

HIRFL的束流品质

魏宝文

(中国科学院近代物理研究所)

一、HIRFL

兰州重离子研究装置(HIRFL)包括一台能量常数 $K=69$ 的扇聚焦回旋加速器(SFC)作为注入器,和一台能量常数 $K=450$ 的分离扇回旋加速器(SSC)作为主加速器。SFC和SSC之间有60米的前束流线(L_1)相连,沿 L_1 装有1个剥离器和2个聚束器。束流从SSC通过后束流线(L_2)被引导到实验大厅的8个终端上,目前没有分束装置。束流从SFC还可以通过10米束流线被引导到小实验厅单独使用。实验大厅面积1456平方米,8个终端仅占用一半多。所以,它为后加速和实验装置的扩充留有足够的空间。SFC已于1987年5月7日出束,SSC将于1988年底出束。8个终

端也将于1988年底安装就位,1989年带束调试并投入使用。

二、束流品质

描述一台重离子加速器的束流品质和运行性能,主要有9个指标。其中束流品质6个:引出能量 E ;束流种类(A, Z);束流强度 I ;能量分散 ΔE ;几何特性 ϵ ;时间特性 τ 。运行性能3个:稳定程度 S ;调节能力 r ;控制水平 C 。

现以HIRFL为例,分类予以叙述。

1. E 和(A, Z)

表1给出了重离子加速器的束流能量 E 同质量数 A 和电荷态 Q 之间的关系。由表1可见, K 已定, E 随 Q 而增加。高 Q 的获得靠电

表1 束流能量 E 同质量数 A 和电荷态 Q 之间的关系。 K 是能量常数

加速器	$E(\text{MeV/u})$	K	备注
高压型	$K\left(\frac{Q}{A}\right)$	V	V =端电压(MV)
回旋型	$K\left(\frac{Q}{A}\right)^2$	$\frac{300^2}{2931.5}B\rho$	B =磁场(Tesla) ρ =引出轨道曲率半径(m)

子—离子之间的电离碰撞。全剥离时 $Q=Z$,从而得到最大能量。一般有

$$Q = Z \left\{ 1 - \exp\left[- \frac{3.86}{Z^{0.447}} \sqrt{W(\text{MeV/u})} \right] \right\} \quad (1)$$

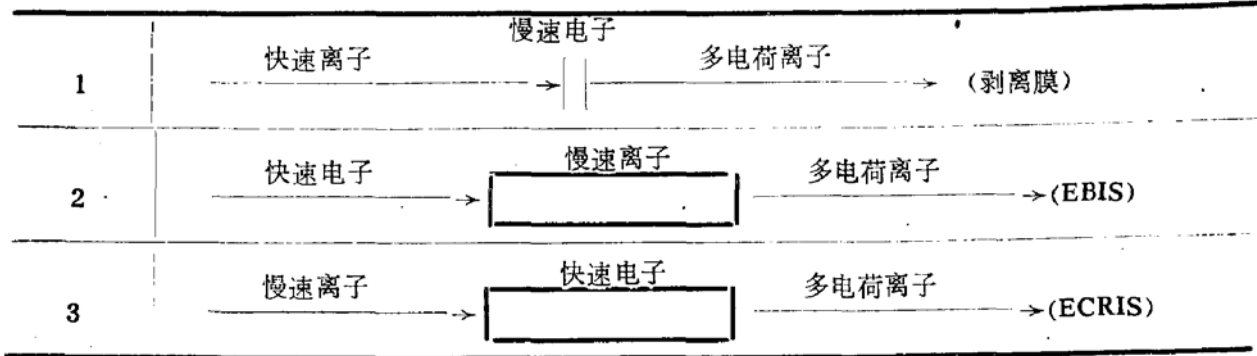
其中 Q =平衡电荷态; W =电子—离子之间的相对动能。

由式(1)可见, Q 又随 W 而增加。提高 W

的方法是使用预加速。这就是迄今世界上重离子加速器普遍采用的剥离膜+串级加速的基本原理。HIRFL也是这样。但是,剥离膜并不是获得高 Q 的唯一方法。实际上,获得高 Q 的方法有三种,即剥离膜、电子束离子源和电子回旋共振离子源(见表2)。以 $^{14}\text{N}^{7+}$ 为例,试比较表2中的方法1和方法3:

方法1: $n = 10^{24} \text{cm}^{-3}$ (碳膜密度), $L =$

表2 获得高电荷态的三种方法,EBIS—电子束离子源,ECRIS—电子回旋共振离子源



10^{-5}cm (碳膜厚度), $W = 5 \text{ MeV/u}$ (预加速能量), $\tau = L/V = 10^{-14}\text{Sec}$ (穿透时间), $n\tau = 10^{10}\text{cm}^{-3}\text{Sec}$ (轻核全剥离条件)。

方法3: $L = 100\text{cm}$ (ECR源中等离子区长度), $\tau = 10^{-2}\text{Sec}$ (扩散时间), $n = 10^{12}\text{cm}^{-3}$ (ECR源中等离子密度)。

从以上比较不难看出,当等离子体温度大于一定值时, $n\tau = 10^{10}\text{cm}^{-3}\text{Sec}$ 可以认为是轻核的全剥离条件。密度 n , 约束时间 τ 和温度 T 是等离子体的三个基本量。它们同电离水平的关系可以概括为以下 6 种情况:

1) $T < 10\text{eV}$ 无电离; 2) $T < 100\text{eV}$, $n \sim 10^8\text{cm}^{-3}\text{Sec}$ 低电离, 如 PIG 离子源; 3) $T \geq 3\text{keV}$, $n\tau \sim 10^{10}\text{cm}^{-3}\text{Sec}$ 轻核全剥离, 如 ECRIS, EBIS; 4) $T \geq 10\text{keV}$, $n\tau \sim 10^{11}\text{cm}^{-3}$

Sec 中重核全剥离 (Fe^{26+}), 如 Tokamak; 5) $T > 30\text{keV}$, $n\tau \sim 10^{13}$ 重核全剥离 (U^{92+}), 目前未实现; 6) $T = 10\text{keV}$, $n\tau = 10^{14}\text{cm}^{-3}\text{secD}/T$ 核聚变点火的 Lawson 判据。

获得同样效益, 方法 2 或 3 要比方法 1 省钱和简单。正是由于这样的考虑, HIRFL 的注入器 SFC 上拟安装轴向注入的 ECR 外离子源, 以取代原设计中的另一台注入器—20MV 串级静电加速器¹⁾。该源采用 10GHZ—FERROMAFIOS 型, 由近物所和法国 CENG 共同研制, 1988 年完成。表 3 是其引出束流参数, 图 1 是用和不用 ECR 源时 HIRFL 的引出束流能量 E 和质量数 A 之间的关系曲线²⁾。表 4 给出了 HIRFL 的 ECR 重离子源的主要参数。

表3 10GHZ—FERROMAFIOS ECR 离子源的引出束流和电荷态, 引出电压 15KV, 引出孔 $\phi 7$, 发射度 $\epsilon \leq 300\text{mmrad}$ 。

	C^{4+}	C^{6+}	N^{5+}	N^{7+}	O^{6+}	O^{8+}	Ne^{4+}	Ne^{9+}	Ar^{10+}	Ar^{13+}	Kr^{17+}	Kr^{19+}
束流强度 (μA)	28	0.35	40	0.35	25	0.15	100	0.16	8	0.2	1.2	0.4
	Xe^{19+}	Xe^{22+}	Al^{8+}	Al^{10+}	Si^{6+}	Si^{8+}	Mo^{18+}	Ta^{20+}	W^{21+}	U^{27+}		
	3	1.3	1	0.1	3	0.1	1.8	3	2	0.065		

考虑到 HIRFL 中 SFC 和 SSC 的匹配模式应先易后难以取得经验; 即先同频加速后不同频加速 (见表 5), 也考虑到近物所过去的核探测技术低能较熟悉而中能缺乏经验还考虑到应优先供束做实验以取得投资效益, HIRFL 从 1987 至 1991 年的供束计划, 拟按表 6 安排。

2. I 和 ΔE

令 I_0 , I_1 和 I 分别表示离子源, SFC 和 SSC 的引出束流强度, 则:

$$I_1 = I_0 \left(\frac{\Delta\theta_1}{2\pi} \right) \epsilon_1 \epsilon_{exL} \exp \left[-5 \times 10^{17} \sigma p \left(\frac{AE_1 R_1}{Q\Delta E_1 2} \right) \right]$$

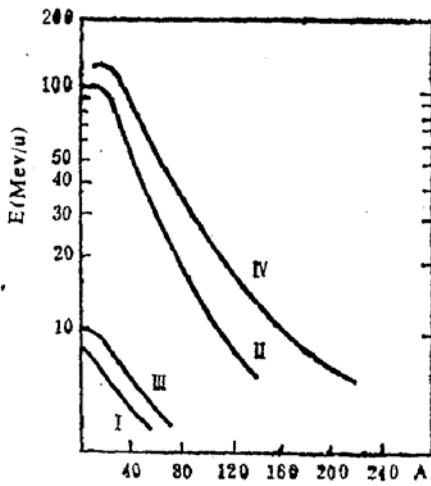


图1. HIRFL的束流能量E和质量数A之间的关系图

- I — PIG + SFC
- II — PIG + SFC + SSC
- III — ECR + SFC
- IV — ECR + SFC + SSC.

表4 HIRFL的ECR重离子源的主要参数

型式	FERROMAFIOS	
磁场	轴向最大磁场	4.5~5.5KG
	镜 比	1.5
	六 极 墙	4KG
	功 率	~50KW
微波	频 率	10GHZ
	功 率	3KW
	负 载 因 子	连续
		0.5 50mS in 50mS off

表5 SFC和SSC的匹配模式

模式	R_1/R	n_1/n	h_1/h	$f_1(\text{mhz})$	$f(\text{mhz})$	$F(\text{mc/s})$	$E(\text{mev/u})$	$\eta\%$
A	3/4	1/1	3/4	6.5—14.0	6.5—14.0	1.6—3.5	5.6—27.1	100
B	3/4	1/2	3/2	13.0—18.0	6.5—9.0	3.3—4.5	23.2—46.0	50
C	3/4	3/2	1/2	6.0—9.3	9.0—14.0	4.5—7.0	46.0—124.8	50
D	3/4	3/2	3/6	6.0—9.3	9.0—14.0	1.5—2.3	4.8—11.7	50

h_1, f_1 —SFC的谐波数和高频频率

h, f, F —SSC的谐波数、高频频率和回旋频率, E —SSC引出能量, R_1 —SFC引出半径,

R —SSC平均注入半径, n_1, n —正整数, $\eta=1/n$ —匹配效率

表6 1987—1991期间HIRFL的束流计划

	加 速 器	模 式	离 子 源	能 量	束 流 品 种
1987	SFC		PIG	<10	C—O, Ne
1988	SFC		PIG	<10	C—O, Ne
1989	SFC+SSC	A	PIG	5.6—27.1	C—Ne, Ar
1990	SFC+SSC	A, B, C, D	PIG	4.8—100	C—Xe
1991	SFC+SSC	A, B, C, D	PIG, ECR	4.8—120	C—U

$$I = I_1 \varepsilon_s \varepsilon_{L_1} \varepsilon_{in} \varepsilon_{ex} \exp[-5 \times 10^{17} \sigma p$$

$$\left(\frac{A E - E_1}{Q \Delta E} \frac{R + R_{ex}}{2} \right) \quad (2)$$

其中, $\Delta\theta_1/2\pi$ = SFC的宏观负载因子, $\Delta\theta_1 =$

SFC的加速相宽, ε_s = SFC的接收度/离子源的发射度, $\varepsilon_{exL}, \varepsilon_s, \varepsilon_{L_1}, \varepsilon_{in}$ 和 ε_{ex} 分别是SFC引出效率、剥离膜透射率, L_1 传输效率, SSC的注入和引出效率, $\sigma = 10^{-16} \text{cm}^2$ (电荷

交换截面), $p = \text{mmHg}$ (真空度), ΔE_1 和 ΔE 分别是 SFC 和 SSC 的圈增益。忽略次要因素, (2) 式可化简为

$$I_0 : I_1 : I = I : \frac{\Delta\theta}{2\pi} : \varepsilon_S \quad (3)$$

例如, $\Delta\theta_1 = 10^\circ$, $\varepsilon_S = \frac{1}{2} ({}^{12}\text{C}, 7.6\text{MeV/u})$, 则 $I_0 : I_1 : I = 1 : 1/36 : 1/2$, 即 $I_0 = 100\mu\text{A}$, $I_1 = 2.8\mu\text{A}$, $I = 1.4\mu\text{A}$ ($\sim 10^{12}\text{P, P, S}$)。

提高束流强度 I , 除了调整加速器使其处于最佳运动状态 (公式 2), 关键是改进离子源的性能 (公式 3)。例如, 使用外注入离子源, 并在离子源和加速器之间的束流线上安装聚束器, 以提高 $I_0 \left(\frac{\Delta\theta}{2\pi} \right)$; 提高离子源的引出电荷态 Q , 不用剥离膜 ($\varepsilon_1 = 1$) 等。

增加 $\Delta\theta$ 可以提高 I 。但是, 这将使引出束流能散增加。令 $\Delta E_1/E_1$ 和 $\Delta E/E$ 分别表示 SFC 和 SSC 的引出束流相对能散, 则有

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 = \left(\frac{1}{G} \frac{\Delta E_1}{E_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{1}{24} \Delta\theta^2 \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \Delta\phi^2 \right)^2 \quad (4)$$

其中, $G = 10.3$ (SSC 的能量放大倍数), $\Delta V/V = \text{SSC}$ 的高频电压幅度稳定, $\Delta\theta = \text{SSC}$ 的加速相宽, $\Delta\phi = \text{SSC}$ 的束流中心相位漂移, 并注意到, $\frac{\Delta E_1}{E_1}$ 的供献要减低 10.3

倍, 若 $\frac{\Delta V}{V} \lesssim 10^{-3}$, (4) 式可简化为

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 = \left(\frac{1}{24} \Delta\theta^2 \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \Delta\phi^2 \right)^2 \quad (5)$$

例如, $\Delta\theta = 10^\circ$, $\Delta\phi = 4^\circ$, 则 $\frac{\Delta E}{E} \approx 2.7 \times 10^{-3}$ 。

为了减小 $\Delta\theta$, 沿 HIRFL 的 L_1 , 安装了 2 台聚束器。第一聚束器位于束流线的中点上, 起匹配作用; 第二台聚束器位于束流线的 SSC 前 1/4 处, 起相压缩作用。用计算机优化垫补线圈电流, 可得到最佳等时场, 从而减少 $\Delta\phi$ 。一般说等时性回旋加速器的能散在

10^{-3} 左右。

3. ε 和 τ

SFC 的引出束流发射度 $\varepsilon_1 \approx 12 \pi \text{ mmmrad}$, SSC 的引出束流发射度 $\varepsilon = (R/R_{ex}) \varepsilon_1 \approx 3\pi \text{ mmmrad}$, 这里, $R = 1\text{m}$, $R_{ex} = 3.21\text{m}$ 。由于 $f = 6 - 14\text{MHz}$, $\Delta\theta = 6^\circ$, $\tau = \frac{i}{f}$

$$\frac{\Delta\theta}{2\pi} \approx 2.8 - 1.2\text{ns}.$$

I , ε , $\frac{\Delta E}{E}$ 和 τ 这几个指标, 同时都要求最佳是困难的, 但可根据物理实验的特殊需要而通过选择后束流线的工作模式来达到最佳。常用的束流传输模式有三种。

1) 消色差传输

从 SSC 引出到实验靶点的束流线可用一个 R 矩阵表示, 我们有

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \\ Y \\ Y' \\ L \\ \frac{\Delta P}{P} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & 0 & 0 & 0 & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & 0 & 0 & 0 & R_{26} \\ 0 & 0 & R_{33} & R_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{43} & R_{44} & 0 & 0 \\ R_{51} & R_{52} & 0 & 0 & 1 & R_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \\ Y \\ Y' \\ L \\ \frac{\Delta P}{P} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, L 是路程, $\Delta P/P$ 是动量分散。消色差传输的条件是 $R_{16} = R_{26} = 0$, 即纵向运动和横向运动无耦合。这时, SSC 引出束流的 I 和 ε 可基本不变地传送到靶位上。

2) 双色散传输

双色散传输的条件是 $R_{26} = 0$, $R_{16} \neq 0$ 。因此, 可以加限制缝以提高 $\frac{\Delta E}{E} \approx 10^{-4}$, 代价是 I 要减弱。

3) 无色差传输

无色差传输的条件是 $R_{13} = 0$, $R_{23} \neq 0$, 即斜率 X' 同能量有关。因此, 可以使不同能量的粒子, 以不同的斜率交聚到最小的纵向位置上, 以减小 $\tau \approx 200\text{PS}$, 代价是 ϵ 将变坏。

GANIL, RIKEN 和 VICKSI 的后束流线都具有上述三种功能。由于经费的原因, HIRFL 的后束流线, 目前只具有第一种功能。但是, 对 HIRFL 后束流线的改进已做了物理设计, 并留有空间位置³⁾。

4. S, r 和 C

这三个指标对物理实验的重要性是显而易见的。对 HIRFL 来说, 1989—1990 的运行将是低水平的。到 1991 年, ECR 重离子源的使用, 将会大大提高 S, 而目前已计划采用的 Vax—8300—CAMAC 分布式智能控制系统的建造, 也会初见效益, 从而大大提高 r 和 C。

三、讨 论

1. ECR 源的建造和使用, 控制系统的完善, 这是 HIRFL 出束后的两项重要改进和发展, 目前已做好了布置, 并已着手进行。

2. 后束运线的改进, SFC 至 8 个终端的束流线分路, 这两项工作, 从技术上和空间上都不存在困难。要视经费与需要而定。

3. 终端投资同加速器投资相比, 是不相适应的, 扩建经费在所必需, 问题是建造目的要十分明确⁴⁾。可以建通用性终端, 也可以建为特殊目的使用的终端, 我倾向后者。当然, 后者要求物理思想必须明确。

4. 低能重离子核物理的研究 ($\leq 100\text{MeV/u}$), 目前在世界上拥有一批实验室和加速器。另一方面, 高能重离子核物理 ($> 1\text{GeV/u}$) 即通过相对论重离子束同核物质的碰撞来研究核子的结构, 正在越来越引起人们的兴趣。美国的动向值得注意, 一方面, 由于经费不足而关闭了一些加速器, 或减少运

行时间, 另一方面, 两个大型工程即将开始兴建。它们是

RHIC	P	28.5—250GeV
	Au	7—100GeV/u
	造价	178.2M\$
SSC	P	20TeV
	造价	3, 010.3M\$

那么, 中间地带, 即 $100\text{MeV/u}—1\text{GeV/u}$ 之间, 将会有什么现象发生呢? 这是美国一些科学家考虑的另一个问题⁵⁾, 我仅以此同样的问题提请各位专家研究。如果值得探讨, HIRFL + 超导分离扇后加速装置, 可以将轻的重离子加速到 300MeV/u 以上。

5. 重离子反应生成的发射正电子的放射性核素, 可以用来作生物医疗照射⁶⁾。正电子扫描临床诊断可给出三维图象, 并能了解肌体的新陈代谢过程。缺中子短寿命放射性同位素的应用是回旋加速器的一个重要应用方面。但是, 1.7 米 SFC 作为 SSC 的注入器, 很难安排专门生产同位素的束流时间。因此, 利用 HIRFL 重离子核反应的副产品, 如 ^{11}C (20.34m) 和 ^{30}P (2.5m) 等, 开展同位素在医学方面的应用研究是很有意义的。近物所有这方面的技术力量。同时, 近物所近邻有兰州医学院及其附属医院和人民医院等单位, 条件是具备的。

参 考 文 献

1. Accelerator design group, Design Principle and Parameters of HIRFL, August, 1979
2. 王义芳, HIRFL 进展报告, VOL5, 1986
3. 尹全民, HIRFL 进展报告 VOL4, 1985
4. 沈文庆 本次会议
5. Proceedings of the workshop on intermediate energy heavy ion physics CONF.—8509176, Sept 1985
6. 岸田则生, 河本进, 后藤彰, 竹中荣一, 上坪宏道理化学研究所报告 Vol.58, No4—5 合并号, 1982, P.77
牛 芳, 放射性同位素 (RI) 直接注入技术, 1986. 9