

31.2 MeV α 粒子在 C^{12} 核上准自由散射的研究

谢贤亮 孔祥傲 孙重文 王世明

(中国科学院上海原子核研究所)

摘 要

我们采用符合技术测量了 31.2 MeV α 粒子在 C^{12} 上的 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 反应出射粒子的相加能谱及角关联分布。角关联分布在相应于 α - α 自由散射的角度(即反冲核冲量趋于零)出现峰。因此,实验结果初步表明,反应机制是准自由散射过程,在低能区证实 α 集团是 C^{12} 基态的子结构。我们用平面波冲量近似进行了计算分析,得到了成团几率为 0.07,与高能的 ($p, p\alpha$) 结果接近。

一、引 言

核的核子集团结构在核结构与核反应机制中起着重要的作用是人们所预期的。核的集团结构在中、高能实验中得到一系列的实验现象^[1,2,6,12,13]。〔近年来在低能区出现了一些实验结果。特别是研究入射粒子与靶核内核子集团之间的准自由散射过程被认为是一种比较直接和有前途的手段。因为,在低能区还可以避免多次散射效应的干扰。这方面的工作有[3—7],他们研究了 $E_\alpha = 25; 28; 32.3; 37.4$ MeV 时的 $Be^9(\alpha, 2\alpha)He^5$ 反应及 $E_\alpha = 28; 37.4$ MeV 时的 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 反应。

$Be^9(\alpha, 2\alpha)He^5$ 的实验结果表明准自由散射过程是比较肯定的,认为 α 集团是 Be^9 基态的子结构;而 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 反应机制是含糊的, α 集团作为 C^{12} 基态的子结构尚存在某些疑点。但是高能的 ($\alpha, 2\alpha$) 及 ($p, p\alpha$) 的准自由散射过程是比较肯定的[11—13],他们[4]认为可能是由于能量较高, α 碎片较易剥离出。一些理论工作者^[9]预言,低能时 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 的准自由过程不明显,但 69 年 V. K. Dolinov^[6-7] 的实验结果与理论预言相矛盾,而 75 年 A. A. Cowley 等^[8]的实验结果也与以前理论不一致。我们认为,入射能量太低时可能受到反应 Q 值的影响。此外,根据平面波冲量近似,如果出现准自由散射过程其截面近似正比于 α - α 自由散射截面。

本工作的兴趣在于研究 31.2 MeV α 粒子 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 反应准自由散射的可能性。

二、反应运动学和实验方法

在实验室系统中,有能量及动量守恒方程:

本文 1983 年 3 月 3 日收到。

$$E_0 = E_1 + E_2 + E_R + E_{\alpha} - Q \quad (1)$$

及

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_R \quad (2)$$

其中 E_0 、 \mathbf{P}_0 分别为入射粒子的能量与动量； E_1 、 E_2 、 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 分别为出射 α 粒子的能量与动量； E_R 、 \mathbf{P}_R 分别为剩余核的反冲能量与动量； E_{α} 为剩余核激发能； Q 为反应 Q 值。

冲量近似处理低能 (α , 2α) 准自由散射过程估算 α 集团在靶核中的动量分布时有一个基本假定：入射的 α 粒子只与靶核中的 α 集团起作用，即 α 集团在靶核中的动量与反冲核的动量大小相等，方向相反。由于反冲核的动量可以作为观察角的函数来确定，因此，我们可以计算出 α 集团在靶核中的动量分布。准自由散射过程角关联峰只出现在相应核内 α 集团相对动量为“零”的观察角 ($\mathbf{P}_R = -\mathbf{q}$ ，其中 \mathbf{q} 为核内 α 集团动量)。上述假定，给出了准自由散射观察角：

$$\theta = \arccos \frac{P_0}{2P} \quad (3)$$

在对称角情况下， $E_1 = E_2$ ，则 $P_1 = P_2 = P$ 为出射 α 粒子的动量。

能量为 31.2 MeV 的 α 粒子，算出 $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 35^\circ 57'$ 为准自由散射角。由此，我们导出准自由散射过程必须是：

1. 要求反冲核的反冲能量 $E_R \approx 0$ ，则出射 α 粒子的相加能量 $E_1 + E_2 = E_0 + Q$ ；
2. 角关联分布的峰只出现在准自由散射角 $\theta = \theta_1 = \theta_2$ 即 α - α 自由散射角。

加强磁场后的 1.2 米回旋加速器的 α 粒子通过准直器到靶上， α 粒子能量为 31.2 MeV，束流强度 100~300 nA。两个厚约 500 μ 金-硅面垒探测器固定在散射室摇臂上，探测器能在同一反应平面内连续转动角度。C¹² 靶用厚度为 839.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 无衬底 CH 薄膜。物理实验电子学系统如图 1 和图 2 所示。

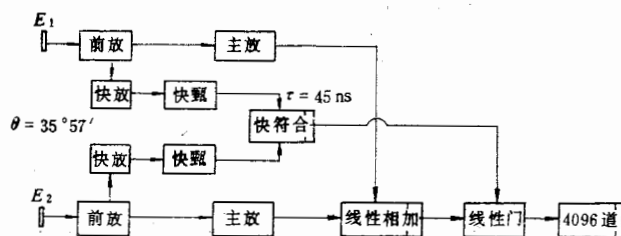


图 1 测量 31.2 MeV α 粒子 $^{12}\text{C}(\alpha, 2\alpha)^8\text{Be}$ 出射 α 粒子相加符合能谱的电子学方框图

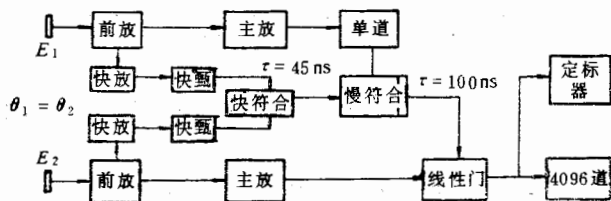


图 2 测量 31.2 MeV α 粒子 $^{12}\text{C}(\alpha, 2\alpha)^8\text{Be}$ 反应角关联的电子学方框图

探测器 E_1 通过选择一定能量范围的 α 粒子与探测器 E_2 作角关联符合测量。本实验取单道阈值分别相应于 6 MeV、10 MeV 和 14 MeV 能量值，道宽取相应于 4 MeV 能量值。

三、结果与讨论

图 3 是减去本底后的相加符合能谱。从图 3 能谱看出, 右边第一峰是

$$E_1 + E_2 = E_0 + Q (Q = -7.4\text{MeV}) = 23.8\text{MeV}$$

(即此角度确定是反冲核的反冲能 $E_R = 0$); 而另一个峰则是 $(\alpha, 2\alpha)$ 反应处于 Be^8 第一激发态, 由此, 我们初步看出 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8_{g.s.}$ 的一步过程即准自由散射过程的第一个证据。

图 4 给出了 $C^{12}(\alpha, 2\alpha) Be^8_{g.s.}$ 的角关联分布, 看出其峰位恰好在计算的 α - α 自由散射角 $\theta = \theta_1 = \theta_2 = 35^\circ 57'$ (即反冲核的动量趋于零的角度) 的附近, 这是 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 准自由散射过程的第二个重要证据。

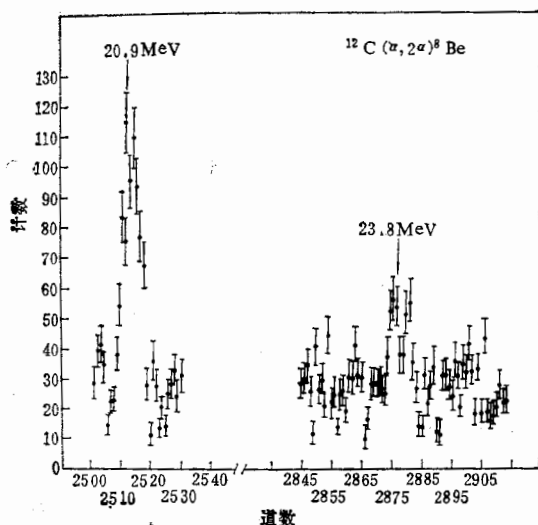


图 3 31.2 MeV α 粒子 $^{12}C(\alpha, 2\alpha)^8Be$ 反应出射 α 粒子的相加符合能谱(扣除本底)

$$E_0 = 31.2\text{MeV} \quad Q = -7.4\text{MeV}$$

$$E_{ex} = 2.9\text{MeV} \quad \theta_1 = \theta_2 = \theta = 35^\circ 57'$$

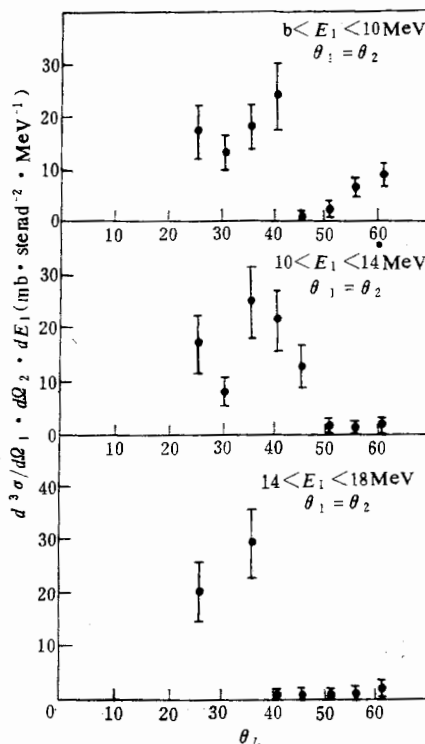


图 4 31.2 MeV α 粒子 $^{12}C(\alpha, 2\alpha)^8Be_{g.s.}$ 的角关联分布

在平面波冲量近似下, $(\alpha, 2\alpha)$ 准自由散射微分截面的理论计算公式为:

$$\frac{d^3\sigma}{dQ_1 \cdot dQ_2 \cdot dE_1} = K \cdot |\phi(q)|^2 \cdot \left(\frac{d\sigma}{dQ}\right)_{\alpha-\alpha} \quad (4)$$

其中, K ——运动学因子; $\phi(q)$ —— α 粒子在靶核基态中的动量分布函数;

$\left(\frac{d\sigma}{dQ}\right)_{\alpha-\alpha}$ ——入射 α 粒子与靶核中 α 集团之间的离壳散射截面, 一般用质心系 α - α 自由散射截面近似代替[查看图 7]。

文献[10]根据李清润等给出的 α 独立粒子相对运动波函数[待发表]:

$$\phi_{00}(r) = \frac{1}{\sqrt{8\pi}} (a^6\pi)^{-1/4} \left[(2 - \sqrt{6}) + \sqrt{\frac{8}{3}} \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] \exp\left(-\frac{r^2}{2a^2}\right) \quad (5)$$

导出了在平面波冲量近似下,准自由散射过程中,核的动量分布函数 $\phi(q)$ 的计算公式:

$$\phi(q) = 2^{-3/2} \pi^{-3/4} a^{3/2} \left[(2 + \sqrt{6}) - \frac{2}{3} \sqrt{6} (a,q)^2 \right] \exp\left[-\frac{1}{2} (a,q)^2\right] \quad (6)$$

我们采用(6)计算了 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 角关联曲线,结果见于图5和图6. 计算结果与实验比较,两者基本符合. 公式中只有一个可调参量 a ,称为相对运动谐振参量,其大小刻划了原子核的集团表面效应;公式中 q 为 α 集团在靶核中的动量.

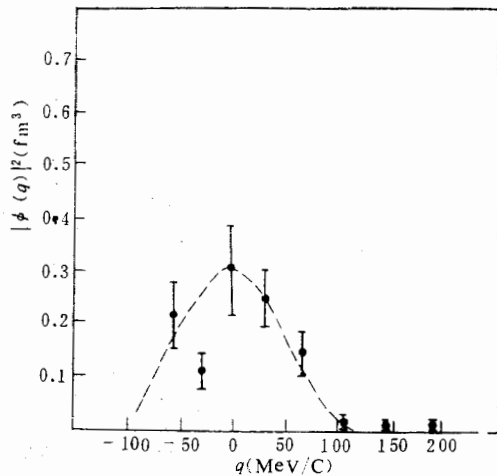


图5 31.2MeV α 粒子 $^{12}C(\alpha, 2\alpha)^8Be_{g,s}$ 的 α 集团动量分布

——采用 α 独立粒子模型 $a = 2.1\text{fm}$, PWIA 计算.
 \blacksquare 实验点

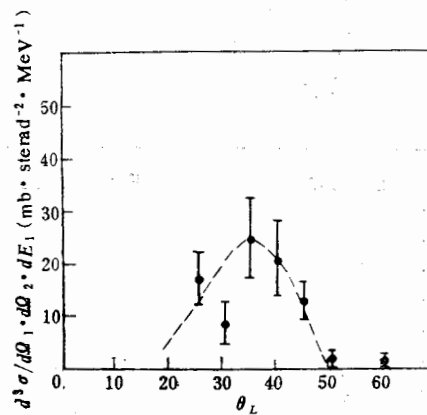


图6 31.2MeV α 粒子 $^{12}C(\alpha, 2\alpha)^8Be_{g,s}$ 角关联的理论计算与实验比较

——采用 α 独立粒子模型 $a = 2.1\text{fm}$, PWIA 计算.
 \blacksquare 实验点

我们的 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 反应实验结果与 T. Yanabu 等^[3,4]的 $Be^9(\alpha, 2\alpha)He^5$ 的情况完全相似,说明我们实验中的 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8_{g,s}$ 的反应机制是准自由散射过程. 其他可能的反应道,如 $C^{12}(\alpha, \alpha p)B^{11}$ 或 $C^{12}(\alpha, \alpha d)B^{10}$ 等,因为它们的反应 Q 值分别为 -15.9MeV 和 -25.2MeV 对本实验不会造成严重干扰.

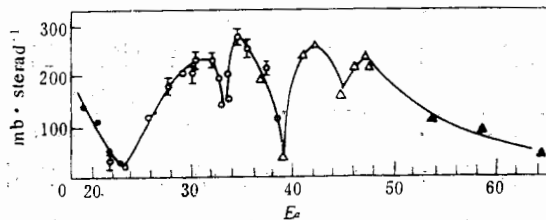


图7 α - α 自由散射在 $\theta_{CM} = 90^\circ$ 时的激发函数

● Nilson et al., ○ Bredin et al.,
 \triangle Conzett et al., \blacktriangle Darrulat et al.

至于我们的实验结果与 T. Yanabu 等^[3,4]的 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8$ 的结果不同,我们认为,从图 7 看出,在 28 MeV α 粒子入射时,虽然 α - α 自由散射截面不小,然而可能刚好受到高反应 Q 值的影响而没有明显地看到准自由散射;而在 37.4 MeV α 粒子入射时,虽然不受高反应 Q 值的影响,但却受到 α - α 自由散射截面接近于谷区的影响,抑制了准自由散射过程.在我们的实验中 31.2 MeV α 粒子入射时, α - α 自由散射截面恰好处于峰值,这与 A. A. Cowley 等的实验结果一致,另外又可能刚好脱离了高反应 Q 值的主要影响,所以在我们的实验中确实测到了反应的准自由散射过程,证实 α 集团是 C^{12} 基态的子结构.我们用平面波冲量近似计算和实验结果比较得到成团几率 P_α 为 0.07,这与 James 等^[12] 150 MeV 质子 $C^{12}(p, p\alpha)Be^8$ 反应研究测得的准自由散射结果, C^{12} 基态的 α 集团几率为 $0.02_{-0.01}^{+0.02}$ 基本接近.至于在 30° 处附近出现了偏离,正如[11]指出的可能是末态相互作用及[9]指出的离能壳的影响不可完全忽略所致.当然,我们为了更多说明问题,从实验上开展 35 MeV、42 MeV、48 MeV 的 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8_{g.s.}$ 研究以探索准自由散射与入射能量是否有关,也可能主要涉及离壳两体散射截面的能量关系,在理论上也需要进一步进行 DWIA 较为精确的计算,以便作出定量的比较,将对轻核的 α 集团结构的研究十分有益.

四、结 论

根据我们的实验结果,似乎可以作出如下初步结论:

(1) 31.2 MeV α 粒子 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8_{g.s.}$ 反应机制是准自由散射过程,或者说是一步敲出过程,证实 α 集团是 C^{12} 基态的子结构.在低能区我们的实验结果和 James 等人 150 MeV 质子 $C^{12}(p, p\alpha)Be^8$ 结果是基本接近的.

(2) 进一步开展 $C^{12}(\alpha, 2\alpha)Be^8_{g.s.}, E_\alpha = 35\text{MeV}, 42\text{MeV}, 48\text{MeV}$ 的实验研究,以探索准自由散射过程与入射粒子能量是否有关,可能主要是离能壳两体散射截面的能量关系,对进一步弄清 C^{12} 的 α 集团子结构的详细情况可提供更多的信息.进一步开展 DWIA 的理论研究以便作出较为定量的结论;

(3) 在适当的低能区,还是可以用 $(\alpha, 2\alpha)$ 准自由散射作为研究轻核的 α 集团结构的更为直接的手段.

参 考 文 献

- [1] V. G. Neudachin and Yu. F. Smirrov: *Atomic energy Rev.*, 3(1965), 157.
- [2] V. V. Balashov, A. N. Boyarkina and I. Rotter: *Nucl. Phys.*, 59 (1964), 417.
- [3] T. Yanabu, S. Yamashita, K. Takimoto and K. Ogino: *J. Phys. Soc. Japan*, 20 (1965), 1303.
- [4] T. Yanabu, S. Yamashita, K. Takimoto and K. Ogino: *J. Phys. Soc. Japan*, 24(1968), 667.
- [5] P. F. Dovovan, J. V. Kave, Č. Zupančič, C. P. Baker and J. F. Mollenauer, *Phys. Rev.*, 135 (1964), 1B-3B, B61.
- [6] V. K. Dolinov et al., *Nucl. Phys.*, A129 (1969), 577.
- [7] V. K. Dolinov et al., *Nucl. Phys.*, A129 (1969), 597.
- [8] A. A. Cowley and G. Heymann, Proc. 2nd. Int. Conf. on Clustering Phenomena in Nuclei "University of Maryland" (1975), P. 323.

- [9] V. V. Balashov et al., *Nucl. Phys.*, **107** (1968), 369.
[10] V. V. Balashov et al., *Nucl. Phys.*, **V-4(3)**, (1982), P. 276.
[11] Y. Kudo, *Progress of theoretical phys.*, **34(6)**, (1965), P. 942.
[12] A. N. James and H. G. Pugh, *Nucl. Phys.*, **42**(1963), P. 441.
[13] C. W. Wang et al., *Phys. Rev.*, **C21**, No. 5—6, (1980), P. 1705.

QUASI-FREE α - α SCATTERING IN ^{12}C AT 31.2MeV

XIE XIAN-LIANG KONG XIANG-JING

SUN CHONG-WEN WANG SHI-MING

(*Institute of Nucleus, Shanghai Academia Sinica*)

ABSTRACT

The summed energy spectra and the angular correlation for two alpha particles from the $^{12}\text{C}(\alpha, 2\alpha)^8\text{Be}$ reaction were measured.

The data show that the quasi-free scattering of incident alpha particle from the alpha cluster in ^{12}C is probably the main mechanism of the reaction on ^{12}C . The data are analyzed by means of PWIA. The probability of forming cluster is 0.07 which is close to the result obtained by James at high incident energy.