

研究简报

关于双核之间相互作用核位的研究

王正大

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文按照双核分子的物理图象,考虑了双核之间粒子空穴相互作用,研究了双核之间价核子相互交换以及相互作用核势。

一、引 言

由于两核子之间的核力不完全清楚,多体问题尚未解决,因此需要寻找一条现实的途径去研究两个复杂核之间的相互作用核势。在重离子反应机制的研究中,双核之间相互作用核位的研究十分重要。现有的折迭势,由于没有考虑原子核的内部结构对于双核之间相互作用核势的影响,并且违反核力的饱和性质,因此是不够的。而现在比较流行的亲近势是基于液滴模型提出的,也没有考虑原子核内部激发对于相互作用核势的影响,但是亲近势满足核力的饱和性质,比折迭势合理些。本文基于双核分子物理图象,把组成双核分子系统的核子区分为固定核子和价核子两类。类似双原子分子的价电子一样,价核子被定义为双核之间可以相互交换的核子,双核之间相互作用核势与价核子在双核系统中的结合能成比例。由此我们可以看到亲近势提出的基本概念不同于折迭势,而基于双核分子图象提出的相互作用核势,又不同于亲近势和折迭势,这反映出双核之间相互作用核势理论公式尚未定形,需要深入探索^[1-3]。

二、双核分子物理图象

按照折迭势和亲近势给出的双核之间相互作用核力公式,在两个 α 粒子接触的条件下,核力将大大高于两个 α 的相互排斥库仑力。然而 Be^8 的自发裂变告诉我们,两个 α 之间相互作用核位是很低的,比上述唯象核位估算结果要低一个数量级。 Be^8 的自发裂变可以归因于双 α 粒子之间不存在价核子,而 Be^9 是天然稳定核,可以解释为在双 α 粒子之间存在一个价中子。双核之间相互作用核位与价核子在双核分子系统中的结合能成比例。同样原子核自发裂变和低能轻离子引起的诱发裂变质量分布表明,非对称裂变几率大大高于对称裂变几率,壳层效应使得峰谷比高达两个数量级左右。这说明两个幻数核之间的相

相互作用核力大大低于两个非幻数之间的相互作用核力,也反映出两个复杂核之间相互作用核势与价核子数目和状态有关。另外满壳层核对于慢中子的吸收截面大大低于非满壳层核,相差高达一到二个数量级,这说明满壳层核与中子的核相互作用大大低于非满壳层核。轻离子引起的诱发裂变的质量分布表明,峰谷比随入射能量增加急剧变化。这反映出双核之间相互作用核位与双核内部激发有关。由于温度激发,双核中的固定核子可以跳到费米面上,转化为价核子,从而增加了双核之间的相互作用核势。

三、双核之间价核子相互交换

按照壳层模型单粒子平均势场从单心到双心的自然演化过程,随双核之间距离 r 的增加,单粒子平均场将由单位阱转化为双位阱 W 形位势图,双核之间的位垒高度 $\varepsilon_h(r)$ 随双核之间距离 r 的平方增加(图 1)

$$\varepsilon_h(r) = \frac{1}{8} m \omega^2(r) r^2. \quad (1)$$

按照双核分子的物理图象,如果不存在残余相互作用 Δ_r 和温度激发 KT ,核子自下而上填充双心壳层模型单粒子能级,表现为矩形分布,可以把处在位垒高度以上的核子看作价核子,而把处在位垒高度以下的核子看作固定核子。但是在存在残余相互作用 Δ_r 和温度激发 KT 的条件下,核子填充单粒子能级的费米分布 $f(\varepsilon)$ 偏离矩形分布

$$f(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{\Delta_T}\right) \right]^{-1}. \quad (2)$$

$$\Delta_T = [\Delta_r^2 + (KT)^2]^{\frac{1}{2}}$$

这时不但有一部分核子由位垒高度以下跳到位垒高度以上,而且由于量子隧道效应,由于费米面下存在空穴 $[1 - f(\varepsilon)]$,因此也可以相互穿透,彼此交换核子。这样,把处在位垒高度以上的核子作为价核子的作法就不够了,我们可以把核子碰撞一次位垒的平均时间作为原子核相互作用时间单位 t_0 ,并定义单位时间 t_0 内双核之间相互交换的核子数 $N_c(\Delta_T, r)$ 为等效价核子数目。双核之间核子穿透位垒的几率 $P(\varepsilon)$,根据量子力学 W·K·B 近似可以表示为^[2]

$$P(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_h(r) - \varepsilon}{\hbar \omega(r)}\right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

如果不存在残余相互作用和温度激发,核子填充双心壳层模型单粒子能级按矩形分布,则由于泡利不相容原理产生的阻塞效应,即使存在量子隧道效应,费米面下仍旧不可能有核子相互交换。由于残余相互作用和温度激发,使费米分布 $f(\varepsilon)$ 偏离矩形分布,这就使得费米面下空穴数 $[1 - f(\varepsilon)]$ 不为零,从而削弱了泡利不相容原理的阻塞作用,于是在核子碰撞一次位垒的平均时间间隔内,双核之间相互交换的核子数,也就是等效价核子数 $N_c(\Delta_T, r)$ 可以写成(图 2)

$$N_c(\Delta_T, r) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_c(\varepsilon) \cdot P(\varepsilon) \cdot f(\varepsilon) \cdot [1 - f(\varepsilon)] d\varepsilon, \quad (4)$$

$$g_c(\varepsilon) = a e^{b\varepsilon},$$

这!

的
被
 ε_h (
核
态
由
核
于这
为
以
间

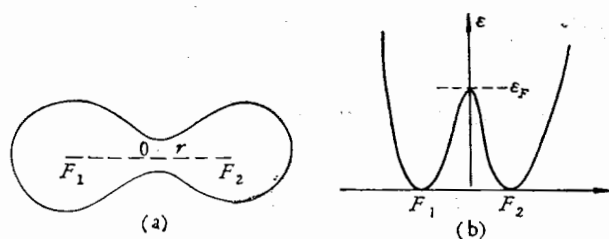


图 1

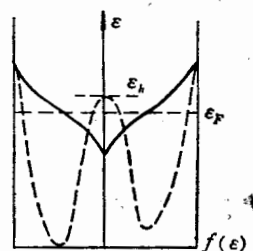


图 2

这里 $g_c(\epsilon)$ 是双心壳层模型单粒子能级密度^[4-5].

四、双核之间相互作用核位

原子核壳层模型单粒子平均势场,从单心到双心的自然演化过程,取决于原子核裂变的变形过程.反之,重离子碰撞发生全熔合与裂变过程相反,原子核壳层模型平均势场被迫由双心向单心发展.双核分子系统处在断点或者相互接触点,双核之间位垒的顶点 $\epsilon_k(r)$ 与双核分子系统核表面对应的封闭费米等位面 ϵ_F 是重合的,价核子数的多少与双核之间颈项的大小存在一定关系.双核之间相互作用核势与双核系统固定核子数目和状态无关,而仅与价核子的数目和状态有关,与价核子在双核分子系统中的结合能成比例.

由于价核子在双核分子系统中分布到单个核上的几率仅仅是 $\frac{1}{2}$,因此从单个核上剥离价核子所需的能量也仅仅是价核子在双核分子系统中结合能的一半,所以比例常数是 $\frac{1}{2}$.

于是双核之间相互作用核势可以表示如下

$$U_N(\Delta_T, r) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\epsilon + \epsilon_B) \cdot g_c(\epsilon) \cdot P(\epsilon) \cdot f(\epsilon) \cdot [1 - f(\epsilon)] d\epsilon, \quad (5)$$

这里 ϵ_B 是处在费米面 ϵ_F 上的核子结合能,处在费米等位面 ϵ_F 上单粒子能级能量被定义为零.由于 $f(\epsilon)$ 和 $[1 - f(\epsilon)]$ 分别表示粒子和空穴数,因此双核之间相互作用核势可以理解为粒子和空穴之间的相互作用.双核分子系统等效价核子数 $N_c(\Delta_T, r)$ 和双核之间相互作用核势 $U_N(\Delta_T, r)$ 的解析表达式可以表示如下

$$N_c(\Delta_T, r) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_c(\epsilon) \cdot P(\epsilon) \cdot f(\epsilon) \cdot [1 - f(\epsilon)] d\epsilon$$

$$\begin{aligned}
 &= \Delta_T \cdot g_c(\varepsilon_F) \cdot \left[1 + \frac{\pi^2}{6} \Delta_T^2 b^2 \left(1 + \frac{1}{b \cdot \hbar\omega} \right) \right] \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_h - \varepsilon_F}{\hbar\omega}\right) \right]^{-1}, \\
 U_N(\Delta_T, r) &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\varepsilon + \varepsilon_B) \cdot g_c(\varepsilon) \cdot P(\varepsilon) \cdot f(\varepsilon) \cdot [1 - f(\varepsilon)] d\varepsilon \\
 &= \frac{1}{2} \Delta_T g_c(\varepsilon_F) \left\{ \varepsilon_B + \frac{\pi^2}{3} \Delta_T^2 \left[\left(b + \frac{1}{2\hbar\omega} \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{b}{2} \left(\frac{1}{\hbar\omega} + b \right) \varepsilon_B \right] \right\} \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_h - \varepsilon_F}{\hbar\omega}\right) \right]^{-1} \\
 &\approx \frac{1}{2} \varepsilon_B N_c(\Delta_T, r),
 \end{aligned}$$

$$\varepsilon_h = \frac{1}{8} m\omega(r)^2 r^2 (\text{MeV}), \quad (6)$$

$$\varepsilon_F = \frac{1}{2} m\omega(r)^2 a_F^2 (\text{MeV}),$$

$$a = 0.087 A_c (\text{MeV})^{-1},$$

$$b = 0.087 (\text{MeV})^{-1},$$

$$\varepsilon_B \approx -8 (\text{MeV}),$$

$$\hbar\omega(r) \approx 41 A_c^{-\frac{1}{3}} (\text{MeV}),$$

$$\Delta_T = [\Delta_c^2 + (KT)^2]^{\frac{1}{2}} (\text{MeV}).$$

在上述参数中, m 是单核子的质量, $\omega(r)$ 由于双核分子系统体积守恒的限制随双心之间距离 r 有微小变化, A_c 是双核系统总的质量数, Δ_c 和 KT 分别是残余相互作用能隙和核温度, Δ_T 是核子填充双心壳模型单粒子能级费米分布总的分布宽度。从相互作用核势的解析表达式可以看出, 双核之间相互作用核势与费米面上核子结合能 ε_B , 费米面上平均单粒子能级密度, 残余相互作用和温度激发导致的核子费米分布宽度, 双心壳模型平均势场参数 $\hbar\omega$ 以及双核之间的距离 r 有关。双核之间相互作用核势随双心之间距离的变化自然显示为伍兹-萨克型, 起源于双核之间价核子交换的量子隧道效应, 等效价核子数随双心之间距离增加急剧减少, 从而使得双核之间相互作用核势急剧削弱。

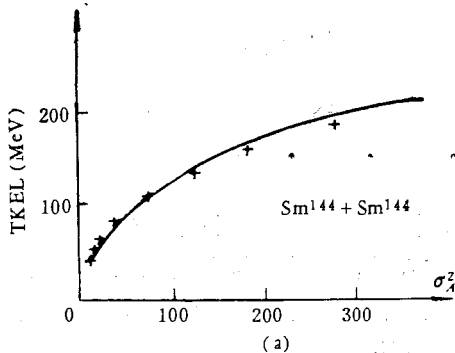


图 3(a) + 实验值
— 计算值

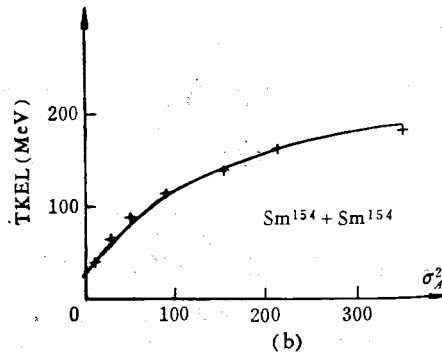


图 3(b) + 实验值
— 计算值

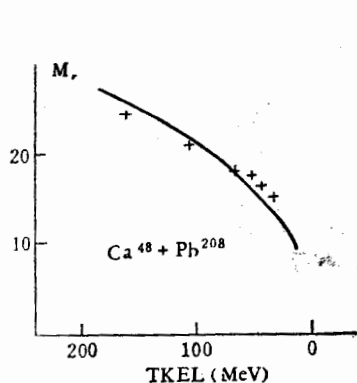


图 4 + 实验值
- 计算值

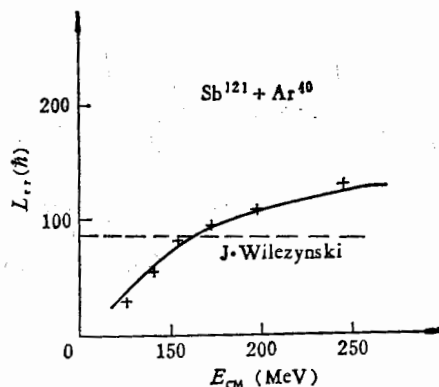


图 5 + 实验值
- 计算值

6)

上述推导的双核之间相互交换的等效价核子数目 $N_c(\Delta_T, r)$ 和相互作用核势 $U_N(\Delta_T, r)$, 通过计算重离子引起的深部非弹性散射质量分布宽度 σ_A^2 、角动量转移 r 多重性 M_r 和熔合裂变入射道临界角动量 L_{cr} , 并与实验数据比较, 初步作了检验, 结果说明双核分子的物理图象对于重离子碰撞系统的研究是适用的。(图 3)、(图 4) 和 (图 5)^[7,8,10]。

参 考 文 献

- [1] 杨澄中, 冉启惠, 吴国华, 王正大, 《低能核物理资料汇编》 p. 138, 原子能出版社, 1974 年 3 月。
- [2] Gross, D. H. E., Hartmann, K. M., Phys. Rev., C24(1981), 2526.
- [3] 王正大, 徐树威, 缪容之, 高能物理与核物理, 4(1980), 788.
- [4] Pashkevich, V. V., Nucl. Phys., A169(1971), 275.
- [5] D. Scharnweber, U. Mosel and W. Greiner, Phys. Rev. Letter, 24(1970), 601.
- [6] J. R. Huizenge et al., Nucl. Phys., A387(1982), 257.
- [7] 邬恩九, 高能物理与核物理, 7(1983), 379.
- [8] R. Bock, Y. T. Chu, M. Dakowski, A. Gobbi, E. Grosse, A. Olmi, H. Sann and D. Schwalm, Nucl. Phys., A388(1982), 334.
- [9] 王正大, 高能物理与核物理, 4(1980), 661.
- [10] 王正大, 第六次全国核物理会议论文集, p. 135—137, (1984, 11, 武汉).

A STUDY OF THE NUCLEAR POTENTIAL BETWEEN TWO NUCLEI

WANG ZHENG-DA

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

According to the physical picture of dinucleus molecule and considering the particle-hole interaction between two nuclei, the exchange of valence nucleons and nuclear potential between two nuclei were studied.