

放射性束加速与放射性束物理

黄业成

(广州市花县经协发展总公司 广州花县 510800)

摘 要 本文论述放射性束加速的原理、国际现状和相应学科的发展前景.

关键词 放射性束加速, 核物理, 核天体物理, 原子物理, 材料科学.

1 引言

早在 1983 年, W. A. Fowler 在他的诺贝尔演说辞中就说道:“我认为, 下一个年代, 放射性束技术的不断发展和应用, 将为实验室核天体物理带来最激动人心的成果.”事实上, 这几年放射性束加速及其物理研究已广泛引起人们的极大兴趣, 这在 1989 年召开的“核科学长远计划讨论会”的报告^[1]中得到反映. 最近的两次主要会议^[2,3]及 EMIS-12 国际会议^[4], 已就放射性束装置及其科学动机和对核物理、核天体物理、材料科学等的发展影响作了评估, 在国内也有姜承烈^[5]和笔者^[6]的文章作过介绍. 本文将进一步探讨其有关的理论和技术问题.

2 放射性束的产生

PF(炮弹碎裂)方法是利用中高能(50~2000MeV/u)重离子束的周边反应产生奇异核碎片, 这些碎片具有与初级束流近似相等的动量并在 0°附近出射, 次级束流线正是为了接收这些炮弹碎裂产物而设计的.

ISOL(在线同位素分离器加后加速)方法是利用高能(500~1000MeV)质子束轰击厚靶产生各种反应产物. 在高温条件下, 放射性原子从靶材料内迅速释放和扩散, 传输到离子源中被电离和引出, 由同位素分离器选择特定质量的核素送至后加速器(通常是线性加速器)进行加速.

人们可以利用 PF 方法产生的放射性束, 轰击次级靶研究次级反应. 它的优点是分

离时间短(μs 量级), 没有化学选择性(这也正是 PF 方法的缺点), 具有较高的产物接收率; 缺点是由于弱的初级束流强度和使用箔靶(靶厚约 $1\text{g}/\text{cm}^2$), 产生次级束流强度较低. 束流品质差(有大的发射度和高的束流沾污), 实用上要增加束流纯化设备, 以及大的能量展宽, 能量不可调等. 国际上的一些 PF 装置如表 1 所示, 它们提供的是能量较高的放射性束(几十至几百 MeV/u).

ISOL 方法的优点是使用高能质子束和厚靶, 能产生束流强度很高的放射性束, 经 ISOL 分离之后的低能(50keV)离子束被送至 Linac 进行后加速, 束流品质非常优良, 能量值可以根据实验需要自由选取; 缺点是扩散、吸收和电离过程强烈地依赖于元素的物化性质, 速度比较慢, 对研究极短半寿命核素不利, 产物在靶材料的释放过程中, 造成较大的衰变损失. 然而, 这一特性却可作为对核素 Z 的选择而加以利用. 因为元素的物化性质不同, 造成产物在靶材料(或俘获物质)的释放和扩散时间的差异, 由此引起的衰变损失可作为对 Z 的选择方法.

为了便于定量比较, 我们引入一个称为“发光度”(Lumfmosity)的物理量, 其量纲为 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 它等于束流强度与靶子厚度的乘积, 是与截面无关的参量. 事实上, 产额可表作 $Y = \sigma IN = \sigma L(n/s)$, 这里 σ 是截面(cm^2), 所以发光度 $L = IN$, I 为束流强度, N 为单位面积中的靶原子数. 基于厚靶情况, ISOL 方法的极大发光度近似为 $10^{38} \sim 10^{39}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (对箔靶则为 $10^{35} \sim 10^{36}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). 而用 PF 方

法, 则为 $10^{36}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 量级. ISOL 方法比 PF 用的靶厚($100\text{g}/\text{cm}^2$)与束流强度($100\text{p}\mu\text{A}$)较方法高 $10^3\sim 10^4$ 倍, 这是因为 ISOL 方法所之 PF 方法($1\text{g}/\text{cm}^2, 1\text{p}\mu\text{A}$)大得多的缘故.

表 1 PF 装置概况

装置名称/地点	前加速器	质量范围 (u)	能量范围 (MeV)	强度(n/s)	说 明
B1/B42/B44 束流线 LBL, 贝克莱	Bevalac 8~2100MeV/u $\leq 10^9\text{n/s}$	≤ 50	≤ 800 (典型值)	$\leq 10^8$	• B45 束流线在建造中 • Bevalac 1994 年关闭
LISE-3 GANIL, 冈城 法国	两台 K=320 相连的 回旋加速器 25~100MeV/u $\leq 10^{12}\text{n/s}$	≤ 136 (典型值)	≤ 80 (典型值)	$\leq 10^9$	• 强度在逐渐增加 • SISSI 超导螺旋在逐渐 增加 • 增加 ISOL 设备在讨论中
PIPS RIKE, Wako(理化所) 日本	K=540 环形回旋加速器 30~135MeV/u $\leq 10^{11}\text{n/s}$	≤ 136 (典型值)	≤ 110 (典型值)	$\leq 10^8$	• 在运行中
A1200 MSU, East Lansing, Michigan	K=1200 超导回旋加速器 50~180MeV/u $\leq 10^{11}\text{n/s}$	≤ 136 (典型值)	≤ 150 (典型值)	$\leq 10^8$	• 在运行中
K4-K10 Complex 杜布纳, 俄罗斯	U-200/U-400/U-400M 3 台回旋加速器与 2 个储存环耦合 85~170MeV/u $\leq 3 \times 10^9\text{n/s}$			$\leq 2 \times 10^8$	• 已申请
FRS/ESR GSI, 达姆斯达德 德国	SIS 18 同步回旋加速器 100~2000MeV/u $\leq 10^8\text{n/s}(\leq 10^{11}\text{n/s})$	≤ 238	≤ 1000 (典型值)	$\leq 10^6$ ($\leq 10^8$)	• 已委托 • 计划 1995 年提高强度 • 增加 HITRAP 在讨论中

用 PF 方法所提供的放射性束能量为 $50\sim 1000\text{MeV}/\text{u}$, 这个能区对于核反应的研究和对放射性束本身的研究是很合适的, 对低能量范围, 必须将它减速, 这样会造成较大的束流强度的损失和引起动量展宽. 对于靠近位垒或垒下能区, 包括核结构研究, 低能核反应机制研究、核天体物理、原子物理和材料科学的研究等, 由 ISOL 方法提供的低能量、高

束流强度、高束流品质的放射性离子束, 是最理想的. 本文正是基于 ISOL 方法, 论述有关的实验装置和物理研究问题.

3 放射性束的加速

3.1 前加速器的选择

放射性束加速装置由前加速器, 质量分离器(ISOL, 包括靶子和离子源等)和后加速

器等大型设备组成。

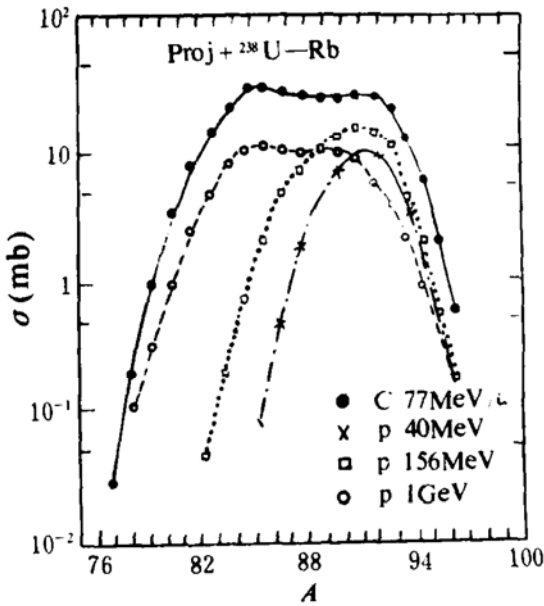


图 1 各种离子束反应截面比较

比较一下中能(50~100MeV/u)重离子核反应、高能质子(1GeV)、中能质子(600MeV)和低能质子(<100MeV)核反应,图1是各种能量的荷电粒子与U反应生成Rb的截面,这是一个具有典型意义的例子。由图看出, $\sigma_{H,1}/\sigma_{P,高能} \sim 5$, $\sigma_{H,1}/\sigma_{P,中能} \sim 10^2$, $\sigma_{H,1}/\sigma_{P,低能} > 10^2$, 由于产额 $Y = \sigma L$, 将加速器的发光度 L 考虑在内, 有如下结果: $Y_{H,1}/Y_{P,高能} \sim 10^{-3}$, $Y_{H,1}/Y_{P,中能} \sim 1$, $Y_{H,1}/Y_{P,低能} > 1$. 即 $Y_{P,高能} \gg Y_{H,1} \approx Y_{P,中能} > Y_{P,低能}$. 由此得如下结论: (1) 高能质子束远优于中能重离子束和中、低能质子束; (2) 中能重离子束与中能质子束具有同样的效果; (3) 低能质子束是最差的. 比较 24GeV、1GeV 的质子束轰击 U 靶产生 Rb、Cs 的同位素分布曲线(图略), 24GeV 与 1GeV 的结果差异不大, 考虑到造价与效率比的关系, 用能量 1GeV 的高能质子束作前加速器是最佳的选择. 因为对更高能量的质子束来说, 获得好处的仅是增大射程, 而反应截面并非经常随能量的增加而增大, 而加速器的造价却是数量级增加的. 这说明为什么目前国际上的一些实验室在建造放

射性束装置时,除了利用现成的设备作前加速器之外,对新建的一般都选择 1GeV 的质子加速器. 姜承烈先生曾提出,在北京建造一台 50~100MeV 的强流质子回旋加速器,与现有的、拟作后加速用的 HI-13 串列加速器相连,来实现放射性束的加速. 笔者认为,择选这样一个方案,不管出于何种考虑,显然不是上策,深值推究.

3.2 对 ISOL 的要求

放射性束加速,最重要的是在注入到后加速器之前要产生同位素纯和同量异位素纯(A,Z)的离子束. 用中等质量分辨($M/\Delta M \sim 2000$)的磁质量分离器,可实现同位素纯的分离. 在许多情况下,人们还需要更高分辨的分析系统($M/\Delta M \sim 3000$);以实现同量异位素分离. 尤其当接近稳定线的核素产额高于接近滴线核素产额几个数量级时,要从中选出纯度极高的同量异位素进行后加速更是如此. 作为放射性束加速装置部件之一的 ISOL,应设计成既可供常规 ISOL 物理研究又可进行同量异位素分离. 目前国际上的绝大多数 ISOL 都不具备这样的性能,只有 CERN 的 ISOLDE-III 具有同量异位素分离的能力. 对目前正在筹建的放射性束加速装置来说,一般都要重新设计一台高分辨的 ISOL,而不能简单的利用现有的设备.

3.3 对后加速器的要求

基于核天体物理、核物理和其它学科研究的要求,后加速的质量数 A 至少在 60(对天体物理)和 100~200 以内(对核物理). 能量要从 100keV/u 至 1MeV/u 甚至 10MeV/u 连续可变. 传输效率要足够高,有用的束流强度达到 nA 量级,且能接受来自 ISOL 的正、负低能离子束. 基于这些特点,选择线性加速器(Linac, 传输率高达 100%),作为后加速装置较之其他加速器(包括回旋加速器和串列加速器等)要合适得多. 后加速的一个关键部分是它的第一级必须以高效率“捕获”、“成形”束和加速来自 ISOL 的低能正(或负)的单电荷态离子束,用高频四极透镜(RFQ)最

为理想. 它可将粒子能量加速到 100 ~ 200keV/u, 荷电粒子经剥离器后, 引入两级的线性加速器, 第一级能量约为 1.5MeV/u, 第二级则为 0.2 ~ 10MeV/u, 这样就能很好的满足有关学科的需要.

表 2 国际放射性束加速装置简况

装置	前 加 速				靶 子		放 射 性 束				说明
	前加速器	粒 子	能量 MeV	强度 μA	元素 Z	厚度 g/cm ²	后加速器	束流 A	能量 MeV/u	强度 n/s	
Louvain La Neuve	K=30 回 旋	p	30	500	6	1	K=110 回 旋	11~19	0.6	5×10^8	运行中
Louvain La Neuve ARENAS	K=110 回 旋	p,d, He	80	25(外) 300(内)	13	5	45MV SC 直线加 速器(Linac)	6~31	1.5	10^9	
CERN ISOLDE PRIMA 欧洲核子 研究中心	1.0GeV 同步回旋 PS-Booster	p	1000	3	4~92	3~300	RFQ + Linac	6~30	1	$10^9 \sim 10^{12}$	PRIMA 非 官方提出 申请
ORNL HHIRF 美 国	K=100 回 旋	p,d, He,Li, B	55~86	10~130	6~32	5	25MV 串 列加速器	80	5	$10^6 \sim 10^{11}$	
EB 88 LBL, 美国	K=30 回 旋	p	30	500	6	1	K=140 回 旋	10~15	1	$10^6 \sim 10^9$	
GANIL 法 国	K=30 +380+380 回 旋	C~Ar	100 MeV/u	8	6~92	3	RFQ + Linac	<200	5~50	$10^9 \sim 10^{11}$	在讨论中
ISAC TRIUMF 加拿大	K=500 回 旋	p	440	10~100	4~92	3~100	RFQ + Linac	<60	1.5	$10^7 \sim 10^{12}$	已提出申请
JHP 日本强子计划	1.0GeV Linac	p	1000	10~100	4~92	3~300	RFQ+Linac	<60	6.5	$10^7 \sim 10^{12}$	已提出申请
Rutherford Appleton 实验室 英 国	800MeV 同步回旋	p	800	100	4~92	3~200	RFQ+Linac 或同步回 旋+ISIS	<80	6.5	$10^7 \sim 10^{12}$	已提出申请
莫斯科	Linac	p	600	160	4~92	3~200	RFQ+Linac	<80	6.5	10^{12}	已提出申请
ISL 北 美	500~ 1000MeV 轻离子 加速器	p, d,He	800 500~ 1000	1000 100~300	92 4~92	0.02~ 0.01 100~300	RFQ + Linac	<220	10	10^9 $10^9 \sim 10^{12}$	在讨论中

一些实验室应用(或提出)回旋加速器作为后加速装置, 主要是因为人们对它很熟悉, 在不少实验室中是很有成效的. 它的好处在于有同量异位素分辨的质量色散, 能量范围

高至 100MeV/u, 造价和运行费用都较低. 然而这些优点被加速器的能量正比于粒子电荷态的平方的事实所抵销. 因为在注入到回旋加速器之前, 必须使粒子处于高电荷态, 效率就会大大降低. 粒子通过回旋加速器的传输率典型值为 10%.

串列加速器的优点在于能与来自 ISOL 的直流输出很好的匹配, 对任何荷质比的低能离子有好的接受度, 低的能量展宽和能量易于改变. 但迄今为止只有一个小组提出用串列加速器作后加速. 因为串列加速器要求负离子引入, 而将 ISOL 的正离子变换成负离子, 必须通过负离子源或电荷交换方法, 其损失率是很大的. 若剥离效率为 25%, 典型的总传输率只有 1%, 这说明为什么只有很少人采用串列加速器作后加速的原因. 本文前面已说, 不宜选择“用低能质子束作前加速和用北京 HI-13 串列加速器作后加速”, 缘由也在于此. 如果在兰州重离子加速器之后建造一台高分辨的 ISOL 和线性加速器与之相连, 就能使我们拥有先进的实验装置, 而参与国际竞争.

国际上的放射性束加速装置简况列如表

2, 它使我们对这些装置的基本性能和人们选择前加速、后加速的意向有所了解.

4 放射性束加速的几种设计方案

4.1 日本 E-Arena 装置(JHP)强子计划^[4,7]

它由 1 台 1GeV 的质子直线加速器、一台高分辨(30000)的 Isobar(同量异位素)分离器和三级不同能量的重离子加速器组成, 第一级使用 RFQ, 能量为 0.17MeV/u, 第二级 Linac, 能量为 1.4MeV/u, 第三级漂移管 Linac(DTL). 这台装置的情况笔者在文献[6]中作过介绍.

4.2 美国洛斯·阿拉莫斯的 ISL^[8]

前加速是能量为 1GeV 的高能质子加速器, 利用厚靶与高能质子束实现核反应, 产物经 ISOL 分离后馈送到高分辨的 Isobar 分离器. 能量为 60keV 的离子束经两级 RFQ 加速达到 100keV/u, 通过剥离器荷质比(q/m)达到 $1/10 \sim 1/24$. 经 DTL 线性加速器第一级加速后, 提供 1.5MeV/u 的放射性束供天体物理研究. 第二次剥离后, $q/m = 1/4 \sim 1/3$, 由第二级 Linac 加速, 可获得 0.2~10MeV/u 的放射性束供于核物理研究(见图 2).

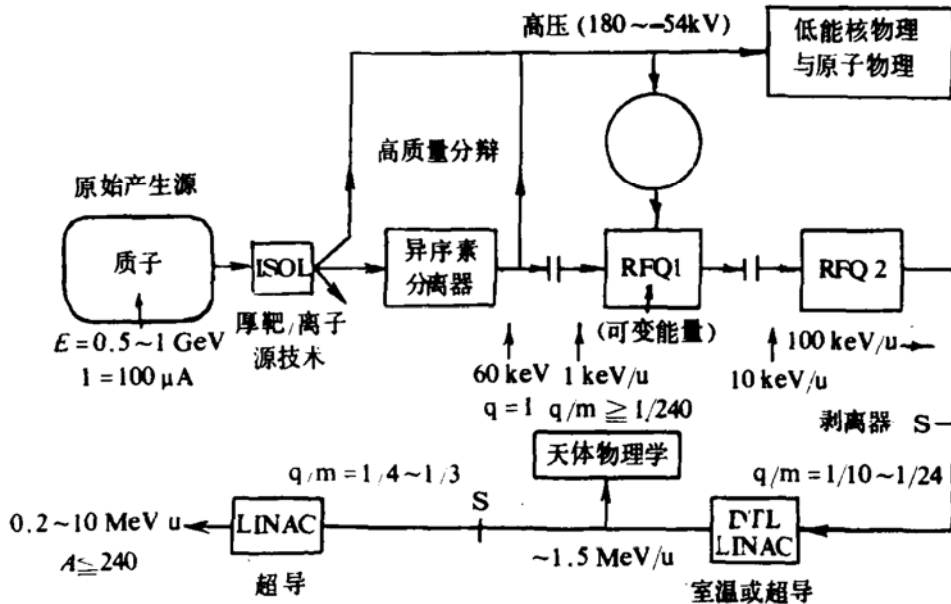


图 2 北美 ISL 放射性束加速装置方框图

4.3 CERN 的 ISOLDE-PRIMA 装置^[9]

前加速由能量为 1GeV 的 PS-Booster 承担, 经高分辨的 ISOLDE-III 在线同位素分离器送至 PRIMA 实现后加速。

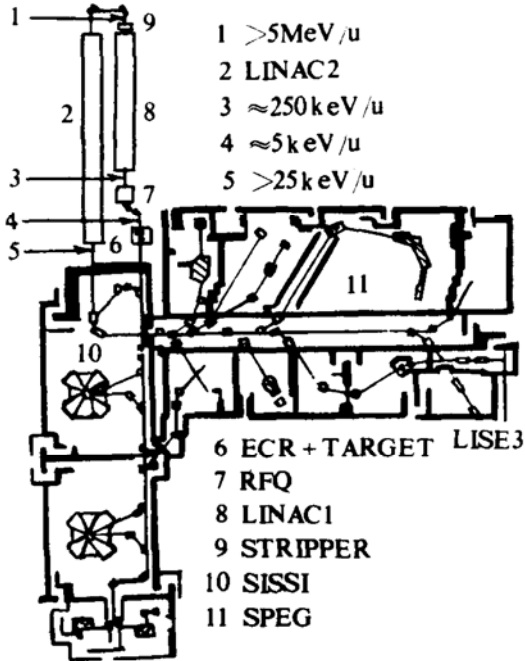


图 3 GANIL 放射性束加速装置方案

4.4 法国 GANIL^[10]

前加速器是两台能量常数为 $K=380$ 的重离子加速器. 250keV/u 的固定能量的 RFQ 将离子预加速, 第一台 Linac 将粒子加速后进行剥离, 能量可达 5MeV/u, 送入第二台 Linac, 最后的能量为 25MeV/u. 这台装置的结构如图 3 所示. (待续)

参 考 文 献

- 1 Nuclei, Nucleons, Quarks; Nuclear Science in the 1990's NSAC(1989)
- 2 Myers W D. Proceedings of the first international conference on radioactive nuclear beams (World Scientific, Singapore, 1990)
- 3 Marciano J B, et al. LANL Report LA-11946-C (1990)
- 4 Proceedings of EMIS- 12 Conference, Sendai, Japan, 1991
- 5 姜承烈. 核物理动态, 1991, 8(2)
- 6 黄业成. 核物理动态, 1992, 9(1)
- 7 Nomura T. Proc. 4th. Int. Conf. on Nucleus-Nucleous, Kanazawa, June 1991
- 8 LALP 91-51
- 9 Ravn H L. CERN-PPE/91-173
- 10 GANIL P91-12

Acceleration and Physics of RI Beams

Huang Yecheng

(Economic and Technical Development Co. Hua County, Guangzhou, 510800)

Abstract The principle and the present situation as well as the prospects corresponded to the physics of RI Beams are described.

Key Words acceleration of RI beams, nuclear physics, nuclear astrophysics, atomic physics, material science.