

质子滴线附近奇异核粒子衰变研究

徐晓冀

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文描述了对质子滴线附近奇异核研究的意义及近几年研究工作的进展,并对 $T_z = -3/2, A = 4n + 1$ 和 $A = 4n + 3$ 系列核的研究作了较详细的叙述,同时报告了我们对 ^{20}Na 衰变研究的最新结果.

关键词 质子滴线, 奇异核, β 延迟粒子衰变, 同位旋相似态(IAS).

将原子核的质量 M (也即能量) 随质子数 Z 和中子数 N 的变化作图, 稳定核素都处于这曲面的所谓“稳定谷”中, 不稳定核素则处于高于稳定谷的“山坡上”, 越远离稳定谷山坡越陡; 这样, 远离 β 稳定线核由于其核内反常的中子-质子比, 整个系统就具有较高的能量. 例如, $T_z = -3/2, A = 4n + 1$ 系列核, 其 β^+ 衰变能 (Q_β) 在 12~18MeV 范围, 某些质子滴线附近的核其 Q_β 值已高达 20MeV, 处于这样高能量的核一般难于通过一次 β 衰变达到稳定的基态, 它们或通过多次 β 衰变, 或 β 衰变后再发射粒子 (质子、 α 粒子、 γ 或裂变碎片等) 以趋于稳定, 后者叫做 β 延迟粒子衰变. β 延迟粒子衰变的必备条件, 是 β 衰变子核必处于高于粒子结合能和粒子发射阈能的激发态. 当然, 原子核也可能不经 β 衰变而发

射粒子, 这叫做直接粒子发射, 图 1 展示了各种可能的 β 延迟或直接粒子发射的衰变道. β 延迟或直接粒子发射, 是远离 β 稳定线核 (也称为奇异核, exotic nucleus) 特有的衰变模式. 目前, 所发现的 β 延迟质子 (β -P) 和 β 延迟中子 (β -n) 先驱核分别都超过了 100 种. 1982 年, 发现了 β 延迟双质子 (^{22}Al 及 ^{26}P) 衰变 (β -2P)^[1], 近几年又发现了 ^{31}Ar β 延迟三质子^[2] 及 ^{17}B β 延迟四中子等更为奇特的衰变模式. 继发现 $^{53\text{m}}\text{Co}$ (^{53}Co 的同质异能态) 的直接质子发射以来, 又发现了 ^{147}Tm 、 ^{151}Lu 、 ^{113}Cs 和 ^{109}I ^[3] 等直接质子发射体. 理论预言, 如果核的质子结合能大于零而双质子结合能小于零, 则有可能观察到核的直接双质子发射 ($2p$)^[4], 为揭示出这种诱人的衰变机制, 近来法国和美国的科学家对 ^{39}Ti 作了大量探索, 但

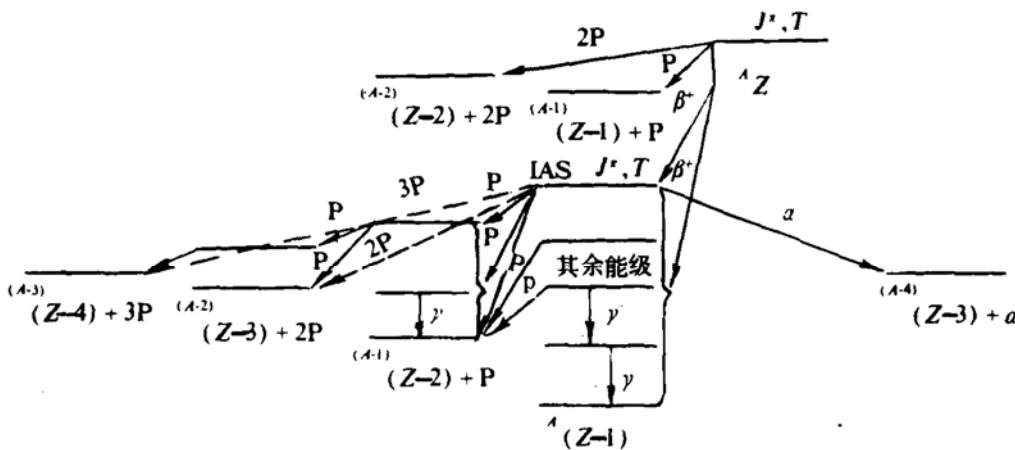


图 1 缺中子奇异核可能的衰变方式

到目前为止,其结果是否定的^[5]. 奇异核的 β 延迟或直接粒子衰变本质地反映了核内的相互作用关系,对它的深入研究,将拓广人们对核物质世界的认识,具有理论和实际意义.

1 我们关注的三个问题

1.1 对两个核系列的探索

(1) $A=4n+1, T_z=-3/2$ 核系列:从 ${}^9\text{C}$ 到 ${}^{61}\text{Ge}$ 都是通过探测其 β 延迟质子而发现的,特点是,先驱核以很大的分支比通过超允许 β 跃迁衰变到子核中高于粒子结合能的同位旋相似态,然后再发射粒子,此系列能否再向远离 β 稳定线区域伸延,还有待于研究. 下两个目标核是 ${}^{95}\text{Se}$ 和 ${}^{69}\text{Kr}$,它们存在吗? 理论预言其质子结合能均在 1MeV 左右,而且应该是 β 延迟质子衰变先驱核^[6],这需要由实验来检验. 另一特点是,先驱核 β 衰变子核的同位旋相似态激发能随 A 值增加而降低, β^+ 衰变分支比也愈来愈大,这种系统性趋势在核结构和核内相互作用上反映了什么? 有待于研究.

(2) $A=4n+3, T_z=-3/2$ 系列:特点是, β^+ 衰变子核的同位旋相似在质子结合能之下,先驱核以较强的盖莫夫—泰勒(Gamow—Teller)跃迁布居到子核中高于粒子结合能之上的激发态,然后再发射粒子^[7]. 到目前为止,已发现的核有: ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{17}\text{Cl}$ 及 ${}^{19}\text{K}$,它们都是 β 延迟质子先驱核,如此系列再向两头伸延,就到了 ${}^{11}\text{Na}$ 及 ${}^{13}\text{Sc}$,它们存在否? 理论预言其质子结合能分别为 -0.3 和 -0.7 MeV,应该不存在;但是,由于低能质子从核内发射,它穿过库仑位垒和离心位垒(由核的角动量造成)要有一定的渡越时间,因此,是否会有核的 β 衰变和直接质子发射两个衰变道的竞争? 这需要实验探测来验证. 对这些核的粒子衰变的探测也是测量 G-T 跃迁强度的有效手段.

1.2 对 Y-Pd 区高温难熔缺中子核的探测

这些核熔点在 1500°C 至 2600°C ,在质量分离中有一定困难,但其 $Q_{\beta^-} B_r$ “窗”较大(约

$3\sim 5$ MeV),有一定的 β -P 几率,可用 P-X, X- γ , β - γ 及 γ - γ 等符合测量手段,对新核素进行 A, Z 指定并推知衰变纲图. 最近,日本九州大学用 β - γ 符合方法并结合子核的在束 γ 谱学研究了 ${}^{58}\text{Ni}({}^{32}\text{S}, \text{Pn})$ ${}^{88}\text{Tc}$, ${}^{60}\text{Ni}({}^{32}\text{S}, \text{P2n})$ ${}^{89}\text{Tc}$ 及 ${}^{54}\text{Fe}({}^{28}\text{Si}, \text{P2n})$ ${}^{79}\text{Y}$ 反应,发现了 ${}^{88}\text{Tc}$, ${}^{89}\text{Tc}$ 和 ${}^{79}\text{Y}$ ^[8]. 一年前,我们曾提出与此相同的方案,日本的工作说明这条技术路线是可行的. 其中 P-X 符合是直接测量核能级密度的唯一有效方法,在核结构理论与实验的互相验证上很有意义.

1.3 对特殊核衰变方式的研究

这里主要指 β 延迟双质子以上的多粒子衰变和直接质子衰变研究,它只能在质子滴线附近原子核结合比较松散的情况下发生. 据我们的理论预测^[9],可能的 β -2p 核有: ${}^{22}\text{Si}$, ${}^{23}\text{Si}$, ${}^{47}\text{Fe}$, ${}^{46}\text{Mn}$, ${}^{43}\text{Cr}$ 和 ${}^{50}\text{Co}$ 等. 最近,在法国 GANIL 已发现 ${}^{47}\text{Fe}$, ${}^{46}\text{Mn}$ 和 ${}^{43}\text{Cr}$,并观察到 ${}^{46}\text{Mn}$ 和 ${}^{43}\text{Cr}$ 的 β -2p 衰变^[9];可能的 2p 核有 ${}^{39}\text{Ti}$, ${}^{38}\text{Ti}$, ${}^{34}\text{Ca}$, ${}^{42}\text{Cr}$, ${}^{18}\text{Mg}$ 和 ${}^{16}\text{Ne}$ 等. 对核双质子发射的角关联探测,有助于探明核内双质子形成与发射机制,可对强子之间相互作用和六夸克集体态理论提供实验验证. 这些核的寿命一般都很短,熔合蒸发反应的截面极小,有效的合成手段是用放射性束流轰击放射性靶(或 $N=Z$ 的靶),探测方法用具有多探测器粒子望远镜的反冲飞行谱仪;GANIL 已用它探测到三十几个滴线附近的缺中子和丰中子奇异核,并对其中一些核进行了延迟粒子谱学的衰变研究.

另外,实验中也考虑了在天体核物理研究中有重要意义的核,例如 ${}^{20}\text{Na}$ 和 ${}^{65}\text{As}$ 等^[10].

2 已开展的研究工作

2.1 建立氦喷嘴系统

为探测短寿命和很低产生截面的缺中子奇异核,并进行延迟粒子谱学衰变研究,我们建立并不断完善了一台氦喷嘴系统(He-jet),它由多靶、转动收集盘和多粒子望远镜配置. 该系统的特点是:(1)对核衰变可同时进行粒

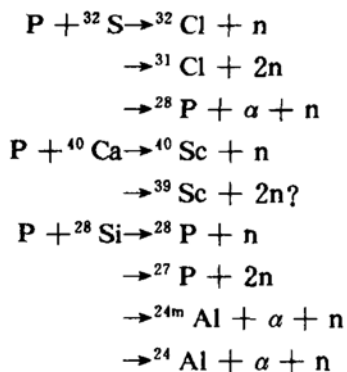
子鉴别、粒子能谱和半衰期测量,它适合于探测半衰期短至 10ms 的核素;(2)对于探测较长寿命(半衰期在 1s 至 1min 量级)的中重核 ($70 < A < 150$) 衰变,可将 He-jet 的收集盘由连续式改为步进式;(3)在收集活性的同时,在另一地点探测的时间约为 3 至 5 倍半衰期;(4)在探测处可配置 β 、 γ 或 X 探头和粒子望远镜,以进行符合测量. 我们已精确计算了 He-jet 系统转盘收集的探测效率^[11]. 下述实验研究均用氦喷射技术进行.

2.2 理论计算衰变特性

对 $A < 70$ 缺中子奇异核粒子衰变的性质作了理论预言计算^[6], 计算主要考虑了先驱核最可几的超允许 β 跃迁的延迟粒子衰变, 基于 Kelson-Garvey 质量关系和同位旋相似态跃迁理论, 对近 100 个未知核作了计算, 得到核的质量剩余 (Δm)、半衰期、粒子发射分支比 (B)、核的单质子和双质子结合能 (B_p 、 B_{2p}), 以及各种可能衰变模式的粒子能量等. 对比最近几年国内外研究工作的进展, 此预言与实验结果符合得很好.

2.3 $T_z = -3/2, A = 4n + 3$ 轻核粒子衰变的实验研究

实验于 1990 年 12 月至 1991 年 1 月在高能物理研究所质子直线加速器上进行, 以 35.5MeV 质子轰击 ZnS、Si 及 Ca 靶, 预期的核反应道如下:



所用实验装置为多靶多毛细管的 He-jet

系统, 由于实验中只探测带电粒子, 以及反应阈能的限制, 非以上反应道均被排除.

在质子分别轰击 ZnS、Si 和 Ca 所得的粒子谱中, 预期的 ${}^{32}\text{Cl}$ 、 ${}^{31}\text{Cl}$ 、 ${}^{28}\text{P}$ 、 ${}^{27}\text{P}$ 、 ${}^{24}\text{Al}$ 、 ${}^{24m}\text{Al}$ 和 ${}^{40}\text{Sc}$ 的 β - α 及 β -P 谱线均能看到. 在质子轰击 ZnS 及 Si 反应中, 由于 ${}^8\text{B}$ (由 ${}^{12}\text{C}(P, \alpha n)$ 反应产生, ${}^{12}\text{C}$ 来自真空中的碳沾污) 的 β - α 本底噪声较大, ${}^{27}\text{P}$ 的统计计数很少, 妨碍了对其半衰期的测量. 此外, 明显地出现 ${}^{20}\text{Na}$ 的 β - α 谱线, 据分析, ${}^{20}\text{Na}$ 是由 He 中 Ne 的杂质通过 ${}^{20}\text{Ne}(P, n)$ 反应而产生. 注意到在 0.73MeV 附近有一个较强的新峰, 对比 P+ZnS 反应中第一与第二探测器所测的谱中峰下积分计数, 推测其半衰期约为 53ms, 怀疑可能是 ${}^{19}\text{Na}$ 的 β -P 谱线, 而 ${}^{19}\text{Na}$ 可能由 ${}^{20}\text{Ne}(p, 2n)$ 反应产生 (阈能为 30.5MeV). 在质子轰击 Ca 反应中, 得到了较好的粒子鉴别谱及相应的 ${}^{40}\text{Sc}$ β 延迟质子谱, 在 0.7MeV 附近也发现了一个新峰, 它是否也是 ${}^{19}\text{Na}$ 或 ${}^{39}\text{Sc}$? 将有待进一步的实验来验证.

2.4 探索 $T_z = -3/2, A = 4n + 1$ 系列核

实验于 1991 年 6 月在中国原子能科学研究院核物理所的串列加速器上进行, 用 $N = Z$ 的重离子炮弹轰击 $N = Z$ 的靶, 通过熔合蒸发反应, 合成缺中子的 β 延迟质子先驱核, 并探索产生新核素 ${}^{65}\text{Se}$ 及 ${}^{69}\text{Kr}$ 的可能性.

用 104.0、115.5 和 127.2MeV 的 ${}^{28}\text{Si}$ 轰击天然 Si 靶, 测到了 ${}^{53m}\text{Co}$ 的直接质子发射谱和 ${}^{53}\text{Ni}$ 的 β 延迟质子谱. ${}^{53m}\text{Co}$ 和 ${}^{53}\text{Ni}$ 分别由 ${}^{28}\text{Si}({}^{28}\text{Si}, p2n)$ 、 ${}^{28}\text{Si}({}^{28}\text{Si}, 3n)$ 反应产生, 测到 ${}^{53m}\text{Co}$ 的半衰期为 218ms, ${}^{53}\text{Ni}$ 半衰期 $< 85\text{ms}$, 与国外结果较一致; 实验还得到 ${}^{53m}\text{Co}$ 的相对激发函数, 考虑到 ${}^{53m}\text{Co}$ 与 ${}^{53}\text{Ni}$ 的质子分支比和探测效率的不同, 得到了它们的实验截面比 $\frac{\sigma_e({}^{53m}\text{Co})}{\sigma_e({}^{53}\text{Ni})} = 553$, 它与 Alice 的计算截面之比 $\frac{\sigma_A({}^{53m}\text{Co})}{\sigma_A({}^{53}\text{Ni})} = 518$ 很接近.

用 128.2MeV ${}^{32}\text{S}$ 轰击天然 Ca 靶, 用粒子鉴别技术得到了质子谱; 在谱中 1.88、2.23

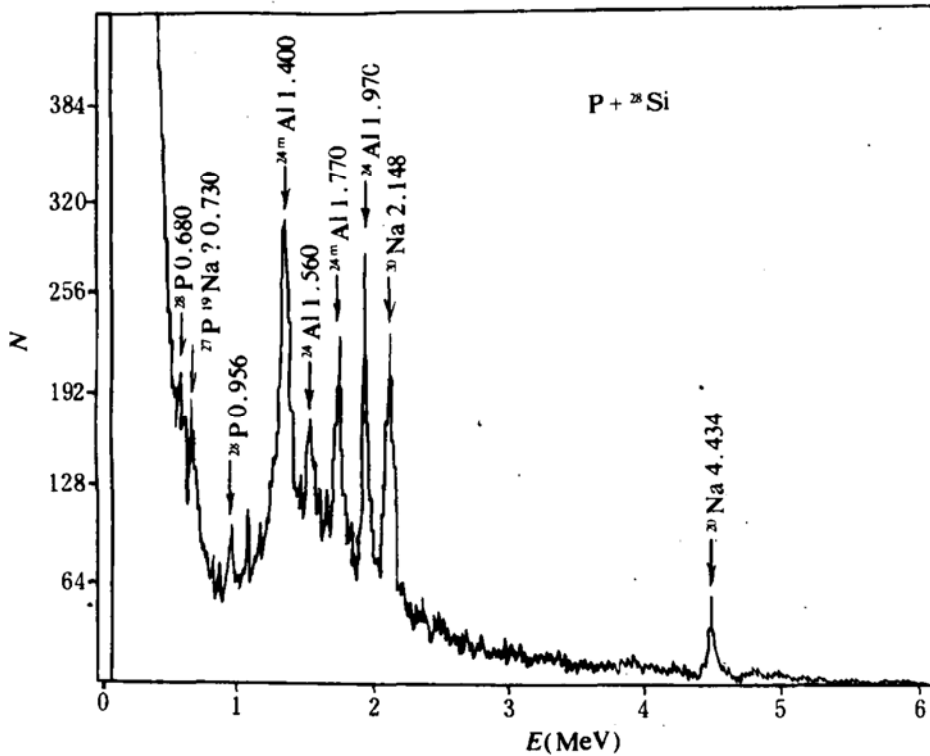


图 2 P+²⁸Si 反应中测到的带电粒子谱

和 2.46MeV 处有相对突出的峰,它相应于 ⁶⁸Se 的 β-P 衰变,⁶⁸Se 由 ⁴⁰Ca(³²S, 2pn) 反应产生,注意到在本底很干净的质子谱中,在 3.7 MeV 处观察到了个别计数,该能量与预言的 ⁶⁸Se β-p 质子能量相符,它是否是 ⁴⁰Ca(³²S, α3n) 反应产生 ⁶⁸Se 的迹象? 还要由实验来验证. 由于氦喷嘴技术对惰性气体不灵敏,实验中几乎不可能观察到 ⁶⁹Kr.

2.5 ²⁰Na β 延迟 α 衰变研究

以 35.5MeV 质子轰击气体氖靶,得到 ²⁰Na 的 β 延迟 α 衰变谱,其五个主要 α 峰能量、强度比以及半衰期都与国外结果很一致^[12]. 在低能部分 0.78MeV 处,发现一个新峰,经粒子鉴别是 α 峰,以六种不同收集盘转速测量,此峰与 ²⁰Na 最强峰(2.148MeV)之强度比基本保持不变. 我们断定:这是首次观察到的 ²⁰Na 的 β 延迟低能 α 衰变(图 3). 根据是:(1)此峰对 ²⁰Na 峰的强度比不变,意味

着它的半衰期和 ²⁰Na 的相同;(2)0.78MeV 峰所对应的 α 衰变能(0.975MeV)正好与 ²⁰Na β⁺ 衰变子核 ²⁰Ne 的两激发态(5.785MeV 和 5.622MeV)与 ¹⁶O 基态(4.734MeV)能量差的平均值(0.970MeV)相当;(3)0.78MeV 的新衰变道遵守角动量和宇称守恒律(1⁻→0⁺ 和 3⁻→0⁺);(4)根据对所有可能的反应道分析,超过反应阈能而又产生 β⁺ 延迟 α 衰变的先驱核只有 ²⁰Na. 为此,我们补充提出了 ²⁰Na 的 β 延迟 α 衰变纲图. 应该指出的是,根据已知的 ²⁰Ne 激发态能级,并考虑到探测器的能量分辨不够好,该 0.78MeV 峰可能是未分辨开的两个峰,它们分别对应于 ²⁰Ne 的 5.785MeV 和 5.622MeV 两激发态到 ¹⁶O 基态的 α 跃迁,这需要进一步的实验来验证. ²⁰Na 是天体物理研究中引入瞩目的核,它与突发快质子(γ p)过程紧密相关^[10],仔细地研究 ²⁰Na 的衰变性质啊将有重要的意义.

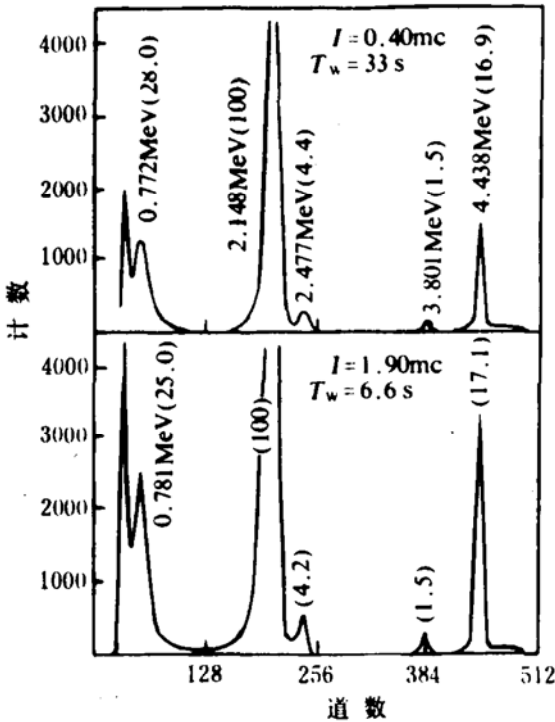


图 3 在 $P+^{20}\text{Ne}$ 反应中观测到的 ^{20}Na β 延迟 α 谱
注:峰能量后数字为强度比, I 为积分束流,
 T_w 为收集盘转动周期

3 今后几年的设想

沿着远离 β 稳定线方向继续搜寻 $T_z = -3/2, A = 4n + 1$ 系列核. 在次级束流线建成之前, 用 $N = Z$ (或尽量缺中子的) 重离子炮弹和靶引起的熔合蒸发反应, 并采用氦喷

咀或束流脉冲化技术, 探索新核素的存在, 研究这些奇异核的衰变性质, 开展 Tc、Ru、Rn 等高温难熔缺中子核素的研究; 用缺中子炮弹引起的重离子反应和符合测量技术, 争取对一、二个核进行较详细的核衰变研究, 在条件具备的情况下, 争取对 ^{50}Co 等核开展 β 延迟双质子衰变研究.

参 考 文 献

- 1 Cable M D, et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 50(6) : 404
- 2 Bazin D, et al. Phys. Rev. C, 1992, 45(1) : 69
- 3 Gillitzer A, et al. Z. Phys. A - Atomic Nuclei, 1987, 326 : 107~119
- 4 Gol' danskii V I. SOVIET PHYSICS USPEKHI, 1966, 1(5) : 770
- 5 Detraz C, et al. GANIL P, 1990, 13
- 6 徐晓冀, 区秀兰, 程远. 高能物理与核物理, 1991, 15(7) : 630
- 7 Aysto J, Xu X J, et al. Physical Review C, 1985, 32(5) : 1700
- 8 Mukai J, et al. KYUSHU University Tandem Accelerator Laboratory Report (1988~1990)123~141
- 9 Borrel V, et al. Nuclear Physics GANIL 1989~1991, a COMPILATION
- 10 Ernst Roeckl. Rep. Prog. Phys., 1992, 55 : 1661~1714
- 11 徐晓冀, 刘作屏. 原子能科学技术, 1990, 24(5) : 54
- 12 Torgerson D F, et al. Physical Review, 1973, C8 : 161

Particle Decay Study of Exotic Nuclei near Proton Drip Line

Xu Xiaoji

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract The significance and recent progress about studying the nuclei near the proton drip line is described. The description in detail is focused on the study of nuclei series with $T_z = -3/2, A = 4n + 1$ and $A = 4n + 3$. Also, the latest results on the decay study of ^{20}Na are reported.

Key Words proton drip line, exotic nuclei, β -delayed particle decay, isospin analog state (IAS).