

在线同位素分离器进展

黄业成

(中国科学院近代物理研究所)

原子核是由中子和质子组成的, 各种不同类型的原子核叫做核素, 核素是原子核物理的基本研究对象。若以原子核的中子数 N 作为横坐标, 质子数 Z 作纵坐标, 那末, 图上的每一点都代表一个核素, 在核素图上, 穿过稳定核的平均位置的一条向上延伸的线称为 β 稳定线, 稳定线上的核素是不发生 β 衰变的, 而位于其上、下两侧的核素(称为“远离 β 稳定线核素”)则发生 β 衰变。核素不能无限远离 β 稳定线, 它们的极限就是所谓“中子滴线”和“质子滴线”。

研究为数众多的远离 β 稳定线核素的基本问题是确定它们的电荷(Z)、质量数(A)、

半寿命($T_{1/2}$)和反应截面(σ)或产额(Y), 用常规的方法是很困难的, 因为随着核素远离 β 稳定线, 它们的半寿命越来越短, 测量仪器必须靠近样品, 或者连接到样品被迅速传输的系统中。其次, 核反应产生的产物并非单一的, 由此造成测量上的许多困难, 必须采用在线分离技术, 其本质在于将短寿命核素的产生、质量分离及对其衰变性质的测量过程在时间上衔接起来, 以便对新核素鉴别和研究。在线同位素分离器(以下简称“在线分离器”)是实现这一目的的大型实验设备, 图1是在线分离方法的原理图, 从核素的产生至接收的传输时间为毫秒量级。因

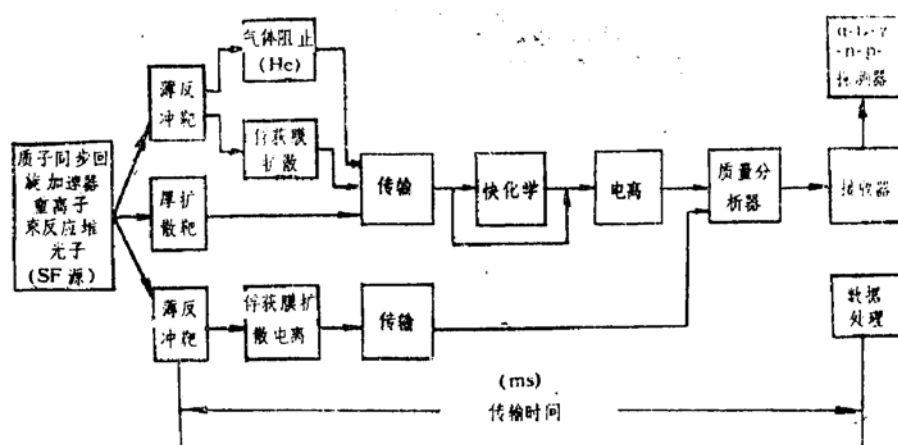


图1 在线分离方法原理

2. A. E. Litherland, Annu. Rev. Nucl. Sci. 30(1980) 437
3. H. W. Lee et al, Nucl. Instrum. Methods B5(1984) 208
4. P. W. Kubik et al., Nucl. Instrum. Methods B1(1984) 51
5. J. Pelletier et al., J. Appl. Phys. 50 (1979) 4517
6. J. M. Anthony et al., Nucl. Instrum. Methods. B10/11(1985) 498
7. K. Nishizumi et al., Nature 319 (1986) 134
8. J. Ellis et al., Nucl. Phys. B238 (1984) 453
9. L. Lyons, Phys. Rep. 129(1985) 225
10. R. G. Milner et al., Phys. Rev. Lett. 54(1985) 1472

此,这也是用在线分离器所能探测到的短寿命核素的半衰期的最低极限。

早在1950年就由Hansen和Nielsen第一次应用在线电磁同位素分离器产生放射性同位素了,可惜的是,这些工作没有继续进行下去,在五十年代核谱学方法不能很好地处理极端复杂的远离 β 稳定线核素的衰变。将1950年开拓性的实验技术与以后的核物理实验相对照,Hansen和Nielsen所提供的信息,再一次引起人们的热情,六十年代中期,人

们对在线质量分离的兴趣大大地提高了,部份原因是由于实验技术得到很大的改进,特别是1964年Ge(Li)谱仪的出现和计算机在核谱学实验中的应用。核物理实验的需要刺激了在线分离器的发展。

1966年和1967年在法国奥赛和瑞士日内瓦欧洲核子研究中心建成了世界上最早的在线分离器。此后,美、苏、加、日、波兰、瑞典、西德和英国等许多国家都相继地建造了新的在线分离器,从而极大地促进了短寿

表 1 国际在线分离器(部份)概况

名称	国别	地名	建成日期	磁铁偏转角	半径(米)	分辨	与反应堆或加速器在线
ISOCELE	法国	Orsay	1966	75° 非均匀场	0.8		同步回旋
TRISTAN	美国	Ames	1966	90°			反应堆
ISOLDE	瑞士	CERN	1967	55°	1.5	800	SC
OSIRIS	瑞典	Nyköping	1968	55°			反应堆
POLARIS	美国	New Jersey	1970	90°	1.5		PPA
UNISOR	美国	Oak Ridge	1972	90°	1.5	2,000	ORIS
ISOL	日本	Tokyo	1972	45°	0.6		
IRIS	苏联	Leningrad	1973	55°	1.5		同步回旋
	西德	Darmstadt	1973	55°	1.5		UNILAC
BEMS	苏联	Dubna	1973	60°	0.8		回旋
PINGIS	瑞典	Stockholm	1973	90°	2.0		回旋
PARSIFAL	法国	Orsay	1973	90° 非均匀场	0.6		
ZBIR	波兰	Swierk	1973	55°	1.5		
LISOL	比利时	Leuven	1975	55°	1.5	1,500	等时性回旋
	加拿大	Chalk River	1978	135° 非均匀场	1.0	>8,000	Tandem
TRISTAN	美国	Brookhaven	1980	90°			反应堆
	日本	Sendai	1981	55°	1.5	1500	回旋
	日本	JAERI	1981	55°	1.5	2000	Tandem
	英国	Daresbury	1984	60°	1.0	600	Tandem
ISOLAN	中国	兰州	建造中	55°	1.5	1,000~1,500	SSC
TRIUMF	加拿大		建造中	60°+120°		20,000	
ISOLDE-3	瑞士	CERN	1987.3	90°+60°		5000~30,000	SC

命核素的研究。今天，远离 β 稳定线核素的研究已成为核物理的一个重要分支。除在核物理方面的应用之外，在线分离器正逐渐成为原子物理、天体物理、固体物理和生物学研究的一种新的手段。

表1列出了国际上一些主要的在线分离器的概况，所用的分析磁铁有非均匀场和均匀场的；偏转角有 135° 、 75° 、 60° 、 55° 和 45° 等多种型式，为增大色散，半径一般都在1米以上。通常人们把分离器连接到反应堆或加速器上，以实现短寿命核素的研究。由于所用的加速器不同，既有与重离子束在线，也有与高能质子束（或 α ， ^3He ）在线的。它们之间，除了根据不同的核反应需要，在靶一离子源的选择上有所差别之外，对主机的离子光学要求则是完全一致的。

由加拿大和法国两国的科学家合作建造的 135° 非均匀场在线分离器，始建于1973年，因为财政困难和公司破产而最终被延期了，直到1976年初才由加、法两国科学家承包下来重新建造，1978年第一次获得离子束，1979年在线运行，这台机器分辨本领很高（8000），可作质谱仪使用，但对于大质量数的原子核质量测量，其分辨仍显得很不够。况且，非均匀场磁铁的加工，技术上比较困难，为了获得相应的分辨，对所用的高压电源和稳流电源的稳定度要求很高，要好于 1×10^{-5} ，这不但在技术上带来困难，投资也将大大增加。为了与新的TASCC装置联结，这台分离器1982年停机进行移位，1984年重新离线运行，目前正同一个大学合作，计划在分离器的一个束流分支上联接一台高分辨的质谱仪进行核质量直接测量。

斯堪的纳维亚型（ 90° ）分离器是一种古老而成熟的分离器，作为在线分离器也用得很广，这类分离器中，以美国的“大学同位素分离器”（UNISOR）为最佳，它是1970年由美国的12所大学与橡树岭国立实验室联合建造起来的，1972年正式运转，最高分辨约2000，总效率介于 10^{-1} — 10^{-2} 之间，工作在

重离子束线中，从多年的运行结果来看，这是一台比较好的在线分离器。

ISOCELE型（ 75° ）非均匀场在线分离器工作在质子束和 α 束线中，为了与法国奥赛重建的等时性回旋加速器匹配，前几年已对ISOCELE的束流光学系统进行了改进，获得了良好的性能。

60° 型在线分离器结构比较简单，在磁铁前面分别应用一套横向和纵向聚焦透镜则可实现双聚焦。英国达累斯伯里的NSF实验室1984年建成了这种设备，并得到首批的物理研究成果。

ISOLDE型（ 55° ）在线分离器是60年代末发展起来的。至今，在周期表中有77种元素被在线分离，其中的66种已被ISOLDE分离过了。这台分离器工作在高能质子束线中，同类型的西德GSI在线分离器则与重离子加速器UNILAC相联。这种分离器结构简单、轻巧，加工容易，造价低廉，性能良好，最大分辨800，总效率高达 10^{-1} 。在中国科学院近代物理研究所建造的在线分离器是在ISOLDE-2的基础上，对束流光学系统进行了改进，在磁铁入口前设置一套双组合四极透镜，分辨本领可提高到1500，将能更好地满足物理实验需要。

45° 在线分离器性能较差，很少被采用。

新一代在线分离器正在出现，1984年加拿大福斯特放射实验室等单位联合筹建一台由两个聚焦磁铁组成的新分离器，以期获得高分辨。由于经济上的原因，目前他们只能建造第一个磁铁的那一段机器。欧洲核子研究中心的LSOLDE-3于1982年由欧洲十多个实验室共同筹建，总投资约二百万瑞士法郎，1986年基本建成，1987年5月离线调试，获得了稳定性同位素束流。这台装置由一个 90° 和一个 60° 的磁铁组成，分辨本领极高，可达30000，能去除系统中全部剩余气体散射离子，达到消除沾污的目的，并可分离一个同量异位素以内的元素，能方便地实现原子核质量的直接测量。

作为一台完整的在线分离器，其工作原理可简单的描述如下。重离子束（或高能质子束）入射在靶—离子源内，与靶子产生核反应，反冲被阻止、释放、电离和加速并进入偏转磁铁而被聚焦。人们可通过改变偏转磁铁的磁场而选择特定质量的核素进行研究。当同时接收不同质量的核素或进行不同种类的实验时，可把反应产物带至3米远，束流由开关码控制，在 0° ， $\pm 30^\circ$ 的方向经四极透镜再一次聚焦后而被探测。对于三个束流分支，第一个可配以带传输系统，放射性样品被传输带收集之后，迅速传至探测站（例如 4π 探测器）进行核素鉴别。第二个用作接收较长半寿命的放射性同位素，进行离线测量。第三个分支可作 β 延迟粒子发射的研究或配以一台高分辨的质谱仪进行原子核质量的直接测量。对于更为完善的在线分离实验室，还应配备一台激光谱仪，进行激光光谱学研究，确定原子核自旋、电多极矩、磁

多极矩和均方电荷半径 $\langle r^2 \rangle$ 等。图2是中国科学院近代物理研究所在线分离器 ISOLAN 的概貌，它将与重离子加速器 HIRFL 在线，预期1988年离线出来，1989年提供物理实验之用。

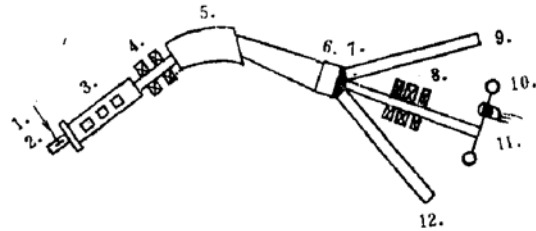


图2 兰州在线同位素分离器 ISOLAN

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. 重离子束 | 7. 束流开关 |
| 2. 靶—离子源 | 8. 四极透镜 |
| 3. 单透镜 | 9. 离线样品接收站 |
| 4. 四极透镜 | 10. 带传输系统 |
| 5. 55° 偏转磁铁 | 11. 4π 探测器 |
| 6. 靶室 | 12. 延迟粒子测量或高分辨质谱仪 |