

重离子加速器的现状和发展趋势

F.G. Resmini*

重离子加速科学不像人们普遍认为的那样是一个年青的领域。早在50年前，为了加速钾离子，由R. Wideroe⁽¹⁾设计了第一台直线加速器。自那时以来，加速器物理学家们一直致力于电子或质子加速器的研制。只是在最近十几年来，也就是从七十年代开始，这个领域才显示出了生气勃勃的活力。预言存在超重核的诱惑力使人们对重离子物理产生了极大的兴趣，物理学家们把研究的课题迅速地扩展到整个能量范围即从几个MeV/核子到几个GeV/核子。这些领域是：

一用于研究中间场现象和核结构的能区大约是10MeV/核子。

一用于发现新现象（冲击波等）的能量为10—100MeV/核子。在这个能区入射子弹的速度比声速（~30MeV/核子）和在核物质中的声速（~20MeV/核子）要大得多。

一预料在相对论能量中，研究核物质的可压缩性将是可能的。并且，在超相对论能量下会产生核物质的新状态（密度异构体，夸克-胶子等离子体）。

所有这些，在重离子加速技术中，科学家已经作了巨大的努力。在十年中，能量跨越了三个量级。这篇论文的目的在于详细地评述目前的状况和今后的发展趋向。将对上面提到的正好相应于不同加速器的三个能区逐一地作一介绍：

1. 目前的概况

图1.给出了目前正在运行的重离子加速器的示意图。自从1980年8月伯克利(Berke-

*意大利米兰大学和国家核物理研究所

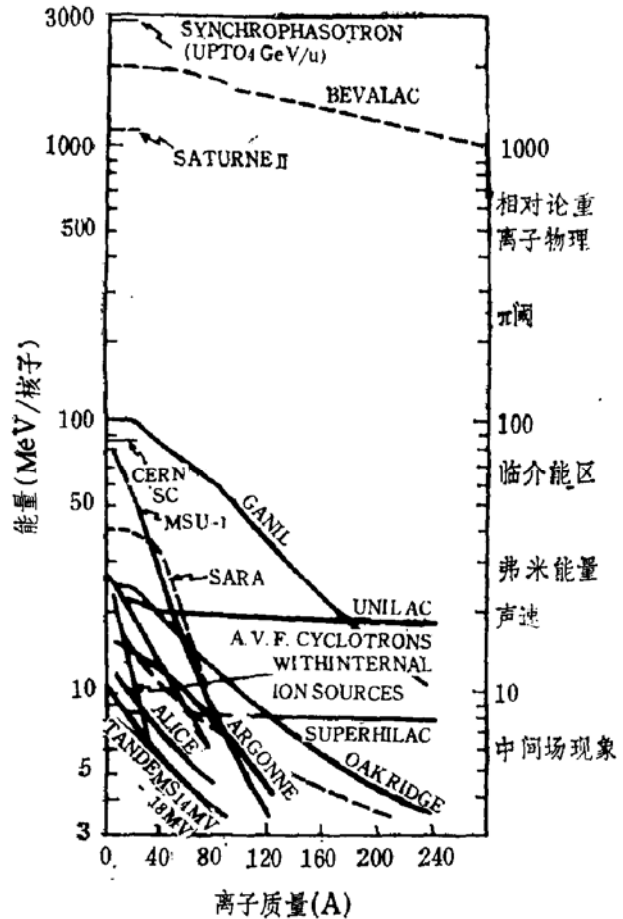


图1 目前运行中的重离子加速器

ley) 会议以来，发展的速度是惊人的，譬如：改进了两台现有的装置，Bevalac和Unilac。前者已由仅限于加速 $A \leq 40$ 可以加速所有的离子一直到铀，而后者几乎成倍地增加能量到 ≥ 20 MeV/核子。五台新的装置：GANIL, MSU K—500的超导回旋加速器，S.A.R.A (法国Grenoble) 的分离扇回旋加速器，Oak Ridge和Daresbury的串列静电加速器均已投入运行。在图2中给出了几台能量范围在10—20MeV/核子的正在建造中的重离子加速器，同时也给出了建成的时

间。这些新的装置包括了各种各样设计类型的加速器，像图3所给出的。它们有一个显著的特点，是把现有的一些加速器改建为新

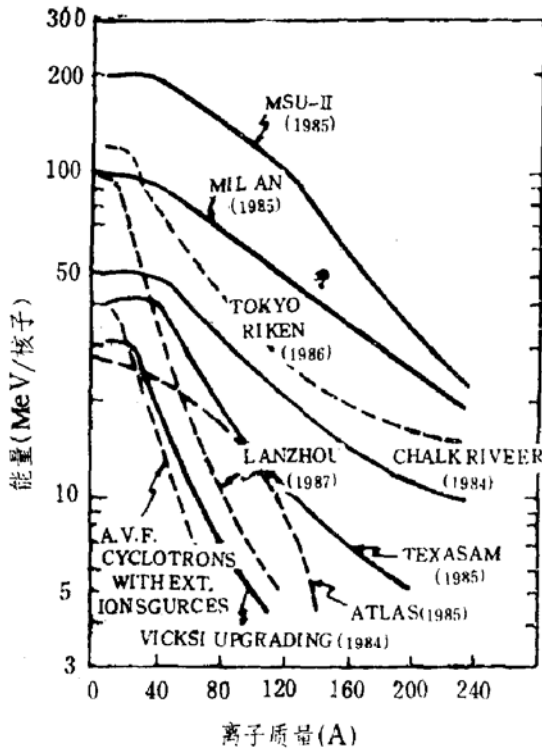


图2 正在建造中的重离子加速器。
(括号内为计划完成日期)

的组合加速装置的一部分，如在MSU正在建造一台新的超导加速器，是把现有的K=500超导回旋加速器作为注入器接入K=800的SC中；在米兰 (Milan) K=800SC或者用Tandem作为注入器和Chalk River (K=520 SC) 一样或是用轴向注入的外部离子源；在Texas AM K=500SC或者单独运行或是作为88英寸AVF回旋加速器的注入器。分离扇加速器即室温加速器像Tokyo-Riken的组合加速装置，对轻离子用常规回旋加速器作为注入器，而对重离子用直线加速器作注入器；在兰州注入器是一个AVF回旋加速器；在Vicksi是把一个8MV的Tandem接到现有的分离扇回旋加速器上；在Argonne把超导直线加速器增能器、ATLAS进行更进一步的扩展。另外，对一些AVF回旋加速器将用新的外部重离子源来装备，再把它们注入到合适能量的装置中。

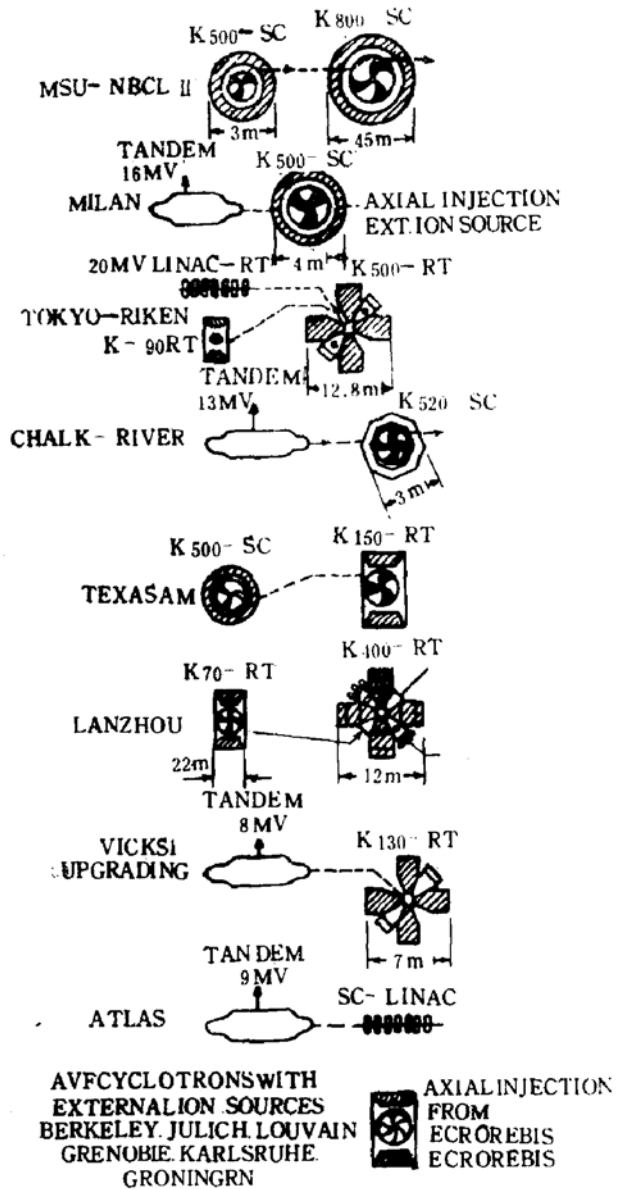


图3 正在建造中的加速器装置。

目前，世界上许多实验室在建造什么类型的加速器这个问题上提出了很好的建议，这些多半都处在中能 (图4) 和高能区 (图5)。而且都是多级加速装置，最后一级是一个不变能量的同步加速器，或是室温或是超导回旋加速器。至于中间能区 (图4)，除Vivitron，由Strasbourg小组建议的35 MV的Tandem以外，它们都是典型的两级加速，最后一级总是一个回旋加速器，或是室温或是超导加速器，注入器则是各种各样的加速器。

从上面的叙述中得到这样一个图象；这

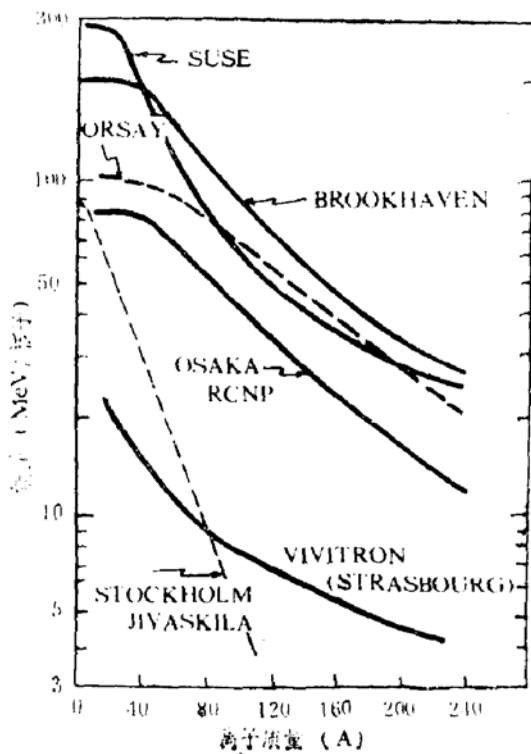


图4 目前建议的中能范围的加速装置。

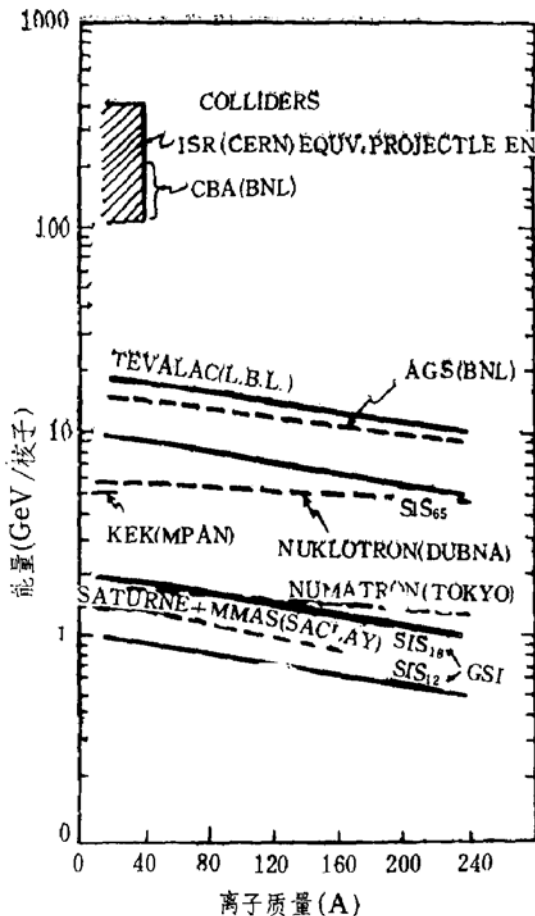


图5 目前建议的高能和极高能区的加速装置。

是一个非常具有活力和激动人心的研究领域；新技术—超导磁铁和超导高频腔已经研制成功；新离子源正在被进一步的发展着，因此，对现有的和建造中的新装置进行更大的改进是完全可能的。

2. 重离子源

在重离子加速器中被加速离子的电荷态 Z/A 起着相当重要的作用。对于像 Tandem、直线加速器或者是它们的组合，能量可以近似的表示为：

$$\left(\frac{T}{A}\right) \text{ MeV/n} \approx V_{(MV)} \left(\frac{Z}{A}\right);$$

公式中， $V_{(MV)}$ 是总加速电压。对回旋加速器和同步加速器其一般的公式为：

$$\left(\frac{T}{A}\right)^2 + 2\left(\frac{T}{A}\right) \times 931.5$$

$$\approx (300)^2 B^2 \rho^2 \left(\frac{Z}{A}\right)^2,$$

公式中，能量单位是 MeV/n ，磁刚度 $B\rho$ 是 Tm 。上式在非相对论近似下，可表示为：

$$\left(\frac{T}{A}\right) \text{ MeV/n} \approx \frac{300^2}{2 \times 931.5} B^2 \rho^2 \left(\frac{Z}{A}\right)^2$$

$$= K \left(\frac{Z}{A}\right)^2,$$

从上面的公式中，可以清楚的看到：不管是什么类型的加速器，最基本的是要达到尽可能高的电荷态。不论哪种离子源，下面的两个参数是重要的：其一是电子能量，其二是 $n_e \tau$ ，即电子密度 n_e 和作用时间 τ 。在电子能量为 1 和 100keV 之间， $n_e \tau$ 值在 10^8 和 10^{12} 之间 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$) 是最有利的，得到这个值的途径是：

一在磁场中电子放电，导致常规的双等离子体和 PIG 型源。

一电子共振离子源， ECR 。在这个源中，磁阱限制电子，而等离子体电子的加热是由回旋加速器的共振所产生。

一电子束离子源， EBIS ，电子是由静

电势所限制。这种源是由磁聚焦电子束所产生。

一剥离，换句话说brut-force。在这个源中，离子和电子的作用是相互交换。能量来自离子轰击膜的速度，而 $n_e\tau$ 是由在剥离膜上的电子密度乘上离子通过它的时间而定。

常规的PIG离子源对于产生高电荷态这一点来说，要么不能达到要求的能量范围要么得不到充分高的 $n_e\tau$ 值。从图6中伯克利88英寸回旋加速器所得到的数据中可以看出，随着电荷态的增加，强度明显下降。电荷态 $>12^+$ 时，对于重离子强度已为零。因此，PIG离子源对高强度低电荷态($Z=1^+, 2^+, 3^+$)将仍旧是有竞争力的。同比较先进的离子源比较起来，ECR和EBIS源达到更高的电荷态是有更大的可能性。

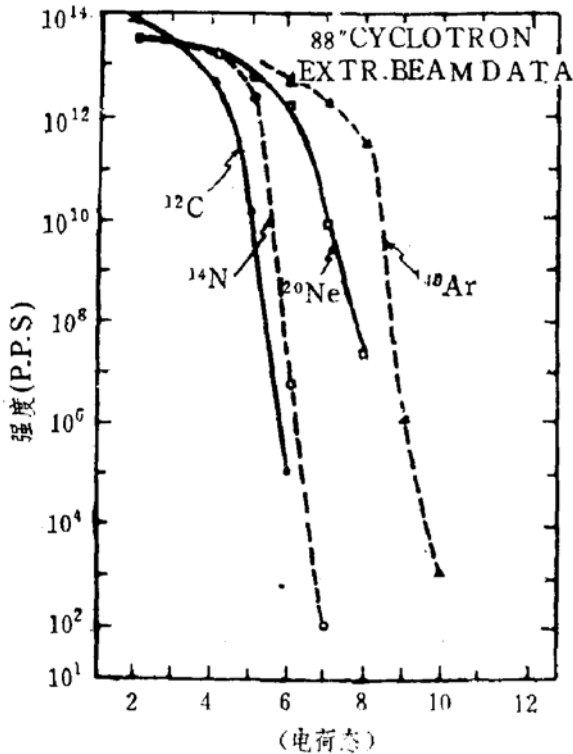


图6 88英寸回旋加速器对五种不同的离子的引出束流数据。

关于ECR源,在Grenoble由R.Geller^(2,3)已研制出了两级ECR源。图7给出了O, Ne, Ar, Kr和Xe的强度作为电荷态的函数,同样,用虚线表示出了在10年或更多一些时间

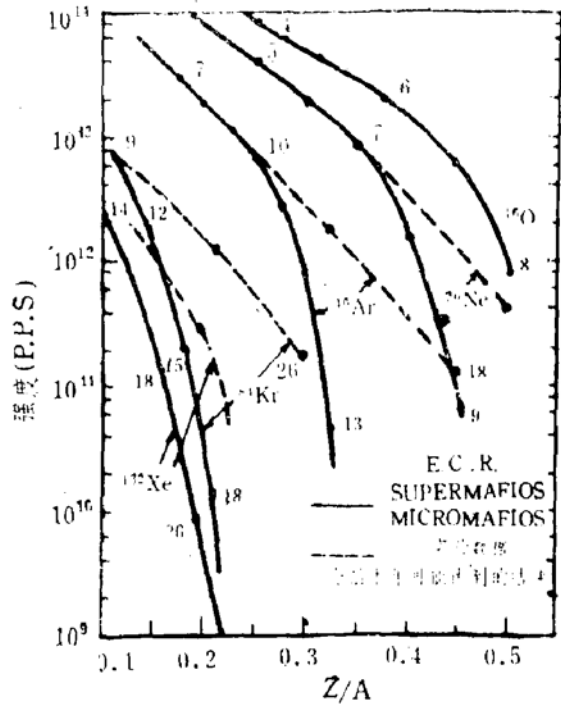


图7 电子共振离子源 (ECR) 的引出束流特性。

达到的预期情况⁽⁴⁾。这些预期的可能性是:在第二级上,热电子密度依赖于加热频率的平方。当达到30GHz, 30kw的功率时,也许使用新的Gyrottron技术⁽⁵⁾能够得到这些结果。正像在后面将要看到的一样,ECR源已在一些装置上使用,而且看起来,它们可以达到所期望的目的。

EBIS源在杜布纳⁽⁶⁾和奥赛⁽³⁾已得到发展。高强度的($\geq 2A$)电子束沿着螺旋轴前进并且当进入到3忒斯拉的磁场时,以300的因子而被压缩,离子的径向限制是由电子束本身而产生,电离区体积的压力是 $10^{-9}\tau$ 或更小一些。在奥赛,用6—8keV的电子能量和离子密度 $10^3 A/cm^2$ 以及用50keV的电子能量,离子密度 $>10^4 A/cm^2$ 和5忒斯拉的磁场进行了实验。这个小组希望在1983年得到 Ar^{18+} 并达到 U^{72+} ⁽⁷⁾。

对于剥离技术,虽然对提高电荷态是很有效的,但它具有以下三个缺点:

一由于剥离必须发生在高能情况下,因此成本是昂贵的。

一除非使用相当高的能量,否则导致严

重的强度损失。

一有时，剥离膜的使用寿命会带来一些困难。

然而，至今剥离技术对任何一个重离子加速器来说是一个重要的基础。正像详细地讨论各种机器一样，新的重离子源将会改变这种状况，用不太昂贵的方法将获得相同的电荷态。

3. 能量达到10—20MeV/核子：串列静电加速器和直线加速器

3.1. 串列静电加速器

最近两三年来，已有几台终端电压为15 MV的新串列加速器。其主要的特点列在表1中，串列加速器的现状归纳为以下几点：

一对于核物理实验，在串列加速器能够达到的能量范围可得到最佳的束流。能量展宽几乎是可以忽略的。它的发射度好于 π mm mrad.，脉冲宽度下降到100psec的数量级。

一近年来主要的技术进展是：i) 达累斯伯里串列静电加速器(Daresbury-HVEC)输电梯的发展和珠链式(NVEC)荷电系统代替了橡胶纤维带；ii) strasbourg小组研究和发展的新的立柱和钢筒的几何结构。其

目的是减小钢筒的尺寸和得到更好的贮电能的分布。这些技术已经成功的使用在Strasbourg的现有的MP Tandem上，使终端电压已达18MV。iii) 对于很大的装置(Oak Ridge, Jaeri)，由于垂直和折叠式结构的发展，以及先进的计算机控制技术的出现，极大地有利于运行。

一对于大的装置在达到设计电压时遇到一些新的问题。除Legnaro和Strasbourg的装置外，Jaeri、Oak Ridge和Daresbury仍然没有达到设计目标，其原因大多是与条件有关，缺乏运行经验，时而机器部件有些损坏。所有的小组还没有找到问题的症结。虽然，这些困难都是暂时的，但是要达到设计电压看来还是有一个时间问题，也是一件艰苦的工作^(8,9)。

一束流强度在 10^{10} — 10^{12} pps的范围内是安全的，强度的限制多半是来自离子源本身和剥离之后加速管的负荷。

目前的趋势是向高电压的方向发展，例如35MV的strasbourg的vivitron计划⁽¹⁰⁾，其原因如下：

—Tandem运行方便，同时有好的束流品质。

—如果使用一个附加的剥离级，同样性

表1 大的串列加速器

地 址	设计电压 (MV)	安装方式 H—水平 V—垂直	筒			现 状
			L (m)	ϕ (m)	Vol (m ³)	
Daresbury	30	V	45.2	8.14	2351	18—19MV 出 束
Oak Ridge	25	V—折叠式	30	10	2355	17—18MV 出 束
Jaeri	20	V—折叠式	26.6	8.3	1440	18MV 出 束
B. Ayres	20	V	36.6	7.6	1645	接近完成
Strasbourg	18	H	25	5.6	300	18MV 出 束
Legnaro	16	H	25	7.6	600	15MV 出 束
Catania	16	H	25	6.2	500	正在进行接收试验
Strasbourg (vivitron)	35	H	50	7.6	1300	计 划
Yale	20	H				计 划

质的束流就会有一些损失。例如,增加一个增能器,就需要附加的剥离级。有时,为了增加能量,剥离级用在Tandem之内。

上面提到的vivitron计划,在许多技术上得到了发展。钢筒的尺寸和立柱的尺寸有了明显的减小。并将允许水平安装,而且造价明显的下降。这将对向高电压迈进开创了新路子。

另外一个可能的发展是在顶端使用高电荷态正离子源⁽¹⁰⁾,取掉低能部分和剥离过程。然而至今,这方面的工作开展的并不那么活跃,因为许多技术问题还有待于进一步的解决。

总之,Tandem是一个很有潜力的装置,现有的技术还是相当先进的。对于相对低的重离子束,无疑它在一个长时期内仍是一个最理想的装置。

3.2. 直线加速器

我们将讨论三种不同类型的直线加速器:

一大的装置像Unilac (GSI), Superhilac (LBL) 和比较新的Rilac (Tokyo)。

一为Tandem作为增能器而设计的直线加速器。它们或使用室温腔体技术或采用超导腔体技术。

一为较大的加速器组合系统,一般为GeV/核子能量的等时回旋加速器作为注入

(上接29页)

$^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}^{(1)}$, $^{12}\text{C} + ^{14}\text{N}^{(15)}$, $^{16}\text{O} + ^{28}\text{Si}^{(7)}$, $^{16}\text{O} + ^{30}\text{Si}^{(7)}$, $^9\text{Be} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}^{(17)}$ 也与表I的结果一致。

在计算中,若当忽视了许多可能是精确结果的时候,认为没有列在表I中的核反应体系不显示共振行为是不可能的。但是,我们能注意到效应太小或者根本就没有观测效应的那些反应($^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}^{(17)}$, $^9\text{Be} + ^{28}\text{Si}^{(1)}$, $^{13}\text{C} + ^{28}\text{Si}^{(4)}$, $^{18}\text{O} + ^{28}\text{Si}^{(1)(4)}$, $^{11}\text{B} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{58}\text{Ni}^{(10)}$)没有相应的能量极小值(表I)。

已经发现在表I中没有列出来的两个反

器而设计的直线加速器。

3.2.1 大的直线加速器

Unilac和superhilac属于固定频率类型的加速器。也就是意味着固定速度,从而固定了每个核子的能量。Superhilac目前是用来作为Bevalac的注入器。而Unilac是1975年建成的一个研究重离子的关键装置,于1982年又进行了设备革新;增加了两个新的108MHz的Alvarez,增加了第二个剥离级。在最后一级加速前,通过了17个单隙腔,能量达到20MeV/核子⁽¹¹⁾。具有很好的流强,发射度为 $5\pi\text{mmrad}$,并得到了150psec的脉冲宽度。整个系统用计算机进行控制。

日本理化所(IPCR)的Rilac在1982年开始运行。它是世界上唯一的一台可变频率的直线加速器。具有6个腔体,运行在16和45MHz之间,用PIG离子源得到了15mmrad的发射度和 $\Delta E/E \approx 6 \times 10^{-3}$ 的能量展宽⁽¹²⁾。

虽然取得了这些成就,但还没有一台新的直线加速器建造为独立的装置。原因也许是由于造价的昂贵和庞大的尺寸。但是,它作为大的同步加速器的注入器仍然是最有前途的。(未完待续)

(何易摘译自Proc.Int.Conf.Nucl.Phys. Florence 1983.Vol. II.)

应; $^{12}\text{C} + ^{20}\text{Ne}^{(6)}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{40}\text{Ca}^{(10)(19)}$ 显示了这类效应,而 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 和 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 反应则仅仅开放转移反应道。

对实验上一直没有进行研究的许多反应做出预言是很有趣的并且是很有意义的,按照表I这些反应应该表现为“轨道运动”。甚至像 α 转移反应中的共振结构和双核子转移反应中未显示这类效应等的某些有关测量,也能够根据类似的总能量考虑加以解释。

参考文献(略)

(刘国兴译自Phys.Rev.Lett.51(1983)

2366,顾金南校)