

重离子加速器的现状和发展趋势

(续完)

3.3.2. 作为增能器的直线加速器

近年来, 经过许多实验室的努力, 适合于加速低 β 的重离子的新的加速装置, 无论是室温或者是超导加速器, 都得到了迅速的发展。这些基本上都是由独立的相共振腔组成, 它可以不改变频率而调整宽的速度范围。其结构和常规的直线加速器是有很大的差别。独立腔体对加速具有一个最佳的速度。对室温加速装置, 新近发展的共振腔的类型是螺旋型 (Heidelberg) 和叉指型 H (Munich)。超导加速装置被设计为分裂式环形共振腔, 如阿贡和Stony Brook的腔体, 以及可变直径的螺旋腔。

由于这些技术的发展, 促使把一些直线加速器作为Tandem的增能器。图8给出了这种情况的图示, 其原因如下:

1. 重离子直线加速器需要一个注入器,

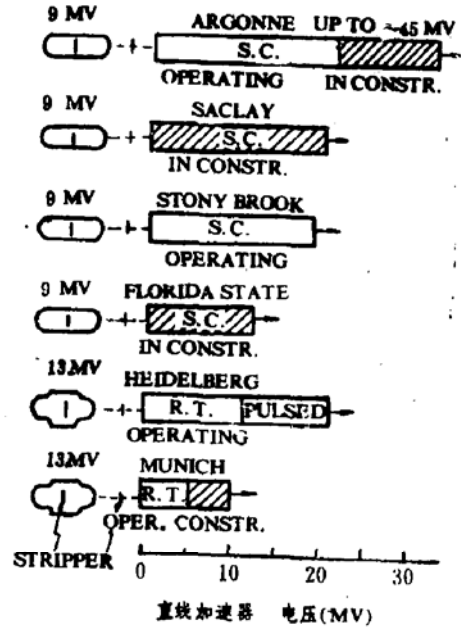


图8. 在建设或运行中的Tandem + Linac系统的总加速电压和计划。SC: 超导腔体, RT: 常温腔体。

参 考 文 献

1. R. Kirchner, O. Klepper, W. Kurcewicz, E. Roeckl, E. F. Zganjar, E. Runte, W-D. Schmidt-Ott, P. Tidemand-Peterson, N. Kaffrell, P. Peuser and K. Rykaczewski, *Nucl. Phys. A378*, 549 (1982).
2. G. Münzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster, K. Güttner and H. Ewald, *Nucl. Instr. Methods* 161, 65 (1979).
3. G. Bruske, K.-H. Burkard, W. Hüller, R. Kirchner, O. Klepper and E. Roeckl, *Nucl. Instr. Methods* 186, 61 (1981).
4. H. Gäggeler, N. Trautmann, W. Brüchle, G. Herrmann, J.V. Kratz, P. Peuser, M. Schädel, G. Tittel, G. Wirth, H. Ahrens, H. Fol-

- ger, G. Franz, K. Sümmerer and M. Zendel, *Phys. Rev. Lett.* 45, 1824 (1980).
5. G. Herrmann and N. Trautmann, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 32, 117 (1983).
6. S. Hofmann, W. Reisdorf, G. Münzenberg, F. P. Hessberger, J. R. H. Schneider and P. Armbruster, *Z. Physik A305*, 111 (1982).
7. O. Klepper, T. Batsch, S. Hofmann, R. Kirchner, W. Kurcewicz, W. Reisdorf, E. Roeckl, D. Schardt and G. Nyman, *Z. Physik A305*, 125 (1982).

(诸永泰译自 *Interdisciplinary Science Reviews*, VOL. 9, No.4, 1984, 313—315)

以便把离子的速度匹配到直线加速器允许的范围。

2. 许多Tandem能够使用一个增能器。对于一些实验，在增能器之前需要剥离，而强度的损失可以由能量增益来补偿。

3. 直线加速器是可以扩展的。像图8中表示的阿贡和慕尼黑的情况就是这样。

对于束流的聚焦，在常规的直线加速器中是通过调整不同单元之间的聚焦元件而解决，在阿贡，佛罗里达州和Saclay使用超导螺线管而达到，而常规的四极透镜则用在Stony Brook和Heidelberg。

上述装置的性能都是很好的，得到的束流强度几乎和注入器的指标一样，因为传输效率达到50—70%以上。例如，在阿贡实验室得到了5mm mrad的发射度和能量展宽 $\Delta E/E$ 接近 5×10^{-4} 的束流，非常接近Tandem的指标，脉冲宽度为150—200 psec¹³⁾。

这个新的加速技术看来是成功的，然而由于具有许多共振腔而使可靠性变小引起了人们的重视。但总的来说，总的电压增益在40—50MV以上，无论是常规的还是超导结构的，直线加速器的价钱还不是那么昂贵。但超过这个值之后将比超导回旋加速器的成本要大的多。目前，用直线加速器作为增能器在世界上许多实验室正在被讨论和提出。这里要特别提出的是，超导共振腔的平均加速场是在2—2.5MV/m，将会达到4—5MV/m。同时，比较高的 β 值将发展到 $\beta = 0.05$ —0.1，这是目前所有的工程所具有的特征。在这种情况下，直线加速器增能器是对同样电压增益的竞争者。

4. 能量达到100MeV/n的回旋加速器

回旋加速器的能量范围仍然是从10—20 MeV/核子到100—200MeV/核子。近两三年来，已证明在这个范围内同样取得了重要的技术进展。为了叙述方便，将以下面的几种

情况分别加以说明：

1. A.V.F 回旋加速器。这类加速器使用内离子源或者先进的离子源。它可以使使用不同类型的注入器。如奥赛的阿利斯装置(Orsay、Alice)用直线加速器作为注入器；美国橡树岭等时性回旋加速器用25MV的Tandem作为注入器；Texas AM88"的回旋加速器连接到K=500的超导加速器上；Brookhaven是用BNL Tandem作为注入器的。

2. 有多种多样注入器的分离扇回旋加速器；如正在运行的GANIL、SARA、VIC-KSI；正在建造中的兰州重离子加速器和RIKEN，以及正在设计的OSAKA都是这样。

3. 结构紧凑的超导回旋加速器；如MSU K-500 (正在运行)；正在建造中的MSU K-800, Milan, Chalk River和Texas AM；正在讨论中的Stockholm, Jivaskjla和Orsay的装置等。

4. 分离扇超导回旋加速器；如Munich的SUSE，虽然装置仍在建议阶段，但是许多模型和原型实验一直在进行着。

4.1 AVF回旋加速器

在这类加速器中，多年来许多实验室在离子源方面进行了极大的努力。像在Texas AM, LBL88", Harwell使用的内离子源

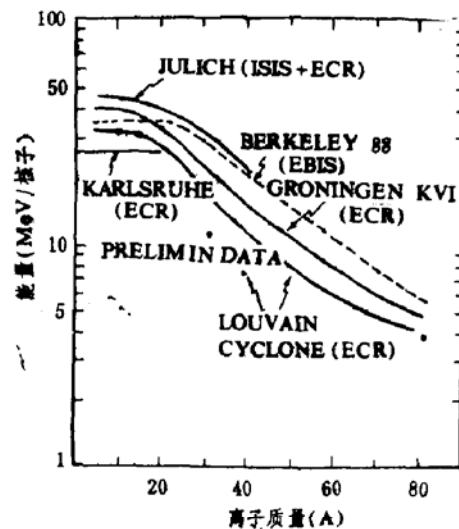


图9. 具有ECR源的AVF回旋加速器所得到的能量和离子质量关系曲线

PIG源；在另一些实验室则使用先进的离子源，采取轴向注入系统，预期的结果表示在图9上，对两种不同的加速器Harwell和Texas使用的PIG源和Louvain使用的ECR进行了比较。很清楚，对低电荷态来说，两种源是可以比拟的；但是对于高电荷态来说，PIG源在强度上远远不及ECR源。从Louvain实验室的情况来看，ECR的确具有好的稳定性和有限的寿命。

现在人们把AVF回旋加速器常常做为比较大的加速器组合部件。例如在Oak Ridge系统上，于1981年把Tandem接到了回旋加速器上。另一个计划是包括一个AVF室温回旋加速器的BNL计划，它具有一个直径为5米的大极面的磁铁。同时，Oak Ridge小组对发展AVF回旋加速器进行了相当长时间的努力，如用超导线圈代替了常规线圈，把K值从100提高到300，磁场强度达到3 忒斯拉。虽然还没有更多的考虑这个计划，但是这样一个发展，同先进的离子源一起，将使现在的回旋加速器的寿命变的更长。主要的缺点是成本高、技术困难。所以从它的潜力来看，这个计划也许会在另外的地方出现。

4.2 分离扇回旋加速器（室温）

分离扇回旋加速器的现状（GANIL和SARA是一个成功的例子）是技术发展的一个好的典范。虽然，它的成本是昂贵的，但是从已经知道的报导来看，比如超导回旋加速器，这样的成本得到了 $K = 400-500$ 的效果，也许这是一个上限值。事实上，最近一项新建议（Osaka）也没有超过这个值。GANIL于1982年底已开始运行，至今引出的束流仅是44MeV/核子的Ar。从注入器得到 1.5×10^{12} pps的 Ar^{4+} ，而从第一个 $K = 400$ 的SSC引出了 5×10^{11} pps，经过 $20 \mu g/cm^2$ 剥离膜之后，束流是3.4MeV/核子（剥离膜的寿命是一周）。 Ar^{10+} 束流被注入到第二个 $K = 400$ 的SSC中被加速到44MeV/核子。其束流的强度是 5×10^{10} pps， $\frac{\Delta E}{E} = 1 \times 10^{-3}$ 。¹⁵⁾

从表3中列出的SARA的情况来看，其内表3. S.A.R.A的束流情况

离子	电荷态	能量 MeV/核子	强度(pps)
C	3/6	30	4.1×10^{11}
N	4/7	30	1.8×10^{10}
O	4/8	30	7.8×10^{10}
Ne	5/10	30	1.2×10^{10}
Ar	7/15	15	0.8×10^9

器之间的传输效率是25%，能量展宽是 $4-8 \times 10^{-3}$ ，发射度为25mm mrad。目前，束流的建立时间为两小时，但还没有运用计算机控制¹⁶⁾。

Vicksi的8 MV Tandem的辅助设备、Riken和HIRFL计划都正在建设中。目前有一种趋势，包括Osaka计划在内正在为加速轻粒子而努力。例如，GANIL在做加速质子的努力。Riken计划加速200MeV的质子，135MeV/核子的氘，而Osaka计划加速300MeV/核子的 $^3He^{++}$ 等。因此，从某种意义上讲，设计者在为建造一个“万能”的机器而做艰苦的努力，又不使造价太贵。而另一种趋势是，在不久的将来，先进的离子源将代替目前的源。例如，在SARA、ECR已在运行，在GANIL和Riken类似的ECR也正在努力研制之中。GANIL在小注入器中，使用了轴向注入离子源，而Riken在RILAC的入口也许用新的源代替PIG源。总的来说，这种类型的加速器已获得成功，而且积累了许多新的经验，预期的目的都已达到。

4.3 超导回旋加速器（小型）

自1982年8月，第一台超导回旋加速器MSU—K500出束以来，束流的品质得到不断提高。虽然对发射度还没有可靠的数据，而对35MeV/核子的C束的能量展宽 $\Delta E/E \approx 2 \times 10^{-3}$ 已测量到了。从运行的经验来看，具有好的稳定性和易调制的能量变化。但存在的主要问题是排除故障的问题，像(18)中所给出的一样：

1. 在偏转板上很难达到最大电场140 KV/cm; 对全剥离的轻离子, 还很难引出最大能量80MeV/核子的束流。

2. 在运行中冷凝板的真空问题, 由于残余气体的剥离而引起的束流损失。

上面这两个问题易于解决, 而离子源的寿命问题恐怕是最头疼的事。虽然最近有人使用铪阴极得到改善, 但这仅仅是对几种离子而言。由于超导回旋加速器是新型的, 很难对它作出明确的评价。然而 MSU-K500 成功的运行消除了人们的怀疑。怀疑的原因大致是, 由于高的磁场而尺寸减小, 随之而来的是缺乏空间而遇到的一些技术问题。

已知存在超导回旋加速器的极限, 并且由束流动力学的共振而证实。实际上, 3 扇的装置被限制在220MeV/核子, 4 扇的装置被限制在380MeV/核子。只有 MSU-I-K 800 被设计为接近这些值(三扇达到200MeV/核子)。

目前正在建设中的超导回旋加速器 Chalk River 将在1984初开始运行*。对超导回旋加速器的现状是鼓舞人心的。其原因是, 和相同K值的室温分离扇回旋加速器相比成本减少。这一点从正在建设中的 Chalk River, Milan, Texas AM 和正在讨论中的新装置(stockholm, Jivaskyla, Orsay)所证实。对发展如此迅速的领域, 要预言它的趋势显然是困难的, 然而发展的方向还是清楚的:

1、先在Milan计划使用轴向注入的先进离子源 (ECR 或 EBIS), 然后在 Orsay, Stockholm 和 Jivaskyla 的装置上使用。

2、加速很轻的离子(甚至质子)是有可能的。在Orsay这一工作正积极进行。然而困难还是相当大的, 因为耦合共振使得超导回旋加速器在低场区(20—25KG)达到极限。所以为了加速轻粒子比如质子要付出的成本是相当大的, 但设计者认为还是有价值的¹⁹⁾。

3、超导电缆在近十年或更少一些时间的问世将是一件十分有益的事。目前, 所有

的工程, 不管是建设中的还是计划中的, 用NbTi电缆在4.2°K温度下, 磁场可达4.5—5T (忒斯拉), 得到K值的范围在800—1000左右。超导电缆的技术不断发展, 可达到比较高的场强。图10给出了使用不同的超导电缆时, 电流密度和磁场的关系。如 Nb₃Sn 电

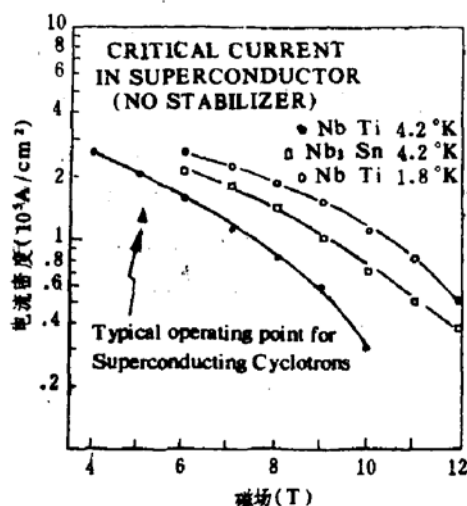


图10. 对各种不同的超导电缆, 临界电流密度作为磁场函数的关系图。

缆在3.2°K, NbTi在1.8°K, 场强接近8T (忒斯拉) 时, 电流密度可达10⁵ A/cm²。这正是超导回旋加速器所需要的。在Milan, K值将在800—2000内变化。

4.4 分离扇超导回旋加速器

分离扇回旋加速器的发展是值得提及的。几年来, 在Munich正在积极建设SUSE工程, 其主要的理由是克服了上面所提到的共振问题, 所以相当高的能量/核子的束流包括轻粒子成为可能。SUSE工程是一个具有K = 1400的四扇装置, 利用Munich的Tandem作为注入器, 可以把质子加速到450 MeV, 全剥离轻粒子达到300MeV/核子, U达到24MeV/核子, 得到了非常好的束流品质和能量分辨(10⁻⁴)²⁰⁾。

要建造这样一台装置必须解决一些技术难题, 主要是像线圈一样的超导扇。另一个不利因素是成本高。Munich小组已建成一

*本文发表于1983年。译注。

扇磁铁的原型, 1:1的RF腔体的原型正在建造中。这无疑说明在回旋加速器的技术上又迈进了一步。

5. 能量达到1—10GeV/核子的同步加速器

毫无疑问, 能量为1 GeV/核子或更高一些的范围是同步加速器的唯一领域。现在运行的装置 Bevalac, Synchrophasotron, Saturne等都是很好的例子。大都是改建的质子加速器。在这个领域中, 新近的成就(1982—83)都是Bevalac的改装, 它的运行计划表示在图11中, 其中还给出了U的电荷态和它们不同阶段的强度, 两个主要的步骤是²¹⁾:

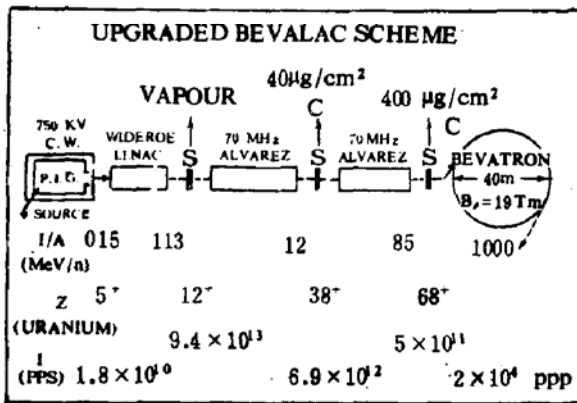


图11. 改进的Bevalac组合装置计划

1. 低能注入部分的散束, 达到第一个 Alvarez直线加速器。

2. 在Bevatron上使用了冷凝泵, 具有新的工作线, 温度降至12°K。这样真空可达 10^{-9} — 10^{-10} 托。

最高能量的重离子束目前在Dubna的同步加速器上已经利用, 但质量数 ≤ 20 。

目前的主要趋势是要发展“专门”(ad hoc)同步加速器。对三个主要的工程 Numatron、SIS和TEVALAC的设计计划在图12中给出。基本思想是类似的, 即多级直线加速器注入到至少有两个同步加速器环的组合装置中, 并根据需要而放置剥离装置。其中

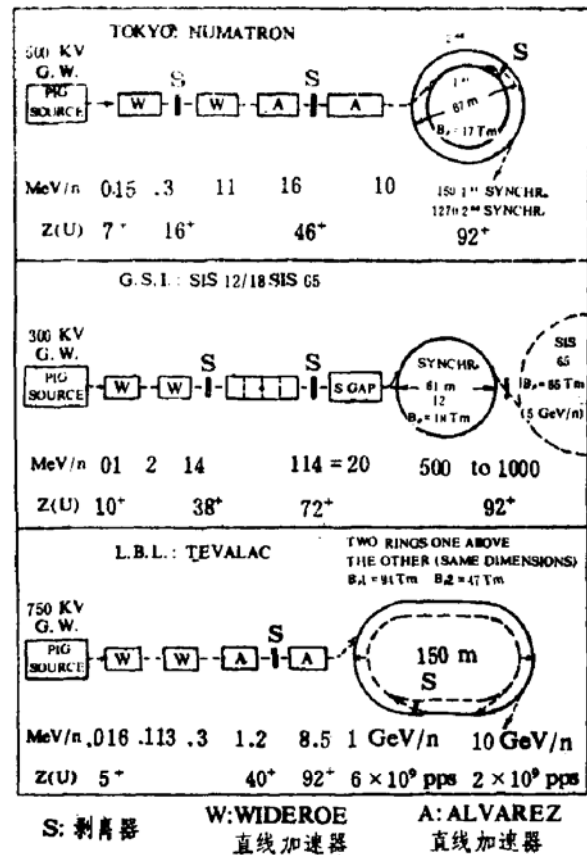


图12. 新的高能加速器的设计计划

TEVALAC得到最高的U能(10GeV/核子), 所使用的超导磁铁具有5—6忒斯拉的场强。在SIS (GSI) 中同样使用超导磁铁。对于剥离级或采用两个 (TEVALAC) 或采用三个 (NUMATRON)。人们认为有意义的发展是R. F. Q (高频四极透镜) 直线加速器的引入。它主要是改善低能部分。看来对低能重离子是非常振奋人心的。并可以用作注入器而注入到室温或超导直线加速器中。R. F. Q最先是由Kapchinskiy和Teplyakov提出的。射频电场用来聚焦、聚束和加速束流。R. F. Q可以从一个低电压源(50KV) 获得高的d. c离子束, 在几米的距离内, 把它聚束并且得到加速。在相同的束流和输出能量下, R. F. Q具有小的尺寸。目前, 在Los Alamos已经进行了成功的试验。将用它来代替现在的直线加速器作为注入器。先进的离子源和R. F. Q注入器的组合装置已由Nucleotron (Dubna)²³⁾ 计划所进行(图13)。它

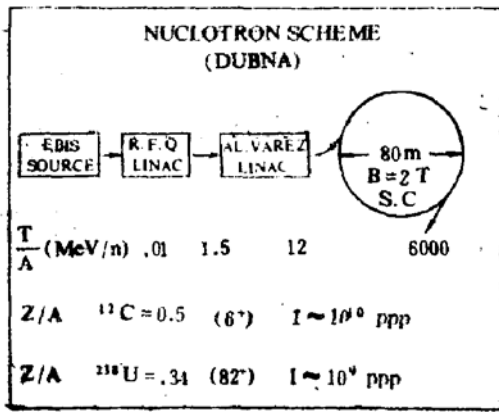


图13. Dubna Nuclotron加速器的设计计划没有剥离级, 高的电荷态 (U^{82^+}) 由离子源完成, 使用 2 忒斯拉的超导磁铁, 可将U加速到 6 GeV/核子。这个计划是吸引人的, 但是它的可能性在很大程度上取决于离子源。

在Saturne I (Saclay) 正在进行对现有装置的改进。把一个圆周35.2米的小同步加速器作为Saturne I的注入器, 可以加速到Xe, 克服了现有直线加速器的极限。电子束离子源 (EBS) + RFQ计划同样在一些实验室进行。

最后, 对于高能对撞机来说, 根据Quark-gluon等离子体公式在超相对论能量区的预言, 达到30GeV/核子铀束流的对撞机是可能的。这些设想在Brookhaven等实验室都进行着紧张的工作。但是, 突破性的发展看来还需更长的时间。

6. 新的加速技术

集团离子加速器 (ERA型即电子环加速器) 在最近几年已引起了人们极大的注意。一些小组正在进行紧张的工作, 而且取得了振奋人心的结果。这类加速器作为另一些装置 (如直线加速器、回旋加速器) 的注入器是很合适的。可以提供几个MeV/核子的束流。同样, 高通量 (几个毫安)、低电荷态 (1^+ ,

2^+) 重离子加速装置也正在研究之中。最引人注目是采用激光加速技术, 它被作为得到超高能质子 (和电子) 装置的候选者而正在积极研究。应该看到, 当前的加速器真正是用途广泛和运行可靠的。正像图14所示的, 它们可以提供平均加速场达到 20—30 MV/米。然而任何新的或不同的加速技术必须提供平均加速场超过100MV/米。

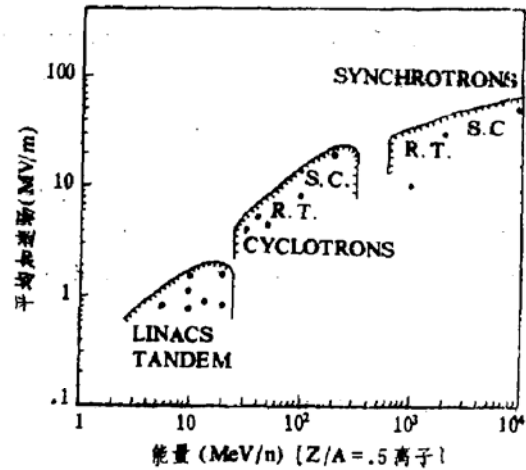


图14. 在本文中所考虑的加速器的平均加速场

7. 结论

重离子加速器技术的发展看来一直是令人满意的, 现有的装置得到了好的结果, 新一代的装置正在建造中。至今还没有任何失败的记载。今后十年, 更重要的发展在预料之中。如果这个领域将继续发展的话, 这终将依赖于重离子物理的新发现和它的重要性。毫无疑问, 其中某些看法至少可变成现实。

参考文献 (略)

(何易 摘译自 Proc. Int. Nucl. Phys.—Florence 1983 Vol. I. Invited Paper. 551—578)