

(π, N) 反应的多核子吸收机制

刘宪辉

陈学俊

(中国科学院高能物理研究所)

(清华大学)

摘 要

本文将 G. E. Brown 和 W. Weise 的 π -核散射理论推广应用到 (π, N) 反应上, 计算了 $T_\pi = 100, 200, 290$ MeV 时的 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应的角度分布, 并与实验作了比较。

一、引 言

(π, N) 反应的特征是大动量转移。从 (π, N) 反应的研究可以得到某些核结构方面的信息, 可以更多地了解 π -核作用的机制。 (π, N) 反应是 (p, π) 一类反应的逆过程。对于 (p, π) 过程已经有相当广泛的研究, 而对于 (π, N) 过程的研究却还不多。由于复杂的多体问题, 前者的研究是不能完全代替后者的, 它们的实验特征也不尽相同。近几年来关于 (π, N) 反应已做了一些较好的实验^[1], 它为理论研究提供了依据。如同 (p, π) 反应一样, 在 (π, N) 反应理论研究中也所谓单核子吸收和两核子吸收模型, 但是都未能很好解释实验材料^[1]。在早先的许多研究中, 共同的一点是发现 π 场的扭曲效应非常大, 说明多个核子的作用是十分重要的。

在 $\pi N(3, 3)$ 共振能区, 由于 P 波共振作用, 多核子效应尤为突出。人们在讨论 π -核散射时, 曾提出各种各样的 Isobar 模型理论, 力图把多核子效应和共振特征包括进来。这些模型在解释 π -核散射实验材料方面都有成功之处。G. E. Brown 和 W. Weise 提出的 Isobar 模型^[2], 理论构架非常清晰: π 介子穿越原子核, 导致 Δ 粒子-核子空穴激发, 形成所谓自旋同位旋波的传播, 最后 π 介子被重新发射出来。这个模型抓住了 $(3, 3)$ 共振这一主要特性。能解释 π -核散射的主要特征。张宗焯和刘波^[4]把 Brown 和 Weise 的理论推广应用到 (p, π^+) 反应上, 将一核子机制和两核子机制结合起来, 得到较满意的结果。本文将他们的方法推广应用到 (π^-, n) 反应上, 但在具体近似和做法上有所不同。下一节我们给出理论方法概要, 第三节是关于 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应的理论计算结果和讨论。

二、理论方法概要

当把 Brown 和 Weise 的理论应用推广到 (π, N) 反应时, 需要计算如图 1 Feynman 图,

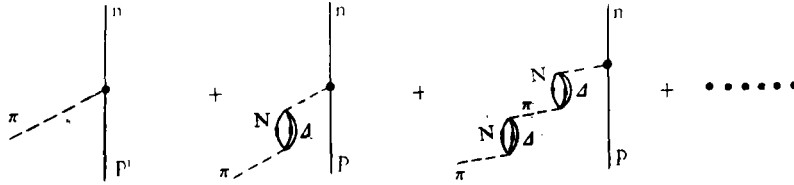


图 1

这里只取了粒子-空穴朝前传播图^[2]。利用 Brown 建立起来的多次散射与 TDA 之间的联系,可以把上面的无穷个图的求和变成两个图(图 2)。

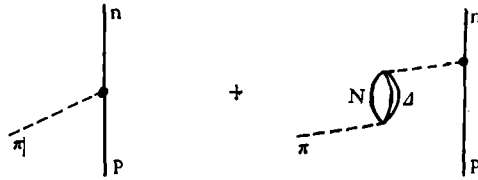


图 2

由此得到散射矩阵为

$$T = \frac{1}{\sqrt{2\omega_\pi}} [H_{NN\pi} + H_{NN\pi} D_0(\omega_\pi, k) H_{\Delta N\pi}^\dagger G H_{\Delta N\pi}]. \quad (1)$$

其中顶角函数取通常的非相对论近似,

$$\left. \begin{aligned} H_{NN\pi} &= \frac{if_{NN\pi}}{m_\pi} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{q} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\varphi}_\pi, \\ H_{\Delta N\pi} &= \frac{if_{\Delta N\pi}}{m_\pi} \boldsymbol{\sigma}_{\Delta N} \cdot \mathbf{q} \boldsymbol{\tau}_{\Delta N} \cdot \boldsymbol{\varphi}_\pi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

\mathbf{q} 是 π 介子在 πN 质心系中的动量, $\boldsymbol{\sigma}$ 和 $\boldsymbol{\tau}$ 是核子的自旋和同位旋算符, $\boldsymbol{\sigma}_{\Delta N}$ 和 $\boldsymbol{\tau}_{\Delta N}$ 是 $N \rightarrow \Delta$ 的自旋和同位旋算符, $D_0(\omega_\pi, k)$ 是自由 π 介子传播子 $[\omega_\pi^2 - k^2 - m_\pi^2 + i\epsilon]^{-1}$, G 是 Δ 粒子-核子空穴 Green 函数用 TDA 方法对角化之后的传播子

$$G = \sum_n \frac{|\Psi_n\rangle \langle \Psi_n|}{\omega_\pi - E_n}, \quad (3)$$

其中, E_n 和 Ψ_n 是所选的 Δ 粒子-核子空穴组态空间中的 TDA 本征解。由 (1) 式可得 $A(\pi, N)B$ 反应的微分截面

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{E_N \omega_\pi k_N}{(2\pi)^2 k_\pi} \sum_{ij} |\langle \Psi_j | T | \Psi_i \rangle|^2. \quad (4)$$

其中 E_N 和 k_N 为 NB 质心系中 N 核子的能量和动量, ω_π 和 k_π 是 πA 质心系中 π 介子的能量和动量。由适当的坐标变换得到

$$\mathbf{q} = \frac{m_N + \omega_\pi / A}{m_N + \omega_\pi} \mathbf{k}.$$

在我们的计算中,考虑到由于多体问题因素太多,直接作 TDA 解仍有其不确定性,不如用唯象的简化近似来代替它,即把 $|\Psi_n\rangle$ 取成谐振子位阱中的简单的 Δ 粒子-核子空穴波

函数 (相当的零级波函数), 相应的本征能量带有两个参数——能级移动 μ_{Δ} 和能级宽度 Γ_{Δ} , 即

$$E_n = m_{\Delta} - m_N + n\hbar\omega_{\Delta N} + \mu_{\Delta} - \frac{i}{2}\Gamma_{\Delta}, \quad (5)$$

$$n\hbar\omega_{\Delta N} = (2n_{\Delta} + l_{\Delta})\hbar\omega_{\Delta} - (2n_N + l_N)\hbar\omega_N. \quad (6)$$

n_{Δ} 和 l_{Δ} 为 Δ 粒子所在谐振子轨道量子数, n_N 和 l_N 为核子空穴所在谐振子轨道量子数. μ_{Δ} 是平均的能级移动, Γ_{Δ} 是平均的能级宽度. 那么,

$$G = \sum_n \frac{|\langle ph \rangle_n \langle ph | n \rangle|}{\omega_{\pi} - E_n}. \quad (7)$$

对 n 求和只能取到有限个大壳. μ_{Δ} 和 Γ_{Δ} 参照文献[5]取值, 在文献[5]中给出了拟合 π 和若干个核弹性散射实验的参数值. 此外, 在我们的计算中, 只考虑了 π 的吸收和重发射, 没有考虑其它介子的作用.

三、 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应

我们用上节所述方法详细地计算了(3, 3)共振能区的 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应. 顶角耦合常数取

$$\frac{f_{NN\pi}^2}{4\pi} = 0.08, \quad \frac{f_{\Delta N\pi}^2}{4\pi} = 0.23. \quad (8)$$

μ_{Δ} 和 Γ_{Δ} 当作参数, 并考虑它们改变时对计算结果的影响. ${}^4\text{He}$ 空穴态的波函数选取由实验确定的双高斯密度函数^[3]

$$\rho(r) = N(e^{-K_1^2 r^2} - c e^{-K_2^2 r^2}). \quad (9)$$

N 是归一化常数. K_1^2, c, K_2^2 取如下两组数值.

	K_1^2	K_2^2	c
A组	0.56	5.0	0.48
B组	0.6	4.2	1.0

为进一步考虑核态波函数的效应, 我们还做了 ${}^4\text{He}$ 波函数取为简单的谐振子形式时的计算. 谐振子参数 α^{-1} 取 0.7 fm. 作为初步分析, 发射的核子用平面波近似, 没有考虑终态核场的扭曲效应, 估计它不能影响我们这里的定性结论. 在计算时, 我们对(7)式的求和只取到 $5\hbar\omega_{\Delta N}$ 激发的所有组态. 计算结果见图 3、图 4、图 5.

在图 3 中, 我们给出用 ${}^4\text{He}$ 双高斯密度函数 A 组参数计算的由 200 MeV π^- 引起的 (π^-, n) 反应微分截面与实验值的比较. 对于峰和谷的位置以及数量级, 理论与实验相符. 对 B 组参数, 大角度时的角分布还要往上抬高, 没有画在图中. 波函数的参数对截面大小的影响是灵敏的, 但对峰和谷的位置并不影响峰谷位置主要由反应机制决定, 计算表明, 在两组参数中, A 组参数更符合实验, 参数 c 不宜过大. 因为核态波函数的高动量成份并不知道得十分清楚, 参数的选择有很大的余地, 因此, (π, N) 反应对这种选择可以作为一个佐证.

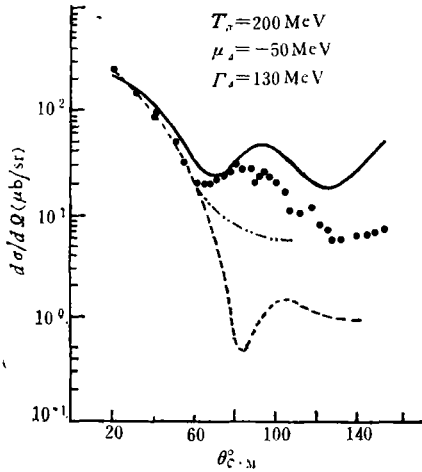


图3 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应微分截面

——本文计算, ${}^4\text{He}$ 用双高斯密度函数;
 - - - H. W. Fearing 的计算^[6];
 - · - V. R. Gibbs, A. T. Hess 的计算^[7]

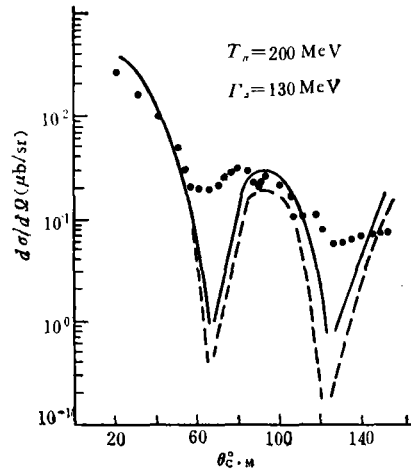


图4 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应微分截面

${}^4\text{He}$ 用简单谐振子波函数
 —— $\mu_\Delta = 0.0$; - - - $\mu_\Delta = -50\text{MeV}$

在图3中还绘出了 Fearing^[6] 和 Gibbs, Hess^[7] 的计算结果. Fearing 用两核子模型的扭曲波冲量近似 (DWIA), 根据 $pp \rightarrow d\pi$ 截面和初末态波函数重迭因子的付氏变换形状

因子来表示 $A(p, \pi)A + 1$ 反应截面, 由细致平衡原理得到 (π, n) 反应截面. Gibbs 和 Hess 用的模型, 精神上类似于 Fearing 的 DWIA, 他们把 (π, p) 过程形式地与 π 核弹性散射截面联系起来. 这两个模型虽然可以部份包含 πN 相互作用的 $(3, 3)$ 共振效应, 但并不能反映 Δ 粒子-核子空穴在核物质中的形成和传播, 正是这一集体行为对 (π, n) 反应是十分重要的. 他们的计算结果与实验符合不好, 也说明了这一点. 这是与本文的主要不同之处.

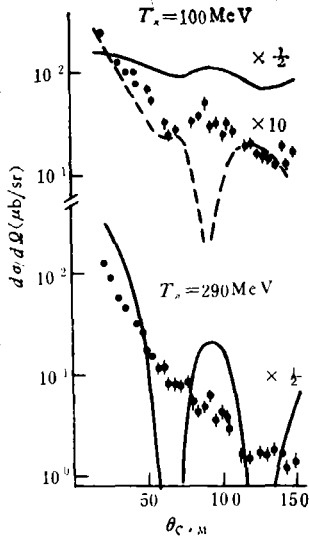


图5 ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ 反应角分布

——用双高斯密度函数;
 - - -用谐振子波函数

在图4中, 我们给出用谐振子波函数的计算结果与实验的比较. μ_Δ 取 -50MeV 或 0 时, 计算结果相差不大, 峰和谷的位置以及峰的高度的理论值与实验相符, 但谷太深. μ_Δ 大小的改变对结果影响不灵敏. 但当改变宽度 Γ_Δ 的值时, 计算结果改变甚大. 我们曾取 Γ_Δ 为 110MeV 和 86MeV 进行过计算, 发现截面值大大抬高, 峰谷位置也改变得不符合实验. 最后确定取 $\Gamma_\Delta = 130\text{MeV}$ 时比较符合实验. 就是说, 由 π -核弹性散射给出的参数 μ_Δ 和 Γ_Δ 值^[5] 是适当的.

图5给出入射 π 能量为 100MeV 和 290MeV 时的 (π^-, n) 反应微分截面的理论值与实验值的比较. 基本上得不到符合, 表明当能量离开 $(3, 3)$ 共振区时, Isobar 模型不能给出正确的微分截面.

从理论和实验的比较分析中,我们看到 (π, N) 反应角分布的峰谷位置对波函数的依赖关系很小,角分布的第一个极小值出现在约 70° 的固定位置处,与弹性散射角分布十分相近. 表明它不是核结构的特征,而是 π -核散射 $(3, 3)$ 共振为主效应的特征. Δ 粒子-核子空穴传播的 Isobar 模型理论正确地反映了 $(3, 3)$ 共振这一重要特征. 由此得出结论, (π, N) 反应机制主要是多核子吸收机制,是集体效应.

上述计算尚存在有待改进的地方. 如考虑 ρ 介子交换效应,加上顶角形状因子,考虑核子非静态项,发射核子的终态相互作用扭曲,以及 πN 非共振部分的贡献等. 这些因素的重要性可能在离开 $(3, 3)$ 共振能区会突出起来,有待进一步研究.

作者对刘波和张宗焯同志的帮助和讨论表示感谢.

参 考 文 献

- [1] J. Källne, H. A. Thissen, C. L. Morries et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 378.
- [2] G. E. Brown and W. Weise, *Phys. Reports*, **22C**(1978), 279.
- [3] J. A. Auger, *Nucl. Phys.*, **262**(1976), 372.
- [4] 张宗焯、刘波,高能物理与核物理, **4**(1980), 256.
- [5] 高琴等,高能物理与核物理, **3**(1981), 321.
- [6] H. W. Fearing, *Meson-Nuclear Physics-1976 AIP Conf. Proc.*, No. 33 edited P. D. Barnes et al.
- [7] W. R. Gibbs, A. T. Hess, *Phys. Lett.*, **68B**(1977), 205.

MULTI-NUCLEONS ABSORPTION MECHANISM OF THE (π, N) REACTIONS

LIU XIAN-HUI

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

CHEN XUE-JUN

(*Qinghua University*)

ABSTRACT

The theory of the π -nucleus scattering developed by Brown and Weise is generalized to study the (π, N) reactions. The differential cross section of the ${}^4\text{He}(\pi^-, n){}^3\text{H}$ at the 100, 200, 290 MeV is calculated by using this method. The results obtained are discussed.