

Contribuição ao estudo dos enxames penetrantes

H.A.Meyer, G.Schwachheim e A.Wataghin

Departamento de Física
Universidade de São Paulo
São Paulo Brasil

Introdução

Estudamos a absorção em chumbo das particulas dos enxames penetrantes (EP) produzidos no ar e dos produzidos num material colocado em cima do arranjo. Vamos chamar os primeiros de enxames atmosfericos penetrantes (EAP) e os segundos de enxames locais penetrantes (ELP). A frequencia dos ~~{EAP}~~ é dada pela frequencia registrada quando o material produtor está ausente (frequencia de fundo), pois as coincidencias casuais e as coincidencias devidas a mesons acompanhados de eletrons de colisão são em numero desprezível. (1)
Além disso os filtros de chumbo são suficientemente espessos para absorver os enxames de eletrons e fotons (este ponto é verificado em todas as experiencias) e a posição desses filtros torna improvavel a regístração dos EP neles produzidos.

Como nós observamos que a absorção dos EAP é pequena em todos os casos, a sua absorção no material produtor será pequena e a frequencia dos ELP será dada pela diferenca entre as frequencias com e sem a presença do material produtor.

A experiencia I foi realizada em Campos do Jordão (844 gr/cm²) no segundo semestre de 1949.

As outras foram realizadas em S.Paulo (950 gr/cm²) em 1950.

Os contadores Geiger-Muller usados nas nossas experiencias eram contadores tipo Maze com area sensível de ^{2,9}~~3~~ cm X 45 cm = 130 cm². Todos os erros que aparecem nessa nota são desvios quadra-

ticos médios.

Experiencia I

A experiencia I é um refinamento de uma experiencia já descrita anteriormente⁽²⁾. Foram registradas coincidencias entre quatro grupo de contadores (fig. 1). Cada grupo consistia de 3 contadores ligados em paralelo. Vê-se pela fig. 1 que para que possa ser registrada uma coincidência o enxame deve conter pelo menos duas particulas capazes de atravessar 19 cm de chumbo. Para a absorção dos EP foram usadas camadas de chumbo de 5 e 10 cm de espessura colocadas na posição A entre os grupos de contadores de cada telescópio (fig. 1). Um enxame produzido nessas camadas, para ser registrado, deverá evidentemente conter pelo menos uma particula energica dirigida para cima. Acreditamos portanto que a frequencia registrada de enxames produzidos nessas camadas seja desprezível. Os ELP são produzidos em 29 gr/cm² de carvão posto em cima do arranjo experimental na posição indicada na fig. 1. Os nossos resultados estão reunidos na tabela I. Vê-se por essa tabela que os EAP não são apreciavelmente absorvidos pelas camadas absorventes, ao passo que a produção local é fortemente absorvida já em 5 cm de chumbo. Esses resultados estão em acordo com os da experiencia anterior⁽²⁾.

Na experiencia I foi usado carvão como material produtor porque o peso atomico do carvão é próximo do peso atomico medio do ar. A semelhança dos resultados da experiencia I e da anterior, na qual foi usada gasolina em vez de carvão, justifica o uso indiscriminado de ambos os materiais nas nossas experiencias.

Experiencia II

O objetivo dessa experiencia é repetir a experiencia I em condições geometricas diferentes: quizemos estudar a

absorção dos ELP de abertura menor.

Os EP foram selecionados por tres grupos de contadores, cada grupo contendo tres contadores (fig. 2). Os 2 contadores externos de cada grupo estavam ligados em paralelo. Foram registradas coincidencias sextuplas. Para ser registrado, um enxame deve ~~XXX~~ conter pelo menos duas particulas capazes de penetrar 10 cm de chumbo. Os ELP foram produzidos em carvão. Nas cavidades A e B colocamos camadas de espessura variavel de chumbo como absorvente. Os nossos resultados estão reunidos na tabela II.

Atribuimos a alta frequencia de fundo quando as camadas absorventes estão ausentes ao fato que enxames de eletrons ainda conseguem penetrar os filtros permanentes. De 2,5 a 10 cm de chumbo a frequencia de fundo varia só muito ligeiramente. Isto é devido a uma pequena absorção dos EAP. Os ELP são entretanto fortemente absorvidos, como na experiencia I.

Experiencia III

Na experiencia III os EP são selecionados por dois telescopios verticais, e varias espessuras de chumbo são colocadas em cima de um contador E colocado entre os telescopios (fig. 3). Medimos assim o poder penetrante de uma particula dos EP. Cada grupo de contadores dos telescopios consistia de 3 contadores ligados em paralelo. Entre os grupos de contadores de cada telescopio havia uma camada permanente de 10 cm de chumbo. Foram registradas as coincidencias entre os quatro grupos de contadores dos telescopios e as coincidencias quintuplas entre esses quatro grupos e o contador E.

A tabela III mostra que quando, sem absorvente em cima do contador E, junta-se uma camada de 5 cm de chumbo aos filtros dos telescopios, a frequencia de fundo de quadruplas diminue sensivelmente. Esse fato indica que antes de ser colocada a

camada adicional o arranjo ainda registra enxames de eletrons. Quando colocamos uma segunda camada adicional a frequencia de fundo não mais se modifica. Isso mostra que 15 cm de chumbo são suficientes para cortar os enxames de eletrons e confirma que a absorção dos EAP é fraca.

Repetindo a mesma serie de medidas com a presença do material produtor (33 gr/cm^2 de gasolina) observamos que os ELP registrados pelos dois telescopios (quadruplas) são fortemente absorvidos (tabela III). Isto também está de acordo com as experiencias I e II.

Em seguida, com uma proteção permanente dos telescopios de 15 cm de chumbo e com 67 gr/cm^2 de gasolina como material produtor, colocamos diversas espessuras de absorvente de chumbo em cima do contador E. As frequencias de quintuplas correspondente as varias espessuras de absorventes são dadas na tabela IV.

O chumbo absorvente cobre somente o contador E de modo que não deve influir sobre as coincidencias quadruplas. Os EP produzidos nesse absorvente não podem ser registrados devido a posição desfavoravel deste absorvente. Tudo isso é confirmado por nossas medidas (tabela IV). Isso nos permitiu reunir todos os resultados de coincidencias quadruplas sem produtor ^(bem como) e todos os resultados de coincidencias quadruplas com produtor.

A tabela IV mostra alem disso que não houve absorção sensivel das coincidencias quintuplas sem produtor, o que está aliás de acordo com as experiencias I e II. Isso nos permitiu reunir tambem todas as coincidencias quintuplas devidas aos EAP. Queremos fazer notar que se nós admitirmos uma absorção dessas quintuplas (uma pequena absorção seria compativel com os erros), o c.l.m. achado por nós para as particulas produzidas na gasolina tornar-se-ia mais longo. Vemos portanto que a reunião dessas coincidencias quintuplas nos dá um limite inferior do c.l.m. que é aliás o que nos in-

teressa nesse trabalho.

Foi levado em conta que as coincidências quintuplas não são estatisticamente independentes das coincidências quadruplas para o cálculo dos erros estatísticos das coincidências quintuplas (vide Apêndice). Aplicando o método dos mínimos quadrados à frequência normalizada de quintuplas, na hipótese que a absorção siga uma lei exponencial, achamos $e^{-L/\lambda} = 0,982 \pm 0,01$ onde L é o livre caminho médio ^(l.c.m) para absorção em centímetros de chumbo. O valor mais provável de L é 56 cm de chumbo (640 gr/cm²).

Investigamos além disso se o contador E era atingido por ftons resultantes da desintegração dos mesons neutros dos ELP, mesons esses que constituem cerca de 1/3 do numero total de mesons produzidos ⁽³⁾. Como a espessura das paredes do contador E medida em unidades de radiação é $\ll 1$, este contador tem eficiencia muito baixa para registração de ftons. Quando coberto com 1 cm de chumbo a sua eficiencia se aproximará da unidade, para as energias em questão. Esperamos portanto que a diferença entre as coincidências quintuplas com e sem 1 cm de chumbo dê a frequência desses ftons. A tabela 4 mostra que essa frequência é baixa. Acreditamos que isso é devido a que a dispersão angular media dos dois ftons nos quais os mesons neutros se desintegram é tão grande que somente poucos deles atingem o contador E. Isso dá um limite superior de aproximadamente 1 Bev para a energia media dos mesons que vão na direção do contador E, se assumirmos que o numero de ftons é aproximadamente igual ao numero de mesons carregados ⁽³⁾.

Discussão

Nas nossas experiencias a absorção dos EAP é fraca. Os EAP devem ser produzidos numa massa de ar pelo menos da ordem de grandeza da massa do material produtor usado nas nossas experiencias, porque as frequências registradas são da mesma ordem.

Por considerações geométricas, vemos que o centro desta massa de ar deve estar a dezenas de metros acima do nosso arranjo. A maior parte dos EAP registrados deve consistir de grupos de partículas tendo muito pequena dispersão angular e em consequência grande energia, e deve consistir principalmente de mu-mesons resultantes da desintegração de pí-mesons. Por essas razões essas partículas não devem ser apreciavelmente absorvidas nem por ionização nem por interações nucleares. É interessante observar que o fator principal na seleção dos EAP é a pequena divergência angular mais do que a espessura de chumbo de modo que as partículas dos EAP selecionados pelo nosso arranjo tem uma energia muito maior que a mínima energia necessária para atravessar a proteção de chumbo.

Os resultados das experiências I, II e a absorção das quadruplas da experiência III, indicam que nas condições dessas experiências a absorção dos ELP é forte, mesmo se levarmos em conta o fato que para absorver um ELP é suficiente absorve-lo somente num dos telescópios. A absorção das partículas que atingem o contador E nos EAP (experiência III) é entretanto pequena. Por causa disso e porque a seção de choque para a absorção nuclear deveria ser maior que a seção geométrica nós não acreditamos que a contribuição das interações nucleares para a absorção observada de quadruplas dos ELP seja importante. A principal contribuição para essa absorção vem portanto de partículas paradas pelo absorvente de chumbo depois de terem perdida sua energia por ionização. Nos resultados experimentais são portanto que a maior parte das partículas dos ELP registrados tem uma energia logo acima da energia mínima necessária para atravessar o filtro de chumbo. Acreditamos que os ELP não são selecionados pela exigência de uma divergência pequena mas pela espessura do filtro de chumbo, o que significa que a energia mínima das partículas dos ELP registrados deve ser justamente a energia necessária para atravessar este filtro. Como

acredita-se que a distribuição espectral destas partículas cai rapidamente quando a energia aumenta, fica explicada a rápida absorção dos ELP.

É muito importante conhecer o critério pelo qual os EP são selecionados por um dado arranjo experimental. De fato os EP são realmente "penetrantes", isto é, a sua frequência não depende dentro de largos limites da espessura do filtro de chumbo, somente se eles são selecionados por uma exigência especial como por exemplo a exigência de uma pequena divergência angular. É por isso que exames resultantes de explosões nucleares de alta energia (estrelas energicas) descobertos nos EAP podem ser chamados "penetrantes". Os ELP registrados, embora sejam da mesma natureza que os EAP registrados não são realmente "penetrantes", no sentido dado acima, por razões que já discutimos, mas eles são naturalmente penetrantes no sentido que eles são capazes de atravessar grandes espessuras de chumbo.

A pequena absorção da produção local no absorvente colocado acima do contador E mostra que a maior parte das partículas dos ELP que atingem este contador tem uma energia maior que a necessária para atravessar o absorvente. Este fato indica que as partículas no centro dos ELP (as partículas que tem a direção da partícula geradora dos ELP) têm em média energia maior que as partículas laterais. Isto compreende-se facilmente pela lei da conservação do momento. Se a ionização não contribui para a absorção observada, o c.l.m. observado por nós será devido a absorção nuclear e será $\sim 400 \text{ gr/cm}^2$. Há uma correção devido o fato que o contador E é às vezes atingido simultaneamente por mais de uma partícula. Levando em conta esta correção e os erros estatísticos das medidas, ainda podemos afirmar que o c.l.m. pra a absorção nuclear não pode ser mais curto que 300 gr/cm^2 . Entretanto devido a possível contribuição da ionização e devido aos erros es-

tatísticos não podemos dar um limite superior ao c.l.m. para absorção nuclear.

Note-se que como o contador E não é atingido por fotons, nós medimos o c.l.m. para partículas carregadas. Medidas com emulsões fotograficas⁽⁴⁾ sobre EP dessas energias indicam que pelo menos 80% das partículas carregadas produzidas são pi-mesons. Os protons que constituem o restante não poderiam mudar os nossos resultados apreciavelmente porque o seu c.l.m. em chumbo é da ordem de 300 gr/cm^2 . A distancia do produtor ao contador E é pequena demais para permitir a desintegração dos pi-mesons produzidos inicialmente. Concluimos que a secção de choque para absorção nuclear em chumbo dos pi-mesons carregados é inferior a metade da secção geometrica, no intervalo de energias considerado. Esta conclusão está em acordo com os resultados de alguns outros pesquisadores⁽⁵⁻¹⁰⁾.

Nossos resultados não nos permitem entretanto afirmar algo de definido sobre o c.l.m. para interação nuclear dos pi-mesons. O nosso arranjo não é sensível a colisões de pequeno angulo com pequena transferencia de energia para o nucleo de chumbo. Acredita-se porem que as interações nucleares devem produzir em media colisões de grande angulo e Brown e McKay⁽⁵⁾ mostraram que estas são quatro ou cinco vezes menos frequentes que interações catastroficas. Alem disso nosso arranjo tem eficiencia razoavel para detetar colisões de grande angulo. Outro fato que poderia mascarar uma possivel interação nuclear é a produção no chumbo pelos pi-mesons de secundarios penetrantes. É um tanto dificil responder a este argumento mas podemos lembrar que a energia das partículas que incidem no contador E não pode ser muito maior de 1 Bev. Para admitir uma secção de choque para interação nuclear da ordem da geometrica (isto corresponderia a um c.l.m. $\sim 150 \text{ gr/cm}^2$ em chumbo), como foi achado pelo grupo de Bristol⁽⁴⁾, mais de me-

tade de todas as interações deveriam resultar na produção de um EP capaz de atingir o contador E com grande eficiência. Não sabemos se isso pode acontecer no nosso intervalo de energias relativamente baixas.

Aproveitamos o ensejo para agradecer a Comissão de Pesquisas Científicas da Universidade de S. Paulo e o seu Presidente, Prof. Souza Campos pela generosa ajuda financeira sem a qual as experiências em Campos do Jordão não teriam sido possíveis. Agradecemos o sr. H.W. Hering por nos ter gentilmente cedido um local próprio para a realização das experiências.

FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS

Apendice

Neste apêndice estão expostos os métodos estatísticos usados para a determinação da curva de absorção das partículas que atingem o contador E na experiência III e em particular para a determinação do c.l.m. para absorção das partículas produzidas localmente. Vamos mostrar como nos utilizamos do fato que simultaneamente com as quintuplas foram medidas quadruplas, tanto para a determinação desse c.l.m. como para melhorar a precisão com que se pode conhecer as quintuplas.

A probabilidade do contador E ser atingido pelos PS selecionados pelos telescópios (com gasolina) depende da espessura de chumbo x colocada em cima desse mesmo contador. Supomos que esta probabilidade $P(x)$ segue uma lei do tipo:

$$P(x) = a + b e^{-c x} \quad (1)$$

onde a , b , c , são parâmetros a ser determinados e $c = e^{-1/L} \cdot L$, é o c.l.m. procurado, porque $P(x)$ é proporcional à frequência de quintuplas com gasolina. Queremos observar que da fórmula (1) obtém-se o c.l.m. correto somente na aproximação que o contador E seja atingido por uma única partícula do E.P. selecionado pelos telescópios. Damos a $P(x)$ os melhores valores medidos (vide tabela abaixo).

x	$P(x)$
0	$N_5(0)/N_4(0) = 0,595 \pm 0,028$
5	$N_5(5)/N_4(5) = 0,612 \pm 0,028$
15	$N_5(15)/N_4(15) = 0,545 \pm 0,029$
20	$N_5(20)/N_4(20) = 0,554 \pm 0,027$
∞	$b/f \quad = 0,422 \pm 0,029$

onde $N_5(x)$ são os números de coincidências quintuplas e quadruplas respectivamente medidas simultaneamente com uma dada espessura de chumbo x (com gasolina). Para $x = \infty$ a probabilidade de $P(\infty)$

será b_5/f_4 na hipótese feita que a contagem de fundo de quintuplas b_5 e que a frequência total de quadruplas com gasolina f_4 não dependem de x .

$N_5(x)/N_4(x)$ é a frequência de uma variável estatística que segue a lei binomial com erro relativo

$$\sqrt{1/N_5(x) - 1/N_4(x)}$$

O erro de b_5/f_4 será calculado porém como erro no quociente de variáveis independentes.

Calcula-se depois com o método dos mínimos quadrados ponderados com aproximações sucessivas as constantes a , b , c , (e portanto L) e os seus erros.

Vamos agora mostrar como se pode utilizar as quadruplas para melhorar a precisão com que se pode conhecer as quintuplas, porque em muitos casos isso é de grande interesse. A frequência de quintuplas $f_5(x)$ pode ser considerada como produto de dois fatores independentes, a probabilidade $P(x)$ e a frequência total de quadruplas f_4 .

$N_5(x)/N_4(x)$ é a melhor medida de $P(x)$. Ao produto

$$\frac{N_5(x)}{N_4(x)} \cdot f_4$$

chamamos de frequência de quintuplas corrigida.

O erro relativo nas quintuplas corrigidas será

$$\sqrt{1/N_5(x) - 1/N_4(x) + 1/N_4^t}$$

onde N_4^t é o número total de quadruplas medidas. Note-se que esse erro é menor do que o erro nas quintuplas medidas diretamente.

REFERENCIAS

- (1) - Cicchini, Meyer, Schwachheim e Wataghin
Comm.Ass.Fis.Arg. 23 Mayo 1949
- (2) - Meyer, Schwachheim, Wataghin e Wataghin
Phys.Rev. 75, 908, 1949
- (3) - Carlson, Hooper e King
Phil.Mag. 41, 701, 1950
- (4) - Camerini, Fowler, Lock e Muirhead
Phil.Mag. 41, 413, 1950
- (5) - W.W. Brown e A.S. MacKay
Phys.Rev. 77, 342, 1950
- (6) - Butler, Rosser e Barker
Proc.Phys. Soc 63, 145, 1950
- (7) - J.B. Harding e D.H. Perkins
Nature 164, 285, 1949
- (8) - W.B. Fretter
Phys.Rev. 76, 511, 1949
- (9) - Lovati, Mura, Salvini e Tagliaferri
Phys. Rev. 77, 284, 1950
- (10) - O. Piccioni
Phys. Rev. 77, 6, 1950

TABELA I

Experiencia I

Frequencia horaria de coincidencias quadruplas

Espessura de chumbo na posição A	Frequencia de fundo (EAP)	Carvão	Produção no carvão (ELP)
0 cm	1,79 ± 0,16	2,21 ± 0,15	+0,42 ± 0,22
5 cm	1,70 ± 0,13	1,53 ± 0,13	-0,17 ± 0,18
10 cm	1,39 ± 0,10	1,50 ± 0,10	+0,11 ± 0,14

TABELA II

Experiencia II

Frecuencia horaria de coincidencias sextuplas

Espe- sura do absor- vente de chumbo	Frecuencia de fundo (EAP)	Carvão	Produção no carvão (ELP)
0 cm	1,106 ± 0,069	1,455 ± 0,082	0,7
2,5 cm	0,656 ± 0,056	1,000 ± 0,077	0,344 ± 0,095
5 cm	0,562 ± 0,037	0,728 ± 0,037	0,166 ± 0,052
10 cm	0,443 ± 0,043	-	-

TABELA III

Experiencia III (1a. parte)

Frecuencia por hora

Espe- sura de chumbo		0 cm	5 cm	10 cm
Frecuencia de fundo (EAP)	frecuencia de quadruplas	1,493 ± 0,083	0,853 ± 0,031	0,978 ± 0,070
	frecuencia de quintuplas	0,930 ± 0,066	0,518 ± 0,024	0,643 ± 0,057
Gazolina	frecuencia de quadruplas	2,009 ± 0,106	1,175 ± 0,056	1,084 ± 0,090
	frecuencia de quintuplas	1,181 ± 0,082	0,672 ± 0,042	0,693 ± 0,071
Produção na gazolina (ELP)	frecuencia de quadruplas	0,8	0,322 ± 0,064	0,106 ± 0,114
	frecuencia de quintuplas	0,6	0,154 ± 0,049	0,050 ± 0,091

TABELA IV

Experiencia III (2a. parte)

Frequencia por hora

Espessura de chumbo acima do contador E	Frequencia de fundo		Gazolina	
	Coincidencias quadruplas	Coincidencias quintuplas	Coincidencias quadruplas	Coincidencias quintuplas
0 cm	0,834 ± 0,051	0,518 ± 0,026*	1,301±0,074	0,730±0,034**
5 cm	0,805 ± 0,058	0,548 ± 0,029*	1,195±0,069	0,751±0,034**
15 cm	0,906 ± 0,074	0,496 ± 0,034*	1,234±0,073	0,669±0,036**
20 cm	0,911 ± 0,080	0,499 ± 0,029*	1,186±0,064	0,679±0,030**
*** frequencia media	0,853 ± 0,031	0,518 ± 0,024	1,226±0,035	-
1 cm	0,876 ± 0,081	0,539 ± 0,038*	1,198±0,080	0,706±0,040**

* e ** - Esses erros estatísticos só podem ser usados para fins de comparação de medidas da mesma série.

*** - As medidas com 1 cm não foram incluídas para o calculo de média.

Descrição das figuras

Fig. 1 - Arranjo usado na experiencia I. Os PS foram absorvidos por camadas de chumbo colocadas na posição A.

Fig. 2 - Arranjo usado na experiencia II. Os PS foram absorvidos por chumbo colocado nas posições A e B.

Fig. 3 - Arranjo usado na experiencia III. Os dois telescopios selecionam os PS e um contador E' colocado entre eles registra as particulas das quais se estuda a absorção. Os retangulos pontilhados indicam os absorventes de chumbo.