

原子核衰变的集团模型和统一模型

李冕丰

(中山大学物理系 广州 510275)

摘 要 本文介绍自1984年发现 ^{223}Ra 发射 ^{14}C 衰变现象以来,用于统一描述 α 衰变、集团衰变和自发裂变的两类原子核衰变模型——集团模型和统一模型的发展概况,并指出它们存在的问题。

关键词 α 衰变, 集团衰变, 自发裂变, 集团模型, 统一模型。

1 引 言

在核物理的研究中,核衰变研究的历史最长。在1896年Becquerel发现天然放射性以后的三、四十年中,核衰变的研究一直是核物理的主要内容。发现了包括 γ 、 β 、 α 、P和自发裂变等十多种原子核衰变的模式,获得了许多关于原子核结构和核运动规律的知识。如果把原子核所有两体衰变都写成

$${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AX_1 + {}_Z^AX_2$$

其中, ${}_Z^AX$ 为母核, ${}_Z^AX_1$ 为子核, ${}_Z^AX_2$ 为出射粒子。把1983年底发现的核衰变中出射粒子的质量数 A_2 排一下队,则可以发现,只有 $A_2 \leq 4$ 和 $A_2 > 60$ 的两个区内的衰变,而从未发现有 A_2 处于 $4 < A_2 < 60$ 区间内的衰变。1980~1984年,Sandulescu和Poenaru等人^[1]利用超非对称的裂变模型预言了Ra、Th、U等16种重核发射8种偶偶核重离子的可能性,它们是 ^{14}C 、 ^{24}Mg 、 ^{28}Ne 、 ^{32}Si 、 ^{46}Ar 、 ^{48}Ca 和 ^{50}Ca 。1984年,英国牛津大学的Rose和Jones^[2]观测到 ^{223}Ra 发射 α 的同时,也发射 ^{14}C 。消息一传开,法、美、前苏联和西欧中心等十多个实验室立即行动,除证实Rose和Jones的新发现外,并展开寻找其他衰变模式的工作^[3],相继发现了发射 ^{23}F 、 ^{24}Ne 、 ^{28}Ne 、 ^{28}Mg 、 ^{30}Mg 、 ^{32}Si 和 ^{34}Si 等衰变模式,实验研究和理论研究十分活跃。

重核发射重离子的衰变(也称集团衰变)的发现,不仅填补了原子核二体衰变中质量谱 A_2 从4到60之间的空白,说明原子核运动变化形式的多样性,再一次体现自然界物质运动

的统一性;而且,集团衰变的发现还开拓了核物理实验研究和理论研究的新领域,加强我们对原子核结构和原子核运动变化规律的认识。可以预言,这些研究必会促进我们对原子核性质和运动变化规律的应用。

在集团衰变现象发现以前, α 衰变是用位阱穿透来解释,认为在母核中预先形成 α 粒子,由于 α 粒子的运动,不断撞击位垒壁,因而有一定的几率穿透位垒成为出射粒子。而原子核的自发裂变则以液滴模型为基础,用原子核的形变及内部激发导致原子核破裂来解释自发裂变。两者都含有位垒穿透因子。集团衰变发现以后,普遍认为, α 衰变、集团衰变和自发裂变都是核衰变,可以统一描述。把上述两种模型推广, α 衰变模型发展成集团模型、自发裂变模型发展成统一模型,来统一描述 α 衰变集团衰变和自发裂变。下面介绍这两类模型的发展概况及存在的问题。

2 集团模型

集团模型是在 α 衰变模型基础上发展起来的。集团模型认为,核子在母核内预先形成集团,形成集团的几率随着集团的增大而减少,形成了的集团保持不变的形状和大小穿透位垒。 α 衰变就是集团衰变的最简单例子。

α 衰变是量子力学处理的第一个问题。Gamow、Condon和Guerney利用量子力学位垒穿透给出 α 衰变的衰变常数为

$$\lambda = fe^{-K}$$

$$K = \frac{2}{\hbar} \int_{R_0}^{R_b} \sqrt{2\mu[V(r) - Q]} dr$$

其中, f 为 α 粒子碰撞位垒的频率, K 为位垒穿透因子, $\mu = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}$ 为折合质量, $V(r)$ 为位垒, 其表示形式为

$$V(r) = \begin{cases} -V_N & r < R \\ \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} & r > R \end{cases}$$

Q 为子核处于基态时的 α 衰变能、位垒的内穿透点为 $R_0 = R = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$, 外穿透点 R_b 满足 $V(R_b) = Q$.

Gamow 公式成功地解释了 α 衰变的一些规律, 特别是对偶偶核基态之间的 α 衰变, 定量符合也相当好, 但是, 对于其它的情况, 定量符合就差了. 如果我们引入禁戒因子

$$F = \frac{T_{ex}}{T_{th}} = \frac{\lambda_{th}}{\lambda_{ex}}$$

对于奇 A 核, F 在 $10^2 \sim 10^3$ 之间, 对奇-奇核, F 的值更大, 个别核的 F 可达 10^{14} .

针对理论值与观测值的分歧, 曾对模型作了多种修正:

1) 考虑 α 集团在母核内的形成几率, 改 λ 为

$$\lambda = S f e^{-K}$$

其中 S 为 α 集团在母核中的形成几率, S 的值不同, α 衰变就可能出现不同程度的禁戒.

2) 考虑角动量的影响. 当出射的 α 粒子轨道角动量 $L \neq 0$ 时, 位垒中应增加由于 L 引起的离心位垒 $\frac{L(L+1)\hbar^2}{2\mu r^2}$.

3) 位垒穿透几率的修正. 为了产生与每种 α 衰变能 Q 相应的准束缚态, 可有多种方法对位垒进行修正, 如有改变位垒深度的、宽度的, 也有改变位垒形状的^[4~5].

Buck 等人^[6]用深度 V_N 固定的方位阱加上一个球面电荷产生的库仑位

$$V(r) = \begin{cases} -V_N + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} & r < R \\ \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} & r > R \end{cases}$$

及用 Bohr - Sommerfeld 量子化条件来规定相应于衰变能为 Q 的准束缚态:

$$\int_0^R dr \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} [Q + V_N - \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} - \frac{L(L+1)\hbar^2}{2\mu r^2}]} = (n + 1/2)\pi = (G - L + 1) \frac{\pi}{2}$$

其中, n 为预形成的 α 集团径向波函数的节点数, L 为轨道角动量, 而 $G = 2n + L$ 为总量子数. 从量子化条件解出 R 就确定了位垒的内穿透点. Buck 模型中只用三个参数为

$$S = 1, V_N = 135.6 \text{ MeV 和}$$

$$G = \begin{cases} 22 & \text{对 } N < 126 \\ 24 & \text{对 } N > 126 \end{cases}$$

就能得到与实验符合得相当好的结果, 例如, 对 154 种偶-偶核基态之间 α 衰变的半衰期, 有 125 个与实验值之差在 2 倍之内, 有 22 个在 3 倍之内; 对 255 个奇 A 核 α 衰变的半衰期, 有 216 个在 3 倍之内.

集团衰变发现以后, 把 α 衰变模型推广到包括 α 衰变、集团衰变和自发裂变. 鉴于在许多重核中集团衰变相对于 α 衰变的分支比很小, 因此许多人致力于集团形成几率的计算. 例如, Malik 和 Gupta^[7] 把集团在母核中的形成几率定义为在 R 处找到碎片 A_1 和 A_2 (分别带有固定的 Z_1 和 Z_2) 的量子力学几率, 通过解薛定格方程而得到

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\sqrt{B_m}} \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{1}{\sqrt{B_m}} \frac{\partial}{\partial \eta} + V(\eta, \eta_z R) \right] \Psi_{k_0 l}^{(\omega)}(\eta) = E_k^{(\omega)} \Psi_{k_0 l}^{(\omega)}(\eta)$$

其中, $\eta = \frac{A_1 - A_2}{A}$, $\eta_z = \frac{Z_1 - Z_2}{Z}$ 分别为质量和电荷的不对称坐标.

Ivascu 和 Sillisteanu 应用谐振子壳模型和光学模型描述集团的形成并且数值解给出与集团形成振幅有关的积分. Blendowske^[8] 等利用多体波函数计算在母核内集团中核子态的重叠, 计算了偶-偶核中直到 ^{16}O 的集团形成几率. 由于对大的集团计算困难, 特别是对形变的奇 A 核, 因而他们转而研究半经验公式, Blendowske 等拟合他们的计算结果和实验数

据后给出的半经验公式为: $S = (S_a)^{(A_2-1)/3}$
而

$$\begin{cases} S_a = 6.3 \times 10^{-3} & \text{对偶 } A \text{ 核} \\ S_a = 3.2 \times 10^{-3} & \text{对奇 } A \text{ 核} \end{cases}$$

这个半经验公式可用于描述所有类型的核衰变,但只依赖于一个参数.从 α 衰变到 Si 衰变,这个预形成因子从 10^{-2} 到 10^{-23} ,变化了 23 个数量级.应用 Blendowske 等的模型计算 $A_2=4$ 到 $A_2=34$ 的核衰变,给出的半衰期的数值是从 10^{11}s 到 10^{28}s ,相对于 α 衰变的分支比从 10^{-9} 到 10^{-16} .对 ^{236}Pu 和 ^{238}Pu 的几种衰变模式给出的半衰期的预言值与随后被实验确认的观测值之间仅差 4 倍.

在集团模型中需要指出的是轻集团的作用. Ronen^[9] 在分析了许多核现象中存在 $(2Z-N)$ 的联系后指出,核中可能存在 ^2H 集团和 ^3H (或 ^3He) 集团.如果核是由 ^2H 和 ^3H (或 ^3He) 集团组成的,则在没有剩余单核子的情况下,核内 ^2H 集团的数目正好就是 $N_d = (2Z - N)$,而 ^3He 集团的数目就是 $N_t = (N - Z)$.在一个给出的元素中,集团总数就是 Z ,因而同一元素的所有同位素含有相同数目的轻集团数,但 ^2H 和 ^3H 的数目却不相同.核性质的 $(2Z - N)$ 关联可解释为核性质与核内 ^2H 数目的关联.如果这时计算核中每一轻集团的平均结合能

$$E = \frac{N_d \cdot m_d + N_t \cdot m_t - M}{N_d + N_t}$$

则可发现, C、Ne、Mg、Si、Ar 和 Ca 的同位素中, ^{14}C 、 ^{24}Ne 、 ^{28}Mg 、 ^{34}Si 、 ^{44}Ar 和 ^{48}Ca 各具有最大的结合能,这就能轻易地解释为什么 ^{223}Ra 发射的集团是 ^{14}C 而不是比 ^{14}C 稳定得多的 ^{12}C 等问题.

3 统一模型

统一模型是在裂变模型的基础上发展起来的.统一模型认为: α 衰变、集团衰变和自发裂变都是同类的过程,不同的只是碎片质量的不对称程度.假设母核形变为球(或椭球)状的两部分,并且核体积在形变过程中保持不变.两碎片的质心距离 r 从 $R_1 = R_0 - R_2$ 变到无限

大,而 $R_t = R_1 + R_2$, 其中 $R_0 = r_0 A^{1/3}$, $R_j = r_0 A_j^{1/3}$ ($j = 1, 2$). 对于 $Q = M(Z, A) - M(Z_1, A_1) - M(Z_2, A_2) > 0$ 的系统,衰变常数可表为 $\lambda = fp = fe^{-K}$ 其中: $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2E_v}{\hbar}$ 为每秒的碰撞数, E_v 为零点振动能、 ω 为原子核集体振荡的特征频率; $K = \frac{2}{\hbar} \int_{R_1}^{R_2} \sqrt{2\mu[V(r) - Q]} dr$, R_1 和 R_2 由 $V(R_1) = V(R_2) = Q'$ 确定, $Q' = Q + E_v$. 与集团模型相比,统一模型衰变常数的表式不包含集团的预形成因子.当然位能曲线 $V(r)$ 也不相同.

Poenaru 等人首先证明衰变可看作是非常不对称的裂变,并把在裂变中用来计算 Q 值和半衰期的方法用于处理衰变,发展了把液滴模型、有效力程模型和 Yukawa+指数模型等三种用于电荷不对称和质量不对称的不相同形变系统,并考虑了唯象的壳修正,形成超非对称的裂变模型.在集团衰变现象发现以前, Poenaru 等人就利用这个模型预言了集团衰变的可能性,以后,他们又考虑了非零角动量的影响,导出了解析性的超非对称的裂变模型^[10].在液滴模型的框架内,把两碎片未分离前的位能曲线 $V(r)$ 表为 r 的二阶多项式,而在两碎片分离后 $V(r)$ 仅为库仑作用,因而得到了衰变常数 λ 是 r 的二阶多项式表式.利用这个模型, Poenaru 等人作了大量的计算,指出从重核可能有多于 140 种核 ($Z_2 < 25$) 的可能发射,给出的计算预言值与实验确认的观测值之差为 1.5 个数量级.

Shi 和 Swiatecki^[11] 采用近程位+库仑位,发展了另一种模型,模型不用可调参数,考虑了两碎片壳效应的影响,模型计算值与实验观测值之差在 5 倍之内.

Shanmugan 和 Kamalaharan^[12] 采用立方位,即在两碎片未分离前,位能曲线为 r 的三次函数,而在碎片分离后用 Yukawa+指数位.在计算中认为出射粒子始终保持为球状,但考虑母核和子核的形变(计算结果发现,子核的形变对寿命的影响很小),即

$$V(r) = -E_v + [V(R_t) + E_t][s_1(\frac{r-R_t}{R_t-R_i})^2 - s_2(\frac{r-R_i}{R_t-R_i})^3] \quad R_i \leq r \leq R_t$$

和

$$V(r) = V_c(r) + V_n(r) - V_d(r) - Q \quad r \geq R_t$$

其中, $V_c(r)$ 为库仑位, $V_n(r)$ 是由于有效力程产生的核相互作用, $V_d(r)$ 是由于子核四极形变引起的相互作用能的变化, 它们的具体表式为

$$V_c(r) = \frac{3}{2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} v \left[\frac{1-v^2}{2} \ln \frac{v+1}{v-1} + v \right]$$

$$V_n(r) = -D \left(F + \frac{r-R_t}{a} \right) \frac{R_t}{r} \exp[(R_t-r)/a]$$

$$V_d(r) = \frac{4R_t^3 C_4 A_2 \beta_2}{a r_0^2} \sqrt{\frac{5}{4\pi}}$$

其中, $v = \frac{r}{\sqrt{a_1^2 - b_1^2}}$, a_1, b_1 为椭球子核的长短半轴, D 为核位的深度常数, 取 $a=0.68\text{fm}$.

由于在集团衰变中出射的轻集团内, 电荷对质量的比 Z_2/A_2 约为 0.4, 与母核内 Z/A 值很接近, 因而在集团衰变中, 对于给定质量的碎片, 电荷重分布的影响很少, 可以忽略; 但在 α 衰变中, α 粒子 $Z_2/A_2=1/2$, 大于母核内的 Z/A 值, 因此 α 衰变需要考虑电荷的重新分布. 另外还需要考虑质量系数 $\mu(r)$ 对质心距离的依赖性. Shanmugan 等人对集团衰变所得的结果优于 Poenaru 及 Shi 等所得的结果.

总之, 在集团衰变现象发现以后, 统一模型越做越细, 既考虑了碎片分离前不同的位能曲线, 又考虑了形变的影响, 质量不对称, 电荷不对称的影响以及形变过程中电荷重新分布等的影响, 还比较了出射碎片保持体积恒定和保持半径恒定对结果的影响. 模型所得的结果与实验数据的符合也一步步得到改善, 但是模型的基本框架没用改变.

4 结 语

集团衰变现象的发现不仅促进了核衰变

的实验研究, 也大大促进了衰变模型的研究, 提高了多种衰变模型与实验数据的符合程度. 但是, 这些进步仍是很初步的. 例如, 对于衰变, 一个含有三个参数的模型仍不可能在一个数量级的范围内拟合所有的实验数据, 即使是含有 24 个参数的半径经验模型, 也只能在 3~4 倍的范围内拟合. 对于自发裂变, 即使是偶-偶核, 半衰期的平均误差也不会好于 $10^2 \sim 10^3$, 对于奇 A 核的误差就更大了. 曾对集团衰变半衰期计算公式中的不确定度作过分析, 指出主要是由核质量的不确定度 Δm 及碎片电荷半径的不确定度 ΔR 引起的, 估计 Δm 和 ΔR 所引起的最大不确定度约为 1.4~2 个数量级. 还有, 集团衰变的精细结构现象, 如 $^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{209}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$, 按统一模型计算, 衰变到子核 ^{209}Pb 基态的几率是 98%, 仅有 2% 的几率衰变到 ^{209}Pb 的第一激发态. 但是, 1989 年法国 Orsay 实验室在磁谱仪上测到的结果^[13]则与此矛盾, 发射 ^{14}C 以后, ^{223}Ra 主要衰变到 ^{209}Pb 的第一激发态 (81%), 而衰变到 ^{209}Pb 基态的几率只有 13%. 这个现象至今未得到满意的解释.

参 考 文 献

- Poenaru D N, et al. J. Phys. (Pairs), 1984, 45: 1099
- Rose H J, et al. Nature, 1984, 307: 245
- Wang S, et al. Phys. Rev., 1989, C39: 1647
- Buck B, et al. Phys. Rev., 1975, C11: 1803
- Price P B, et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54: 297
- Buck B, et al. J. Phys. G, Nucl. Part. Phys., 1992, 18: 143
- Malik S S, et al. Phys. Rev., 1989, C39: 1992
- Blendowske R, et al. Z. Phys. A, Hadrons and Nuclei, 1991, 339: 121
- Ronen Y. Phys. Rev., 1991, C44: R594
- Poenaru D N, et al. Phys. Rev., 1985, C32: 572
- Shi Y J, et al. Nucl. Phys., 1985, A438: 450; 1987, A464: 205
- Shanmugan G, et al. Phys. Rev., 1990, C41: 1184, 1742
- Hourani E, et al. Phys. Rev., 1991, C44: 1424

Cluster Models and Unified Models of Nuclear Decay

Li Mianfeng

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Abstract Both cluster models and unified models, describing in a unified manner alpha decay, cluster decay and spontaneous fission, are briefly introduced. The developments and problems of nuclear decay models are also described.

Key Words alpha decay, cluster decay, spontaneous fission, cluster models, unified models.

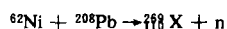
德国 GSI 的奥托·克勒佩尔博士访问近代物理研究所

德国重离子研究中心(GSI)的奥托·克勒佩尔博士(Dr. O. Klepper)应邀于 1993 年 4 月 17~22 日访问了近代物理研究所,这是他时隔 13 年对该所的第二访问。

克勒佩尔博士长期从事在线同位素分离器及远离 β 稳定线核素研究的实验工作,具有丰富的经验和深厚的造诣。近年来,他主要在 GSI 的碎片分离器(FRS)和实验储存环(ESR)上,从事实验研究工作及激光离子源的实验工作。

克勒佩尔博士在近代物理所作了三次学术报告,介绍了 GSI 所做的和准备做的有关工作。内容涉及:(1)奇异核及其衰变,并介绍了在 GSI 的新和老设备上所做的核谱学工作;(2)在线同位素分离器和离子源(FEBIAD 离子源、热离子源、激光离子源);(3)远离 β 稳定线核素的衰变谱学研究;(4)在 GSI 的碎片分离器(FRS)和实验储存环(ESR)上的实验工作。

GSI 在以 10~15MeV/u 丰中子炮弹的转移反应发现了许多丰中子新核素的基础上,又以 11.4MeV/u 的 ^{208}Pb 轰击天然钨靶,在 GSI 的在线同位素分离器上发现了新核素 ^{206}Au 。为了产生丰中子新核素,GSI 用的相对论性 ^{197}Au 重离子炮弹碎裂,在碎片分离器(FRS)上作了产物 Ir 的同位素分布曲线,它与逆反应实验预言的结果一致。GSI 还将用相对论重离子 ^{20}Ne 轰击 ^{238}U 靶,研究其裂变碎片可能产生的双幻核 ^{78}Ni 及其附近的新核素,其结果将比 ^{86}Kr 弹碎裂更好。此外,GSI 还将用冷融合反应去合成 110 号元素的实验,即



其产额约为每 3 周一个原子。近年来,GSI 一直致力于用融合蒸发反应 $^{58}\text{Ni}(5\text{MeV/u}) + ^{50}\text{Cr} \rightarrow ^{108}\text{Sn} + 2p + xn$ 来发现双幻核 ^{108}Sn 及其附近的缺中子新核素。第一个目标是发现 ^{102}Sn 。这个工作的关键是如何抑制同质量数的 In。为此,GSI 研制了激光共振电离离子源,已做过首次实验,但是没有找到 ^{102}Sn 。激光共振电离离子源的改进工作正在进行。GSI 在 ^{108}Sn 和 ^{148}Gd 附近做了许多 β 跃迁测量、端点能量测量和 β 强度函数测量。用反康+Si(Li)+Ge γ 探测器的 β - γ 符合获得了精确的端点能量值。克勒佩尔博士的学术报告使该所的同行们很受启发。有些实验方法和实验技术可以直接借鉴过来,对推动和改进我们的科研工作很有意义。

近物所核三室还和克勒佩尔博士进行了多次座谈,向来访者介绍了近期的科研成果和工作进展,在线同位素分离组介绍了离子源方面的工作以及即将进行的在线实验方案。对此,克勒佩尔博士提出了很有价值的意见和建议。发现新核素 ^{208}Hg 的实验组向克勒佩尔博士详细介绍了合成 ^{208}Hg 的物理思想和实验技术,克勒佩尔博士对此表示祝贺并祝愿该所在核物理研究领域取得更多更好的科研成果。

(中国科学院近代物理研究所 谈锦封供稿)