



1989 年诺贝尔物理奖获奖者之一

沃尔夫冈·保罗

G. Werth* 董太乾

沃尔夫冈·保罗生于 1913 年。他于 1939 年在柏林高等技术学院 Kopferman 教授指导下获得博士学位,以后一段时间内从事原子核磁矩的测量工作。他设计了一种新的原子束仪并用它研究了铍和其它元素的超精细结构、斯塔克效应、振子强度等参数。第二次世界大战中他的工作不得不暂时中断了一个时期。以后他在哥丁根大学用传统的磁质谱仪从事质谱和同位素分析的工作。1947 年在他主持下建成了一台 6MeV 的电子回旋加速器,并用它开始了一系列有关核物理的实验,如氘核的光裂变,核的电子散射等实验。同时他继续了他有关原子束的实验。

1948 年他在实验中发现具有一定自旋偏极化了的碱金属原子束以很小的角度入射到一个不均匀磁场区域时会发生全反射,这与光学中光束在不同介质表面会发生全反射的现象类似。由于受到这个与光学的相似性的启发,他想到了可以利用它建造适用于原子束的透镜。他利用具有固有磁矩的原子在不均匀磁场中会受到磁力这一点制成了具有 n 度轴对称的原子束透镜,此时磁场强度与 r^{n-1} 成正比,这里 r 是离对称轴的距离。特别是当原子的磁矩 μ 是一个常数,则对于 $n=3$ 的情况,原子受力 $F = \mu \cdot \nabla |B|$ 随磁场强度的增加而线性地增加,因而导致原子围绕对称轴作简谐振动。这种六极对称(相当于 $n=3$)场的装置目前广泛地在原子束仪中被应用,例如在铯原子钟和氢脉塞中用来聚焦某一特殊自旋取向的原子。保罗自己用它根据原子在其中的偏转来测量核矩和核自旋的大小。与原子的情况完全类似,处在确定的转动能级上的分子在不均匀电场中也受到力,利用它也可以对它们进行聚焦。由于一般情况下分子的有效电矩不是常数,而是正比栏外电场强度的,所以为了得到与 r 成正比的力,所要求的场的对称性是 $n=2$,也就是四极对称场。这种四极对称(相当于 $n=2$)的静电场装置是目前分子束选态时常用的装置。保罗和他的同事们利用它测量了二原子分子的超精细结构和电偶极矩。

1952 年保罗成为波恩大学的正教授,这时除了从事原子和分子物理工作外,他开始了高能物理的研究工作。他和他的同事们建造了世界上第一台电子同步加速器,其中利用了具有交变梯度的磁场来对电子进行聚焦:当电子束在具有交变梯度的磁场中沿着轨道运动时,交变地经受到聚焦和散焦的力。当径向为聚焦力时轴向便为散焦力,反之当径向为散焦力时轴向便为聚焦力。这种情况与光学完全类似,一束光可以被具有交变聚焦和散焦能力的透镜所聚焦。这个世界上第一台电子同步加速器的能量是 500MeV,这个能量足以用来进行一些有关核激发态和介子光生 (pion-photoproduction) 实验。在波恩大学很长时期内就是用这台电子同步加速器进行了一系列高能物理实验,直到 1967 年又建成了一台新的 2.5GeV 的同步加速器,用它可以对核的短寿命态 (10^{-23} s) 进行研究。20 年以后,1987 年,这台同步加速器又配备了一个 3.5 GeV 的贮存环 (ELSA),这是世界上在大学中能量最高的同步加速器,因为一般大型加速器都是由国家或国际研究机构来建造的。保罗本人是德国高能物理实验室的创始人之一,1971—1973 年间他是汉堡 DESY 的主任,正是在此期间建造了贮存环 DORIS 和大型正负电子贮存环 PETRA。这二项工程的完成使得 DESY 成为世界上先进的高能物理研究基地之一。在此同时,他积极参与了欧州高能物理研究所 CERN 的工作,1965—1967 年间他是该所核物理组的主任,对该组的研究工作起了决定性的作用。

上述在高能物理中的研究工作使得保罗在原子分子物理方面有了新的想法,最终导致了他 1989 年获得诺贝尔物理奖。下面就来介绍这一工作。高能电子(有固有磁矩)与具有交变的聚焦和散焦的磁场的相互作用性质完全可以类推到带电粒子与交变电场的相互作用。开始利用这个思想建成的是四极质量过滤器。它由四根互相平行的金属杆组成,金属杆相对部分的表面是双曲面,四根杆分成二组,互相对着的二根杆为同一组并保持等电位,在二组杆之间加上一定的直流和交流电压。如果适当选择所加的 U_{dc} 和 U_{ac} ,那么只有 e/m 具有某一确定值的离子才能通过这个装置,

* G. Werth 现为西德美因兹,约翰尼斯·古丁堡大学物理所的教授,曾是沃尔夫冈·保罗的学生。董太乾北京大学无线电电子学系教授。

而其它的离子都将逸出此装置。这种质量过滤器的分辨率可以高达 10^6 。保罗和他的同事们用它来精确测量离子的质量和进行同位素分离。与传统的质谱仪相比,这种仪器不需要磁场,因而可以大大减轻重量。当放在飞行体上时(如人造卫星上),这点就显得很重要,因此它现在被广泛地用于探测高层大气、太阳系空间等,它也可应用于高真空仪器中背景气体的分析。

后来保罗把上述质量过滤器的原理扩展到三维结构就导致离子阱的发明——获得 1989 年诺贝尔物理学奖的工作。如果想像上述质量过滤器的某一对金属杆之间有一根垂直其表面的连线,并以此为轴转动 180° ,就得到一个三维的离子阱。离子阱是由一个金属环和上下两个金属帽构成,其内表面也是双曲面,二个帽用导线相连保持等电位,在环和帽之间加上直流电压和射频交流电压,这样离子阱便可用来囚禁带电粒子,这种离子阱称为保罗阱,或称为射频阱。

保罗和他的同事们研究了这种离子阱的稳定性、贮存效率和贮存时间等性能。但由于当时真空技术的限制,离子阱真空度不高,所以他们首次用 N^+ 做实验时只得到了 15ms 的贮存时间。由于贮存时间太短,他们只把它当质谱仪使用。当时他们是用电子管线路来检测离子的 x 向运动在离子阱中感应出来的象电流,以此检测离子阱中离子的多少,那时他们已最少能检测到十个贮存离子。

保罗也分析了另一种离子阱,其结构与上述保罗阱类似,只是其中环与帽之间只加直流电压不加交流电压,另外在离子阱的内部空间内再加一个强的磁场 B 。这样的离子阱类似于 1936 年潘宁提出的真空规管的结构,所以称为潘宁阱。在潘宁阱中离子的运动是三种简谐振动的叠加:频率为 ν_c 的轴向振动(它只决定于所加直流电压的大小)、频率为

$$\nu_c = \frac{\nu_c}{2} + \left(\frac{\nu_c^2}{4} - \frac{\nu_z^2}{2} \right)^{1/2}$$

的回旋运动(这里 $\nu_c = \frac{e}{mB}$)和频率为

$$\nu_m = \frac{\nu_c}{2} - \left(\frac{\nu_c^2}{4} - \frac{\nu_z^2}{2} \right)^{1/2}$$

的磁运动。由于 ν_c 与离子的带电量 e 、质量 m 和所加磁场 B 有关,所以当 e 、 B 已知,由 ν_c 或 ν_m 就可测出离子的质量 m 。事实上这种潘宁阱后来发展成为一种非常精确的质谱仪。保罗的学生曾用此仪器首次直接测出质子质量与电子质量的比值 m_p/m_e 。后经默德尔特和 Van Dyck 的改进,用此离子阱测量 m_p/m_e 值的精度现已达到 10^{-7} 。

潘宁阱在保罗的研究所里被用来测量自由电子的磁矩。他们把自由电子贮存在潘宁阱中,然后用一束自旋偏极化了的钠原子束与它们碰撞,从而使得自由电子的自旋也偏极化,然后输入微波引起自由电子的

自旋共振,从电子自旋共振的频率和已知外加磁场值便可测得自由电子的磁矩。在此实验中测量精度被电子-原子碰撞所限制,约为电子反常磁矩的 10^{-4} ,也就是电子总磁矩的 10^{-5} 。后来,在此基础上又进行了许多技术上的改进,特别是德默尔特用潘宁阱长时间地贮存了单电子后,其测量精度达到了电子总磁矩的 4×10^{-12} 。这也是到目前为止有关基本粒子特性最精确的测量值。用同样的方法他们测量的正电子的磁矩也到相同的精度,得到了与负电子相同的反常磁矩值,这是对量子电动力学和 CPT 理论的直接验证,因为这些理论假设粒子及其反粒子具有相同的磁矩。

德默尔特及其同事们利用保罗阱,进行了氦离子极化和超精细结构测量。他们观察到 8.6GHz 的 He^+ 基态自旋共振,得到了 10Hz 的共振线宽,这是首次用离子阱得到的高分辨率谱。他们对一系列重离子进行了基态超精细结构微波谱测量,在跃迁频率为几京赫的情况下可以得到几毫微的线宽。

保罗的学生托谢克和德默尔特合作实现了用激光冷却贮存离子。激光冷却可以使贮存离子的运动范围小于激光束的直径,这样就可以观察到单离子的荧光。用激光对这种单离子进行激发,也可以得到较强的荧光,甚至用肉眼就能观察到这种单离子荧光。如果贮存离子存在亚稳态,则当此离子处在亚稳态时,原有的荧光就消失,这就是所谓的单离子“量子跳跃”现象,是德默尔特用 Ba^+ 在保罗阱中首次观察到的。

后来,保罗又从事了贮存中性粒子的工作。开始时他用了三个超导线圈产生一个四极不均匀磁场,当带有磁矩的粒子在此线圈中时,不均匀磁场对某一特定自旋取向的粒子能产生向着线圈中心聚焦的作用,因而这种粒子可以被囚禁在线圈中。但是如果粒子进入线圈前没有充分冷却的话,由于粒子初速度太大,往往不可能被这种不均匀磁场所囚禁。一直到保罗从波恩大学退休以后,他利用轨道跟踪型阱 (racetrack type trap),才成功地囚禁了中子。他观察到贮存中子由于 β 衰变而消失,并由中子数的衰减曲线测得自由中子的寿命。

除了保罗在科学上有许多成就以外,他还是德国科学界的重要决策人之一。他是一些重要研究机构如 DESY 和 CERN 的奠基人之一,也是一些国际交流项目的负责人。1979 年他任洪堡基金会的主任,这个基金会对世界上其它国家的科学家到德国来作研究工作提供资助。

保罗获得诺贝尔物理学奖的工作——发明了离子阱以及其它许多科学上的成就已经和必将继续对现代实验物理学产生巨大的影响。

(注:本文删去了原文中的参考文献,如读者需要,可来信索取。)