

# 高能重离子加速装置

叶美玲

(中国科学院近代物理研究所)

**摘要:** 高能重离子研究向新的领域扩展很快。本文简要介绍了美国以及欧洲其它国家的一些较大的高能重离子加速装置的设想及设计发展情况。

近年来, 高能重离子研究向新的领域扩展极快。例如人们希望在实验室内实现产生夸克胶子等离子体新的物质状态, 进行统计量子色散动力学(QCD)的实验, 通过高能离子的核反应来模拟早期宇宙条件等。人们需要建立高能重离子加速装置提供实现这些科研活动的手段<sup>1)</sup>。通过高能重离子加速器设计, 以及利用高能重离子对撞方式, 以求得比固定靶方式增加成百倍以上有效能量的高能 ( $\text{GeV/A} \sim 100\text{GeV/A}$ ) 和超高能 ( $\text{TeV/A}$ ) 的对撞机的热潮正在逐渐形成。人们还同时使用束流的储存、堆积和冷却等技术特性, 以使加速粒子的方式达到经济、灵活和多样化。

这里主要介绍美国以及欧洲和其它国家的一些较大型的高能重离子加速装置的设想, 并对设计的发展情况, 作一展望<sup>2)</sup>。

## 一、LBL 计划

LBL(劳伦斯伯克利实验室)是最早的高能重离子加速器中心之一。它将原来加速轻粒子的直线加速器 Super Hilac 与加速质子到  $6\text{GeV}$  的质子同步加速器 Bevatron 重新组合成高能重离子加速器 Bevalac。

目前进行的是通过实验分析各种剥离能量的效果, 得出 U 的全剥离能量为  $430\text{MeV/A}$ 。相同的实验还有 Au, 是由 LBL 和 BNL 合作进行的。

LBL 的第一个对撞机设计较详细的是 VENUS 计划。但是由于该计划较庞大, 在

经济和技术上都存在不少困难而搁置了。目前又提出一个更新的计划, 即 MIN 对撞机, 它的最大能量达  $4\text{GeV/A}$ 。使用的离子在 Bevalac 中加速到  $400\text{MeV/A}$ , 达到全剥离。成千以上的脉冲注入到两个  $200\text{m}$  圆周长的同心储存环中。由于低能入射束的散射性和多电荷离子在同相束流传递动量之间的库伦交换而引起束流截面的增大现象导致束流损失严重。为了消除这个效应, 需要在速率上相等于束流最低扩散率的随机冷却。其光亮度在  $1\text{GeV/A}$  时能随束流的能量而线性的增加。

MIN 对撞机设计还未完善。例如缺乏磁铁结构和交切区的详细情况。

## 二、ORNL 计划

美国橡树岭国家实验室 ORNL 现有一台  $25\text{MV}$  串列静电加速器为注入器与 ORIC 组合的重离子加速器 HHIRF。目前设计的是一对同步环用作核物理研究, 能区在  $20\text{--}600\text{MeV/A}$ 。二环的弯曲力为  $8\text{Tm}$ 。第一个环是由  $25\text{MV}$  串列静电加速器为注入器, 具有 8 个元件组成的组合段 (类型为 FODOODOF) 的单梯度磁铁结构运行在  $20\text{Hz}$ 。第二个环是第一个环传送来的束流伸展环和储存环。第二个环束流采用共振引出传输到现有的靶厅, 或者被电子冷却后引出或用于靶的实验, 二环具有超高真空 (在  $20^\circ\text{C}$  时为  $10^{-11}\text{torr}$ ) 以便储存部分被剥离的重离子达几百秒。

近期 ORNL 的物理工作者对中能重离子领域感到极大的兴趣。加速器研究小组通过

二年的调研,除了为串列静电扩展而提出了各种同步加速器的增强器结构外,而今又提出了中能重离子加速器的增强器系统,作为原有的HHIRF向重离子中能领域扩展的建议而提向NSAC<sup>3)</sup>。

该中能重离子加速器系统由三个同步加速器环组成。一个为4Tm的快速循环增强环,一个为15Tm的慢速循环的主加速器环和一个为10Tm的储存/冷却环。已有的25MV串列静电加速器将为该系统的离子束的注入器。运行在毫脉冲方式( $\sim 100\mu\text{sec}$ ),静电加速器是一个供给具有全部离子宽度变化的优良注入器,它能提供最大能量, $^{12}\text{C}$ 为12.5 MeV/A到 $^{238}\text{U}$ 为1.52MeV/A的各种离子。4Tm的增强环将吸收Tandem来的离子和作为注入15Tm主加速环的预加速器。

增强环与主加速环的最大能量是依赖于离子的种类和剥离膜的数量和位置。在图1及图2中给出了三种情况。这些曲线使用了剥离级的最大丰态电荷。

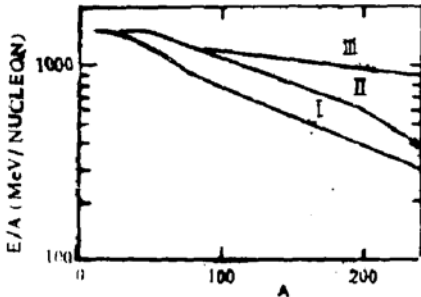


图1. 25MV串列静电与15Tm同步回旋器组合加速得到的能量曲线。剥离器处在三种位置: A为质量数, E/A为粒子单核能。

- I 在静电与4Tm增能器之间
- II 在增能器与主环之间
- III 在上述二个位置

冷却环的主要作用,是当增强环与主加速环加速器另一组离子束流时,冷却和储存前次来的束流和供给慢速共振引出束流溢出到实验区。

冷却环的另一个重要作用,是为了减少束流能散、发射度和增加相空间密度而使用电子冷却系统。从而能得到所希望的能量分

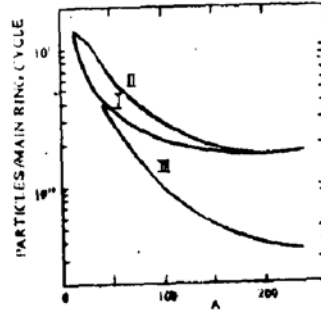


图2. 25MV串列静电与15Tm同步回旋器组合加速得到的束流强度。离子源束流为 $500\mu\text{A}$ 。三种情况对于图1的三种剥离器位置。

分辨率 $\Delta E/E$ 为 $10^{-4}$ 和发射度大大小于 $1\pi\text{mm mrad}$ 的束流。

冷却环的第三个主要作用是捕集和冷却由主加速环来的束流对固定靶碰撞而产生的二次辐射束流。对于这个目的,冷却环需要大动量吸收和随机冷却二方面的功能。

这三环加速系统提供了允许多种方式加速结构的灵活性。例如,用主加速环作为增强环的伸展环从而得到较高流强、较低能量的束流。在这种结构情况中,增强环能加速30束团/秒,给出 $\text{C}^{6+}$ 能量为176MeV/A时,流强达 $1 \times 10^{12}$ 粒子/秒。 $^{238}\text{U}$ 为25MeV/A时,流强为 $5 \times 10^{10}$ 粒子/秒。在另一种加速结构中,当冷却环中有另一个实验用的储存离子,则增强环与主加速环将传递离子到第二实验区。

束流强度大到可使用劈束器同时进行二个或更多个实验。这对于大吸收实验来说特别真切,它们需要的束流强度仅为 $10^6$ 到 $10^7$ 离子/秒。

这三环系统允许在主环和冷却环之间引进相当复杂的束流输运线,以得到束流二次分离用的特殊设计。初始束流为 $10^{11}$ 粒子/秒,二次束流为 $10^6$ 到 $10^7$ 粒子/秒,能用作生产同位素用。

这三环系统,造价总的为 $68 \times 10^6$ 美元,其中加速器部分新建的三环为 $32 \times 10^6$ 美元,串列静电Tandem的改进为 $6 \times 10^6$ 美元。

### 三、BNL计划

布鲁克海文实验室(BNL)的高能重离子加速器的设计在逐步投建,从几个GeV/A向大于100GeV/A的计划迅速前进。他们这样作有三个有利的现实条件。第一,实验室具有二个端压为15MV的Tandem作为可靠的离子流注入器;第二,有一个原来为CBA用的非常大的、直径为1km的隧道,可用来为目前的计划用;第三,可利用超导磁铁的创举,容易而快速的设计对撞机。更重要的是可以利用已有的28GeV质子同步回旋加速器(AGS)作为低能量固定靶实验或作为对撞机的注入器。

根据以上三个有利条件,BNL近期以来采用下面三个阶段来逐步实现这宏伟的计划。

1. Tandem-AGS设计,它已被批准。目前正在建造。由Tandem产生的重离子束流传输到AGS。这个设计要求1km长的传输线,一个注入系统和改善了的AGS真空和高频系统。在这个运行模式中,可以加速全剥离的轻离子到15GeV/A,这个设计即将运行。

2. 在Tandem和AGS之间加入一个B为16.5Tm的增强环。重离子在较长的传输后注入到增强环,在环内使Au<sup>38+</sup>加速到367MeV/A。这束流通过增强环与AGS之间的固定靶能够全剥离。用这种运行模式,可得到全剥离的重离子束Au于固定靶上的能量达10GeV/A。它表明附加了增强环到BNL原有的设备上将大大的增加了实验室的工作能力。增强环的设计已经完成,正等待投资和同意投建,希望能在1989年开始。

3. 更切实于理想的BNL设计是RHIC计划,它是相对论重离子对撞机,使全剥离的重离子加速到Au,其能量达100GeV/A。即由Tandem出来的重离子束通过增强器到AGS,最后到对撞机。

当二级模式运行时,从Tandem出来的束流每个脉冲长为100ms,能散度和发射度很小,可以忽略。进行束流调节,通过一次谐波h=1的高频系统形成单个脉冲束团引入增强器捕获后加速到高端能量。从增强器引出的离子通过剥离级的靶注入到AGS。通过AGS加速质子为28GeV到Au为11GeV/A。

在RHIC设计中了解到,特别在能量低于储存环的临界能量时,束流内部的发散性是决定超导磁铁孔径和结构选择的关键。RHIC的另一决策,是利用短束团的正面碰撞或者有一个很小的角度碰撞以增强束流的光亮度。这个可以通过束流的惯性结构,散束方法以及缩短低能量时的填满时间来进行。对撞机是由工作磁场强度为4Tesi、线圈内直径为8cm的磁铁组成。

RHIC设计中束流Au为100GeV/A运行时,其亮度为 $10^{27}\text{cm}^{-2}\text{S}^{-1}$ ,每股束流以200ns分隔成57个束团组成。在增强器与AGS中每一秒加速一个束团,则二个环的填满时间约为2分钟。

### 四、美国与欧洲在CERN上的合作计划

#### 1. 合作计划

LBL、CERN和GSI共同对CERN重离子加速进行了合作。由GSI供给O<sup>8+</sup>离子流,由LBL供给rf四极矩。束流将注入50MeV质子直线,传输到增强器中加速,之后引出传送到CPS中加速到17GeV/A,氧离子得到全剥离再传送到SPS加速到最终能量达200GeV/A,引出到固定靶实验。希望流强 $10^8$ 离子/脉冲。最低要求通过几个加速级的束流处理,得到较强的束流。希望在明年某些时候重离子束将得到输送。

由C. Rubbia提出一个新奇的想法,即将400GeV的反质子及200GeV/A的氧离子在单个SPS环中进行二者的碰撞实验。这二股束流被分离的保持在环的大部分区域,轻微

地调节它们的能量使之在交切区进行碰撞。

## 2. Fermilab的设想

第一个设想是使用Fermilab的一些装置。上面CERN计划自然也在这里采用和作为重点的工作来作。准备在200MeV的直线加速器和8GeV的增强器之间增加一个为几个GeV的预增强器以提高在Fermilab上碰撞束流实验质子束的亮度。不需作其他大的变更,使质子束能够在增强器中加速到3.2GeV/A,在主环中达到60GeV/A,在Tevatron中达400GeV/A。这时得到和加速了的个别束团至少有 $10^9$ 离子。在Fermilab上也就是在CERN上的设想,即有可能在Tevatron单环中用反质子1TeV和离子400GeV/A之间的碰撞束。光亮度估计为 $10^{28}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。如果在Fermilab上发生2TeV对2TeV的质子和反质子的碰撞贡献。利用一个附加引出环(它也允许质子对质子的碰撞)就可以去实现在每股束流为0.8TeV/A的幻想能量的重离子碰撞束。在这些能量时束流内部的发散将不再代表极限,所希望的光亮度随能量直线的增加,预期它会超过 $10^{28}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

第二个设想是20TeV对20TeV的超导环对撞机(SSC)。显然它也代表着处于8TeV/A超幻想能量和光亮度约为 $10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的重离子束对撞束的理想所在。这要求一个合适的离子源,类似它的一个已在Fermilab早期已描述。在这些设想的能量和光亮度方面,无疑的是个新的领域,它将发现物质的未知态。

## 五、欧洲和其他一些国家的计划

日本Tokyo的NUMA TRON<sup>4)</sup>的直线加速器为前加速器,之后注入到一对同心的同步加速环,估计能加速重离子小于1.5GeV/A,它在1977年提出后作了一些模型实验。苏联的Dubna曾使用原有的同步加速器加速质量数 $<20$ 的重离子取得高能量之后,进行了最高能量为6GeV/A的设计NUCLOTRON计

划<sup>5)</sup>,并进行了原来和运行的加速模型实验。

欧洲除上面所述的与美合作的CERN计划外,较现实的有西德GSI的扩展计划。

GSI自1976年重离子加速器UNILAC建成后,一直在探索进一步扩展该设备向高能重离子加速的发展计划。1981年提出二级加速概念,同步加速器SIS18作为该计划中的增强器。1983年到1984年GSI的重离子聚变小组及核物理工作者认识到,增加一台实验储存环ESR的必要性<sup>6)</sup>。这计划可使重离子全剥离到铀,剥离靶和电荷分离器将置于SIS18和ESR的输运上。ESR为了得到最重离子(60%的U)而决定它的弯曲功率为10Tm,相当 $U^{92}$ 离子加速到能量为560MeV/A。之后将束流处理再反输送到SIS18作进一步的加速(对U可达1.3GeV/A),或者在低能量时将离子减速作为原子物理的实验。

SIS18以前曾设计过<sup>7,8)</sup>,目前作些修改以适应于新增加的储存环GSI组合的需要,还有的是对UNILAC到SIS18, SIS18引向ESR及ESR到实验室的束流传输系统等设计。该系统中的SIS18得到的能量,流强与粒子种类的关系见图3和图4。

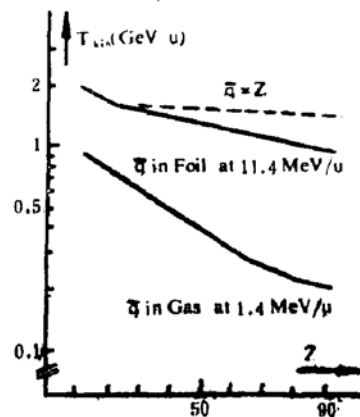


图3. 从SIS18得到的粒子能量

这个由UNILAC为注入器,通过同步加速器SIS18到储存环ESR加速器系统很快的得到了使用者的一致同意。同时也很快的通过基金审批程序,于1985年4月得到正式授权建造。

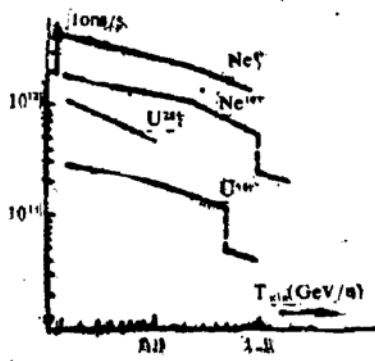


图4. 由SIS 18得到的部分粒子流强

其总投资为160MDM, 附加设施35MDM, 主要分配比例如下: UNILAC的改建8%, SIS18同步加速器28%, 实验储存环ESR12%, 二环束流传输、靶厅、生产靶分离器等8%, 建筑物包括供配电及公用设备44%。

在国际上还有许多类似于ESR储存环的设计。由于束流的储存, 冷却和堆积技术的使用, 可充分利用有限的设备, 进行灵活的组合, 提供产生多样化的束流实验效果而较广泛的被采用<sup>9)</sup>。图5给出了目前国际上设计与建议的储存环能力, 表1列出了它的主要参数。

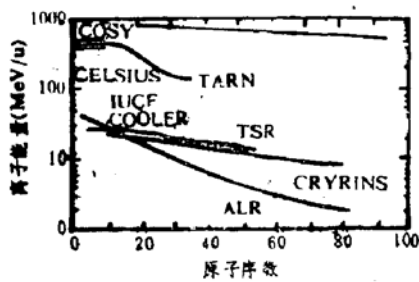


图5 正在设计或建议的大型储存环加速能力

表1 具有束流冷却的重离子储存环

Ring	Institution	Cooler	CELSIUS	COSY	ALR	TSR	CRYRING	TARN II	ESR
	IUCF	Bloomingt.	Univ. Uppsala	KFA Jülich	Univ. Aarhus	MPI Heidelberg	AFI Stockholm	INS Tokyo	GSI Darmstadt
Circumference C [m]	168	81.8	163.6	7.7	31.8	35	30.5	75.6	103.2
Max. Bp [Tm]	3.7	6.3	7.7	21	1.85	1.5	1.4	6.9	10
C/Bp [T <sup>-1</sup> ]	47	13	21	7.7	17	23	22	11	10
Injector	cyclotron	cyclotron	cyclotron	cyclotron	tandem	tandem	RFQ	RFQ	h.i. synch.
Mass range [u]	K=220	K=190	K=45	K=45	6MV	15MV+lin.	---	or cycl.	18 Tm
Injection [MeV/u]	1-20	1-20	1-20	1-20	4-238	12-130	20-208	1-100	20-238
q/A	220-55	190-45	45-11	45-11	3-0.05	15-7	0.3	0.8	834-556
Max. energy [MeV/u]	1-0.5	1-0.3	1-0.5	1-0.5	0.5-0.1	0.5-0.37	0.5-0.2	1-0.25	0.5-0.39
Cool. range [MeV/u]	500-150	1200-395	1500-460	1500-460	41-2	27-13	24-9	1300-140	834-556
Operation in	50-400	40-550	1-30	1-30	0.1-10	1-30	0.1-10	---	4-560
Status	1986	1987	1988	1988	1988	1988	1988	1987	1988/89
	construct.	construct.	proposal	proposal	study	proposal	study	t. design	t. design

## 参考文献

- (1) N. P. Samios  
IEEE NS-32, №5 1985 P (3824—  
3827)
- (2) A.G. Ruggiero  
IEEE NS-32 №5 1985 P (1596—  
1600)
- (3) ORNL Accelerator Study Group  
HHIRF Newsletter #29, #31,
- (4) Study Group of NUMATRON  
NUMATRON 1977
- (5) A.M. Raidin et al  
IEEE NS-30 №4, 1983 P (3247)
- (6) K. Blasche et al  
IEEE NS-32 №5 1985 P (2657—  
2661)
- (7) K. Blasch et al  
IEEE NS-28 №3 1981
- (8) K. Blasche et al  
IEEE NS-30 №4 1983
- (9) K. Franzke  
IEEE NS-32 №5 1985 P (3297—  
3301)