

6.8 GeV/c π^- -N 非弹性作用下 π^0 介子的产生*

王祝翔 罗春燠 馬亞棟 秦荣先 霍安祥

提 要

利用联合原子核研究所 24 立升丙烷气泡室照片, 对动量为 6.8 GeV/c π^- 介子与核子非弹性作用产生 π^0 介子的问题进行了研究。扫描了约 2700 对立体照片。在宽度为 29.3 厘米的有效范围内得到了 1275 个 π^- -N 非弹性作用事例。在 936 个 π^- -p 事例和 339 个 π^- -n 事例中, 观察到正电子、负电子对数目分别为 240 和 89。考虑了气泡室对 γ 光子的探测效率, 我们得到每个事例产生的平均 π^0 介子数 $\bar{n}_{\pi^0} = 1.00 \pm 0.06$ 。 γ 光子的平均横动量为 $\bar{p}_{\perp\gamma} = 173$ MeV/c。此外, 着重研究了 γ 光子的能量分布。在 γ 光子全部是由 π^0 介子衰变产生以及 π^0 介子和 $\pi^\pm$ 介子具有相同能谱的假设下, 利用在相同入射粒子能量的 π^- -N 作用中所产生的次级 $\pi^\pm$ 介子能量分布^[1,2]变换成 γ 光子的能量分布; 将本实验所得的 γ 光子能量分布和变换得到的分布进行比较, 这两个分布在实验误差范围内完全符合。

一、引 言

我們利用联合原子核研究所 6.8 GeV/c π^- 介子的丙烷气泡室 (有效体积为 $14 \times 28 \times 55$ 厘米³, 磁场强度为 13700 高斯) 照片^[3], 根据观察在室中由 π^0 介子衰变的 γ 电子对, 对 π^- -N 作用产生 π^0 介子的问题进行了研究。假定所观察到的 γ 电子对全部是由 π^0 介子衰变产生的, 则根据 γ 光子的数目、能量以及气泡室对 γ 光子的探测效率就能推断出产生 π^0 介子的性质, 从而可以与 $\pi^\pm$ 介子产生的性质 (例如数目、能量分布等) 进行比较。

本工作一共扫描了大约 2700 对立体照片, 入射 π^- 介子总数为 18768 个。扣除其中 $(5 \pm 2)\%$ μ^- 和 e^- 的混杂, 实际的入射 π^- 介子数为 17830 ± 375 个。平均每张照片的入射 π^- 介子数约为 6.5 个。

在预先确定的扫描范围内总共观察到 2407 个核作用 (包括 π^- -N 作用及 π^- -c 作用), 根据这些事例的作用点沿入射粒子方向的坐标的分布, 对有效范围作了校正, 得到实际有效范围为 29.3 厘米。核作用自由路程为 217 ± 4 厘米。

二、实 验 结 果

1. 事例分布

根据确定事例的选择标准, 我們得到了 936 个非弹性作用事例。事例按次级带电粒子的支数分布列在表 1 中。

* 1964 年 7 月 30 日收到。

表 1 $(\pi^-p)(\pi^-n)$ 事例中带电粒子支数分布

支数 (n)	(π^-p) 事例					(π^-n) 事例				
	0	2	4	6	8	1	3	5	7	
事例数	29	396	410	92	9	73	189	72	5	
本工作%	3.1 ± 0.6	42.3 ± 2.1	43.8 ± 2.2	9.8 ± 1.0	0.96 ± 0.32	21.5 ± 2.5	55.8 ± 2.5	21.2 ± 2.5	1.5 ± 0.7	
文献[2]%	6 ± 2	44 ± 5	40 ± 5	9 ± 2	11 ± 1	27 ± 4	51 ± 6	17 ± 3	5 ± 2	

在不同支数事例中的 γ 电子对分布以及校正后 π^0 介子的实际数目和 π^0 介子平均数列在表 2 中。

表 2 平均 π^0 介子数与带电粒子支数的分布

支数 (n)	(π^-p) 事例					(π^-n) 事例				
	0	2	4	6	8	1	3	5	7	1—8
观察到的 $N_{e^\pm}$	14	118	84	22	2	34	44	11	0	329
校正后的 N_{π^0}	44.0 ± 12.8	523 ± 49	295 ± 33	91.2 ± 20	6.4 ± 4.5	107 ± 19	162 ± 26	47.0 ± 14.2	0	1276 ± 70
平均 n_{π^0}	1.52 ± 0.52	1.33 ± 0.14	0.72 ± 0.09	0.99 ± 0.24	0.71 ± 0.55	1.46 ± 0.31	0.86 ± 0.15	0.65 ± 0.32	0	1.00 ± 0.06

从表 2 看出, π^0 介子对事例的平均值是随支数的增大而下降。总起来说, 平均每个事例产生的 π^0 介子数为

$$\bar{n}_{\pi^0} = 1.00 \pm 0.06.$$

2. 在 (π^-p) 及 (π^-n) 作用中带有反冲质子事例所占比例的估计

利用单 π 交换模型, 并假定在产生的 π 介子中存在 $N_{\pi^+} + N_{\pi^-} = 2N_{\pi^0}$ (亦即 $N_{\pi^+} = N_{\pi^-} = N_{\pi^0}$) 关系。则根据观察到 γ 电子对求得的 π^0 介子数以及事例分布可以计算出带反冲质子事例和带反冲中子事例在所有事例中所占的比例。结果得到:

- (1) 在 (π^-p) 作用中, 带反冲中子的事例占 68%, 带反冲质子的占 32%。
- (2) 在 (π^-n) 作用中, 带反冲中子的事例占 45%, 带反冲质子的占 55%。

上述结果基本上与单 π 交换理论计算值是相一致的。此外, 我们也根据 π^-N 直接碰撞模型, 并利用 π^0 介子的实验数据对带反冲质子事例和带反冲中子事例分别所占比例作了估计。其结果为:

- (1) 在 (π^-p) 作用中, 带反冲中子的事例所占比例是 40%, 带反冲质子的事例占 60%。
- (2) 在 (π^-n) 作用中, 带反冲中子的事例所占比例是 90%, 而带反冲质子的事例占 10%。

这结果与工作[2]及理论^[4]计算出结果相差较大。

3. γ 光子的各种分布

在 264 个带有电子对的 π^-N 作用事例中, 共观察到 329 个电子对, 其中有 25 个电子对由于径迹过短而不能测量动量, 此外, 尚有 16 个由 π^0 介子直接产生的电子对也没有作测量。因此, 实际上总共测量了 288 个电子对。在这 288 个 γ 光子中, 对于每一个 γ 光

子,根据其动量以及在室中的潜在长度给出相应的改正因子 K ,则经校正后得到的总 γ 光子数为 2338 个,由此得出此气泡室记录 γ 光子的平均探测效率 $\bar{\eta} = 0.12 \pm 0.01$. 此结果与工作[1,5]的结果一致. 值得指出,如果根据这个平均探测效率值再对 25 个不能测定动量的 γ 光子作改正,则总共的 γ 光子数为 2546 个,这相当于总共有 1273 个 π^0 介子. 由于 $\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^-$ 衰变是占 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 衰变的 $1/80$,可以得出,在 1273 个 π^0 介子中应观察到 16 个直接电子对衰变事例,这刚好与我们观察到的 16 个直接电子对衰变的事例相符合.

改正因子 K 是利用以下公式计算的:

$$K = \frac{1}{\eta(E)} = 1/[1 - e^{-\mu(E)l_p}], \quad (1)$$

式中 η 是能量为 E 的 γ 光子在此气泡室 l_p 长度内转化成电子对的几率; l_p 是 γ 光子在室中有效范围内的潜在长度; $\mu(E)$ 是具有能量为 E 的 γ 光子在丙烷气泡室中单位辐射长度的电子对产生几率.

关于丙烷 (C_3H_8) 的 $\mu(E)-E$ 曲线则是利用电子对产生的电磁作用理论^[6]计算得到的,其结果如图 1 所示.

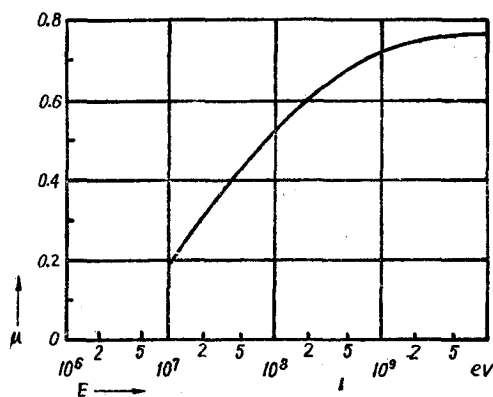


图 1 γ 光子在丙烷中单位辐射长度转换为电子对的总几率.

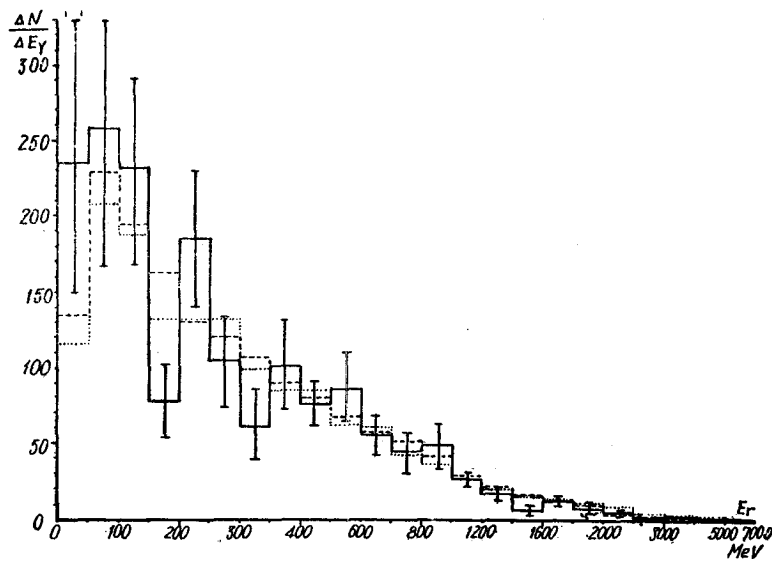
(1) γ 光子的能量分布

图 2 画出了 γ 光子的能量分布. 图中实线是表示改正后 γ 光子的能量分布. 从这个分布可以看出,除了 E_γ 在 50—100 MeV 之间存在一个表征 π^0 介子衰变成 γ 光子的峰值外,并不存在其他明显的峰值,只是 E_γ 在 200—250 MeV 处具有较大的值.

为了从此 γ 能量分布推出 π^0 介子的能量分布,并检验 E_γ 在 200—250 MeV 处是否有峰值,我们利用了工作[1,2]的在相同能量 π^-N 作用下的 $\pi^\pm$ 介子的能谱,并假定 π^0 介子和 $\pi^\pm$ 介子具有相同能谱形式. 利用以下公式^[7]:

$$N(E) = \int_E^\infty \frac{F(\epsilon) d\epsilon}{\sqrt{\epsilon^2 - \epsilon_0^2}}, \quad (2)$$

把此能谱转换成 γ 光子的能谱,并分别用断线和点线表示在图 2 上. [式(2)中 $N(E)$ 表示能量为 E 的 γ 光子数, $F(\epsilon)$ 为 π^0 介子的能谱形式, ϵ_0 为 π^0 介子的静止质量.] 从图中可以看到,在误差范围内,这两种能谱与本工作得到的 γ 光子的能谱一致. 由此可见 E_γ

图2 γ 光子在实验室坐标系的能量分布。

——本实验的 γ 能谱
 ----由乳胶的 π 谱转换而得的 γ 能谱
由气泡室的 π^- 谱转换而得的 γ 能谱

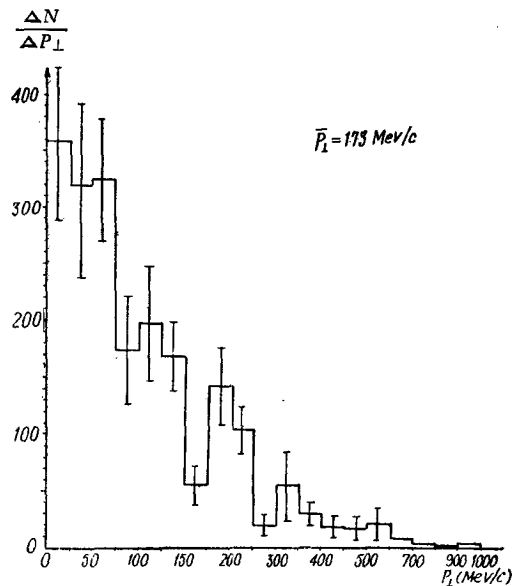
在 200—250 MeV 处有较大的值不能认为是峰。

(2) γ 光子的横动量分布

图 3 是 γ 光子的横动量分布,其平均横动量为 173 MeV/c。

(3) γ 光子的平均 Δr 值

为了从另一角度来比较 π^0 介子和 $\pi^\pm$ 介子的产生性质,我们计算了 γ 光子的 Δ 值, Δ 值能够反映粒子的动量和角分布的性质。如果 π^0 介子和 $\pi^\pm$ 介子的动量、角分布是一样

图3 γ 光子的横动量分布。

的,則應該有 $\bar{\Delta}_{\pi^{\pm}} = \bar{\Delta}_{\pi^0}$. Δ 值的定义是^[8]:

$$\Delta \equiv E - P \cos \theta. \quad (3)$$

由于

$$\begin{aligned} \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma, \\ E_{\pi^0} &= E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}, \\ P_{\pi^0} \cos \theta_{\pi^0} &= P_{\gamma_1} \cos \theta_{\gamma_1} + P_{\gamma_2} \cos \theta_{\gamma_2}, \end{aligned}$$

故

$$\Delta_{\pi^0} = \Delta_{\gamma_1} + \Delta_{\gamma_2}.$$

取平均值时,則 $\bar{\Delta}_{\pi^0} = 2\bar{\Delta}_{\gamma}$. $\bar{\Delta}_{\gamma}$ 可以从 γ 电子对的动量及角度求出,結果为 $\bar{\Delta}_{\gamma} = 54$ MeV, 由此得到 $\bar{\Delta}_{\pi^0} \simeq 108$ MeV.

三、討 論

根据以上实验結果可作如下討論:

(1) 我們得到 π^0 介子按事例的平均数为 $\bar{n}_{\pi^0} = 1.00 \pm 0.06$. 根据在相同入射粒子能量下研究 π^- -N 非弹性作用的乳胶工作結果^[9], 有 $\bar{n}_{\pi^+} = 0.8$; $\bar{n}_{\pi^-} = 1.7$ (其中包括了入射的 π^-). 这三个数值有利于証明純产生的 π 介子数之間存在 $N_{\pi^+} = N_{\pi^-} = N_{\pi^0}$ 关系, 說明如下:

假如在 π^0 总数中有 10% (也許更少) 是由于 (π^-p) 电荷交换作用而形成的, 則产生的 π^0 平均数为 $\bar{n}_{\pi^0p} = 1.00 - 0.10 = 0.9$. 而入射 π^- 介子中有 10% 是由于电荷交换而变成 π^0 介子, 平均 π^- 介子在次級 π^- 介子粒子中还余留下 0.9 是入射 π^- 介子, 因此純产生的 π^- 介子的平均数为 $\bar{n}_{\pi^-p} = 1.7 - 0.9 = 0.8$. $\bar{n}_{\pi^+} = 0.8$ 即为 π^+ 的純产生平均数. (如果电荷交换为 5%, 則 $\bar{n}_{\pi^0p} = 0.95$, $\bar{n}_{\pi^+} = 0.8$, $\bar{n}_{\pi^-} = 0.75$; 如果电荷交换为 20%, 則 $\bar{n}_{\pi^0p} = 0.8$, $\bar{n}_{\pi^+} = 0.8$, $\bar{n}_{\pi^-} = 0.9$.) 由此可見, 在純产生 π 介子中, 大致存在着 $\bar{N}_{\pi^+} = \bar{N}_{\pi^-} = \bar{N}_{\pi^0}$ 的关系. 而且純产生 π 介子按事例的平均数(包括 π^0)为 2.5.

(2) 从 γ 光子能譜分析中可以看到, 只有当 π^0 介子具有与 $\pi^{\pm}$ 介子相同的能譜时, 才能得出与实验結果完全吻合的 γ 光子能譜. 因此可以认为 π^0 介子与 $\pi^{\pm}$ 介子具有相同的能譜, 但是, 并不排除有少量的其他 γ 光子源的存在.

此外, 从表征动量和角分布特性的 Δ 值的分析來說, 在工作 [9] 中得到的 $\bar{\Delta}_{\pi^{\pm}} = 100$ MeV 与本工作的結果 $\bar{\Delta}_{\pi^0} = 108$ MeV 是相一致的. 这也說明 π^0 介子与 $\pi^{\pm}$ 介子的动量和角分布很可能是一样的.

根据以上的分析, 我們可以初步作出以下結論: 在 7.00 GeV/c 在 π^- -N 作用下 π 介子的产生过程中, 無論在数目、动量分布或角分布方面, 产生的 π^0 介子都具有与产生的 $\pi^{\pm}$ 介子相同的性質. 从同位旋观点来看, 即产生的 π 介子在同位旋空間的分布是均匀的, 这表明在高能产生 π 介子的强作用过程中, 电荷无关性仍然是成立的.

本工作所用的丙烷气泡室的照片是由联合原子核研究所供給的, 特向联合所有同志表示感谢. 在工作过程中, 曾得到肖健先生、郑吉母同志不少帮助和討論, 作者表示謝意.

参 考 文 献

- [1] Биргер, Н. Г., Ван Ган-чан (王淦昌), Ван Цу-цзэн (王祝翔), Дин Да-дао (丁大钊), Катышев, Ю. В., Кладницкая, Е. Н., Копылова, Д. К., Любимов, В. Б., Нгуен Дин-ты, Никитин, А. В., Подгорецкий, М. И., Смородин, Ю. А., Соловьев, М. И., ЖЭТФ, **41** (1961), 1461.
- [2] 王世伟等, 中国科学 (将发表).
- [3] Ван Ган-чан (王淦昌), Соловьев, М. И., Шкобин, Ю. Н., ПТЭ, **1** (1959), 41.
- [4] Барашенков, В. С., Блохинцев, Д. И., Ван Жун (汪容), Михул, Э. К., Хуан Цзю-чжань, Ху Ши-кэ, 联合原子核研究所先印本, Д-780.
- [5] Любимов, В. Б., Никитин, А. В., Трка, З., 联合原子核研究所先印本, Р-974 (1962).
- [6] Rossi, High Energy Particles, p. 79 (1952).
- [7] Carlson, A. G., et al., Phil. Mag., **41** (1950), 701.
- [8] Биргер, Н. Г., Смородин, Ю. А., ЖЭТФ, **37** (1959), 1355.
- [9] 王世伟、王祝翔等, 物理学报, **21** (1965), 235.

π^0 -MESON PRODUCTION IN π^- -N INELASTIC INTERACTIONS AT 6.8 GeV/c

WANG TZU-SHIANG LO CHUEN-SHUN MA YA-DE
CHIN YONG-HSIEN HO AN-SHIANG

ABSTRACT

Using the 24-litre propane chamber, photographs from JINR π^0 -meson production in inelastic interactions of π^- -mesons of momentum 6.8 GeV/c with nucleons are examined. About 2700 pairs of stereoscopic pictures have been scanned and 1275 events of π^- -N inelastic interactions have been found in an effective region 29.3 cm wide. In these events, 936 π^- -p and 339 π^- -n events, 240 and 89 electron-positron pairs have been observed respectively. After taking account of the efficiency of the bubble chamber for detection of γ -photons, it is found that the mean number of π^0 mesons produced per event is $\bar{n}_{\pi^0} = 1.00 \pm 0.06$ and the mean transverse momentum of the γ -photons is $\bar{P}_{T\perp} = 173$ MeV/c. In addition, the energy distribution of the γ -photons is especially examined. Under the assumptions that the γ -photons are entirely due to π^0 decays and that the energy spectrum of the π^0 mesons is the same as that of the $\pi^\pm$ -mesons, an energy distribution of γ -photons can be deduced from the energy distribution of the secondary $\pi^\pm$ -mesons produced in π^- -N interactions at the same incident energy^[1,2]; the γ -photon energy distribution obtained in the present experiment is in agreement with this deduced distribution within experimental error.