

四个新的丰中子稀土同位素的鉴别

H. Mach等

四个新的丰中子裂变产物核已经在布鲁克海文国家实验室在线质量分离器TRISTAN上鉴别出来。测出它们的半衰期是： ^{156}Pm , $T_{1/2} = 28.2 \pm 1.1$ 秒； ^{159}Sm , $T_{1/2} = 15 \pm 2$ 秒； $^{160}_{1/2}\text{Sm}$, $T = 8.7 \pm 1.4$ 秒； ^{161}Eu , $T_{1/2} = 27 \pm 3$ 秒。这些核在核合成的计算中是特别重要的，因为它们位于稀土区域，在这个区域，由 γ 过程(快速中子俘获过程)形成最大的丰度值。通过对这些核的半衰期与最近计算的别的新核的半衰期的比较，揭示出理论结果与实验结果之间的偏差的系统学特征。

核衰变的半衰期数据不仅在核结构和核技术领域，而且在天体物理学的问题中有着十分重要的应用。最近，Mathews已经就天体物理条件下核合成计算所需的数据进行了评述，他选出中子的结合能和核的半衰期作为需要从实验上进行测量的最重要的参数。稀土区域的核对星体爆发时中子的快速俘获过程是相当重要的(即使我们对星体爆发的位置和基本图象还不清楚)。最为重要的核是质量数为80, 130, 165和195的那些核，它们位于 γ 过程的丰度峰内。

对大量的丰中子核来说，只有两家半衰期编评数据，一家是Takahashi等人使用一个

简单模型所做的工作，另一家是由Klapdor等人结合对 β 强度函数的细致处理所做的更加精确的计算。最近一两年，由于Klapdor等人找到了许多新的丰中子核，而且理论与实验值之间的偏差的系统学图象正在显露出来。大体上已经表明，理论计算的半衰期值在 $A \approx 70$ 的区域高于实验值，而在 $A \approx 190$ 的区域则低于实验值。自从计算的半衰期值的范围彼此相差超过了一个数量级以来，对不同的天体物理模型，其输入数据中就留下了较大的误差。为了对这些偏差有一个较好的系统学的理解并为天体核合成的计算提供新的数据，我们在 $A \approx 160$ 的质量区域鉴别出几种新的丰中子核： ^{156}Pm , ^{159}Sm , ^{160}Sm 和 ^{161}Eu 。

用在线质量分离技术来研究丰中子稀土核是困难的，因为它们的裂变产额很低，同时裂变产物要花相当长的时间才能从靶上扩散出来。因此，通常采用快速化学分离技术或别的一些外来技术，不过它们要受到核必须是在 β 稳定线近邻这一条件的限制。由于Piotrowski等人在TRISTAN上研制出了一种热离子源，它可以达到很高的温度($\approx 2500^\circ\text{C}$)，而且裂变产物的扩散较快，从

相对振幅和用壳模型计算有相反符号。 $12.3 \text{ MeV } ^{40}\text{Ca}(d, \alpha)^{38}\text{K}$ 数据才与 $D_2 = 0$ 符合⁽²⁶⁾。若是 $D_2(d, \alpha)$ 接近 -0.31 fm^2 ，数据和壳模型计算一致。 -0.31 fm^2 与其它关于 (d, α) 研究和根据 α 粒子波函数得到的结果接近⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾⁽²³⁾。相应于更完整的 α 粒子波函数的 $D_2(d, \alpha)$ 值的精确计算将有更大的值。

我们期望 $(d, ^6\text{Li})$, $(^6\text{Li}, d)$, $(^6\text{Li}, \alpha)$ 和 $(^7\text{Li}, \alpha)$ 反应同样有 d 和 α -集团态结构。在转

移反应中，氘核自旋轨道力本身能产生张量分析本领。 ^6Li 和 ^7Li 自旋轨道力多半不重要。多步过程的作用问题是导致了某些不确定性。在这方面还存在许多问题和争论⁽²⁷⁾，我们着重研究了 (d, α) 反应和讨论了极化数据。

(刘国兴译自Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics, India, 1984, P.238)

而使它有可能用适当的产额来在线萃取短寿命稀土核。这里所给出的结果是使用改型的该种离子源(有几处进行了改进,以便进一步减小裂变产物的扩散时间)、在 $156 \leq A \leq 164$ 质量区域内获得的。

测量是在布鲁克海文国家实验室在线质量分离日TRISTAN上完成的。稀土核的活性是由浸在园形石墨底衬上大约5克富积 ^{235}U 的裂变热中子引起的。放射性元素由热离子源电离并萃取出来形成离子束,通过 90° 的磁铁进行质量分离后,把选择出来的同量异位放射性离子束沉积到一个可动的镀铝的聚脂薄膜带上,经过预先确定好的一段时间之后,把累积起来的源在0.3秒钟的时间内送到计数站去,在那里对三个探测器的计数进行比较(一个是小的高纯锗(Ge)平板探测器,一个是大的高纯锗平板探测器,一个是大的锗锂(GeLi)探测器)。单一 γ 谱,多重 γ 谱的标度(GMS)和任意两个探测器之间的 γ - γ -t的符合谱是同时累积起来的。多次计数的周期是在源一到达计数站就开始的,而对某一个特定的同量异位素则延续到超过所选定的周期时间 ΔT ,在这一段时间内,依秩获取到32个谱。除了 ^{157}Sm 、 ^{158}Sm 的情况外,不需要对衰变曲线作死时间修正,因为长寿命同位素的谱通常是用归一化参数推断出来的。

对能量在20—1500keV范围内观察到的所有跃迁,我们都进行了仔细的分析,并结合 E_γ 、 I_γ 、衰变的GMS和符合关系成功地把它们鉴别出来了。所有短寿命的不纯谱线都不属于钡和它的衰变产物,因为它们要高于所研究的特定稀土区同量异位素17—19个质量单位。造成这些不纯谱线的离子是在离子源的高温条件下形成的外来分子束的一部份。钡同位素的衰变和它们的衰变链是已经知道的,而且还有了束能量和强度的刻度。

稀土核衰变谱的一个特点是存在很强的低能转换跃迁。因此,依据一组 K_{α_1} 、 K_{α_2} 、

K_{β_1} 、和 K_{β_2} 特征x射线的存在,就可以把新的同位素正确的鉴别出来。伴随的 γ 射线谱是在GMS(其衰变曲线等同于那些x射线)和x- γ 、 γ - γ 符合的基础上鉴别出来的。测得的新的同位素的半衰期列在表1中(略)。这些值是从每一个衰变中强的单一跃迁所获得的平均值计算出来的。x射线的半衰期没有包括在平均值里面,因为可能存在一个小的系统误差、会对我们在复杂的x射线范围的分析中产生干扰。图1(略)表明了代表每一个新的同位素的那个跃迁的GMS数据。每一个要研究的核就代表了一个特殊问题,我们在后面各段中加以讨论。

^{156}Pm ,在很强的x- γ 和 γ - γ 符合的基础上,发现了伴随于 ^{156}Pm 衰变的十一条跃迁 γ 。半衰期的测量体现了6个结果的平均。这6个结果涉及到75.7keV、117.8keV和174.1keV三条跃迁 γ 和两组GMS的测量,两组GMS的测量是用周期时间分别为 $\Delta T = 48$ 秒和 $\Delta T = 96$ 秒进行的。

^{156}Sm 的衰变在最初对 $A = 159$ 的同量异位素的研究中给错过了(GMS测量的周期时间 $\Delta T = 640$ 秒)。在对第一个接受器里的GMS谱的离线分析中,清楚地揭示出具有对应 $K_{\alpha_1} + K_{\alpha_2}$ 半衰期为 19 ± 5 秒和对应 K_{β_1} 半衰期为 17 ± 6 秒的Eu的特征x射线存在,我们找到了伴随于这个衰变的两条 γ 谱线,其能量分别为 190 ± 0.3 keV ($T_{1/2} = 15 \pm 2$ 秒)和 114.3 ± 0.4 keV ($T_{1/2} = 16 \pm 4$ 秒),能量为114.3keV的这条谱线很弱。这些跃迁不可能用它其他的衰变来确认,否则会 与 E_γ 和 $T_{1/2}$ 相矛盾。

^{160}Sm 的衰变是在对第一个接受器里测得的GMS谱的在线分析中被确认的(测量的周期时间 $\Delta T = 96$ 秒)。发现Eu的特征x射线的半衰期 $T_{1/2}(K_{\alpha_1} + K_{\alpha_2}) = 14 \pm 6$ 秒和 $T_{1/2}(K_{\beta_1}) = 11 \pm 4$ 秒,它可能会受到紧靠后的强烈的Gd的x射线的影响。仅仅在能量为 109.7 ± 0.3 keV ($T_{1/2} = 8.7 \pm 1.4$ 秒)处发现有一条跃迁 γ ,其半衰期可以与这些x射线的半衰期相

比较,而且在各个配对的探测器的门中才有与Eu的x射线的弱符合。除此而外,没有哪一种情况能产生一条跃迁 γ 可以与109.7 keV这条跃迁 γ 在 E_γ 和 $T_{1/2}$ 上相一致。

^{161}Eu ,在 γ - γ 和 x - γ 符合和半衰期测量的基础上,确认出能量为 $71.9 \pm 0.2\text{keV}$ 、 $91.9 \pm 0.2\text{keV}$ 、 $163.7 \pm 0.2\text{keV}$ 、 $293.9 \pm 0.3\text{keV}$ 和 $314.3 \pm 0.3\text{keV}$ 的五条跃迁 γ 是属于 ^{161}Eu 的衰变,其中的四条立刻就拟合成 $^{160}\text{Gd}(d,p)$ 反应所产生的 ^{161}Gd 的能级图。半衰期 $T_{1/2}$ 值是对71.9keV、91.9keV和163.7KeV三条跃迁 γ 测量的平均。

^{162}Eu ,由于存在钷的不纯谱线和来自 ^{167}Eu - ^{157}Gd 的长寿命衰变的污染跃迁谱线,使研究发生困难。微弱的证据是来自半衰期为6秒的Eu的x射线,GMS谱是用周期时间 $\Delta T = 32$ 秒进行测量的。

对 $A = 163$ 和 $A = 164$ 的同量异位素来说,由于存在污染,所以还无结果可以报告。

我们还测量了另外三个核的半衰期,它们在过去已被人用别的方法测量过。既然在线质量分离器为获得这些核提供了不同的方法,因此有必要注意到我们的结果比起文献了报导的结果要低些,尤其在 ^{157}Sm 和 ^{160}Eu 的情况下特别低。

在 $A \approx 160$ 区域内新核的半衰期测量已经总结在表1中,通过对理论计算值的比较发现,Klapdor等人的模型结果一般是低于实验值,而Takahashi等人的模型结果统统高于实验值。对Yb、Lu、Ra和Ac等核也观察到类似的结果。

Klapdor等人的模型在大量的核上进行了检验。对那些半衰期小于1000秒的核,重复计算表明,有58%的结果使实验值与理论值之比不大于 α 。对表1中的核,有67%的结果使实验值与理论值之比不大于 α 。所以,在 $A \approx 160$ 区域内的新核,理论计算的值在所预期的极限内是靠得住的。这与 $A < 80$ 区域内许多新的同位素的结果形成鲜明的对比,在那里,仅仅有28%的计算结果使实验

值与理论值之比不大于2。此外,由于轻核的平均半衰期仅为3秒,它远小于表1中列出的核的半衰期,因此,人们先验地估计到:参考文献3的计算对它们会更加精确,而不是更差。

为了更加详细地评价参考文献3的计算,采用实验测定的半衰期值与理论计算的半衰期值的比是很方便的,其比值用R表示,它们已列在表1的第6列中。从表中可以看到,在 ^{168}Pm 和 ^{165}Tb 之间,R单调的降低。此外,在 ^{162}Pr 和 ^{166}Pm 与 ^{165}Tb 和 ^{168}Dy 之间,存在着一个与此相似的,但很突然的转向点,很明显,在这些转向点之间,R单调的降低,然后又突然跳开,形成锯齿形。在别的质量区域来研究这样的图形是我们感兴趣的。

自参考文献3发表以来,大约有50个新的同位素被发现,这些核参差不齐的散布在 $z = 6$ 到 $z = 89$ 之间的丰中子区域,但是,在 $z = 28$ 附近,新核形成了特别庞大的一群,它们为本结果提供了一个重要的比较。Bosch等人最近就 $z = 28$ 区域的新核的半衰期测量进行了编评,他在文章的图1中给出了实验结果与理论结果比值的图示说明。

在 $A \approx 160$ 质量区域观察到的锯齿形也在 $z = 28$ 的闭壳层附近出现,但它取了更极端的值。从Cr核开始,R值几乎单调的减小,直到0.1(对应Co核),然后在 $z = 28$ 处又突然跳到 $R = 2.5$ (对应Cu核)。根据这些数据,人们提出,锯齿形的转向点可能与壳层闭合有关。应当注意到, $^{64}\text{Co}(z = 27)$ 的实验结果与理论结果之间出现了很大的偏差($R = 0.03$),它被认为是一种孤立的乱真效应。这一结果和最近关于Co的新的同位素的结果与在 z 略低于28处观察到锯齿形的最深极值更是一致的。

按照上面所说的原因,仍然无法解释在 $A \approx 160$ 区域的那些转向点,对球形核,在 $z = 58$ 处,对 $g_{7/2}$ 壳层的闭合来说,这里有一个小小的支壳的那些核,其偏差取极值看起来是有些道理的。目前还难于估计观察到的

这些结果会在核合成的计算中产生什么样的影响，然而，上面的结果和讨论更加增强了 Mathew所说的在闭壳层近邻的核上还需要

做进一步的实验工作。

(李业祥译自《PHYSICAL REVIEW
LETTERS》 Vol. 56 № 15 1986)