

# 玻色 – 爱因斯坦凝聚领域 Feshbach 共振现象研究进展\*

尹 澜<sup>†</sup>

(北京大学物理学院 北京 100871)

**摘 要** Feshbach 共振现象是当前玻色 – 爱因斯坦凝聚领域中的一个研究热点. 目前在大多数低温碱金属原子气体里都已观测到 Feshbach 共振现象. 在实验里利用 Feshbach 共振可以任意改变这些系统中原子之间的相互作用强度, 从强相互排斥作用到强相互吸引作用都可以实现. 文章详细介绍 Feshbach 共振现象以及目前它在原子气体系统里的最重要的两个应用, 研究费米子气体里的超流态和有强相互作用的玻色子气体.

**关键词** Feshbach 共振, 玻色 – 爱因斯坦凝聚, 超流态, 强相互作用

## Recent studies of Feshbach resonance in the field of Bose-Einstein condensation

YIN Lan<sup>†</sup>

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** Feshbach resonance is currently a very hot topic in the area of Bose-Einstein condensation, and has already been observed in most low-temperature alkali gases. In these systems the interaction between atoms can be tuned from strong repulsion to strong attraction. A detailed overview is given of the Feshbach resonance and two of its most important aspects, the superfluid phase in Fermi gases and the strong-interaction regime in Bose gases.

**Key words** Feshbach resonance, Bose-Einstein condensation, superfluid, strong interaction

### 1 引言

在 20 世纪 20 年代, 随着量子力学的诞生和发展, 物理学家们发现自然界的粒子可以分成玻色子和费米子两类, 它们分别满足不同的统计规律. 在随后的几十年中, 主要通过对固体中电子体系的研究, 对费米子的多体系统有了很多的认识. 然而对玻色子多体系统的研究相对较少, 这主要是因为实验上除了液氦外几乎没有其他系统可供研究, 而且液氦系统具有液体本身的复杂性, 至今仍没有一个微观理论能够比较全面地解释液氦的各种性质.

在 20 世纪 90 年代, 对碱金属原子气体的冷却技术取得了突破性的进展, 在这些系统里成功地观测到玻色 – 爱因斯坦凝聚现象, 先后有六位科学家因此获得了诺贝尔物理学奖. 在最近十年里, 玻色 –

爱因斯坦凝聚领域一直是物理学中发展最快的一个领域, 不仅为研究玻色子多体系统提供了一个平台, 而且也为研究中性费米子多体系统创造了条件. 随着光格子势阱和 Feshbach 共振等技术的发展和成熟, 实验上已经可以研究一些以前无法研究的多体系统. 在以下篇幅, 本文将详细介绍 Feshbach 共振现象以及目前它最重要的两个应用, 研究费米子气体的超流态和有较强相互作用的玻色子气体.

### 2 原子气体系统中的 Feshbach 共振

Feshbach 共振<sup>[1]</sup>最早是物理学家 Feshbach H

\* 国家自然科学基金(批准号 90303008)资助项目

2004-02-05 收到

† E-mail: yinlan@pku.edu.cn

在原子核物理研究中首先发现的. 在 20 世纪 90 年代初, Tiesinga 等预言了在碱金属原子气体系统中存在有 Feshbach 共振<sup>[2]</sup>, 他们提出在这些系统里原子碰撞的散射长度可以通过改变磁场来调节. 在 1999 年, MIT 的 Ketterle 实验组首先在钠系统中观测到了 Feshbach 共振<sup>[3]</sup>. 在最近的几年里, 在其他碱金属气体里也先后观测到了 Feshbach 共振, 其中玻色子系统有<sup>23</sup>Na、<sup>85</sup>Rb、<sup>87</sup>Rb、<sup>7</sup>Li、<sup>133</sup>Cs 等, 费米子系统有<sup>40</sup>K、<sup>6</sup>Li 等. 目前 Feshbach 共振已被应用到玻色-爱因斯坦凝聚领域里的多个方面.

Feshbach 共振的出现是由碱金属原子的特殊结构造成的. 在碱金属原子中, 最外层电子只有一个电子. 当两个碱金属原子碰撞时, 它们总的电子自旋可以处在单重态或三重态. 由于原子核的磁矩远小于电子磁矩, 原子总的磁矩主要是由电子磁矩决定的, 所以在双原子系统中三重态的磁矩远大于单重态的磁矩. 当有磁场时, 三重态里最大的塞曼能绝对值远大于单重态的塞曼能绝对值, 因此通过调节外加磁场可以改变三重态和单重态的能量差别. 一般来说, 在气体里的大多数原子中任两个原子都处在自旋是三重态的散射态上, 有少量原子结合成自旋单重态的双原子分子, 所以通过改变磁场大小可以使双原子分子态能量接近散射态. 当散射态和分子态能量相同时, 系统里发生 Feshbach 共振, 此时原子的散射长度发散. 在原子气体中, 散射长度与原子之间的相互作用强度成正比. 所以在有 Feshbach 共振的系统里, 可以改变磁场来调节原子的散射长度和原子之间的相互作用强度. 两碱金属原子系统的能量随两原子之间距离的变化见图 1.

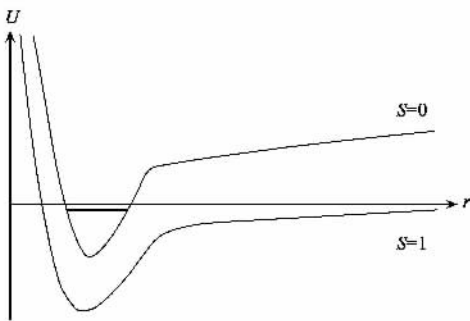


图 1 两碱金属原子系统的能量随两原子之间距离的变化关系. 图中横轴下的粗线段代表总自旋单重态 ( $S=0$ ) 的一个分子态的能级. 当磁场改变时, 它可以和自旋三重态 ( $S=1$ ) 的散射态能级(横轴位置)重叠, 此时系统中发生 Feshbach 共振.]

在 Feshbach 共振系统中, 散射长度  $a$  随磁场  $B$

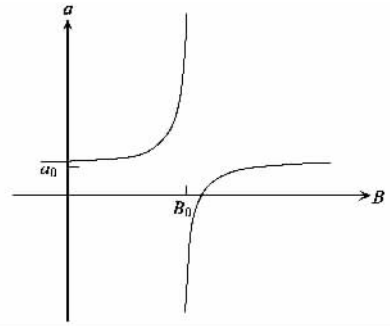


图 2 在 Feshbach 共振附近散射长度随磁场的变化关系

的变化关系(见图 2)可以用以下的简单公式来描述,  $a = a_0 \left( 1 - \frac{\Delta}{B - B_0} \right)$ , 其中  $B_0$  是共振发生的磁场位置. 当远离共振时, 散射长度趋于一个恒定值  $a_0$ ; 当靠近共振时, 在  $B_0$  两侧, 散射长度分别向正无穷和负无穷发散, 发散宽度  $\Delta$  是一个常数. 利用 Feshbach 共振可以使散射长度达到任何一个值, 任意地改变原子间的相互作用, 所以目前 Feshbach 共振在玻色-爱因斯坦凝聚领域应用地非常广泛.

### 3 有 Feshbach 共振的玻色气体

玻色气体的多体理论是在 20 世纪 50 年代发展起来的<sup>[4]</sup>. 它解决的第一个难题是如何处理原子间的硬核势. 两个原子之间存在有范德瓦耳斯力, 当它们之间的距离比较近时, 它们的相互作用趋于无穷大, 被称作硬核势. 由于有发散性, 硬核势很难被直接用于微扰计算. 李政道和杨振宁等首先解决了这个难题, 他们发现可以用一个简单的接触势代替硬核势来进行理论计算, 这个接触势的大小和原子的散射长度成正比. 这种用有效的相互作用势代替微观势的方法正是现代理论物理中广泛采用的建立有效场理论方法的一个雏形.

对于三维有排斥作用的玻色气体, 传统理论有以下几个主要结果 (1) 在转变温度下, 系统中存在有玻色-爱因斯坦凝聚 (2) 系统的基态除了凝聚部分外还包括和 BCS 波函数相似的量子亏缺 (3) 系统的低能元激发是声波, 声频和波矢的大小成正比 (4) 所有的物理量都可以通过微扰论进行精确计算, 微扰参数是气体参数  $\sqrt{8\pi n a^3}$ , 其中  $n$  是原子密度,  $a$  是散射长度. 虽然传统的玻色气体理论发展得很完善, 但是它也有美中不足的地方. 传统的玻色气体理论只适用于稀薄的气体, 即气体参数小于 1 的情况. 对于有强相互作用 ( $\sqrt{8\pi n a^3} > 1$ ) 的玻色气

体,传统理论无法处理.

在目前实验里研究的碱金属原子气体都是稀薄的气体.当前的一个研究方向是利用 Feshbach 共振增大散射长度,以达到强相互作用区域来进行研究.虽然实验里在强相互作用区域还不能使系统足够稳定进行研究,但是在稀薄的情况已经发现了和传统理论存在差异的新颖现象.由于 1998 年, Ketterle 实验组首先在钠系统中通过测量原子非弹性散射速率发现了 Feshbach 共振<sup>[3]</sup>. 实验中的原子气体都是被势阱束缚的亚稳系统,非弹性散射导致原子从系统中丢失,而丢失速率随散射长度的增加而增加,所以非弹性散射速率的峰标志着 Feshbach 共振的位置. Ketterle 等在实验中发现原子丢失速率比理论估算要大许多,这也对实验上研究强相互作用区域造成了很大困难,因为在强相互作用区域很难有足够的时间来进行观测. 2002 年, Wieman 实验组利用 Feshbach 共振使<sup>85</sup>Rb 原子气体中的散射长度有一个方波似地变化,当散射长度稳定后他们发现原子数目在周期性的振荡,而振荡频率正是双原子分子的能量<sup>[5]</sup>. 由于粒子不能无中生有,唯一合理的解释是系统中粒子除了处在原子态外还可以处在双原子分子态,所以如果忽略粒子的丢失,总的粒子数是守恒的. 当时还没有直接观测双原子分子的实验手段,这个实验成为证明系统中存在分子态的间接证据. 去年我们用多体理论成功地解释了这两个实验的结果<sup>[6]</sup>. 我们发现在 Feshbach 共振附近有弱相互作用的玻色气体和传统的稀薄气体有很多相同之处,但也有不同的地方,最主要的不同点是在 Feshbach 共振附近的玻色气体有一个分子类型的元激发,这正是 Wieman 实验组观测到的原子数目振荡对应的激发模式. 此外,由于分子能量比原子能量低,系统中任三个原子会经过互相碰撞最后形成一个双原子分子和一个原子,并保持能量和动量守恒,这个过程被称作三体重组过程. 三体重组过程是造成此系统中粒子丢失的主要原因,我们计算的三体重组速率和 Ketterle 实验组测量的粒子丢失速率吻合.

在过去的一年中,对有 Feshbach 共振的玻色气体又有了新的实验进展. 在<sup>85</sup>Rb 系统中, Wieman 实验组发现当接近强相互作用区域时原子数目的振荡频率和双原子分子能量出现差异<sup>[7]</sup>,他们认为这是由于相互作用增强所导致的,目前尚没有令人满意的解释. 在钠系统中, Ketterle 实验组成功地将原子从系统中剔除,从而得到了纯分子系统<sup>[8]</sup>,观测到了分子的玻色-爱因斯坦凝聚. 而理论上对有强相

互作用的玻色气体的研究还处在探索阶段,因为强相互作用历来是理论物理中的难题之一. 当前比较流行的观点是当散射长度趋于正无穷时玻色气体会费米化,指的是玻色-爱因斯坦凝聚会消失,而且系统的能量密度会和粒子密度的  $5/3$  次方成正比,与理想费米气体的能量密度关系相似, Heiselberg 等用试探性波函数法得到了这一关系<sup>[9]</sup>. 然而至今仍无一个严格的理论来证明费米化的观点,有强相互作用的玻色气体性质仍然是一个谜.

## 4 有 Feshbach 共振的费米气体

随着玻色-爱因斯坦凝聚领域的发展,冷却玻色气体的实验技术现在已成功用于冷却费米气体. 和固体中的电子系统相比,费米气体有很大的不同,费米原子没有电荷因而在磁场中只有塞曼效应而没有轨道耦合,而且原子间的相互作用是短程的,和另一个中性低温费米系统<sup>3</sup>He 液体相比,费米气体结构简单,不具有液体本身的复杂性,更便于研究多体效应. 目前利用光格子势阱可以在费米气体中束缚多个自旋态,这是在<sup>3</sup>He 系统所无法实现的. 因此研究各种各样的费米气体性质也是目前玻色-爱因斯坦凝聚领域中的一个热点,其中最令人关注的是实现费米气体的超流态. 在<sup>3</sup>He 系统中存在着非常奇特的超流态,人们普遍期待在费米气体的超流态会有新颖的实验现象出现. 实现超流态需要费米子间有相互吸引作用,而且吸引作用越强越好,以便提高超流态的转变温度,有利于实验观察. 目前只有通过利用 Feshbach 共振技术才能增强原子的相互吸引作用.

Jin 实验组首先在<sup>40</sup>K 中开始研究费米气体系统,他们第一个把费米气体冷却到费米温度附近,达到量子简并区间并观测到库仑阻塞现象<sup>[10]</sup>. 现在世界上至少有 5 个实验组在研究和超流态有关的冷费米气体,但大多数研究的是更为简单的<sup>6</sup>Li 系统. 目前几乎所有这些实验组都采用光格子势阱来束缚两个自旋态,而且用 Feshbach 共振技术来改变原子之间的相互作用. 除了实现超流态外,研究有强排斥相互作用的费米气体也是这个领域的一个重要方向. 去年 Grimm 实验组首先在有强排斥相互作用的费米原子气体里观测到双原子分子的玻色-爱因斯坦凝聚<sup>[11]</sup>. 他们首先利用 Feshbach 共振使原子间具有较强相互吸引作用,再把系统进行冷却,最后再利用 Feshbach 共振使原子之间有强相互排斥作用,这时有超过一半的原子跑到了双原子分子态上并形成了分子的玻色-爱因斯坦凝聚. 此外在有强排斥相互作用

的费米气体里有几个实验组先后都观测到了一个比较奇特的现象,即离 Feshbach 共振越近分子的寿命就越长,这和玻色气体形成了鲜明的对比,在玻色气体中离 Feshbach 共振越近粒子丢失越快.最近在实现超流态方面最近有了重大突破,2004 年 1 月底 Jin 实验组报道他们成功地观测到了费米气体的超流态<sup>[12]</sup>.在<sup>40</sup>K 系统中,他们把原子气体冷却到约 0.08 倍费米温度,然后利用 Feshbach 共振快速地把相互作用从强吸引作用变到排斥作用,使得大量原子转到分子态上,这时他们看到分子凝聚的形成.和以前关于分子凝聚的实验相比,他们的实验的不同之处在于快速地用 Feshbach 共振来改变原子相互作用,这样粒子密度分布还来不及改变,只是许多原子结合成双原子分子.在这个实验里,分子的凝聚可能对应着原系统中原子对的凝聚,间接说明原来的费米气体可能处在超流态,然而目前还缺乏直接证据.

从理论观点来看,实验系统中可能观测到的费米子超流态和传统超导体中的 BCS 超导态非常相似,它们都是配对态,在 BCS 超导态中自旋相反的两个电子配对,在费米气体中超流态两个自旋不同的费米原子配对.费米气体的独特之处是在 Feshbach 共振附近不仅有原子对,还有双原子分子,而且原子之间有非常强的相互吸引作用,目前还没有一个令人满意的理论来描述这一复杂体系.此外,对于超导体,Leggett 曾经提出一个从 BCS 到玻色-爱因斯坦凝聚的理论<sup>[13]</sup>,他指出当相互作用从弱变强时电子会从配对逐渐变成双电子分子,但在超导体

中一直没有观测到这个现象.在费米气体中,当系统通过 Feshbach 共振,原子间相互作用是从吸引作用变成排斥作用,而系统中发生了从原子配对态到分子玻色-爱因斯坦凝聚的转变,现在实验上观测到这一转变比超导理论中的度跃变化得更快.

## 5 展望

当前在玻色-爱因斯坦凝聚领域里关于 Feshbach 共振的研究进展非常快,竞争也很激烈.Feshbach 共振技术的成熟为研究以前无法研究的有强相互作用的原子气体和原子分子混合体创造了条件.随着分子玻色-爱因斯坦凝聚和超流态的实现,会有更多新颖的实验体系被研究,更多的现象将被发现,这将加深人们对基本凝聚态体系的认识.

## 参考文献

- [ 1 ] Feshbach H. *Theoretical Nuclear Physics*. New York : Wiley , 1992
- [ 2 ] Tiesinga E *et al.* *Phys. Rev. A* ,1993 ,47 :4114
- [ 3 ] Inouye S *et al.* *Nature* ,1998 ,392 :151
- [ 4 ] Fetter A L *et al.* *Quantum Theory of Many-Particle Systems*. San Francisco : McGraw-Hill , 1971. 218
- [ 5 ] Donley E A *et al.* *Nature* ,2002 ,417 :529
- [ 6 ] Yin L *et al.* *Phys. Rev. A* ,2003 ,68 :033608
- [ 7 ] Claussen N R *et al.* *Phys. Rev. A* ,2003 ,67 :060701
- [ 8 ] Xu K *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,2003 ,91 :210402
- [ 9 ] Cowell S *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,2002 ,88 :210403
- [ 10 ] DeMarco B *et al.* *Science* ,1999 ,285 :1703
- [ 11 ] Jochim S *et al.* *Science* ,2003 ,302 :2101
- [ 12 ] Regal C A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,2004 ,92 :040403
- [ 13 ] Leggett A J. *J. Phys. ( Paris )* ,1980 ,Colloq. 41 :7

· 物理新闻和动态 ·

## 双脉冲星电磁发射的几何模型

蟹状星云是公元 1054 年爆发的超新星遗迹.在星云的中心有一颗密度极大的中子星,它的质量比太阳稍大,而直径只有 15km,一汤匙的中子星材料重达  $10^9$  吨.中子星的磁场辐射收拢到以磁极轴为中心线的窄圆锥内.像地球一样,中子星也有自转,自转轴与磁极轴并不重合.这导致中子星的发光圆锥绕自转轴进动.每当光锥扫过地球,我们将看到一次脉冲闪光,脉冲星实际上就是快速旋转的中子星.蟹状星云内的中子星,其自转周期是 33ms,因此每秒我们将看到 33 次脉冲闪光.

2003 年 12 月—2004 年 1 月,天文观测的一项国际合作研究,发现了第一个双脉冲星体系——J0737-3039A 和 B [见物理, 2004(5) 322].A 星和 B 星围绕它们的质心作轨道运动(周期 2.4 小时,速度  $\sim 0.1\%$  光速),二者的自转周期分别为 22.7ms 和 2.77s.

为了对一罕见的双脉冲星体系的发射物理进行深入研究,首先应弄清它们的运行参数,如,轨道角动量  $J$  和自转轴  $\Omega$  以及它们之间的夹角  $\Omega$  与磁极轴  $\mu$  的夹角  $\alpha$ ,发射圆锥角  $2\rho$ ,该体系地球的视线方向等等.最近,来自美国喷气推进实验室的 Jenet F A 等,作出了有关的几何模型.研究者认为,A 星辐射能量的速率约为 B 星的 3000 倍,当 A 星的发射圆锥扫过 B 星,B 星因受激可导致自身的辐射强度增大近二个量级.考虑地球的相对方位,Jenet 等的计算解释了 B 星在其轨道运动中辐射周期性增强的观测数据.Jenet 的计算还给出,A 星自转轴绕轨道角动量方向进动的周期是 75 年.据此,Jenet 预言,若干年后这一双脉冲星系统从地球上不再可见.

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Nature 2004 428 900 919)