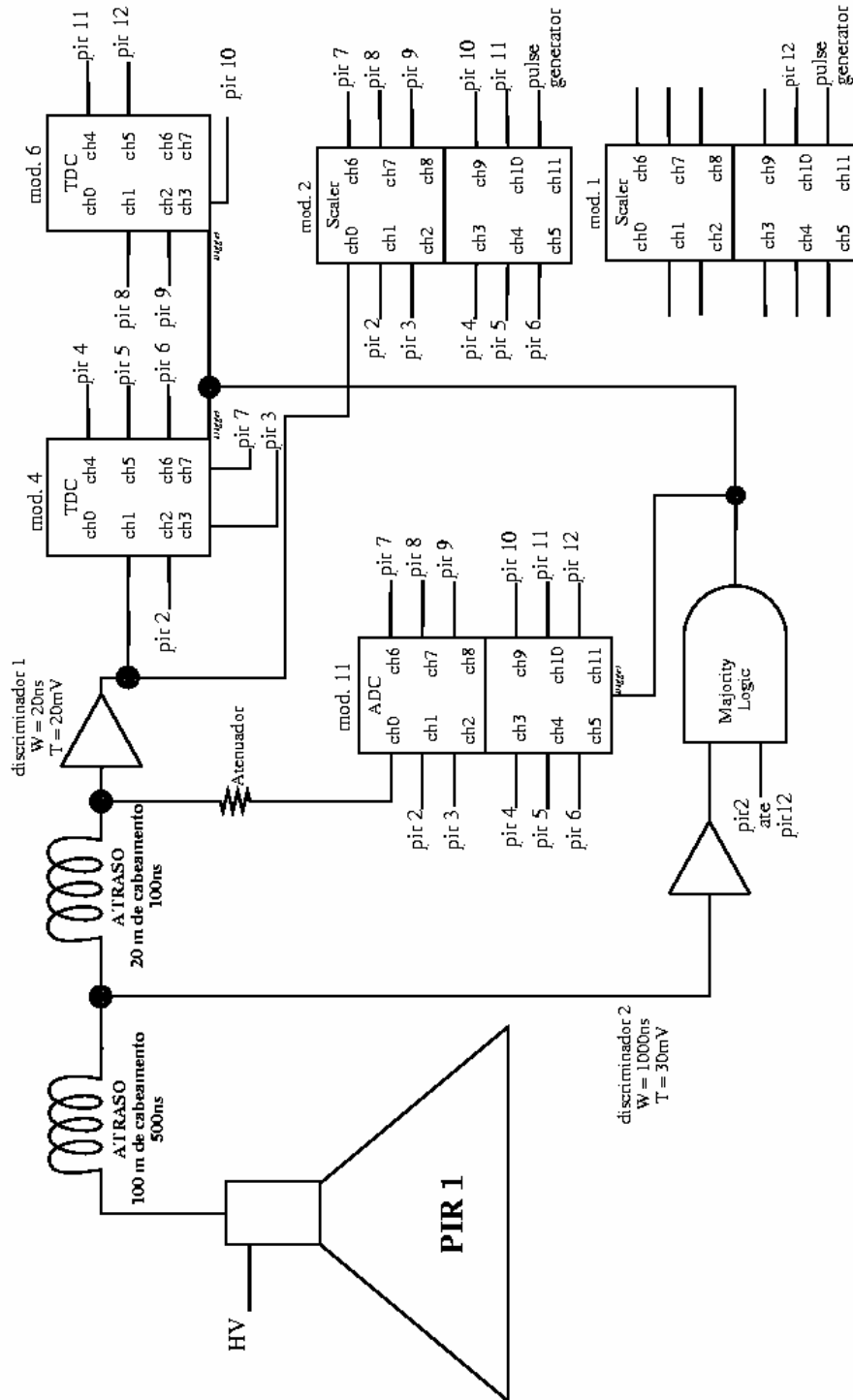


Figura 8 – Diagrama elétrico da eletrônica do EASCAMP

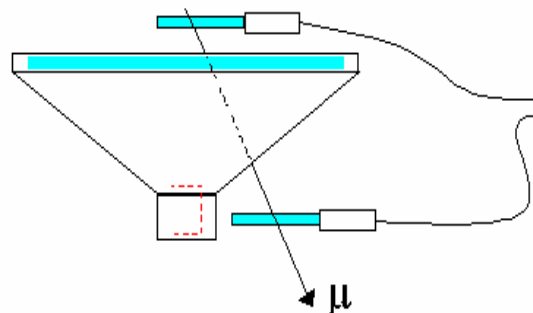
Quando um chuva atmosférica de energia da ordem de  $10^{14}$  eV atinge o conjunto de detectores, ao menos 4 das estações deverão contar partículas. Como as partículas são relativísticas, para o caso extremo de um chuva inclinado horizontalmente, são necessários 100 ns para percorrer uma distância de 30 m, que é a maior distância entre os detectores em uso. Logo o tempo de 100 ns do primeiro discriminador fornece base suficiente para a coincidência com qualquer outro detector para qualquer evento de

chuveiro. Um *trigger* assim formado, com a imposição de coincidência mínima de 4 detectores é a condição de aquisição de dados do nosso experimento. Com a ocorrência de uma coincidência os dados do ADC, TDC são convertidos e descarregados em um computador dedicado ao barramento CAMAC. Já o módulo *scaler* fornece a contagem individual das pirâmides a cada 10s, quando seus dados são também descarregados para o mesmo computador. Cada registro de dados contém também o tempo de ocorrência do evento.

### **Calibração dos detectores de cintilação**

Cada estação do detector de chuviscos atmosféricos deve medir o tempo de chegada e a carga das partículas. Para a calibração do tempo “zero” (a medida relevante é o tempo relativo entre as estações) foi feito o uso de um detector auxiliar ligado ao sistema de aquisição de dados. Tendo comprimento de cabo suficiente para alcançar qualquer uma das estações, ele foi colocado junto à base de cada pirâmide a ser calibrada. Foi feita uma aquisição de dados com a coincidência entre o detector e a pirâmide no qual ele se encontra. Como a maior parte destas coincidências é dada pela passagem de múons individuais da radiação cósmica que atravessam ambos os detectores. A diferença de tempo de resposta entre eles fornece a calibração relativa de tempo. O procedimento foi executado em todas as estações e resultou na calibração desejada (fig.10 e Tab. 2) . Um pequeno cintilador plástico de cerca de  $10 \times 10 \text{cm}^2$  acoplado a uma fotomultiplicadora serviu para este propósito.

Sabendo que a quantidade de luz produzida no material cintilador é proporcional ao número de partículas (relativísticas) que nele incide – até o limite de linearidade da fotomultiplicadora – o que necessitamos é encontrar a carga correspondente a uma partícula. Fizemos isto utilizando um telescópio de partículas mostrado no desenho da Figura9. A coincidência de sinais entre os dois detectores do telescópio indica a passagem de uma partícula (múon). Amostrando a carga produzida pela pirâmide neste instante temos o sinal equivalente a uma partícula. Ajustando a alta tensão de alimentação das fotomultiplicadoras para que os valores de carga sejam aproximadamente o mesmo para cada pirâmide, obtivemos a calibração para o número de partículas para cada uma das estações (fig. 11 e Tab. 3).



**Figura 9. Pirâmide (detector modular) com o telescópio de partículas utilizado na calibração do seu sinal.**

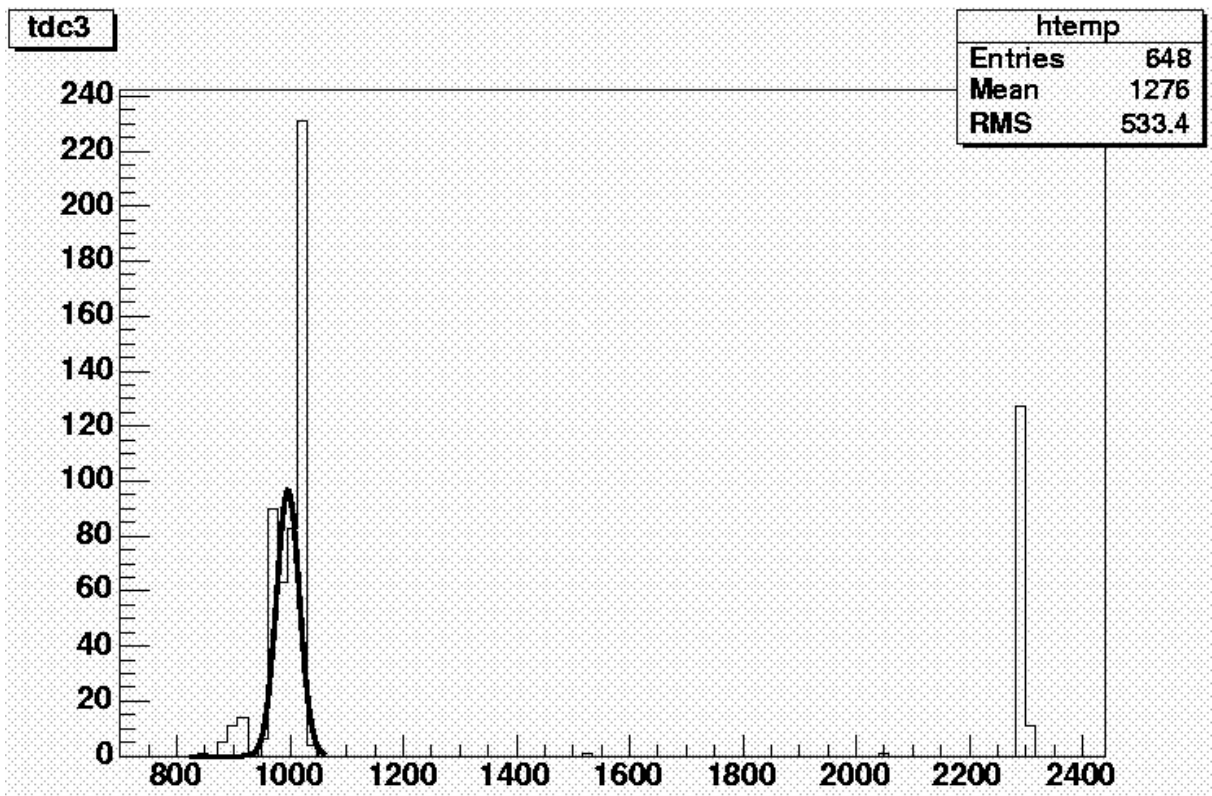


Figura 10 – Medida do atraso intrínseco de um dos detectores (pirâmide nº10). O pico em ~2300 representa a ineficiência do conjunto. O gráfico está plotado em nº de contagens vs  $10^{-10}$  segundos

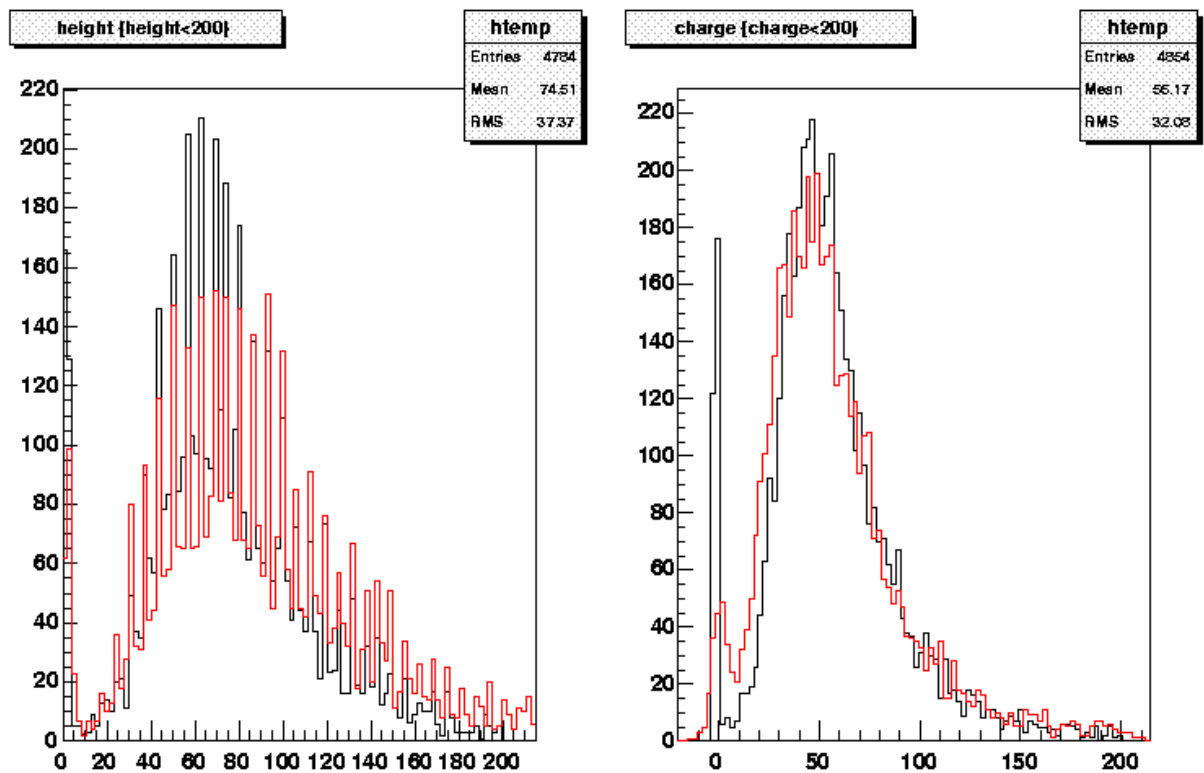


Figura 11- Medida do sinal gerado por uma partícula medida pelo conjunto do EASCAMP. O primeiro gráfico mostra a altura de pulso do sinal e o segundo a carga integral do sinal. As unidades são mV e pC.

PIR	Atraso intrínseco(ns)
1	81,61
2	95,98
3	106,6
4	94,66
5	96,85
6	95,82
7	87,77
8	103,05
9	101,65
10	99,8
11	124,1
12	121,7

Tabela 2 – Atraso intrínseco de cada detector

PIR	CARGA(pC)
1	54,53
2	42,68
3	62,01
4	52,64
5	64,84
6	45,83
7	41,52
8	44,99
9	48,30
10	48,07
11	48,82
12	60,09

Tabela 3 – Carga integral do sinal de uma partícula medida por cada detector

### **Método de tempo de vôo**

Descreverei a técnica de tempo de vôo que serve para determinar a direção incidente da frente de partículas de um CAE. Essa determinação é de suma importância por dois motivos: primeiro porque pretendemos estudar a resposta dos detectores de superfície do OPA em função da direção de chegada do CAE; e também porque as funções de densidade de partículas em função da distancia ao centro do chuveiro são para distancias medidas sobre o plano da frente de partículas.

Esse método de caracterização utiliza-se da aproximação de que a frente de partículas do chuveiro é plana, sem espessura e as partículas viajam com velocidade igual à da luz.

Uma frente plana pode ser representada pela equação:

$$lx + my + nz = ct$$

onde  $l = \sin\theta \cos\theta \cos\varphi$ ,  $m = \sin\theta \cos\theta \sin\varphi$  e  $n = \cos\theta$  são os cossenos diretores do eixo do chuveiro,  $\theta$  e  $\varphi$  os ângulos zenital e azimutal,  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas cartesianas do detector (referentes a uma coordenada  $x_0, y_0, z_0$ ),  $c$  a velocidade da luz e  $t$  o tempo de chegada da frente medida pelo detector em relação à algum tempo arbitrário.

O ajuste é feito minimizando a quantidade  $\psi$ :

$$\psi = \sum \omega_i \{lx_i + my_i + nz_i - c(t_i - t_0)\}^2$$

lembrando que:

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1$$

onde  $t_i$  é o tempo relativo de chegada do  $i$ -ésimo detector, com coordenadas  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$ ,  $\omega_i = 1/\sigma_i^2$  é o fator de peso e  $\sigma_i$  é o erro na determinação no tempo de chegada do  $i$ -ésimo detector.

Os cossenos diretores  $l$ ,  $m$  e  $n$  são obtidos resolvendo a equação:

$$\frac{\partial \psi}{\partial l} = \frac{\partial \psi}{\partial m} = \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$$



## Conclusão

Após este período de trabalho observamos que o trabalho foi realizado com sucesso: fiz o estudo da bibliografia para entendimento dos fenômenos; realizamos a calibração dos detectores para podermos operá-los e para que houvesse familiarização com as ferramentas de aquisição; e iniciamos o estudo das técnicas de reconstrução dos parâmetros de um chuva atmosférico extenso.

## Referências

- [1] Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics, Pierre Sokolsky, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1988).
- [2] Cosmic Rays and Particle Physics, Thomas K. Gaisser, Cambridge University Press (1990).
- [3] Extensive Air Shower, M.V.S.Rao and B.V. Sreekantan, World Scientific, New York (1999).
- [4] Extensive Air Showers, G.Cocconi, Encyclopedia of Physics, Cosmic Rays I, Spring-Verlag, Berlin, 215-271 (1961).
- [5] Introduction to Experimental Particle Physics; R. Fernow; Cambridge University Press;1986.
- [6] Techniques for nuclear and particle physics experiments, Willian R. Leo, Spring-Verlag Berlin Heidelberg, Alemanha (1987).
- [7] Tese de Mestrado, Análise da resolução angular de EAS, Luiz Gustavo dos Santos, IFGW-UNICAMP (1994).
- [8] Tese de Laurea, Effeto ombra della luna e del sole, P.Bloto, Univ. de Turim, Itália (1990).
- [9] Tese de Mestrado, O uso de cintiladores plasticos na medida de densidade de particulas e sua influencia na caracterização de chuveis atmosfericos externos / Marcelo Augusto Leigui de Oliveira, IFGW-UNICAMP(...).
- [10] *site* do Particle Data Group : <http://pdg.lbl.gov/>
- [11] *site* do root
- [12] No site do Observatório Pierre Auger, <http://www.auger.org>, está disponível uma lista de publicações e descrições dos objetivos e andamento do projeto.
- [13] Auxílio FAPESP (1994/5443-5);  
Os múons observados com o detector central do EASCAMP, Tese de Doutorado, Silvia Paganini, UNICAMP-IFGW (2001);  
Fauth, A. C.; Biral, A. R. P.; Chinellato, J. A.; Kemp, E.; Luna, E. G. S.; Nogima, H.; M.A.Leigui O.; Santos, L. G.; Castro Souza Jr, M.; Lima, F. T.; Turtelli Júnior, A. O Detector De Chuveis Atmosféricos Eascamp-II, XVII Encontro Nacional De Física De Partículas E Campos, 1996, Serra Negra, p. 255-258;
- [14] C++ Como Programar; H. M. Deitel, P. J. Deitel; 3<sup>o</sup> ed. ; Porto alegre; bookman, 2001.

# Fotos do Experimento

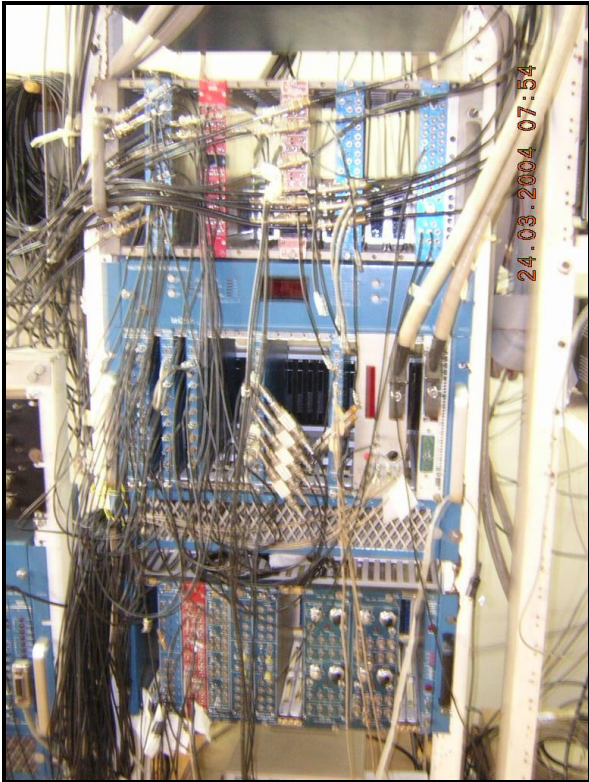


Figura 12 – Foto da eletrônica de aquisição do EASCAMP

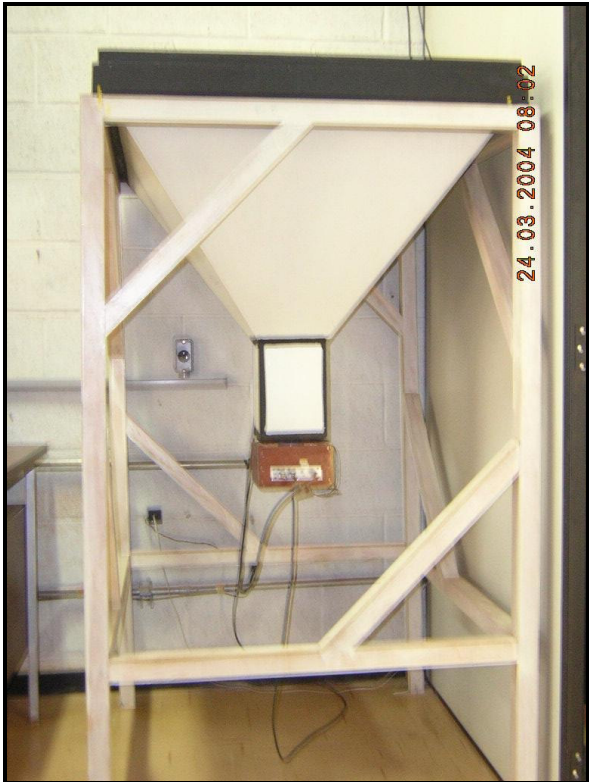


Figura 13 – Foto de um dos doze módulos detectores