

保罗与保罗阱

——1989年诺贝尔奖金物理学奖获奖作品介绍

梅 刚 华

(中国科学院武汉物理研究所)

本文简要介绍1989年诺贝尔奖金物理学奖获得者联邦德国波恩大学的沃尔夫冈·保罗(Wolfgang Paul)的获奖工作和生平,以及离子囚禁领域的某些最新进展。

1989年9月,在第九届国际激光光谱学学术会议上,美国国家标准与技术研究所(NIST)以J. Bergquist^[1]为首的一批科学家,报告了一项使整个物理学界瞩目的成果:他们在实验中成功地获得了一条分辨率极高的离子跃迁谱线,其 Q 值高达 10^{13} ,比以前最好的结果提高了一个量级。这项成果是利用保罗阱(Paul trap)离子囚禁和激光冷却技术获得的。

时隔一个月之后,瑞典皇家科学院宣布,将1989年度诺贝尔物理学奖的一半,授予联邦德国波恩大学的保罗教授和美国华盛顿大学的德默尔特(H. Dehmelt)教授,以表彰他们对离子囚禁技术的发展所作出的重大贡献。鉴于离子囚禁技术已使一系列的高精度物理测量成为可能,作为一种重要的离子阱——保罗阱的发明人,保罗教授获得这一殊荣便是理所当然的了。

沃尔夫冈·保罗1913年生于德国洛伦茨基希,先后在慕尼黑和柏林的理工大学接受教育,1939年获哲学博士学位。1952年,他被任命为波恩大学教授,并任该校物理研究所所长,从而步入了一生中成果累累的物理学研究的黄金时代。

50年代初,保罗从事多极电场和多极磁场的研究和设计工作。这种非均匀的多极场能象透镜聚焦光束那样使原子或分子束聚焦,并将具有不同的电子自旋取向的原子或分子从空间上分开。1951年,保罗与Friedburg等人^[2]首先描述了六极选态磁铁的聚焦原理并完成其设计。六极磁铁结构的截面如图1所示。原子束

从磁铁的一端口射入,从另一端口射出。在磁铁极隙中,处于其电子自旋方向与外磁场方向平行的状态(记为 \uparrow 态)的束原子,要受到一个指向磁铁轴线的磁力作用,磁场对这类原子的作用效果是使其“聚焦”;处于其电子自旋方向与外磁场方向反平行的状态(记为 \downarrow 态)的束原子,要受到一个偏离磁铁轴线的磁力作用,磁场对这类原子的作用效果是使其“发散”。在穿过磁铁以后,就得到一个聚焦了的、处于 \uparrow 态的原子束。多极电场的选态原理也与此类似。

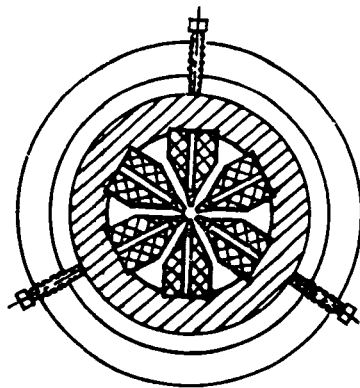


图1 六极选态磁铁的截面

目前所有实用型原子钟都是利用微波诱导原子从 \uparrow 态到 \downarrow 态的稳定跃迁。为了获得这种跃迁,首先必须使处于 \uparrow 态的原子数目多于 \downarrow 态的原子数目,实现所谓“粒子数反转”。很显然,多极电场和多极磁场具备这种使粒子数反转的功能,因而成为早期的氢分子钟和后来的氢原子钟装置中不可缺少的重要器件。美国的

Townes 和苏联的 Басов 和 Прохоров 由于研制成功世界上最早的氨分子钟而分享了1964年诺贝尔奖金物理学奖。

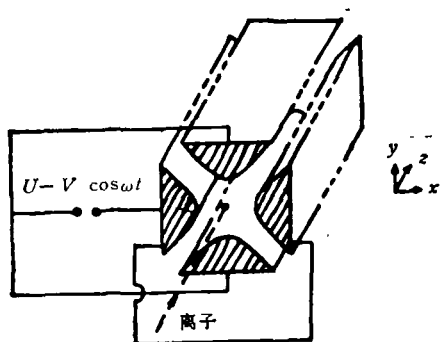


图2 四极滤质器原理

50年代末,保罗首先描述了四极滤质器(四极质谱计)的工作原理。质量为 m 的原子经电离以后进入如图2所示的四极电场。四极电场通过在两对间隔为 $2r_0$ 的双曲线形电极之间加上交、直流电压来实现。在电场作用下,离子在 z 方向受力为零,在 x, y 方向上的运动轨迹满足 Mathieu 方程:

$$(d^2u/d\xi^2) + [a_u - 2q_u \cos 2(\xi - \xi_0)]u = 0, \quad (1)$$

其中 u 可取 x, y , 且

$$\xi = \omega t/2, \quad (2)$$

$$a_x = -a_y = 4eU/m\omega^2 r_0^2, \quad (3)$$

$$q_x = -q_y = 2eV/m\omega^2 r_0^2, \quad (4)$$

仅当 a_u 和 q_u 在一定范围时,亦即当 U, V, ω, r_0 一定,离子的荷质比 e/m 在一定范围时,(1)式才有稳定解。就是说,只有 e/m 在一定范围的离子才可以穿过四极场而被检测,其余的离子都被四极场发散掉。这种四极滤质器对 e/m 的选择性极高,从而为高精度的质量测量提供了一种强有力的手段,因而迅速成为许多实验室的常规仪器。Van Dyck 等人^[3]曾用高分辨四极滤质器测量过质子质量及质子-电子质量比,测量精度竟高达 5×10^{-13} !

基于上述原理,保罗又发明了一种“三维滤质器”,这就是著名的保罗阱,又称射频阱。

多少年来,制备一种孤立的原子或离子系

统一直是物理学家梦寐以求的事情。在这种系统中,原子或离子处于静止状态,相互之间作用为零,且不受周围环境的影响。由于没有多普勒展宽(或多普勒展宽极小),原子或离子的跃迁谱线极窄。在这种系统中进行测量,可以获得精度极高的微观粒子特性数据,由此可对广义相对论及量子电动力学等物理学基本理论进行实验验证。可是,要制备出这种系统谈何容易!然而离子阱(以及后来的中性粒子阱)的发明,使情况发生了根本性转机。

所谓离子阱,就是利用电场对离子的作用,将离子局域在一个很小的区间,类似一个“陷阱”。最早出现的离子阱是 Penning 阱。由于 Penning 阱中强磁场产生的塞曼频移和离子运动的不稳定性,在许多情况下使用保罗阱更为有利。

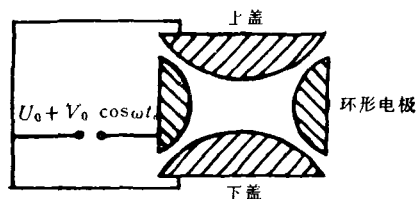


图3 保罗阱示意图

保罗阱的剖面结构如图3所示。它是由一个双曲面环形电极加上、下两个双曲面盖组成的。上、下盖(作为一个电极)与环形电极之间加入一个交流电压和一个直流电压。与四极滤质器原理类似,只有具有某一确定范围的 e/m 值的离子,其运动轨迹才有稳定解。在电场作用下,这种离子便被牢牢地“囚禁”在阱中心附近很小的区域内。保罗阱的尺寸可以做得很小,被囚禁的离子密度极为稀薄,甚至可以实现单离子囚禁。

囚禁在保罗阱中的离子并非完全静止不动。其运动轨迹可用某些特定频率的简谐振动的线性叠加来描述。为了使阱中的离子完全静止下来,最有效的办法是对其施行激光减速(又称激光冷却),这也是近年来发展迅速的新兴技术。经激光减速以后,阱中的离子已经十分接近静止状态。也就是说,经激光冷却后,保罗阱

中的离子几乎就是一个理想的孤立系统。

让我们再回到本文开头谈到的例子,看看物理学家如何利用这种孤立离子系统实现高精度测量。实验人员先将一个 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子囚禁在一个尺寸仅为几百微米的保罗阱中,然后进行激光冷却,使离子处于接近静止的状态。再用光学手段测量 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子基态($^2S_{1/2}$)到某一亚稳状态($^2D_{5/2}$)的跃迁谱线轮廓,测得其半高宽 $\Delta\nu$ 为86Hz,该谱线的频率 ν 约为 $1 \times 10^{15}\text{Hz}$,故谱线Q值($\nu/\Delta\nu$)约为 10^{13} 。据实验人员报道,如对实验手段加以改进,可以获得更窄的谱线。该谱线的极限宽度约为1Hz,如果有朝一日,物理学家们能够获得宽度接近这一极限的谱线,谱线Q值可高达 10^{15} 量级。 10^{15} 量级的谱线Q值意味着什么呢?如果利用该谱线制成原子钟,在不考虑其它因素影响的情况下,则该原子钟的精确度即为 10^{-15} 。

保罗所研究的物理学领域远不止上述这些。他在高分辨光谱学、质谱学、分子束物理及高能电子物理(包括辐射生物学)乃至教育学等方面均有很深的造诣。他是首先利用光学方法观察到兰姆(Lamb)移位的科学家之一(兰姆移位的实验验证是量子电动力学发展史上的伟大事件之一,兰姆本人也因此而荣获1955年诺贝尔奖金物理学奖)。他在波恩领导和建立了一台强聚焦的500MeV电子同步加速器,后来在他主持下建成了一台2.5GeV加速器。他还擅长并热衷于科学研究的组织工作,担任过

欧洲核子中心核物理学部主任等职务。由于对教育事业的兴趣,他参加过联邦德国政府高等教育委员会的工作。作为洪堡基金会的总裁,他对国际间科技人才的交流与合作作出了重要贡献。

已逾古稀之年的保罗教授,至今依然活跃在离子、中性粒子囚禁领域的前沿。1984年,他与他的学生一起,在超导囚禁环中成功地囚禁住中子^[4]。1988年,他与他的同事(包括他的两个儿子)获得了中子寿命的新的测量值。

纵观保罗的工作,我们看到他的主攻方向始终如一,这就是多极场(包括多极电场和多极磁场)的研究。他对多极场理论和实验有深刻的了解并运用自如,他的一系列重要发现与发明,包括四极、六极电场和磁场的分析与制作,四极滤质器及保罗阱的发明,以及中性粒子的囚禁等等,无不得益于此。在当今世界,任何一位科学家想要在几个学科乃至同一学科的几个不同领域同时取得突出成就,几乎是不可能的。知识广博,主攻明确,坚持不懈,终有所成,这大概就是保罗这位当代伟大科学家给我们的启示。

- [1] J. Bergquist et al., Proc. 9th International Conf. on Laser Spectroscopy, Bretton Woods, N. H. June 1989, eds., M. Feld et al., Academic, San Diego, Calif.
- [2] H. Friedburg and W. Paul, *Naturwiss.*, **38**(1951), 159.
- [3] B. G. Levi, *Phys. Today*, No. 12(1989), 17.
- [4] K.-J. Kügler et al., *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research*, **228**(1985), 240.

(上接第547页)

多的实际应用,我们预期将在下述几个方面作进一步的研究:一是快速测量变换技术,以提高时间分辨率;二是进一步向多道探测方向发展;三是由少量投影得到高精度分辨率的变换技术;四是扩大应用领域。由于这一诊断技术的优点,我们相信,这一技术一定会在我国得到大力的发展和应用。

- [1] H. M. Hertz, *Opt. Comm.*, **54**(1985), 131.
- [2] G. W. Faris and R. L. Byer, *Opt. Lett.*, **12**(1987), 155.
- [3] G. W. Faris and R. L. Byer, *Opt. Lett.*, **12**(1987),

- 72.
- [4] R. Snyder and L. Hesselink, *Opt. Lett.*, **13**(1988), 87.
- [5] T. Okoshi and M. Nishimura, *IEEE Lightwave Technology*, **LT-1**(1983), 9.
- [6] P. Francois et al., *IEEE J. Quant. Electron.*, **JQE-18**(1982), 524.
- [7] G. W. Faris and R. L. Byer, *Opt. Lett.*, **11**(1986), 413.
- [8] K. E. Bemutt et al., *Appl. Opt.*, **23**(1984), 2678.
- [9] H. M. Hertz and G. W. Faris, *Opt. Lett.*, **13**(1988), 351.
- [10] H. M. Hertz, *Appl. Opt.*, **25**(1986), 914.
- [11] L. W. Caspereson, *Appl. Opt.*, **12**(1973), 2434.
- [12] F. J. Weinberg, *Optics of Flames*, Butterworth, London, (1963), 24.