

# 电子冷却

饶亦农 夏佳文 原有进 魏宝文  
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 本文概述电子冷却原理及其国际现状.  
**关键词** 束流温度, 电子冷却, 冷却时间.

## 1 束流温度与电子冷却

具有高的能量分辨、位置分辨和角分辨的带电束流对高水平的核物理实验是很重要的. 从束流本身的性质来说, 这就要求束流温度很低, 因为束流温度直接影响束流横向发射度的大小和纵向动量散度的高低. 束流温度( $T$ )与水平发射度( $\epsilon_h$ )、垂直发射度( $\epsilon_v$ )和纵向动量散度( $\sigma_p/P_0$ )之间的关系为

$$\frac{3}{2}k_B T = \frac{1}{2}m_0c^2\beta_0^2\gamma_0^2\left[\frac{\epsilon_h}{\beta_h} + \frac{\epsilon_v}{\beta_v} + \frac{1}{\gamma_0^2}\left(\frac{\sigma_p}{P_0}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $\beta_h$ 、 $\beta_v$  分别为水平、垂直方向包络函数,  $\beta_0$ 、 $\gamma_0$  为相对论因子. 如果降低束流温度, 那么束流发射度和动量分散都将减小, 束流相空间密度随之增大, 这就是束流冷却的目的.

电子冷却是 G. Budker<sup>[1]</sup>提出的一种束流冷却方法, 它的过程是: 将单色性足够高和准直性非常好的均匀电子束入射到离子储存环的一个直线节(称为冷却段)中, 电子的平均速度在数值和方向上等于离子的平均速度, 这两股束流重叠在一起同向运动. 电子与离子之间通过库仑相互作用, 产生能量转移, 结果轻的电子将带走重的离子的横向振荡与纵向振荡能量, 从而收缩储存束的横向包络、发散角和动量分散, 如图 1 所示, 但并不明显地损失离子. 这样, 束流相空间密度也就增加了. 在这个过程中, 电子束的作用相当于一个“冷却器”(Cooler), 它吸收了“热离子气”的振

荡能量. 从热力学的观点来看, 电子束的横向及纵向温度比离子束的要低, 当两种束流达到热平衡时, 高温的离子就被低温的电子所冷却.

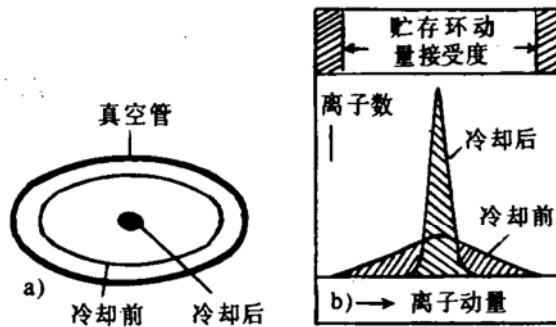


图 1 电子冷却效应. a 束流包络变小, b 动量分散变窄

图 2a 显示了冷却段内离子以不同角度和速度穿越平行运动电子束的图像. 如果站在电子质心系中观察, 那么电子全部静止, 离子则以各种速度从不同方向穿越“电子气”, 就象气体分子的热运动一样, 如图 2b 所示. 由于受到库仑散射作用, 比电子跑得慢的离子, 被向前弹踢, 最终具有与电子相等的速度, 反之, 跑得快的离子踢电子损失其能量. 电子不断地被更新, 结果离子在三个方向上的速度分散变小了, 束流温度也就降低了.

还可以借助另外一个物理过程来类比电子冷却效应. 将电子束视为以速度  $v_{e0}$  向前运动的一个薄片, 比薄片跑得快的离子将穿透它, 并且每次穿越时沿动量方向将有能量损失, 直到离子的所有横向速度分量被削弱且

纵向速度等于薄片速度(见图 2c). 运动较慢的离子, 从相反的方向穿越薄片, 会产生相同的效应. 理想情况下, 离子最终具有与薄片相同的纵向速度, 横向速度分量全部等于零.

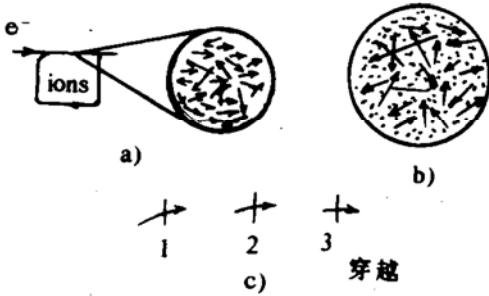


图 2 电子冷却图像

## 2 电子冷却理论——两体碰撞模型

电子冷却的微观机制是离子与电子之间的弹性碰撞, 根据带电粒子之间的两体碰撞理论, 并考虑电子的速度分布, 可以得到冷却力的一般表达形式.

### 2.1 冷却力

在电子静止参照系下, 冷却力可表示为

$$\vec{F}^*(\vec{v}_i^*) = -F_0 c^2 L_c \int f(\vec{v}_e^*) \frac{\vec{v}_i^* - \vec{v}_e^*}{|\vec{v}_i^* - \vec{v}_e^*|^3} d^3 \vec{v}_e^* \quad (2)$$

式中,  $F_0 = 4\pi Z^2 n_e r_e^2 m_e c^2$ ,  $L_c$  称为库仑对数, 取值在 10~15 间.

可见,  $\vec{F}^*(\vec{v}_i^*)$  相当于电荷分布  $4\pi\epsilon_0 F_0 c^2 L_c f(\vec{v}_e^*) d^3 \vec{v}_e^*$  在速度空间中  $\vec{v}_i^*$  这一点产生的电场, 场的大小取决于电荷分布, 即:  $\vec{F}^*(\vec{v}_i^*)$  取决于电子速度分布  $f(\vec{v}_e^*)$ .

电子在枪内受到加速, 形成纵向相空间的收缩, 因此, 电子速度分布呈“扁平”状. 当  $\Delta_{e\parallel} < v_{i\perp} < \Delta_{e\perp}$  时, 横向冷却力可表示为

$$\vec{F}_{\perp}^* = -\frac{\sqrt{2\pi}}{4} F_0 c^2 L_c \frac{\vec{v}_{i\perp}^*}{\Delta_{e\perp}^3} \quad (3)$$

### 2.2 冷却时间

束流冷却时间定义为冷却率的倒数, 即

$$\tau^* = (\lambda_i^*)^{-1} = \left(-\frac{1}{2m_i} \frac{\partial F_i^*}{\partial v_i^*}\right)^{-1} \quad (4)$$

将冷却力表达式(3)代入其中, 再作 Lorentz 变换, 并考虑到冷却段的实际有效长度, 最终得出实验室坐标系下的束流冷却时间表达式

$$\tau = \frac{2}{\pi \sqrt{2\pi}} \frac{e\gamma_0^2 \beta_0}{\eta r_e r_i L_c J_e} \left(\frac{kT_e}{m_e c^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为冷却段长度与环周长之比,  $J_e = en_e \beta_0 c$  为电子电流密度.

下面进行讨论.

(1) (5)式表明: 对于小振幅的  $\beta$  振荡, 束流冷却时间与离子速度无关, 而且是一个常数, 这时束流发射度与动量散度以  $e^{-t/\tau}$  的规律下降; 但在  $v_i^* \gg \Delta_{e\perp}$  时, 冷却时间与  $v_i^{*3}$  成正比, 冷却将变慢.

(2)  $\tau \propto \frac{1}{r_i} = \frac{A}{Z^2} r_p$  ( $r_p$  为质子的经典半径), 对质子:  $\frac{A}{Z^2} = 1$ , 对高电荷态的重离子:  $\frac{A}{Z^2} < 1$  或  $\ll 1$ , 这表明电子冷却更适合于重离子的冷却.

(3)  $\tau \propto \beta_0 \gamma_0^2$ , 这意味着离子能量越高, 冷却时间越长.

(4)  $\tau$  与离子密度无关, 与电子密度  $n_e$  成反比, 电子密度越高, 冷却力越强, 冷却时间也就越短.

(5) 若电子温度  $kT_e = 0.3\text{eV}$ ,  $J_e = 0.20\text{A/cm}^2$ ,  $\eta = 0.027$ , 对  $300\text{MeV/u}$  的  $\text{Ar}^{18+}$ ,  $\frac{A}{Z^2} = 0.12$ ,  $\gamma_0 = 1.32$ ,  $\beta_0 = 0.65$ , 将这些参数及  $L_c = 10$ ,  $r_e = 2.818 \times 10^{-15}\text{m}$ ,  $r_p = 1.535 \times 10^{-18}\text{m}$  代入(5)式中计算, 结果冷却时间约为 1s.

### 2.3 平衡

在束流冷却过程中, 当电子温度与离子温度达到热平衡时, 冷却将停止. 如果束流横向与纵向相空间不存在耦合, 那么根据热平衡条件

$$T_{e\perp} = T_{i\perp} \quad T_{e\parallel} = T_{i\parallel} \quad (6)$$

和束流温度定义, 可以推出

$$\theta_{i\perp} = \sqrt{\frac{m_e}{m_i}} \theta_{e\perp} < \frac{1}{42\sqrt{A}} \theta_{e\perp}$$

$$\frac{1}{\gamma_0} \frac{\delta p}{p} = \sqrt{\frac{m_e}{m_i}} \theta_{e\parallel} < \frac{1}{42\sqrt{A}} \theta_{e\parallel} \quad (7)$$

取一组典型参数进行估算:  $kT_{e\perp} = 0.2eV$ ,  $E_e = 137keV$  (冷却  $250MeV/u$  的 Ar 束),  $\gamma_0 = 1.268$ ,  $\beta_0 = 0.615$ , 对应  $\theta_{e\perp} = 1.1 \times 10^{-3} rad$ ,  $\theta_{e\parallel} = 6.6 \times 10^{-7} rad$ , 代入(7)式, 结果  $\theta_{e\perp} < 4 \times 10^{-6} rad$ ;  $\delta p/p < 3 \times 10^{-9}$ , 如果环的磁聚焦函数  $\beta = 25m$ , 那么横向的束流包络为  $a_{\perp} = 2\beta\theta_{e\perp} = 0.2mm$ .

这只有在不考虑束流加热效应的理想条件下才可能得到. 理论计算表明<sup>[3]</sup>, 被冷却的束流分辨率最终是由冷却效应与束内散射之间的平衡决定的. 对能量介于  $100 \sim 300MeV/u$ 、累积粒子数达到  $10^{10}$  的高电荷态重离子, 其束内散射与电子冷却形成的平衡发射度及动量散度分别为  $\epsilon < 10\pi mm \cdot mrad$  和  $\delta p/p < 4 \times 10^{-4}$ .

至此, 对电子冷却的两体碰撞模型作了简单描述. 在上述讨论中, 没有考虑纵向磁场, 但在实际的螺线管磁场内, 电子的横向运动将变成围绕磁力线的回旋运动. 在电子与离子碰撞期间, 若电子回旋了多圈, 那么两者之间的横向能量转移忽略不计, 因而, 离子所感到的电子温度就是极低的纵向温度. 详细的理论分析表明<sup>[4]</sup>, 纵向磁场效应与“扁平”速度分布相结合, 导致冷却力增加, 冷却时间缩短.

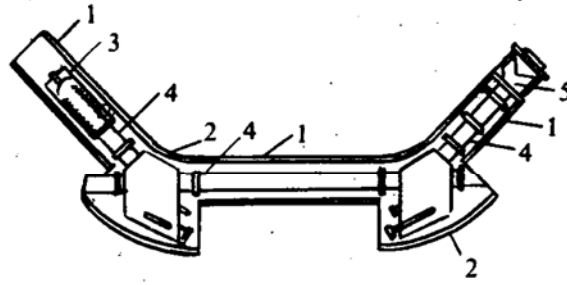
电子冷却实际上是电子与离子之间的弹性碰撞过程, 除了弹性碰撞通道之外, 还存在电子离子复合、激发与电离等事件<sup>[5]</sup>, 这里不再赘述.

### 3 电子冷却实验

#### 3.1 装置构造

具有开创性的第一台电子冷却设备是由 G. Budker 研究小组设计制造的. 它采用螺线管磁场将电子从枪阴极引导到收集器. 这种装置已经成为一种经典设计并应用到迄今为至所有的电子冷却装置上.

冷却装置的主要部件一般包括电子枪、加速管、两个弯曲螺线管(toroid)、减速管和电子收集装置(collector), 所有这些设备都放置在螺线管(solenoid)轴线上, 如图3所示.



1. 螺线管 2. 弯曲螺线管 3. 加速管  
4. 漂移管 5. 收集器

图3 电子冷却装置

螺线管磁场的作用是将电子从电子枪引导到收集器, 并将电子的横向运动转变成围绕磁力线的回旋运动, 以抑制电子之间的相互排斥造成的束流膨胀.

为了使电子束的横向温度最低, 电子枪的设计一般都采用 Pierce 光学<sup>[6]</sup>与共振聚焦技术.

弯曲螺线管磁场将电子导入和引出冷却段. 为了抵偿电子所受的惯性离心力, 必须在弯曲螺线管上安装一个导向线圈, 产生沿水平方向的二极场以迫使电子弯转.

为了恢复电子的绝大部分能量, 必须采用高效率的收集器. 收集器处在下降的螺线管磁场中, 电子束受该散焦透镜作用沿磁力线方向散开, 以避免收集器表面局部热负载过高.

#### 3.2 实验结果

表1 TARN-II 冷却  $85MeV N^{5+}$  束的实验结果

实验名称	实验结果
$\delta p/p$	$2 \times 10^{-3} \rightarrow 1 \times 10^{-5}$
发射度	$90\pi mm \cdot mrad \rightarrow 0.025\pi mm \cdot mrad$
流强	$10^8 ppp$
冷却时间	几秒

80年代初, 电子冷却技术在质子与反质

子储存环上的应用取得了令人鼓舞的结果,人们自然想到将这种技术用于其它稀薄离子的储存,比如重离子、次级束流与极化离子等.近十年内,全世界共有九台轻、重离子电子冷却储存环已经建成投入运行.到 1992 年,TARN-II<sup>[7]</sup>对轻重离子(N<sup>5+</sup>)和 ESR<sup>[9]</sup>对重离子(Z ≥ 10)进行冷却的实验结果表明,当储存的离子数达到 10<sup>7</sup>时,冷却后束流发射

度小于 1πmm. mrad,动量散度达到 10<sup>-5</sup>量级,见表 1 和表 2.这表明电子冷却技术对于重离子束的相空间压缩同样是非常有效的.

电子冷却具有重要意义.首先,它提供的冷离子束比起平常的束流具有许多实验上的优点;其次,电子冷却可以抵偿束流加热效应;第三,作为自由电子靶可应用于原子物理研究.

表 2 ESR 冷却重离子的实验结果

离 子	能 量 (MeV/u)	储存粒子数	平衡值	
			$\delta p/p$	$\epsilon(\pi\text{mm. mrad})$
Ne <sup>10+</sup>	150	5.0 × 10 <sup>8</sup>	2.5 × 10 <sup>-5</sup>	
Ar <sup>18+</sup>	250	1.0 × 10 <sup>8</sup>	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	
Xe <sup>54+</sup>	250	1.0 × 10 <sup>8</sup>	1.0 × 10 <sup>-4</sup>	<0.5

参 考 文 献

<p>1 Budker G I. <i>Atomn. ya Energiya</i>, 1967, 22 : 346</p> <p>2 Derbenev Y S, Skrinsky A N. <i>Part. Acc.</i>, 1977, 8 : 1</p> <p>3 Herr H. <i>AIP Conf. Proc.</i>, 1985, 128</p>	<p>4 Debernev Y S, Skrinsky A N. <i>Part. Acc.</i> 1978, 8 : 235</p> <p>5 Beyer H F, et al. GSI-ESR-88-01</p> <p>6 Pierce J R. <i>Theory and Design of Electron Beams</i>, 1954</p> <p>7 Tanabe T, et al. <i>Proc. 5th Japan-China Joint Symposium</i>, 18~20 Oct., 1993</p> <p>8 Franzke B, et al. HEACC92, 60</p>
---	---

## Electron Cooling

Rao Yinong Xia Jiawen Yuan Youjin Wei Baowen

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** This paper briefly describes the principle of electron cooling and the current status.

**Key Words** beam temperature, electron cooling, cooling time.

(上接 33 页)

The calculated results are compared with the experimental values, and a good agreement has been obtained. The theory values are given for absent experimental data.

**Key Words** inelastic scattering, direct reaction model, integrated section, angular distribution.