

# Relatório Final de Instrumentação para Ensino - Versão 3.

Universidade Estadual de Campinas – F 809 A

Nataly Horner Hoe de Castro – RA 016991  
sob a orientação do Prof. Jun Takahashi (DRCC)

29 de novembro de 2005



**UNICAMP**



A realização plena deste trabalho tornou-se possível graças ao Sr. Geraldo R. Castro e à UNIMAGNA METALÚRGICA LTDA., que tornaram nossa montagem experimental improvisada num aparato robusto e bem construído que poderá ser utilizado em prol da divulgação do conhecimento científico durante muito tempo nesta Universidade.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Parte Histórica</b>	<b>4</b>
2.1	Teoria X Experimento . . . . .	4
2.2	Desenvolvimento Histórico . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Aspectos Teóricos</b>	<b>10</b>
3.1	A Física dos Raios Cósmicos . . . . .	10
3.1.1	Chuveiros Cósmicos e partículas elementares . . . . .	10
3.2	A Física da Câmara de Nuvens . . . . .	12
3.2.1	Deflexão de partículas por campo magnético . . . . .	12
<b>4</b>	<b>O Experimento</b>	<b>14</b>
4.1	Metodologia . . . . .	14
4.1.1	A segunda montagem . . . . .	14
4.2	Resultados e Discussão . . . . .	18
4.3	Sobre a bibliografia . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Agradecimentos</b>	<b>21</b>

# Introdução

Raios cósmicos têm sido estudados há mais de um século. Entretanto, ainda não se sabe exatamente de onde vêm e como são criados, embora existam muitas teorias a respeito disso. Não obstante, durante todo esse tempo serviram como um importante laboratório natural no limite de altas energias, crucial na expansão das fronteiras da Física no que diz respeito à Física de Partículas. Não apenas isso, os raios cósmicos são importantes indicadores de objetos astrofísicos tais como buracos negros, quasares, estrelas de nêutrons, supernovas, dentre outros. Assim, o estudo dessas partículas de altas energias provenientes dos confins do Universo nos fornecem uma vasta informação – ainda que indireta – sobre o zoológico cósmico existente muito além do ínfimo alcance e imaginação humanos.

A fascinação que os raios cósmicos nos causa motivou esse projeto, no qual revivemos um pouco os primórdios da física de partículas através de um de seus mais importantes instrumentos durante décadas: a câmara de nuvens. Adaptada e simplificada para nossas necessidades, construímos uma câmara de nuvens por difusão, baseada essencialmente na proposta de (1). Conforme nossa proposta apresentada no (2), não apenas construímos uma câmara de nuvens capaz de exibir trajetórias cósmicas mas também, com a ajuda decisiva do Sr. Geraldo da UNIMAGNA METALÚRGICA LTDA., foi desenvolvida uma câmara de nuvens bem-construída e duradoura, capaz de ser exibida em Feiras de Ciências, eventos e demonstrações. Essa segunda versão da câmara foi doada pela UNIMAGNA à UNICAMP.

Apresentaremos nos capítulos seguintes um breve histórico da história dos raios cósmicos, a teoria necessária para compreender o funcionamento da câmara e as partículas ali visualizadas e finalmente, a descrição do desenvolvimento da câmara em si. Conforme indicado pelo Prof. Lunazzi, procuramos em cada capítulo seguir uma ordem crescente de complexidade da informação apresentada, de forma que os tópicos considerados mais básicos pelo leitor possam ser pulados, bem como aqueles considerados por demais complexos, sem que isso comprometa o entendimento do restante do relatório.

# Parte Histórica

À medida em que aprofundamos nossa pesquisa sobre câmaras de nuvens para a realização desse projeto, pareceu-nos cada vez mais claro que esse instrumento teve um papel dramático na Física do começo do século XX (4), embora hoje em dia a câmara de nuvens seja um aparato desconhecido para muitos. Esse caráter histórico aumenta ainda mais a importância didática desse instrumento. Iremos portanto discuti-lo e apresentar um breve histórico sobre o desenvolvimento e evolução das câmaras de nuvem no século passado.

## 2.1 Teoria X Experimento

No obituário de C.T.R. Wilson<sup>1</sup>, o criador da câmara de nuvens, Lorde Rutherford se refere à tal invenção como “o instrumento mais original e maravilhoso de toda história científica”. Essa afirmação pode soar exagerada nos dias de hoje, mas para compreendê-la em toda sua profundidade e entender o caráter revolucionário da câmara, é necessário situá-la no contexto histórico de quando esta surgiu.

Devemos lembrar que às portas do século XX, existia então uma discussão acirrada acerca do caráter da matéria que se estendeu ainda pelas primeiras décadas daquele século: seria esta contínua – numa corrente liderada por Mach – ou discreta – conforme já supunha e defendia Boltzmann, desde o desenvolvimento de sua mecânica estatística? Nos dias de hoje, à luz da Física Nuclear e da Mecânica Quântica, tal questionamento soa-nos como risível. Entretanto, a atual certeza indubitável acerca do caráter discreto da matéria só nos foi conferida graças ao acúmulo de evidências científicas concretas, sem as quais todo o embasamento teórico desenvolvido seria apenas castelos no ar. Historicamente, os átomos sempre foram uma entidade teórica quintessencial. A câmara de nuvens, junto com uma série de experimentos desenvolvidos então, foi fundamental portanto para conferir a solidez da evidência experimental às bases teóricas ainda frágeis que estavam sendo fundadas da teoria discreta da matéria. Segundo E.N. da C. Andrade, “o triunfo da hipótese atômica é a epítome da física moderna”<sup>2</sup>.

A visualização de trajetórias de partículas carregadas através da câmara por meio de um dispositivo simples mas dramático, deu, segundo muitos, o melhor suporte para um realismo fundado abaixo dos limites microscópicos da física,

---

<sup>1</sup>Times (Londres), 16 de Novembro de 1959

<sup>2</sup>Andrade, *Atom* (1923)

uma vez que exibia parte por parte a matéria corpuscular, tornando assim visível um mundo subvisível e estendendo a percepção humana a níveis subatômicos (4). Não obstante, a simplicidade da câmara, baseada num processo puramente físico de ionização e coalescência gotas nos impressiona e serve como exemplo: a física mais pura esconde-se sutilmente em mecanismos engenhosos mais próximos de nós do que imaginamos.

Ao tornar palpável a realidade microfísica da matéria, a câmara de nuvens nos revelou o pósitron e o múon, dentre uma série de novas partículas, bem como permitiu estudar em detalhes processos nucleares. Para gerações de físicos de raios cósmicos e mais brevemente, para físicos de aceleradores, a câmara de nuvens deu um significado concreto para o amplo espectro de novas partículas que estavam sendo descobertas, inaugurando assim o campo da física de partículas.

## 2.2 Desenvolvimento Histórico

Como ocorre por vezes em descobertas científicas, a câmara de nuvens teve sua origem numa época, lugar e área totalmente à parte dos fenômenos de espalhamento, produção e desintegração da física de partículas.

A câmara de nuvens teve suas origens na Era Vitoriana, nas colinas chuvosas da Escócia. Wilson não era absolutamente um físico de partículas. Durante toda sua vida, demonstrou interesse principalmente em fenômenos meteorológicos, realizando pesquisas analíticas sobre as estruturas básicas da matéria que se revelavam complexas, mas faziam parte da realidade do nosso dia a dia, tal como os fenômenos de precipitação de chuva e neblina. Há uma física massiva por trás de fenômenos dessa natureza e Wilson fazia parte da corrente que se propunha a realizar experimentações miméticas – ou seja, reproduzir fenômenos físicos naturais com toda a sua complexidade em laboratório – o que, obviamente, exigia uma compreensão profunda por trás dos processos físicos que regiam o fenômeno. Havia também nessa época um grande interesse em estudos meteorológicos, motivados pela neblina industrial, o espírito vitoriano de então – fascinado com todos os tipos de reprodução do exótico na natureza, tanto nas artes como na ciência – e as demandas práticas de transporte, o que acabou resultando na fundação de sociedades, rede mundiais e laboratórios meteorológicos, dentre os quais, o observatório no pico de Ben Nevis, ao norte da Escócia, que funcionou entre 1883 e 1904, onde Wilson realizou algumas de suas pesquisas sobre nuvens em setembro de 1894, que culminou com o desenvolvimento da câmara de nuvens.

Desde 1880, o engenheiro escocês John Aitken já investigava o mecanismo de formação de nuvens, inclusive produzindo pequenas nuvens de vapor em laboratório, ao permitir a entrada de um jato de vapor de água num grande recipiente de vidro. A formação de nuvens ocorria quando o vapor se condensava em gotículas de água, na presença de partículas de poeira em suspensão na câmara. Quando o ar era filtrado e não continha poeira, não se observava condensação alguma.

Na situação natural, temos água de rios, lagos e oceanos evaporando e se difundindo no ar, subindo até as camadas mais altas da atmosfera, onde o ar é mais frio. Isso ocasiona a perda de energia dessas moléculas de água, que acabam se condensando em partículas da atmosfera formando as nuvens. Assim, Aitken adaptou sua experiência inicial, sempre buscando reproduzir essa for-

mação tal como ocorria na natureza: colocando um pouco de água no fundo de um grande recipiente de vidro, esperou que o mesmo ficasse saturado ao máximo com as moléculas de água. Uma vez atingida essa condição, realizava o resfriamento brusco do ar por expansão, o que resultava na produção de nuvens, pois as moléculas de água não tinham mais energia suficiente para flutuar independentemente e portanto, condensavam-se nas partículas de poeira em suspensão – ao passo que nada ocorria quando o ar era filtrado e portanto, não possuía partículas em suspensão. Aitiken concluiu que a existência de pontos de nucleação era uma condição necessária à formação de nuvens, sendo que quanto mais pontos nucleadores o ar contivesse, mais condensação ocorreria e portanto, mais espessa seria a nuvem formada.

Wilson tomou como ponto de partida o Método de Aitiken para produção de nuvens e passou a realizar expansões maiores do que as que Aitiken realizava, o que levou-o a uma descoberta peculiar: quando a expansão realizada era tal que  $V_f = 1,25V_i$ , Wilson verificou a condensação das moléculas mesmo em ar filtrado, totalmente livre de poeira! Para garantir que o ar estava de fato livre de núcleos condensadores de poeira, Wilson realizou várias expansões, de forma que a cada expansão, o vapor se condensava nos núcleos de poeira, que depois se precipitavam como gotículas de água, até que após um número suficiente de expansões todas as partículas de poeira tivessem sido levadas abaixo pelas gotículas de água. Entretanto, independentemente de quantas vezes Wilson realizasse as expansões, o vapor continuava se condensando em algum núcleo como que invisível, que era continuamente reposto. Realizando expansões ainda maiores ( $V_f = 1,4V_i$ ), Wilson verificava a formação de neblinas com gotículas menores e em maior número.

Wilson hipotetizou então que os núcleos condensadores poderiam ser íons, que existiriam até mesmo no ar filtrado. Para verificar essa hipótese, Wilson expôs sua câmara à raios X – que haviam sido descobertos então há pouco, em 1895, por Röntgen – e outras fontes radioativas, verificando uma intensificação considerável nas gotículas condensadas. Para confirmar de fato que os misteriosos núcleos de condensação eram íons carregados, Wilson expôs a câmara a um campo elétrico, que removia assim todos os íons, e finalmente, nenhuma nuvem mais se formava.

Com isso, Wilson provou que o ar era ionizado. Vários outros indícios apontavam para isso, como no caso também relatado por ele de um eletroscópio<sup>3</sup> isolado que se descarregava sozinho, mesmo se mantido longe de fontes radioativas.

Essa misteriosa ionização do ar intrigava os cientistas de então, que se voltaram para a investigação da origem dessa ionização, realizando diversos experimentos a fim de verificar a origem dessa radiação ionizante. O próprio Wilson, intrigado com este efeito, repetiu o experimento do eletroscópio sob diferentes circunstâncias: submeteu-o a diferentes tipos de ar – e.g. ar proveniente do campo –, em diferentes horas do dia e em diferentes lugares, sem verificar alteração alguma na taxa de descarga do eletroscópio. Wilson viu-se obrigado a concluir que de alguma forma, os íons eram simplesmente formados no ar, dentro de um recipiente fechado, como se fosse uma propriedade intrínseca do ar, num efeito que ele denominou de ionização espontânea.

<sup>3</sup>O eletroscópio era um instrumento bastante utilizado nos primeiros experimentos de radioatividade, pois a taxa com a qual suas folhas de ouro se aproximavam forneciam uma medida da taxa de ionização

Esse mistério permaneceu sem explicação por uma década, até que em 7 de Agosto de 1912, Viktor Hess realizou um experimento que consagrou-o com o Prêmio Nobel. Num intrépido vôo num balão de hidrogênio – altamente inflamável – em altas altitudes (acima de 5 km) carregando câmeras de ionização, Hess realizou medições durante a subida e a descida do balão, através das quais concluiu que conforme subia, inicialmente a ionização caía um pouco mas em seguida, passava a crescer mais e mais, em taxas cada vez maiores. Sua explicação para isso era que até 2000 metros, a radiação proveniente da radioatividade terrestre ainda tinha alguma influência; entretanto, acima disso, Hess presumiu que alguma radiação de alta potência estaria entrando da atmosfera, proveniente do espaço – no que Millikan batizou em 1925 de radiação cósmica ou raios cósmicos. Entretanto, embora se soubesse agora que essa radiação viria de fora da Terra, permanecia a pergunta: de onde? Pois devemos lembrar que nessa época, os astrônomos não dispunham de ferramentas suficientes para abordar o problema.



Figura 2.1: Viktor Hess após um de seus vôos bem-sucedidos de balão, no qual o aumento da ionização a altas altitudes foi comprovado.

Na década de 20, o interesse no estudo dos raios cósmicos cresceu rapidamente, a partir do momento que se percebeu que o fenômeno de ionização do ar estava ligado a idéias novas e fundamentais. Nesse meio tempo, Wilson deu continuidade aos seus estudos com a câmara de nuvens, aperfeiçoando-a até que em 1910, conseguiu obter fotografias de trajetórias de partículas ionizantes em movimento, uma vez que a partícula ionizante deixaria um rastro de íons atrás de si, os quais serviriam como núcleos condensadores ao se efetuar a expansão da câmara. Teríamos então uma condensação do vapor nessa trajetória,



permitindo que a mesma fosse visualizada e registrada fotograficamente. Para que a visualização na câmara de Wilson fosse ótima, a expansão era realizada imediatamente após a ionização – cuidadosamente desenvolvida de forma que fosse rápida o suficiente para não causar turbulência. Além disso, a câmara deveria estar “limpa” de qualquer outra espécie de íons que não aqueles que se desejasse estudar. Isso era obtido aplicando-se um campo elétrico de tal forma que íons que estivessem na câmara por mais de que algumas frações de segundos fossem eliminados. Em 1929, o russo Skobelzyn obteve as primeiras fotografias

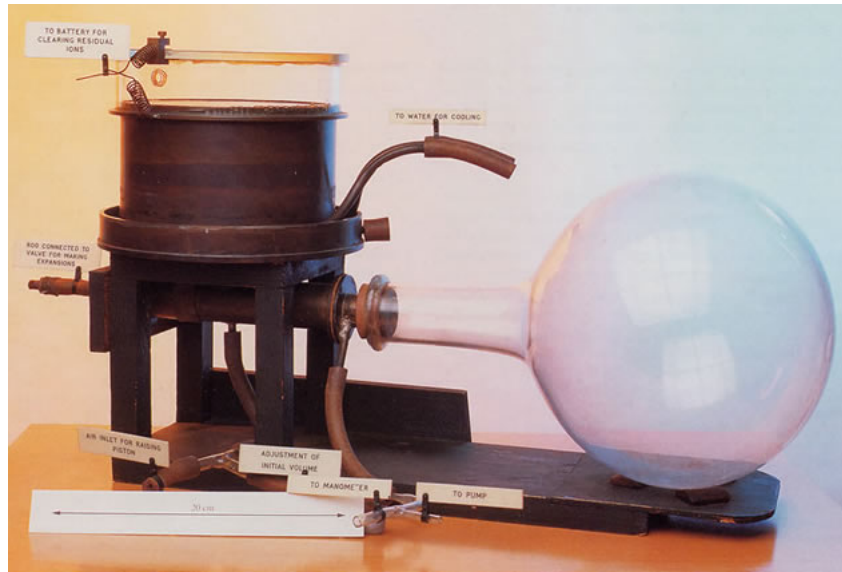


Figura 2.2: A câmara de nuvens de Wilson, pioneira na visualização de trajetórias de partículas ionizantes.

de trajetórias de raios cósmicos, empregando a câmara de nuvens de Wilson. No início da década de 30, passaram a utilizar a câmara associada com contadores Geiger que disparariam uma máquina fotográfica quando fosse detectada a passagem de um raio cósmico. Foi analisando esse tipo de experimento que Carl Anderson, um colega de Millikan no Instituto de Tecnologia da Califórnia percebeu que algumas das trajetórias fotografadas eram atribuídas a pósitrons, a anti-partícula do elétron – que haviam sido previstas teoricamente por Dirac em 1928.

A Câmara de Wilson foi um instrumento crucial na pesquisa de raios cósmicos até meados do século 20. Entretanto, esta apresentava uma limitação considerável: era sensível apenas por períodos limitados de tempo, devido a todo o processo necessário para a “limpeza” da câmara e a expansão do gás. Em 1939, Alexander Langsdorf (5) propôs um modelo de câmara de nuvens continuamente sensível, baseada na difusão de vapor através de um gradiente de temperatura. Essa proposta foi considerada demasiado complicada e caiu no esquecimento, até que esse modelo voltou a tona em 1950 e foi consideravelmente simplificado por Needels e Neilsen (6) – mantendo entretanto sua essência, que é a produção de nuvem por meio de gradiente de temperatura – e foi justamente

esse o modelo que utilizamos na realização do nosso projeto.

Embora as visualizações por ela fornecidas sejam úteis apenas para fins de demonstrações e não forneçam trajetórias precisas o suficientes para determinações finas de propriedades de raios cósmicos, a câmara de nuvem por difusão serviu de inspiração para Donald Glaser, ao desenvolver a câmara de bolhas, quando este buscava explorar o limite superior do espectro de energia de raios cósmicos, medindo-se o momento de raios cósmicos de altíssimas energias – numa tentativa de se obter mais informações acerca do mistério sobre a natureza e origem de raios cósmicos. Basicamente, o que Glaser propôs foi construir uma câmara de nuvem que ao invés de supersaturar um gás com vapor, iria operar justamente de forma inversa, utilizando a energia depositada por um íon num líquido para superaquecê-lo, causando a produção de bolhas de vapor. A câmara de bolhas inaugurou assim uma nova geração de câmaras de detecção de trajetórias de partículas, servindo principalmente como ferramenta auxiliar na pesquisa das novas partículas dos aceleradores de partículas que começaram a ser construídos a partir de então.

# Aspectos Teóricos

Esta parte será dividida em dois tópicos: primeiramente, detalharemos e caracterizaremos as partículas que serão visualizadas na nossa câmara. Em seguida, abordaremos os aspectos teóricos envolvidos no nosso experimento.

## 3.1 A Física dos Raios Cósmicos

Nesse ponto, o leitor deve estar se indagando: até agora, tanto falamos sobre raios cósmicos, mas, o que são exatamente os raios cósmicos que veremos no experimento aqui apresentado? Na verdade, as partículas cósmicas que encontramos na superfície terrestre na verdade não são as partículas cósmicas que se originaram em galáxias distantes e atravessaram o Universo até chegar aqui. Na verdade, o que detectamos e visualizamos em nosso aparato são raios cósmicos secundários, criados a partir da energia da partícula primária que atingiu a atmosfera terrestre. Esses raios cósmicos secundários formam cascatas complexas de partículas, que tomam a forma de chuviros de partículas e podem nos revelar muitas informações a partir do momento que entendemos a física desses chuviros.

Vale a pena ressaltar entretanto que as partículas detectadas na câmara de nuvens não são apenas raios cósmicos mas podem também ser provenientes de radiações presentes na superfície terrestre.

### 3.1.1 Chuviros Cósmicos e partículas elementares

Os raios cósmicos primários que se propagam no Universo em geral consistem de nucleons de elementos mais leves, tais como hidrogênio, hélio, lítio, berílio e boro, com energias que variam da ordem de  $10^{10}$  a  $10^{19}$  eV, até onde sabemos atualmente. Ao atingir a atmosfera terrestre entretanto, passam a sofrer reações e dar origem as partículas que detectamos na superfície terrestre. Em resumo, essa cadeia de reações bastante complexas está representada na Fig.3.1. Citamos alguns processos físicos relacionados com a formação desses chuviros na atmosfera terrestre: bremsstrahlung, produção de pares pósitron-elétron, espalhamento múltiplo, efeito Compton, radiação Cerenkov, entre outros.

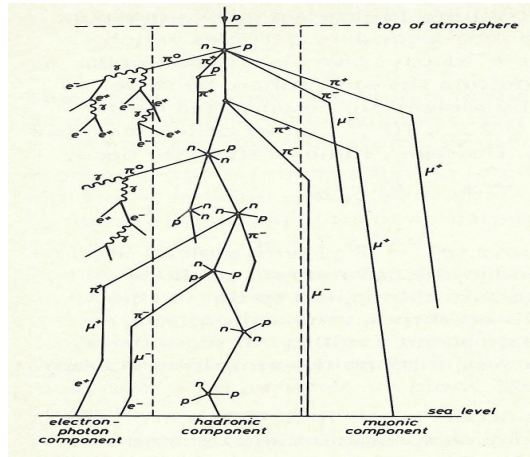


Figura 3.1: Representação esquemática do desenvolvimento de produção de partículas na atmosfera terrestre (15)

	Particle	Charge	Mass * MeV	Spin $\frac{h}{2}$	Important Decays	Mean Life sec.
Photon	$\gamma$	0	0	1	stable	$\infty$
	$\nu_e$	0	0	$\frac{1}{2}$	stable	$\infty$
Leptons	$\nu_\mu$	0	0	$\frac{1}{2}$	stable	$\infty$
	$e^\pm$	$\mp$	0.511006 $\pm 0.000002$	$\frac{1}{2}$	stable	$\infty$
	$\mu^\pm$	$\mp$	105.659 $\pm 0.002$	$\frac{1}{2}$	$e + \nu_e + \nu_\mu$	$2.2001 \times 10^{-6}$ $\pm 0.008$
	$\pi^\pm$	$\pm$	139.580 $\pm 0.015$	0	$\mu + \nu_\mu$ $e + \nu_e$ $\mu + \nu_\mu + \gamma$ $\pi^0 + e + \nu_e$	$2.604 \times 10^{-8}$ $\pm 0.007$
Mesons	$\pi^0$	0	134.975 $\pm 0.014$	0	$\gamma + \gamma$ $\gamma + e^+ + e^-$	$0.89 \times 10^{-16}$ $\pm 0.18$
	$K^\pm$	$\pm$	493.83 $\pm 0.11$	0	$\mu + \nu_\mu$ $\pi^\pm + \pi^0$	$1.235 \times 10^{-8}$ $\pm 0.005$
	$K_S^0$	0	497.75 $\pm 0.18$	0	$\pi^+ + \pi^- + \pi^0$	$0.874 \times 10^{-10}$ $\pm 0.011$
	$K_L^0$	0	497.75 $\pm 0.18$	0	$\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$ $\pi + \mu + \nu_\mu$ $\pi + e + \nu_e$	$5.30 \times 10^{-8}$ $\pm 0.13$
	$p$	+	938.256 $\pm 0.005$	$\frac{1}{2}$	stable	$\infty$
	$n$	0	939.550 $\pm 0.005$	$\frac{1}{2}$	$p + e^- + \nu_e$	$1.01 \times 10^3$ $\pm 0.03$
Baryons Hyperons	$\Lambda$	0	1115.50 $\pm 0.08$	$\frac{1}{2}$	$p + \pi^-$ $n + \pi^0$	$2.62 \times 10^{-10}$ $\pm 0.04$
	$\Sigma^+$	+	1189.47 $\pm 0.08$	$\frac{1}{2}$	$p + \pi^0$ $n + \pi^+$	$0.810 \times 10^{-10}$ $\pm 0.013$
	$\Sigma^0$	0	1192.54 $\pm 0.10$	$\frac{1}{2}$	$\Lambda + \gamma$	$< 1.0 \times 10^{-14}$
	$\Sigma^-$	-	1197.41 $\pm 0.09$	$\frac{1}{2}$	$n + \pi^-$	$1.66 \times 10^{-10}$ $\pm 0.03$
	$\Xi^0$	0	1314.9 $\pm 0.8$	$\frac{1}{2}$	$\Lambda + \pi^0$	$2.9 \times 10^{-10}$ $\pm 0.4$
	$\Xi^-$	-	1321.3 $\pm 0.2$	$\frac{1}{2}$	$\Lambda + \pi^-$ $\Lambda + e^- + \nu_e$	$1.73 \times 10^{-10}$ $\pm 0.05$
	$\Omega^-$	-	1672 $\pm 1$	$\frac{3}{2}$	$\Xi + \pi$ $\Lambda + K^-$	$1.1 \pm 0.6 \times 10^{-10}$

\* Masses are expressed here in terms of the rest energy (MeV) of each particle, the energy being measured in "Millions of Electron Volts" (MeV) see p. 65.

Figura 3.2: Tabela de partículas elementares. (de A.H. Rosenfeld et al, Rev.Mod.Phys. 37,633,1965)

## 3.2 A Física da Câmara de Nuvens

De forma bastante direta, a formação da trajetória na câmara se dá da seguinte forma: a partícula carregada passa e ioniza a região por onde passa. Essa trajetória ionizada acaba atraindo moléculas de vapor para aquele sítio, e devido a condição de supersaturação, acabam se condensando numa trajetória visível destacada do vapor.

Alguns detalhes sobre o funcionamento da câmara que vale pena ressaltar:

- Recomenda-se que a densidade de vapor do gás não seja maior do que a densidade de vapor do gás contido na câmara, para garantir um sistema absolutamente estável (5). Isso não ocorre na nossa combinação de isopropanol com ar, o que provavelmente deve ter algum reflexo negativo na estabilidade da câmara.
- O método de produção de vapor utilizado garante que praticamente a maioria absoluta de condensação formada provém de íons.
- Deve-se evitar tanto o superaquecimento como a condensação excessiva do sistema, o que pode gerar núcleos de condensação do sistema, e assim, chuva contínua.
- As vantagens de se operar uma câmara a uma pressão aproximadamente atmosférica são grandes: pequenos vazamentos se tornam não tão importantes; podemos utilizar acrílico de pouca espessura, permitindo assim a passagem de partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  e raio x macios, além de permitir a introdução de amostras radioativas com considerável facilidade.

### 3.2.1 Deflexão de partículas por campo magnético

Um experimento bastante interessante de se realizar com a câmara e que pode nos revelar bastante sobre as características das partículas cósmicas que por ali passam é submeter a câmara a um campo magnético intenso e observar a deflexão da trajetória dessas partículas, com um raio de curvatura dado por

$$R_{mag} = \frac{mv}{eB} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} \quad (3.1)$$

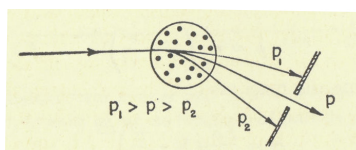


Figura 3.3: Deflexão de partículas com diferentes momentos por campo magnético uniforme e constante.

Em particular, para um ímã com campo magnético uniforme e constante com um campo na direção  $\hat{z}$  e uma partícula de carga  $qe$  com velocidade  $v_y$  relativística e pequenas velocidades nas direções  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$ , temos que o desvio

angular  $\theta$  e o deslocamento  $\delta$  causados pelo campo magnético em função de sua posição sobre o eixo  $y$  será

$$\theta_x(y) \approx \frac{qe}{\gamma m_0 c} \int_{-\infty}^y B_z(y') dy' \quad (3.2)$$

e

$$\delta_x(y) \approx \frac{qe}{\gamma m_0 c} \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^{y'} B_z(y'') dy'' dy' \quad (3.3)$$

onde  $\gamma$  é o fator de Lorentz e  $m_0$  a massa de repouso da partícula. Assim, se conseguirmos medir através da câmara o deslocamento  $\delta$  da trajetória devido ao ímã, poderíamos determinar a energia da partícula, através da simples relação

$$\delta = 1.957[GeV] \quad (3.4)$$

onde [GeV] é a energia da partícula em GeV.

# O Experimento

## 4.1 Metodologia

Conforme relatamos em (3), o primeiro teste do experimento foi bem sucedido, embora pudemos apenas especular sobre as condições ótimas de formação da nuvem. Tendo uma vez verificado que o experimento se realizava de forma satisfatória e a visualização das partículas era boa, nos dedicamos a seguir a desenvolver uma câmara de nuvens menos improvisada, capaz de ser utilizada seguidamente para demonstrações públicas, com fins didáticos. O desenvolvimento dessa segunda etapa será apresentado na seção seguinte.

### 4.1.1 A segunda montagem

Nessa segunda etapa, tínhamos em mente todos os detalhes experimentais necessários ao novo aparato, observados na primeira montagem.

Providenciamos uma caixa de acrílico nas mesmas dimensões da caixa de vidro utilizada anteriormente. O acrílico foi o material que indicaram em nosso caso, por resistir bem a baixas temperaturas. A seguir, nossa preocupação voltou-se para o desenvolvimento de um sistema que pudesse armazenar o gelo seco de forma adequada, de forma que conforme este sublimasse, as condições do experimento permanecessem inalteradas – condição fundamental para desenvolver um aparato utilizado em demonstrações. A alternativa mais simples encontrada foi a confecção de uma caixa metálica que pudesse armazenar o gelo, sendo que a mesma servisse já como base da câmara de nuvens. Assim, entramos em contato com o Sr. Geraldo da Unimagna Metalúrgica, que a partir daí auxiliou-nos intensamente no aperfeiçoamento da câmara com sugestões práticas e eficientes, conforme apresentamos nas fotos a seguir.

Note que as principais alterações que foram realizadas foram as seguintes:

- Substituição do feltro umedecido por um sistema de evaporação com o dobro de eficiência. Note que o sistema agora possui uma bandeja, que impede que o excesso de álcool caia no chão da câmara e ao mesmo tempo, permite que a caixa fique fechada por mais tempo, sem que seja necessário umedecer com frequência o feltro. O abastecimento inclusive é feito de forma bastante simples, através do uso de uma mangueira que levará o álcool até a bandeja por vácuo (chupa-se o ar dentro da câmara para fora através da mangueira, criando assim um vácuo).

- Desenvolvimento de um sistema de resfriamento da câmara que permite estabilidade de temperatura durante longos períodos de tempo. No caso, foi construída uma caixa metálica de alumínio tendo como isolamento entre as paredes uma camada espessa do poliuretano. O gelo seco é introduzido tanto nessa caixa como no sistema dissipador acoplado à câmara (Fig.4.5), dotado de uma tampa para que, uma vez abastecido, o gelo seco não caia fora quando posicionado dentro da caixa de resfriamento. O sistema dissipador é constituído por quatro aletas de chapa de alumínio espessas, soldados com pasta de silicone<sup>1</sup> na superfície de contato inferior da câmara, provocando um resfriamento extremamente eficiente e rápido da câmara.
- Desenvolvimento de um sistema de vedação, que como vimos em (3), é um fator importante na formação da nuvem dentro da câmara.
- O chão da câmara foi pintado com uma tinta preta fosca que não saísse com o álcool. Entretanto, o mais indicado no caso seria a anodização, por interferir menos com o processo de dissipação. Porém, a limitação de tempo levou-nos a escolher como alternativa a pintura epoxi.
- A fonte de luz foi substituída por uma fonte muito mais intensa e com o foco direcionável. Entretanto, um problema encontrado é que sendo bastante potente, a fonte aquecia rapidamente, o que não permitiu uma iluminação constante e intermitente durante longos períodos de tempo.

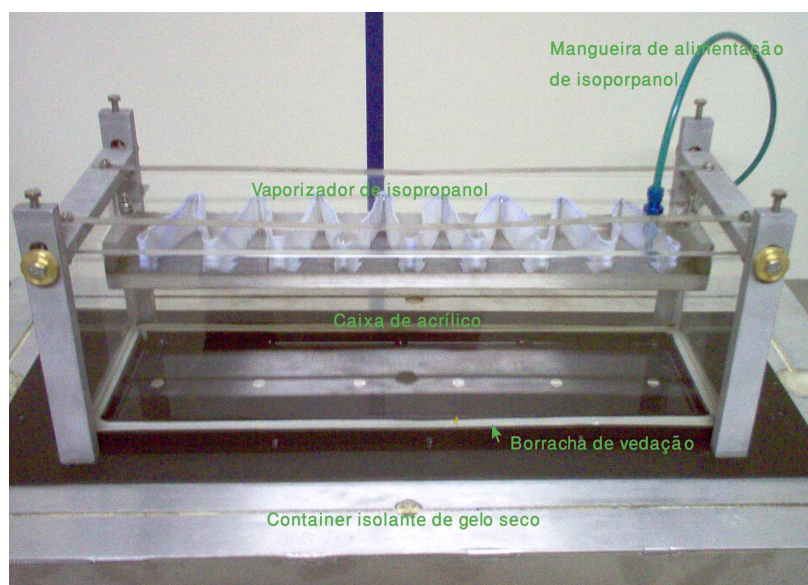


Figura 4.1: As principais melhoras realizadas: sistema de evaporação e introdução do isopropanol, sistema de vedação, sistema de armazenamento do gelo seco e resfriamento do chão da câmara

<sup>1</sup>A pasta de silicone é utilizada geralmente em sistemas em que se deseje garantir uma condução de calor/resfriamento com alta eficiência



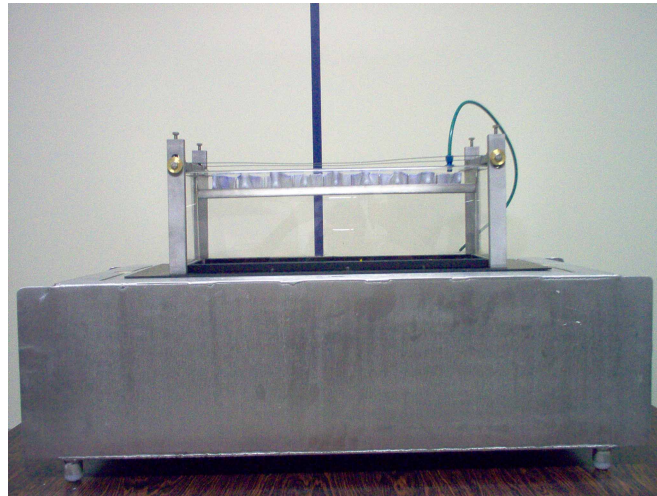


Figura 4.2: Vista frontal da caixa de resfriamento mais câmara.

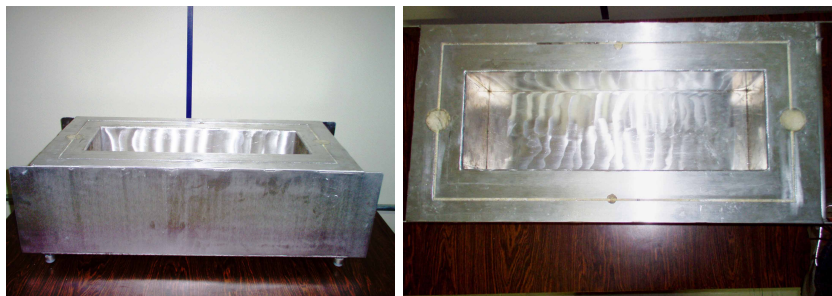


Figura 4.3: A caixa de refrigeração por gelo seco, onde a câmara será encaixada.

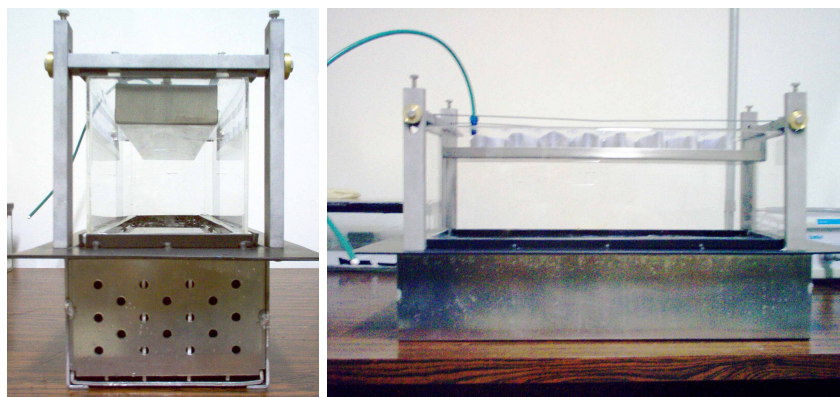


Figura 4.4: Vista lateral e frontal da câmara, fora da caixa de resfriamento.

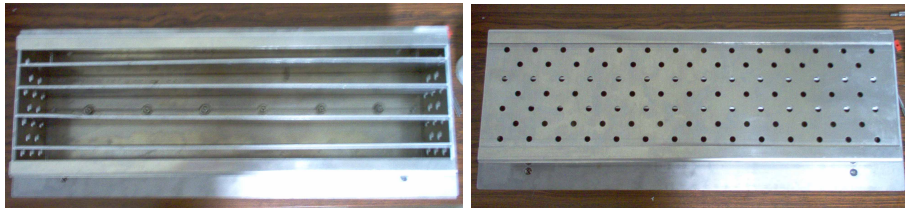


Figura 4.5: Vista inferior da câmara, onde se armazenará também gelo seco.

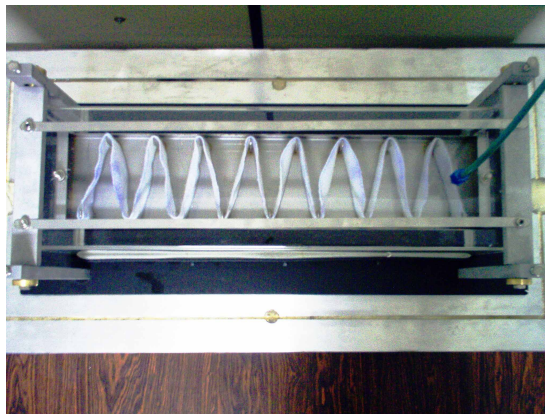


Figura 4.6: Vista superior. O sistema de evaporação do isopropanol.



Figura 4.7: Fonte de iluminação, emprestada pelo Laboratório de Óptica.

Para essa segunda etapa, conseguimos também um ímã com um campo magnético aproximadamente constante e uniforme entre suas placas (Fig.4.8), com intensidade de aproximadamente 4,5 G, gentilmente emprestado pelo Depto. de Ímãs do LNLS. Pretendíamos tentar observar a curvatura de raios cósmicos na presença desse campo, conforme vimos na teoria.

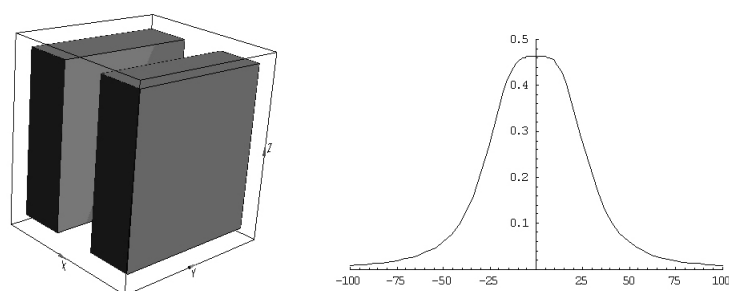


Figura 4.8: Ímã com campo magnético constante entre as duas placas magnéticas. O gráfico ao lado fornece uma simulação da intensidade da componente  $B_x$  do campo. As demais componentes podem ser desprezadas.

Além disso, obtivemos também um pouco de areia monazítica da praia de Guarapari - ES, rica em Tório e que deve emitir portanto partículas  $\alpha$ . Foi cogitada a utilização de uma fonte radioativa mais intensa, mas como a fonte disponível emitia raios  $\gamma$  além das partículas  $\alpha$ , decidimos omiti-la por questões de segurança.

## 4.2 Resultados e Discussão

Realizamos dois testes com essa nova montagem: um no dia 23 de Novembro de 2005 em Bragança Paulista, na presença da família da autora deste relatório, e outro no dia 25 de Novembro de 2005, numa sala do departamento de Raios Cósmicos.

No primeiro teste, o sistema atingiu rapidamente o estado de equilíbrio desejado, com a formação inclusive de uma fina camada de nuvem no chão da câmara, estado esse considerado ótimo para a visualização das partículas. A visualização estava de fato excelente, de forma que ao aproximar o ímã da câmara, pudemos claramente observar um desvio bastante intenso de partículas nas proximidades do ímã. A presença da família da autora também serviu como uma prévia das reações que se deve esperar do público em geral, permitindo o aperfeiçoamento do método didático utilizado para explicar o funcionamento da câmara.

No segundo teste entretanto, não conseguimos atingir a condição ótima, embora tenhamos tentado durante uma tarde inteira, realizando pequenas alterações nas condições da câmara (diminuindo ou aumentando a quantidade de álcool disponível, deixando entrar um pouco de ar, vedando menos). Ainda que os raios cósmicos pudessem ser observados, uma chuva intermitente reduziu a definição das trajetórias e embora estivéssemos portanto câmaras fotográficas de alta definição, não foi possível fotografar as trajetórias. Nesse teste, utilizamos a areia monazítica, da qual pudemos de fato observar emissão de partículas  $\alpha$  e um pedaço de chumbo, onde tentamos verificar a formação de pares elétron-pósitron. Isso entretanto não foi bem-sucedido. Além disso, devido também a

visualização não ótima da câmara, a presença do ímã pouco nos revelou e não pudemos realizar caracterização alguma das partículas.

A fim de verificar afinal quais são as condições ótimas necessárias para a realização do experimento, buscamos nos primeiros artigos que fizeram uso da câmara mais informações (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12). Essa pesquisa bibliográfica foi bastante interessante, pois permitiu conhecer um pouco mais sobre o funcionamento técnico da câmara. As duas informações que nos chamaram mais a atenção foi para o uso de metanol em quase todas as montagens (apenas uma fez uso do álcool isopropílico) e para um aquecimento do teto da câmara, o que deve, segundo os artigos, aumentar a altura da nuvem formada a partir do chão câmara. Devemos tentar realizar esse aquecimento através de uma lâmpada de infravermelho no nosso próximo teste, que será na apresentação do projeto ao Prof. Lunazzi.

Uma outra pequena alteração que será feita será colocar a amostra de chumbo e de areia em cima de algum isolante, antes de colocá-los em contato com a caixa. A leitura dos artigos nos chamou a atenção para o fato de que, ao colocar as amostras em contato com a superfície bastante fria da câmara, estas acabam entrando em equilíbrio térmico com o chão da câmara, de forma que passam a servir como condensadores também e qualquer partícula ionizante que por aí passar não serão visualizadas, pois a condição de supersaturação não será mais verificada.

Lembramos aqui que apesar de todas as vantagens da câmara que desenvolvemos, existe uma desvantagem que nos impede realizar muitos experimentos: o gelo seco custa R\$4,00 o kilo, sendo que para cada ensaio, utilizamos cerca de 50kg – o que dura cerca de 8hs. Esse custo acaba nos limitando. Cogitamos utilizar nitrogênio, dada a eficiência do sistema de resfriamento desenvolvido, mas por prudência, decidimos não fazê-lo antes da apresentação do projeto ao orientador da disciplina, pois existe um sério risco da caixa de acrílico não resistir à baixa temperatura e estourar. A caixa, por sinal, já apresenta algumas pequenas fissuras.

### 4.3 Sobre a bibliografia

Observamos aqui que não será possível fazer uma revisão bibliográfica detalhada tal qual solicitou o orientador do curso, uma vez que nos baseamos em vários trechos de várias fontes de referência, citadas nesse relatório e nos anteriores. Fica difícil a essa altura ligar o que veio da onde, mas na medida do possível, procuramos ao longo do relatório indicar de quais referências vieram as informações que estávamos apresentando.

## Conclusões

Foi uma experiência bastante gratificante trabalhar com esse projeto. Pudemos aprender bastante e ter um contato mais próximo e realista com o que é de fato realizar pesquisa científica. Embora ainda não tenhamos conseguido estabelecer exatamente quais são as condições ótimas de operação da câmara, continuaremos a investigar o assunto. Isso acaba limitando o uso da câmara, pois embora esta permita a visualização dos raios cósmicos para fins de demonstração, em condições não ótimas não é possível fazer análises mais aprofundadas sobre as características dessas partículas, tal qual faziam os pioneiros em raios cósmicos.

Esperamos com esse projeto também ter dado um contribuição ao equipamento de instrumentação para ensino em física da Universidade, com essa câmara que poderá ser usada ainda em inúmeras outras demonstrações que estão por vir.

# Agradecimentos

Diversos colaboradores da Unicamp cooperaram na realização desse projeto, aos quais queremos apresentar aqui nossos agradecimentos: Antônio Costa (Laboratório de Óptica), Carlos (Laboratório de Raio-X e Cristalografia), Roberto (Vidraria do IFGW), Profa. Mônica Cotta (DFA), Nivaldo e João (DRCC), Giancarlo Tosin e a equipe do departamento de ímãs do LNLS, Sra. Maria (UNIMAGNA).

Expressamos aqui nossos agradecimentos ao Sr. Geraldo (UNIMAGNA), por seu papel crucial no aperfeiçoamento da câmara e por sua gentil doação.

## Referências Bibliográficas

- [1] A. Foland <http://www.lns.cornell.edu/~adf4/cloud.html>
- [2] N. Horner F 809A - Projeto de Instrumentação para Ensino.
- [3] N. Horner F 809A - Relatório Parcial de Instrumentação para Ensino. Segunda Versão.
- [4] P. Galison *Image and Logic: Material Culture of Microphysics*, University of Chicago Press, 1a. ed.
- [5] A.L. Langsdorf, Jr., *Review of Scientific Instruments* 10, 91 (1939).
- [6] T.S. Needels and C. E. Neilsen, *Review of Scientific Instruments* 21, 976 (1950).
- [7] E.W. Cowan, *Review of Scientific Instruments* 21, 991 (1950).
- [8] R.P. Shutt, *Review of Scientific Instruments* 22, 730 (1951).
- [9] E.L. Fireman and D. Schwarzer, *Physical Review* 94, 385 (1954).
- [10] A.R. Bevan, *Journal of Scientific Instruments* 31, 45 (1954).
- [11] A.P. Batson et al., *Journal of Scientific Instruments* 33, 302 (1956).
- [12] H. Slatis, *Nuclear Instruments* 1, 213 (1957).
- [13] R. Clay, B. Dawson *Cosmic Bullest - High Energy particles in astrophysics*, 1a. ed, Addison-Wesley (1997)
- [14] M. Born, *Atomic Physics*, 8a. ed, Dover (1969)
- [15] O.C. Allkofer, *Introduction to Cosmic Radiation*, Verlag München, 1a. ed, (1975)
- [16] D.H. Frisch, A.M. Thorndike, *Elementary Particles*, Van nostrand Momentum Book, 1a. ed, (1964)
- [17] [http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/cloudchamber/cloudchamber\\_index.htm](http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/cloudchamber/cloudchamber_index.htm)