

兰州在线同位素分离器 ISOLAN

黄业成 王同庆 谈锦封

郭斌 范红梅

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

本文描述兰州在线同位素分离器 ISOLAN 的设计原理、结构和特性。对 Ar 和 Xe 的离线调试结果, 分辨本领达到 700—1200。ISOLAN 将与兰州重离子加速器联机, 以中能重离子核反应进行新核素的合成和远离 β 稳定线核素的研究。

一、引 言

国际上的在线同位素分离器主要与高能质子束、反应堆中子或低能重离子束在线。兰州在线同位素分离器 ISOLAN (ISOL in Lanzhou) 作为重离子加速器 HIRFL 的一个终端, 它工作在中能 (20—100 MeV/A) 重离子束线上, 这为短寿命核素的合成和研究, 提供很有利的条件。

中能重离子碎裂反应(弹碎裂)是生成低质量区缺中子和丰中子核素的最好方法。它的特点是炮弹与靶核之间只有很少的动量转移; 产物具有与炮弹相近的运动速度, 角分布峰值在 0° 附近; 碎片的同位素分布与炮弹和靶核的 N/Z 有关, 炮弹(或靶核)越是丰中子, 碎片也越是丰中子, 反之亦然。因此, 有意识地选择炮弹和靶核, 就能得到所期望的核素。炮弹与靶核之间的少数几个核子的转移过程, 是与炮弹碎裂竞争的一种反应机制, 它能生成缺中子或丰中子核素, 具体情况视炮弹的 N/Z 值而定。它是产生不太远离炮弹的核素的一种有效方法。用上述两种反应机制, 已在 $Z = 23, 25, 27, 29$ 达到质子滴线; $Z < 8$ 时到达中子滴线。若用很重的靶核, 人们还期望探测到质量数和 Z 值都比较接近靶核的重核素。

中能重离子反应, 对中等质量的产物, 是裂变与散裂反应竞争的结果。裂变产生的是丰中子核素, 而散裂反应, 它的产物分布在缺中子区和丰中子区的广大区域。裂变在整个过程中所占的份额, 与靶核的裂变位垒的大小有关。

为适应各种反应机制和不同性质核素的研究, 要求在线同位素分离器有高的分辨本领和高的分离效率。因此, 必须对束流光学系统进行精心的设计, 我们对 ISOLDE 型分

离子束流光学系统的改进,正是为了这个目的。靶离子源是在线同位素分离器的重要组成部分。人们已设计了厚靶、多层靶、带喷氦的离子源等,以满足不同的实验需要。此外,人们还试图设计高温靶、熔融靶,以探索合成高温难熔元素新核素的可能性。随着中能重离子核反应机制的深入研究和靶离子源技术的发展,可以期望 ISOLAN 将在这一学科的研究和发展中发挥重要的作用。

二、束流光学原理

由于 ISOLDE 型分离器^[1](55° 磁铁)具有结构简单、轻巧,加工容易,造价低廉,分辨本领高,性能良好等优点,我们选择了 ISOLDE 作为设计模式。

55° 磁铁的聚焦原理是荷电粒子在单透镜的作用下,形成平行束而进入磁场区,在磁铁出口 $\sqrt{2} R$ 处双聚焦成像。

根据荷电粒子的传输理论^[2,3]

$$\sigma(Z) = M \sigma(O) M^T, \quad (1)$$

式中 $\sigma(Z)$ 和 $\sigma(O)$ 分别为荷电粒子在位置 Z 和 O 处的相空间矩阵, M 和 M^T 是光路上光学元件的传输矩阵及与之相应的转置矩阵。ISOLDE 在线同位素分离器的光路如图 1 所示。

设荷电粒子在离子源的初始状态为 $[x_0, \theta_0]$, 其中 x_0 为最大位移, θ_0 为最大发散角。从图 1 看出, 荷电粒子通过单透镜后形成一组平行束, 它的状态以 $[x_1, \theta_1]$ 表之, 我们可把这个状态作为 55° 偏转磁铁的物腰, 应用(1)式给出的变换, 研究荷电粒子的成腰特性。

设象腰的状态为 $[x, \theta]$, 则在水平面上有

$$\begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_{2H} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 l_1 为磁铁的物距, l_{2H} 为水平面上磁铁的像距, $a_{ij}(i, j = 1, 2)$ 为水平方向磁铁的矩阵元, H 则是在(2)式变换下的新矩阵。因为

$$\sigma = H \sigma_1 H^T \quad (3)$$

所以

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_1^2 & 0 \\ 0 & \theta_1^2 \end{bmatrix} H^T. \quad (4)$$

水平方向的包络方程及最大发散角为

$$x_{\max} = \sqrt{\sigma_{11}}, \quad (5)$$

$$\theta_{\max} = \sqrt{\sigma_{22}}, \quad (6)$$

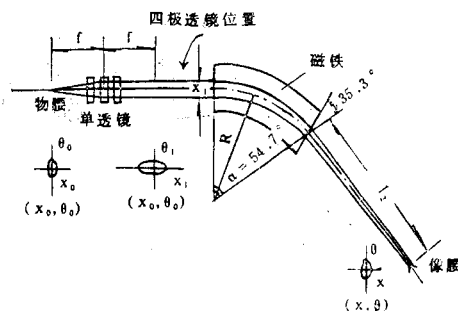


图 1 ISOLDE 分离器聚焦原理

则象腰对应的 θ 和 x 的极值 θ_{\min} 和 x_{\min} 分别为

$$\theta_{\min} = \sqrt{\sigma_{22}} = \sqrt{H_{21}^2 x_1^2 + H_{22}^2 \theta_1^2} = H_{21} x_1 = \frac{\cos \alpha}{l_{2H}} x_1, \quad (7)$$

(当 $\theta_1^2 \rightarrow 0$, 对平行束时)

$$x_{\min} = \frac{E}{\pi \theta_{\min}} = \frac{l_{2H} E}{\pi x_1 \cos \alpha}, \quad (8)$$

上面的 $H_{ij}(i, j = 1, 2)$ 是矩阵 H 的矩阵元.

由此可得分辨本领

$$R.P = \pi D x_1 \cos \alpha / l_{2H} E, \quad (9)$$

这里 D 是色散.

由此可见, 在离子源的发射度 E 不变的条件下, 提高分辨本领的唯一方法是增大进入磁铁之前的平行离子束的宽度 x_1 [4-6]. 技术上在磁铁入口前设置一套双组合四极透镜是最佳的方法. 兰州在线同位素分离器 ISOLAN 就是根据这一方案设计的, 其束流包络如图 2 所示.

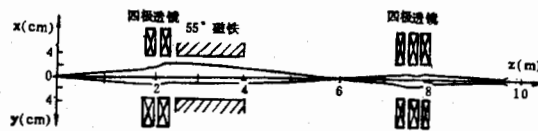


图 2 ISOLAN 束流包络图

三、ISOLAN 概貌

图 3 显示出兰州重离子加速器 HIRFL 实验大厅的布局, 左下方(R_1)就是 ISOLAN. 来自 HIRFL 的重离子束入射在 ISOLAN 的靶离子源中实现核反应, 产物在靶离子源内被俘获、重新释放、电离和加速, 荷电粒子在单透镜和四极透镜的联合作用下, 形成宽的平行离子束通过磁场区而进行质量分析, 在接收室处双成腰(双聚焦). 为满足不同类型的实验需要, 束流由开关码控制, 把经质量分离的离子束送至 4 米远处, 由三组合四极透镜再一次聚焦. 对于三个束流分支(见图 4), 第一分支配以带传输系统及相应的探测设备, 进行新核素的合成和新衰变模式的研究. 第二分支配以激光谱仪, 测量短寿命核素的核自旋、磁矩、电四极矩和电荷均方半径变化等. 第三分支可收集放射性样品供离线研究或配以高分辨质谱仪, 进行原子核质量的直接测量, 提取远离 β 稳定线核素核结构的信息.

四、ISOLAN 详细情况

1. 磁铁^[7]

这是一台半径 1.5 米, 偏转角 54.7° , 成“H”型结构的均匀场磁铁. 磁隙和磁极宽

7)

8)

9)

人
是
如

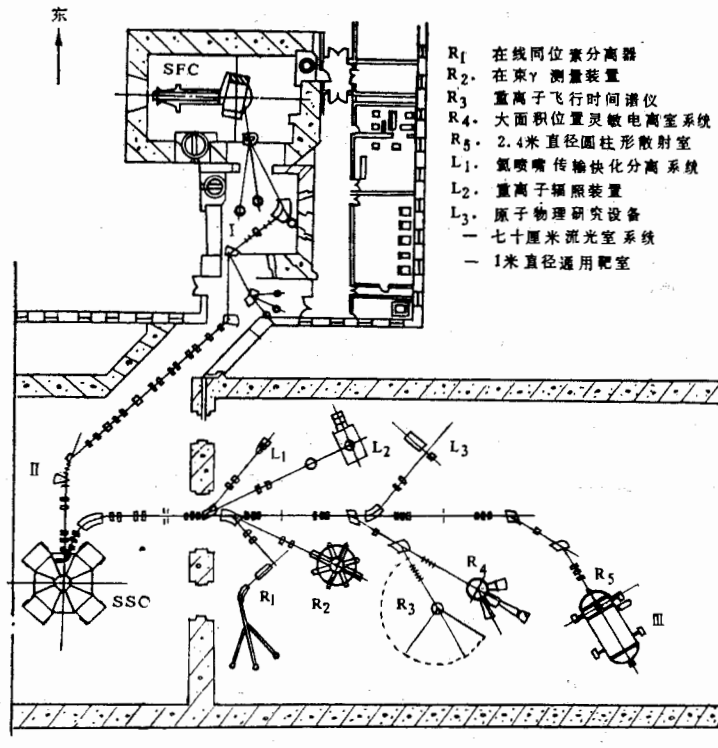


图 3 HIRFL 实验大厅布局

度分别为 6 厘米和 22 厘米。磁场强度 4 千高斯，可分离最大质量数为 250。在 80 毫米宽的范围磁场均匀度好于 1.4×10^{-4} ，满足高分辨本领设计的要求。磁铁总重量约 1 吨，具有轻巧、灵活的特色。

2. 真空系统

为减少出气，真空室全部由不锈钢材料做成。4 台 300 升/秒的油扩散泵在主机中均匀分布，其中两台位于离子源室和四极透镜室，另两台安装在色散室和接收室附近，以保证各区域具有良好的真空条件，减少离子与中性分子的散射和电荷交换。实验证明，当离子源的进气率约 5×10^{-4} 毛·升/秒，离子源区的真空度介于 0.8 至 1.3×10^{-5} 毛之间，而接收室的真空度为 3.0 — 5.0×10^{-6} 毛，完全满足离子束聚焦条件要求。

3. 高压电源和磁场电源

从离子源发射的离子束通过磁分析器到达接收室的总宽度为^[8]

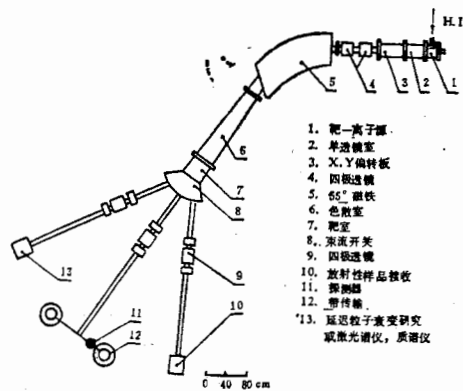


图 4 ISOLAN 概貌

$$W_T = R \frac{dV}{V} + 2R \frac{dB}{B} + S_0 + p, \quad (10)$$

式中 R 为磁铁的半径; 第一项为加速电场不稳定的贡献; 第二项为磁场不稳定的贡献; 第三项为虚源的大小, 一般说来 $S_0 < 1$ 毫米; 第四项为磁铁的象差, 对于平行束入射, $\theta_1 \approx 0^\circ$, 有 $p \approx 0$. 所以, 聚焦斑点的大小, 主要由加速电场和磁场的稳定度决定. 我们用的高压电源的纹波和稳定度为 1.6×10^{-4} , 磁场电源为 1.0×10^{-4} . 均满足设计要求.

4. 离子源

离线调试是用一台中空阴极离子源^[9]进行的. 它的结构特点是体积小, 电子发射面大和有良好的热屏蔽, 这对于提高电离效率是很有利的. 离子源的进气量约 5×10^{-4} 毫·升/秒, 在弧室温度介于 950 至 1100°C 之间时, 选择合适的参数能使离子源长时间地稳定工作. 在未来的在线实验中, 将采用一台 FEBIAD^[10] 源, 以适应更广泛的物理实验需要.

五、离线调试结果

表 1 给出的是 ISOLAN 的技术指标. 离线调试中, 由于我们采用了三电极引出系统和具有强聚焦作用的三圆筒透镜(图 5), 被引出的离子束比较发散, 它在强聚焦单透镜的作用下, 形成宽的平行离子束而进入磁场区, 所以, 即使在双组合四极透镜暂时还没有安装使用的情况下, 我们仍能得到高的分辨本领. 对 Ar 和 Xe 的调试结果, 分辨本领达 $700-1200$. 图 6 显示的是由安装在接收室焦平面处的扫描探针(直径 0.5 毫米)经磁场扫描, 由 X、Y 记录仪画出的 Xe 的同位素质谱.

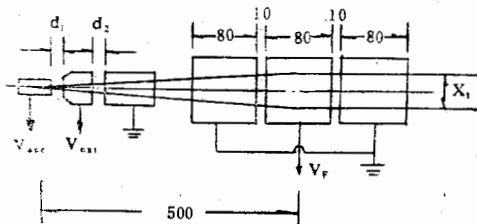


图 5 引出和聚焦光学

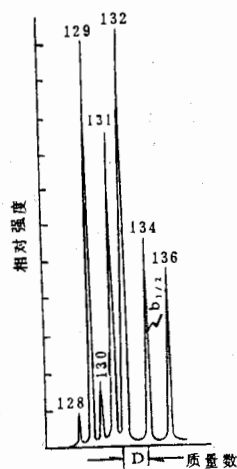


图 6 Xe 质谱

离线调试的成功, 标志着兰州在线同位素分离器 ISOLAN 已基本建成, 并将提供核物理研究使用.

表1 ISOLAN 的技术指标

磁铁偏转角 α	54.7°
磁铁半径 R	150 厘米
磁场强度 B	4千高斯
磁场均匀度	$<1.4 \times 10^{-4}$
加速电压 V	50 kV
可分离质量数	250
可同时接收质量数	100±10
分辨本领(有四极透镜) $R.P$	1000—1500
分辨本领(无四极透镜) $R.P$	700—1200
分离效率 η	10^{-4} — 10^{-2}
色散 D	7.5 毫米,当质量数为 200 时

本工作是在中国科学院近代物理研究所已故名誉所长杨澄中教授以及邬恩九教授和戴光曦教授的关怀和支持下进行的。作者之一(黄业成)感谢欧洲同行 Drs. S. Sundell, H. Ravn, R. Kirchner 和 Prof. H. Wollnik 对 ISOLAN 束流光学原理的热情讨论。李伟生、张贵谦、蒋发魁、白鹏举、李伟东、苏帮伟和孙锡军同志参加了部分工作。邬恩九教授审阅了本文,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] A. Kjelberg and G. Rudstam, CERN 70-3.
- [2] K. L. Brown, SLAC-75.
- [3] K. L. Brown, SLAC-91.
- [4] Huang Yecheng(黄业成), *Nucl. Instr. and Meth.*, B26(1987), 25.
- [5] H. Wollnik, *Nucl. Instr. and Meth.*, 95(1971), 453.
- [6] B. R. Nielsen, *Nucl. Instr. and Meth.*, 186(1981), 457.
- [7] 王同庆,郭斌,核物理动态,1988年第2期50页.
- [8] J. H. Freeman, *Ion Implantation*, 1973, p. 389.
- [9] 谈锦封,第三届全国离子源学术交流会议论文集,1987年9月兰州.
- [10] R. Kirchner et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, 186(1981), 295—305.

A STATUS REPORT OF ISOLAN — THE ON-LINE ISOTOPE SEPARATOR IN LANZHOU

HUANG YECHENG WANG TONGQING TAN JINFENG

GUO BIN FAN HONGMEI

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

A new ISOLAN facility has been constructed for on-line use with the heavy ion accelerator HIRFL in Lanzhou. The beam optical principle of an earlier ISOLDE type separator is modified by including a quadrupole doublet lens in front of the magnet. The mass spectra of Ar and Xe isotopes were measured with a scanner inside the collection chamber for an off-line test. The resolution power is equal to 700—1200 by only using a single einzel lens.