

# 稀气体中发现自旋波

阎守胜

(北京大学物理系)

## 一、意外的发现

在凝聚态物理中,自旋波是人们很熟悉的现象。以铁磁材料为例,在绝对零度,系统处于基态,所有的电子自旋磁矩规则地排列于易磁化方向[图 1(a)].当由于某种扰动(如温度的升高),使任一磁矩方向有偏离时,它将绕着易磁化轴进动。由于自旋间的相互作用,这种进动会影响到近邻,像波一样地传播开去,这种自旋的整体运动称为自旋波[图 1(b)],这里相邻自旋间的关联是最重要的。事实上原子间存在

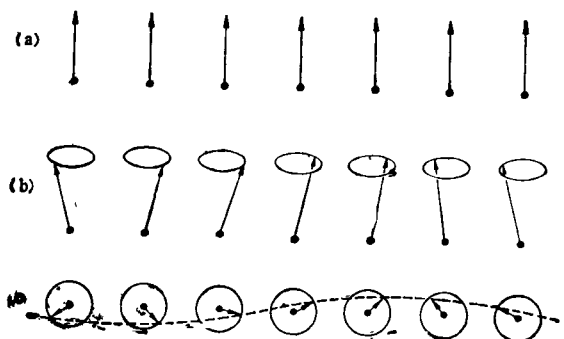


图1 自旋链列上的自旋波

(a)  $T = 0$ 时,规则的排列; (b)自旋波示意;  
(c)俯视图

的只是库仑作用,原本与自旋取向并无关系。由于原子波函数的相互交叠,各个电子均有一定的几率处在空间同一地点,无法加以区分,因而在写出总波函数时要考虑全同粒子的交换对称性,对电子系统来说,这是反对称的。波函数的轨道部分相对称时,自旋部分要反对称,或相反。对这两种情况,系统的能量不同,因而相互作用和自旋的相对状态有关,自旋间有所关联。

这是一种量子力学的相互作用,称作交换作用。交换作用是在低温下使所有自旋磁矩平行排列,通常称为自发磁化的原因,也是自旋波存在的原因。

在其它一些系统,例如液体 $^3\text{He}$ 和顺磁性金属中的导电电子里也看到了自旋波的存在。所有这些系统的共同点,在于它们都是浓的简并的(即量子性的)系统。粒子的德布罗意波长至少和最近邻距可相比拟,相邻粒子波函数有相当的重叠,需要考虑粒子的全同性。

对于稀气体,原子在大多数时间内远离其近邻,近邻距要比德布罗意波长大得多,波函数没有交叠,可以根据粒子所在的区域把它们编号分开。通常认为不需要考虑全同粒子的交换对称性,是一种非简并的经典气体。如果加外磁场,使气体中所有原子的磁矩取向,其中任一方有所偏离时,按照经典的处理方法,在它和其它原子不断的碰撞中,由于相互作用原本和自旋无关,偏离了的自旋方向将得到保持,不会发生什么特别的事情。可是1984年美国Cornell大学D. Lee的小组,在稀到 $10^{16}$  atoms/cm<sup>3</sup>的“经典”气体中(浓度大约为海平面上空气的千分之一),在原子间距为几百埃,比德布罗意波长(在实验温度下约为20 Å)大一个多数量级时,确切地观察到了量子力学的集体运动模式——自旋波的存在<sup>[1]</sup>,这个意外的发现引起了人们的重视(本刊在1985年第7期“前沿”栏中有简要的报道)。

## 二、自旋极化氢( $\text{H}\downarrow$ )气体

Cornell小组实验中用的是原子氢气体,因

在低温下用强磁场使氢中的自旋取向，故称为自旋极化氢气体，常用  $H\downarrow$  表示。向下的箭头表示在自旋磁矩和磁场方向一致时，自旋方向和外磁场方向(通常假定朝上)恰好相反。

平常我们碰到的都是分子氢 ( $H_2$ )，原子氢只存在于星际空间，但当浓度大到 100 原子/ $cm^3$  时，也会复合成分子氢，原因是单个的氢原子共价结合成分子氢后能量会大大地下降。原子氢有很强的复合倾向，且氢分子也十分稳定。

从量子力学的计算知道，氢原子间的相互作用决定于电子的自旋状态。平常碰到的氢分子中，两个电子的自旋是反平行的，总自旋  $S=0$ ，称做单重态。相互作用势有一很深的吸引势阱(图 2)，在相互距离  $0.74 \text{ \AA}$  处深达  $4.75 \text{ eV}$ ，换算成热运动能  $k_B T$  ( $k_B$  是玻耳兹曼常数)，相当于温度为  $55,100 \text{ K}$ 。如果两个电子的自旋平行排列，总自旋  $S=1$ ，一般称作三重态(在磁场中会分裂成三个能量不同的状态)，其相互作用势基本上是排斥的(图 2)。如果把图中的能量尺度放大一些，实际上在距离  $4.15 \text{ \AA}$  处有一很浅的位阱，深度为  $0.56 \text{ mV}$ ，相当于温度  $6.46 \text{ K}$ ，大约是满壳层的氦原子间势阱深度的一半，吸引作用是很弱的。由于氢原子质量是氦

原子的  $1/4$ ，零点运动能要大得多(和粒子质量成反比)。氦原子系统一直到绝对零度都可以保持在液态；而自旋平行的  $H\downarrow$  系统，弱的吸引力加上强的零点运动(这相当于一种离散倾向)，却可以一直保持在气态，这是人们很感兴趣的研究对象。

$H\downarrow$  系统最引人注意的是它的统计特性。原子氢由两个紧束缚的费米子——质子和电子组成，组合起来是玻色子。1925 年爱因斯坦研究理想的(无相互作用的)玻色气体时发现，当温度降低到某一临界温度  $T_c$  时，会有宏观数量的粒子凝聚到单一的量子态，通常称为玻色爱因斯坦凝聚。目前，唯一可能的实验证据是液体  $^4\text{He}$  的超流相变，其中最主要的事实是  $^4\text{He}$  超流相变温度  $T_\lambda = 2.17 \text{ K}$ ，和算出的凝聚温度  $T_c = 3.1 \text{ K}$  十分接近。实际上两者行为有明显的差别，例如，依照理想玻色气体的理论， $T_c$  正比于  $n^{2/3}$ ， $n$  是单位体积的粒子数，压力增加时，体系浓度加大， $T_c$  应增加；而液体  $^4\text{He}$  则相反，压力增大，超流相变温度  $T_\lambda$  却降低。人们把这个差异归之于液体  $^4\text{He}$  浓度太高( $n = 2 \times 10^{24}$  原子/ $cm^3$ )，是强相互作用的系统，和理想行为有偏离。但直到现在，对这个复杂的多体问题，也还没有满意的微观理论。

$H\downarrow$  气体则不同，如果在  $0.2 \text{ K}$  凝聚，可以算出浓度  $n_c = 4 \times 10^{19}$  原子/ $cm^3$ 。  $H\downarrow$  原子之间的平均距离约  $28 \text{ \AA}$ ，要比超流相变时  $^4\text{He}$  原子间距大一个数量级，有可能在理想玻色气体的基础上，把粒子间微弱的相互作用当作小的微扰来处理，理论上可以进行严格计算。这种处理方法对于强相互作用的  $^4\text{He}$  系统是完全不可能的。  $H\downarrow$  第一次在实验上提供了一个有可能确切地观察玻色爱因斯坦凝聚的系统，这是唯一可以对超流理论进行检验的系统。特别是  $H\downarrow$  原子具有自旋，和  $^4\text{He}$  超流相比，现象可能更丰富一些。

目前人们已可较长时间地(如一小时)维持浓度为  $10^{16}$  原子/ $cm^3$  的  $H\downarrow$ ，可以达到的最高浓度为  $10^{18}$  原子/ $cm^3$ ，相当于海平面大气浓度的  $10\%$ ，还难于看到凝聚现象。尽管如此，但

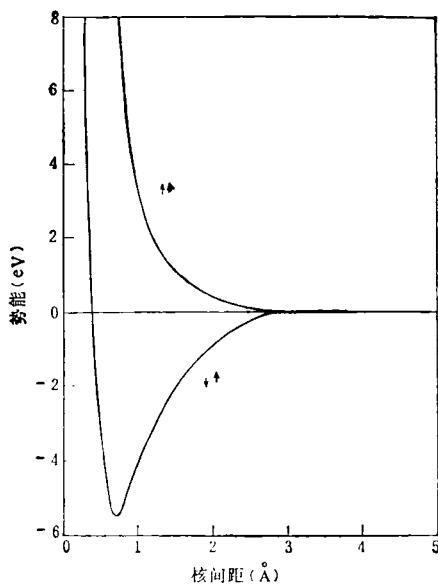


图 2 一对氢原子的相互作用势  
(图中箭头表示电子自旋方向)

由于  $H\downarrow$  系统简单, 便于理论处理, 浓度又可在很大范围内变化, 所以实际上研究工作范围已大大地扩展了, 如研究吸附和退吸附的动力学, 气体和表面的热交换, 低温下复合及弛豫的物理等。稀  $H\downarrow$  气体中发现自旋波就是这类研究工作中最令人激动的一个发现。

### 三、Cornell 小组的实验

实验的大体做法是在室温下用高频放电的方法把  $H_2$  分子拆开成  $H$  原子。使原子氢气体稳定的基本方法是用强磁场及低温使电子自旋极化。图 3 给出外磁场作用下单个氢原子的电子超精细能级图。按能量增加的次序分别叫 a, b, c 和 d 态。在 a 态中, 电子自旋和核自旋反平行排列, 电子自旋和磁场反平行, 但不纯, 混有少量和磁场平行的量子力学态。b 态中电子自旋和核自旋平行, 均和磁场反平行。在 c, d 态

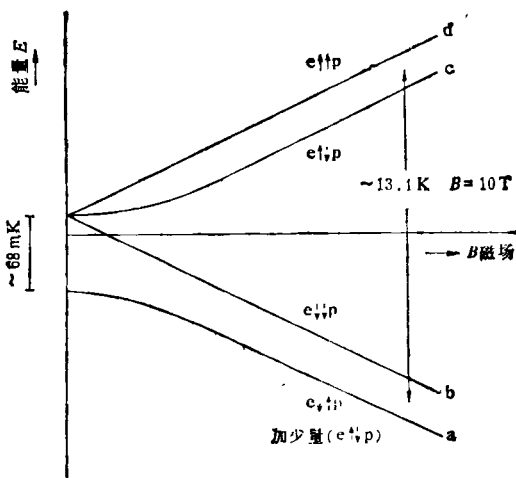


图3 孤立氢原子在磁场  $B$  中的超精细能级图  
e 代表电子, p 代表质子

中电子自旋基本上是平行于外磁场的。零场情况下, 超精细分裂  $\Delta E/k_B$  为  $68\text{mK}$ ; 磁场为  $10\text{T}$  时, 电子自旋向下和向上态能量差大到约  $13.4\text{K}$ 。这样在低温强场下, c, d 态的占据几率按玻耳兹曼因子  $e^{-\Delta E/k_B T}$  计算将极大地减小, 如在  $0.4\text{K}$ ,  $10\text{T}$  下, 比 a, b 态要小  $e^{-32} \approx 10^{-14}$  倍。物理上相当于低温强场排斥自旋和

磁场方向同向的氢原子, 吸引反向的氢原子(处在 a, b 态)。由于 a 态中混有少量反向自旋的态, 易于和其它氢原子复合, 最后只剩下 b 态的氢原子, 这是一个纯的状态。

在  $H\downarrow$  中观察到的自旋波是核自旋的集体运动。实验过程中, 电子一直处在 b 态, 自旋方向为外场所固定。核自旋磁矩要比电子的小一千倍, 在外场中能级的分裂也要小得多, 取向可以发生变化。

为了防止  $H\downarrow$  被管道或样品室的壁吸附后, 在壁上发生自旋方向反转的散射从而使  $H\downarrow$  复合, 一般采用对氢原子吸附差的聚四氟乙烯管, 把它套在从室温通向低温的管道内。样品室壁上覆上一层超流的  $^4\text{He}$  膜。 $^4\text{He}$  无自旋, 对  $H\downarrow$  的范德瓦尔斯力也很弱,  $H\downarrow$  打在上面, 既不会发生自旋方向的变化, 被吸附的几率也较小。

Cornell 小组实验中所用磁场为  $7.7\text{T}$ , 温度在  $0.16-0.7\text{K}$  之间, 这是用减压的  $^3\text{He}$  液池及致冷能力较大的稀释致冷机达到的。为了能吸收少量  $H\downarrow$  复合所发出的热, 需要大的致冷能力。实验中  $H\downarrow$  的浓度为  $10^{16}$  原子/ $\text{cm}^3$ , 是很稀薄的。样品室尺度约  $1\text{cm}$ 。在做核磁共振实验时, 本来期待的只是中心频率为  $1042\text{Hz}$  (拉摩进动频率) 的一个宽度约为  $10\text{kHz}$  的吸收峰, 然而却观察到附加了一些很窄的高的共振吸收峰(可以窄到  $100\text{Hz}$ , 如图 4 所示)。他们认为产生这些尖峰的原因是稀  $H\downarrow$  气体中有自

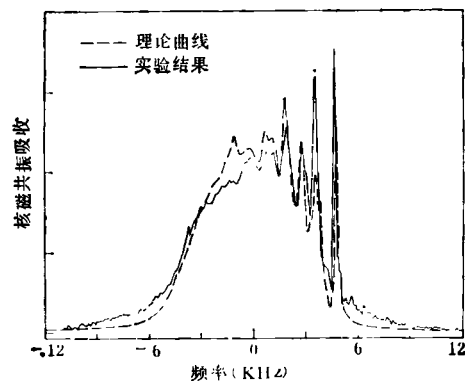


图4 Cornell 小组在稀  $H\downarrow$  气体中测得的核磁共振吸收谱(尖的共振峰表示核自旋驻波的存在, 图中频率为实际频率和拉摩进动频率之差, 虚线是理论计算值)

旋波的驻波存在。按照这种想法,根据实验的具体情况计算出的理论曲线(图4中虚线)和实验十分一致。在处理相互作用复杂的多粒子系统时,理论上常要引入一些调节参数,然而在这里却不需要这样做,这进一步说明了研究稀 $H\downarrow$ 气体系统的优越性。

#### 四、物理解释及其意义

稀 $H\downarrow$ 气体中存在自旋波的原因是,尽管德布罗意波长比原子间距小得多,但当它比原子的硬球尺寸大时,在散射的瞬间仍要考虑粒子的全同性。尽管相互作用不显含自旋,但这种全同性的考虑会导致两个原子的核自旋在碰撞时围绕其总自旋进动,称为同种自旋旋转效应(identical spin rotation effect)<sup>[2]</sup>。由于交换力十分弱,所有的核自旋并不能象在铁磁材料中那样自发排列,核自旋的取向靠外场实现。在这个条件下,气体中连续不断的碰撞,自旋相对旋转,总起来导致自旋波的出现。

事实上在1981年和1982年,法国科学家

C. Lhuillier 和 F. Laloë<sup>[2]</sup>及苏联的 E. P. Bashkin<sup>[3]</sup> 就已从理论上预言了这种现象的存在,但相当多的人持怀疑态度。听到 Cornell 小组的实验结果时,Laloë 写信给 Lee:“作为以前曾是原子物理学家的人,我很高兴地看到,不仅仅在凝聚态中,而且在稀的系统中也会表现出有趣的量子力学的运动模式。”这一点正是这个实验发现的意义所在,它立即引起了人们对稀的非简并系统的兴趣,在稀的 $^3\text{He}$ 系统中,在稀的 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合液中<sup>[4]</sup>,其中 $^4\text{He}$ 处在超流态, $^3\text{He}$ 占 $4/10^4$ ,可以看作是稀的非简并的 $^3\text{He}$ 准粒子气体,虽然不象 $H\downarrow$ 那样明显,但人们相继都看到了确定无疑的自旋波存在的证据。

#### 参 考 文 献

- [1] B. Johnson, et al, *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 1508.
- [2] C. Lhuillier, F. Laloë, *J. Phys. (Paris)*, **43** (1982), 197.
- [3] E. P. Bashkin, *JETP Lett.*, **33**, (1981), 8.
- [4] W. Celly, W. Mullin, *Phys. Rev. Lett.*, **52** (1984), 1810.

---

### 征 订 启 事

《中国物理快报》(英文版 *CHINESE PHYSICS LETTERS*)自1984年创刊以来,已获得国内外好评。为了满足广大读者的需要,科学出版社加强了对本刊的发行工作,已委托龙门科技开发公司办理本刊的发行事宜。需预订本刊1986年各期的单位可向该公司预订(全年12期,每期2.20元)。本刊国内为限量发行,每单位限订五份。汇款地址:北京朝内大街137号龙门科技开发公司。开户银行:中国工商银行东四分理处。帐号:4601184

《中国物理快报》编辑部

1985年1月15日

---

### 1986年第2期《物理》内容预告

自由电子激光器(孙陶亨);一种高分辨光谱学——光子相关谱学(董孝义);分子电子学简介(彭英才);非晶态的声子谱(郑兆勃);自旋玻璃的实验和理论综述(姚凯伦);离子束混合制备非晶态合金薄膜(柳百新);摩擦学中的表面效应(戚震中);测量绝缘材料的真正电阻值方法(李光远等);中平均功率无 $^{11}\text{e}$ 长

寿命 $^{11}\text{e}$ CO<sub>2</sub>激光器(吕惠宾等);2mm斑纹移动干涉仪的研制与电子密度的实验观测(刘轶群等);光孤子与光纤通讯(董孝义);卡文迪许实验室三十年代初的成果(金尚年等);经典力学和量子力学运动方程的复变数形式(许庆林等)。