

在阈能附近的 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应和 ηN 散射*

姜 焕 清

(中国科学院高能物理研究所和理论物理所, 北京 100039)

王 淮 淮

(中国科学院理论物理所, 北京 100080)

摘 要

本文提出了 π 介子与核子作用产生 η 粒子的 $N^*(1535)$ 激发模型, 计算了在阈能附近的 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应截面以及 S -波 ηN 散射长度, 并与实验及其他理论作了比较.

一、引 言

η 粒子、 K 介子和 π 介子属于同一个 $SU(3)$ 的八重态. π 介子和 K 介子与原子核的相互作用的研究已经取得了重要的进展, 并且为核的激发方式以及核物质的新形态的研究提供了重要的信息. 相比之下, 人们对于 η 粒子与原子核的相互作用几乎一无所知, 对于 η 和核子的作用也了解得很少. 一个重要的困难在于 η 粒子的寿命很短, 其平均寿命只有 0.75×10^{-18} 秒, 不可能在实验室中产生 η 介子束流. 所有有关 ηN 相互作用的信息都只能间接地得到. 目前, 在美国 Los Alamos 的介子工厂用 π 介子在原子核上产生 η 介子的实验研究计划, 正在为 η -核作用的机制提供重要信息^[1,2]. 在理论研究方面, 利用一种耦合道的方法, R.S. Rhalerao 和 L.C. Liu 考虑了 $N^*(1440)$, $N^*(1520)$ 和 $N^*(1535)$ 三个共振, 通过符合 πN 的散射相移, 定出 πNN^* , ηNN^* 和 $\pi\pi NN^*$ 的耦合常数, 预言了 ηN 相互作用的特点^[3], 并由此预言了 η -核形成束缚态的可能性^[4]. 李扬国和姜焕清在 DWIA 的理论框架下, 讨论和预言了 π 在原子核上产生 η 介子的“电荷交换”反应的特点^[5], 而所输入的基本过程取自实验的参数化的形式.

从基本粒子性质表可以发现^[6], 在质心能量小于 1700 MeV 时, 在一系列 N^* 共振态中, 仅仅 $N^*(1535)$ 具有较大的分支比 (45—55%) 衰变成 ηN , 而通过其他共振产生 η 的可能性都极小, 可以忽略. 换句话说, ηN 与 $N^*(1535)$ 具有强的耦合, 与其他共振态的耦合极弱. 因此, 当我们研究 η - N 相互作用时, 可以假定 $N^*(1535)$ 共振模型. 另一方面, $N^*(1535)$ 与 ηN 耦合的重要实验信息是 $N^*(1535)$ 衰变成 ηN 、 πN 以及 $\pi\pi N$ 的分支比以及 $\pi^- p \rightarrow \eta n$ 反应的截面. 对于 πN 道, 除 $N^*(1535)$ 共振有

本文 1990 年 12 月 11 日收到.

* 国家自然科学基金资助的课题.

贡献以外,其他机制也可以对 πN 作用有重要贡献。因此,在研究 ηN 作用时, πN 散射相移并不是有关系的,其衰变分支比以及 η 产生的截面才是相关的物理量。基于上述考虑,姜焕清、E. Oset 和刘龙章假定了一种形式的相互作用哈密顿量,通过 $N^*(1535)$ 衰变各道的分支比及总宽度定出了 πNN^* , ηNN^* 和 $\pi\pi NN^*$ 的耦合常数。由此出发,得到了 η -核的光学势,通过求解克莱因-戈登方程,研究了 η -核形成束缚态的可能性^[7]。

然而,在能量为 0.6—1GeV 的能区, π 介子在自由核子上引起的 η 产生反应,即 $\pi^-p \rightarrow \eta n$, 是一个重要的反应道。上述方法定出的 ηNN^* 等耦合常数,应该给出阈能附近的 $\pi^-p \rightarrow \eta n$ 反应截面,本文将在文献 [7] 给出的相互作用哈密顿量的基础上,计算 $\pi^-p \rightarrow \eta n$ 反应的截面,研究 $N^*(1535)$ 的质量和平均宽度等因素对反应截面的影响,并计算 S 波 ηN 散射长度,对低能 ηN 相互作用的特点作一些分析。

第二节将简要概括我们的理论公式,第三节给出数值结果和讨论。

二、基本理论公式

从基本粒子表可知, $N^*(1535)$ 的质量为 1520 到 1560 MeV, 平均能量为 1535 MeV; 宽度在 110 到 250 MeV 之间,其平均值为 150 MeV。它衰变到 πN 、 ηN 和 $\pi\pi N$ 各道的分支比分别为 35—45%, 45—55% 和 10%。考虑到 $N^*(1535)$ 的三种可能的衰变,我们需要知道 πNN^* , ηNN^* 和 $\pi\pi NN^*$ 的耦合常数。为此,考虑到参与反应的粒子的量子数,对于 πNN^* 、 ηNN^* 和 $\pi\pi NN^*$ 耦合,我们可以取如下形式的相互作用哈密顿量^[7]:

$$\begin{aligned}\delta H_{\pi NN^*} &= -ig_\pi \bar{\psi}_{N^*}(x) \phi(x) \boldsymbol{\tau} \psi_N(x) + \text{h.c.}, \\ \delta H_{\eta NN^*} &= -ig_\eta \bar{\psi}_{N^*}(x) \psi_N(x) \phi_\eta(x) + \text{h.c.}, \\ \delta H_{\pi\pi NN^*} &= -iC \bar{\psi}_{N^*}(x) \gamma_5 \psi_N(x) \phi(x) \phi(x) + \text{h.c.}\end{aligned}\quad (1)$$

其中, g_π , g_η 和 C 分别对应于上述三种耦合的耦合常数。利用标准的费曼规则,可以计算由于 πN 道、 ηN 道和 $\pi\pi N$ 道的衰变而提供的 $N^*(1535)$ 的自能。相应的衰变宽度 $\Gamma^{(i)}(q)$ 与通过该道提供的自能 $\Sigma^{(i)}(q)$ 有如下的关系

$$\frac{\Gamma^{(i)}(q)}{2} = -\text{Im}\Sigma^{(i)}(q).\quad (2)$$

其中 q 为 $N^*(1535)$ 的四动量。利用已知的 N^* 的总宽度和各道分支比的实验值,不难从 (2) 式定出相互作用哈密顿量 (1) 式中的耦合常数 g_π , g_η 和 C 。

对于 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应,我们需要计算图 1 所示的费曼图,其 T 矩阵为:

$$\begin{aligned}-iT &= (-i)g_\pi \frac{1}{\sqrt{s} - M_{N^*} + i\Gamma(\sqrt{s})/2} (-i)g_\eta \\ &+ (-i)g_\pi \frac{1}{\sqrt{s} - M_{N^*} + i\Gamma(\sqrt{s})/2 - \omega_\pi(K_\pi) - \omega_\eta(K_\eta)} (-i)g_\eta\end{aligned}\quad (3)$$

其中 $\Gamma(\sqrt{s}) = \Gamma(\pi N) + \Gamma(\eta N) + \Gamma(\pi\pi N)$, \sqrt{s} 为系统的不变能量, M_{N^*} 为 $N^*(1535)$ 的平均质量, k_π , k_η 分别为 π 和 η 介子的动量。(3) 式中第一项相应于图 1 中的直接项

(a), 而第二项相应于交换项 (b)。利用 Bjorken-Drell 约定, 我们可以得到 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应的截面公式。

$$\frac{d\sigma}{dn} = \frac{M_p^2}{(4\pi)^2} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{\lambda^{1/2}(s, m_\pi^2, M_p^2)}{\lambda^{1/2}(s, m_\eta^2, M_n^2)} \cdot \bar{\Sigma} |T|^2, \quad (4)$$

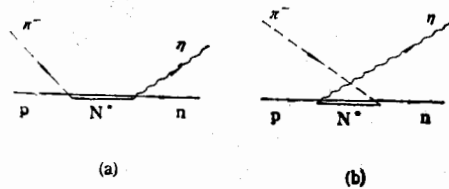


图 1 $\pi^- p \rightarrow \eta n$ 反应的费曼图

(a) 直接项; (b) 交叉项

其中 $\bar{\Sigma}$ 表示对核子初态自旋取向求平均, 对末态自旋取向求和。 m_π 、 m_η 和 $M_{n(p)}$ 分别为 π 、 η 和中子(质子)的质量。 $\lambda(x, y, z)$ 为 Källén 函数。

利用公式 (4), 我们可以计算不同能量下, π^- 在质子上引起的 η 介子产生的截面。

三、数值结果和讨论

利用上节的公式, 我们首先讨论耦合常数 g_π 、 g_η 和 c 与 N^* 质量及衰变宽度取值的关系。 在基本粒子性质表中^[6]建议了 N^* 的平均质量为 1535 MeV, 衰变宽度为 150 MeV。 但是这些数值有很大的不确定性。 假定取 $N^* \rightarrow \pi N$, $N^* \rightarrow \eta N$ 和 $N^* \rightarrow \pi\pi N$ 的分支比为 40%, 50% 和 10%。 我们得到 g_π 、 g_η 和 C 分别为 0.664, 2.06 和 $9.23 m_\pi^{-1}$ 。 为了研究不同的 N^* 质量及宽度的取值对耦合常数的影响, 在表 1 中我们给出了另外三种情况的结果。 可见, 不同的 $N^*(1535)$ 的平均质量及宽度的选取, 对耦合常数有一定影响。 我们将通过 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应, 进一步确定这些参数。

表 1 相互作用耦合常数

	$M_{N^*}(\text{MeV})$	$\Gamma(\text{MeV})$	g_η	g_π	$C(m_\pi^{-1})$
I	1535	110	1.75	0.568	11.18
II	1555	110	1.613	0.564	10.09
III	1610	110	1.408	0.552	7.99

利用公式 (4) 和表 1 中的耦合常数, 可以计算在阈能附近 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应截面。 图 2 给出了不同的 N^* 质量及衰变总宽度的选取情况下, 反应截面与质心总能量的关系。 图中的三条曲线分别对应于表 1 中三种不同取值的结果。 实验数据取自文献 [8]。 与实验结果的比较可见, 当取 $M_{N^*} = 1555 \text{ MeV}$, $\Gamma = 110 \text{ MeV}$ 时, 在阈能附近, 理论结果与实验符合得比较好。 在质心能量大于 1600 MeV 时, 理论结果比实验值系统地偏小。 这是由于, 在较高的能量下, 更高能量的 N^* 共振态对 η 产生会有贡献。 例如 $N^*(1710)$

有 25% 的分支比衰变成 ηN , 这将会对能量高于 1600 MeV 的 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应有重要贡献, 而在阈能附近, 它的贡献很小. 由此, 我们可以得出结论, 利用 $M_{N^*} = 1555 \text{ MeV}$ 和 $\Gamma = 110 \text{ MeV}$ 所得到的相互作用耦合常数, 在低能区还是比较可靠的.

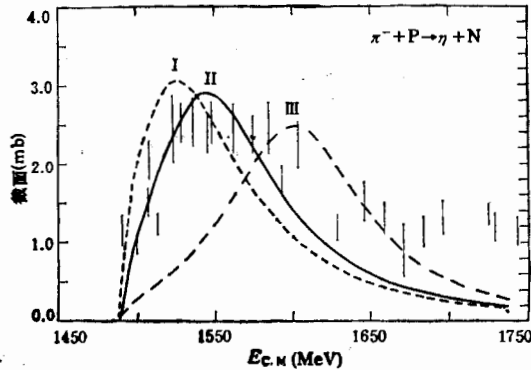


图 2 $\pi^- p \rightarrow \eta n$ 反应的总截面

利用上述结果, 可以进一步计算 S -波 ηN 散射长度, 从而对 ηN 相互作用的特点有所认识. 计算结果在表 2 中给出. 表中也同时给出了其他人的理论结果, 可见, 不同的理论模型给出的 S 波 ηN 散射长度有一个共同的特点, 即散射长度的实部为正. 这表明, 低能 ηN 相互作用是吸引的. 但不同的理论得到的散射长度的数值差异很大. 我们的第二组耦合常数得出的结果与文献 [3] 比较接近. 对于 ηN 相互作用的强度, 有待其他实验的进一步检验.

表 2 η - N S 波散射长度

理 论	$a_0(\text{fm})$
本文 I	$0.506 + i0.256$
本文 II	$0.340 + i0.117$
本文 III	$0.155 + i0.027$
文献 [3]	$0.28 + i0.19$
文献 [9]	$0.83 + i0.05$

总之, 本文利用 $N^*(1535)$ 共振模型, 研究了 $\pi N \rightarrow \eta N$ 反应并与实验作了比较. 该模型较好地给出了阈能附近 η 产生的截面, 并预言了 ηN 相互作用的性质. 这一结果可以进一步用于研究 π 在原子核上引起的 η 产生反应.

参 考 文 献

- [1] J. C. Peng, Proc. of International Symposium on Medium Energy Physics, World Scientific, (1987), P. 336.
- [2] J. C. Peng et al., Phys. Rev. Lett., 58(1987), 2027.
- [3] R. S. Bhalerao and L. C. Liu, Phys. Rev. Lett., 54(1985), 865.
- [4] Q. Haider and L. C. Liu, Phys. Lett., 172(1986), 257.
- [5] Li Yang-guo and Chiang Huan-ching, Nucl. Phys., A454(1986), 720.

- [6] Review of Particle Properties, *Phys. Lett.*, **170B**(1986), 1.
[7] H. C. Chiang, E. Oset and L. C. Liu, submitted to *Phys. Rev. C*.
[8] V. Flaminio et al., CERN-HERA 79-03(1979).
[9] S. F. Tuan, *Phys. Rev.*, **B139**(1965), 1393.

The $\pi N \rightarrow \eta N$ Reactions near Threshold and η -N Scatterings

JIANG HUANQING^{a,b)} WANG WEIWEI^{b)}

a)(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica Beijing 100039*)

b)(*Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

ABSTRACT

The $N^*(1535)$ model is proposed for pionic η - production reactions. The $\pi N \rightarrow \eta N$ reaction cross sections near threshold and the S -wave η -N scattering length are calculated and compared with the experimental data and other theoretical calculations.