

文章编号: 1007-4627(2005)03-0261-06

在线同位素分离器和丰中子核 β 衰变*

王友宝

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 简要介绍了在线同位素分离器的原理以及在奇异核 β 衰变核谱学中的应用。着重介绍了芬兰 Jyväskylä 大学的离子制导型在线同位素分离器, 并对在该装置上开展的丰中子 Ag 同位素的 β^- 衰变研究进行了综述。

关键词: 在线同位素分离器; β 衰变核谱学; 丰中子核结构; 质子诱发裂变

中图分类号: O571.32*2 **文献标识码:** A

1 引言

长期以来, 远离稳定线核的结构和衰变性质研究一直是核物理领域的一个前沿性课题; 这直接推动了各种先进的加速器和高灵敏度谱仪的发展, 并为人们探索各种不同的反应机制提供了动力。就现在的核素版图而言, 已确知的不稳定核的数量远超过稳定核, 对这些核的结构和衰变性质的研究极大地丰富和发展了原子核理论。

在不同的能区, 运用不同的弹靶组合能够产生的不稳定核的数量和种类相差很大。从需要较低能量的少数核子转移反应、热中子诱发裂变到中高能量区的深部非弹、多重碎裂等都可以用来产生不稳定核, 几种常用的反应如表 1 所示。诱发裂变的束流主要是中子或轻带电粒子, 裂变碎片多分布在丰中子一侧的中等质量核区。重离子熔合蒸发反应包括

垒下熔合和垒上熔合, 则是合成丰质子中重核以及超重核的主要途径。多重碎裂反应通常使用每核子上百 MeV 至 GeV 量级的高能质子或重离子束, 能够同时产生多达上千种的不稳定核素。总地来说, 对于远离稳定线的核素, 由于产额低本底大, 必须借助有效的分离技术才能达到谱学实验的要求, 这使得在线同位素分离器应运而生。

2 在线同位素分离器

在线同位素分离器 (ISOL) 成型于 20 世纪 50 年代^[1]。陆续建成的分离器^[2]中: 一类建造在高通量的反应堆上, 如美国 BNL 的 TRISTAN^[3], 瑞典 Studsvik 的 OSIRIS^[4], 法国 Grenoble 的 LOHENGRIN^[5]等, 这类分离器通常利用热中子打²³⁵U 靶 (~5 g 量级) 产生丰中子核; 另一类则建造在不同的加速器上, 因而在束-靶组合上有较大的选择余地。建造在加速器上的分离器又可根据弹核的能区、种类细分, 其中使用低能轻、重离子的分离器较多, 如德国 GSI UNILAC 上的 ISOL^[6], 芬兰 Jyväskylä 的 IGISOL^[7], 比利时 Leuven 的 LISOL^[8]等。这类分离器上用以产生不稳定核的反应机制通常为熔合蒸发或诱发裂变等。使用高能质子束的分离器有欧洲核子中心 (CERN) 的 ISOLDE^[9] 和加拿

表 1 产生不稳定核的几种常用的反应

反应类型	弹核能量 (每核子)	不稳定核的 大致数量	奇异性*
转移反应	5—10 MeV	几个	小
诱发裂变	eV—80 MeV	几百	中
熔合蒸发	2—10 MeV	几十	大
多重碎裂	50 MeV—1 GeV	上千	大

* 奇异性简指远离稳定线的程度。

收稿日期: 2004-12-13; 修改日期: 2005-02-03

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10445004); 人事部留学人员科技项目启动基金资助项目; 中国原子能科学研究院核物理所青年启动基金资助项目

作者简介: 王友宝(1966-), 男(汉族), 山东新泰人, 博士, 研究员, 从事实验核物理研究;

E-mail: ybwang@iris.ciae.ac.cn

大 TRIUMF 的 TISOL^[10] 等。它们的特点是一般使用厚达数百 g/cm^2 的金属靶, 利用碎裂、裂变等反应产生远离稳定线核, 分离束品种多、强度大。

在线同位素分离器的工作原理^[11] 大致如下: 选择适当的反应产生感兴趣的不稳定核; 反应产物经慢化后注入离子源电离, 继而用适当的电场引出并加速到几十 keV 的能量, 通过磁场分离成质量分离束。在线意味着整个过程以一种连续的方式进行, 因此可以产生亚秒级的短寿命核束。从技术角度来讲, 分离器可以按慢化过程不同划分为厚靶、薄靶两类, 简单的示意图如图 1 所示^[12]。

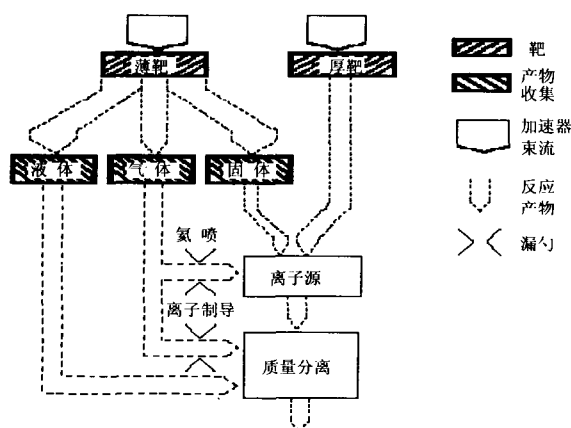


图 1 概念不同的在线同位素分离器

厚靶类分离器, 如 TRISTAN, OSIRIS, ISOLDE 和 TISOL 等, 都采用紧凑型的靶-离子源组合^[13], 以便最大限度地提高分离束的强度。由低能轻、重离子引起的反应, 反应产物的动量分布通常较宽且沿束流方向前冲, 因此一般使用薄靶, 再用固体膜或气体来收集反冲核。收集膜常置于离子源中, 如 GSI 的 ISOL。从技术角度讲与厚靶类近似。这些分离器的靶(收集膜)-源部分通常处于高温区, 以使反应产物从靶材料(收集膜)中有效逸出, 注入离子源电离。这些特点决定了这类分离器延迟时间较长, 并易受元素的化学性质限制, 难以有效地产生一些高温难熔金属核。

用惰性气体慢化、收集反应产物最早见于较轻的丰质子核 β 衰变研究, 后来发展为氦喷技术^[14]。一台比较有代表性的装置就是美国 Berkeley 的 RAMA^[15], 中国科学院近代物理研究所也有类似装置^[16]。其原理是用流动的氦气通过直径 1—5 mm 的毛细管, 把反应产物从靶室引出到低本底处, 结

合磁带传输系统进行直接测量; 或进一步注入离子源电离后进行在线质量分离。氦气的流速可达 $200 \text{ cm}^3/\text{s}$, 延迟时间可短至 20—100 ms。为了提高传输效率, 须在氦气中添加有助于形成团结构的气溶胶, 例如甲烷、乙炔等有机气体, 或 NaCl 和 PbCl_2 等无机盐的蒸汽。这项技术在研究短寿命核, 特别是丰质子核 β 衰变方面发挥了很大作用^[17]。在氦喷技术的基础上又产生了不用气溶胶的离子制导型分离器, 如 IGISOL 和 LISOL 等。此外, 为了探索新的传输机制, 使用液氮作为慢化、收集介质的可行性研究也已经开始^[18]。

3 离子制导型在线同位素分离器

3.1 离子制导原理

20 世纪 80 年代初, 芬兰 Jyväskylä 大学发明了离子制导技术^[19]。根据不同的反应类型, 陆续发展了分别适用于轻离子^[12]、重离子熔合蒸发反应^[20]以及质子诱发裂变^[21]等 3 种不同的离子制导技术, 其中适用于轻离子熔合蒸发反应以及质子诱发裂变的离子制导技术相当成功。利用轻离子-离子制导技术精细研究了 ^{41}Ti ^[22], ^{23}Al ^[23], ^{58}Cu ^[24] 和 ^{12}N ^[25] 等不少丰质子核。针对重离子熔合蒸发反应的离子制导技术则存在一些问题, 主要是由于反冲产物电离氦气引起的等离子体效应导致效率下降。近几年虽不断有所改进^[26,27], 仍不足以与常规离子源型分离器(如 GSI 的 ISOL)相提并论。

离子制导的原理如图 2 所示。加速器束流打到薄靶上产生不稳定核, 反应产物反冲出靶膜后注入气体室(通常为氦气)。在氦气体中离子和气体原子发生碰撞损失能量得到慢化。慢化过程中离子同时俘获电子, 降低其电荷态。由于大多数元素的第二电离势不足以电离氦原子, 在完全纯净的氦气中, 通过上述电荷交换过程离子最低只能到 2^+ 态, 但是由于系统中存在 O_2 , N_2 , Ne 和 H_2O 等杂质是不可避免的, 实验发现大多数离子最终停留在 1^+ 态。这些经过慢化的 1^+ 态离子由流动的氦气通过直径为 1.2 mm 的漏勺带出离子制导室, 在电场的加速下进入分离级。氦气由一套复杂的差分泵系统供给, 在离子制导室内保持 1×10^4 — 5×10^4 Pa 的气压, 离子制导室与加速器管道间用厚度为 $4 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 的 Havar 膜隔离。离子制导室与引出电极间的

漏勺是用来阻止过多的氦气进入引出级, 在漏勺上一般加有几百 V 的偏压, 以提高离子传输的效率。这项技术的特点在于不需要常规离子源和不依赖于元素的化学性质, 因此对所有元素具有普适性。此外整个过程只需要亚 ms 量级, 可以产生很短寿命的不稳定核。分离束中观测到的寿命最短的放射性^[28,29]是²⁰⁴Tl 1 104 keV 的同质异能态, 半衰期仅 63 μ s。实际上, 一般反应产物经过 7 m 长的整个分离器系统, 飞行时间需约 40 μ s, 因此离子制导部分的延迟时间非常短。

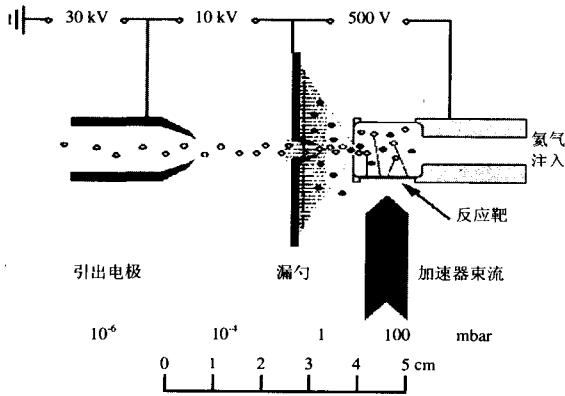


图 2 离子制导的原理

3.2 IGISOL 装置

芬兰 Jyväskylä 大学的 IGISOL 装置如图 3 所示。能量约 40 keV 的不稳定核束沿垂直于加速器束流的方向引出, 由一个 55°的分析磁铁进行质量分离, 然后在焦平面位置用一套静电偏转装置分送到不同的实验靶站。对于 40 keV 的分离束, 典型的能量展宽约为 100 eV, 这主要是由于离子在漏勺附近与气体原子碰撞所导致。降低漏勺上的偏压可以减小能量展宽, 提高质量分辨率。目前整套分离器的质量分辨率 $M/\Delta M \approx 300-1\ 000$ 。

3.3 丰中子核 β 衰变

IGISOL 装置建成后, 在 $A = 100-120$ 质量区, 即从钷到银间的高温难熔金属核和它们的同质异能态的 β 衰变研究中发挥了巨大的作用。此前有关该质量区丰中子核的实验数据非常少。离子制导技术的优点——分离时间快并与元素的化学性质无关, 结合质子诱发裂变的近对称型分布, 很好地填补了这一核区实验数据的匮乏。迄今用裂变离子制

导技术发现并研究了 40 多个新的丰中子核^[7,28-32], 被研究核素的边界扩展到远离稳定线 16 个中子, 并发现了一些 β 缓发中子核^[31,32]。此外, 也发现并研究了一些寿命很短的同质异能态, 如 $T_{1/2} = 1.5\text{ ms}$ 的¹¹⁴Ag^{m[29]}和 $T_{1/2} = 19.1\text{ ms}$ 的¹¹⁷Pd^{m[33]}等。

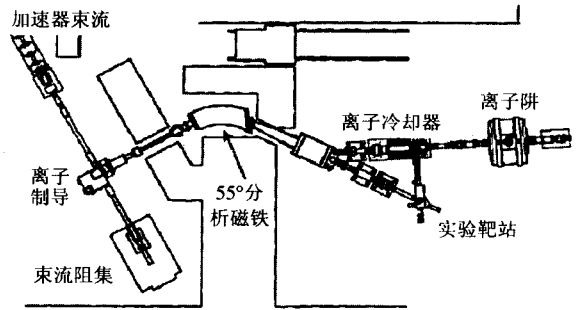


图 3 IGISOL 装置平面图

$A = 100-120$ 的丰中子核从结构上讲属于过渡区, 即从四极形变参量 $\beta \geq 0.3$ 的轴对称形变核 Sr 和 Zr 经 Mo, Ru, Pd 和 Cd 过渡到球形满壳核 Sn。Mo 和 Ru 核则具有较明显的三轴形变 ($\beta = 0.2-0.3, \gamma \approx 20^\circ-25^\circ$)^[34,35]。在此核区, 一般多种激发模式并存, 原子核的激发谱较为复杂, 例如质子对激发现象和形状共存等^[36,37]。从 β 衰变的角度来讲, 一般存在 $\nu g_{7/2} \rightarrow \pi g_{9/2}$ 的容许 G-T 跃迁。在近球形核¹²⁴⁻¹²⁸Cd 的 β^- 衰变中, 此跃迁集中在 $\text{Cd } 0^+_{g.s.} \rightarrow \text{In } 1^+$ 一条能级, $\log ft \approx 4.0$ ^[38]。对其它核, G-T 跃迁强度则有所分散。

在 IGISOL 装置上, 通常用 25 MeV 以上的质子束轰击天然铀靶。铀靶厚为 15 mg/cm^2 , 与束流方向成 7° 夹角倾斜放置, 有效厚度可达 120 mg/cm^2 。质子束由 K130 回旋加速器以 H_2^+ 的形式提供, 最大流强可达 100 μA 。在上述条件下裂变碎片的质量分布趋对称型。与热中子诱发裂变相比, $A \approx 120$ 附近核素的产额得到较大增强。裂变离子制导的效率一般约为 130 ions/ $(\mu\text{C} \cdot \text{mb})$ 。在实验仪器方面, 除了常规的 $\beta-\gamma(X)$ 和 $\gamma-\gamma(X)$ 谱学设计外, 还建立了用于衰变能测量的 $\Delta\beta-\beta$ 望远镜系统^[39], 以及内转换电子谱仪 ELLE^[40]等。

4 ^{116,118,120}Ag 到 ^{116,118,120}Cd 的 β^- 衰变

4.1 简介

基态的 Cd 核是近球形核, 其低激发态可以用

集体振动的多声子态和形状共存的 $2p-4h$ 入侵态来解释。声子模型预言了多声子态的组成、能量和跃迁强度，后一项可以用 γ 跃迁的相对 $B(E2)$ 值来检验。针对在 $^{112,114}\text{Cd}$ 二声子三重态附近观测到的另一组 0^+ 和 2^+ 态^[41]，Heyde 等^[42] 引入形状共存的 $2p-4h$ 入侵态，并与集体振动的多声子态组态混合给出了相对合理的解释。实验上确实观测到了建立在这一组 0^+ 和 2^+ 态上的转动带^[43]。对于更重的 Cd 核，此前的实验数据相对较少，且主要来自于裂变实验—— ^{242}Pu ， ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 等自发裂变的瞬发 γ 射线谱学^[44] 和热中子诱发 ^{235}U 裂变所产生的丰中子 Ag 核的 β^- 衰变。基于 ^{118}Ag 的 β^- 衰变实验研究，Aprahamian 等^[45] 曾报道 ^{118}Cd 是一个满足声子模型预言的纯振子核。

4.2 实验

^{116}Ag 实验所用的 $\beta-\gamma$ 探测器几何安排^[46] 如图 4 所示。用一个 2 mm 厚的 BC408 圆柱形塑料闪烁体作为 β 探测器，总效率约 60%。用 4 个相对效率均为 70% 的高纯锗探测退激的 γ 射线。因为 β 延发的 γ 射线的多重性一般较低， γ 探测器以紧凑的几何方式放置，距离注入点约 5 cm。此外为了降低分离束中长寿命的同量异位素所产生的本底，使用了磁带机。 $^{118,120}\text{Ag}$ 实验的探测器几何安排与此大致相同，不同之处仅在于用一个 10 cm^2 的平面锗探测器替代图中的一个高纯锗，以便探测特征 X 射线。

$^{116,118,120}\text{Ag}$ 等裂变产物的独立生成截面和在 IGISOL 装置上的独立产额如表 2 所示。表中的数值是基态和同质异能态之和。以 ^{120}Ag 为例，除了半衰期为 1.23 s 的基态外，还存在一个半衰期为 0.4 s 的同质异能态，实测的独立产额分别为 2 400 和 1 750 ions/s。

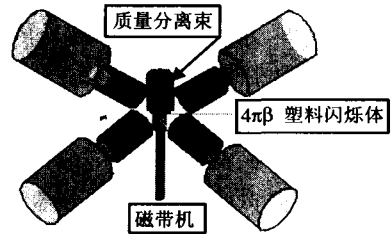


图 4 $\beta-\gamma$ 探测器几何安排

表 2 $^{116,118,120}\text{Ag}$ 等核的独立生成截面和独立产额

同位素	生成截面 ^a /mb	估计产额 ^b ions/s	实测值 ions/s
^{116}Rh	3.3	2 574	2 400
^{116}Ag	10.4	8 112	
^{118}Ag	13.8	10 764	
^{120}Ag	5.67	4 423	4 150

^a 25 MeV 质子打 ^{238}U ，同位素独立生成截面的计算值，见文献[47]；^b 质子束平均流强约 6 μA ，并考虑裂变离子制导的效率。

4.3 部分结果与分析

$^{116,118,120}\text{Ag}$ 均存在两个 β^- 衰变态，各自的性质如表 3 所示。结合 Ag 核两个态的 β^- 衰变，能够布居 Cd 核较大自旋范围内的核态。对丰中子 Ag 核，容许 G-T 跃迁主要衰变到子核 3 MeV 激发能附近的一条能级（分支比约 30%）， $\log ft$ 值一般小于 5.0。在 $^{116}\text{Ag}^{\text{m}[48]}$ 和 $^{118}\text{Ag}^{\text{m}[49]}$ 的 β^- 衰变中， $^{116,118}\text{Cd}$ 的此能级分别位于 2958.8 和 3031.9 keV， $\log ft$ 值均为 4.9。此能级因此具有准粒子性质，其组态可能包含 $\nu g_{7/2}$ 上的一个空穴，外加在 $\nu g_{7/2} \rightarrow \pi g_{9/2}$ 跃迁中作为旁观者的一个外层中子。

表 3 $^{116,118,120}\text{Ag}$ 基态和同质异能态的 β^- 衰变

同质异能态	E_x/keV	$T_{1/2}/\text{s}$	J^π	$I_\beta(\%)$	Γ	基态
$^{116}\text{Ag}^{\text{m}}$	81	8.2	(5^+)	94	E3	$^{116}\text{Ag}^{\text{g}}$: (2^-), 2.68 min
$^{118}\text{Ag}^{\text{m}}$	128	2.0	(4^+)	54	E3	$^{118}\text{Ag}^{\text{g}}$: (1^-), 3.76 s
$^{120}\text{Ag}^{\text{m}}$	203	0.40	(6^-)	63	E3	$^{120}\text{Ag}^{\text{g}}$: (3^+), 1.23 s

作为一个例子， ^{116}Cd 的部分能级纲图如图 5 所示。我们发现了 19 条新能级，其中包括 1 869.7 keV 4^+ 态。并由 γ 跃迁的相对强度导出了相对 $B(E2)$

值。在此基础上第一次鉴别出了 ^{116}Cd 核的三声子五重态，即 1 869.7 keV 4^+ ，1 916.0 keV 3^+ ，1 928.4 keV 0^+ ，1 951.4 keV 2^+ ，以及 2 026.8 keV 6^+ 态。

- [12] Dendooven P. Nucl Instr and Meth, 1997, **B126**: 182.
- [13] Ravn H L. Nucl Instr and Meth, 1992, **B70**: 107.
- [14] Moltz D M. Nucl Instr and Meth, 1981, **186**: 135.
- [15] Moltz D M, Wouters J M, Äystö J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1980, **172**: 519.
- [16] Xu Shuwei, Li Zhankui, Xie Yuanxiang, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 017301 及其参考文献.
- [17] Äystö J, Cerny J. In: Treatise on Heavy-Ion Science, edited by Bromley D A, New York: Plenum Press, 1989, **8**: 207.
- [18] Huang W X, *et al.* Europhys Lett, 2003, **63**: 687.
- [19] Ärje J, Äystö J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1981, **186**: 149.
- [20] Dendooven P, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1998, **A408**: 530.
- [21] Taskinen P, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1989, **A281**: 539.
- [22] Honkanen A, *et al.* Nucl Phys, 1997, **A621**: 689.
- [23] Peräjärvi K, Siiskonen T, *et al.* Phys Lett, 2000, **B492**: 1.
- [24] Peräjärvi K, Dendooven P, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A696**: 233.
- [25] Fynbo H O U, Diget C A, *et al.* Nature, 2005, **433**: 136.
- [26] Béraud R, Canchel G, Emsalleme A, *et al.* Hyperfine Interactions, 2001, **132**: 485.
- [27] Huikari J, Dendooven P, Jokinen A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2004, **B222**: 632.
- [28] Ärje J, Äystö J, *et al.* Phys Rev Lett, 1985, **54**: 99.
- [29] Penttil H, Äystö J, Jauho P, *et al.* Phys Scr, 1990, **T32**: 38.
- [30] Äystö J, Astier A, *et al.* Phys Rev Lett, 1992, **69**: 1 167.
- [31] Mehren T, Pfeiffer B, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77**: 458.
- [32] Wang J C, Dendooven P, *et al.* Phys Lett, 1999, **B454**: 1.
- [33] Penttilä H, Jauho P P, *et al.* Phys Rev, 1991, **C44**: R935.
- [34] Smith A G, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77**: 1 711.
- [35] Shannon J A, *et al.* Phys Lett, 1994, **B336**: 136.
- [36] Heyde K, Van Isacker P, *et al.* Phys Rep, 1983, **102**: 291.
- [37] Wood J L, Heyde K, *et al.* Phys Rep, 1992, **215**: 101.
- [38] Spanier L, Aleklett K, *et al.* Nucl Phys, 1987, **A474**: 359.
- [39] Äystö J, Jauho P P, *et al.* Nucl Phys, 1990, **A515**: 365.
- [40] Parmonen J M, Janas Z, Trzaska W H, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1991, **A306**: 504.
- [41] Julin R. Phys Scr, 1995, **T56**: 151.
- [42] Heyde K, Van Isacker P, *et al.* Phys Rev, 1982, **C25**: 3 160.
- [43] Juutinen S, Julin R, *et al.* Phys Lett, 1996, **B386**: 80.
- [44] Hamilton J H, Ramayya A V, Zhu S J, *et al.* Prog Part Nucl Phys, 1995, **35**: 635.
- [45] Aprahamian A, *et al.* Phys Rev Lett, 1987, **59**: 535.
- [46] Wang Y B, *et al.* Phys Rev, 2001, **C63**: 024309.
- [47] Rubchenya V A, Äystö J. Theoretical Predictions for Neutron-rich Fission Product Yields: Study for RNB projects. <http://www.ganil.fr/eurisol/>.
- [48] Wang Y B, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 054315.
- [49] Wang Y B, *et al.* Phys Rev, 2003, **C67**: 064303.
- [50] Brink D M, *et al.* Phys Lett, 1965, **19**: 413.
- [51] Äystö J, Jokinen A. J Phys, 2003, **B36**: 573.
- [52] Lunney D, Pearson J M. Rev Mod Phys, 2003, **75**: 1 021.
- [53] Kluge H J, Blaum K, *et al.* Phys Scr, 2003, **T104**: 167.
- [54] Van Duppen P. Nucl Instr and Meth, 1997, **B126**: 66.
- [55] Kluge H J, *et al.* Spectrochimica Acta, 2003, **B58**: 1 031.
- [56] Bricault P G, Dombbsky M, Schmor P W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1997, **B126**: 231.
- [57] Habs D, Kester O, Rudolph K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1997, **B126**: 218.

Isotope Separator on Line and β Decay of Neutron-rich Nuclei*

WANG You-bao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Isotope Separator on Line is briefly introduced with emphasis on the basic concept and features related to the production of exotic nuclei and β decay spectroscopy. The Ion Guide Isotope Separator on Line (IGISOL) at the University of Jyväskylä, Finland is presented in detail with experimental results on the decay of neutron-rich silver isotopes produced in proton induced symmetric fission.

Key words: isotope separator on line; β decay spectroscopy; structure of neutron-rich nuclei; proton induced fission

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10445004); Starting Foundation of National Ministry of Personnel for Oversea Chinese Students; Starting Foundation of Nuclear Physics Department, China Institute of Atomic Energy