

超导重离子直线加速器

陈佳洱

(北京大学)

摘要: 本文回顾了近年来高频超导体的状况, 叙述并讨论了SUNYLAC和ATLAS二台超导重离子直线加速器的结构和性能。在此基础上讨论了超导直线加速器取得的成就、遇到的问题和发展前景。

一、前 言

60年代初期人们发现低温超导体的高频表面电阻只有铜在室温下的十万分之一^{[1][2]}。这个发现展示了建造高效率的超导直线加速器的光明前景。从此人们开始了对于超导直线加速器的奋力探索。二十多年来尽管高频超导技术的开发还远未达到理想的境地, 但已经出现了诸如超导电子直线加速器、超导高能粒子分离器以及超导重离子直线加速器等卓有成效的应用。

近年来美国阿贡国家实验室和纽约州立大学石溪分校各建成了一台超导重离子加速器ATLAS^{[3][4]}和SUNYLAC^{[5][6]}。它们充分证实了超导直线加速器的优越性。这二台加速器都以FN型串级静电加速器为注入器, 在 $\sim 3\text{MV/m}$ 的加速场强下以100%的负载周期加速各种中等质量的重离子。它们的终能量超过一个25MV的串级静电加速器(图1), 在束流性能上则保持了串级静电加速器所具有的优异品质。重要的是这样一套静电—超导直线加速器系统的总投资, 包括FN注入器在内, 大大低于建一个25MV串级静电加速器所需的费用。同时超导直线加速器运行的总功耗, 包括低温液氦系统在内, 又只为同类型室温直线加速器的五分之一左右。以上这些事实吸引着国际上其它许多从事核物理研究的单位, 他们纷纷投身于建造和研制超导

重离子直线加速器的行列。目前正在建造或已决定建造超导直线加速器的试验室有法国的萨克雷核子中心^[7]、英国的牛津大学核物理试验室^[8]、美国的佛罗里达州立大学^[9]和华盛顿大学、印度的达达研究所以及以色列

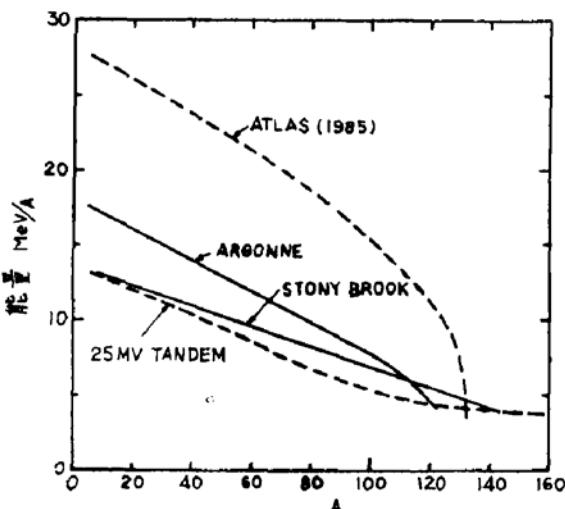


图1 超导直线加速器的能量

的维兹曼研究所^[8]等, 美国加州还开设了一个“超导应用公司”^[10], 专门供应超导腔及有关设备。超导重离子直线加速器所取得的成就, 还进一步引起人们在高能电子储存环、高能直线对撞机方面开发和应用超高频超导技术的兴趣。一种新的场强高达 80MV/m , 而造价1百万美元/GeV的超导加速结构正在成为下一步的行动目标!

为了具体说明超导重离子直线加速器的成就, 它所遇到的困难以及发展动向等, 本

文下面分别介绍和讨论(1)高频超导体的基本特性；(2)加速腔的结构与性能；(3)超导加速器运行中的几个技术问题等。

二、高频超导体的基本特性^{[11][12]}

超导体的高频表面电阻和高频临界磁场是超导技术在加速器方面应用的二个最重要的参量，前者决定着加速腔的功耗，后者规定了能量梯度的上限。

高频场下超导体的性能与直流情况下不同。当温度降至某个临界温度T_c后，超导体的电阻不为零，而等于某个称为“高频表面电阻”的小量R_s。根据BCS理论，常用超导材料Nb的表面电阻随温度T、频率f变化的情况可表述为^[13]

$$R_{BCS} = \frac{2.4 \times 10^{-21}}{T} \cdot f^{1.8} \cdot \exp(-1.8)$$

$$\frac{T_c}{T} [\text{欧}]$$

式中f以[Hz]为单位，T以[°K]为单位。实际测量表明：R_s随温度降至10⁻³欧后，就偏离理论规律而趋于所谓“剩余”电阻R_{res}，所以实际上R_s = R_{BCS} + R_{res}。式中R_{res}的大小与温度无关但与超导体的表面处理状况密切相关，它反映了超导表面不完善的程度。表面电阻R_s随温度和磁场变化的实验曲线如图2所示。Pb，Nb和Nb₃Sn三种超导材料，在低场下的典型数据列在表1上。

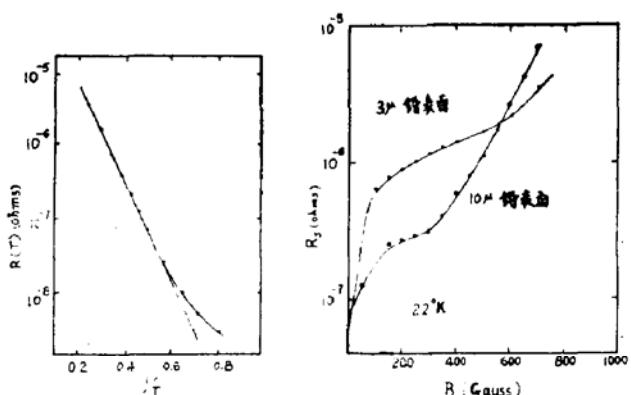


图2 a) 表面电阻随温度变化 图2b) 表面电阻随磁场变化

表1 T = 4.2 °K f = 100 MHz时的表面电阻

| 材 料 | 类 型 | T _c [°K] | R _{BCS} [欧] | R _{res} [欧] |
|--------------------|-----|---------------------|------------------------|----------------------|
| Pb | I | 7.2 | 5 × 10 ⁻⁹ | 2 × 10 ⁻⁸ |
| Nb | I | 9.2 | 2.5 × 10 ⁻⁹ | 10 ⁻⁹ |
| Nb ₃ Sn | I | 18.2 | 4 × 10 ⁻¹¹ | ~10 ⁻⁹ |

(*100 MHz, 300 °K时，铜的表面电阻为2.5 × 10⁻³欧)

表2 临界磁场的理论值

| 材 料 | T _c [°K] | H [*] _c (T=0) [奥] | H _{sh} [奥] | E _s (MV/m) |
|--------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Pb | 7.2 | 804 | 1125 | 11 |
| Nb | 9.2 | 2000 | 2400 | 24 |
| Nb ₃ Sn | 18.2 | 5400 | 4000 | 40 |

* H_c(T) = H_c(0) (1 - (T/T_c)²)

超导体的高频临界磁场规定了谐振腔的上限。常用的Nb和Pb的临界场决定于所谓“超热临界场”(Super Heating Critical Field) H_{sh}^[11]，而略高于直流临界场 H_c。高频

磁场一旦超过H_{sh}，超导体就立即转成普通导体。Nb₃Sn的临界场也等于H_{sh}，但略低于H_c。表2上列出了三种典型材料的直流和超热临界场的理论值，还列出了假定腔内单位加

速电场的磁场峰值 $H_p/E_a = 100 \text{ Oe}/(\frac{\text{MV}}{\text{m}})$ 时，允许的加速场强。

实验上测得的临界场明显的低于理论值，Pb为450高斯，Nb为1600高斯，^{[1][2]}其原因不完全清楚，估计仍与不完善的表面有关。据认为：材料的表面上可能存在一些局部的非超导的“核”，它们不断地对周围加热，最后导致超导状态的破坏（称‘热磁破坏’）。事实上局部结晶缺陷或成分不纯引起的当地临界场的降低、表面不平等几何因素引起当地磁场的局部升高以及表面残留的尘埃等异物引起的介质加热或欧姆加热等都可成为形成上述非超导‘核’的原因。

除了临界磁场之外，电场引起的电子负载包括电子共振负载（Multipactor）和场致发射也都会限制加速电场的水平。经验表明，在氦气中长时间的进行高频锻炼，有助于克服这类电子负载。

在已知的上百种具有超导性能的元素、合金或化合物材料中，以Pb、Nb和Nb₃Sn三种对在加速器方面的应用最具有实用价值。三种之中又以Nb₃Sn的T_c和H_{sh}最高，因而应用的潜力最大。可惜目前还没有找到一套成熟的工艺，能用以得到表面光洁而平滑的Nb₃Sn。这不能不暂时限制了它在高频技术方面的应用。反过来，Pb的T_c和H_{sh}都较低，然而它价格便宜，且易于镀于铜的表面形成导热良好的超导层，因此有不少实验室仍用Pb来制备高频加速腔。

三、加速腔的结构与性能

适于加速重离子的超导腔，大体有三种结构。美国的ATLAS和SUNYLAC等采用分离环（SLR）的结构，西德卡尔斯鲁厄与法国萨克菜核中心合作采用锥形螺旋线（Tapered Helix Resonator）的结构，还有以色列和美国合作搞的1/4波长共振线（QWR）结构（图3）。这些结构的特点与室温的直线后

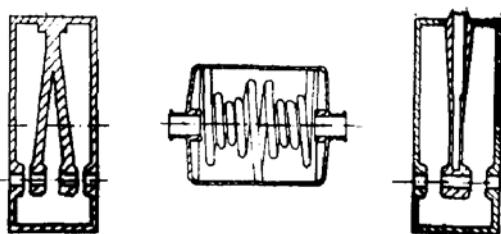


图3 三种超导加速腔结构

加速器有不少类似之处。然而，同样一个结构参量其含义对于超导和常温往往是不同的。下面就几个主要参量包括谐振频率、电长度、几何尺寸稳定性等问题进行讨论。

超导腔谐振频率的确定是多种相矛盾的因素综合平衡的结果。一方面速度低的重离子要求用频率低的RF场来加速以达到较高的能量增益并获得高亮度的优质束。然而另一方面，谐振频率低意味着腔的机械尺寸大，结果机械加工和表面处理的难度和成本都增高了，制冷的耗费亦增大了，更重要的是尺寸大的腔储能高，会给难度较大的频率、相位稳定控制问题增加困难（详见下一节）。作为一种折衷，谐振频率f₀通常取在90—150MHz之间。有些设计，如ATLAS，比较注重腔的能量增益和保持注入束的优良品质，就选取f₀ = 97MHz。另一些，如石溪的SUNYLAC和萨克菜的Helix结构，更强调解决相位控制方面的困难，他们分别将f₀定为150MHz和135MHz。

现有超导腔的电长度都只有1—1 $\frac{1}{2}$ 个驻波波长，都属于所谓‘短结构’。这种结构的优点一般说是在大的范围内改变加速离子的品种和能量而不影响有效的加速效率，以电长度为1.5βλ的SLR和THR结构为例，它们对于能量或质量数在5:1范围内变化的离子（例如A = 16—80）的加速效率都在70%以上，而对于电长度为1个βλ的QWR结构，允许改变的范围就更宽，达10:1。（参见图4。图上的加速效率用渡越时间因子T(β)来表示。

$$T(\beta) = \int E(Z) \cos\left(\frac{WZ}{\beta_c}\right) dZ / \left| \int E(Z) dZ \right|,$$

速度等于相速 β_0 的同步离子的效率为 $T(\beta_0)$ 。短结构在这方面的优点，无论对超导或常温的重离子加速器都具有相同的意义，然而对于工艺过程更为复杂，且成熟程度还不高的超导腔来说，采用短结构还有更多的好处。一是短腔易于制备和调运。即使局部有一点点小毛病也不会象长腔那样让许多仍然有用

利于腔的互换。在调试中一旦发现某个腔有毛病可以方便地换上备用腔。最后，在加速器运行中如遇有一个或几个腔发生故障时只需将它们暂时关掉就是了，整个加速器仍可继续运行。因为经验表明，全年的运行计划中只有很少的几次是需要在加速器的最高能量下运行的。

超导加速腔的几何参量需按稳定运行的要求最佳化。这里有三方面的要求。一是要求单位加速电场下表面电场和磁场的峰值趋于极小，前者是为了避免场致发射引起的电子负载；后者是为了使超导体的工作点远离临界场 H_{cr} ，防止热磁破坏，两者都是为了尽可能地提高加速场强，发挥超导腔的优越性；二是要求储能 U/E_a^2 趋于最小，以利于相位的稳定控制。ATLAS的腔由于谐振频率低，储能的问题更为突出，为此他们采取了限制腔径向尺寸的措施（如让漂浮管与腔壳同轴等），尽量降低储能。最后还要求腔的结构尺寸具有高度的稳定性。由于超导腔的Q值高达 $\sim 10^8$ ，频带极窄($\sim 1\text{Hz}$)，结构尺寸的稳定问题就特别突出。实际上在一些敏感的部位上，如分离环腔的漂浮管电极，仅十几 \AA 的位移就可使谐振频率移出一个带宽！为此，要特别注意让这些部件具有足够高的

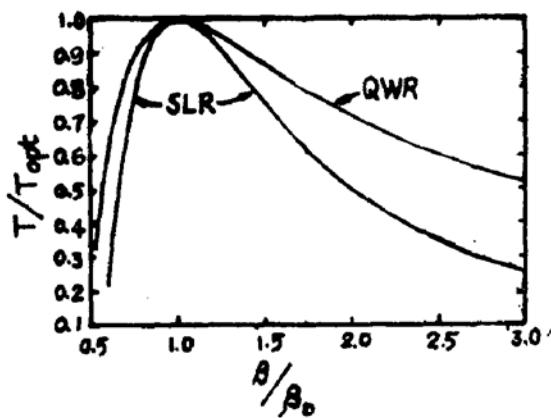


图4 短结构腔的渡越时间因子 (对同步粒子规范化后的值)

的加速单元跟着报废。其次，加速器上腔列的相速分布仅为二、三个预定的常数，不需连续变化。（例如SUNYLAC上有40个腔它们的相速只有二个；前面16个腔的 $\beta_0 = 0.055$ ，后面24个腔的 $\beta_0 = 0.10$ ）这种分布非常有

表3 超导腔的性能参数

| | 分离环 (SLR) | | 锥形螺旋线 THR | $\frac{\lambda}{4}$ 共振线 QWR |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
| | ATLAS | CUNYLAC | | |
| 材料 | Nb | Pb | Nb | Nb |
| 相速 β_0 | 0.105 | 0.1 | 0.06 | 0.085 |
| 频率 f_0 [MHz] | 97 | 150 | 135 | 159 |
| 加速电场 E_a [MV/m] | 3 | 3 | 2.25 | 3 |
| Q_0 | 2×10^8 | 6×10^7 | 5×10^8 | 1.5×10^8 |
| 能量增益[MeV] | 1.07 | 0.67 | 0.42 | 0.54 |
| E_p/E_a | 4.7 | 5.5 | 7 | 4.2 |
| B_p/E_a | 182 | 105 | 280 | 54 |
| U [J] ($E = 3\text{MV}/m$) | 1.32 | 0.36 | | 0.52 |
| v | | 45 | | 190 |

机械强度并处于电场辐射压力的平衡之中，使它们不致在高电场下变形或为实验室的机械噪音激发出过量的微振动。石溪的分离环腔以 $\phi 20\text{mm}$ 的镀有 $\sim 10\mu\text{m}$ 纯铅的钢管制成环臂以保证必要的机械强度。该腔固有振动的基频 $\nu = 45\text{Hz}$ 左右，高于一般实验室噪音基频。环端漂浮管电极中央电隙的间距约为二侧间距的二倍以求得电场的平衡。石溪的QWR腔以更粗的锥形管($\phi_{\max} = 40\text{ mm}$, $\phi_{\min} = 20\text{mm}$)作内电极，其固有基波频率 $\nu = 190\text{ Hz}$ 。鉴于实验室噪音的谱线密度与频率的高次幂成反比，且通常强迫振动的振幅 $\propto \frac{1}{\nu^2}$ ，显然QWR的动态稳定性要比SLR高得多。此外，QWR是轴对称结构，电磁压力是自然平衡的。现有超导腔的一些典型数据列在表3上。

超导腔的 Q_0 与表面电阻间存在着简单的关系： $Q_0 = G/R_s$ ，其中G是腔的几何因子，与导体的电阻及所加的电场等无关。对于SLR腔，典型 $G = 20\Omega$ 。由此 Q 值随着加速电场的变化，反映了超导的性能状态的变化。有关的实验曲线画在图5上。 Q 值在高场区的迅速下降反映了场致发射引起的电子负载的效应。

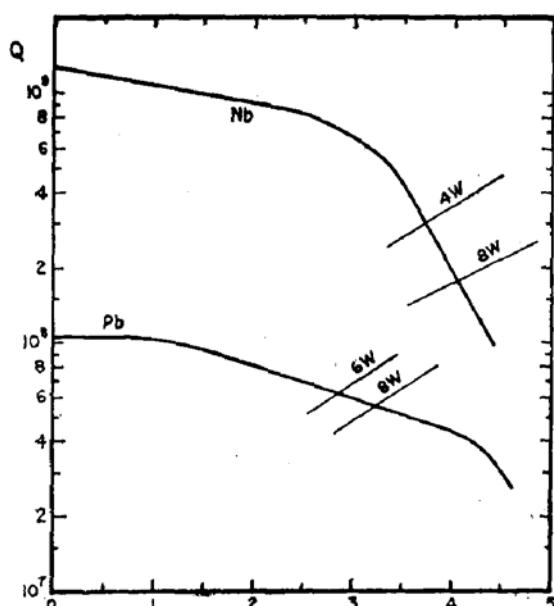


图5 Q 值随加速电场变化的情况

四、超导加速器运行中的几个技术问题

这里我们将介绍和讨论现有超导加速器所遇到的有关RF相位稳定控制、低温冷却以及束流动力学方面的问题。

1. 频率和相位的稳定控制 现有超导重离子直线加速器都由几十个相位可以独立调节短结构谐振腔所构成。由于腔的频带极窄，每个腔都用一个自激回路来激励。自激振荡的频率是不稳定的，随腔体结构的瞬时参量飘动；而它的振幅则是稳定的，不随频率而变。然而从重离子加速的要求来说，必需有一个统一的频率和确定的相位分布。这就提出了超导加速器频、相稳定控制的课题。事实上超导腔谐振频率的偏差有二种成分，一种是所谓‘静态的’。例如结构相同的腔，即使室温下有相同的频率但冷至 4.5°K 时，因材料或加工上的不均匀或其它差异，谐振频率的差别可达 10kHz 。这类偏差可依靠速度较慢的自动调谐器来调整。如ATLAS上的腔用步进电机控制的“活塞”作慢调谐器，SUNYLAC则用使腔壁微量变形的‘压力杠杆’。另一种偏离是因实验室机械噪音引起的快振动，这需要用锁相反馈的方法来调整，即利用腔和标准讯号间的相位误差信息同时控制回路的瞬时频率和振幅，迫使腔的频率锁在加速器的标准频率上而同时保持腔的振幅不变。为了锁频，SUNYLAC用一个与回路原有相位正交的功率放大器，亦称调谐放大器(Tunning Power Amplifier)调整自激回路的相位和频率。(图6)。计算表明调谐所需的功率 $P_{TUN} \cong U(\omega_a - \omega_s)^{[13]}$ ，其中U系储能， ω_a 加速器的频率， ω_s 腔的瞬时频率。石溪SLR腔的储能 $U = 0.36(J)$ ，频飘

$$\frac{\omega_a - \omega_s}{2\pi} \cong \pm 30\text{Hz}, P_{TUN} = 68\text{瓦}.$$

用这样的方法可使腔和标准讯号间的相差锁到 $\pm 0.1^\circ$ 之内。为了使锁相回路稳定工作，需增强自激

回路与腔间的耦合，以使有效带宽与频率误差的振幅相当，即 $Q_1 = Q_0 / [1 + \beta \approx \frac{\omega_a}{|\omega_a - \omega_s|}]$ 。

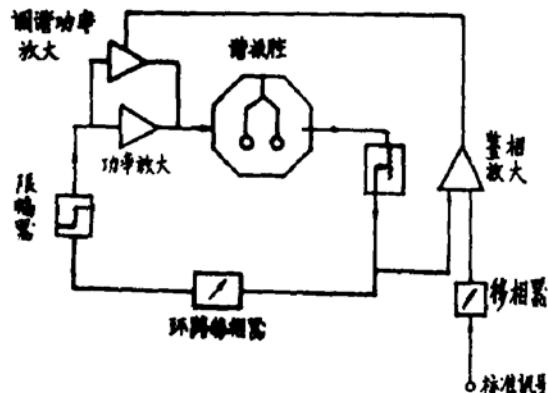


图6 锁相自激振荡回路

对于体积大、储能更高的ATLAS上的腔，因所需的 P_{TUN} 相当大，上述方法不一定方便，故改用与腔强耦合的“压控电抗”即“VCX”(Voltage Controlled Reactance)来调整回路的频率。‘VCX’由十多个受PIN二极管控制的固定电抗构成，通过改变开关管的数量就可改变与腔强耦合的电感量，这样的方式可以在KHz的范围内调整频率，使相位误差 $<0.1^\circ$ 。

2. 低温冷却 现有加速器上，超导腔以3—6个为一组，分别安装在十来个低温罐中冷至 4.5°K 。低温罐的内部结构相当复杂。大体可分为三层。中心部分是由液氦冷却的腔体，外边是一层充液氮的热屏蔽层。其外至容器壁间是由绝缘和辐射屏蔽材料构成的绝缘层。最外边的容器壁是真空密闭的。工作时罐内真空保持在 10^{-7} — 10^{-8} 托。腔和罐壁之间通过一些绝缘性能好的构件联结或支撑。冷却用的液氦、液氮以及各种信号控制电缆分别通过罐顶板上的接口输入至罐内各有关部分。

阿贡和石溪的腔在冷却方式上各有特点。石溪的腔是倒挂着的，输入的液氮经一个贮氮池，靠重力由腔顶灌入分离环管及漂浮管电极。由于腔的体积小，涂的铅层又很薄，热传导比较好，所以在液氮的自然蒸发下就

可使Pb表面冷至 1.5°K 。这样的冷却方式效率较高，且可避免因压力输氦引起的机械振动。不过阿贡的超导腔因体积大，还需采用压力输氦的方式来冷却。同样，流体阻抗较大的Helix也不得不采用强迫冷却的方式。

在 $3\sim 4.5\text{MV/m}$ 场强下工作的超导腔，典型功耗为4—8瓦。可见一个有40个腔的加速器，就需在 4.5°K 下冷却200—300瓦的功率，加上液氦输运线等上的热损耗等，冷却功率达400瓦左右。现有液氦机的电效率，高的达 10^{-2} ，低的仅 10^{-3} ，但价钱便宜。据此，加速器的总功耗，根据不同的液氦机的条件在40KW到400KW之间。除了液氦外，还有液氮的消耗，石溪每天消耗液氮约240升。

3. 束流动力学问题 超导直线加速器具有“高保真”地加速优质束流的能力。这首先是因为它能同时在高梯度和连续波(CW)的状态下运行，这可以减少许多畸变。同时作为直线加速器它的注入和引出过程是自然的，没有圆形加速器所遇到的那些困难。然而超导加速器的这一优势得以发挥的根本条件是：束流的相空间分布必需落在加速器的线性接收空间之内。对于纵向运动来说，这意味着注入束的相宽 $\Delta\phi < 6^\circ$ ，能散 $\Delta E/E \lesssim 10^{-3}$ ^[14]。为了达到这个条件，需要在束流的群聚和脉冲束的输运方面作许多努力。以SUNYLAC为例，在注入器(FN串级加速器)之前设置了高效率的双飘移谐波聚束器，它在FN加速器之后形成宽为 $\sim 1\text{ns}$ 的脉冲束，束流利用率达60—70%^[15]。高的束流效率有助于弥补FN上电子剥离器所造成的束流损失。在超导加速器之前，还设有一个超导的分离环腔作后聚束器，它能充分利用束流纵向相空间经FN加速之后，充分收缩的特点，进一步将ns级束流压缩至 100ps 左右^[16]。此外，还有一个后切割器它与FN加速器的分析磁铁组成一个纵向光阑，切除一切不需要的粒子本底。与群聚系统同样重要的是脉冲束的后输运系统。限于实验室的空间，石溪

不得不在后聚束之后再将束偏转 180° 以注入直线加速器。为了防止偏转中引起的时间弥散和束流损失，他们采用了由二个90度磁铁和一个三元四极透镜组成的消色散、等时性输运系统，‘高保真’地将束注入直线加速器。ATLAS加速器采用了类似的注入系统^[3]，但他们用了一个四个谐波的谐振腔作前聚束器^[10]，它的电压波形接近于理想的锯齿波形，束流效率可达70%。迄今ATLAS的前级超导加速器已运行了 10^4 小时，获得了横向相面积 $1\text{--}2\text{mm}^2\text{--mrad}$ 、纵向相面积 $20\text{--}80\text{KeV}\cdot\text{n}^{\frac{1}{2}}$ 的各种离子束 $50\text{--}100\text{nA}$ ，很好地满足了核物理研究的各项要求，他们还打算利用散束器，将脉宽扩展至 100ns 而使 $\frac{\Delta E}{E} \sim 10^{-4}$ ^[3]

五、结束语

归纳已有实践，超导重离子直线加速器所取得的主要成就有以下几个方面：

1. ATLAS前级超导加速器的上万小时的运行实践充分肯定了高频超导体的实用性。他们的经验证实：油污、暴露大气、辐照等等都不足以对超导体造成基本的损害，个别的缺陷完全可以通过淋洗—抛光或充氮下的锻炼等迅速恢复。

2. 在能量梯度方面已大大超过高压型加速器和连续运行(CW)的常温直线加速器。在结构投资和运行费用方面也都显示了它的明显优势。

3. 已运行的ATLAS和SUNYLAC二台超导加速器都未配备专职开机人员。一旦机器启动即交由核物理试验人员操作，运行中遇有需要变化束流参量(例如改变终能量)时，可由试验人员通过简便操作，在一分钟之内迅速实现，这充分说明超导加速器运行的稳定和可靠性。

4. 二台加速器加速出的重离子束的优良性能，证实了超导直线加速器所具有的‘高保真’地加速优质粒子束的能力。

然而在实践中也暴露了超导加速技术上的一些不足。例如由于低温罐的升温和冷却所需时间过长。因为检修一个安装在束流线上的超导腔往往要花上七至十天时间，这不能不影响加速器的开机率。看来今后必需备有随时可换到束流线上工作的备用加速段，以保证加速器在最高能量下的开机率。此外，还有一些更基本的问题，例如因工艺过程不成熟，同样的结构和处理方法往往可以得出相当不同的结果；而且实验上达到的表面电阻和临界磁场总比理论值差得多。这说明高频超导体的应用仍还处于初期阶段，许多基本问题尚待认识，更好的材料尚待开发，而一旦人们对高频超导体的规律有了进一步的掌握，超导直线加速器就将以更高的加速场强，更低的建造费用在高能领域作出新的贡献！图7上画着最佳化梯度下加速器设备投资、运行功耗随着参量 $f \cdot Q_0$ 的变化^[11]，其上 c_1 是单位长度的建造费用(包括土建等基本设施、加速结构、真空束流输送、诊断等)以[M \$ / m]为单位， η 是液氢机的机械效率。

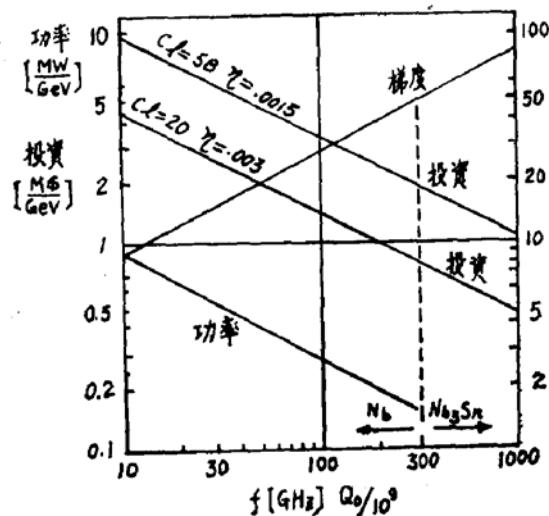


图7 超导直线加速器单位能量的投资、功率以及最佳能量梯度随 $f \cdot Q_0$ 变化情况

由图可见Nb腔预期的最高梯度达 50MV/m 而Nb₃Sn腔可达 80MV/m ！这无疑将是超导直线加速技术的下一个目标。

参考文献

- 1) Fairbank, W. M., et al, Proc. 8th Intern.

- Conf. Low Temperature Physics, London, 1962, p.324
- 2) Pierce, J. M. et al, Proc. 9th Conf. Low Temperature Physics, Oiho, 1964, p.396
- 3) Bollinger, L. M. IEEE Trans. Vol. NS-30, №4 (1983) 2065
- 4) Bollinger, L. M. IEEE Trans. Vol. NS-24, №3 (1977) 1076
- 5) Brennan, J. M., Chen,C. E. et al, Bulletin of American Physical Society Vol. 28,2 (1983) 91
- 6) Ben-Zvi, I IEEE Trans. Vol. NS-28, №3 (1981) 2488
- 7) Compte Rendu d'active 1981—1982, Division De La Physique CEN Saclay ISSN 0750—6678
- 8) Lapostalle, P., IEEE Trans. Vol. NS—30, 4 (1983)1957
- 9) Chapman, K.H.. N.I.M.184 (1981)239
- 10) "Applied Superconducting, Inc." 707 West Woodbury Road,Altadena, California, 91001
- 11) Tigner, M. et al, AIP Conf. Proceedings No.105 p.801
- 13) Paul, P. et al, Comments Nucl. Part. Phys. Vol. 11,5 (1983)217
- 14) Bollinger, L, M. et al, IEEE Trans.NS —22,3 (1975)1148
- 15) Brennan, J.M. Chen, C.E. et al, IEEE Trans. NS—30,4 (1983)2798
- 16) Lynch, F.J. et al, N.I.M. 159 (1979) 245