

关于氦中含氘量对负π介子吸收实验影响的讨论*

唐孝威

一、负π介子吸收实验所提起的问题

负π介子被氦吸收,是π介子物理中的一个基本反应. 这个反应有二个分枝,即辐射俘获及介子俘获.

辐射俘获:
$$\pi^- + p \rightarrow n + \gamma, \quad (1)$$

介子俘获:
$$\rightarrow n + \pi^0 \rightarrow 2\gamma. \quad (2)$$

其中p和n是质子和中子. π⁰介子的寿命极短,在小于10⁻¹⁵秒之内,衰变为一对γ线. 所以实验上观察到属于二个分枝的二羣γ光子. 反应分枝的几率比P(又称为潘诺夫斯基比值)在介子物理学中很重要,在唯象介子理论中,就是靠P来把低能(S波)π介子核子散射和光生π介子反应联系起来^[1]. 因此,多年来进行过许多实验,测量反应中二羣γ的产额比,来求出P. 下面把一些数据,列在表1中^[2].

表 1

实验P值	实验作者
0.94 ± 0.30	W. K. H. Panofsky 等 (1951) ^[3]
1.50 ± 0.15	J. M. Cassels 等 (1957) ^[4]
1.87 ± 0.10	J. Fisher 等 (1958) ^[5]

可以看出,实验值之间的差别,远远超过实验误差的范围. 此外,从π介子核子

作用的唯象理论,推得P的理论值为P₀ = 2.43^[5]. 它比所有实验值大得多. 这些问题是π介子物理中的一些困难,它曾经引起很多探讨^[1,6,7],例如苏联A. M. Балдин曾提出过π₀介子的假说来解决这个困难^[7]. 但以后实验证明,π₀介子并不存在^[8],9].

作为一种可能的解说是:氦中含的氘,影响了π介子吸收的机构. 天然氦中永远混杂着氘,它的含量虽然少,但它可能优先吸收负π介子. 如果认为,不同的实验作者所用氦靶的纯度不同,而且氘的影响很大,那么实验值之间的差别是可以理解的. 至于唯象理论推算,只是考虑了负π介子被纯粹的孤立质子吸收的情形,没有考虑氘的作用. 所以理论P₀值和实验值不符合的问题,或许也可用同一原因来解说.

这个解说是否正确,要求用定量计算的结果来判断. 本文的目的就是进行这个计算.

* 1950年10月10日收到.

- 1) 联合原子核研究所正在进行这个实验. 实验最后结果尚未发表. 初步测量结果曾在第九届国际高能会议上报告过^[2], P = 1.2 ± 0.3.
- 2) 按照 Балдин 的假说^[7], 新的π₀介子是中性的赝标介子,同位旋为零,质量可能略小于π介子. 而现在已知的π介子则写作π₁,它的同位旋为1,因而有π₁⁺, π₁⁰, π₁⁻三种状态. 如果存在着π₀介子,则唯象理论关于π介子核子作用就需要重新进行分析. 在计算中引入新的相角移(π₀的)而可推出新的理论值P₀. 目前的实验表明了这种假说的π₀并不存在.

二、天然氘中负 π 介子的命运

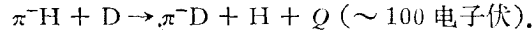
我們首先考察负 π 介子在被吸收之前的经历。加速器上产生的负 π 介子, 经过磁场作动量选择, 再经过慢化片慢化后, 打到液氘靶中而停下。它很快被质子俘获到原子轨道上, 形成中间状态, 即介子氘原子^[9,10]。在介子氘原子中, 负 π 介子相当于普通氘原子中的轨道电子; 介子氘原子是一个小的中性体系, 它可在氘分子间自由运动, 并且碰撞。

液氘中少量氘也可以俘获负 π 介子, 形成介子氘原子。俘获的多少决定于氘的浓度。如果靶中氘原子相对数是 1, 而氘原子相对数是 ρ , 那么初期形成的介子氘原子和介子氘原子的比值, 就是 $1:\rho$ 。

介子氘原子最初是在激发状态, 接着发生的有下面几种互相竞争的过程:

1) 介子原子从激发态跃迁到基态; π 介子落到原子的 K 轨道上。以后, π 介子被质子所吸收。

2) 介子氘原子和氘中的氘碰撞而“交换介子”。因为 π -D 原子的结合能大于 π -H 原子(由于二种情况下介子折合质量不同), π^- 介子可以“转交”给氘:



由于能量关系, 这个过程是不可逆的。在此之后, $\pi^- \text{D}$ 体系以氘核吸收介子而告终。

3) π 介子衰变为 μ 介子。但已知这过程的几率比上二种要小几个数量级^[11], 所以下面讨论中就不再去考虑它。

氘和氘吸收负 π 介子的反应, 归纳在表 2 中。

表 2

吸 收 反 应	反应所生 γ 线的特性
$\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$ (1)	能量是 129 兆电子伏的单能 γ 。
$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$ (2)	平台形的 γ 能谱。在 55 兆电子伏到 83 兆电子伏间。
$\pi^- + d \rightarrow n + n$ (3)	不产生 γ 线。
$\pi^- + d \rightarrow 2n + \gamma$ (4)	能量 110 到 130 兆电子伏间的窄 γ 峰

氘吸收负 π 介子的实验曾经详细做过^[3,11], 反应产物也是中子和 γ 光子(反应 $\pi^- + d \rightarrow 2n + \pi^0$ 是不发生的)。反应(4)产生的 γ 线, 能量和反应(1)产生的 γ 线很相近; 目前高能 γ 谱仪很难把它们分辨开来。此外, 已知反应(3)和(4)的分枝比是^[3]:

$$w_{(3)}/w_{(4)} = 2.37 \pm 0.75.$$

三、介子交换过程的后果

本节中针对氘中混有少量氘的情况, 讨论一群脉冲式负 π 介子进入氘靶后介子交换过程的结果。令这群介子在时间 $t = 0$ 时进入。在氘靶中停下的 π^- 介子数是 n , 容易计算在时间 t 时, 介子氘原子的数目 n_1 和介子氘原子的数目 n_2 。

介子刚停下就被氘俘获, 形成的介子氘原子数 $n_{10} = n \frac{1}{1 + \rho}$ 。被氘俘获形成的介子氘原子数 $n_{20} = n \frac{\rho}{1 + \rho}$ 。 n_{10} 中之一部分, 由于 π^- 被氘核吸收而消失(几率是 λ_1), 另一

部分由于 π^- 轉交给氘而失去(几率是 λ_0)。但在 n_{20} 中, 則除了 π^- 被氘核吸收而消失(几率是 λ_2)外, 还由介子氘原子轉交给介子, 形成新的介子氘原子。 λ_1 和 λ_2 决定于 π^- 介子和核子作用的强度, 而 λ_0 則决定于氘的浓度。 $\lambda_0 = N\rho\nu\sigma$, N 是单位体积中氘核数目, ρ 是液氘中氘浓度, 介子原子速度为 ν 时, 交换过程的截面是 σ ; 所以乘积 $N\rho\nu\sigma$ 标志介子氘原子和氘碰撞发生介子交换的速率。我們可得到时间 t 时剩余的介子氘原子数:

$$n_1(t) = n_{10}e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

其中 $\lambda \equiv \lambda_0 + \lambda_1$, 而 n_2 則应适合于下面的微分方程:

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = \lambda_0 n_{10} e^{-\lambda t} - \lambda_2 n_2(t).$$

得到

$$n_2(t) = \frac{\lambda_0 n_{10}}{\lambda_2 - \lambda} e^{-\lambda t} + \left(n_{20} - \frac{\lambda_0 n_{10}}{\lambda_2 - \lambda} \right) e^{-\lambda_2 t}. \quad (6)$$

假若介子氘原子是稳定的体系, 即 $\lambda_2 \rightarrow 0$, 則 $n_2 - n_{20} = A(1 - e^{-\lambda t})$, A 是常数。就是說, n_2 数目将会不断积聚。实际上它是不稳定的体系, 平均寿命 $\approx \frac{1}{\lambda_2}$, 所以 n_2 数先增加后减少, 在 $t = t_M$ 时最多。

$$t_M = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda} \ln \left(\frac{g - 1}{g} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda} \right). \quad (7)$$

其中

$$g \equiv \frac{\lambda_0 n_{10}}{n_{20}} \cdot \frac{1}{\lambda_2 - \lambda}.$$

总起来說, 停下的 n 个 π^- 介子, 全都被吸收。而在介子氘状态下吸收和在介子氘状态下吸收的数目, 分别是:

$$\left. \begin{aligned} N_{\pi^-p} &= \int_0^\infty \lambda_1 n_1 dt = n_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda} \\ N_{\pi^-d} &= \int_0^\infty \lambda_2 n_2 dt = n_{20} + n_{10} \frac{\lambda_0}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

四、 P 值和氘含量关系的計算

在通常負 π 介子吸收实验中, 都測量总的 γ 能譜, 再把低能和高能二羣 γ 綫分开, 取二羣比值的一半, 而得到 $P^{[3,4]}$ 。因为按照 P_0 的定义, $P_0 = \omega_{(2)}/\omega_{(1)}$ (即表 2 中反应(2)和反应(1)的分枝比)。能量为 130 兆电子伏左右的高能 γ 羣的权重应为 $\frac{1}{1 + 2P_0}$, 能量平均在 70 兆电子伏左右的低能 γ 羣的权重应为 $\frac{2P_0}{1 + 2P_0}$ 。这里 P_0 指的是純氘时应有的 P 值, 也应相当于唯象理論算得的值^[5]。

前面已經提到, 氘吸收負 π 介子后, 产生的 γ 綫特性, 和反应(1)的 γ 綫相近, 它們将混在高能 γ 羣中。这样, 測到的 P 值, 与純氘时的 P_0 值自然就不同。下面表 3 中, 計算了每一个停下的 π^- 介子可以有的不同分枝的几率。这里用的 $k \equiv \frac{\omega_{(4)}}{\omega_{(1)} + \omega_{(3)}} \approx 0.3$ 。

表 3

起始时氦原子数目	交换介子后氦原子数目	γ 线的能量和产额	每道中 π 离子数目
11_2	$\frac{1}{1+\rho}$	$\frac{1}{1+\rho} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda} \left\{ \begin{array}{l} \sim 130 \text{ 兆电子伏: } \frac{1}{1+2P_0} \\ \sim 70 \text{ 兆电子伏: } \frac{2P_0}{1+2P_0} \end{array} \right.$	$\frac{1}{1+\rho} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda} \cdot \frac{1}{1+2P_0}$ $\frac{1}{1+\rho} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda} \cdot \frac{2P_0}{1+2P_0}$
$1D_2$	$\frac{\rho}{1+\rho}$	$\frac{\rho}{1+\rho} + \frac{1}{1+\rho} \frac{\lambda_0}{\lambda} \left\{ \begin{array}{l} \sim 130 \text{ 兆电子伏: } k \\ \sim 70 \text{ 兆电子伏: } 0 \end{array} \right.$	$k \left[\frac{\rho}{1+\rho} + \frac{1}{1+\rho} \frac{\lambda_0}{\lambda} \right]$

这时再取二羣 γ 线的比值的半, 求得 P 等于

$$P = \frac{P_0}{1+\eta},$$

其中

$$\eta \equiv k(1+2P_0) \left(\rho \frac{\lambda}{\lambda_1} + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) \geq 0,$$

所以 $P \leq P_0$. 即实际量到的 P 值, 由于氦不是百分之百纯粹的原故, 总比理论上推出的 P_0 要小. 而

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{1}{N\rho\nu\sigma} = \frac{1}{a\rho}; \quad a \equiv N\nu\sigma\tau_1. \quad (9)$$

其中 τ_1 是介子氦原子中 π^- 被质子吸收的平均寿命. 最后得到:

$$P = \frac{P_0}{1+k(1+2P_0)\rho(1+a+a\rho)}. \quad (10)$$

这给出了氦纯度对 P 值影响的定量关系.

上面讨论的纯度效应, 的确是使 P 实验值减少, 但是在代入具体数值计算以后, 看出这个效应在数量级上的实际影响很小. 粗略的数字估计如下: $\tau_1 \approx 10^{-13}$ 秒, $\nu\sigma \approx 10^{-12}$ 立方厘米/秒^[12], $N \approx 4 \times 10^{22}$ /立方厘米, 于是 $P \approx \frac{P_0}{1+3 \times 10^{-1}}$. 所以不能够用它来解说负 π 介子吸收实验和理论间的矛盾. 如果用 J. M. Cassels^[4]的结果, $\frac{P_0 - P}{P_0} \approx 38\%$; 再利用式(10), 所相应的 $\rho \approx 50\%$, 这显然是不可能的. 同样理由, 不同作者所用氦靶纯度的差别, 也不致这么大. 这个估计表明, 第一节中提出的解说并不适合.

五、小 结

本文算得了 P 和 ρ 的定量关系, 并得出了天然氦中氖影响不大, 不足以解说各个实验值相差很大及实验和理论值不符的问题. 因此对于这问题, 还需要寻找其他的原因, 例如对各次实验的可靠程度以及唯象理论中 P_0 值推算的可靠程度, 还需要分析.

用实验来证明式(10)表明的效应, 却是有趣的: 可以在液氦靶中混入不同浓度的氖, 再测量 P 值.

最后要指出,如果讨论的不是负 π 介子,而是另一种不活泼的负介子(例如负 μ 介子)被氩吸收,那么 τ_1 长而交换介子多,氩内少量杂质将会有很大的影响. 在氩吸收 μ^- 介子的实验中,就应当考虑本文讨论的效应;此外还应当把 μ^- 介子衰变的因素也计算进去,从而决定实验的方案.

本工作是在联合原子核研究所时完成的. 作者感谢苏略也夫(P. M. Суляев)同志的关心.

参 考 文 献

- [1] J. M. Cassels. Proceeding of 7th Annual Rochester Conference (1957).
- [2] A. Дунайцев, В. Пантуев, Ю. Прокошин, Тан Сяо-вэй (唐孝威), В. Хацатурян: 参見九届国际高能物理会议报告集 (1959, 基辅).
- [3] W. K. H. Panofsky, R. L. Aamodt, J. Hadley. *Phys. Rev.* **81**, (1951), 565.
- [4] J. M. Cassels, G. Fidicaro, A. M. Wetherell, J. R. Wormald *Proc. of Phys. Soc.* **A70**, (1957), 405.
- [5] J. Fisher, R. March, L. Marshall, *Phys. Rev.* **109**, (1958), 533.
- [6] Y. Yamaguchi, *Prog. theor. Phys.* Vol. 19, (1958), 622.
- [7] A. Baldin, *Nuovo Cimento* II, Vol. IX, (1958), 547.
A. Baldin, *Nuovo Cimento* II, Vol. VIII, (1958), 569.
- [8] Proceedings of 1959 Annual International Conference on High Energy Physics at Kiev.
- [9] E. Fermi and Teller, *Phys. Rev.* **72**, (1947), 399.
- [10] A. S. Wightman, *Phys. Rev.* **77**, (1950), 521.
- [11] J. A. Kuchner, A. W. Merrison, S. Tornabene, *Proc. of Phys. Soc.* **A73**, (1959), 551.
- [12] T. H. P. Skyrme, *Phil. Mag.* **2**, **19**, (1957), 910.