

重离子加速器的现状

魏 宝 文

1911年卢瑟福发现原子核以后的约50年中，核反应的入射粒子主要局限于质子、氘、氚、氦核和中子。在轻粒子核反应的实验基础上，发展了两种解释反应机制的理论——复合核模型和直接作用模型（壳结构）。这两种模型都基本上没有考虑核物质的集体运动。重离子加速器为重离子核反应的发展提供了条件。利用重离子核反应可以研究核物质的集体性质，如粘滞性、形变和压缩性等；由于入射的重离子具有很高的角动量，激发核具有很高的转动能，通过它的退激 γ 射线可以研究核的旋转性；用各种重离子束（质量、能量）同靶核组合的广泛的入射反应道，能产生一些远离稳定线的核。通过这些新的核可以研究核子在物质中的结合情况。大体上说，高能重离子束（1 GeV/A以上）主要用在天体物理的研究方面，低能重离子束（100 MeV/A以下）主要用在核物理、原子物理和低能重离子物理（平均场现象）的研究方面，居间能量的重离子束（100 MeV/A—1 GeV/A）主要用在中心碰撞物理的研究方面。诚然，加速器学科的发展是和物理学的基础研究紧密相连系的，然而，它在其它学科领域和国民经济中的应用也是十分广泛的，例如，当前美国单是为医学目的而建造的加速器就有3000多台。重离子

加速器的发展也为重离子束在其它学科领域，例如材料科学、辐照医学和惯性核聚变等的应用展现了广泛的前景。

六十年代有两件事促进了重离子加速器的发展。一是利用常规PIG离子源在杜布纳、斯德哥尔摩和奥赛的回旋加速器上实现了

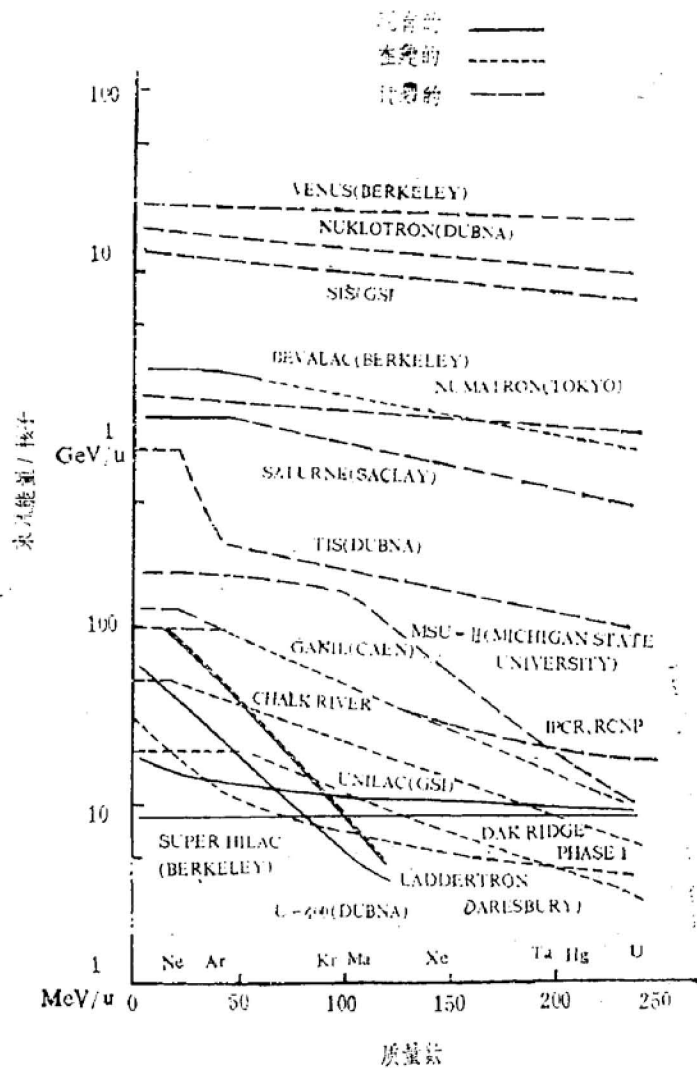


图1 目前世界上已有的、在建的和计划的主要重离子加速器⁽¹⁾

^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{20}Ne 的加速(1960—1966);二是用剥离膜提高离子、电荷态的组合加速技术的发展,它首先应用在贝克莱、耶鲁和曼彻斯特的组合直线加速器上(1966年前后),后来又被用到奥赛的直线加速器和回旋加速器的组合加速系统——爱丽斯以及其它的组合加速系统上(1969)。图1给出了目前世界上已经存在的、正在建造的和计划建造的主要重离子加速器的加速离子种类和能量范围。

低能重离子加速器主要有美国Berkeley的SUPERHILAC,西德GSI的UNILAC和法国的GANIL。高能重离子加速器主要有美国Berkeley的Bevalac和法国Saclay的Saturne。在建的中低能重离子加速器主要有美国Michigan大学的MSU-II,日本理化所的RIKEN SSC和兰州的HIRFL。计划建造的高能重离子加速器主要有美国Berkeley的VENUS,苏联的Dubna的Nuklotron,西德GSI的SIS和日本INS的Numatron等。

UNILAC已于1976年1月建成出束。它可以把从轻核到铀的原子核加速到10MeV/A以上,能量分辨好于1%。主加速器是一台直线加速器,由三节组成,第一节采用Wideröe结构,可以把注入器来的束流加速到1.4 MeV/A,束流可以直接引到低能实验室,第二节采用Alvarez结构,束流能量可达5.9 MeV/A,第三节包括20个单气隙加速腔体,束流能量可以加速到10MeV/A以上。有两台注入器,在注入器和Wideröe腔之间有一个27MHz的聚束器将注入器来的直流束变成脉冲束,Wideröe腔和Alvarez腔之间装有剥离器和电荷态选择器。UNILAC的一个新的改进计划是把束流能量提高到25MeV/A,并提高束流的强度,现正在进行。

GANIL的主要参数列于表1。它可以把轻核加速到100MeV/A,铀核加速到10MeV/A,束流强度 10^{12} — 10^{10} PPS,能量分辨 10^{-3} 。束流引到实验区之前,经过一个 α 磁分析系统可以把能散降到 10^{-4} 量级。GANIL于

1982年底引出了44MeV/A的Ar离子束流,目前正在致力于扩大束流品种,并建造第二注入器CO₂的工作。在CO₂上将使用轴向注入的ECR电子回旋共振离子源以提高机器的运行效率。实验区的建设也在逐步完善之中。实验区的设备主要计划有一个1m直径的散射

表1. GANIL主要参数⁽²⁾

	CO ₁	SSC ₁	SSC ₂
注入平均半径m	-	0.84	0.857
引出平均半径m	0.465	3	3
谐波数			
$\geq 20\text{MeV/A}$	4	7	2
$< 20\text{MeV/A}$	8	14	4
能量增益		13.6	12.25

室,它与5m的飞行时间线相连;一个远距离操纵的散射室,可以在束流平面内和束流平面外进行测量;一个3m直径的散射室,适合于大的探测器系统;一个低本底实验室,用来测量核反应产生 γ 射线;一个名叫SPEG的谱仪;一个原子物理实验室,装有超剥离离子线LISE;一个高通量实验室,装有质谱仪和辐照装置,用作凝聚态物理研究,还有一些普通实验室等。

Bevalac是SUPERHILAC和常梯度同步加速器Bevatron的组合加速系统。在线加速器上使用了新的离子源ABLE,并在同步加速器上改进了真空系统之后,Bevalac已于1982年将铀离子加速到了1GeV/A。

Saturne可以将氩以下的离子加速到1 GeV/A以上。

MSU-II由两台超导回旋加速器组成。第一台(K=500)已于1981年11月建成出束,第二台(K=800)计划于1985年完成。

RIKEN SSC(K=540)是RIKEN Linac的后加速装置。它可以把Ar离子加速到66.6MeV/A,铀离子加速到13.6MeV/A,1986年建成。第一期工程建成后,从新建一台AVF回旋加速器(K=90)作为SSC的第二注入器,可以把碳离子加速到134.6MeV/A,

质子加速到184MeV。

中国科学院近代物理研究所于七十年代初，在1.5m经典回旋加速器上分别把C、N和O离子加速到73MeV、97MeV和88 MeV，接着提出了以分离扇回旋加速器为主器的重离子研究装置建造计划（HIRFL），这个计划于1976年末被批准，预计1987年建成。它可以把轻离子加速到100MeV/A，Xe离子加速到5MeV/A。

在**高能重离子加速器的建造计划中**，VENUS计划可以算是较宏伟的一个。首先，重建SUPERHILAC的剥离前加速装置使束流强度提高一个量级，一个半径为30m的超导后加速环可以将铀离子加速到7GeV/A，然后将束流送入到一个超导直流扩展环并引出到外靶，从直流扩展环引出的束流经剥离后从新注入到第一个加速环，可以得到10 GeV/A的束流能量，最后，用两个大的超导环将对撞束的能量分别提高到20GeV/A，从而得到非常高的质心系能量。

Nuklotron 计划的束流能量是15—25 GeV/A，超导同步加速器环包含有100多个超导弯曲磁铁和磁透镜。为了取得经验，1个1.5GeV/A的超导同步回旋加速器模型正在设计之中。

在SIS计划中，首先是发展10mA的离子源，使作为同步加速器注入器的UNILAC的引出束流强度提高2—3个量级，再建一台直径为800m的常温同步加速器环，这个环由128个弯曲磁铁，80个四极透镜和12个高频加速腔体组成，真空度为 10^{-11} 托。

Numatron 的早期计划是将铀离子加速到1.27MeV/A，最近修改了设计，加了两个直径为300m的超导环，从而可以加速出30GeV/A的重离子对撞束^[3]。修改后的Numatron 计划与VENUS计划很相似。一个实验用的10MeV/A低能贮存环，TARN已经建造，并取得了关于束流积累和随机冷却方面的一些测量结果。

以上简单介绍了重离子加速器的发展和

现状。低能重离子加速器的一个新的加速原理是近年来发展的所谓电子环加速器。在这种加速器里，正离子被约束在电子环内，被一个较低的梯度场所加速。就重离子回旋加速器来说，从它的单核子引出动能E可以看出，

$$E \approx 18(\bar{B} \bar{\rho})^2 \left(\frac{Z}{A}\right)^2 \quad \text{MeV/A.}$$

提高E的方法是增加引出轨道的平均半径 $\bar{\rho}$ ，电荷态Z和平均磁场 \bar{B} 。增大 $\bar{\rho}$ 受到了造价的限制，所以，发展多电荷重离子源以提高Z，发展超导磁铁以提高 \bar{B} 是发展重离子回旋加速器的两个重要环节。

图2是首先在Grenoble发展的ECR（电

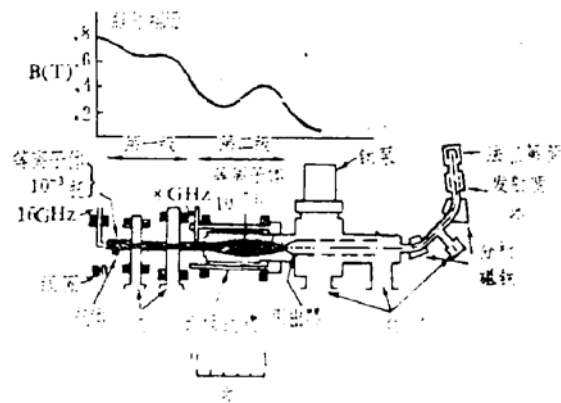


图2 Geller的第一个ECR重离子源^[2]

表2 从PIG、ECR和EBIS重离子源拉出的几种典型束流的束流强度、电荷态和发射度^[2]

束流	Z	PIG	ECR	EBIS
		I(S ⁻¹)	I(S ⁻¹)	I(pulse ⁻¹)
N	2+	1.10 ¹⁵		
	5+	1.10 ¹³	5.10 ¹³	2.10 ¹⁰
	7+		5.10 ¹²	1.10 ¹⁰
Ar	3+	2.10 ¹⁵		
	8+	4.10 ¹²	3.10 ¹³	1.10 ¹⁰
	12+		1.10 ¹²	8.10 ⁹
Xe	18+			6.10 ⁹
	3+	2.10 ¹⁴		
	10+	1.10 ¹²	4.10 ¹²	1.10 ¹⁰
	26+		4.10 ¹⁰	4.10 ⁹
	24+			2.10 ⁹
发射度 ϵ_n (π mmrad)		.1—1	.1—1	.1

表 3

正在建造的超导回旋加速器⁽²⁾

实验室	机器名称	最大能量(MeV/A)			磁铁磁场(KG)			能量贮存(MJ)	离子源注入器	建成时间
		Z/A	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{10}$	扇山(Max)	平均	\bar{B}_{max}, r_{ex}			
Chalk River Canada	Chalk River SSC(K=520)	50	10		60.5	50.5	65cm	21.5	13 MV Tandem	1983
MSU/E, Lansing MI, USA	K=500	80	5.1		58.5	48.5	67.3cm	18.9	PIG内源或轴 向注入外源	1981 已建成
"	K=800	200	14		62.3	53.1	103cm	60.6	K=500, 或其 它离子源16 MVTandem	1985
Milan Univ. Milan, Italy	C.S.	120	100	8	58.5	49.3	86.7cm	40.2	或其它外源	1985
Texas A & M/ College Station, TX, USA	K=500	80	5.1		58.5	48.5	67.3cm	16.9	PIG内源或轴 向注入外源	1984

子回旋共振)重离子源。从这个源拉出的一些典型重离子束的电荷态和强度列于表2, 同表还列出了PIG离子源和EBIS离子源(电子束离子源)的结果比较。它的缺点是消耗功率大($\sim 3\text{MW}$), 克服的办法是使用超导线圈和钐钴永久磁铁, 例如, 像在后来的Grenoble和Karlsruhe及Louvain等地方所做的那样。

正在建造的超导回旋加速器计划列于表3。随着超导材料纯度的提高和超导磁铁制造技术的发展, 更高的磁场, 例如10T是有可能的^[4]。

(上接12页)

到的, 例如

- 1 小角度分离系统SASSY,
- 2 速度滤波器SHIP,
- 3 高温在线气相化学,
- 4 低温在线气相化学,
- 5 准在线溶解化学,
- 6 离线化学。

从封面图可以看出, 实验所涉及到的半寿命从微秒到十年, 相差13个量级; 在如此宽的寿命范围内, 测量的灵敏度仍然很高。为了比较, 图中用虚线给出了在高轰击能量下截面上限的包络。这些结果已在最近召开

参 考 文 献

- [1] Proceedings of Japan—China joint symposium on accelerators for nuclear science and their applications, 1980, P349.
- [2] Ninth international Conference on cyclotron and their applications, 1981, P1, 147, 231, 635.
- [3] Y. Hirao, Proceedings of China-Japan joint symposium on accelerators for nuclear science and their applications, 1983, to be Published.
- [4] CERN Courier, Vol.23, No5 (1983)168

的一次国际核物理会议上作过介绍。

下一步计划是打算选择 ^{254}Es 作靶, 利用 $^{43}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 的熔合反应来合成超重元素, 其复合核是 $Z=119, N=183$ 。这个中子数很接近 $N=184$ 的中子壳, 它的稳定性比 $Z=114$ 的质子壳要强得多。但是, 这个反应能否在库仑位垒以下进行仍是一个尚待解决的问题。在超铀元素的研究计划中, 上述计划已名列前茅。

(插图和参考文献略)

(罗诗裕, 邵明珠译自“GSI Nachrichten, 1983, 第10期, 5—9页”)