

# 德默尔特和他的 离子陷阱

程丙英



汉斯·德默尔特是美国西雅图市华盛顿大学物理系教授。由于他发明了用电磁陷阱捕捉质子、电子和离子的技术，并将这种技术应用于原子基本常数和光谱学的测量，瑞典皇家科学院授予他1989年诺贝尔物理学奖。同他一起获得1989年诺贝尔物理学奖的还有西德波恩大学教授沃尔夫冈·保罗，他主要的成就在于五十年代发明了使用六极磁场将原子束聚于一束射线的方法。另一位获奖的物理学家是美国哈佛大学的诺曼·拉姆齐教授，他的功绩在于发明了一种精确观察原子辐射和测量原子辐射的方法，这种方法构成了目前世界上使用的时间标准的基础。授奖委员会主席英瓦尔·林格伦说：“他们三人创造了准确的测量方法，由于有了这些方法才有可能进行某些实验，从而迫使人们考虑一些基本的物理定律，特别是关于时间和空间的定律”。他们的获奖充分证明了实验物理技术在科学研究中的重要地位。

德默尔特1922年生于德国的格里茨，1950年在哥廷根大学获得博士学位。1952年移居美国，先在北卡罗来纳州杜克大学做了三年博士后研究，于1955年迁至他一直工作至今的华盛顿大学。1956年任助教，1961年升为教授。曾获得美国物理学会戴维森-吉纳尔奖。他研究涉及到的领域有：核四极共振，核与电子的参量振荡，自由原子极化的光学探测，自旋交换共振，存储离子光谱，激光冷却等。

早在50年代德默尔特就提出了利用“电磁瓶”囚禁单个原子或离子的设想。如果能将被囚禁的原子或离子静止不动，那么光谱学家就可以在这些原子或离子上进行精确的无外干扰的测量。当时许多物理学家认为他是在做白日梦。后来的事实证明，他不但是一位天才的预言家，而且是将单个质子、电子和正电子囚禁在小体积内并进行长时间高精度测量的先驱。

## 潘宁陷阱和射频四极陷阱

德默尔特利用和发展了两种类型的陷阱：潘宁陷

阱和射频四极陷阱。两种陷阱主要区别在于潘宁陷阱利用磁场约束粒子在陷阱中的运动，而射频四极陷阱则用射频场约束粒子的运动。潘宁陷阱的基本装置如图1所示。一个环状电极和二个帽状电极所围成的区域就是陷阱区。 $r_0 = \sqrt{2}z_0$ 。电极内表面制成双曲线型。两帽状电极位于环电极两端对称的位置上。当环电极相对于两帽电极有一直流电压 $V_0$ 时，会激发出一个阱深约为 $\frac{1}{2}V_0$ 的势阱。即当一个电子的能量小于 $\frac{1}{2}eV_0$ 时就会在轴方向（ $z$ 轴）受到囚禁。在 $x-y$ 平面内的约束力是通过沿 $z$ 轴施加一均匀的静磁场实现的。带电粒子在这一磁场中由于电磁相互作用会导致在 $x-y$ 平面内的迴旋运动。带电粒子的运动由三分量合成。第一种运动是平行于 $z$ 轴频率为 $\omega_z$ 的简谐振动，与施加的磁场无关。第二种运动是前面提及的迴旋运动，圆频率 $\omega_c = zeH_0/mc$ 。 $ze$ 为带电粒子的电荷， $H_0$ 为施加磁场的强度， $m$ 为带电粒子的质量， $c$ 为光速。第三种运动是对迴旋运动的一种扰动。这一运动使得迴旋运动轨道的中心轴偏离 $z$ 轴一很小的方向。其运动频率与轴向频率 $\omega_z$ 及回旋频率 $\omega_c$ 有关，起因于电场与磁场的相互作用。囚禁的粒子类型不同，所施加的电场与磁场也随之不同。如果要囚禁离子，需要在帽电极中央打一非常小的通孔。在陷阱的外部装上涂有电子发射材料的钨丝，电子从加热的钨丝发射出，经由小孔进入离子陷阱，将高真空陷阱中剩余



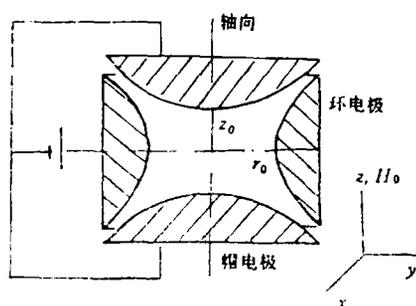


图1 潘宁阱示意图

的气体离子化。通过离子与剩余原子或离子的碰撞，使得离子从纵向运动变为横向运动，再通过与外电路的耦合，离子就可以存储在阱中。

在光谱学的研究中，有时需要将磁场减到最小，以避免不必要的塞曼效应等磁场对粒子能级的附加效应。而射频四极阱就可以满足这一要求。它只需在如图1的环电极与帽电极间加一频率为 $\Omega$ 的射频电压，就可以将带电粒子加以约束。当直流电压加在环电极与帽电极之间时，在陷阱内产生的势垒如马鞍型，陷阱内的带电粒子沿势垒的凹陷方向，即轴向或径向逃出势阱。如果用一定频率(射频)的交流电压代替直流电压，产生的假势垒类似于椭球状，粒子在这种势阱中会产生一低频振荡。在轴方向带电粒子会受到一趋向于陷阱中心的向心力。当外加的交流驱动频率比粒子的轴向振荡频率大很多时，粒子会产生稳定的振荡，振荡的幅度不会超过三维陷阱的几何尺寸。

被囚禁在陷阱中的粒子在高真空以及与外界绝热的条件下，可以被维持很长的时间，如果对这样的粒子再进行冷却减速，它们即可成为理想的基本物理常数和高精度光谱测量的样品。如果能将单个粒子囚禁并加以冷却，测量的精度和可靠性能更进一步加以提高。德默尔特在三十余年的工作中，发展了一套捕捉离子、电子、正电子的陷阱技术。1973年首次成功地实现了单电子、单正电子、单离子、单质子长时间的囚禁。并对离子进行光学冷却，获得了极高精度的回旋频率、微波辐射谱宽、回磁比等粒子常数和谱线的测量值。

### 几个重要实验

#### 一、氦离子的极化和超精细结构的测量

1961年德默尔特小组利用被自旋极化了的氦原子与氦离子的自旋交换碰撞，在离子陷阱中获得了自旋极化的 $He^+$ 同位素离子，测出了极化的程度。1966年他们利用这种自旋碰撞交换的技术，将 $He^+$ 离子基态里精细能级间射频跃迁的带宽压缩了200倍，使得了小于10Hz的窄带跃迁，测出 $^3S_1$ 态 $F(0,0)$ 与 $F(1,0)$ 之间的超精细分裂为 $8\ 665\ 649\ 867 \pm 10\text{Hz}$ 。1967年发明了通过监视陷阱中离子气的平移温度探测

离子射频跃迁，存储离子数等参量的技术。测试了陷阱中电子气随驱动频率改变的电子温度。1968年德默尔特在射频四极阱中实现了质子的辐射冷却。通过耦合失相振荡的热运动到外LC电路，将约 $10^4$ 个质子俘获于 $10^{-11}\text{mmHg}$ 真空度的陷阱中达3000秒，相应的质子温度低到900K。

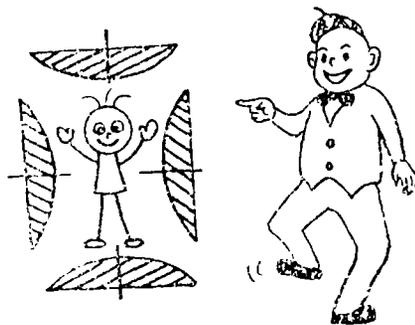
#### 二、单电子振荡器

将单电子囚禁在高真空低温的电磁约束的陷阱中，对于电子回旋磁比、电荷质量比等常数的测量有重要意义，另外还可以将单电子振荡器当成一理想的空间位置固定的准原子模型。这种“原子”无多普勒加宽效应的影响，各个能态也非常易于获得。

1973年德默尔特小组成功地将单电子囚禁在一阱深为6V的潘宁陷阱中，并测得单电子轴向受迫振荡频率为55.7MHz的信号。实验中，他们在环电极的轴方向施加4000高斯的磁场。帽壳电极间距为7.6mm，在其中一极上施加54.7MHz的驱动电压。在环电极上加1MHz的射频电压和12V的直流电压。陷阱的真空度维持在 $10^{-11}\text{mmHg}$ 。实验利用陷阱周围环境中的剩余气体将一电子束中的慢电子撞入陷阱区域。控制电子束的作用时间，使得初时大约有10个左右的电子维持在陷阱中。这些电子再与留在陷阱中的气体碰撞，获得动能和动量，使得在 $x-y$ 平面内的运动改变到 $z$ 方向(轴向)，最后与帽电极相撞并被吸附。控制施加的射频电压，就可将多余的电子按上述途径排除出陷阱，直到最后留下一单电子。单电子在轴方向的运动等效于在两帽状电极间加进一变化着的阻抗。利用外电路的共振匹配技术可测出电子在轴向受迫振荡的信号电流随时间的变化。这一变化反应出各个多余电子被排除出陷阱的时间和单电子被囚禁的时间间隔。1984年德默尔特小组将一单电子囚禁10个月之久。在囚禁期间，他们进行了著名的低能单电子的相对论滞后及双稳现象的观察。

#### 三、离子的激光冷却

在1975年美国光学年会上，德默尔特和另外一个



著名的物理学家肖洛同时提出了利用激光冷却原子或电子，从根本上降低光谱测量中多普勒加宽效应的设想。其基本原理如图2所示。当原子在陷阱中的振荡周期远远小于原辐射衰减的带宽 $\gamma$ 时，它的吸收谱由一静止原子的跃迁频率 $\omega_0$ 和许多多普勒效应边带谱组成。边带谱与 $\omega_0$ 的频率差正好等于原子振荡频率 $\omega$ 的整数倍。当一束入射激光的频率调到比静止频率 $\omega_0$ 低的第一个低频边带吸收谱线时，即激光频率为 $\omega_0 - \omega$ 时，陷阱中的原子以减少它们的振动能量为代价，吸收这一频率的光子而跃迁到它的上能态。上能态的原子以自发衰减的速率向各个方向以不同的边带频率发射光子，回到下能态。发射光子的平均能量为 $\hbar\omega_0 - R$ ， $R$ 为光子对原子的反冲能，等于 $(\hbar K)^2/2m$ ， $K$ 为入射激光的波矢量。当反冲能远远小于原子的振动能 $\hbar\omega$ 时，原子的动能便产生亏损，每一散射事件的亏损额约为 $\hbar\omega$ 。这种重复的光子反冲，将原子速度逐渐减小而达到冷却。这种方法也称为边带冷却法。

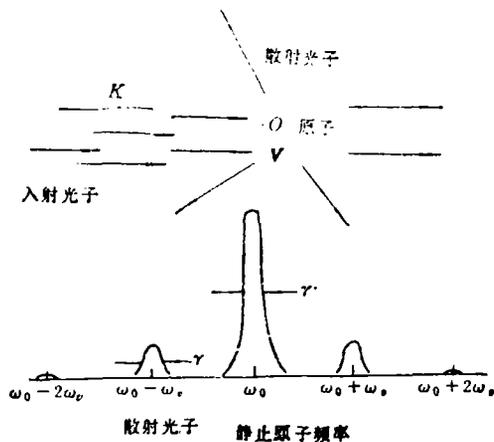


图2 激光冷却原理

1978年，德默尔特和他在西德海德堡大学的同事成功地在Ba原子中实现了光学的冷却。在这一次实验中他们还拍摄到10—20个被囚禁的Ba离子发射共振荧光的图象，第一次给人们以囚禁原子发射光的视觉观察感。观察到的激光的边带冷却效应为：当入射激光的频率调到原子的静止频率 $\omega_0$ 时，离子发射的荧光消失。当把激光频率下调到偏离 $\omega_0$ 中心频率一个多普勒宽度（约500MHz）时，Ba离子才开始发射荧光，这一荧光可以维持几秒钟的时间。当把入射激光的频率调到大于中心频率 $\omega_0$ 时，荧光消失。显然调到低频一边时，离子的动能减少，因此可以被囚禁在陷阱中维持荧光的发射。后来在华盛顿大学的实验室，德默尔特小组用边带冷却的方法将镁离子冷却到约5mK，几乎接近当时给出的理论极限。

#### 四、单正电子的囚禁

正电子与电子带相反的电荷，而电子带的负电荷，所以加深人们对基本粒子的认识。肖洛小组建立了在高真空中的单正电子囚禁的方法，并进行了实验。

陷阱分为两个，正电子导入陷阱并把它囚禁由第一个陷阱。肖洛小组进行了基本常数的测量。肖洛小组在陷阱开有正电子的囚禁过程中，使得精确的正电子运输到第二个陷阱。

实验中他们在一个近100keV的方向，以迴旋运动电子进入陷阱后由电子产生偏转运动。初时，电子会在一个轴向的轴向能量由一正电子将达到热平衡轴振荡，利用在陷阱中，施加一可变频率陷阱轴心旋转作用，气体的碰撞非常低，以保持高于 $10^{-11}$ 。

为了将调整电子要靠得很近，轴心极中心开的小孔，其间加上一脉冲电压控制陷阱轴向驱动逐步排出陷阱，直到

#### 五、低能单电子的囚禁

德默尔特和肖洛小组观察低能电子的迴旋频率。肖洛小组观察到电子的迴旋频率，应，电子迴旋频率与电子的电荷质量比，对外部的微波驱动电子的动能在驱动实验中令实验者惊奇的是不能忽略电子的相对论影响。即使在电子的静止能量的百万分之一电子的有效质量

# 奇 异 核 漫 谈

周 书 华

一八九六年放射性现象的发现，使人类第一次接收到来自原子核的信息。十五年以后，原子的有核模型出现了。到了一九三二年，发现了中子，这促使人们认识到原子核是由不带电的中子和带正电的质子所组成。

在核物理与核化学中，把由一定数目的质子与中子组成的原子核称为一种核素。至今已发现的核素约有二千七百种，其中仅有二百八十种左右是稳定的，也就是说，人们没有发现它们通过放射性衰变而转化为另一种核素的现象。还有很多核素，虽然能够通过放射 $\alpha$ 粒子（由两个质子和两个中子组成的氦原子核），或正、负 $\beta$ 射线（正电子或负电子），甚至通过自发裂变（重原子核自发地分裂成两个质量相近的碎片核）而变成其它的核素，但由于这些过程进行得非常缓慢，以至这些核素自它们在宇宙中形成到现在约 $8 \times 10^9$ 年的漫长时间里，还没有衰变完，仍然可以在自然界中找到它们。其余的更不稳定的核素在地壳中已不存在，只能人工地利用粒子加速器或反应堆通过原子核反应来生成。

对大量的核素所进行的研究表明，原子核的稳定性与组成该核素的中子数和质子数之比有很大关系。对于比较轻的核素，核中所含中子数与质子数相等或

接近相等时最稳定。随着核的加重，稳定核中的中子数与质子数之比越来越大。当质子数为100左右时，中子数比质子数多出百分之五十左右的核素才具有较高的稳定性。不稳定的核素，与稳定的核素相比，或者具有过多的中子（称富中子核），或者具有过多的质子（称缺中子核）。不稳定核素通常要发生正的或负的 $\beta$ 衰变而转变为中子数与质子数之比向稳定核靠近的核素。因为在 $\beta$ 衰变中，或者核中的一个质子变成中子（正 $\beta$ 衰变），或者核中的一个中子变成质子（负 $\beta$ 衰变），这样 $\beta$ 衰变就是原子核改变其中子数与质子数之比，从而向稳定的核素接近的最有效途径。中子数与质子数之比与稳定核素偏离不太大的核素，其 $\beta$ 衰变能量一般小于1MeV；半衰期以月或年为单位来度量。而这一比值与稳定核素相差较多的核素，其 $\beta$ 衰变能量一般为5--10MeV（对那些处在粒子稳定性极限上的核，可达20MeV）；而半衰期则要用秒和毫秒来度量。在粒子稳定性极限上的核，其最后一个中子（或质子）的结合能等于零，超过这一极限的核不能存在。具有不寻常的中子数与质子数之比的核素具有很多奇异的性质，又称做奇异核。如果把各种核素以其质子数为横坐标，而以其中子数为纵坐标，标在核素图上，那么就可看到，稳定核素大致上沿着一条线排列，该线

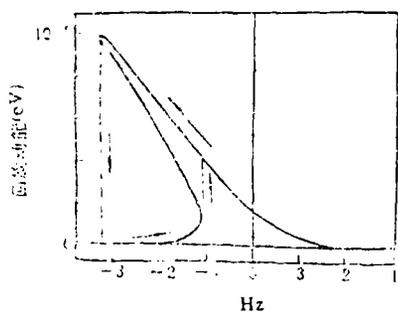


图3 迴旋驱动频率漂移。

应地减少为  $\nu_r = \nu_0(1 - k/MOC^2)$ ， $k$ 为电子动能。如果由于相对论引起的迴旋频率的变化大于共振宽度时，通常的共振响应曲线就会被严重地破坏，呈现类似于磁滞特性的滞后效应。

巴方在共振迴旋频率中引进了依赖于电子能量的

非线性效应，人们在驱动频率低于静止质量时的共振频率 $\nu_0$ 的区域内得到三个不同的响应曲线如图3所示。中间一个的响应明显地呈现不稳定，取决于从哪个方向扫过驱动频率。如果驱动频率从高低调节，周期运动的电子从近共振的场中吸取很多的能量，在共振响应的峰值处突然降到零。相比之下，当从低频扫到高频时，人们只看到对驱动频率很小的响应。因此明显地呈现一个双稳的滞后现象。轨道电子对驱动频率的响应完全取决于驱动过程。实验中陷阱要浸在液氦中，以保持 $10^{-14}$ 托的高真空陷阱区。电子的轴向谐振频率为60MHz，迴旋频率为164GHz。技术的关键是配制一个高信噪比，窄带宽的微波驱动源，使得其信号带宽小于相对论性所引起的迴旋频率变化的宽度。他们用了一年半的时间才准备好以石英晶体振荡为基波的信号源，信噪比可达 $10^{14}$ 。1985年他们首次观察到在电子能量不超过10eV时的相对论性单电子滞后效应。实验结果与理论预言完全一致。