

# 1986年回旋加速器

—M.K.Craddock在1986年国际回旋加速器会议上的总结

## 概 要

发明回旋加速器至今已有五十六年的历史了，其设计、建造和改进仍在稳步向前，功能也在不断地扩展。在过去的两年内已有六项工程建成，13项计划正在进行，另外四项已经批准。其趋势是愈来愈多地使用超导磁体，其中一例是使用了超导高频腔。ECR离子源虽然费用昂贵，但是能产生高效率剥离重离子。它的出现已淘汰了许多PIG离子源，还可能淘汰许多作注入器用的加速器。能够储存、冷却并加速束流的冷却环大大地改善了回旋加速器的性能，因而正在不断地推广；有五个正在建造之中，已准备建造的数目更多。高强度的问题给束流动力学和高频控制提出了不少新课题并引导出了一些新的解决方案。

## 引 言

第一台回旋加速器建成以来已有五十多年了。正如我们在这次会议上所听到的那样，回旋加速器自身还在继续发展着。随着时光流逝，建造它的元老们已到垂暮之年，最近两年已有三位主要的先驱者逝世了。在此，让我们对他们的贡献致以敬意。首先必须提到的是Stanley Livingston，他认为自己在当Lawrence的研究生时，就开始做建造回旋加速器的实际工作了；其后，他在Cornell和MIT领导建造了较大的回旋加速器，又建造了一个布鲁克海文的弱聚焦高能同步稳相加速器；接着，他与别人共同发现了强聚焦，又建造了剑桥电子加速器。其次，要提到的

是Jack Livingood，他早期也在Berkeley开发加速器，其后，在把独特的扇形聚焦技术应用到阿贡零梯度同步加速器中他起了先导作用；当然，这两位加速器的先驱者也因用英语著有加速器教科书而闻名于世。最后，要提到的是Jack Riedel，他是一位出色的高频工程师，他的技术是传奇般的高超；他的最后的、也许是最富有挑战性的成就是为密执安州立大学超导回旋加速器作的高频系统。

至于回旋加速器的原理，自1930年起，现在已接近中晚期了。即便是分离扇聚焦回旋加速器，它的首次实验也是在35年以前就完成了。在这样一个成熟的领域内，我们不能说会议上某些论文发现了一些新原理，因而它们是最重要的；然而，这次会议上也有一些新颖有趣的独特报导。主要的进展似乎首先是改进技术，例如：超导磁体、精确的电磁场计算、ECR源。其次是由于新的问题而引起的，例如：高强度、与其它加速器的联接。

## 已经完成和正在进行的计划

在详细综述以前，我们有必要先回顾一下自上次会议以来(East Lansing, 1984年5月)一些已经完成的工程项目和正在建设中的计划项目(见表1)。

在那些已经完成并且正在成功地运转的加速器中，首先要提到的是Chak River<sup>[1]</sup>K = 520的超导回旋加速器。作为一个加拿大人，我非常荣幸地在此向首先提出超导加速器设想的小组致以同行的祝贺，并对他们完全是由于非技术上的原因而推迟了建成日期

表1

新的回旋加速器

回旋加速器	能量	粒子 <sup>+</sup>	时间(年)
近期已完成			
* AECL Chalk River	K 520		1985
NAC (S. Africa) SFC	8MeV	P+L·I·	1986
SSC	200MeV	P+L·I·	1986
Krakow	56 MeV	P+L·I·	1986
Debrecen	20 MeV	P+L·I·	1986
Uppsala SC**	200MeV	P+H·I·	1986
RIKEN Ring SSC	K 540		1986
正在建造中			
Louvain	30 MeV	H <sup>-</sup>	1986
* MSU/Harper Hospital	50 MeV	d	1987
* MSU	K 800 (1200)		1987
* Texas A&M	K 500		1987
Swierk	30 MeV	H <sup>-</sup>	1987
Lanzhou HIRFL SFC	K 69		1987
SSC	K 450		1988
Milan/Catania	K 800		1988
Dubna U400M	K 540		1988
NAC (S. Africa)	K 11	→ P+H·I·	
Warsaw	K 180		
* Monich TRITRON	K 85	P+H·I·	
Bombay	35 MeV	P+L·I·	
已批准计划			
Osaka RCNP	400MeV	P+L·I·	1991
* Orsay/Groningen AGOR	K 600		1991
Jyväskylä	K 100		
* Amersham/Oxford Instr.	12/17 MeV	H <sup>-</sup>	
提议的			
* MSU Medical SC	285MeV	P	
* EULIMA SSC	>300MeV/U	L·I·	
* Munich SOC	K 2400		

\* 超导磁体

+ 没有另外说明的重离子。

\*\* 同步回旋加速器向扇形聚焦转换

表示同情。在一些新颖的特色中,使用微调杆而不是使用微调线圈是值得注意的改进,而且已取得了明显的成功。至今该回旋加速器已运行了一年多,并提供了不同类型的束流用于实验,最近还输出了20MeV/u.<sup>79</sup>Br的束流。

其次,在南非国家加速器中心<sup>[2]</sup>,一台小型聚焦回旋加速器作注入的为加速轻离子用的大型分离扇环形回旋加速器已开始运行。66MeV及200MeV的质子束已加速引出。注入器具有完全的圈分离并有100%的引出效率。为在更高的能量下达到同样条件,磁

铁校准和它的改进工作正在进行中。

据报导，波兰Krakow的56MeV的回旋加速器以及匈牙利Debrecen的20MeV的装置已开始运行。此外，还有两个装置刚刚完成，将要开始调束——一个是非常壮观的K=540分离扇环形回旋加速器<sup>[3]</sup>，我们在日本RIKEN参观期间曾赞扬过它；另一个是在瑞典Uppsala的扇形——转换200MeV的同步回旋加速器<sup>[4]</sup>，它用作1160MeV CELSIUS冷却环的注入器（早在1986年11月，已成功地加速出全能的 $\alpha$ 粒子）。

表1表明，将有愈来愈多的回旋加速器计划使用超导磁体。在中国Lanzhou<sup>[5]</sup>(K=450)和苏联Dubna<sup>[6]</sup>(U400M)建造的以及计划在日本Osaka<sup>[7]</sup>建造的(400MeV质子)回旋都给人以深刻的印象。它们可能已成为回旋加速器磁体盛行年代的最后几个装置。

取而代之的是我们也许将进入回旋加速器的低温系统时代。这个时代的诱惑力是非常大的。正如Henry Blosser<sup>[8]</sup>所指出的(图1)，平均来说，超导回旋加速器仅需要室温磁体钢材的1/17就能产生和室温磁体相等的弯曲功率。

更为引人注目的是超导磁体在医用回旋

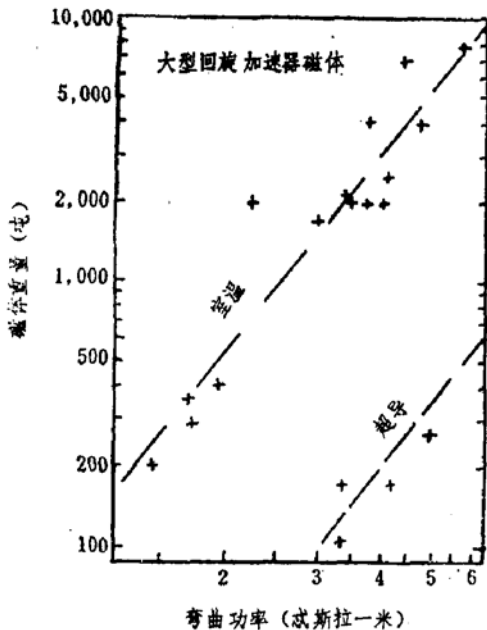


图1. 大型回旋加速器的磁体重量随功率的变化。

加速器中的应用。由于费用的低廉，将促进回旋加速器更容易在医院中推广使用。1987年初，一台中子治疗用的小型回旋加速器<sup>[8]</sup>(K=100)将在密西根州立大学的Harper医院落成。它是安装在一个可转动的台架上的。Amersham/Oxford仪器厂12/17MeV微型回旋加速器<sup>[9]</sup>将是最紧凑的密集型产品。更为雄心勃勃的是这两个设计：一台300MeV用质子和轻离子作治疗的超导装置——同步回旋加速器，它正在MSU设计，一个欧洲财团<sup>[10]</sup>目前正在设计另一台分离扇回旋加速器EULIMA。

## 高强度

SIN小组<sup>[11]</sup>正在探索一个新的研究领域，它们在装有外离子源的CW同步回旋加速器中首次观察到强的空间电荷效应。他们用新的0.86MeV Cockroft—Walton预注入器能为新的分离扇注入器II提供16毫安(直流)束流。由此，他们能够引出约1.0MA的束流，而仅有2 $\mu$ A的损失；但是束流强度仅仅再提高10%时，束流损失就上升到最大容许量10 $\mu$ A左右。束流损失的增加量与能散的增量( $\sim 0.45$ MeV/mA)有关。能散起因于次级纵向空间电荷效应(借助于三次谐振高频平顶波，线性效应可被补偿)。计算机模拟显示，在注入器II中最初几圈有螺旋状不稳定现象，这或许与Mort Gordon<sup>[12]</sup>所描述的涡旋运动有关。因为590MeV的环不能接受能散大于0.3MeV的束流。所以，目前能被加速的最大束流是0.65MA。实际上，CW束流的上限是0.35mA。该值受靶的次级产物、束流阻止及高频电源所限制。

关于高频，两个回旋加速器均处于束流负载是主要效应这种令人高兴的环境中。目前200KW的基频功率放大器基本上处于0.35mA的束流极限。对于较高的束流，计划建造一个新的600KW系统。这也可能使峰值电压从500KV增至700KV，并具有高频及束流动

力学方面的许多好处。为了平顶高频，三次谐振腔运行在与基频反向状态。结果，束流负载效应对它们呈现负值，由于束流输运能量至高频系统，故所需能量随强度增加而减少。对于在注入器 II 中电流大于 0.8mA 以及在环中电流大于 0.5mA 的情况下，所需的三次谐波功率确实呈负值。从提供能量的观点来看是令人满意的，但是从维修控制观点来看，这是非常危险的，因为系统起到质子调束管的作用，具有以基频馈入的能量，部分能量则以三次谐波形式耦合输出。为了控制幅度及相位已研制成了一个反馈回路样机，并已成功地进行了测试。当形成高电压时，

腔体电压及相位基本上能保持恒定，但不输送能量。下一步的问题是设计一种能兼顾束流负载高低两种情况的系统，为此制作了没有能量相对反射的传输线和发生器。调速管子工作在 A 类或 AB 类状态，外部吸收器用作预先加载谐振和优化工作线。

## 与其它加速器的联接

近二十多年来，回旋加速器已广泛地应用于与其它加速器的联接，Bob Pollock<sup>[13]</sup>在一定程度上对此作了评论。表 2 概括地指出了这些联接的情况。与 Van de Graaffs 串

表2 回旋加速器与其它加速器的联接

名 称	能 量	粒 子 <sup>+</sup>	时间(年)
串级静电 (Van de Graaffs)			
Duke Cyclo-Graaff	15MeV+7MV	H <sup>-</sup>	1968
Livermore	15MeV+7MV	H <sup>-</sup>	1968
Oak Ridge (HHIRF)	25MV+K100		1981
Chalk River (TASCC)	13MV+K520		1985
Berlin (VICKSI)	8 MV+K130		1986
Milan/Catania	15MV+K800		1988
Munich (TRITRON)	13MV+K85	P, H.I.	
直 线			
RIKEN	16MV+K540		1986
冷 却 环			
Indiana (IUCF)	200MeV+500MeV	P, L.I.	1987
Tokyo (TARNII)	K67+K1800	P, H.I.	1987
Uppsala (CELSIUS)	K200+K1870	P, H.I.	
Jülich (COSY)	45MeV+2500MeV	P, L.I.	
Osaka (RCNP)	400Mev+1800MeV	P, L.I.	
同步回旋			
TRIUMF (KAON F.)	450MeV+30GeV	H <sup>-</sup> ; P	

<sup>+</sup> 没有另外说明的重离子

列静电加速器和其它回旋加速器相联接已很普遍。例如最近与 VICKSI 相联接就是一个例子。与直线静电加速器相联接是很少的。与法国 Orsay 的 ALICE 相联接是唯一例子。该器在 1985 年已关闭。然而这种情况可能马上会改变，在日本的 RIKEN，迫切地需要用一

台可变频率直线加速器作新的 K=540 分离扇加速器的重离子注入器。但是，近期的发展趋势是用非常强有力的 ECR 源，而不主张用其它加速器作为回旋加速器的注入器。在这次会议上，R.Geller<sup>[14]</sup>，C. M. Lyneis<sup>[15]</sup>和其它一些人已经对离子源性能方面连

续取得的进展，特别是质量愈来愈高的粒子提供全剥离方面的进展作了评论。在某些情况下，例如在Michigan，重新考虑了使用加速器作注入器的计划(图2)。事实已告诉我们ECR源的发展意味着“PIG源的死亡”。也许对这场变革最合适的口号是：

“胜利属于ECR源”

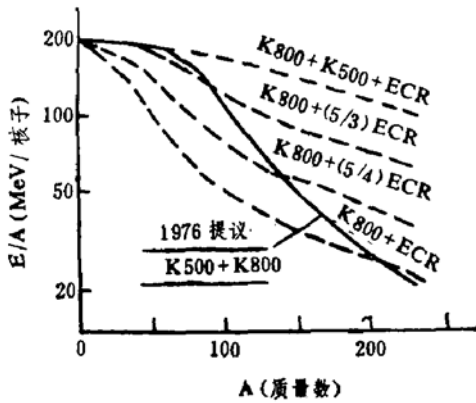


图2. 在MSU,当离子源和加速器为不同的组合时,每核子能量随质量的变化关系(这部分表示了电荷态的修正因子)。

近年来,另一个受到偏爱的趋势是附加有“冷却环”。这个有点不太恰当的术语包含了许多内容:即储存、冷却和加速。已有一些单行文章作了描述,如Dieter Mohl,<sup>[16]</sup>对此还作了仔细的评论。很显然,这些冷却环正对许多主加速器给予强有力的帮助。在Bloomington<sup>[17]</sup>(IUCF), Tokyo<sup>[18]</sup>(INS—TARN II)和Uppsala<sup>[4]</sup>(CELSIUS),前期试转工程已取得了很好的进展,并迫切地等待着它们开始运行。

### 模拟放射性离子加速

Malory等在MSU<sup>[19]</sup>发展了一项新颖技术,该技术是把具有相同荷质比的核反应产物作为初始粒子给予俘获和加速,这些初始粒子是在中间半径处的内靶上产生。用初始束流 ${}^6\text{Li}^{2+}$ ,他们首次观察到 ${}^8\text{He}$ 以及 ${}^3\text{H}$ , ${}^9\text{Li}$ 和 ${}^{12}\text{Be}$ (图3略)。看来,假如这种靶子产生的

放射性强度是能够容忍的话,此项技术似乎相当可能用于短寿命同位素的产生和加速。

### 超导分离轨道回旋加速器

Munich小组<sup>[20]</sup>把超导磁体用于分离轨道回旋加速器的提议,使得由于规模大和费用高而濒临死亡的回旋加速器获得了新的生命力。他们的样机K=85 'TRITRON'完全处于低温状态,而且整个地被封闭在真空室中,这是第一次把超导高频腔用于回旋加速器。磁体本身尺寸非常适中,由12个扇形体组成。每个高6cm(图3),径向范围约90cm,包含有20个2cm×2cm的开口以容纳线圈、铜制屏蔽物及1cm直径的束流孔径(束

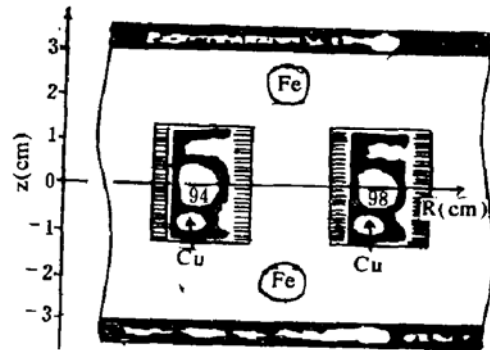


图3. TRITRON的扇形磁铁的垂直截面图。二个径向邻近的束流通道,各自装配有超导线圈和铜屏蔽。

流将从一个13MV的Van de Graaff型串列静电加速器中以小的发射角注入)。分离轨道的设计保留了回旋加速器固定磁场和高频的优点。这些优点使CW具有高强度束流,同时允许个别地控制束流孔径的磁场,从而控制了聚焦。其结果可能使这类装置既具有等时性,又具有相位聚焦的特点。Hiderer已描述了当前的建造情况。看来,TRITRON的进展将受到人们的密切关注。

### 减速回旋加速器

在加速器中,减速是众所周知的一种可能性,近来在CERN它被用在PS及LEAR中

减速反质子并已见效。在TRIUMF回旋加速器中，几年来已很有成效地把它作为诊断工具用于测量束流相位<sup>[22]</sup>的绝对值(图4)。在回旋加速器中，减速的两种可能的最新应用还没有被人们所熟悉。

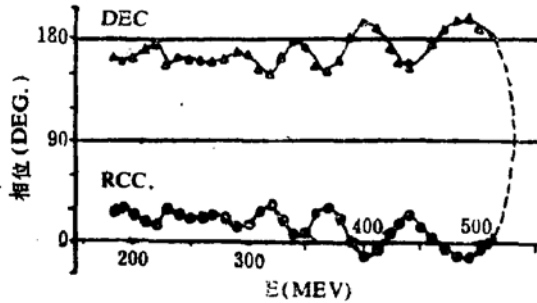


图4. TRIUMF回旋加速器中加速和减速束流的测量相位。

在W. Joho等的帮助下，Simons's的“回旋加速器陷阱”<sup>[23]</sup>已在Sin研制成功，它用在气体约束地区阻止 $\mu^-$ 粒子。110MeV/c的 $\mu$ 介子进入一个由超导螺线管产生的具有聚焦强度 $n = 0.5$ 、场强为4T的磁场。在有空气存在的情况下，介子在反向的回旋加速器轨道上被减速。并中止在围绕轴的狭窄区域中。这种陷阱，现在已搬到CERN，在LEAR对反质子执行着相同的功能。

欧洲的强子装置正在设计之中，用以产生强度比目前能得到的大100多倍的质子及反质子束流。在这样的强度下，随机冷却将会失效。为了冷却束流，必须把反质子从大约2.5GeV的峰值减速到适合电子冷却的能量( $\sim 200$ MeV)，可见减速回旋加速器似乎带来某种方便之处，并已被EHF研究小组<sup>[24]</sup>考虑。这种装置可能与反向运行的ASTOR<sup>[25]</sup>有某些类似的特征。

### FFAG回旋加速器

FFAG(固定场交变梯度)加速器常称为同步加速器，这确实不十分合适。因为它具有回旋加速器的特征，即有一个固定磁场和一个不断增加的轨道半径。事实上，是一种带有扇形体及螺线管聚焦的环形回旋加速

器。虽然，FFAG概念自MURA设计工作开始，已隐伏了许多年，近来，由于希望得到高强度的(毫安级)加速器作为约1GeV的散裂中子源，此概念又流行起来了。FFAG的设计是由Argonne的ASPUN<sup>[26]</sup>(图5)及Jülich<sup>[27]</sup>的SNQ提出的。虽然这些项目已被撤消，但目前仍有一个研究组正在为Rutherford-Appleton实验室考虑一个合适的设计作为欧洲的散裂中子源。该设计方案是用已有的800MeV ISIS同步加速器作为储存环，并用一个新的加速器使束流强度提高到3mA。为此目的，一个FFAG回旋加速器正被考虑。如果对FFAG同步加速器的工作继续进行，那么从涉及到的技术问题的类似性来看，把它作为一个课题纳入下次会议是合

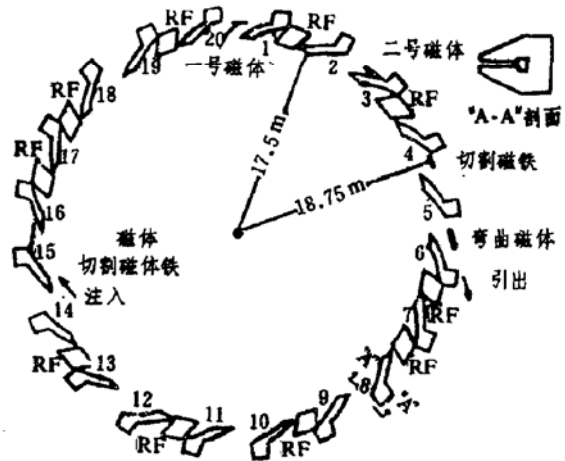


图5. 建议中的1.1GeV ASPUN FFAG的布局图。

适的。这种技术上的相似性涉及到具有扇型聚焦的直流磁体，具有加宽的加速缝隙的高频腔，以及大的真空系统等。

### 结 论

我们回到表1看到目前已有十三台回旋加速器在建造中，已批准建造的在四台以上。显然，这是一个兴旺的景象。我们期望在下次会议上能够听到许多有关初始运行的报告。如果，他们雄心勃勃制订的提案或者说“理想”大多数能被批准的话，那么他们的

杰作一定会成为高度建设积极性的必然成果。卓有成效的艰苦劳动成果，常会使人在睡梦中都带着甜蜜的微笑。

### 参 考 文 献

- [1] J.A. Hulbert, these proceedings, paper A1
- [2] A.H.Botha,H.N. Jungwirth et al., ibid., A2/L6
- [3] H.Kamitsubo, ibid., A3
- [4] S.Holm, D.Reistad, ibid., H45
- [5] B.W.Weil, ibid., E3
- [6] R. Ts. Oganessian, ibid., J2
- [7] I. Miura et al., ibid., H20
- [8] H. Blosser, T. Antaya et al., ibid., E1
- [9] M.F.Finlan, M. N. Wilson, ibid., L50
- [10] Y. Jongen, P. Mandrillon et al., ibid., D31
- [11] W.Joho, ibid., B2
- [12] M.M.Gordon, Proc. 5th Int. Cyclotron Conf., Oxford, 1969, ed.R. W. McIlroy (Butterworths, London, 1971), P.305
- [13] R.E.Pollock, Proc. 9th Int. Conf. on Cyclotrons, Caen, September 1981, ed.G.Gendreau (Les Eds. de Physique, Les Ulis, 1982), P.731
- [14] R. Geller, these proceedings, paper M1
- [15] C.M.Lyneis, ibid., M2
- [16] D.Nohl, ibid., C1
- [17] R.E.Pollock, ibid., C2
- [18] T.Katayma, ibid., C3
- [19] M.L.Mallory, ibid., J1
- [20] U.Trinks, Proc. 10th Int. Conf. on Cyclotrons, East Lansing, May 1984, ed. F. Marti(IEEE,New York, 1984), P.605
- [21] G. Hinderer, these proceedings, paper G1
- [22] M.K.Graddock, E. W. Blackmore, G. Dutto et al.,IEEE Trans.NS-24, 1615 (1977)
- [23] R. Abela,L.M.Simons et al., SIN Newsletter №.16 (January 1984) , P.65
- [24] C. Tschalär, Private Communication
- [25] W.Joho, Proc. 10th Int. Conf. on Cyclotrons, East Lansing, May 1984, ed. F. Marti (IEEE, New York, 1984), P.611
- [26] T. K. Khoe, R. L.Kustom, IEEE Trans. NS-30, 2086 (1983)
- [27] P.F. Meads, Jr., G. Wustefeld, IEEE Trans.NS-32, 2697 (1985)

(郭敏燕译自“Concluding remarks at CYCLOTRON’86, 11th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, October 13-17”  
叶峰、王兴林校)

上接27页

6. 今村昌 化学の领域 V29(9) 675—683 (1975)
7. Venkatesan T. Nucl. Instrum. Methods Phys. Rev. Sec. B, 7—8, 461—7 (1985)
8. Gazman A. M. Nucl. Instrum. Methods Phys. Rev. Sec. B,7—8, 468—72 (1985)
9. H. Wiedersich Nucl. Instrum. Methods Phys. Rev. Sec. B, 7—8, 1—10 (1985)
10. K.T.Kroff Radiat. Effects 89, 157—163 (1985)
11. I. Bello Radiat. Effects 89. 189—204 (1985)
12. G. Kraff Heavy Ion Radio Biology and Therapy, Present situation and Possible future development at GSI Proc of the Int. Symp. on Particle Therapy SIN Switzerland March 13—14, 1987
13. 赵祥臻 重离子辐射化学  
1982年中国科技大学辐射化学专业讲义