

综 述

次级束流技术及其应用

冯 军 沈文庆 尹全民 靳根明 王 柄 周建群

(中国科学院近代物理研究所)

次级束流技术是近几年来在核物理研究中发展起来的一种新的、强有力的实验手段。本文综述了次级束流技术及其在新同位素合成、衰变特性研究中的应用以及在原子核反应机制和核结构研究中的应用,并描述了在兰州HIRFL加速器上发展这一技术的设想及一级束流光学计算结果。

关键词: 次级束流技术 丰中子同位素 反应截面 原子核半径 中子过剩自由度 束流光学

一、引 言

用磁铁元件和束流管道把加速器引出的束流在初级靶上的反应产物聚焦、选择、传输可得到所需的次级束流。用次级束流不仅能进行新同位素合成及其衰变特性的研究,还可以进行核反应机制及核结构特性的研究,甚至还可用在材料科学、生物医学等研究中。在法国GANIL、美国MSU及欧洲CERN,物理工作者利用Ar、Ne、Kr等束流轰击Ta、Be、Ni等靶子,得到了 ^8He 、 ^{11}Li 、 ^{14}Be 、 ^{19}B 、 ^{22}C 、 ^{24}O 、 ^{27}F 、 ^{30}Ne 、 ^{72}Ni 以及 ^{47}Ar 、 ^{57}Ti 、 $^{59,60}\text{V}$ 、 $^{61,62}\text{Cr}$ 、 $^{64,65}\text{Mn}$ 、 $^{68-70}\text{Co}$ 等上百种新的丰中子和丰质子同位素^[1-3],并发现了 β 延迟中子发射^[4]、 β 延迟单质子及双质子衰变等奇异的衰变方式。Tanihata等人在美国LBL实验室,通过测量相对论能区次级束流引起的核反应相互作用截面,研究了核半径随中子数的增加和减少时的变化规律,发现了 ^{11}Li 、 ^{14}Be 丰中子核的半径比相邻核的半径大20%,并且不符合 $R=1.18A^{1/3}$ 的规律,同时还发现 ^9Li 、 ^{12}Be 的横向动量分布是由宽度为 $\sigma_0=23\text{MeV}/c$ 和 $\sigma_0=95\text{MeV}/c$ 的两个高斯分布组成,从而提出在 ^{11}Li 、 ^{14}Be 核中可能存在中子皮结构^[5,6]。这一新的实验结果,提供了有关核的形状和半径的新信息,使人们进一步思考把适用于稳定核的理论外推到远离 β 稳定线的核是否正确和在多大程度上正确,并对远离 β 稳定线核的性质进行新的估计。Mittig^[7]等人用S. Kox提出的反应总截面参数化计算公式,根据中能区次级束流引起核反应的实验结果提取相互作用半径 r_0 ,得到 r_0 随中子过剩自由度 $(N-Z)$ 的增加而增加,并和 Z 无关,这是一个全新的结论,它可能来自形变随 $(N-Z)$ 和中子皮随 $(N-Z)$ 的增加而增加,也可能有别的因素。我们认为它可能是由于中子分布弥散度随 $(N-Z)$ 的增加而增加^[8]。这方面的实验和理论都有待于进一步发展,而且很有可能开创出一个新的研究方向。

二、次级束流技术

发展和应用次级束流技术,一个很重要的参数就是某一核素产额的大小。Guerreau^[9]用纯几何方法得到了两个相互作用的核在重迭区内的碎片产物的质量分布,用重迭区内核子巨

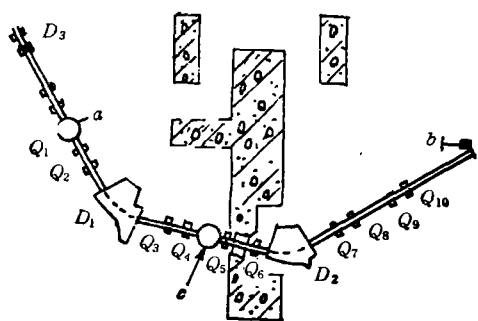


图 1 GANIL 的 LISE 谱仪次级束流线

Q_1 至 Q_{10} 为四极透镜, D_1 和 D_2 为偏转磁铁

a. 靶 b. 出射焦平面 c. 中间焦平面

Fig. 1 Schematic drawing of the LISE spectrometer at GANIL Q_1 to Q_{10} designate the quadrupoles, D_1 and D_2 designate the dipoles

a. Target b. Exit focal plane c. Intermediate focal plane

旋加速器、法国 GANIL 的 LISE 谱仪及 SPEG 谱仪、日本 RIKEN 的加速器及西德 GSI 的 SIS/ESR 计划。图 1 是法国 LISE 谱仪上的次级束流线布局图^[12]。它由 2 个相同的偏转磁铁、10 个四极透镜及 1 个六极透镜组成。第一个偏转磁铁把在零度方向附近的反应产物从主束中分开, 次级束流以空间等时性模式传输到 18m 远处的次级靶室进行所需要的研究。粒子鉴别用飞行时间及 $E-\Delta E$ 望远镜方法实现。为了得到纯度较高的次级束流, 还采用了加降能器的方法, 即在两个偏转磁铁之间加入不同形状和厚度的降能片, 利用不同核素在降能片中能损不同, 而用第二个偏转磁铁进一步进行核素选择^[13]。图 2(a) 是在 LISE 上用 65MeV/A $^{18}\text{O} + \text{Be}$ 产生的次级束流, 图 2(b) 是加了降能片在不同 $B\rho$ 选择下得到的较纯的次级束流。LISE

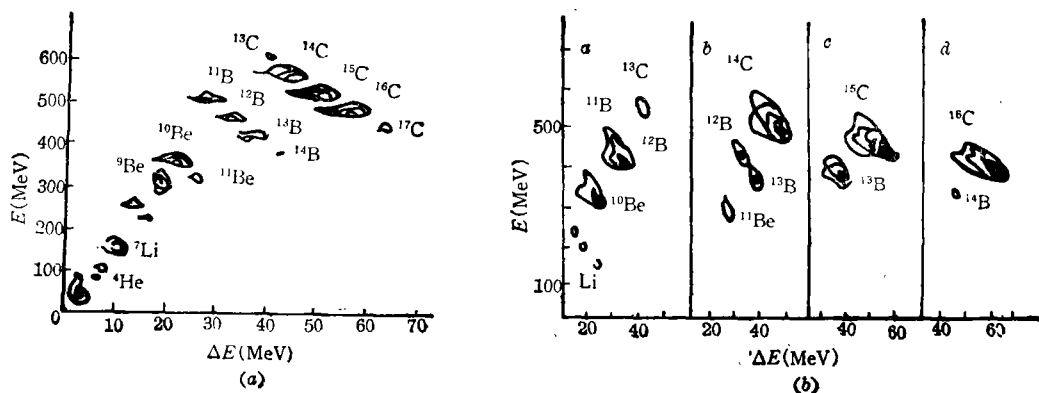


图 2 (a) 65MeV/A $^{18}\text{O} + \text{Be}$ 产生的次级束流

(b) 65MeV/A $^{18}\text{O} + \text{Be}$ 通过纯化后在不同 $B\rho$ 下得到的次级束流

Fig. 2 (a) Bidimensional plot showing the isotopic composition of a secondary beam obtained in the following conditions: 65 MeV/A $^{18}\text{O} + 1036\text{mg}/\text{cm}^2$ Be. $B\rho = 2.248\text{Tm}$, $\Delta B\rho/B\rho = \pm 0.22\%$

(b) Isotopic composition of the beams obtained by purification of the beam analysed in

Fig. 2 (a) a. $B_2 = 1.077$, b. $B_2 = 1.069$, c. $B_2 = 1.057$, d. $B_2 = 1.043$

$B_1\rho = 2.248\text{Tm}$, $\Delta B\rho/B\rho = \pm 2.78\%$

谱仪次级束流强度为 10^3 — 10^8 pps 范围。人们还对产生次级束流的最佳条件进行了实验和理论上的研究。对于质量接近于炮弹的次级束流要得到 10^7 — 10^8 pps 的流强已不成问题, 而对于远离炮弹质量的很丰中子或缺中子核素组成的次级束流强度可能较低, 但这对于经过选择的核物理实验及应用研究还是很有用的^[14]。

三、用次级束流引起的核反应研究原子核结构

用次级束流引起核反应进行的第一个实验是测量核反应相互作用截面。它是由Tanihata^[5,6]等人在美国 LBL 的 Bevalac 加速器的次级束流线上进行的。实验是用 800MeV/A 的 ^{11}B 和 ^{20}Ne 作为初级束流, 轰击 2.54cm 厚的 Be 靶产生 740MeV/A 的 $^3\text{--}^8\text{He}$ 、 $^{7\text{--}14}\text{Be}$ 、 $^{6\text{--}11}\text{Li}$ 次级束流, 再用这些次级束流和 Be、C、Al 靶进行反应, 测量不同次级束流引起核反应的相互作用截面 σ_I (反应中弹核内质子或中子数变化的总截面), 并用 (1) 式提取弹核和靶核的半径 R_I :

$$\sigma_I(p, t) = \pi [R_I(p) + R_I(t)]^2 \quad (1)$$

式中, $R_I(p)$, $R_I(t)$ 分别是炮弹和靶子的半径。图 3 是实验得到的不同核素的半径随 A 的变化曲线。从图 3 可见, ^{11}Li 、 ^{14}Be 、 ^{17}B 的半径都比相邻核大 20% 左右, 并且不再符合 $R = 1.18 A^{1/3}$ 的规律。用 Glauber 模型代入实验得到的 σ_I 值提取得到的原子核有效均方根半径 R_{rms} , 也得到同样的结果。如果作出 $^{11}\text{Li} + \text{C} \rightarrow ^9\text{Li} + \text{X}$ 碎裂反应产生的 ^9Li 的横向动量谱如图 4 所示。它是由分布宽度 $\sigma = 23 \pm 5 \text{ MeV/c}$ 的窄的高斯分布和分布宽度为 $\sigma = 95 \pm 12 \text{ MeV/c}$ 的宽的高斯分布组成。这和 β 稳定线附近的核的情形有很大差别。对于 β 稳定线附近的核, 碎裂反应的动量分布是单一的高斯分布, 其分布宽度与靶物质和炮弹能量无关, 只依赖于炮弹质量和碎片产物的质量及核子在核中动量涨落的大小。经过初步的理论计算, 人们认为 $\sigma = 23 \text{ MeV/c}$ 的高斯分布相当于 ^{11}Li 最外面的两个中子被移走, 这两个中子分布在很大的分布半径上, 和核反应相互作用截面测量得到的 ^{11}Li 有很大的半径是一致的; 而 $\sigma = 95 \text{ MeV/c}$ 的高斯分布相当于 ^{11}Li 内部的中子被移走, 从而得出, 对于很丰中子的核, 其外可能存在一个中子晕圈。而且, 人们推测, 如果这一结论得到肯定, 那么, 所有远离 β 稳定线的丰中子核外都可能被中子晕圈包围着。

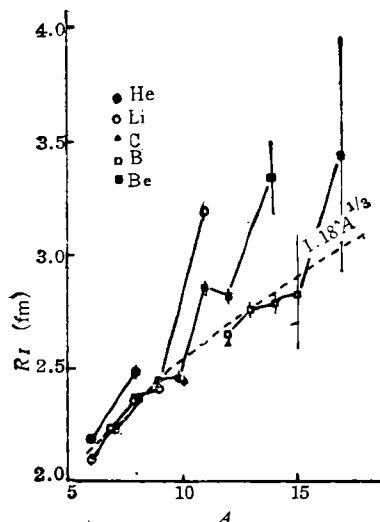


图 3 不同核素相互作用半径随 A 的变化
Fig. 3 Interaction radii determined from σ_I

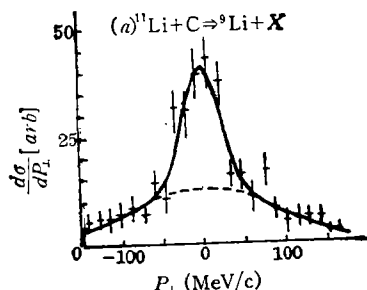


图 4 ^{11}Li 碎裂产生 ^9Li 的横向动量谱
Fig. 4 Spectrum of fragments from ^{11}Li collision

在中能区, 法国的 Mittig^[7] 等人用 60MeV/A 的 ^{40}Ar (流强 $1\mu\text{A}$) 轰击 350—500mg/cm² 厚的 Ta 靶产生的一系列丰中子核素 ($Z = 5$ —12) 测量对 ^{28}Si 靶的反应总截面, 并用

S. Kox 的公式提取原子核半径参数 r_0 。结果表明,从 B 到 Ne, r_0 随中子过剩自由度 ($N-Z$) 的增加而增加。但是 GANIL 的另一实验小组^[15]在 1988 年的一次国际会议上报道了用和 Mittig 等人类似的方法得到的另一实验结果:对于 $Z > 4$ 的元素, r_0 随着 $N-Z$ 的增加几乎保持不变。人们还不清楚这一差别是由于所用的靶轻重不同造成的,还是实验得到的数据误差太大或实验方法不同造成的,而且由于实验数据太少,还不能得到最后的结论。

根据现有的实验结果及理论,人们预言^[16],用次级束流开展的实验可能有以下几个方面:1. 研究用奇异核炮弹在相对论能区及中能区引起的碎裂反应,可以给出有关从中能到高能转移反应和碎裂反应的信息。2. 在中能区,用次级束流引起的反应进行热核的退激及粒子发射和裂变之间竞争的研究。3. 在较低能区(5—20 MeV/A) 可以进行准弹转移反应的研究,用象 ^{16}C 这样很丰中子的炮弹轰击缺中子靶,可以研究中子转移几率。4. 用次级束流进行中子皮、质子皮的研究。另外,人们现在还没有获得较低能量下的次级束流。

四、用次级束流技术合成新的同位素及其衰变特性的研究

在低能区,裂变反应、深部非弹性碰撞(DIC)反应、复合核蒸发轻粒子等反应机制为寻找远离 β 稳定线的同位素提供了很好的实验手段。Artuki^[17]和 Volkov^[18]等人在 70 年代利用 DIC,找到了十几种远离 β 稳定线的新的丰中子同位素。但是,以中、高能重离子碎裂反应为基础产生的次级束流可以得到本底小以及用其他方法难以得到的远离 β 稳定线很丰中子(或丰质子)的同位素。

Langevin^[1]用 44 MeV/A 的 ^{40}Ar 轰击 85 mg/cm² 厚的 Ta 靶,在 LISE 谱仪次级束流线上发现了 ^{29}N 、 ^{29}Ne 、 ^{30}Ne 等新的同位素,并证明了 ^{18}B 、 ^{21}C 、 ^{25}O 是粒子不稳定的。这和理论上预言它们是粒子稳定的结果不一致。另一实验小组采用同样的实验技术和设备,用 33 MeV/A 的 ^{86}Kr (流强 2.5×10^{10} Particles/s)轰击 Ta 靶(83 mg/cm²)及 Ti 靶(63 mg/cm²),第一次观察到了 ^{47}Ar 、 ^{57}Ti 、 $^{59-60}\text{V}$ 、 $^{61-62}\text{Cr}$ 、 $^{64-65}\text{Mn}$ 、 $^{66-68}\text{Fe}$ 、 $^{68-70}\text{Co}$ 等 14 种新的同位素,并且用 β - γ 符合技术测量了一些新核素的半衰期及衰变方式,发现有些核的结果与现有理论预言的结果不符。应用次级束流技术及传统技术使人们发现了大量的新同位素,对 Ne 已经达到质子滴线和中子滴线,对 Ca 已达到质子滴线,这些新核素的合成对检验和发展核理论起了重要的作用。通过对合成的新核素衰变特性的研究,人们已发现了一些奇异的衰变方式,如 β 延迟中子和质子衰变, β 延迟双质子和双中子衰变,直接质子、中子、双质子衰变,发射比 α 粒子重的核如 ^{14}C 、 ^{24}Mg 集团的衰变^[19]

等。图 5 显示了用 60 MeV/A ^{22}Ne 轰击 Be 靶和 Ta 靶产生的 ^{17}B 核素的 β 延迟多中子衰变的中子多重性谱,半衰期为 5.0 ms。 β 延迟 0n、1n、2n、3n、4n 中子衰变的相对几率分别为 0.24, 0.62, 0.13, 3.3×10^{-2} , 4×10^{-2} 。通过对这些远离 β 稳定性同位素衰变方式及寿命的研究,得到了关于核结构的新信息,并促使人们

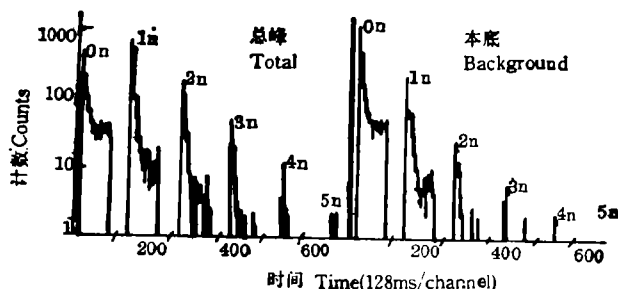


图 5 ^{17}B 的 β 延迟多中子衰变的中子多重性谱
Fig. 5 β -delay emission neutron multiplicities spectrum of ^{17}B

改进壳模型理论计算, 以更好地预言新同位素的半衰期、衰变方式等性质。

五、在兰州 HIRFL 装置上发展次级束流技术

兰州 HIRFL 加速器在 1989 年底建成出束后, 束流能量在中、高能区, 我们用国际上通用的 TRANSPORT 程序对 HIRFL 装置后输运线发展次级束流技术进行了较完整的一级束流光学计算, 确定了次级束流的传输模式, 给出了初级靶室的位置、焦平面探测器的位置, 并用移植的 Abrasion—Ablation Model 程序加上 Alice 程序计算了 HIRFL 装置可能产生的次级束流强度。

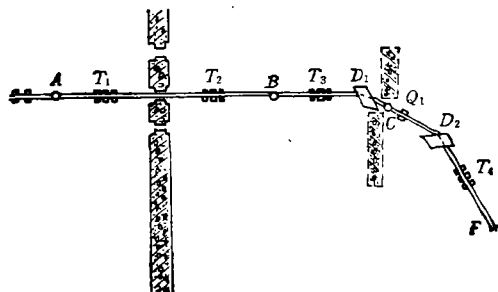


图 6 HIRFL 次级束流线

A. 靶 B. 零探测器 C. 中间焦平面 F. 出射焦平面

Fig. 6 HIRFL secondary beam line

A. Target B. Zero detector C. Intermediate focal plane F. Exit focal plane

磁场可调的四极透镜; (3) 尽量利用 HIRFL 装置后输运线原有的设备; (4) 有利于以后的束流传输。这样, 初级靶位置选取如图 6 所示, 距第一个四极透镜 2.75m。从初级靶到次级靶的传输距离为 31.094m。计算得到的束流包络如图 7 所示。从图 7 可见, 束流在第一个偏转磁铁 D_1 后约 1m 处在水平方向形成一个焦点。要求形成焦点的主要原因是: (1) 放置焦平面

图 6 是 HIRFL 装置后输运线到重离子飞行时间望远镜终端之间的束流线, 即 HIRFL 次级束流线。把它和图 1 中 LISE 次级束流线相比, 两条束流线的布局基本相同, 只是 LISE 谱仪在 2 个偏转磁铁之间用了 4 个四极透镜, 而 HIRFL 束流线在两个偏转磁铁之间只有一个四极透镜, 但通过束流光学计算, 两者传输次级束流都可以实现相同的传输模式。初级靶位置的选取主要考虑: (1) 为了减少本底及有较好的粒子鉴别本领, 初级靶越远离次级靶越好; (2) 为了在初级靶上得到较小的束流斑点及便于束流制备, 初级靶处束流必须是双腰而且靶子前面必须有

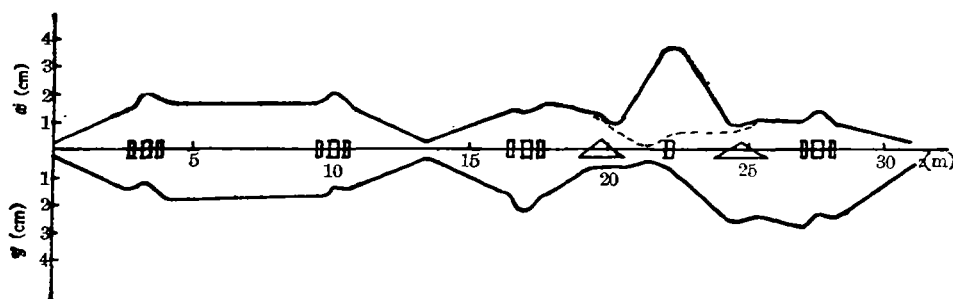


图 7 HIRFL 次级束流包络

水平和垂直发射度为 $\varepsilon=15\pi\text{mm. mrad}$, 动量宽度为 $\pm 2.5\%$, 物靶 $x_0=y_0=0.3\text{cm}$

虚线表示 $\delta=0$ 时水平束流包络

Fig. 7 HIRFL secondary beam envelopes

Horizontal and vertical emittances $\varepsilon=15\pi\text{mm. mrad}$, momentum width $\pm 2.5\%$ and target object $x_0=y_0=0.3\text{cm}$. Dashed lines: horizontal beam envelope for $\delta=0$

探测器,测得粒子轨迹的位置,从而精确定出 $B\rho$,得到好的质量分辨;(2)放置光栏,用作对束流的调制及选择;(3)放置降能器,用作 $B\rho$ -能损选择方式来得到很好的粒子选择。从初级靶到偏转磁铁 D_1 的焦平面的一级变换矩阵为:

$$A = \begin{pmatrix} 0.92687 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.95220 \\ 5.82345 & 1.07891 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 6.84108 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00950 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.83611 & 0.99059 & 0.00000 & 0.00000 \\ -0.07909 & 0.10273 & 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 & -0.04725 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{pmatrix}$$

如果初级靶点 $X_0 = \pm 0.3\text{cm}$, 相放大倍数 $G = (X/X_0)_A = 0.927$, 动量分散 $D = (X/\delta)_A = 0.952\text{cm/percent}$, 那么谱仪的分辨率为:

$$R = \frac{\Delta B\rho}{B\rho} = \frac{2X_0 G}{D} \approx 5.84 \times 10^{-3}$$

同样条件下, LISE 谱仪为 $R = 2.64 \times 10^{-3}$ 。

从初级靶到次级反应靶室焦平面的一级变换矩阵为:

$$C = \begin{pmatrix} -1.55189 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ -0.81283 & -0.64438 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & -0.65432 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & -11.35079 & -1.52831 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 & -0.09450 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{pmatrix}$$

从矩阵 C 可以看出, $R_{16} = R_{26} = 0$, 即位置消色差及角度消色差都等于零,实现了束流空间等时性传输。根据计算结果及国外一些实验室的经验,在 HIRFL 装置上发展次级束流技术是可行的。所需增加的设备正在设计制作中。在 HIRFL 次级束流线上首先可能开展的工作有:(1)用丰中子炮弹测量原子核反应总截面;(2)奇异核弹性散射研究;(3)远离 β 稳定线核素衰变特性的研究。

参 考 文 献

- [1] M. Langevin et al., *Phys. Lett.*, **150B**(1985), 71.
- [2] D. Guillemaud Mueller et al., *Z. Phys.*, **A322**(1985), 415.
- [3] B. Sherrill et al., *J. de. Phys.*, 1986, C4-215.
- [4] A. C. Mueller et al., GANIL, p88-02.
- [5] I. Tanihata et al., *Phys. Lett.*, **160B**(1985), 80.
- [6] I. Tanihata et al., *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 113C.
- [7] W. Mittig et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1988), 1889.
- [8] Shen Wenqing et al., *Nucl. Phys.*, **A491**(1989), 130.
- [9] D. Guerreau, *J. de. Phys.*, (1986), C4-207.
- [10] J. Gomez del campo et al., ORNL-TM-7295.
- [11] M. Uno et al., INS. Report NUMA, 40(1982).
- [12] R. Anne et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A257**(1987), 215.
- [13] J. P. Dufour et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A258**(1986), 267.
- [14] B. G. Harvey, *Nucl. Phys.*, **A444**(1985), 198.
- [15] M. G. Sait-Laurent et al., GANIL p88-10.

- [16] R. Bimbot, Invited talk on con. "Frontiers of heavy-ion phys" June 15—19, 1987, Yugoslavia
[17] A. G. Artukh et al., *Nucl. Phys.*, **A176**(1971), 284.
[18] V. V. Volkov, Int. conf. nucl. phys.,(Munich), Vol. 1, 1973, p279.
[19] 沈文庆, 1988年南京全国核物理会议特邀报告。

Secondary beam technology and its application

Feng Jun Shen Wenqing Yin Quanmin
Jin Genming Wang Bing Zhou Jianqun

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica*)

Abstract

Secondary beam is a new and efficient experimental technology which is developed to study nuclear physics in recent years. This technology and its application are reviewed. The idea for developing the secondary beam technology on HIRFL accelerator is described, and the result of first-order beam optics is also given.

Keywords: Secondary beam technology Neutron-rich isotope
Reaction cross section Nuclear radius Neutron excess degree
Beam optics

(1988年12月7日收到)