

从 ISOL 到放射性束加速

黄业成

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文介绍远离稳定性核素研究的一些重要成果,说明从 ISOL 到放射性束加速的发展趋势.

关键词 在线同位素分离器,放射性束加速,远离稳定性核素,核天体物理.

1 在线同位素分离器

在线同位素分离器 (ISOL) 是合成新核素,研究短寿命核衰变性质和核结构的一种大型实验设备. 它可与反应堆中子在线,研究质量介于 75 至 155 之间的裂变产物. 与高能质子束相连时,由散裂反应可生成分布很宽的缺中子核素和大质量的丰中子核素;也可通过靶核碎裂生成质量较小的碎裂产物或由靶核裂变生成裂变产物. 对于低能重离子,主要由熔合反应生成缺中子核素,或通过炮弹与靶核之间的若干个核子转移生成裂变区以外的丰中子核素. 对中能重离子则生成炮弹碎裂产物或由其它的反应机制生成重剩余核,用人工方法合成核素的分布如图 1 所示.

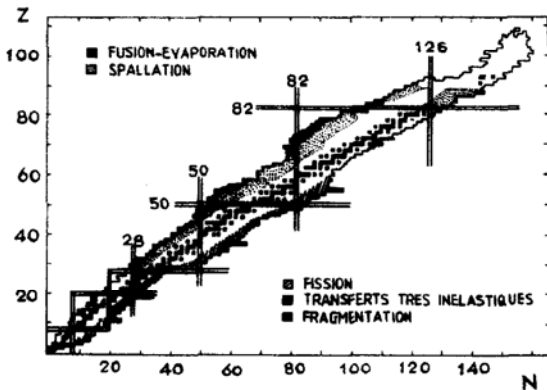


图 1 核素图

传统的 ISOL 由靶离子源、质量分析器、

束流光学系统、带传输和探测站等部件组成. 当核反应发生后,反冲被阻止,并在高温条件下重新释放,扩散到离子源内被电离和加速. 释放和扩散速度依赖于反冲和阻止物质的物理化学性质以及离子源的工作特性. 核素从产生到被探测存在一个时间延迟,延迟时间过长,不利于短寿命核素的研究. 一般说来, ISOL 可分离半寿命为 10ms 量级的核素 (如 ^{11}Li , $T_{1/2}=8.7\text{ms}$).

针对稀土元素高温难熔、不易蒸发电离的特点,应用激光离子源是一种可行的办法,目前国际上正处于对源体特性测试和离线调试阶段. 用离子引导 (Ion Guide) 取代离子源已在质子束引起的反应研究中获得成功. 由于离子引导不需要传输管和电离器,反冲直接通过 He 气迅速传输至分离器的引出系统,延迟时间可缩短至 1~0.1ms 量级,有利于短寿命核素的探测. 由于引出效率和分辨本领比较低,而且还需要一个庞大的真空系统,因而限制了 Ion Guide 在 ISOL 的广泛应用. ECR 离子源用于 ISOL 又是一种尝试,已在一些实验室投入使用. ISOL 技术的改进和发展,为我们提供有力的实验手段.

2 远离稳定性核素的研究

回顾 1966 年 ISOL 出现之后奇异核的研究状况,我们将看到一幅令人警奇的物理图像. 虽然这里涉及的仅是其中的一部分,绝

非这一学科的全部内容。

2.1 核素图边界的大大扩充

自然界存在的稳定核有 260 多个, 放射性核素约 60 个。自 1934 年 F. 约里奥和 I. 居里发现人工放射性以来, 至今已合成 2000 多个核素, 其中大部分是由 ISOL 产生的, 以平均每年 40 个的速率增长。按目前的实验条件考虑, 估计还有 600 个核素可以合成, 它们大部分分布在丰中子区。如仍按 40 个/a 的速率计算, 还有 15 年的工作可做, 但离达到核素分布极限(滴线位置)仍很遥远。

2.2 新衰变模式

从长寿命放射性同位素中, 人们知道有 β^+ 衰变、 β^- 衰变和 α 衰变等几种衰变方式。由于对远离 β 稳定线核素的研究, 人们还发现了 β^- 延迟中子、二中子、三中子乃至四中子衰变; β^- 延迟 d 发射 (^6He 核); β^+ 延迟质子、双质子、三质子 (^{31}Ar 核) 衰变和直接质子衰变 (^{151}Lu 、 ^{147}Tm 、 ^{109}I 和 ^{113}Cs 等); 新 α 衰变岛; 甚至重离子 ^{14}C 、 Ne 和 Mg 衰变。

2.3 新形变区的发现

接近 ^{31}Na 和 ^{32}Mg 的形变区已被详细地研究过了, 这是通过原子核质量的直接测量画出双中子分离能 S_{2n} 对质子数 Z 的变化曲线而发现的, ^{31}Na 和 ^{32}Mg 的中子数均为 20, 是中子幻数, 这两个核素应是中子满壳核, 实验资料表明它们却是形变的。对其它新形变区(例如 $A \sim 100$, $N=60$ 的大形变区)的研究也为远离稳定性核素的核结构提供新的知识。

2.4 双幻核和亚幻核

原子核结构的壳模型理论已为稳定谷附近核素的实验资料所证实, 对远离稳定性核素将是怎样的呢? 除了人们熟知的幻数(这里称作主幻数)外, 是否还有新的幻数存在? ^{132}Sn 是非常远离稳定线的丰中子核素, 从它的第一激发态 (2^+ 态, 4MeV) 已充分显示了 ^{132}Sn 具有非常典型的双幻核特性。与 ^{132}Sn 遥遥相望的是很缺中子核素 ^{100}Sn , 这是

人们最感兴趣的核素之一, 现正寻找各种途径以便尽早合成它。 ^{56}Ni 是没有 β^+ 衰变的缺中子双幻核, ^{78}Ni 也正被逐步逼近之中。

诸如 $^{88}\text{Ni}_{40}$ 、 $^{88}\text{Zr}_{40}$ 、 $^{88}\text{Zr}_{50}$ 、 $^{88}\text{Zr}_{56}$ 和 $^{164}\text{Gd}_{82}$ 已被证实是双幻核(这里称作亚幻核), 它们的幻性不像主幻核(如 $^{132}\text{Sn}_{82}$ 、 $^{208}\text{Pb}_{126}$ 等)那么强。只有当亚幻数与另一幻数相遇, 幻性被加强时才显出双幻核的特性。上述例子中, $^{88}\text{Ni}_{40}$ 是亚幻数 $N=40$ 被主幻数 $Z=28$ 加强, $^{164}\text{Gd}_{82}$ 是亚幻数 $Z=64$ 在 $N=82$ 主幻数中被加强, 而 $^{88}\text{Zr}_{40}$ 则是两个亚幻数相互加强。亚幻数的存在是奇异核的核结构特性之一。

2.5 滴线附近的原子核

最近几年, 在缺中子区对 $Z=29$ 以下的, 大多数 Z 值及 $Z < 8$ 的丰中子区, 已分别到达质子滴线和中子滴线。滴线上的原子核最后一个核子的结合能为零 ($B_n, B_p=0$), 其结构与稳定核有很大的不同, ^{11}Li (还有 ^8He 、 ^{14}Be 和 ^{17}B 等) 具有异常大的核半径。若把 ^{11}Li 看作是 ^9Li 核芯和无核结构的双中子组成的二体系统, 那末, ^{11}Li 异常大的半径是由两个外层中子的弱束缚所致。

由于实验条件和反应机制的限制, 目前还不可能利用现有加速器所能加速的荷电粒子(基本上属于稳定的原子核)产生非常远离稳定线的核素。如果我们能够加速一些本来就是很丰中子(或很缺中子)的放射性原子核, 那末, 由此而合成的核素将更丰中子(或更缺中子), 在质量较大的区域也有可能到达核素分布的极限。实现放射性束加速, 不但可以深化 ISOL 物理, 而且还可以把研究领域大大地拓广。

3 二次束流线

二次束流线是从研究炮弹碎裂发展起来的一种实验设备, 它可以接受半寿命很短的核素, 但由于质量分辨低且只能接收 0° 的产物, 因此, 它不像 ISOL 那样具备灵活性和通

用性的特点. 作为 ISOL 的补充和发展, 二次束流线在炮弹碎裂研究中可充分发挥其作用 (如法国 Ganil 的 Lise).

如把二次束流线接收的碎裂产物 (具有相当高的能量) 作为炮弹轰击第二个靶子, 可进行核反应研究, 国际上已有多个实验室建造这种装置. 中国科学院近代物理研究所 HIRFL 实验大厅的二次束流线也在筹建之中. 然而, 由于二次束流线接受角度小 (一般为 5 毫弧度), 能散大、分辨低及对荷电粒子能量的不可选择等缺点, 作为放射性束加速装置, 其局限性是显而易见的.

4 放射性束加速

放射性束加速 (方框图见图 2) 是基于核天体物理要求提出来的. 用高能质子束 (或 α) 轰击厚靶可获得较高产额的 ^{13}N 、 ^{14}O 、 ^{15}O 、 ^{17}F 、 ^{22}Na 和 ^{26}Al 等放射性束供核天体物理研究. 如果后加速的能量可变 (或分级加速) 并高于库仑位垒时, 利用各种反应产生的放射

性束可以进行更深层次的核物理研究.

1991 年 9 月 2 日至 6 日, 在日本仙台召开的第 12 届国际电磁同位素分离器会议 (EMIS-12) 上, 放射性束加速作为一个专题列入大会报告项目, 现将日本的 E-Arena 装置 (JHP 强子计划) 介绍如下, 以便对放射性束加速有一个基本的了解.

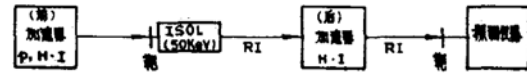


图 2 放射性束加速装置方框图

E-Arena⁽¹⁾ 的结构如图 3 所示, 它由一台 1GeV 的质子直线加速器 (前加速)、一台 ISOL 和一系列的后加速器组成. 各种放射性核素由 1GeV 的质子轰击厚靶主要经过散裂反应产生, 由 ISOL 进行质量分析, 选择特定的放射性核素送至后加速器, 进行三级加速, 每一级的能量分别达到 0.17、1.4 和 6.5MeV/u.

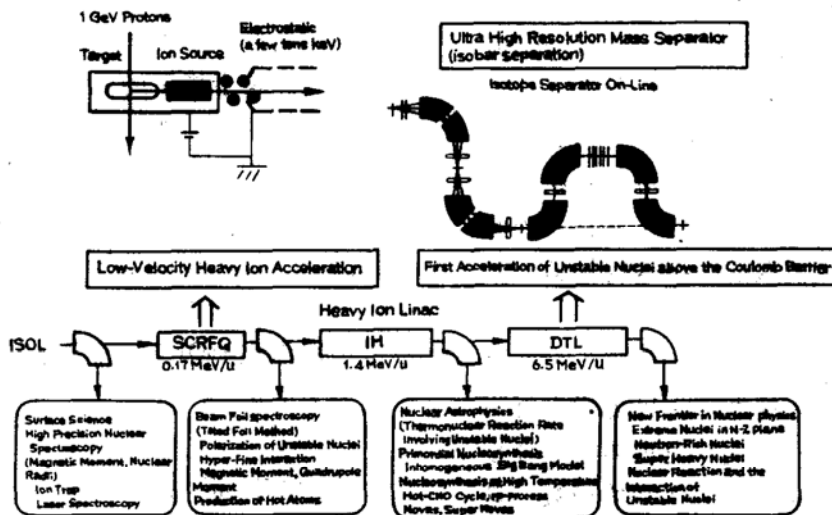


图 3 E-Arena 放射性束加速装置

利用 ISOL 分离的放射性核素可进行表面科学和传统的 ISOL 物理研究. 对于

0.17MeV/u 的放射性束可进行束箔光谱学、热原子产生等方面研究。当完成第二级加速时, 炮弹的能量为 1.4MeV/u, 可供核天体物理研究。对最后一级 6.5MeV/u 的放射性束, 可进行核物理新领域(在 $N-Z$ 平面的极端核, 丰中子核素, 超重核等)以及不稳定核的核反应和相互作用研究。

笔者最近获悉, 欧洲核物理合作委员会(NuPECC)于1991年秋提出一份关于未来欧洲核物理的报告, 研究在欧洲某地建造大型的奇异核束装置的可能性^[2]。

1989年, CERN 的 ISOLDE 小组计划将加速器 RPIMA 连到 ISOLDE 束线上^[3]。而今因 SC 的关闭, ISOLDE 已与 PS Booster 在线, 除了暂缺后加速器(可能是 RFQ+Linac 结构)之外, ISOLDE 已具备了所有的技术条件, 因此, 在 ISOLDE 建造放射性束加速装置是顺理成章的。后加速能量将从 0.2MeV/u 至 6~10MeV/u。从长远来看, 能量将增加到费米能区。为此, ISOLDE 委员会已向 CERN 提

出计划, 希望能在 2 至 3 年内尽早建成^[2]。

姜承烈在论及放射性束物理研究时, 提出在我国建造放射性束加速装置的设想和初步方案^[4], 这是很有意义的事情。在我国财力、物力还不很富裕的条件下, 应根据国情, 打破部门所用制, 实行各方面的合作, 如能早日实施, 将为我国的核物理、核天体物理及有关学科的发展创造有利的条件, 也使我们有机会参与国际竞争。可以预期, 放射性束加速及其物理研究将会成为热门的课题之一。

参 考 文 献

- 1 Nomura T. Proceedings of EMIS-12, Sendai Japan, 1991
- 2 CERN/ISC 91-20
- 3 Rolfs C, et al. CERN/EP/HH/tdn/postacc
- 4 姜承烈. 核物理动态, 1991, 8(2): 11~21

From ISOL to Acceleration of RI Beams

Huang Yecheng

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

Abstract Some of the highlights of nuclei far from stability were yielded. The trends of development from ISOL to acceleration of RI beams were also described.

Key Words on-line isotope separator, acceleration of RI beams, nuclei far from stability, nuclear astrophysics.