

$^{6,7}\text{Li}$ 核内集团的动量分布

韩文述 卢兆启 庄 斐 郑玉明

(中国科学院原子能研究所)

摘 要

本文用文献[1]给出的 $^{6,7}\text{Li}$ 核集团结构波函数,求得与阱心距离有关的核内集团动量分布,它与实验结果符合较好;并解释了动量分布的半高度全宽度,随入射粒子能量增高而加宽的现象。

一、引 言

三体准自由散射实验日益成为研究核集团结构的重要工具。用平面波冲量近似(PWIA)已能较好地解释准自由散射截面的主要特征,而计算截面中用到的一个重要量是核内集团的动量分布 $|\phi(k)|^2$ 。通常计算 $|\phi(k)|^2$ 用的集团结构波函数是Tang型波函数(在 r_0 以外,连接Hanke(函数))。由于所得 $|\phi(k)|^2$ 的半高度全宽度(FWHM)较实验大得多,又引入了截止半径参数 R_0 。但是在入射粒子能量 E_0 不太高的情况下, $R_0 > r_0$,即所求得的与实验相符合的 $|\phi(k)|^2$ 与集团结构波函数无关,而人们正是要用三体准自由散射实验来研究核的集团结构。此外,从通常计算 $|\phi(k)|^2$ 中,对实验上所发现的FWHM随 E_0 增高而加宽以及所谓“成团几率”随 E_0 增高而增大的现象,得不到很好的解释。

卢慧筠、孙汉城^[2]曾指出:FWHM随 E_0 增高而加宽的现象是反映了核表面状态。根据测不准关系,核内不同区域的动量分布不同。核表面区域 Δr 大,则 Δp 小,即动量分布窄。但如何从定量上解释这种现象,并进一步阐明其物理实质是十分必要的。

本文用文献[1]所得 $^{6,7}\text{Li}$ 核集团结构波函数,在不用截止半径参数条件下,求得与阱心距离有关的 $|\phi(k)|^2$ 。它不仅较好地与实验相符合,而且对FWHM随 E_0 增高而加宽的现象也能给予解释。

二、 $^{6,7}\text{Li}$ 核内集团的动量分布

用双生成坐标方法,得到与实验符合较好的等效集团相对运动波函数为^[3]

$$\psi_l(r) = \sum_{i=1}^{N_0} f_{l,i} \frac{1}{r} \Gamma_l(r, \lambda_i, s_i) P_{\nu_0, \nu_i} \quad (1)$$

其中

$$\Gamma_l(r, \lambda_i, s_i) = \left(\frac{2\lambda_i}{\pi}\right)^{3/4} 4\pi r i_l(2\lambda_i s_i r) e^{-\lambda_i(r^2+s_i^2)}, \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{N_1 N_2}{2N} \nu_i, \quad (3)$$

$$P_{\nu_0, \nu_i} = \left(\frac{2\sqrt{\nu_i \nu_0}}{\nu_i + \nu_0}\right)^{\frac{3}{2}(N-1)}, \quad (4)$$

$$N = N_1 + N_2. \quad (5)$$

式中 $f_{l,i}$ 是双生成坐标基底 ψ^{GC} 的振幅, 它是通过求解 Hill-Wheeler 方程确定的; $i_l(x)$ 是虚宗量球贝塞尔函数; N_1 和 N_2 分别是核内两团的核子数目 ([1] 中已限定 $N_1 = 4$); s_i 是阱心距离; ν_i 是不同位阱的谐振子参数; i 表示所选的不同基 (ν_i, s_i) , 其排列顺序为 s 由大到小. 核内集团的动量分布为

$$\phi_l(\mathbf{k}) = (2\pi)^{-3/2} \int e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \phi_l(r) Y_{lm}(\hat{r}) d\mathbf{r}. \quad (6)$$

将 (1) 式代入 (6), 并对 m 求统计平均后得

$$|\phi_l(\mathbf{k})|_n^2 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\sum_{i=1}^n f_{l,i} P_{\nu_0, \nu_i} \lambda_i^{-3/4} e^{-k^2/\lambda_i} j_l(k s_i) \right)^2. \quad (7)$$

式中 $j_l(x)$ 是 l 阶球贝塞尔函数; $l = 0$ 或 1 , 对 ${}^6\text{Li}$ 或 ${}^7\text{Li}$; n 最大取值为 N_0 (全部基底数). n 与入射粒子能量 E_0 (相应德布洛意波长 λ_D) 有关. 如果近似地把 s_i 看作是两团质心距离, 对给定的 E_0 , 则仅能探测到 $s_i > \lambda_D$ 的集团结构. 注意到给定一组 (ν_i, s_i) 的生成坐标组态 ψ^{GC} 的物理意义是描述两团分别处于谐振子参数为 ν_i 的位阱, 阱心距离为 s_i 的状态. 于是在一定 E_0 的条件下, 只能探测到 n 个组态. 随 E_0 增高, 最终可探测到全部组态 N_0 . 由 (7) 式可见随 s_i 减少, $|\phi(\mathbf{k})|_n^2$ 的 FWHM 增加, 则解释了入射能量 E_0 增高 FWHM 加宽的现象.

三、与实验比较及讨论

对 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 核, 分别取 $\nu_0 = 0.44$ 和 0.47 ; $l = 0$ 和 1 ; (ν_i, s_i) 为 $(0.3, 12)$ 、 $(0.3, 11)$ 、 $(0.48, 7)$ 、 $(0.48, 6)$ 、 $(0.55, 3.3)$ 、 $(0.48, 3.3)$ 、 $(0.55, 2.5)$ 、 $(0.48, 2.5)$ 和 $(0.35, 11)$ 、 $(0.35, 9)$ 、 $(0.5, 7)$ 、 $(0.5, 5.5)$ 、 $(0.55, 3.5)$ 、 $(0.5, 3.5)$ 、 $(0.55, 2.8)$ 、 $(0.5, 2.8)$, 并用文 [1] 给出的 $f_{l,i}$ 各选三种入射能量 E_0 的计算结果与实验值比较, 见图 1 和图 2. 计算值与实验值较好地符合. 计算中所取的 n 值, 它相应 s_i 的下限及求得的 FWHM 和 λ_D 值均在图的说明中标出. 相应 s_i 的下限大约为 λ_D 的 2 倍. 应指出, 由于 ϕ_l 是束缚态等效相对运动的波函数, ν_0 不再是相应于两团自由状态的谐振子参数, 而应是 ν_i 的平均, 但在实际计算中, ν_0 值改变对计算结果影响不大. 另外, 在求解 Hill-Wheeler 方程的 $\phi_l(r)$ 中, s_i 应是连续的. 由于 [1] 文中 s_i 近似取成间断值, 故 FWHM 随 n 变化是间断的. 对于那些 FWHM 落于用 s_i 和 s_{i+1} 计算的 FWHM 之间的实验可用内插法解决.

最后我们来讨论所谓成团几“率” (它相当于实验值与计算值的归一因子) 问题. R.

实验值:

- 取自 ${}^6\text{Li}(d, 2d)^{[31]}$;
- ⊙——取自 ${}^6\text{Li}(p, p\alpha)^{[41]}$;
- 取自 ${}^6\text{Li}(p, pd)^{[51]}$;
- $E_d = 9\text{MeV}(\lambda_D = 9\text{fm})$;
- $E_p = 56.5\text{MeV}(\lambda_D = 4.5\text{fm})$;
- $E_p = 590\text{MeV}(\lambda_D = 1.4\text{fm})$

计算曲线:

- 1—— $n=1$ (求和到 $s_i=12\text{fm}$);
- 2—— $n=3$ (求和到 $s_i=7\text{fm}$);
- 3—— $n=7$ (求和到 $s_i=2.5\text{fm}$);
- FWHM = $45\text{MeV}/c$;
- FWHM = $68\text{MeV}/c$;
- FWHM = $118\text{MeV}/c$

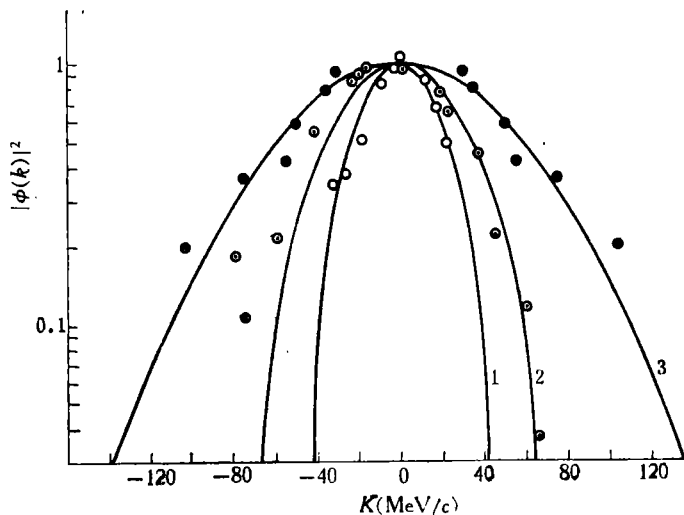


图 1 ${}^6\text{Li}$ 核中 $d + \alpha$ 动量分布

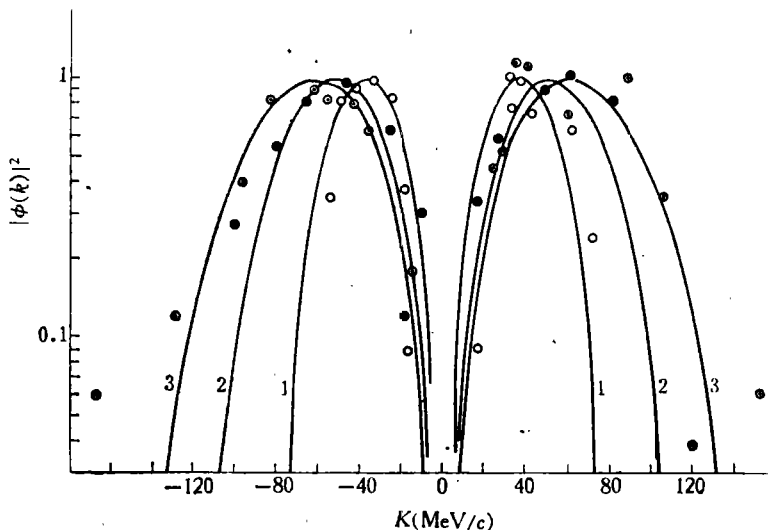


图 2 ${}^7\text{Li}$ 核中 $t + \alpha$ 动量分布

- 实验值: ○——取自 ${}^7\text{Li}(\alpha, 2\alpha)^{[61]}$, $E_\alpha = 18\text{MeV}$ ($\lambda_D = 5.3\text{fm}$);
- 取自 ${}^7\text{Li}(\alpha, 2\alpha)^{[71]}$, $E_\alpha = 56\text{MeV}$ ($\lambda_D = 3\text{fm}$);
- ⊙——取自 ${}^7\text{Li}(p, pt)^{[81]}$, $E_p = 156\text{MeV}$ ($\lambda_D = 2.6\text{fm}$).
- 计算曲线: 1—— $n=1$ (求和到 $s_i=11\text{fm}$), FWHM = $72\text{MeV}/c$;
- 2—— $n=3$ (求和到 $s_i=7\text{fm}$), FWHM = $96\text{MeV}/c$;
- 3—— $n=4$ (求和到 $s_i=5.5\text{fm}$), FWHM = $120\text{MeV}/c$

Hagelberg^[9] 等人曾搜集了 ${}^6\text{Li}$ 核的, 由各种反应和不同能量 E_0 求得 ${}^6\text{Li}$ 核中 $d + \alpha$ 的成团几率 Γ_D , 基本上随 E_0 增高而增大. 其范围由 $\Gamma_D = 0.035$ ($E_\alpha = 23.6\text{MeV}$) 到 0.8 ($E_p = 590\text{MeV}$). 人们认为, 核中某种形式的成团几率是客观存在, 这样大的变化是不合理的, 故近年来很少有人再提到它. 我们认为由于核中各种集团形式波函数彼此不正交, 确切定义成团几率是有困难的, 但如果可以抽出随 E_0 变化的因子, 得到一个确定数 Γ_d , 则 Γ_d 仍不失为对成团几率的一个度量.

在(7)式中,由于 n 不同,所得峰高自然不同,可将不同 n 的峰高对 N_0 的峰高比定义为成团探测率 Γ_E ,

$$\Gamma_E = |\phi_l(k_m)|_n^2 / |\phi_l(k_m)|_{N_0}^2 \quad (8)$$

而实际存在核中的某种集团结构的成团几率 Γ_d 为

$$\Gamma_d = \Gamma_D / \Gamma_E \quad (9)$$

表1. ${}^6,7\text{Li}$ 中成团探测率 Γ_E

| n | 2 | 3 | 4 | 6 | -8 |
|--------------------------|-------|------|------|------|----|
| $\Gamma_E-{}^6\text{Li}$ | 0.002 | 0.01 | 0.22 | 0.82 | 1 |
| $\Gamma_E-{}^7\text{Li}$ | 0.008 | 0.06 | 0.28 | 0.70 | 1 |

式中 Γ_D 是实验值对理论值的归一因子,而 Γ_E 是可以(7)式计算的,其结果见表1.这里仍存在如上述的由于 s_i 取间断值而使 Γ_E 值变化不连续的问题.由表1可见 Γ_E 是随 E_0 增高而变大的,趋势与R. Hagelberg等人^[9]分析一致.由于各个作者在求 Γ_D 时,所用方法不同,必须用统一波函数,统一方法重新计算 Γ_D ,再用(9)式求得 Γ_d .

作者们感谢金星南、孙汉城、姚锦章、文克玲、张培华等同志对本工作提出的有益意见.

参 考 文 献

- [1] 卢兆启等, 原子核物理.
- [2] 卢慧筠、孙汉城, 原子能科学技术, No. 2(1976), 124.
- [3] 孙汉城, 原子核物理, 1(1979), 1.
- [4] M. Jain et al., *Nucl. Phys.*, A153(1970), 49.
- [5] J. C. Alder et al., *Phys. Rev.*, C6(1972), 18.
- [6] 孙祖训等, 原子能研究所年报, (1978), p. 22.
- [7] J. R. Pizzi et al., *Phys. Lett.*, 28(1968), 32.
- [8] Y. Sakamoto et al., *Phys. Rev.*, C11(1975), 668.
- [9] R. Hagelberg et al., *Nucl. Phys.*, A207(1973), 366.

THE MOMENTUM DISTRIBUTION OF THE NUCLEAR CLUSTER FOR ${}^6,7\text{Li}$ NUCLEI

HAN WEN-SHU LU ZHAO-QI ZHUANG FEI ZHENG YU-MING

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, the momentum distribution of the nuclear cluster, which depended on the distance between the centres of wells, is derived by using ${}^6,7\text{Li}$ nuclear cluster structure wave functions taken from the previous paper⁽¹⁾. It is in a good agreement with experimental result, and the enhancements of FWHM of the momentum distribution with increase of incident energy are explained.