

远离 β 稳定线核素研究进展

黄业成

摘要: 本文描述远离 β 稳定线核素的产生、合成和研究进展。

目前已经发现的核素总共2000多个,其中稳定的核素包括寿命很长的天然放射性同位素约300个。理论估计有6000多个核素人们是有可能合成和认识的,因此,合成和开拓为数众多的未知的远离 β 稳定线核素,对检验核结构理论,深化人们对原子核的认识,是非常有意义的。

一、远离 β 稳定线核素的产生

1、反应堆热中子引起的铀裂变反应

^{235}U 的热中子裂变是产生丰中子核素的手段之一。其产物的质量数在 $A=75$ 至 155 之间,产额峰值在 $A=95$ 和 138 附近。热中子通量约 10^{11} 中子/ $\text{cm}^2\cdot\text{秒}$,反应截面最高可达20巴。

2、高能质子束引起的反应

入射质子与靶核之间的反应是一个很复杂的过程,当低的入射能量时($<30\text{MeV}$),形成复合核($N, Z+1$),复合核退激伴随着中子蒸发,由反应(p, xn)而产生新的核素。

随着入射粒子的能量增加,到达 600MeV 甚至更高时,导致很复杂的前平衡过程,而后有更多的核子及核子团蒸发,这就是散裂反应($p, xn\ y_p$),产生大量的核素,此时复合核概念已不起重要作用。散裂反应产生的核素是不可选择的,它既可产生缺中子核素,也可产生丰中子核素,从这种反应产生的核子团有一个很宽的 N 和 Z 分布。

高能质子束是引起裂变反应生成丰中子核素的另一方法。

当炮弹能量增至 24GeV 时,通过碎裂反应能生成极端丰中子的轻同位素(例如 Na

的同位素)。

高能质子束所用的靶子,厚度为 $20\sim 200\text{g}/\text{cm}^2$,反应截面 20mb 量级,质子强度约 $1\mu\text{A}$ 甚至更高。

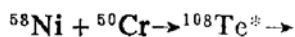
3、重离子反应

a. 熔合一蒸发反应

入射粒子能量低于有效库仑位垒时,占优势的反应过程是库仑激发和散射。随着入射能量的增加,在高激发能下碰撞核的全熔合变成主要的了,形成复合核之后进行退激。当入射粒子能量不高于库仑位垒很多时,重离子引起的反应是可以选择的,而且通常只有少数几个具有合适产额的同位素产生。因为存在着多种入射炮弹、靶核与能量的不同组合,人们十分有可能去选取特别感兴趣的一种或几种同位素以获得最大产额。对于中重核和重核区,靶的 $N>Z$,当炮弹 $N\approx Z$ 时,所产生的复合核较之用质子产生的更缺几个中子。所以对产生一个特殊的同位素,要求更少的激发能,这意味着在产额方面有更高的选择性。除此之外,用重离子轰击,使复合核具有更高的角动量,复合核退激,通常是 γ 射线占优势,提供研究这些核的高自旋态的唯一机会。

两个重核的熔合,是合成奇异核很有用的方法。最简单的是生成核的质子数等于两个相互作用核质子数的和,而中子数小于参与反应的母核的中子数之和。这是因为一些中子从新核中蒸发出来的结果。用两个缺中子的核的熔合反应,人们可能达到或接近质子滴线。西德GSI对奇异核的研究,都集中在缺中子边,被发现的新核素大都落在这一区域,这是因为他们使用的炮弹和靶子都比较

缺中子之故。



以及 $^{180}\text{O}(\text{natW}, \text{Xn}, \text{pxn})\text{Pb}$, Tl 是熔合一蒸发反应的例子。

由于在全部的熔合系统中较之同质量数的稳定核占有比较少的中子, 因此, 在质子滴线的同位素, 可以到达 $\text{Pb}(Z=82)$ 区, 而在 Pb 区之外, 库仑力变得越来越占优势, 这就限制了更重元素的产生。图1显示了GSI合

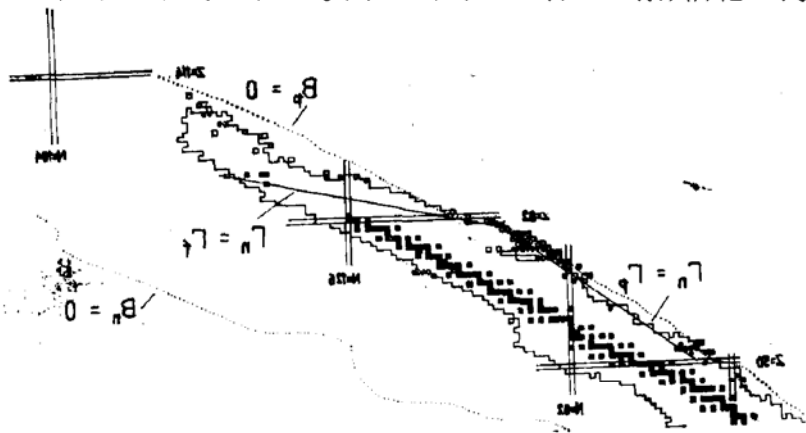
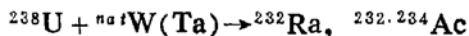
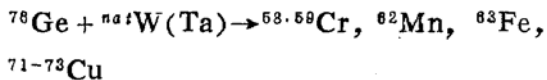


图1. GSI合成的新核素“O”

成新核素的概况, 已有相当多的质子滴线附近的核素被合成了, 它们都在 Pb 区以下^[1]。

b. 转移反应

两个相互作用的重核之间的多个质子或中子的转移, 导致一些丰中子核素的产生(在裂变区之外的区域, 即 $Z \leq 29$ 和 $Z \geq 64$ 区域)。反应结果 N/Z 值增加, 生成丰中子核素。例如



第一个反应生成类弹产物, 第二个反应则生成类靶核素。入射粒子的能量约 $9 \sim 11.7$ MeV/u。为了得到最高产额, 靶子厚度可选择到使炮弹从初始能量减至库仑位垒左右。

c. 碎裂反应

对于更高能量的重离子束, 将发生碎裂

反应, 产生轻质量的丰中子核素。例如 212 MeV/u的 ^{48}Ca 束, 轰击 C 、 Be 靶, 发现 ^{22}N , ^{20}F , ^{23}Ne , $^{32,34}\text{Mg}$, $^{35-37}\text{Al}$, $^{28,30}\text{Si}$, $^{41,42}\text{P}$, $^{43,44}\text{S}$, $^{44,46}\text{Cl}$ 等核素。由于入射粒子能量高, 靶子厚度可比熔合反应时厚好几倍。反应产物在实验室坐标系中接近 O^0 的方向射出。

由于重离子在物质中的射程很短, 重离子反应只能用同位素纯的(或丰度高的同位素)箔靶。例如天然丰度 0.13% 的 ^{180}W , 浓缩至 92.6% , 用以研究最轻的偶-偶核 $^{184-186}\text{Tl}$ 。重离子反应靶厚为 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 量级, 甚至更箔一些。这就限制了重离子反应对于入射粒子束为 10^{12} 粒子/秒的极大产额只有 10^8 原子/秒。

图2和图3分别表示各种反应机制所能产生的核素的分布区域^[2]和产额曲线^[3]。

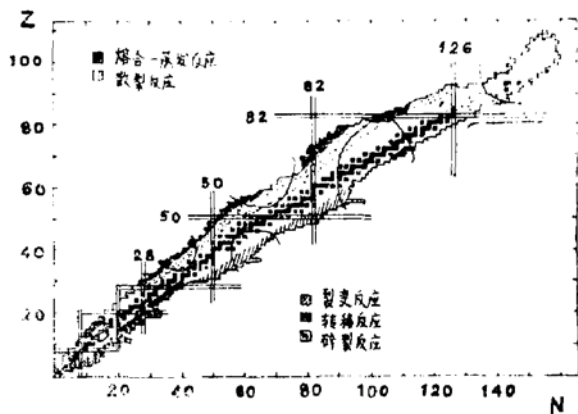


图2. 不同反应机制产生核素的分布区域

由此看出, 对于接近稳定线的核素, 用高能质子束的产额比用重离子束高好几个数量级, 随着核素远离稳定线, 高能质子束产生的核素, 其产额急剧下降, 相邻两核素之间的产额可相差两个数量级。对非常缺中子的核素, 重离子反应产额反而更高, 这是很

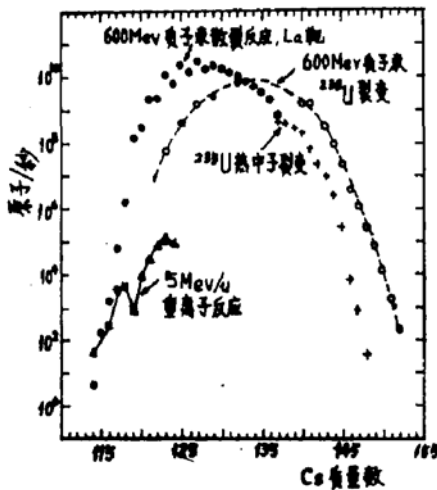


图3.不同反应机制产生核素的产额曲线有利的,从而也可说明,为什么重离子反应(熔合—蒸发反应)的产物更易于接近质子滴线。

二、远离β稳定线核素的合成

合成和鉴别新核素,是研究例外核最基本而最重要的工作。在周期表中,已有74种元素被在线分离,其中的66种已被CERN的ISOLDE分离过。

1、N = Z线及双幻核素的合成

因为核力的同位旋不变,具有N = Z的核素除最轻的以外,都是远离稳定线的。因这些核素的对称能为零,对检验核质量公式有着特殊的意义。目前最重的N = Z的核素是 ${}_{35}^{74}\text{Rb}$ ($T_{1/2} = 64.9\text{ms}$), ${}^{80}\text{Zr}$ 仍未找到。在锡区已接近 ${}^{100}\text{Sn}$,象 ${}^{100}\text{Sn}$ 这样的核素,它既属于N = Z线上的核,也属于双幻核,而且又位于质子滴线上。这是人们最感兴趣的核素之一。因为它是双幻核就更应特别稳定,但它又是中子数缺得很多的核(远离稳定线约18个核素的位置!)应该是极不稳定的,这两种相互矛盾着的因素,究竟谁更重要,是目前核结构理论的一个尖锐的课题。

根据对新α衰变岛的研究,目前已到达 ${}^{102}\text{Sn}$,即 ${}^{106}\text{Te} + {}^{102}\text{Sn} + \alpha$ 。人们或许会问,合成 ${}^{100}\text{Sn}$ 的可能性到底有多大?理论估计,从反应(${}^{58}\text{Ni} + {}^{50}\text{Cr}$)产生的 ${}^{101}\text{Sn}$ 的截面为

$8\mu\text{b}$;从 ${}^{108}\text{Te}$ 经α衰变到 ${}^{102}\text{Sn}$ 的半寿命为 $60\mu\text{s}$ [4]。由最接近 ${}^{100}\text{Sn}$ 的核素的性质来看,可以预料,生成 ${}^{100}\text{Sn}$ 的截面是极其低微的,其半寿命也是非常短的。因此,合成 ${}^{100}\text{Sn}$ 的可能性是微乎其微的。尽管如此,人们还是力图逼近它,通过对最接近 ${}^{100}\text{Sn}$ 的核素(如 ${}^{101}\text{Sn}$, ${}^{102}\text{Sn}$, ${}^{100}\text{In}$ 等)的研究,以图得到有关它的基本性质。

从 ${}^{48}\text{Ca}$ 至 ${}^{208}\text{Pb}$ 之间的双幻核已发现了 ${}^{56}\text{Ni}$ 和 ${}^{132}\text{Sn}$ 。 ${}^{132}\text{In}(0.2\text{s}) \rightarrow {}^{132}\text{Sn}(40\text{s}) + \beta$ 衰变到 ${}^{132}\text{Sn}$ 。 ${}^{56}\text{Ni}$ 没有β⁺衰变。因此, ${}^{132}\text{Sn}$ 是唯一能提供β衰变研究的双幻核,它的能级结构理论上是相当感兴趣的,而 ${}^{100}\text{Sn}$, ${}^{48}\text{Zr}$, ${}^{78}\text{Ni}$, ${}^{70}\text{Ca}$ 尚待开发。

2.边界核素的合成

在滴线上的核素,核子的结合能 $B_p = B_n = 0$,合成沿着质子滴线和中子滴线上的核素,并研究这些处于极限情况下的核素的特性,无疑是很有意义的,GSI已合成了近100种新核素,在原子序数为50至56和68至82的两个区域内,已经达到甚至超过了预言的质子滴线(见图1)。

在丰中子边,除低质量范围内的少数几个核素接近(或达到)中子滴线外,其余的尚未开拓,这是因为中子滴线离稳定区比较遥远,核素越远离稳定区,生成它的反应截面越小,其半寿命也随之而急剧下降的缘故。

3.新α衰变岛

根据已有的知识,在 $A > 150$ 的核素才可能有α发射,比Pb重的区域以及稀土区是人们已经熟悉的α衰变区域。一个新的α衰变岛是近年才发现的,14个新的α发射体是 ${}^{106-110}\text{Te}$, ${}^{110-113}\text{I}$, ${}^{110-113}\text{Xe}$ 和 ${}^{114}\text{Cs}$ [5]。

研究α衰变特性是发现和鉴别新核素的可靠途径之一,正是从 ${}^{106-108}\text{Te}$ 的α衰变,人们发现了 ${}^{102-104}\text{Sn}$, ${}^{102}\text{Sn}$ 是迄今最接近双幻核 ${}^{100}\text{Sn}$ 的核素了。

4.新形变区核素的合成

四个新的形变区已用在线分离技术发现

了^[6]，一个是接近³²Mg，两个是在Z = 40附近的重核和轻核，第四个是轻的Cs同位素。实验资料最完全的是质量数接近100的区域，在靠近[Z, N] = (40, 60)发现了核形变，由Rb和Y经β衰变为Sr和Zr的一系列激发态的实验中证明了。实验资料表明¹⁰⁰Sr是直至目前为止所发现的形变最大的核之一，形变开始于N = 60。

三、新衰变模型的研究

对远离稳定核的研究，将遇到β延迟粒子发射。当Q_β大于核的粒子发射阈能时，β延迟粒子发射变成允许的了。延迟粒子发射的时间尺度比τ退激还短。

所有各种类型的β延迟粒子发射的研究，对于建立质量公式中的参数是很重要的。研究这些衰变，也可提供激发能级的资料。

1、β⁻延迟中子、双中子、三中子发射

β⁻延迟中子及多中子衰变是某些区域的丰中子核素的特性之一。第一个实验发现β⁻延迟多中子衰变模型的是¹¹Li(T_{1/2} = 8.5ms)

^[7]，它来自24 GeV质子束的铀碎裂反应。它的Q_β = 20.7 MeV，而2n、3n的阈能分别为7.315和8.888 MeV，由此可知¹¹Li是最适宜于β⁻延迟中子发射。⁸⁹⁻⁹¹Br, ¹³⁹⁻¹⁴¹I也是β⁻延迟中子发射的。

最重的Na的同位素是³⁰⁻³²Na及^{93, 100}Rb是双中子发射的。质量公式预言，裂变产物⁸³⁻⁸⁴Ga, ^{93, 87}As, ⁹¹Se, ⁹²Br, ^{101, 102}Rb, ¹³⁰Sb, ¹⁴²I和¹⁴⁸Cs也是β⁻延迟双中子的先驱核。

期望³¹⁻³⁵Na是三中子发射的。K同位素的三中子先驱核将是⁶⁶K，但迄今发现最重的同位素是⁵⁴K^[8]。

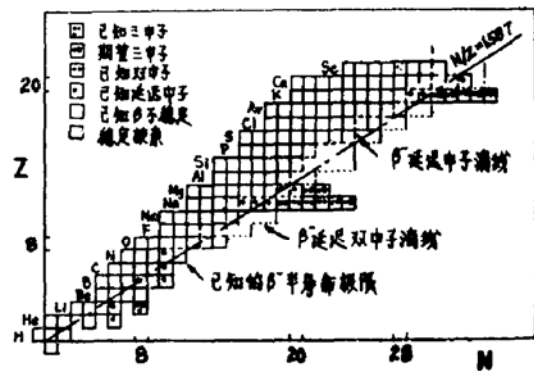


图4. β⁻延迟中子先驱核分布图(Z ≤ 20的区域)

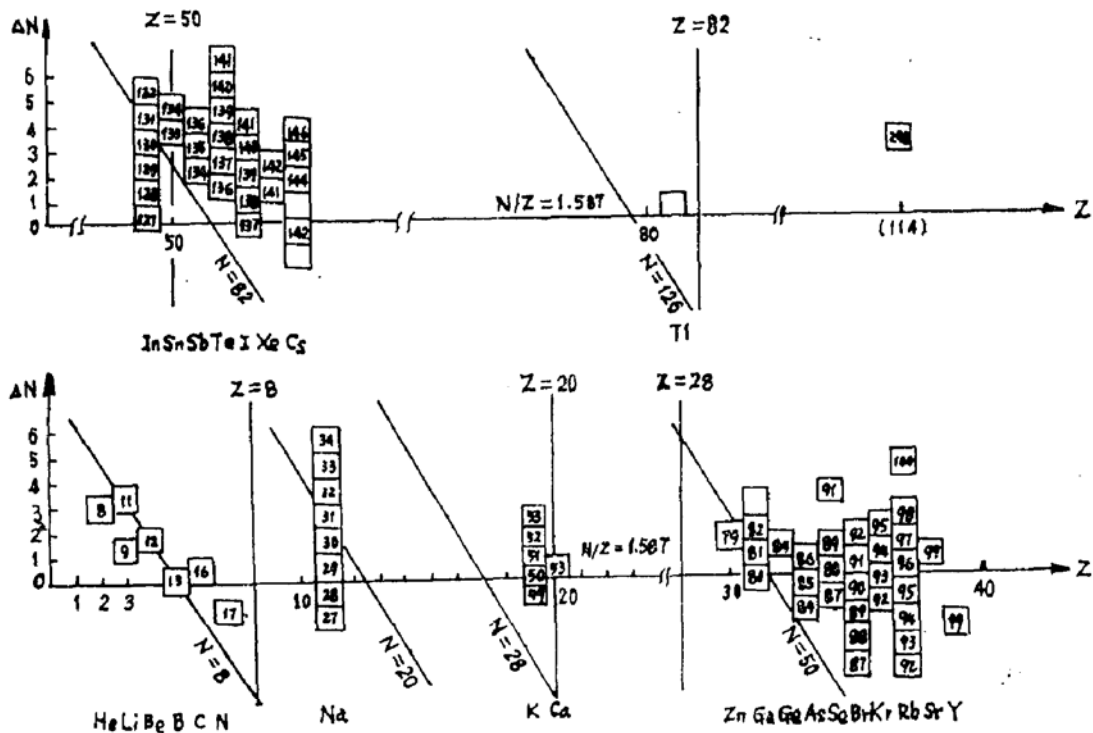


图5. β⁻延迟中子发射体岛

杨澄中教授在总结了直至83年底为止的 β^- 延迟中子先驱核的资料之后,提出了 $N/Z = 1.587$ “ β^- 延迟中子先驱核线”的概念^[9],他认为应当仔细研究 $N/Z = 1.587$ 这一条线。中子先驱核在 $N = 8, 20, 50, 82$ 和 126 等中子满壳层附近形成“岛”,它们大都位于中子满壳层的右边。中子壳效应对 (β^-, n) 衰变是有利的。质子满壳的影响也参与衰变。他预言在尚未出现中子先驱核的区域($N = 28$ 附近),最有可能出现的中子先驱核是 ^{51}K 。杨教授明确指出,与其寻找难于到达的中子滴线上的核素,还不如沿着 $N/Z = 1.587$ 这条更感兴趣的中子先驱核线去合成新核素,它更能激发人们的丰富的物理思想,这将是很有价值的。可喜的是,今天我们已经看到就在这个区域,包括 ^{51}K 在内的 $^{49-54}\text{K}$ 和 ^{53}Ca 的 β^- 延迟中子先驱核已被找到^[10],看来质子满壳的竞争仍然是很微弱的。只要认真分析,人们就能发现,通过核素图的座标原点与 β^- 延迟中子先驱核分布区域的平均位置的一条直线(图4)正与 $N/Z = 1.587$ 线相符。图5是杨澄中教授的结果,我们把新发现的 β^- 延迟中子先驱核 $^{49-53}\text{K}$ 及 ^{53}Ca 一并填补上去了,证实了杨教授的预言。

2. β^- 延迟 ^3H 发射

1969-1970年有人讨论过 β^- 延迟 ^3H 发射的几率,对于极端丰中子的核($Q_\beta = 15 \sim 30$ Mev),这种衰变模型是有可能的。下列的已知核素有可能是 ^3H 发射。 ^8He , ^{11}Li (已被证实), ^{14}Be , ^{15}B , $^{17-19}\text{C}$, ^{27}F , ^{49}Ne 和 ^{35}Na 。

^{55}Ca 双中子发射至 ^{53}Ca ,而它的 ^3H 发射几率估计 $P_i \sim 5\%$ 。对 ^{11}Li , $B_i = 15.72$ Mev, $P_i = (0.010 \pm 0.004)\%$ 。

3. β^+ 延迟质子、双质子发射

$^{18}\text{Ni} + ^{92}\text{Mo} \rightarrow ^{150}\text{Y}^*$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{93}\text{Nb} \rightarrow ^{151}\text{Tm}^*$ 的熔合反应产生的核素 $^{143, 145, 147}\text{Dy}$ 和 $^{147, 149}\text{Er}$ 是 β^+ 延迟质子发射的。实验中采用的靶子为 ^{50}Cr , ^{54}Fe , $^{58, 60}\text{Ni}$, $^{63, 65}\text{Cu}$,其厚度为 $4\text{mg}/\text{cm}^2$,炮弹为 $4 \sim 5$ Mev/u的 ^{40}Ca , ^{58}Ni 。

^{22}Al , ^{26}P 则是 β^+ 延迟双质子的先驱核。

四、原子核质量的直接测量^[11, 12, 13]

原子核最基本的性质之一是它的质量或总结合能。过去的质量测量及质量公式的建立是对稳定核而言的。而远离 β 稳定线核素的情况,我们了解得还很少。在没有大量的实验数据前提下,是不能将稳定核的理论向例外核任意推广的。半经验质量公式的改进必须依赖于新的、好的原子质量数据。 Q_β 的测量可以间接决定核的质量,不利之处在于我们必须预先知道衰变纲图。对于远离稳定核,很多情况下是不知道的,因此,原子核质量的直接测量更为可取。

来自在线同位素分离器(ISOL)的短寿命核素的离子束被送到一台高分辨本领的质谱仪中,离子束被质谱仪的静电偏转板及均匀场扇形磁铁偏转和聚焦,最后被高增益的电子倍增器探测。

在质谱仪恒定的磁场中,质量为 M_A, M_B, M_C 的离子通过同一轨道,所有的电势(静电偏转板的)服从如下关系:

$$M_A V_A = M_B V_B = M_C V_C$$

考虑到对系统的修正,我们有

$$M_A(V_A + \delta) = M_B(V_B + \delta) = M_C(V_C + \delta)$$

$$\text{则 } M_A = \frac{M_B M_C (V_C - V_B)}{(M_B - M_C)V_A + M_C V_C - M_B V_B}$$

式中

$$V_A = V_A^0 + v_A, \quad V_B = V_B^0 + v_B, \quad V_C = V_C^0 + v_C$$

若 M_B, M_C 为已知核素的质量,则未知核的质量 M_A 可从上述式精确地求得。

v_A, v_B, v_C 是三角波电压,用以调制电位 V_A, V_B, V_C ,以精确地在质谱仪中找到对应的核素的质谱。

根据核质量直接测量已经计算出双中子分离能对中子数的变化曲线。当 $N = 20$ 时, Ca, K 显示出中子壳层效应,而对 Na, Mg 则开始形变。

另一些实验结果是,对Rb, N=50为中子壳层,发现了在N=56的中子亚壳层,但比N=50时弱8倍,而N=60时开始形变。

为了检验质量公式对形变预言的成就如何,下面给出一些结果,应用不同的质量公式计算的结果,都没有发现任何形变。这是因为在建立公式时,并不知道这个形变区,公式中的参数是从已知的核外推而得的。而应用液滴模型公式计算的结果,发现了形变。这些公式已包括了形变能项。但形变开始得比实验值为早。

对C₅同位素的实验结果表明, N=82显示中子壳层,在N=90出现一个峰,在稀土区发生形变。

通过核质量的直接测量,不但能得到远离稳定核的质量数据,同时也揭示了其他新的特性。这无疑是非常有意义的。

五、激光光谱学^[14,15,16]

原子核的性质能由超精细相互作用反映到原子光谱上,从研究原子能级的超精细结构可获得诸如核自旋、电多极矩、磁多极矩和均方电荷半径变化 $\delta\langle r^2 \rangle$ 等重要参数。

对于四极形变情况 $\delta\langle r^2 \rangle$ 的总值为

$$\delta\langle r^2 \rangle = \delta\langle r^2 \rangle_{sph} + \delta\beta\langle r^2 \rangle$$

$$= \delta\langle r^2 \rangle_{sph} + \frac{5}{4\pi} \delta(\langle \beta^2 \rangle \langle r^2 \rangle_{sph})$$

$\delta\beta\langle r^2 \rangle$ 项依赖于形变 $\langle \beta^2 \rangle$ 的均方值。

业已得到Na的 $\delta\langle r^2 \rangle$ 对中子的关系曲线。遗憾的是,与S_{2n}比较,它们没有揭示出同一特性。 $\delta\langle r^2 \rangle$ 曲线显示出奇一偶的跳动且在N=14(²³Na)处有一壳层效应而对S_{2n}(Na)则没有这种行为。介于²⁰Na和³¹Na(N=19,20)之间 $\delta\langle r^2 \rangle$ 没有特殊的不连续。而Hartree-Fock则预言有一强的跳跃。

在N=50处,对Rb同位素,中子满壳层效应非常显著。这是因为当中子填满了壳层时,

电荷半径减少之故。在核质量测量中,由S_{2n}发现N=56的亚壳层效应,而 $\delta\langle r^2 \rangle$ 则没有发现。在N=60处, $\delta\langle r^2 \rangle$ 和S_{2n}一样,观察到突然发生形变。

C₅同位素的情况,在N=90处没有表明形变发生。这是因为实验测量只到了这一点就停下来了。但在N≤82时,正如Ba和Xe一样,奇偶跳动很清楚。

杨澄中教授审阅了本文,沈文庆、张敬业、徐树威等同志曾对初稿作过讨论,并提出了宝贵的意见,特此致谢。

参 考 文 献

1. P. Armbuster, Europhysics News, 14(1983) 4-7
2. M. Epherre, Noyaux Loin De La Vallee De Stabilité 12-16 Septembre, 1983. P. 14.
3. H. Ravn, Physics Reports 54(1979)241
4. E. Roecl, GSI-84-48 Juli, 1984
5. D. Schardt等, CERN-81-09, P. 169, July 1981
6. B. Jonson, Nuclear Instruments and Methods 186(1981)42
7. B. Jonson等, CERN-81-09, P.265, July 1981
8. A proposal For An Intens Radioactive Beams Facility P. 27, June 1985, Canada
9. 杨澄中,核物理动态 第二卷第1期, 1985
10. M. Langevin等, Phsics Letter 130 B(1983) 251
11. M. Epherre等, Physics Review, C 19(1979) 504-1552
12. C. Thibault, CERN-81-09, P. 47-55, July 1981
13. G. Audi等, AMCO-7 Darmstadt, 1984, P. 119
14. 同12
15. A. C. Mueller等, Nuclear Physics A 403 (1983)243-262
16. H. Kluge, Progress in Atomic Spectroscopy Part B, Chapter 17, P. 727, 1983.