

π^- - ^4He 吸收后的核子谱

姜焕清 李扬国 潘缉智

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

在两核子吸收的框架下,我们分析了静止的 π^- 以及 60、100 和 220 MeV 的 π^\pm 介子在 ^4He 上吸收后发射的核子谱. 两核子吸收机制定量地符合现有实验. 四核子的相空间计算与实验不符.

一、引 言

自从 π 介子在实验上能成为束流以来, π 吸收的现象一直被人们所重视并进行了多年的研究^[1,2,3]. 人们建议了多种模型理论来分析这些实验^[4], 然而, 到目前为止, 还没有一种微观理论能统一解释 π 吸收后的各种现象. 大家知道, π 吸收是一种真正的多粒子现象. 至少需要两个核子的参与, π 介子才可能被吸收. 实验表明, 两核子吸收的机制是主要的, 但 π 介子被核中多核子集团吸收的可能性一直是人们所讨论的问题^[5]. 即使假定两核子吸收的机制, π^+ (π^-) 可以被 $n-p$ 对吸收, 也可以被 $n-n$ 对 ($p-p$ 对) 所吸收, 从唯象的分析及微观的计算^[6]中, 对这个吸收比值 R_{np} 有许多讨论. 但由于末态相互作用的存在, 使得对这个量的确定变得复杂化, 以致至今尚无定论. 在前面的一些工作中^[7,8,9], 我们建议了一种计算 π 吸收后粒子谱的模型理论. 我们假定, π 介子是被核内一对核子所吸收, 吸收了 π 的这一对核子在核内可能经历核子-核子碰撞的级联过程. 计算的核子谱及核子关联谱与实验符合得很好, 从发射的高能核子谱, 我们抽出 $R_{np} = 13 \pm 6$ ^[7]. 这种模型推广到飞行 π 介子上, 也得到了满意的结果^[9]. 在这个模型的基础上, 加上“拾取”的机制, 我们又定量地给出了发射氦核的能谱^[8].

也有另外的理论可以解释 π 吸收后的单举质子能谱. 例如, 柯治明和玻尔曼^[10]的多核子吸收机制. 为了确定 π 介子被核吸收的机制, 研究像 ^4He 这样的轻原子核是很有意义的. 因为它的核子数极少, π 吸收后的末态级联过程贡献小, 几乎可以忽略. π 吸收主要来自直接吸收项, 因而有助于检验 π 吸收机制.

近年来 Jackson 等^[11]测量了 60 到 220 MeV 能区的 π^\pm 在 ^4He 上被吸收后发射的质子谱. 最近 Cernigoi 等^[12]又测量了 ^4He 俘获静止 π^- 后发射的中子和质子能谱. 我们用二核子吸收和四核子吸收模型分析这些实验, 比较不同模型下 π 吸收会有什么样的结果.

在第二节概括我们的模型公式。数值结果及与实验的比较将在第三节给出。在第四节,我们将讨论四核子相空间的公式及其结果。

二、公式概括

我们假定 π 介子是被一对核子所吸收。我们把这一对核子叫直接参加者。“参加者”还可能在反应的末态与 ${}^4\text{He}$ 中的另外两核子发生末态相互作用,从而敲出新的核子。实验上观察到的核子双重微分截面可写成上述两部分贡献之和,

$$\frac{d\sigma_{abs}}{d^3P} = \frac{d\sigma_0}{d^3P} + \frac{d\sigma_1}{d^3P}, \quad (1)$$

其中下标 0 和 1 分别表示直接参加者和经过末态相互作用后的贡献。得到上式,我们略去了相干项,对于单举反应来说,它可能是不重要的。按照文献[7],把上式中各项写成因子化的形式,即

$$\frac{d\sigma_n}{d^3P} = \sigma_n C_n^\pm(\nu) \frac{dW_n}{d^3P}, \quad (2)$$

这里, $\frac{dW_0}{d^3P}$ 是两个束缚的核子吸收 π 介子后,其中任一核子动量的分布函数,它由 $V_{\pi NN}$ 通过下式得到:

$$\frac{dW_0}{d^3P} = u_0 \int d^3P' \langle \mathbf{P}, \mathbf{P}' | V_{\pi NN} | \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 \rangle \delta(E_i - E_f), \quad (3)$$

其中 $E_i = E_\pi - E_B$, E_f 分别为初末态的总能量, E_π , E_B 分别为 π 介子的总能量(包括它的静止质量)和 ${}^4\text{He}$ 的结合能。 u_0 由归一化条件决定,

$$\int d^3P \frac{dW_0}{d^3P} = 1. \quad (4)$$

假定 ${}^4\text{He}$ 中的单粒子波函数为高斯形式, $V_{\pi NN}$ 的空间依赖取为 δ 函数,则得:

$$\begin{aligned} \frac{dW_0}{dE dQ} &\propto e^{1.25mP_0 P \cos\theta/E_F} \frac{P}{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|} \\ &\times \sinh \left[\frac{|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0|}{\sqrt{2m}} \sqrt{E_i - E} \left/ \frac{2}{5} E_F \right. \right], \end{aligned} \quad (5)$$

其中 E_F 和 \mathbf{P}_0 分别为 ${}^4\text{He}$ 的费米能量和 π 的动量。对于静止的 π , $\mathbf{P}_0 = 0$, 则得到文献[7]的结果,

$$\frac{dW_0}{dE} \propto \sinh \left[\sqrt{E(E_i - E)} \left/ \frac{2}{5} E_F \right. \right]. \quad (6)$$

dW_1/d^3P 则是 dW_0/d^3P 与核子-核子微分截面的卷积,

$$\frac{dW_1}{d^3P} = \int d^3P' \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d^3P} (\mathbf{P}' \rightarrow \mathbf{P}) \frac{dW_0}{d^3P'}, \quad (7)$$

其中 $d\sigma/d^3P (\mathbf{P}' \rightarrow \mathbf{P})$ 是对核内核子的费米运动求平均并考虑泡利原理限制后的核子-核子微分截面, σ 是同位旋平均后的核子-核子总截面。

(2)式中 σ_n 是一个几何因子,它给出吸收截面的绝对值,在我们的模型中^[7],

$$\sigma_n = c \int d^3r S(\mathbf{r}) \frac{T^n(\mathbf{r}, \mathbf{e})}{n!} e^{-T(\mathbf{r}, \mathbf{e})}, \quad (8)$$

其中

$$S(\mathbf{r}) = 2I_m(U_{\text{opt}}^L(\mathbf{r}) |\phi_\pi(\mathbf{r})|^2 + f(r) |\nabla \phi_\pi(\mathbf{r})|^2), \quad (9)$$

这里 $U_{\text{opt}}^L(\mathbf{r})$ 和 $\nabla \cdot f(r) \nabla$ 分别为 π 核光学位的定域部分及非定域部分, $\phi_\pi(\mathbf{r})$ 是 π 介子的空间波函数, 对于飞行 π 介子, 它取程函扭曲的波函数, 对静止的 π^- 介子, 它是 π^- 原子的束缚态波函数. $T(\mathbf{r}, \mathbf{e})$ 是从 \mathbf{r} 出发, 沿 \mathbf{e} 方向看, 以核子的平均自由程为单位的原子核厚度函数,

$$T(\mathbf{r}, \mathbf{e}) = \int_0^\infty \frac{dS}{\lambda_N} \frac{\rho(\mathbf{r} + \mathbf{e}S)}{\rho(0)}, \quad (10)$$

在我们的计算中, \mathbf{e} 取为 π 吸收后, 核子的平均发射方向^[7]. (8) 中 c 为一常数, 它由某一能量下, 例如 220MeV 时 π 吸收的实验总截面来确定, 对于静止的 π 介子, 按实验要求,

$$\sum_n \sigma_n = 1.$$

$C_n^\pm(\nu)$ 为计数因子, 它给出 π^\pm 入射的情况下, 经过 n 次末态 $N-N$ 碰撞后, 发射 ν 种核子的数目. 定义

$$R_{np} = \frac{\sigma(\pi^+ np \rightarrow pp)}{\sigma(\pi^+ nn \rightarrow np)}, \quad (11)$$

为 np 对核子与 nn 对核子吸收 π^+ 的比, 于是,

$$\left. \begin{aligned} C_0^+(P) &= \frac{2 + R_{np}^{-1}}{1 + R_{np}^{-1}} \\ C_1^+(P) &\approx C_0^+(P) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

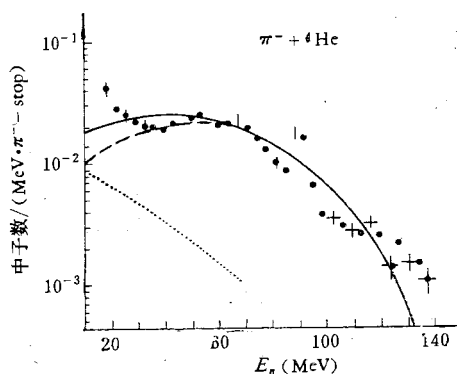
等等.

利用本节给出的公式, 可以计算 ^4He 吸收 π^\pm 后发射的质子谱及中子谱.

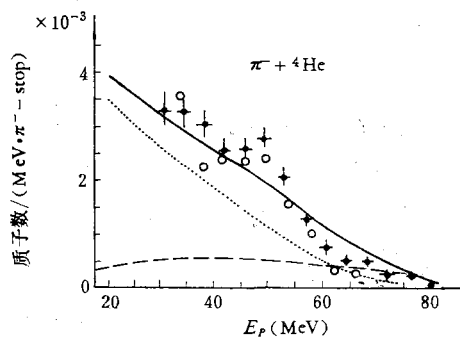
三、数值结果和讨论

我们计算了动能为 60、100 和 220MeV 的 π^\pm 介子被 ^4He 吸收后, 在 45° 和 90° 发射的质子能谱以及静止的 π^- 介子被吸收后发射的中子和质子能谱. ^4He 的密度分布取自电子散射分析的结果, ^4He 的费米动量取符合 $(e, e'p)$ 反应的数值^[13], 即 $P_F = 110\text{MeV}/c$. π 介子在原子核中的平均自由程是入射能量的函数, 考虑核多体的修正, 对 60、100 和 220MeV 的 π 介子分别取为 1, 0.5 和 0.7fm ^[14]. 关于 R_{np} , 目前还没有肯定的结论, 根据唯象的分析^[5], $R_{np} = 13 \pm 6$, 在这里, 对所有的情况我们都取它为 10.

图 1 和图 2 分别给出 ^4He 吸收了静止的 π^- 后发射的中子及质子能谱. 实验取自文献 [12], 曲线是我们计算的能谱的绝对值. 由于实验只给出了各种能量的核子数的相对值, 我们将实验点在 60MeV 处规一化到理论值. 从图可见, 发射的高能端的中子及质子主要是“参加者”的贡献, 而较低能量的核子有一部分来自末态相互作用的贡献. 在非常低的能量区域, 按公式(1)的计算仍比实验偏小, 这可能是“旁观者”的贡献, 即 ^4He 中未直接“参与”吸收的两核子以原有的动量分布, $\text{EXP}(-2.5P^2/P_F^2)$, 发射出来, 在我们的计算中未

图1 ${}^4\text{He}$ 吸收静止 π^- 后发射的中子能谱。

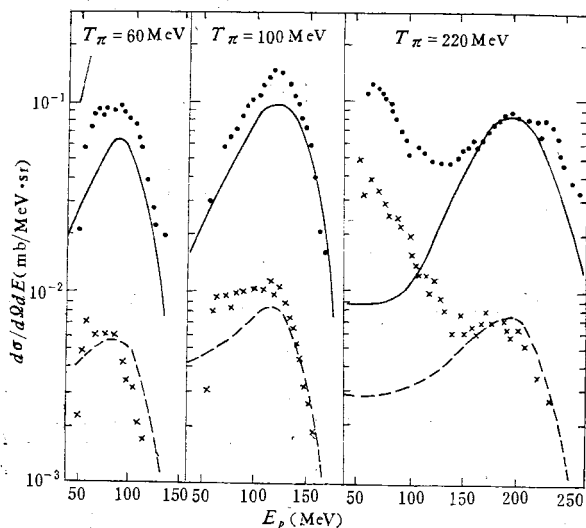
实验点取自文献[12], 断线是直接参加者的贡献, 点线是经过末态相互作用的贡献, 实线是两项之和。

图2 ${}^4\text{He}$ 吸收静止 π^- 后发射的质子能谱。

其他说明同图1

考虑这一部分贡献。

图3和图4分别给出了动能为60、100、220MeV的 π^+ 及 π^- 被 ${}^4\text{He}$ 吸收后,在 45° 和 90° 发射的质子能谱。从实验我们看出,在两个出射角,质子能谱都在某一出射能量呈现明显的峰值。这个峰值正好相应于 $\pi^+ + d \rightarrow p + p$ 反应在相应入射能量及出射角度的出射质子能量,这正好是两核子机制的证明。与较重的靶核不同,对于 ${}^4\text{He}$ 来说,核子数较少,末态相互作用相对地不重要,所以,这些峰仍然明显地呈现出来。由于吸收 π 的这一对核子的费米运动,在一定角度上出射质子的能量是一个分布,其分布宽度取决于 ${}^4\text{He}$ 中

图3 ${}^4\text{He}$ 吸收60、100和220MeV

的 π 介子后在 45° 发射的质子谱。

● 是 π^+ 入射, × 是 π^- 入射, 曲线是我们计算的结果。

核子费米能量的大小。图中的曲线是我们的计算结果。总的说来,从与实验的比较可以看出,我们的模型差不多可以定量地符合实验。当然,仍然存在与实验的偏离:

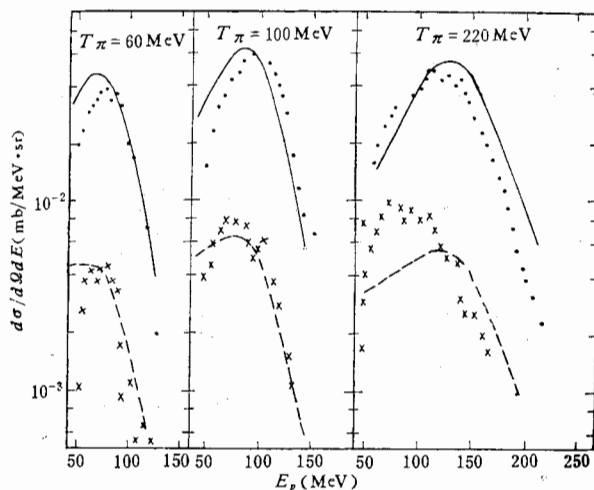


图 4 ^4He 吸收 60、100 和 220 MeV 的 π^- 介子后在 90° 发射的质子谱。
其他同图 3。

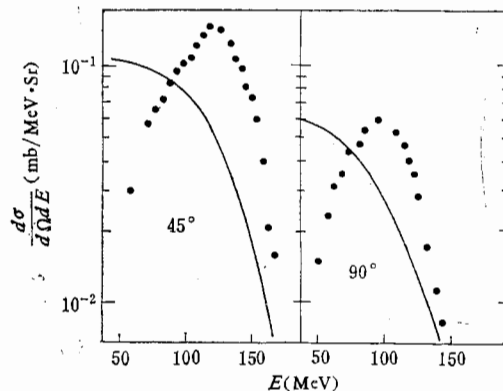


图 5 四核子相空间计算的结果。

1. 在 220 MeV 入射能量的情况下, 在 45° 方向出射质子能谱的低能端明显地小于实验值。这是由于 π^- 介子在未被吸收以前可以先敲出质子, 然后被另外的两核子吸收, 这种直接敲出过程主要发生在较小角度和较低的出射能量。由于实验只测量了能量大于 40 MeV 的质子, 因此, 对较低的人射能量, 这种贡献就很小, 在 60 和 100 MeV 入射 π^- 的情况下, 就没有发现这种明显的差异。

2. 对 220 MeV 入射 π^- 的情况, 在 90° 出射质子谱也有较大的偏离, 我们还不清楚其中的物理因素。

四、四核子吸收的相空间讨论

尽管两核子模型是成功的。但多核子吸收(如四核子吸收)机制能否解释这一实验? 由于 ^4He 正好有四个核子。因此, 四核子吸收在 ^4He 上没有末态相互作用, 且吸收算符将依赖于四核子的坐标。 π^- 吸收后, 四个核子动量分布的几率将比例于跃迁矩阵元的平方:

$$\frac{dW}{\prod_{i=1}^4 d^3P_i} = |\langle \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4 | \theta(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}) | \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4 \rangle|^2 \times \delta(E_i - E_f) \quad (13)$$

其中, $E_i = T_\pi + m_\pi c^2 - E_B$, $E_f = \sum_{i=1}^4 P_i^2/2m$, 假定, 吸收算符 θ 是空间短程的相互作用, 例如, 取 $\theta \propto \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r})\delta(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r})\delta(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r})\delta(\mathbf{r}_4 - \mathbf{r})$, 则规一化的单粒子动量分布函数只是四粒子的相空间函数对其他三个粒子动量的积分^[16]:

$$F_4(\mathbf{P}) = I_3(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}, E_i - P^2/2m)/I_4(\mathbf{P}_0, E_i), \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 \text{其中: } I_N(P_0, E) &= \prod_{i=1}^N \int d^3P_i \delta^{(3)}\left(\mathbf{P}_0 - \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_i\right) \delta\left(E_i - \sum_{i=1}^N \frac{P_i^2}{2m}\right) \\
 &= \frac{(2m\pi)^{\frac{1}{2}(N-1)} \cdot (E_i - P_0^2/2Nm)^{\frac{1}{2}N-\frac{1}{2}}}{\Gamma\left(\frac{3}{2}(N-1)\right)} \quad (15)
 \end{aligned}$$

利用(14)和(15)式,我们可以计算发射质子能谱的形状. 它表示四个核子同等地参于总能量和动量的分配,但我们只观察其中的一个,而不观察其余的核子. 图5中给出了100 MeV的 π 介子被四个核子吸收后在 45° 发射核子的能谱形状,绝对值是任意单位,为了比较,我们也标出了实验点.从图可见,四核子相空间的计算与实验不符,它不可能给出实验上明显的峰值的位置.当然,我们并不能排除有很小一部分几率,正像文献[15]中所指出的,小于10%的几率的 π 介子是被四核子所吸收的.无论如何,它不可能占很大的比例.

作者感谢核理论组的同志们对本工作的讨论.

参 考 文 献

- [1] J. Hüfner, *Phys. Reports*, **21** (1975), 1.
- [2] D. S. Koltun, *Adv. Nucl. Phys.*, **3** (1969), 71.
- [3] T. I. Kopaleishvili, *Particles and Nuclei*, **V2**, part 2(1973), 87.
- [4] D. Ashery, Proc. of the International Conf. on Nucl. Phys., Berkeley, California, 1980.
- [5] R. D. McKeown et al., *Phys. Rev. Lett.*, **44** (1980), 1033.
- [6] K. Shimizu and A. Faessler, *Nucl. Phys.*, **A333** (1980), 495.
- [7] H. C. Chiang and J. Hüfner, *Nucl. Phys.*, **A352** (1981), 442.
- [8] F. Hachenberg, H. C. Chiang and J. Hüfner, *Phys. Lett.*, **97B** (1980), 183.
- [9] 姜焕清、李扬国,科学通报, **26**(1981), 1290; 高能物理与核物理, **6**(1982)721.
- [10] C. M. Ko and S. Bohrmann, *Phys. Lett.*, **97B** (1980), 188.
- [11] H. E. Jackson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977), 1601.
- [12] C. Cernigoi et al., *Nucl. Phys.*, **A352** (1981), 343.
- [13] E. J. Moniz et al., *Phys. Rev. Lett.*, **26** (1971), 445.
- [14] J. Hüfner and M. Thies, *Phys. Rev.*, **C20** (1979), 20.
- [15] F. Hachenberg, Preprint.
- [16] R. H. Milburn, *Rev. Mod. Phys.*, **27** (1955), 1.

NUCLEON SPECTRA FOLLOWING PION ABSORPTION BY ${}^4\text{He}$

CHIANG HUAN-CHING LI YANG-GUO PAN JI-ZI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In the framework of two nucleon absorption, we analyse the nucleon spectra following pion absorption by ${}^4\text{He}$ for stopped pion and pions in flight at $T_\pi = 60, 100$ and 220 MeV. Two nucleon absorption mechanism agrees quantitatively with the data. Four nucleon phase space calculation does not fit the measurements.