

电子冷却技术的现状

许永兴

在1983年的美国粒子加速器的圣菲会议上,美国的印第安那大学回旋加速器实验室提出了在原来的分离扇加速器后接一个电子冷却储存环以提高束流的能量及质量的计划。这个把高能物理中电子冷却技术应用到中能加速器里来的大胆而新颖的方案引起了与会者的极大兴趣。加速器专家们认为这是继超导技术之后加速器技术领域中的又一重大进展。它将为做更高水平的核物理实验开辟广阔前景。

一、前言

根据相对论原理,在 高能物理实验中当束流轰击静止靶核时其有效作用能为

$$E_{\text{有效}} = 2E_0 \left[\left(\frac{E_K + 2E_0}{2E_0} \right)^{1/2} - 1 \right],$$

其中 E_0 为粒子的静止能量, E_K 为粒子的动能, 如果 $E_K \gg E_0$, 则

$$E_{\text{有效}} \approx (2E_0 E_K)^{1/2},$$

显然 $E_{\text{有效}}$ 比 E_K 要小得多。

为了提高被加速核与靶核之间有效作用能, 应使轰击核与靶核相对于实验室坐标作方向相反的运动。因而储存相反电荷的粒子, 最后使它们作相对碰撞以达到核反应目的的各种储存环成为粒子物理实验中有力的工具。众所周知, 核反应的计数率是等于束流的亮度与反应截面的乘积。在储存环中为了提高事件发生的几率对一定反应截面而言就意味着必须提高束流的亮度。亮度的定义为六维相空间 $(x, P_x, y, P_y, \Delta\varphi, \delta)$ 中粒子电荷密度。对一定的粒子流强来说要提高亮度就必须减小六维相空间的体积。所谓“冷却”即是指束流所占据的相空间体积的缩

小。但由刘维尔 (Liouville) 定理可知, 只要系统是哈密顿 (Hamiltonian) 的, 则粒子所占据的相空间在运动过程中是不变的。例如在任何电磁场中运动, 粒子所受的力都将使相体积保持不变。所以要使束流的相空间体积缩小, 系统中必须有非哈密顿项的力, 象摩擦力、扩散、辐射等。如何产生这些非哈密顿项力是束流冷却问题的主要课题, 当然从理论上讲使束流的六维相空间体积缩小总是可能的。

二、减小Betatron振荡的几种途径及其比较

1948年Schwarz在电子和正电子环中首先发现同步辐射现象。如果环的几何结构选取合适, 同步辐射将增加束流的相空间密度。电磁辐射对系统提供了额外的自由度, 因而束流亮度增加了。在大的环中, 粒子每旋转一圈可损失好几个 MeV 的能量, 同时Betatron 振荡也很快衰减, 从而使相体积缩小。但对这种现象, 应注意采取相应措施带走由辐射而产生的真空室上热量的堆聚。

随机冷却是在1972年由Van de Meer建议的, 其原理图如图1所示。该装置是由检测电极、快速校正器、放大器和滤波链组成。它采用电子学的反馈线路对束流每圈旋转中粒子对平衡轨道的平均平方的偏离进行校正。而Betatron振荡的减小是正比于系统的带宽 W , 和反比于粒子数 N , 所以 N/W 是对粒子冷却进行测度的一个重要参数。由于这种冷却方式是先检测然后再校正束流的随机波动所以称之为随机冷却。

电子冷却是在1966年由Budker提出的。

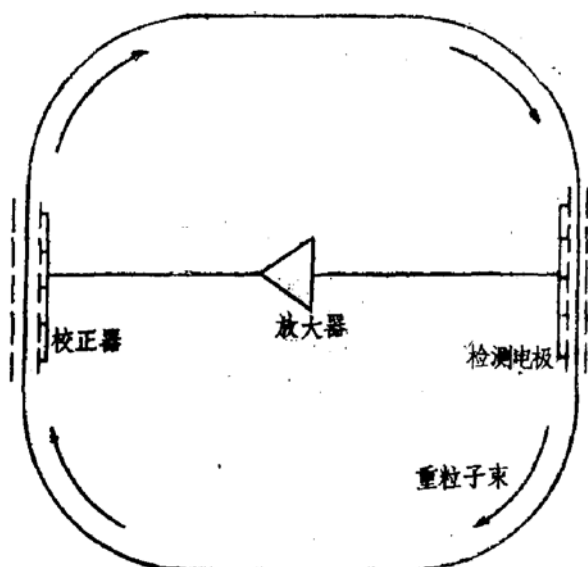


图1. 随机冷却示意图

当电子束以相同速度平行于重离子束运动时，将通过库仑相互作用来减小离子束的Betatron振荡。这是因为轻的电子通过与离子的库仑散射带走了极大部分离子能量。所以用等离子体物理的语言来描述的话，电子束具有较低的纵向及横向温度，当电子束和离子束达到热平衡时，则离子束被“冷却”下来了。

纵观以上三种冷却方式，它们各有特点。同步辐射只对电子及正电子这类轻粒子有效，而对重的离子冷却效果不佳。而对随机冷却，冷却时间需要较长但随着离子束能量的增加冷却时间并不显著增加，因而适合高能储存环中带电离子的冷却。电子冷却技术对几百MeV以下的中低能离子冷却速率很快，但随着离子束能量增大，其冷却时间显著增长。美国印第安那大学的分离扇回旋加速器所加速的质子能量是200MeV，正好在这个范围内，这就说明了该回旋加速器实验室采用电子冷却技术的原因。

三、电子冷却的典型装置及参数间关系

当电子束注入到重离子储存环的直线段部分，假若电子速度的大小与方向和重离子是一样的，那末在静止的框型系统中二股

束流交混行进从而构成二元等离子体。如果电子温度足够低，则可以使重离子温度逐渐下降，从而达到冷却目的。

电子冷却典型装置如图2所示，它用于苏联VEPP-3储存环中。该系统基本参数如下：被冷却的质子能量为200MeV，电子束的能量是100KeV、流强为1A。电子束的能量为 1×10^{-3} ，其束流半径为1cm。电子束散角是 3×10^{-3} 。二股束流相互作用区的长度是1.5m。离子束的特征衰减时间为10秒。

该装置电子源是采用Pierce电子枪，为的是获得尽可能小的散角的强电子流。由

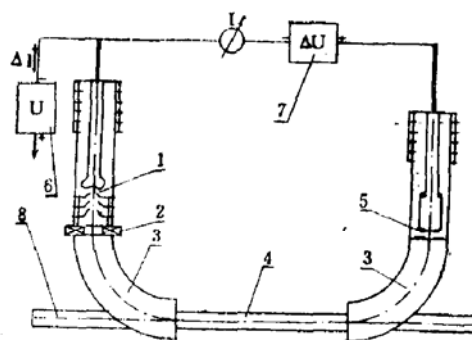


图2. 电子冷却系统原理图

- 1—电子枪
- 2—磁透镜
- 3—弯曲磁铁
- 4—束流相互作用区
- 5—收集器
- 6—加速电压电源
- 7—补偿电源
- 8—VEPP-3 环形跑道

(纵向磁场绕组没有标出)

于引出阳极是散焦透镜，用紧跟着的磁透镜来聚焦以产生性能良好的平行束。在二股束流的相互作用区中，由于纵向磁场的约束电子作螺旋运动。约束磁场的磁感应强度约为400G。若磁场不均匀度差于 5×10^{-3} 将导致电子束的扰动，从而产生不稳定因素。

当电子束流强为1A，能量为40KV时，经过相互作用区后其流强损失为2mA，阴极与收集极之间压降为1KV。这样流强及电压的损失率各为

$$\Delta I/I = 2 \times 10^{-3}, \Delta U/U = 2.5 \times 10^{-2}.$$

为了节省总的电源功率，采用回收装置，由收集极采集电子后，经过补偿电源 ΔU 重新获得能量增益。这样系统即可连续地正常工作。

作。

电子冷却技术的实现依赖于一些有关参数的配合和适当地选取。首先要求电子束与离子束运动方向一致，并且速度相同。使平均速度的相对偏离满足下式

$$\frac{\overline{v_e - v_i}}{\overline{v_i}} < 1 \times 10^{-3}.$$

其中 $\overline{v_e}$ 是电子平均速度， $\overline{v_i}$ 是离子平均速度。若该值大于 2×10^{-3} 则冷却效应消失。可见对二股束流的速度偏差要求是极为严格的。另外，电子束应是稳定且单能，其能散 $\Delta E/E$ 应小于 10^{-3} 。

若电子束温度是足够低，经多次散射后，在冷却过程中离子的角散被降低。存在以下一般关系式：

$$\theta_p \sim \sqrt{\frac{m}{M}} \theta_e.$$

其中 θ_p 是质子的温度角散， θ_e 是电子的温度角散， m 是电子质量， M 是离子质量。从这公式不难发现，为了使离子束的横向相空间体积缩小，要求注入电子束的温度角散足够低。一般限制在 3×10^{-3} 以下。

离子束冷却后的能散关系为

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \sqrt{\frac{m}{M}} \beta^2 \gamma \theta_e.$$

其中 $\beta = v_i/c$ ， $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ 。从该公式中可看出离子束的纵向相空间面积的缩小，也依赖于电子的温度角散。因对电子冷却装置而言，获得小角散的电子束是设计中一个至关重要的问题。

电子和被冷却的离子达到热平衡所需要的时间是由衰减时间来表征的：

$$\tau = \frac{3}{2\sqrt{2\pi}} \left(\frac{mc^2}{e^2} \right) \cdot \left(\frac{Mc^2}{e_i^2} \right) \frac{\gamma^2}{nc\eta L}.$$

$$\times \left(\frac{T_e'}{mc^2} \right)^{3/2} \begin{matrix} \theta_p \ll \theta_e \\ \theta_p \gg \theta_e \end{matrix}.$$

其中 n 是电子密度， e_i 及 e 分别为离子及电子的电荷， T_e' 为电子温度， η 为电子束作用的轨道长度与整个跑道周长之比， $L \sim 20$ 是库仑对数。对一确定能量的离子束，要降低衰减时间则必须提高电子密度和增加电子与离子相互作用区域的长度。

四、电子冷却技术的发展现状

由于核物理及粒子物理实验迅速发展，物理学家对束流及有关装置提出越来越高的要求。例如①要求被加速束流具有特别高的亮度，②要求轰击束流具有特别高的单色性以观察窄的共振，③对特别薄的内靶的谱仪实验感兴趣。这些类型的实验都对束流质量提出了新的挑战。近年来物理学家认为，电子冷却技术是获得高质量束流的重要途径之一。

苏联核物理研究所在1976年就对电子冷却技术及其在NAP-M上的实验结果有所报导。实验中证实了离子的Betatron振荡的振幅冷却率为 0.2Sec^{-1} ，热平衡后横向振幅为 0.8mm ，环中质子寿命由原来的900秒提高到5000秒。

CERN1980年在ICE装置上也做了类似的工作。它把研究重点放在大的能散及大的发射度离子束流的冷却效果的观察上。实验结果是成功的。离子束经冷却后其动量分散由 2.5×10^{-3} 降低到 4×10^{-6} ，冷却因子约为60。束流的Betatron振荡的振幅冷却后，其平衡直径为 0.5mm 。同时环中束流寿命由3分钟增加到14分钟。最终结果使束流六维相空间密度增加 10^6 倍。

1981年美国费米实验室也对高能质子束（能量为 200MeV ）的电子冷却技术进行了

表一

三个电子冷却装置主要参数一览表

	L	E_p	E_e	I_e	B	L_{in}	D_b
	(m)	(MeV)	(MeV)	(A)	(KG)	(m)	(cm)
NAP-M (USSR, 1976)	47	35~80	19~43.6	0.1~0.25	1	1	1
ICE (CERN, 1980)	74	46	—	1.3	0.5	3	5
FERMILAB (USA, 1981)	135	200	110	10	2	—	—

L—跑道形的环总长度,

E_p —质子能量,

E_e —电子能量,

I_e —电子流强,

B—纵向约束磁场的磁感应强度,

L_{in} —电子束与质子相互作用区的长度,

D_b —电子束流的直径。

探索。实验结果表明由于质子能量高, Beta-tron 振荡衰减的冷却时间为10至12秒。经冷却后动量分散减小了50倍。同时环中离子束流的寿命达到了1000秒。它的这些令人振奋的实验结果和成功的经验为印第安那大学电子冷却储存环的建造提供了可信的依据。

这三个装置的主要参数列于表一。

电子冷却技术从最初的发现到目前的应用只经历了不长的十几年, 但在这短短的时期内它却显示了巨大的潜力及诱人的前景。我们相信随着这项专门技术的不断完善, 它将在粒子加速器及其它领域得到越来越广泛

的应用。

参考文献

1. A. I. Arenshtan et al, Soviet Conf. on Charged-Particle Accelerators, P.439 (1968)
2. G. I. Budker et al, IEEE NS-22, №5 P.2093 (1975)
3. G. I. Budker et al, Particle Accelerator Vol.7, №4, P.197 (1976)
4. F. T. Cole & F. E. Mills, Annu. Rev. Nucl. Sci., Vol.31, P.295 (1981)
5. R. E. Pollock, IEEE NS-30, №4, P. 2056 (1983)

(上接21页)

得出结论: ^{14}C 碎片是 ^{223}Ra 核的衰变产物, 因为像 ^{227}Th 和 ^{210}Ra 可能发射的 ^{14}C 离子在实验室系能量分别为27.6和26.2MeV, 这些值超出了我们的测量值 $29.4 \pm 1.2\text{MeV}$ 误差之外。

由测定的 ^{223}Ra 活性, 立体角和29.6MeV碳离子6+电荷态的百分比, 我们导出 ^{223}Ra 发射 ^{14}C 相对于发射 α 粒子的分支比是 $(5.5 \pm 2.0) \times 10^{-10}$ 。这个结果与H. Rose和G. Jones两人从实验推出的分支比 $(8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$

是符合的。

根据实验结果, 我们的结论是: ^{223}Ra 发射 ^{14}C 这种奇异核衰变已经是确定无疑的了。超导磁谱仪SOLENO与强放射源相配合对于进一步研究类似的稀有衰变方式是一种理想实验手段。我们认为, 使用更强的源即使发射重碎片的分支比比本实验值低1—2个数量级也是能观测到的。

(刘国兴译自Phys. Rev. Letters, 53(1984)759吴国华校)