

^{223}Ra 发射 ^{14}C 核的奇异核衰变

S. Gales*等

本工作采用强放射源 ^{227}Ac 和大立体角磁谱仪研究了 ^{223}Ra 发射 ^{14}C 核的奇异核衰变,经过五天的辐照后使用经过 ^{14}C 束校准的 $\Delta E-E$ 望远镜在预期的 ^{14}C 的位置观测到一组11个事件, ^{223}Ra 发射 ^{14}C 相对于发射 α 粒子的分支比是 $(5.5 \pm 2.0) \times 10^{-10}$ 与以前报告的分支比 $(8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$ 相符合。

Becquerel发现核的放射性衰变已经近一个世纪了。最近,英国牛津大学的H. Rose和G. Jones报告了新类型放射性衰变方式⁽¹⁾,这完全是出人意料的。他们认为, ^{223}Ra 核(半寿命为11.2天的 α 发射体)能够偶然地通过发射一个 ^{14}C 碎片衰变,属于天然衰变链中的核通过发射比 α 粒子重的碎片以减少它的电荷和质量这一现象是令人惊奇的发现,所以如果采用大为改进了的实验技术完成一个独立测量以证实第一个实验结果是很有必要的。

在H. Rose和G. Jones实验中,采用 ^{227}Ac 放射源($t_{1/2} = 21$ 年),由它而来的衰变链中(包括 ^{223}Ra)较低的成员是处于长期平衡中。该源直接放在 $\Delta E-E$ 望远镜系统前面,立体角等于 $\frac{1}{3}\text{sr}$,计数率可达到400计数/秒,经过189天,观测到总能量约为30MeV的11个事件。根据这一结果,他们认为,这些事件是 ^{223}Ra 发射的 ^{14}C 碎片,相对发射 α 粒子的分支比是 $(8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$ 。

我们实验的目的是使用磁谱仪方法以大大地减少收集时间和从高通量的 α 粒子中明确地鉴别出稀有的衰变方式。而且,我们采用同样的实验安排和 ^{12}C , ^{14}C 和 ^{16}O 离子束独立地确认观测到事件的性质和能量。

二个不同强度的放射源 ^{227}Ac 是在我们放射实验室制备的,一开始就使用相同的原始料材,把源沉降在Pt片上,源面积的直径是8mm。为了防止溅射,源表面用薄的碳膜加Formvar膜($20-30\mu\text{g}/\text{cm}^2$)覆盖,用有很好能量分辨的硅探测器在实验前后测量二个源的强度并且使实验的几何安排能保证重复和准确地测量探测器所张立体角。

表1给出了 ^{227}Ac , ^{227}Th 和 ^{223}Ra 的结果。这里我们要强调的是,如果按文献(1)的实验安排使用“强源”,则 α 粒子计数率将会达到 0.9×10^6 计数/秒。

这样一个“强放射源”必须和磁谱仪一起使用,因为磁谱仪能够去掉高通量 α 粒子并鉴别出稀有的衰变方式,放在磁谱仪焦面上的标准 $\Delta E-E$ 望远镜系统能够准确地鉴别发射的重碎片。为了充分利用源强度的优点,还需要一台大立体角磁谱仪($\sim 0.1\text{sr}$),幸好,可以用Orsay MP串行加速器实验室的超导螺旋磁谱仪,它的主要性能指标是:立体角 $0.05-0.1\text{sr}$,透射曲线 $\Omega = f(B\rho)$ 或

*法国奥赛核物理研究所

是类库仑能量。在协变截面图中观测到有质心速度的简单源。随着发射核电荷的增加,产额按接近指数的规律减少,角分布由 90° 到 180° 从平坦到向后成峰变化,并且能谱由马克斯威尔到高斯分布变化。这些数据表

明。在向后角度观测到的复杂核是来自平衡复合核。

[梁国照译自《Phys. Rev. Lett.》51

(1983)2187]

表 1 本实验使用的放射源强度

	^{227}Ac	^{227}Th	(a) ^{223}Ra
弱 (μCi)	3.3	3.3	2.80
强 (μCi)	247	247	210

(a) ^{227}Ac 和 ^{227}Th 源是在实验前一个月制备的, 因此在实验期间还未达到长期平衡。

立体角 Ω 与磁刚度的函数关系是呈钟罩形的, 动量分辨本领为 $\pm 4\%$ 。

为了这一特殊的研究, 图1(a)给出了实验安排的示意图。源放在磁谱仪内, 在像面内位与源前面1.53米, 由Si固体探测器组成的 ΔE -E望远镜系统用来鉴别出射粒子的原子序数和测量它的总能量。 ΔE 探测器厚度是 7.5μ , 面积是 200mm^2 , E探测器厚度是 200μ , 面积是 300mm^2 , 两个探测器都是在我们实验室制备的。使用 ^{241}Am 和 ThC 源的 $5.48, 6.05, 6.09$ 和 8.78MeV α 粒子对探测器做了初步校准。 ΔE 和 E 探测器的阈值分别为 0.5 和 1.5MeV 。

实验步骤如下:

首先, 使用强度较弱的 ^{227}Ac 源测量 SOLENO 的立体角和透射曲线, 调整电流使 Th 源的 6.038 和 5.978MeV 双线 α 粒子聚焦并且与用已知立体角探测器测量的相同 α 粒子计数率做比较。图1(b)表示导出的 $\Omega = f(B\rho)$ 透射曲线, 立体角最大值为 $0.115 \pm 0.002\text{sr}$ 。

其次, 为了尽可能测量出本底事件, 在不放置源 ^{227}Ac 和调整 SOLENO 中电流为零的条件下, 测量进行了五天。我们将在后面讨论得到的本底谱, 在整个实验结束时还要重复一次上述本底测量。

测量发射重碎片的方法如下: 调整 SOLENO 电流使得在 ΔE -E 望远镜中有选择性地聚焦我们所期望的 29.7MeV $^{14}\text{C}^{6+}$ 离子 (实验室系能量并且考虑了在源和碳膜中的能量损失) 6^+ 是最可几电荷态⁽⁴⁾。

对于 $I = 285\text{A}$, $B = 2.43\text{T}$, 磁谱仪有最大的立体角 [见图1(b)]。强源 ^{227}Ac 所辐射的高通量 $^4\text{He}^{++}$ 离子由于它们较低的磁刚度而

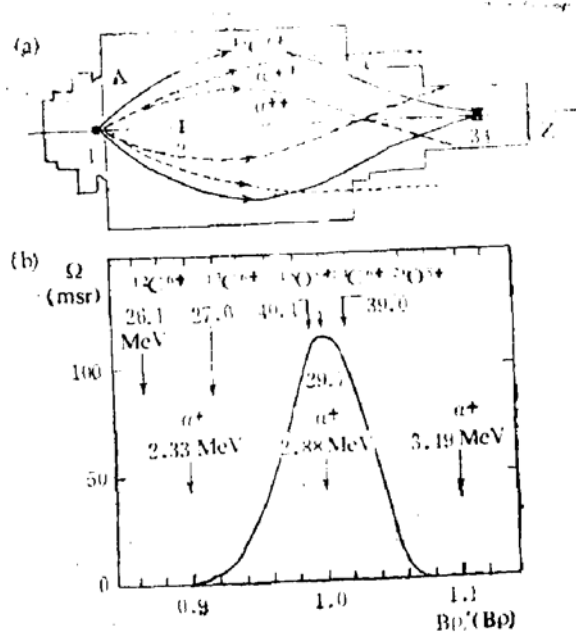


图1. (a) 本工作使用的实验装置示意图。1、是源的位置, A是入射孔径 (极限角度为 $\pm 20^\circ$) 2、是张角为 $\pm 4^\circ$ 的中间隔板。它阻止沿Z轴发射的 α 粒子进入 ΔE -E望远镜系统。3、4 ΔE -E望远镜系统的位置, 在这个图上, SOLENO的调整相应于 29.7MeV $^{14}\text{C}^{6+}$ 离子聚焦 (实线)。(b) 表示 SOLENO 磁谱仪的透射曲线。立体角 Ω 是粒子磁刚度 $B\rho$ 与中心磁刚度 $\langle B\rho \rangle = 0.49\text{Tm}$ 之比的函数, 透射曲线相应于图 (a) 所表示的情形, 同时也划出了其它可能的稀有衰变方式。

聚焦于探测器前面所张立体角为零。而具有很高 $B\rho$ 值的 $^4\text{He}^{++}$ 将要聚焦于 ΔE -E 探测后面很远, 所以它们也不会被探测器记录 [图1(b)], 只有能量在 2.33 和 3.49MeV 之间的低能 α 粒子在 SOLENO 透射曲线内 [图1(b)]。这些 α 粒子或者阻止在 $7.5\mu\Delta E$ 探测器中或者由于较低的能量阈值不能给出符合事件。

根据 Gamow 因子比⁽¹⁾ 和衰变可用的能量, 我们还计算了其它可能存在的奇异核衰变所处的位置并且与图1(b)中 SOLENO 透射曲线做了比较。我们注意到, H. Rise 和 G. Jones 没有考虑, $^{227}\text{Ac} \rightarrow ^{20}\text{O} + ^{207}\text{Te}$ 这种可能存在的稀有衰变方式, 但是在我们从 Gamow 因子比计算中导出的值可以和 $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{208}\text{Bi}$ 得到的值相比较。

从图1(b), 很明显, 仅仅 $^{18}\text{O}^{8+}$, $^{14}\text{C}^{6+}$ 和 $^{20}\text{O}^{8+}$ 以大立体角 ($\sim 100\text{msr}$) 被传递, 但是按

照选定的电流不能传递^{12,13}C⁶⁺离子。

使用标准的快慢符合技术获得关联的 ΔE -E事件。符合计数率约为2-4计数/秒。此外,用装有内计时装置T-1600SOLAR计算机测量每个符合事件到达时间T。事件(ΔE , E, T)被贮存在磁带中。

图2(a)是5天内得到的整个二维谱。在图的左下角,可以看到²¹⁹Ra, ²¹⁵Po和²¹¹Bi衰变产生的6.55, 7.39和6.62MeV α 粒子的等高图。从²²⁷AC源中逃逸的²¹⁹Rn, 望远镜系统探测了它衰变的子核(²¹⁵Po和²¹¹Bi)。与这些 α 峰有关的无规符合事件位于沿 ΔE (~ 1 MeV)和E(5-6.5MeV)线上。

在 ΔE -E平面中间区域,观测到一组与 α 粒子分开的11个事件。它们在 ΔE 探测器中能量损失(6.8 ± 0.7 MeV)与碳离子在 $7.5 \mu\text{mSi}$ 探测器中所预期的能量损失符合得非常好。测量的总能量等于 29.4 ± 1.2 MeV, 与根据 φ

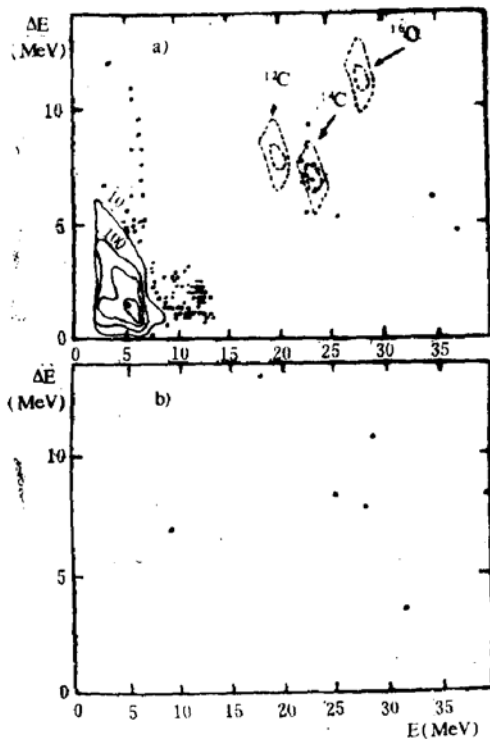


图2. (a)是使用强源²²⁷AC和调整磁谱仪电流与图1(a)相应,5天内测量的 ΔE -E二维谱。图的中间一组11个事件相当于²²³Ra发射的¹⁴C核。虚线表示弹性散射¹²C, ¹⁴C和¹⁶O离子所处的位置(见正文) (b)在无²²⁷AC源和磁谱仪中无电流条件下5天内测量的 ΔE -E谱。在“本底”测量时观测到6个无规分布事件。

值和能量损失得到的计算值(29.7MeV)非常接近。

我们也观测到无规分布的另外6个事件,图2(b)表示了磁谱仪中未加电流和不放²²⁷AC源5天内测量的 ΔE -E谱。在测量可能的本底时也探测6个事件,这些事件是由于²⁵²Cf裂变产物对探测器少量粘污所引起的。事实上,这个源最初被用来检验 ΔE 探测器对重粒子的能量响应。令人满意的是,本底谱很好地解释了在图2(a)中不能鉴别的6个事件。

为了独立地确认观测到与¹⁴C衰变相应的事件,我们用Orsay MP串列加速器提供的¹²C, ¹⁴C和¹⁶O离子束进行了弹性散射实验。入射束轰击厚度 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 无衬碳靶。在实验室角度 $8.3 \pm 0.2^\circ$ 弹性散射粒子¹²C⁶⁺, ¹⁴C⁶⁺和¹⁶O⁸⁺经磁谱仪聚焦并为 ΔE -E望远镜系统所记录。我们是这样选择每种入射离子束能量的,使¹²C⁶⁺, ¹⁴C⁶⁺和¹⁶O⁸⁺离子在实验室系弹性散射能量准确地等于相应的重碎片能量,即是,对¹²C是26.1 MeV,对¹⁴C是29.7 MeV和对¹⁶O是39.0 MeV。[假定²⁰O碎片是39.0 MeV,见图1(b)]。图2(a)中的虚线表示了¹²C, ¹⁴C和¹⁶O的极大的1/2和1/10的等高线。

很清楚,在这个校准前观测一组11个事件的位置和望远镜系统对29.7MeV¹⁴C⁶⁺离子的响应完全符合,¹²C和¹⁶O二个等高线都远离观测的这些事件。

根据这些结果,观测到的重碎片明显地相应于¹⁴C,它的总能量也和²²³Ra衰变为¹⁴C + ²⁰⁹Pb预期的能量很好地符合。我们想强调一下,SOLENO磁刚度的选取和用弹性散射的¹²C, ¹⁴C, ¹⁶O离子独立地检验都排除发射碎片为¹²C, ¹³C, 和¹⁸O和²⁰O核的可能性,这个鉴别不涉及Gamow因子比或者预形成几率考虑。而文献(1)的作者是根据Gamow因子比和预形成几率的计算排除了存在其它衰变方式的可能性。况且,我们从总能量测量

(下转33页)

(上接21页)

得出结论： ^{14}C 碎片是 ^{223}Ra 核的衰变产物，因为像 ^{227}Th 和 ^{219}Ra 可能发射的 ^{14}C 离子在实验室系能量分别为27.6和26.2MeV，这些值超出了我们的测量值 $29.4 \pm 1.2\text{MeV}$ 误差之外。

由测定的 ^{223}Ra 活性，立体角和29.6MeV碳离子6+电荷态的百分比，我们导出 ^{223}Ra 发射 ^{14}C 相对于发射 α 粒子的分支比是 $(5.5 \pm 2.0) \times 10^{-10}$ 。这个结果与H. Rose和G. Jones两人从实验推出的分支比 $(8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$

是符合的。

根据实验结果，我们的结论是： ^{223}Ra 发射 ^{14}C 这种奇异核衰变已经是确定无疑的了。超导磁谱仪SOLENO与强放射源相配合对于进一步研究类似的稀有衰变方式是一种理想实验手段。我们认为，使用更强的源即使发射重碎片的分支比比本实验值低1—2个数量级也是能观测到的。

(刘国兴译自Phys. Rev. Letters, 53(1984)759吴国华校)