

# Aula 7

## Câmara de Nuvens e a Detecção do Pósitron

Renan Milnitsky  
Marcelo Gameiro Munhoz  
Julien Minerbo

Quando Dirac propõe sua equação em 1928, ela é muito bem recebida por conseguir extrair, a partir de teorias fundamentais, a natureza e as propriedades do spin. No entanto, ela traz consigo resultados indesejados, como é o caso dos estados de energia negativa, que na época tiveram pouca ou quase nenhuma tentativa de interpretação física. O sucesso da teoria em prever o spin fez com que a comunidade tivesse um olhar mais cuidadoso para os estados de energia negativa. Depois de um conjunto de aulas criando interpretações físicas para tais estados, fomos apresentados a teoria dos buracos e a proposta de existência do pósitron. Cabe se perguntar se o antielétron realmente existe.

As primeiras evidências sobre a natureza do pósitron foram obtidas por Carl D. Anderson em suas investigações sobre a natureza dos raios cósmicos. Seu trabalho com os pósitrons o rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1936 e é sobre ele que nos debruçaremos nesta aula. Como as evidências dos pósitrons estiveram intimamente associadas a natureza dos raios cósmicos, cabe fazer uma contextualização inicial sobre o estado interpretativo deles na época que Anderson realizou seus experimentos.

### 1. Viktor Hess e a Descoberta dos Raios Cósmicos

O estudo dos raios cósmicos tem início com a investigação de um famoso problema que assolava não só a física, como a também a meteorologia, desde o final do século XIX: o **problema da ionização residual do ar atmosférico**. O problema consistia no fato de que determinadas porções da atmosfera sofriam com ionizações sem nenhuma causa diretamente aparente.

Um dos primeiros a perceber este efeito foi o cientista C.T.R Wilson. Em 1900, ao conduzir experimentos com eletroscópios como o da Figura 1, ele verificou que eles eram misteriosamente e rapidamente descarregados quando colocado em contato com a atmosfera, sugerindo haver nela agentes ionizantes que provocavam sua diminuição de carga elétrica. Em seus estudos, ele percebeu que os tempos de descarga dependiam de diversos fatores meteorológicos. Foi então que ele começou a se questionar qual seria a fonte que originaria das radiações que provocariam este efeito.

Como este estudo ocorreu paralelamente aos estudos de Marie Curie e Henry Becquerel sobre a radioatividade natural de determinados elementos químicos presentes na natureza, muitos acreditaram que essa ionização responsável tanto pela ionização do ar, quanto pela rápida descarga de eletroscópios, seria proveniente destes elementos que estariam dispersos em diversas localidades da superfície terrestre.

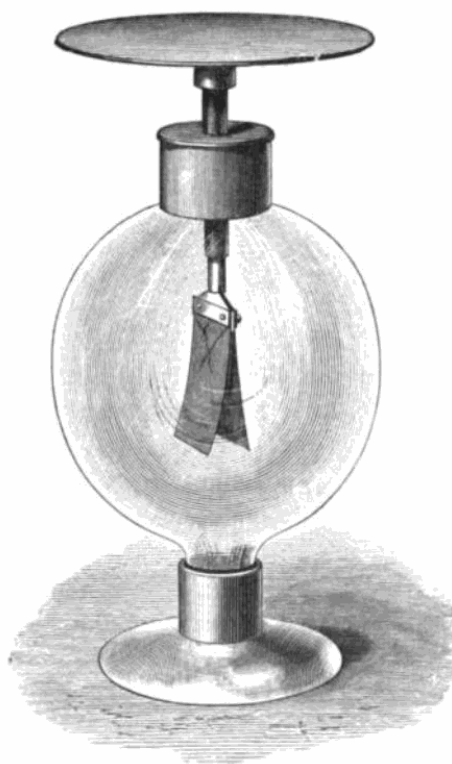


Figura 1 - Ilustração de um eletroscópio, instrumento utilizado para avaliar a presença de cargas elétricas. A parte superior é colocada em contato com diversos materiais e, ao ser eletrizada, ela provoca a eletrização e repulsão das duas folhas de ouro no interior do bulbo isolado a vácuo. Já se sabia que radiação ultravioleta e raios X e eram capazes de descarregar eletroscópios em função da colisão dos fótons de alta energia com as cargas elétricas em excesso.

A validade desta hipótese foi investigada pelo físico Theodor Wulf, que comparou a ionização produzida na superfície terrestre, com aquelas produzidas a 80 m e a 300 m, realizando suas medidas indo da superfície ao topo da torre Eiffel. Se a causa da ionização fosse provocada pela radiação naturalmente emitida por elementos presentes na superfície, imaginava-se que sua intensidade deveria diminuir com a altitude, sendo maior na superfície, menor a 80 m e praticamente nula a 300 m. No entanto, ao contrário do que se esperava, os resultados apontaram para um aumento da ionização a 300 m, levando-o a postular que talvez haja uma fonte de radiação acima da crosta terrestre. (BUSTAMANTE, 2013)

Paralelamente, o físico italiano Domenico Pacini realizou medidas da ionização em ambientes diversos, como montanhas, marés, lagos e até mesmo em profundidades marítimas. Em um de seus mais relevantes estudos, realizados nas águas do Golfo de Gênova a bordo da marinha italiana, ele utilizou um eletrômetro para comparar as medidas de descarregamento na superfície terrestre e no fundo do mar. Como o coeficiente de absorção de radiação na água é altíssimo, esperava-se observar decréscimos exponenciais à medida que se direcionava a maiores profundidades. No entanto, contrariando novamente as concepções da época, Pacini observou uma redução não significativa, sendo as medidas debaixo d'água cerca de apenas 20% menores do que na superfície. Isto o levou a afirmar que essa radiação não poderia ser nenhuma daquelas emitidas na superfície terrestre, mas sim de uma outra fonte de radiação de altíssima energia e, portanto, de altíssimo poder de penetração. (BUSTAMANTE, 2013)

Os mais significativos passos dados com relação a este problema foram dados por Viktor Hess e Albert Gockel. Hess tomou conhecimento do método de investigação que Gockel vinha desenvolvendo desde o início do século XX: elevar balões até altitudes elevadas para avaliar a produção de ionização na atmosfera. Após 3 anos de investigação, Gockel constata um comportamento misterioso. Esperando detectar alguma região no qual deveria ocorrer uma diminuição na ionização da atmosfera, acreditando ainda na hipótese de que a causa seria a radiação naturalmente emitida por elementos, ele percebeu que após uma determinada altitude, a ionização começava a crescer exponencialmente. Sobre este comportamento, Hess aponta que,

No último ano tive a oportunidade de investigar a radiação penetrante durante dois voos de balões. Reportei a primeira destas viagens no encontro de Karlsruhe. Nas duas viagens, nenhuma variação relevante na radiação foi possível de ser observada até altitudes de 1.100 m. Gockel, também, em dois voos de balão, não foi capaz de detectar a esperada diminuição na intensidade da radiação com relação a altitude. Disso, foi concluído que, além da radiação gama produzida por elementos radioativos na crosta terrestre, deve haver outra fonte de radiação penetrante. (HESS, 1913, p.1)

Segundo Bustamante (2013), Hess realizou muitos estudos sistemáticos baseados na elevação de balões, conduzindo uma centena de voos apenas no ano de 1912. Suas principais conclusões foram as de que:

- **Até 1000 m de altitude:**  
radiação é absorvida devido a presença de grandes massas de ar, o que provoca uma diminuição da ionização com relação a altitude.
- **Entre 1000 m e 5000 m:**  
aumento significativo da radiação não explicado pelas fontes radioativas terrestres.
- **Acima de 5000 m:**  
ionização 10 vezes mais intensa do que a observada no solo.

Não parecendo haver alternativa plausível, os comportamentos observados nas altitudes elevadas só poderiam ser explicados pela existência de uma radiação penetrante provinda do espaço e que atingia a atmosfera terrestre pela sua extremidade superior – a denominada **radiação cósmica (ou raios cósmicos)**. Na perspectiva de Hess, estes raios interagiam com a atmosfera produzindo uma cascata de radiações que atingiria a terra nas suas mais diferentes localidades, este fenômeno ficou conhecido como chuva cósmica, ilustrado na figura 15.

Mas o que exatamente são os raios cósmicos? Quais são suas propriedades? Eles são semelhantes à radiação que identificamos na Terra? O que os produzem? É na investigação destas questões que se encontra não somente o trabalho de Carl Anderson, mas também da atividade científica que, na época, deu origem a física de partículas.

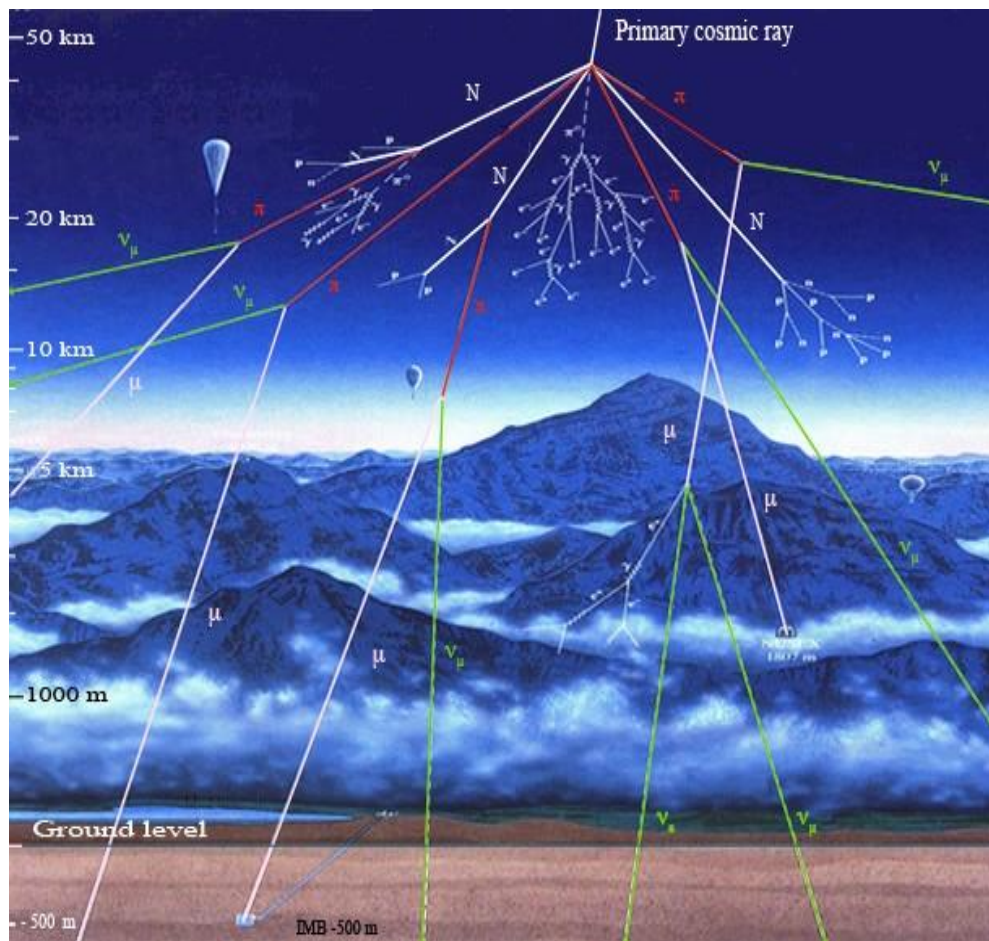


Figura 2 - Representação da radiação cósmica penetrando a atmosfera. Até 1914 era notável a percepção de sua intensidade decrescendo até 1000 m, devido a presença de grandes massas de ar, mas sofrendo um aumento exponencial acima desta altura.

## 2. Carl Anderson e a Câmara de Nuvens da Caltech

Como o estudo de Anderson foi publicado em 1932 e a teoria dos buracos que levou a proposição do pósitron começou a ser desenvolvida em 1930, pode-se imaginar que uma das motivações experimentais de Anderson tenha sido exatamente a de verificar a validade ou não da teoria de Dirac. Acontece que Anderson tinha pouco conhecimento da teoria de Dirac e isto se dava por dois motivos: i. a péssima recepção que a teoria dos buracos teve após sua proposição e ii. a diferença de localização geográfica entre Dirac e Anderson.

Dirac realizava suas pesquisas teóricas em Cambridge na Inglaterra e Anderson conduziu seus experimentos na Caltech, nos Estados Unidos. Longe de procurar o pósitron, Anderson foi convidado por Milikan para construir um novo tipo de aparato que seria utilizado para investigar o espectro de energia dos raios cósmicos. Até esta época, sabia-se que os raios cósmicos eram compostos por raios gama de alta penetrabilidade e radiações ionizantes que supunha-se ser elétrons e prótons. O mapeamento da energia era fundamental pois sabia-se que eram radiações de altíssimas energias, em função de sua alta penetrabilidade, inclusive em profundidades dos oceanos, mas não se sabia exatamente as ordens de grandeza e a amplitude de seu espectro de energia.

O equipamento construído por Anderson a convite de Milikan se trava de uma câmara de nuvens com uma novidade essencial: o acoplamento de grande um campo magnético que seria utilizado para avaliar a energias das partículas carregadas a partir da deflexão ocasionada pela força de Lorentz.

A câmara de nuvens é um aparato inventado pelo físico C.T.R. Wilson em 1894 com o objetivo de simular e estudar as condições meteorológicas de formação de nuvens. Para produzir as nuvens no interior da câmara, Wilson gerava porções de vapor em condição de supersaturação, o que gerava um estado de instabilidade extremamente. Quando partículas carregadas atravessam este gás supersaturado, elas promovem uma ionização que, devido a sua alta instabilidade, inicia um processo de condensação, formando gotas ao longo de toda a trajetória realizada pela partícula. Como as gotas são formadas no local por onde a partícula passou, o instrumento pode ser utilizado para visualizar, de forma indireta, a trajetória e as características dela – quanto for a massa da partícula, maior será a ionização e, portanto, maior será a espessura do traço deixado na câmara de nuvem. A Figura 3 representa este processo.

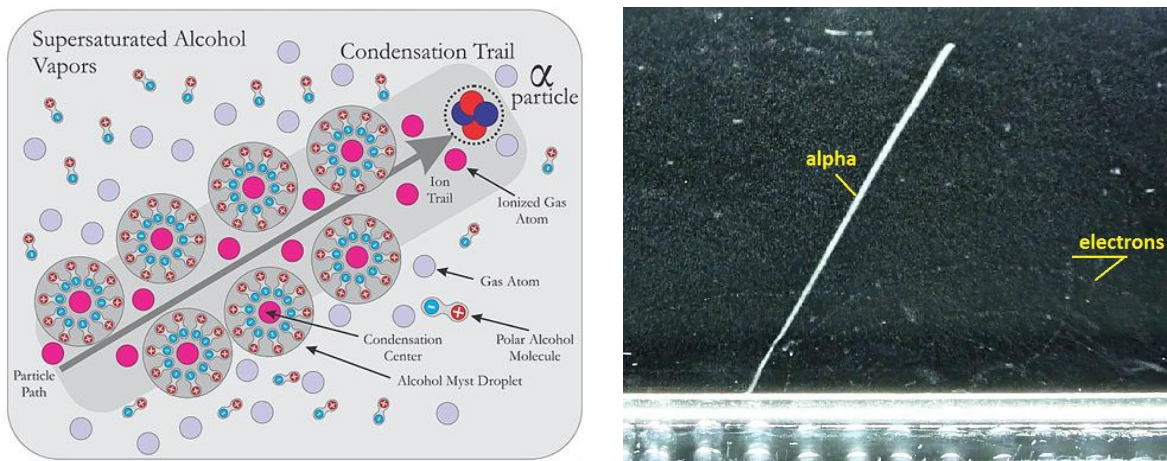


Figura 3 - À esquerda: representação da ionização provocada pela passagem de partículas alfa em uma câmara de nuvens. À direita: registro fotográfico de trajetórias de partículas alfa (maior espessura) e beta (menor espessura).

A aplicação do campo magnético permite tanto um estudo qualitativo, quanto quantitativo das partículas carregadas que passam no interior da câmara. Como ilustrado na Figura 4, a aplicação de campos magnéticos permite associar o sentido da deflexão ao sinal da carga elétrica: partículas de carga positiva são defletidas em um sentido, negativas no sentido oposto, e partículas neutras passam sem sofrer deflexão. A caracterização do sentido do movimento da partícula carregada pode ser extraído da força de Lorentz, onde  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ , que também pode ser analisada a partir da regra da mão esquerda.

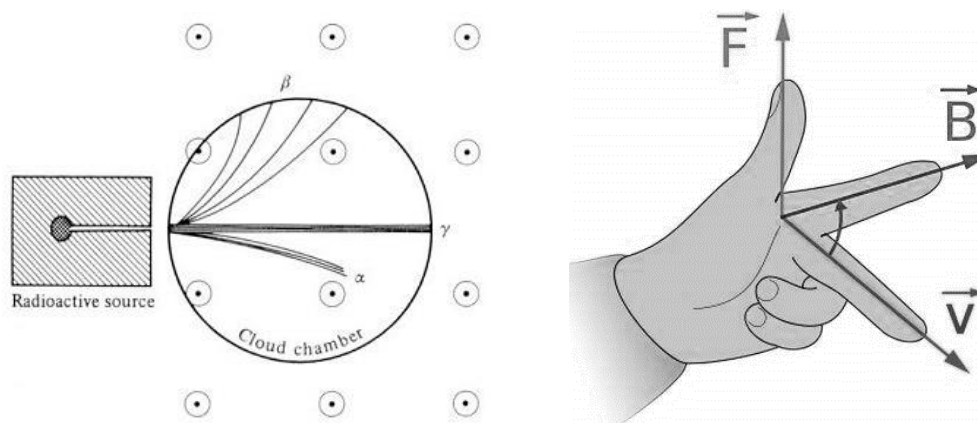


Figura 4 - À esquerda: partículas carregadas sob a ação de um campo magnético no interior de uma câmara de nuvem. À direita: regra da mão esquerda utilizada para determinar o sentido da força magnética que alterará a trajetória das partículas.



Além da identificação do sinal da carga elétrica, também é possível avaliar a massa das partículas a partir do raio de curvatura da trajetória realizada. Para isto, sabendo que a Força de Lorentz age como resultante centrípeta de um movimento circular realizado pelas partículas no interior da câmara, podemos escrever que

$$F_{cp} = F_{mag}$$

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Desta forma, sabemos que quanto maior for a massa da partícula, maior será o raio de curvatura da trajetória realizada. Já quanto menor for a massa, menor será o raio de curvatura. Por este motivo a partícula  $\alpha$  da Figura 4 aparece com uma trajetória menos defletida e, portanto, com maior raio de curvatura. Já a partícula  $\beta$  aparece com uma trajetória mais defletida e, portanto, com menor raio de curvatura.

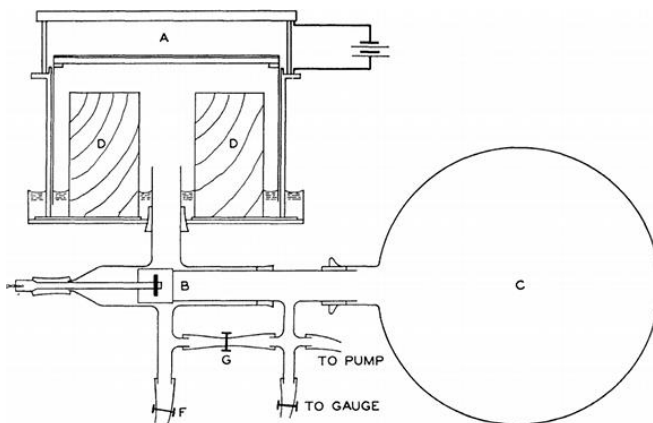


Figura 5 - Projeto e desenho da Câmara de Nuvens projetada por C.T.R. Wilson.

A câmara de nuvens utilizada por Anderson reproduzia o método originalmente empregado por C.T.R. Wilson para a formação das nuvens, que consistia no resfriamento do gás a partir de uma expansão adiabática realizada a partir da movimentação um pistão com embolo manual, como o mostrado na Figura 5.

No arranjo experimental proposto por Anderson, a câmara de nuvem se encontrava envolta por um conjunto de espiras que constituíam um solenoide por onde passava uma corrente que produzia um campo magnético de 1,7 T, o que representava uma grande conquista para a época. Em termos comparativos, o *Large Hadron Collider* (LHC) emprega campos magnéticos de 2,0 T e para isto faz uso da tecnologia de supercondutores, o que não existia na época de Anderson. Para gerar uma corrente suficientemente intensa para produzir um campo de 1,5 T, Anderson empregava uma potência de 425 kW a 600 kW, o que era equivalente a 10% de toda a energia da Caltech. Em frente a câmara de nuvens, Anderson acoplou uma câmera fotográfica para produzir registros da trajetória das partículas carregadas. A Figura 6 apresenta uma fotografia e uma ilustração do aparato experimental utilizado por Anderson.

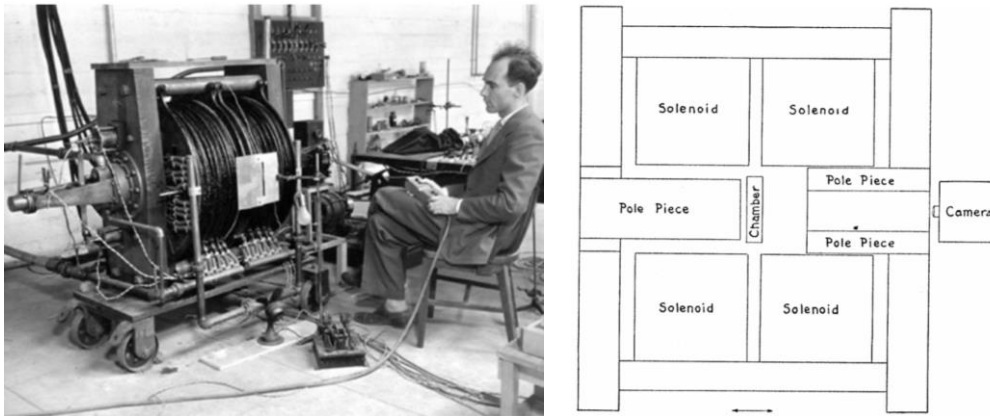


Figura 6 - Câmara de nuvens envolta por um campo magnético gerado por um solenoide. Anderson utilizou este arranjo para investigar a energia dos raios cósmicos e com obteve evidências para a existência do pósitron.

### 3. A detecção do pósitron

Com a câmara de nuvens acoplada ao campo magnético em pleno funcionamento, resultados extraordinários começaram a aparecer. Até esta época, conhecia-se muito bem processos de interação de fótons com a matéria, em especial, o espalhamento Compton. Como fótons não podem ser observados diretamente em câmara de nuvens, Anderson esperava fazer uma análise de seu espectro de energia a partir dos elétrons espalhados por eles. Para sua surpresa, como aponta em um relato de seu trabalho:

Os primeiros resultados da câmara de nuvem magnética foram dramáticos e completamente inesperados. Havia um número aproximadamente igual de partículas de carga positiva e negativa, em nítido contraste com os elétrons produzidos pelo espalhamento Compton esperados simplesmente pela absorção de fótons de alta energia. (Anderson, 1985, p.119)

A emblemática fotografia que rendeu a Anderson o Premio nobel está apresentada na Figura 7. No centro da figura o cientista colocava uma pequena camada de chumbo para frear as partículas com o objetivo de identificar o sinal de sua carga elétrica a partir da deflexão provocada pelo campo magnético que tinha seu sentido apontando para dentro ( $\otimes \vec{B}$ ).

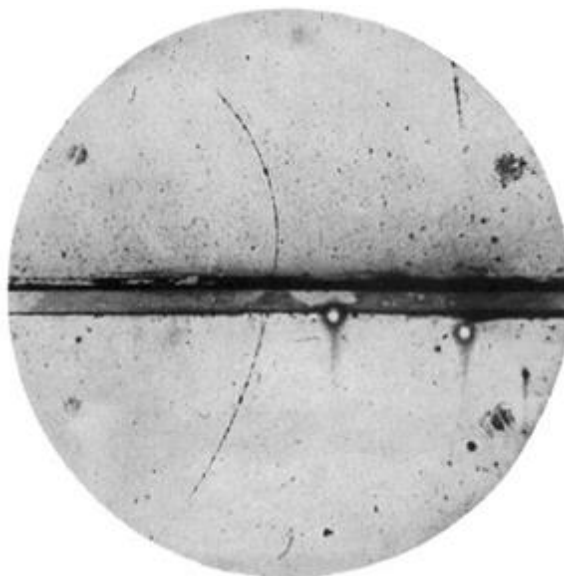
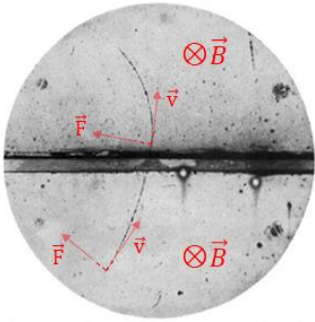
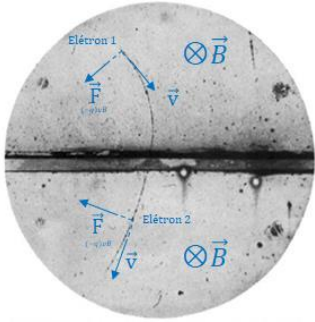
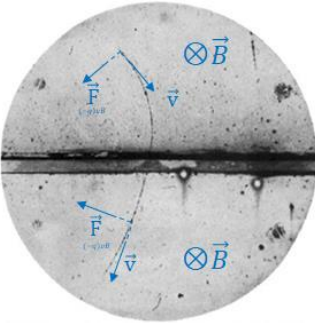
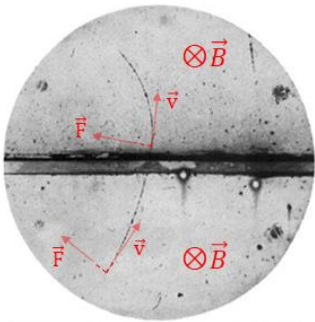


Figura 7 – Evidências da trajetória de partículas com carga elétrica positiva. Esta seria a primeira vez em que o pósitron teria sua natureza revelada experimentalmente.

Quando analisamos esta fotografia sob a ótica dos conhecimentos atuais em física de partículas elementares, identificamos rapidamente que ela revela a trajetória realizada por um elétron positivo (pósitron), em função do sentido de sua trajetória e da elevada deflexão sofrida pela ação do campo magnético. No entanto, nesta época apenas duas partículas com carga elétrica eram conhecidas: os elétrons e os prótons. Em função da resistência em postular novas partículas, Anderson apresenta 4 hipóteses para explicar a trajetória observada na Figura 7. Estas 4 hipóteses estão sintetizadas na tabela da Tabela 1.

Tabela 1 - As 4 interpretações de Anderson sobre a natureza da partícula detectada na câmara de nuvem.

Traço na Câmara de Nuvem	O que é?	Qual a hipótese?
	Próton	<p><b>Hipótese:</b> a partícula possui carga positiva e se trata da movimentação de um próton vindo de baixo para cima.</p> <p><b>Problemas:</b> Um próton com este raio de curvatura deveria ter baixa energia, de aproximadamente 300 keV, e não seria capaz de atravessar a camada de chumbo nem percorrer altas distâncias sem ser absorvido na câmara de nuvens.</p>
	2 Elétrons negativos	<p><b>Hipótese:</b> A partícula possui carga negativa e retrata dois elétrons se movimentando de cima para baixo: um Elétron 1 é absorvido pela camada de chumbo; um Elétron 2 de alta energia é produzido a partir da interação de fótons com a camada de chumbo.</p> <p><b>Problemas:</b> Ainda que seja um processo possível, é muito pouco provável que um elétron seja absorvido no mesmo local em que um segundo elétron é ejetado pela incidência de um fóton.</p>
	Elétron negativo	<p><b>Hipótese:</b> A partícula possui carga negativa e retrata um elétron se movimentando de cima para baixo que é acelerado ao passar pela camada de chumbo por algum processo de interação ainda desconhecido.</p> <p><b>Problemas:</b> Nenhum processo de interação com a matéria previa aceleração e ganho de energia ao invés de frenamento e perda de energia.</p>
	Elétron positivo (Pósitron)	<p><b>Hipótese:</b> A figura retrata um elétron positivo (pósitron) se movimentando de baixo para cima após ser produzido pela passagem de um fóton de alta energia.</p> <p><b>Problemas:</b> Dificuldade do contexto em aceitar a existência de uma nova partícula elementar que nunca havia sido observada anteriormente.</p>



Como as três hipóteses envolvendo elétrons e prótons soavam absurdas, Anderson trabalhou na hipótese de que as partículas deveriam ser elétrons positivos (pósitrons). Ainda que fosse coerente que as trajetórias correspondessem a pósitrons, não estava claro para Anderson como exatamente eles eram produzidos:

Não foi imediatamente óbvio para mim qual era o mecanismo detalhado na produção de pósitrons. Eles de alguma forma adquiriram a carga positiva do núcleo? Eles poderiam ser ejetados do núcleo quando presumivelmente não havia pósitrons presentes no núcleo? (ANDERSON, 1985, p.121)

A descrição do processo que explicaria o aparecimento de pósitrons no interior das câmaras de nuvem foi proposto por Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini com a ideia da produção de pares, na qual um fóton de alta energia interage com o campo elétrico do núcleo de um dos átomos que compõe a câmara de nuvem e produz, neste processo, um par elétron-pósitron.

Blackett e Occhialini sugeriram a hipótese da produção de pares no seu artigo publicado na primavera de 1933, no qual relataram as suas belas experiências com raios cósmicos utilizando a primeira câmara de nuvens controlada por contadores Geiger. (ANDERSON, 1985, p.121)

A câmara de nuvens de Blackett e Occhialini, ao contrário da manualmente operada por Anderson, contava com um mecanismo automático na qual dois detectores Geiger, ao detectarem a presença de partículas eletricamente carregadas no interior da câmara, acionavam uma câmera fotográfica que começava a fazer os registros. A presença de dois detectores era uma precaução para o caso de um deles ser acionado acidentalmente, se houvesse a coincidência de dois acionamentos, isto representaria um evento que precisa ser fotografado. Este processo, que na física de partículas atualmente é conhecido como *trigger* (gatilho), possibilitou a coleta de uma imensidão de novas fotografias de chuviros cósmicos revelando não somente a existência do pósitron, mas principalmente da sua existência acoplada a produção em pares com elétrons como prevê o processo de produção de pares.



Figura 8 - Produção de um chuviro cósmico contendo centenas de elétrons e pósitrons. (Blackett & Occhialini, 1933)

#### 4. A caracterização de processos de interação a partir de fotografias de câmaras de nuvem

O aprimoramento de câmaras de nuvem permitiu não somente a identificação do pósitron, mas também a visualização e o estudo de uma série de outros processos de interação de partículas eletrizadas e da radiação com a matéria. A Figura 9 apresenta 3 fotografias na qual podemos avaliar a presença de elétrons, pósitrons e prótons pelo sentido de sua trajetória e pela deflexão provocada pela ação de campos magnéticos.

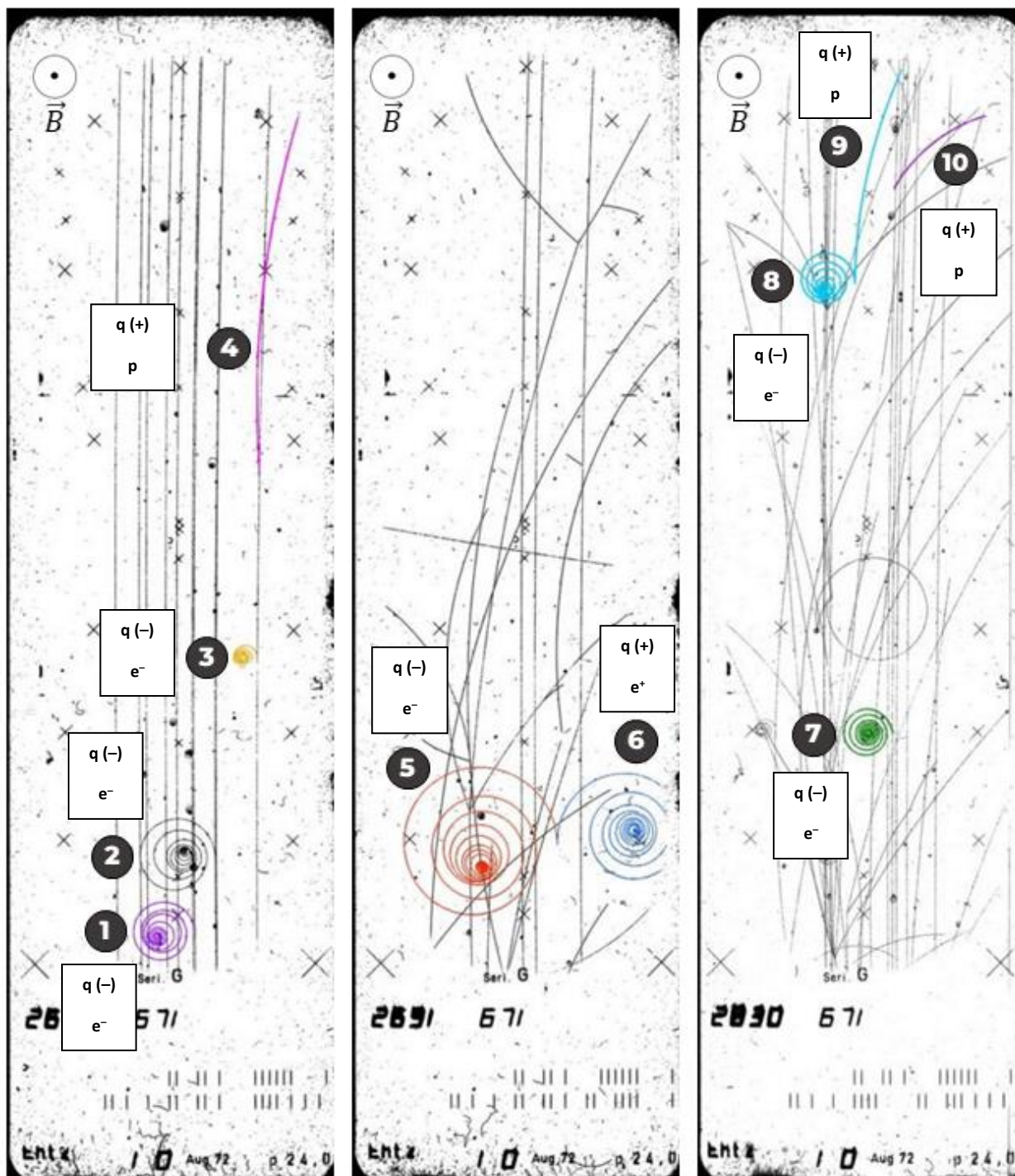
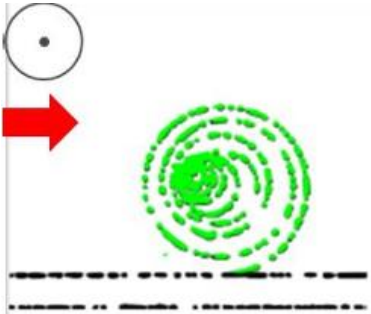
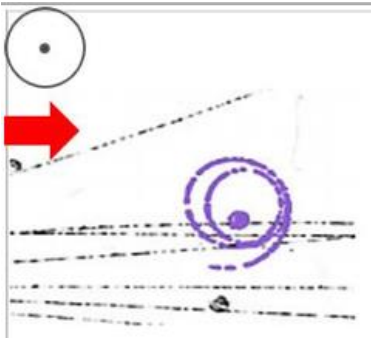
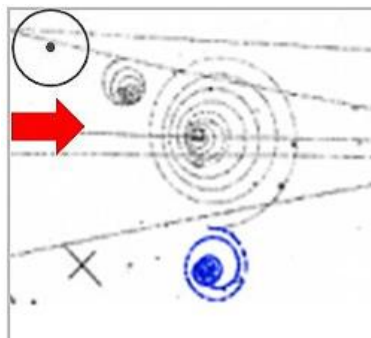
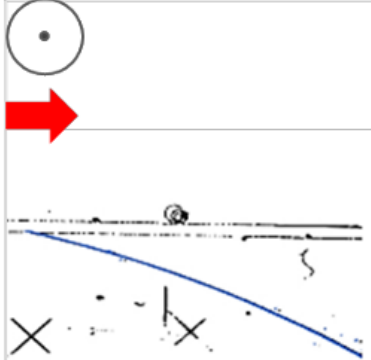


Figura 9 - Identificação de Elétrons, Prótons e Pósitrons em fotografias de câmaras de nuvem.

A tabela 2 apresenta os traços característicos de alguns processos que podem ser estudados com fotografias de câmaras de nuvens.

Trajetória na câmara de nuvem	Partícula	Processo de <u>interação e produção</u> e <u>traço característico</u>
	Elétrons ( $e^-$ )	<p><b>Processo:</b> <u>Bremsstrahlung.</u></p> <p>Uma partícula com carga elétrica interage com elétrons do gás, transferindo energia cinética para ele. O elétron ionizado começa a perder energia pela interação com o gás, diminuindo o raio numa trajetória espiralada.</p> <p><b>Traço característico:</b> trajetória curvada no sentido anti-horário (-) e com baixo raio de curvatura, vindo de um traço que revela ionização na câmara de nuvens (indicando a presença de partículas carregadas que provocam a ejeção do elétron).</p>
	Elétrons ( $e^-$ )	<p><b>Processo:</b> <u>Espalhamento Compton.</u></p> <p>Um fóton interage com um elétron que compõe o gás da câmara de nuvem. Parte da energia do fóton é transmitida para o elétron ejetado, que começa a perder energia pela interação com o gás, diminuindo o raio numa trajetória espiralada.</p> <p><b>Traço característico:</b> trajetória curvada no sentido anti-horário e com baixo raio de curvatura (-) vindo de nenhuma trajetória ionizada anteriormente (indicando a presença de partículas neutras produzindo a interação, como é o caso do fóton.)</p>
	Pósitrons ( $e^+$ )	<p><b>Processo:</b> <u>Produção de Pares</u></p> <p>Um fóton de alta energia interage com o núcleo atômico do gás que compõe a câmara de nuvem e produz um par elétron-pósitron.</p> <p><b>Traço característico:</b> trajetória destacada está curvada no sentido horário e com baixo raio de curvatura (+) vindo de nenhuma trajetória ionizada anteriormente (indicando a presença de partículas neutras, como é o caso do fóton.)</p>
	Prótons (p)	<p><b>Processo:</b> Uma partícula com carga elétrica de alta energia interage com prótons do gás, transferindo energia cinética para ele.</p> <p><b>Traço característico:</b> trajetória destacada está curvada no sentido horário (+) e com baixo raio de curvatura, vindo de trajetória ionizada anteriormente (indicando a presença de partículas carregadas de alta massa, como é o caso do próton.).</p>

## **BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS**

ANDERSON, C. **“Unraveling The Particle Content of The Cosmic Rays”** In: Early History of Cosmic Ray Studies: Personal Reminiscences with Old Photographs. 1985. Disponível em: <[link de acesso](#)>.

ANDERSON, C. **“The production and properties of positrons”**. Nobel Lecture. 1936. Disponível em: <[link de acesso](#)>.

ÅSBRINK, W. & LAWNCIZAK, A. **“On the 1932 Discovery of the Positron.”** Disponível em: <[link de acesso](#)>.

BETELLI, L et al. **“Particle Physics with Bubble Chamber Photograph.”** CERN. Disponível em: <[link de acesso](#)>.