

意义,属国际水平。

(2) 60年代从事激光工作。我国第一台激光器——红宝石激光器研制成功仅在国外实现一年半之后,是以他的创造性思想为主而独立实现的,并在光泵和腔结构上有所创新。之后,他长期从事大功率固体激光器的研究,掌握了许多激光物理关键性问题和关键技术。在他的指导下,发展了多种激光器,建立了系统的研究激光的实验及测试技术,使器件水平与初期相比提高七个数量级。他指导的激光原子法分离铀同位素的激光工程工作,已成功地移交核工业部门,并获得可见量浓缩铀的第一步实验。他率先在我国实现自由电子激光,从理论上分析了电子束流的电子发射亮度极限,对激光产生高亮度电子束进行了理论预测,并对感应电子

加速器和射频加速器用于自由电子激光时的性能进行了对比分析。

(3) 光信息处理方面的工作。早在1960年,他就将信息论应用于光学系统信息传递,包括从衍射谱平面,测量获取物体信息,用可相互区分的光子态导出光学信息量值,用信息论讨论非直接成像,包括全息成像等,在国内光信息处理和光计算领域起了倡导推动作用。

王之江先后发表论文近170篇。他是《中国科学》和《科学通报》编委,中国光学学会副理事长,量子电子学国际理事会理事,“Journal of Nonlinear Optics”的编委;他还是第三届和第五届全国人民代表大会代表,上海市第八届和第九届人民代表大会代表。

(中国科学院技术科学部办公室)

诺贝尔物理奖获得者拉比及其分子束共振法

林 木 欣

(华南师范大学物理系,广州 510631)

拉比在核磁矩的研究中,发明了“分子束共振法”。利用这种方法,拉比及其合作者首次精确地测定了一些核的磁矩。然而,这种方法有着更为深远的意义,它开拓了磁共振和原子钟等新领域,并导致许多重大的发现和发明。历史表明,拉比是20世纪中杰出的物理学家和物理教育家。

一、核磁矩的早期探测

提起拉比(I. I. Rabi, 1898—1989),人们自然会想到核磁矩的精确测定^[1]。自从卢瑟福的核原子模型确立后,人们就想了解核结构和核力,这就需要掌握反映原子核性质的数据。而核磁矩是反映核的重要性质的物理量之一,因此,核磁矩数据的精确测定就成为当时人们所关注的课题。

早在1915年,H. S. Allen就已经提出核

磁矩的概念,他认为核的成分处于某种转动状态,它们会引起磁矩。显然,这是一种很粗糙的想法,缺乏充分的根据。1924年,泡利提出了核自旋的假设,认为原子光谱的超精细结构是由电子轨道运动和核的净角动量之间的相互作用引起的。原子核作为一个带电而又具有角动量的力学系统,应该具有磁矩,那么,能否在实验上测定核磁矩呢?

1926年,斯特恩提出,可用分子束实验测定核磁矩。他曾在1922年与盖拉赫(W. Gerlach)合作,用这种实验发现原子磁矩的空间量子化取向。但首次得到核磁矩数值的是G. Breit和F. W. Doermann。他们于1932年根据光谱测量推得锂核(⁷Li)磁矩的数值。可是很遗憾,这种方法存在着很大的误差。1933年,斯特恩与O. Frisch, I. Estermann等合作,用分子束偏转实验来测氢分子中氢核(质子)与氘

核的磁矩，得到了惊人的结果：质子磁矩约为狄拉克理论预期值的 2.5 倍，氘核磁矩则介于 0.5 到 1 个核磁子之间^[2]。

由于拉比于 1928 年曾在斯特恩的实验室里做过一年研究工作，并掌握了斯特恩所发明的分子束实验方法，所以他在 1929 年回到哥伦比亚大学任教后，立即着手用分子束技术来研究原子能级的精细结构。他和他的学生 Victor Cohen 一起，研究原子束在弱磁场中的偏转，以测量自旋和精细结构常数，从而估算核磁矩。当斯特恩等人用分子氢测得质子和氘核的磁矩后，拉比和他的合作者再利用原子氢和原子氘来测量质子和氘核的磁矩，也进一步肯定了斯特恩等人得到的结果。

二、拉比的分子束共振法^[3]

然而，用分子束偏转实验测得的核磁矩值会受精确度的限制。这是因为原子或分子的速度分布，影响了偏转角度的分布。因此，拉比等人一直在设法改进斯特恩的分子束技术。

1936 年，荷兰物理学家 C. J. Gorter 提出了共振吸收的基本概念，并试图直接观测核磁矩体系对电磁波的吸收，但未获成功。1937 年 9 月，Gorter 访问了拉比的实验室，描述了他的设想，拉比深受启发。拉比便研究把射频共振吸收引入分子束技术中，终于在 1938 年发明了“分子束共振法”。

这种方法的原理如图 1 所示。分子束从左边狭缝 O 出发(由炉子蒸发产生)，在水平轴线右边的 D 处安放探测器，中间经过磁铁 A、C

和 B。磁铁 A 和磁铁 B 产生两个不均匀磁场区，磁场梯度 $\frac{dH}{dZ}$ 方向相反，磁铁 C 为均匀磁场区，场强为 H_0 。由电磁学可知，当核磁矩为 μ 的粒子在均匀磁场中通过时，只受到力矩作用而作拉莫尔进动，其进动频率为

$$\nu = \frac{\mu H_0}{I h}, \quad (1)$$

式中 I 和 h 分别为核自旋和普朗克常数。当粒子通过不均匀磁场区时，除了作拉莫尔进动以外，还受力作用而使分子束偏转。因磁铁 A 和 B 的磁场梯度的方向相反，故核磁矩为 μ 的粒子通过两个不均匀磁场区时，分别受到 F_A 和 F_B 两个方向相反的作用力：

$$F_A = \mu_z \left(\frac{dH}{dZ} \right)_A, \quad F_B = -\mu_z \left(\frac{dH}{dZ} \right)_B, \quad (2)$$

式中 μ_z 是 μ 在 Z 轴方向的投影。这就使得粒子作相反方向的偏转。调节磁铁 A 或 B，可使偏转刚好互相补偿而进入探测器 D (如图 1 中的实线所示)。在磁铁 C 两极之间再设置一个垂直于 H_0 的射频场 H_1 ，当 H_1 的频率等于拉莫尔进动频率 ν 时[见(1)式]，分子束对射频场产生共振吸收，使得核磁矩的取向改变， μ_z 值发生变化，从而使分子束偏离原来的轨道而不能到达探测器(如图 1 中的虚线所示)。

实验装置如图 2 所示。该装置装在黄铜管子中，可分为三个不同区段，每一区段都有各自的高真空抽气系统。图 2 左边为源区段，由蒸发器产生分子束。右边为接收区段，包括磁铁 A、B 和 C，射频场系统 R，准直缝 S 和探测器 D。左、右两区段之间为隔离区段，它使接

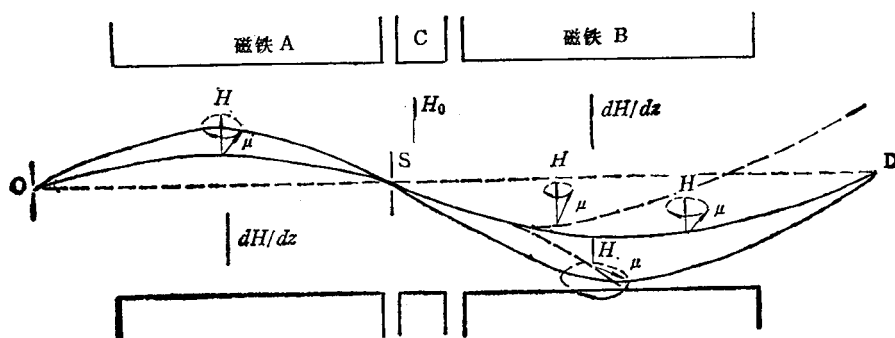


图 1 分子束共振实验原理图

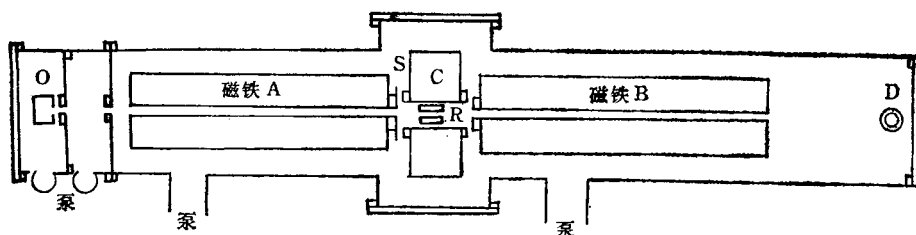


图2 分子束共振实验装置图

收区段同加热炉放气区段之间用真空隔离，两端狭缝可在真空条件下移动。

这个装置的技术难度是很大的。产生梯度的磁铁 A 和 B 的磁极间隙只有 1mm，励磁线圈要通过 300A 的电流，在间隙处产生 1.2T 以上的磁场以及大约 10T/cm 的磁场梯度。磁铁 C 既要产生一均匀磁场区，又要在磁极间置射频振荡线圈，使产生射频场 H_1 的频率为 0.6—8MHz。仪器组装时，先要用光学方法对磁铁、狭缝和检测器进行准直，然后用分子束通过仪器进一步准直。

这种方法之所以精确，在于引入了射频共振技术。核磁矩值是根据观测到的磁场值 H_0 和频率值 ν 计算出来的。当时测量频率是用外差式频率计，误差不超过 0.03%，测量磁场是用急掷线圈和冲击电流计，误差不超过 0.5%，故求得核磁矩的精确度达千分之几。拉比等第一次测定的结果如表 1 所示。

表 1 首次分子束共振实验测定的核 g 值和核磁矩

核	g	自旋	磁矩
${}^6_3\text{Li}$	0.820	1	0.820
${}^7_3\text{Li}$	2.167	3/2	3.250
${}^{19}_9\text{F}$	5.243	1/2	2.622

因此，拉比和他的合作者 S. Millman, P. Kusch 和 J.R.Zacharias 实现了精确测定核磁矩的目的。拉比由于“发明了记录原子核磁性的共振法”，荣获了 1944 年度诺贝尔物理奖。

三、分子束共振法的推广和应用

分子束共振法的意义，已远远超出了用于精确测定核磁矩。半个多世纪以来，尽管技术手段在不断更新，但分子束共振法的物理思想

却保持着青春的活力，在许多领域中得到非常重要的推广和应用。

1. 用于建立量子频标(原子钟)^[4]

1940 年，P.Kusch 和 S. Millman 在拉比的支持下，把分子束共振法用于测量碱金属原子超精细结构的 $\Delta F = \pm 1$ 跃迁。拉比预见到，碱金属铯 (${}^{133}\text{Cs}$) 的超精细结构有可能作为计量频率的基准。1945 年，拉比在公开演讲中又提出了研制原子钟的可能性，对此，《纽约时报》作了引人注目的报道。曾师从拉比多年的 N.F. Ramsey，到哈佛大学任教后继续研究改进拉比实验的方法。1949 年，Ramsey 以“一种新的分子束共振法”为题，提出了分离振荡场方法，为提高测量精度开辟了新的途径。1955 年，英国国家实验室的 L. Essen 和 V.L. Parry 首先研制成功铯原子钟。经过进一步改善以后，在 1967 年第 10 届国际计量大会上决定把铯原子超精细能级的零场跃迁频率 9192.631770 (20) MHz，作为定义秒的时间基准。1960 年，Ramsey 又发明了短期稳定度极为优越的氢原子钟。Ramsey 由于提出了分离振荡场方法以及将该方法应用于氢钟和其他原子钟因而荣获了 1989 年度诺贝尔物理奖。目前，世界上除了积极发展氢原子钟以外，对小巧价廉的铷原子钟的发展也非常重视。

2. 用于发展磁共振技术^[5,6]

拉比的分子束共振实验，是通过把磁共振的思想引入分子束技术中以测定核磁矩的。这种方法也存在着如下一些问题：(1) 被测物质要变为分子束状态；(2) 热分子束的速度分布引起偏转角分布，而且分子束通过共振区的要求难以保证磁场均匀区的要求。能否找到一种办法，既不损害样品而又能更精确地测定核磁

矩呢? 1945年12月,哈佛大学的E. M. Purcell小组在石蜡样品中观察到核磁共振吸收信号。过了一个月,斯坦福大学的F. Bloch小组在水样品中观察到核感应信号。他们都是在凝聚态物质中实现了核磁共振的,而且比拉比的方法更加精确和简单,因而Bloch和Purcell以“核磁精密测量新方法的发展及有关发现”荣获了1952年度诺贝尔物理学奖。除了核磁共振以外,E. K. Завойский于1944年首先在固体中观察到电子顺磁共振信号,J. H. E. Griffiths于1946年在铁磁物质中发现铁磁共振,H. G. Dehmelt和H. Krüger于1950年在固体中发现纯核四极共振……70年代以来,磁共振技术的发展大大加快,并在物理、化学、生物和医学等领域的分析测试工作中有着广泛的应用。

3. 用于测量拉姆移位和电子磁矩^[7]

在拉比实验室里工作多年的拉姆(W. E. Lamb)跟他的学生R. C. Retherford一起,在第二次世界大战结束后,利用微波共振吸收来检测氢原子束的精细结构能级。按照狄拉克的理论,氢原子 H_{α} 谱线的精细结构能级 $2^2S_{1/2}$ 与 $2^2P_{1/2}$ 是重合的。但他们在1947年发现, $2^2S_{1/2}$ 能级比 $2^2P_{1/2}$ 向上移动了大约1000MHz,称之为拉姆移位。另外,比拉姆早一年到拉比实验室而跟拉比一起搞分子束共振实验的P. Kusch于1947年与H. M. Foley一起进行电子磁矩的研究,测得电子磁矩并不等于理论预期值的一个玻尔磁子,而是 (1.001146 ± 0.000012) 个玻尔磁子。这两项实验结果,揭示了旧理论存在的矛盾,推动了量子电动力学的发展,拉姆与P. Kusch也由此而共享1955年度诺贝尔物理学奖。

4. 用于研制微波激射器与激光器^[8]

1951年,哥伦比亚大学的C. H. Townes考虑了一个独特的分子束系统。他与研究生J. P. Gordon以及博士后研究人员H. J. Zeiger一起,用氨分子束通过聚焦器选出高能态的分子束,注入微波共振腔以形成一个分子振荡器,使氨分子产生受激发射。1954年,他们成功地制成了这种微波激射器。与此同时,苏联物理

学家H. Г. Басов和A. М. Плохоров也独立地研制成这种激射器。自此,人们考虑把这种装置推广到光频段。1958年,A. L. Schawlow与Townes发表了《红外和可见光maser》一文,为光激射器的制作奠定了基础。1960年,T. H. Maiman研制成第一台光激射器,即激光器。Townes, Басов和Плохоров由于发展量子电子学并导致微波激射器和激光器的发明,从而获得了1964年度诺贝尔物理学奖。目前,微波激射器和激光器还在继续发展,特别是激光器的发展更为迅速,用途更广。激光器的种类很多,工作原理也各有差异,但其基本思想还是一致的。特别是近十多年发展起来具有特大功率而能击毁空间导弹的自由电子激光器,正是由自由电子束在螺旋形磁场中共振来实现的。可见拉比的分子束共振法的影响是何等的深远。

四、拉比的奋斗生涯和崇高荣誉

拉比于1898年7月29日出生在奥地利的一个犹太家庭。幼儿时随家迁居美国。1919年在康奈尔大学化学系毕业。工作三年后又回到康奈尔大学攻读化学研究生学位。但不久便转到哥伦比亚大学读物理,并于1927年取得博士学位。接着他取得资助到欧洲从事研究工作两年,先后到过几所著名大学,分别得到索末菲、玻尔、泡利、斯特恩和海森堡等名家的指导。特别是斯特恩和泡利,对他后来用分子束实验来研究核磁矩,起了决定性的影响。

1929年,拉比由海森堡推荐而回到哥伦比亚大学任教。他在哥伦比亚大学组织了研究组,开展了斯特恩所创立的分子束工作并有所创新。他在哥伦比亚大学历任讲师、副教授、副教授,1937年起任教授。经过将近十年的努力,终于发明了能精确测定核磁矩的分子束共振法,这是他学术上达到的高峰。为此他声名大振,1940年被选为美国国家科学院院士。但第二次世界大战使他在1940—1945年间,转向微波雷达的研究。战争结束后,他试图开拓分子束技术的应用。

拉比是一位出色的学术领导人,很善于物

色和培养人才。他事业上的成功，跟他周围有一批得力的合作者是分不开的。随着他学术地位的提高，他成为强有力的核心人物。在 30 年代和 40 年代，他吸引了许多有志有才的青年来哥伦比亚大学物理系学习或工作。1945—1949 年，他担任哥伦比亚大学物理系主任，他的威望和影响使该系在物理学的一些新领域的发展处于领先地位。因此，从 30 年代起，哥伦比亚大学逐渐形成了一个以拉比为中心的物理学派，被认为是产生新思想、新数据和培养富于创造性青年物理学家的研究中心。拉比学派的影响，后来被他的弟子 J. R. Zacharias, N. F. Ramsey, W.A. Nicrenbeg, J.S. Schwinger 和 H. K. Hughes 等大大发扬。在他们当中，Schwinger 对量子电动力学有突出贡献，荣获了 1965 年度诺贝尔物理奖；Ramsey 对发展原子钟有巨大贡献，荣获了 1989 年度诺贝尔物理奖。前面提到的拉姆、P.Kusch 和 Townes 等三名诺贝尔物理奖获得者，也都是在他们早期从事学术活动时被拉比吸引到哥伦比亚大学辐射实验室工作并取得卓越成果的。

50 年代以后，拉比在社会上有许多任职。1950—1951 年，他担任美国物理学会理事长。1952—1956 年，他担任美国原子能委员会的总顾问委员会主席。1955—1958 年，他担任原子能和平利用国际会议的副主席；后来又担任联合国关于和平利用原子能会议的副主席。此外他还担任过美国总统科学顾问委员会顾问，以及联合国科学委员会顾问等职务。

拉比一生享有崇高的荣誉。他接受了普林斯顿大学、哈佛大学等许多著名大学授予的荣誉博士学位。他除了赢得科学上的最高奖——诺贝尔奖之外，许多学术团体和政府部门还给予他很多的奖赏，这里不一一列举。但值得提出的是他在晚年的时候，美国物理教师协会授予他 1981 年奥斯特奖章，以表彰他在培养人才方面的卓越贡献^[9]。拉比对此感到特别欣慰。的确，拉比对他的学生的影响是非常深刻的。正如 Schwinger 所说，他对原子和核的磁矩，特别是对角动量的量子理论的长期入迷，正是由于早期跟拉比接触的结果。Ramsey 在接受诺贝尔奖的演说词中，开始就提到要感谢他的导师拉比。1989 年 1 月 11 日，拉比与世长辞。Ramsey 对拉比作了这样的评价：“他是一位世界物理学的杰出领导人，又是一位令人深受鼓舞的教师”^[10]。

- [1] G. L. 特里格著，华新民等译，二十世纪物理学的重要实验，科学出版社，(1982),84.
- [2] Nobel Lectures (Physics: 1942—1962), Elsevier, (1964),8.
- [3] I.I. Rabi et al., *Phys. Rev.*, **55**(1939), 526.
- [4] N.F. Ramsey, *J. Research of NBS*, **88**(1983),301.
- [5] 林木欣，大学物理，No. 1(1984),29; No. 2(1984),34.
- [6] J.H. Van Vleck, *Magnetic Resonance Preceedings of the International Symposium*, Plenum Press, (1970), 1.
- [7] 见文献[1]，第七、八章。
- [8] 郭奕玲、林木欣、沈慧君，近代物理发展中的著名实验，湖南教育出版社，(1990),369.
- [9] J. S. Rigden, *Am. J. Phys.*, **50**(1982), 971.
- [10] N. F. Ramsey, *Am. J. Phys.*, **56**(1988), 875.

量子场论的前沿问题国际研讨会简讯

受国家自然科学基金委员会和国家科学技术委员会攀登计划“90 年代理论物理学重大前沿课题”的资助，中国高等科学技术中心和中国科学院理论物理研究所于 1993 年 5 月 10 日至 17 日在北京联合举办了“量子场论的前沿问题”国际研讨会。共计 50 余人参加了会议。出席会议的除了来自全国(包括台湾地区)的物理学家外，还有来自美国、加拿大、法国、瑞士、意大利和丹麦的活跃在第一线的专家。会上共作报告 36 人次。内容涉及量子场论各个方面的最新进展，其

中包括共形场论、弦理论和矩阵模型、拓扑量子场论、量子群及量子空间的微分运算、非线性 σ 模型、自旋系统、低维统计模型、离散群上的规范理论、非对易几何和粒子物理模型等方面。研讨会气氛活跃，讨论深入，学术水平高，不仅国内学者收益匪浅，一些应邀前来报告的海外学者也有很大收获，他们向我们表示了进一步合作交流的意向。

(中国科学院理论物理研究所 吴可)