



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Física Experimental II

T.L. N°8

Mecânica Relativista Colisões de Partículas Elementares

5ª Feira

Lisboa, 27 de Maio de 2004

GRUPO N°1

André Cunha	N° 53757
Tiago Marques	N° 53775
Ricardo Figueira	N° 53755

Procedimento

Este trabalho consistiu numa análise de fotografias tiradas dentro de uma câmara de bolhas, nas quais é possível observar o rasto deixado por partículas carregadas. Desta forma é possível observar colisões de partículas elementares.

Começou-se por determinar os raios das trajectórias seguindo-se o traçar destas em papel vegetal (apêndice 1). Através da medição dos raios das trajectórias e da leitura do momento linear do próton incidente é possível determinar o momento linear das outras partículas através da relação,

$$p_n = p_1 \cdot \frac{r_n}{r_1} .$$

Desta forma traçaram-se as rectas tangentes às trajectórias, quer do próton incidente como das duas partículas carregadas, no ponto da colisão e procedendo-se à regra do paralelogramo comparou-se o vector do momento linear do próton incidente com o vector momento linear resultante das partículas resultantes carregadas. Mediu-se o ângulo dos vectores momento linear e preencheram-se as tabelas (1,2 e 3).

Sabendo que:

$$E = \sqrt{p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4} \text{ e que } p = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot v$$

Foi possível determinar a energia e velocidade de cada partícula. Quando se chega a uma não conservação do momento linear torna-se necessário supor que existe pelo menos mais uma partícula neutra resultante da colisão. Desta forma tem-se várias hipóteses de partículas resultantes (próton + próton, próton + próton + π^0 , próton + π^+ + neutrão e π^+ + próton + neutrão).

Também se realizaram os mesmos cálculos dentro do que seria esperado pela mecânica clássica sabendo que:

$$E = \frac{p^2}{2m} \text{ e que } E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 .$$

Nesta experiência o cálculo dos momentos, energias e velocidades, bem como o teste das hipóteses das partículas resultantes da colisão foi feito recorrendo a um programa escrito em JAVA desenvolvido pelos membros do grupo.

Análise de resultados

Fotografia 22 (P1 = 2024 MeV/c²)

Tabela 1:

	Raios (cm)	Ângulo (°)
Protão incidente	400	0
Partícula 3	380	12
Partícula 4	90	-67

Como se pode observar pela análise dos vectores dos momentos lineares (apêndice 1), existe conservação do momento linear (com um pequeno erro associado). Ao se utilizar o programa chegaram-se aos seguintes valores:

Imagem 1:

Colisões de Partículas

Input de valores

Protão Incidente (P1)

Momento:

Raio:

Ângulo:

Partícula Resultante (P3)

Raio:

Ângulo:

Partícula Resultante (P3)

Raio:

Ângulo:

Antes da Colisão

Energia Inicial:

Momento Inicial:

Momento(x) Inicial:

Momento(y) Inicial:

Depois da Colisão

Momento Final:

Momento(x) Final:

Momento(y) Final:

Variação do Momento

Variação Momento:

Variação Momento (x):

Variação Momento (y):

Hipóteses

P3 = Protão, P4 = Protão, P5 = Pi(0)

Energia (P1): Velocidade (P1):

Energia (P2): Velocidade (P2):

Energia (P3): Velocidade (P3):

Energia (P4): Velocidade (P4):

Energia (P5): Velocidade (P5):

Energia Final:

Variação E:

Calcular

Usar que mecânica?

Mecânica Relativista

Mecânica Clássica

P3 = Protão, P4 = Protão

Energia (P1): Velocidade (P1):

Energia (P2): Velocidade (P2):

Energia (P3): Velocidade (P3):

Energia (P4): Velocidade (P4):

Energia (P5): Velocidade (P5):

Energia Final:

Variação E:

P3 = Pi(+), P4 = Protão, P5 = Neutrão

Energia (P1): Velocidade (P1):

Energia (P2): Velocidade (P2):

Energia (P3): Velocidade (P3):

Energia (P4): Velocidade (P4):

Energia (P5): Velocidade (P5):

Energia Final:

Variação E:

Como se pode observar a hipótese que representa uma menor variação da energia (13,3 MeV) é de próton + próton, ou seja, não resultou nenhuma partícula resultante de carga nula. Obtiveram-se para valores de velocidade 0,9073 c para o próton incidente e 0.8988 c e 0.4367 c para os resultantes. As outras hipóteses apresentam uma grande variação de energia o que vem a provar a sua impossibilidade.

Quando se fez a análise clássica da colisão verificou-se que se obtiveram velocidades para partículas superiores à velocidade da luz ($635696096 \text{ m.s}^{-2}$ para o próton incidente, e $603911292 \text{ m.s}^{-2}$ e $143031621 \text{ m.s}^{-2}$ para os prótons resultantes). Também se chegou a uma variação da energia de 98.75 Mev o que evidentemente não representa uma colisão elástica.

Fotografia 19, (colisão na parte superior da folha) (P1 = 1974 MeV/c)

Tabela 2:

	Raios (cm)	Ângulo (°)
Próton incidente	400	0
Partícula 3	105	53
Partícula 4	200	-27.5

Pela a análise dos vectores do momento linear concluí-se que é necessário a existência de uma partícula neutra resultante para que haja conservação do momento linear. O momento desta partícula é considerado ser a variação dos momentos antes e depois da colisão das partículas carregadas. Através dos cálculos das energias foi-se estimar qual seria a hipótese correspondente a esta colisão.

Imagem 2:

Colisões de Partículas

Input de valores

Protão Incidente (P1)

Momento: 1974
Raio: 400
Angulo: 0.0

Partícula Resultante (P3)

Raio: 105
Angulo: 53

Partícula Resultante (P3)

Raio: 200
Angulo: -27.5

Antes da Colisão

Energia Inicial: 3.123,5251
Momento Inicial: 1.974
Momento(x) Inicial: 1.974
Momento(y) Inicial: 0

Depois da Colisão

Momento Final: 1.188,0647
Momento(x) Final: 1.187,3252
Momento(y) Final: -41,9129

Variação do Momento

Variação Momento: 787,7905
Variação Momento (x): 786,6748
Variação Momento (y): 41,9129

Calcular
Reset

Usar que mecânica?

Mecânica Relativista
 Mecânica Clássica

Hipóteses

P3 = Protão, P4 = Protão, P5 = Pi(0)

Energia (P1):	2.185,5251	Velocidade (P1):	0,9032
Energia (P2):	938	Velocidade (P2):	0
Energia (P3):	1.071,6106	Velocidade (P3):	0,4835
Energia (P4):	1.361,6215	Velocidade (P4):	0,7249
Energia (P5):	799,274	Velocidade (P5):	0,9856
Energia Final:	3.232,5061		
Variação E:	108,981		

P3 = Protão, P4 = Pi(+), P5 = Neutrão

Energia (P1):	2.185,5251	Velocidade (P1):	0,9032
Energia (P2):	938	Velocidade (P2):	0
Energia (P3):	1.071,6106	Velocidade (P3):	0,4835
Energia (P4):	996,8796	Velocidade (P4):	0,9901
Energia (P5):	1.225,6977	Velocidade (P5):	0,6427
Energia Final:	3.294,188		
Variação E:	170,6629		

P3 = Pi(+), P4 = Protão, P5 = Neutrão

Energia (P1):	2.185,5251	Velocidade (P1):	0,9032
Energia (P2):	938	Velocidade (P2):	0
Energia (P3):	536,7544	Velocidade (P3):	0,9654
Energia (P4):	1.361,6215	Velocidade (P4):	0,7249
Energia (P5):	1.225,6977	Velocidade (P5):	0,6427
Energia Final:	3.124,0736		
Variação E:	0,5485		

P3 = Protão, P4 = Protão

Energia (P1):	2.185,5251	Velocidade (P1):	0,9032
Energia (P2):	938	Velocidade (P2):	0
Energia (P3):	1.071,6106	Velocidade (P3):	0,4835
Energia (P4):	1.361,6215	Velocidade (P4):	0,7249
Energia (P5):	Não há.	Velocidade (P5):	Não há.
Energia Final:	2.433,2321		
Variação E:	-690,293		

Facilmente se verifica que se torna necessário recorrer a uma partícula neutra para que haja conservação de energia (uma variação de - 690.29 MeV para a hipótese protão+protão). Da análise dos dados conclui-se que a hipótese que representa uma menor variação de energia é a de π^+ + protão + neutrão que apresenta um dE de 0.5485 MeV. As velocidades das partículas resultantes, segundo esta hipótese é de 0.9654 c para o π^+ , 0.7249 c para o protão e 0.6427 c para o neutrão.

Analisando a colisão do ponto de vista clássico, verificou-se que o protão incidente tinha uma velocidade de $619.992.141 \text{ m.s}^{-2}$, o π^+ de $1.089.999.242 \text{ m.s}^{-2}$, o protão resultante de $309.996.070 \text{ m.s}^{-2}$ e o neutrão de $247.132.046 \text{ m.s}^{-2}$. Novamente se verifica a existência de velocidades superiores a c. Também se verificou que para estas velocidades e considerando as massas das partículas que não se verifica conservação de energia (dE = 259.13 MeV).

Fotografia 19, (colisão na parte inferior da folha) (P1 = 1974 MeV/c)

Tabela 3:

	Raios (cm)	Ângulo (°)
Protão incidente	400	0
Partícula 3	185	17.5
Partícula 4	72	-62.5

Analisando os vectores dos momentos lineares verifica-se que não se dá conservação do momento linear com as partículas carregadas. Novamente se foi verificar se alguma das quatro hipóteses testadas correspondia à colisão em questão.

Colisões de Partículas

Input de valores

Protão Incidente (P1)

Momento:

Raio:

Angulo:

Partícula Resultante (P3)

Raio:

Angulo:

Partícula Resultante (P3)

Raio:

Angulo:

Antes da Colisão

Energia Inicial:

Momento Inicial:

Momento(x) Inicial:

Momento(y) Inicial:

Depois da Colisão

Momento Final:

Momento(x) Final:

Momento(y) Final:

Variação do Momento

Variação Momento:

Variação Momento (x):

Variação Momento (y):

Hipóteses

P3 = Protão, P4 = Protão, P5 = Pi(0)

Energia (P1): Velocidade (P1):

Energia (P2): Velocidade (P2):

Energia (P3): Velocidade (P3):

Energia (P4): Velocidade (P4):

Energia (P5): Velocidade (P5):

Energia Final:

Variação E:

P3 = Protão, P4 = Pi(+), P5 = Neutrão

Energia (P1): Velocidade (P1):

Energia (P2): Velocidade (P2):

Energia (P3): Velocidade (P3):

Energia (P4): Velocidade (P4):

Energia (P5): Velocidade (P5):

Energia Final:

Variação E:

P3 = Pi(+), P4 = Protão, P5 = Neutrão

Energia (P1): Velocidade (P1):

Energia (P2): Velocidade (P2):

Energia (P3): Velocidade (P3):

Energia (P4): Velocidade (P4):

Energia (P5): Velocidade (P5):

Energia Final:

Variação E:

Calcular

Usar que mecânica?

Mecânica Relativista

Mecânica Clássica

Como se pode verificar nenhuma das hipóteses apresenta uma variação de energia razoável (a mais baixa corresponde à hipótese protão + π^+ + neutrão que, no entanto, assume o valor de -103,94 MeV).

Conclusões

Este trabalho permitiu comprovar experimentalmente a validade da teoria da relatividade restrita de Einstein face à invalidez da mecânica clássica, que se revela errada para velocidades próximas de c .

Ao analisar os resultados obtidos para a primeira colisão (Fotografia 22 ($P1 = 2024 \text{ MeV}/c$), pôde-se concluir de imediato, através da regra do paralelogramo (importante referir pequeno desvio nos vectores), que o acontecimento em estudo traduzia uma colisão do tipo 1. Tal facto foi verificado após os cálculos que demonstraram a impossibilidade de a colisão se tratar de uma de outro tipo. No entanto, existe uma variação de energia ($13,3 \text{ MeV}$) e de momento linear ($39,79 \text{ MeV}/c$). Estas variações devem-se aos erros inerente ao processo de análise geométrica das fotografias mas, contudo, representam desvios bastante reduzidos ($0,42\%$ para a energia e $1,97\%$ para o momento linear).

Quanto à análise do ponto de vista clássico, chegou-se a partículas com velocidades superiores à da luz bem como a uma não conservação de energia.

Para o segundo caso (Fotografia 19, (colisão na parte superior da folha) ($P1 = 2024 \text{ MeV}/c$), foi observado que a colisão não poderia de forma alguma ser do tipo 1. Verificou-se então, através do princípio da conservação da energia, que a melhor das hipóteses seria a colisão do tipo $\pi^+ + \text{próton} + \text{neutrão}$. Considerando esta hipótese, chegou-se a uma variação de energia muito reduzida (desvio de $0,0176\%$). É impossível analisar a variação do momento linear pois considerou-se esta o momento da partícula resultante neutra (neutrão neste caso).

Na análise da colisão da perspectiva da mecânica clássica chegou-se novamente a valores muito elevados para a velocidade das partículas em questão e a uma não conservação de energia.

Na terceira colisão, tal como na segunda, verificou-se que não se dava conservação do momento linear considerando apenas as partículas carregadas. No entanto, quando testadas todas as hipóteses implementadas no programa verificou-se que nenhuma correspondia a uma variação de energia aceitável. Tal facto apenas poderá ser explicado se considerarmos que a colisão em questão envolve outras partículas para além das consideradas. Neste caso torna-se impossível com o nosso programa testar qual a colisão em questão.

Como se pôde constatar a mecânica clássica revelou-se completamente inadequada para retratar estas colisões, dado que as velocidades implícitas (reais) são próximas de c .

Erros

Nesta experiência estão associados erros experimentais bem como erros resultantes do aparato. Quanto a estes últimos, deveremos ter em consideração que o movimento das partículas não é bem circular mas sim uma espiral resultante da perda de energia destas ao se deslocarem dentro da câmara de bolhas. Também não nos devemos esquecer que a fotografia pode não ter sido tirada perfeitamente perpendicular com a trajectória das partículas e que o momento da partícula 2 não é exactamente nulo.

Durante as medições estão inerentes erros associados ao método utilizado. Verificou-se que algumas vezes o raio da trajectória não correspondia exactamente ao do ábaco e aproximou-se ao que apresentava um menor desvio. Também se tornou bastante complexo traçar a tangente à trajectória no ponto de colisão tendo estas medições um erro considerável.

Apêndice 2

O programa que criámos para a realização deste trabalho experimental tem como valores de *input* o momento linear da partícula incidente tal como o raio das trajectórias observadas (efectua-se uma aproximação para trajectórias circulares visto que estas são de facto espiróide) e o ângulo formado pela tangente no ponto de colisão das trajectórias de todas as partículas detectáveis, que depende do referencial escolhido pelo utilizador.

O programa começa por calcular o valor do momento linear final tal como as suas coordenadas vectoriais, calculando também a variação deste nas mesmas condições.

Depois de ter os valores necessários calculados como foi descrito anteriormente, vai testar as diferentes hipóteses para partículas resultantes, deixando ao critério do utilizador a escolha da situação que melhor se adequa à realidade (a que representa uma menor variação de energia):

Hipóteses Consideradas

1. Protão + Protão \rightarrow Protão + Protão
2. Protão + Protão \rightarrow Protão + Protão + π^0
3. Protão + Protão \rightarrow π^+ + Protão + Neutrão (π^+ - Inferior e Protão Superior)
4. Protão + Protão \rightarrow π^+ + Protão + Neutrão (π^+ - Superior e Protão Inferior)

Inclui ainda a possibilidade de calcular todos os dados de acordo com a mecânica clássica.