

里德伯原子

张志三

在人们通常的概念中,原子是很小的,它的尺寸比一个埃多一点(一埃等于 10^{-10} 米),近似呈球形。但近些年来,人们利用激光技术与电子束技术可以制造出很大的原子,其大小可相当于生物学分子那样,达微米(10^{-6} 米)的量级。制造方法是把原子中的一个电子激发到接近于电离极限的能级上。在这种情况下,原子中的被激发了的电子远远地离开了原子实(原子中的其余电子同原子核合在一起的总称,带有正电荷)。具有这样电子的原子称为里德伯原子(Rydberg atoms)。用量子理论的术语来说,这种原子具有很大的主量子数 n ,也可以说 n 越大,里德伯原子也越大。

目前,在实验室中制备出的里德伯原子的主量子数 n 约为200。这似乎是原子物理中的新鲜事。而事实上,在本世纪六十年代中期,天文学家便观测到星际空间存在着里德伯原子,并且确定出有的里德伯原子的 n 可达250。这比目前实验室制造的里德伯原子还要大,真可谓“天工夺巧,人莫能及”了。

从经典物理的观点来看,里德伯原子中的被激发的电子沿着很大的轨道围绕原子实而运转,有点像太阳系中的行星围绕太阳运转那样,所以里德伯原子也称为行星式原子。自七十年代以来,里德伯原子的研究工作颇为热烈,至今其势不衰。现已积累了大量有关里德伯原子的资料。

里德伯原子的主要特点是它们的结合能很弱,因而其光谱学性质及量子态行为与处于低激发态的原子相比有很多不相同之处。其中之一表现在里德伯原子同很弱的外场(电场或磁场)之间的相互作用。这种相互作用的大小和里德伯电子同原子实之间的相互作用大小可为同数量级的,甚至大于 $1/r$ 库仑相互作用,因而里德伯原子的光谱发生很大变化。理论与实验对此都作了充分证明。以磁场对里德伯原子的光谱的影响为例,当被激发的电子的能量不断增加并且通过电离能级时,里德伯原子的光谱演变成类似朗道光谱的结构。也就是说,在光谱中出现一组近乎等距离的共

一起来。我们还没有这种理论,要得到这种理论,还需要走很长的路,但我们确已知道该理论应具有许多特性。

现在,如果你相信宇宙并非任意的,而是由一些确切的定律来支配的,那么你最终不得不把这些部分理论合成为可以描述宇宙中万物的大统一理论。从文明的黎明开始,人类就不曾满足看到无联系的和不可解释的事物。他们渴望了解这个潜在的、有序的世界。

振线,谱线之间的距离正比于磁场的强度。尽管这令人惊讶的现象至今尚无完善的解释,但它在天体物理中却很有意义:里德伯原子在中子星附近会经受很强磁场的作用。在实验室中进行这种模拟研究,有可能帮助人们了解特殊环境对它们动力学性质的影响,加深对其光谱的理解;同时也为了解星际空间的物理环境提供知识。

外电场(斯塔克场)同里德伯原子的相互作用也很值得关注。库仑场同斯塔克场相互叠加所引起的场电离效应已有了一套解释。一般承认,场电离包括两个相关的过程:当里德伯原子处于强度为 E 的电场中时,原子势能的最大值为 $V_m = -\sqrt{2E}$ 。不论原子处于哪一个量子态上,只要这个态的能量大于 V_m ,原子就会立即从这个态发生电离,这一过程可以称为经典过程;但如果原子所处的量子态的能量小于 V_m ,而又接近于 V_m 时,经由穿过势垒隧道,电子也会脱离原子而跑掉的,这一过程称为隧道电离。隧道电离有一个确定的阈,可表示为 $1/n^4$,其中 n 为有关量子态的主量子数。场电离有多方面的应用。例如可以用来准确地确定里德伯原子的各个不同的量子态的能级位置,因而这种测量方法既可作为探测器,也可作为分光计。同时,还能利用场电离效应来探测极少数原子,甚至单个原子的存在。这种方法十分灵敏,又比较简单,其用途也很广。对被激发的原子,在其发射荧光而衰落之前,加之以直流电场,该原子便被电离,然后探测电子或离子。因为每一个量子态都有确定的电离阈,记录下所施加的电场也就知道电离是在哪一个激发态发生的。

里德伯原子的辐射性质同低激发原子也有区别,而且随着里德伯原子的大小及结合能的强弱变化而变化。当激发能越来越接近电离极限时,量子态的密度也越来越大,相邻能级之间的距离便越来越小;因而与之相互作用的波长也越来越长,从红外逐渐扩展到微波区域。此外,里德伯能级的寿命很长,并且同主量子数

今天我们仍渴望了解为什么我们会生存在这里,我们来自何方。人类对知识的最大愿望,就是对我们的无止境的追求给出公正的评价。我们的目标无非是能对我们生存在其中的宇宙作一个完整的描述。

(译自 Stephen W. Hawking 的 A Brief History of Time, pp.1—14)

(鲍丙豪译 扬建邺校)

数 n 的三次方成正比,因此,里德伯能级之间的跃迁具有极窄的共振宽度。这一情况对于高分辨光谱的研究颇为有利。事实上,最近已经有人分开高里德伯能级的精细结构,其精确度非常之高,因而有人建议把这种高精度的测量用于红外与微波区域的基本度量学中。另一方面,里德伯能级之间的跃迁具有很大的电偶极矩矩阵元,因此它们同红外与微波辐射之间的相互作用十分灵敏。这一情况有可能发展成高灵敏的红外与微波场的探测器。

近年来对里德伯原子的辐射性质的研究结果令人感兴趣:人们发现在高于选定激发的里德伯能级的其它能级上也有粒子布居,并且不大的室温变化会引起这些更高里德伯能级上粒子数目的变化。这些超激发的里德伯原子的存在为前所未有的。实际上,其机理并不难解释:已制成的里德伯原子能够额外地吸收室温下微弱的黑体辐射,从而形成具有主量子数 n 更大的里德伯原子。有人正试图利用这种现象来探测微弱辐射场的存在。

碰撞过程对于里德伯原子光谱的影响是一个重要课题。利用在实验中有可能任意选定激发态及跃迁频率的事实,可以研究需要加以控制的一些过程。举例来说,当两个里德伯原子同长波长的电磁辐射发生相互作用时,如果辐射场的频率同两个里德伯原子的不同频率之差相匹配时,便可观测到共振特性:在辐射场中,碰撞原子之间会发生能量转移,从而使某一原子的某一能级上的粒子数目成为多数,严格控制这种能量转移过程,可以使更多的粒子占有该能级;于是便为产生激光辐射提供了条件。

最近,利用短脉冲激光产生里德伯波色(Rydberg wavepackets)很引人注目。自量子力学发展的初期至今,关于物理系统的量子描述与经典描述之间的对应与联系的问题,一直吸引着物理学家。里德伯波色的研究提供了一个新的方向来检验两者的相互关系。这些波色为一些高激发的里德伯态的相干叠加。在此种情况中海森伯测不准原理的限度可以近似地减到最小。波色的径向坐标与角变量成为确定的。这些有局限性的波色的行为类似经典粒子,它们的运动遵从牛顿运动定律。与此同时,这些波色又表现出纯量子性质,例如具有量子相位差,并且出现相干性(差拍现象)。现在的激光技术比较容易地从实验上来研究这些性质。事实上,几年前在化学物理中,便观察到应用短脉冲激光建立起这种最小限度不确定的波色。

在理论上,就类氢原子而言,已建立起一个简单模型来说明短脉冲激光对原子的激发中,里德伯波色的形成过程。其主要观点是:借助单光子跃迁,原子基态同所有的里德伯能态之间发生耦合。结果证明,短脉冲激光建立的波色是相干的,具有量子性质;此外,波色会演变成原子偶极矩的振荡。这种振荡的偶极子

为荧光之源。经过少数几次经典振荡之后,波色出现了复杂的量子拍,又呈现出相干性。因此,测量荧光的强度可能为量子效应与经典效应之间相互影响提供启示。

为简明起见,将已确定的里德伯原子的性质用表1表示:

表1 里德伯原子的一些性质

量	对 n 的依赖关系
结合能	$-Rn^{-2}$
轨道半径	$a_0 n^2$
几何截面	$-\pi a_0^2 \omega^4$
偶极矩	αn^2
极化率	αn^7
辐射寿命	αn^3
电场中的斯塔克分裂, $E = 1kV/cm$	$\Delta W \propto n(n-1)R$
场电离的临界场强度 E_c	$E_c = \pi e_0 R^2 e^{-3} n^{-4}$

表中的 R 为里德伯常数, a_0 为玻尔半径, n 为主量子数。

具有单个里德伯电子的原子的研究方兴未艾,双电子激发的里德伯原子的研究也开展了。这后一类原子的光谱颇为复杂。一方面是具有大数目的可能的量子态,另一方面多数量子态位于第一个电离极限以上,因而会发生自电离现象。自电离的发生一般是经由两个电子之间的静电相互作用,因而自电离的速率取决于两个电子互相接近的程度,但这只是问题的一个方面。当双激发电子的轨道相互接近时,两个电子的运动成为高度相关的。了解相关电子的运动情况,即它们的能级性质是重要的研究内容。就低位置的双激发态而言,理论计算出的能级位置与跃迁几率同实验结果相一致。但当两个电子的能级很高并且都接近原子的双电离极限时,现有的理论在某种程度上失效了,相关的新特点开始起作用。现在出现的一个重要新概念是在这个区域的波函数随着激发态的变高也变得更为收敛集中,并且当激发态趋于双电离极限时,波函数成为准定域的了。这一新特点的发现及随之而生的把大数目的态的效果混合在一起的观点,也许是意味着一种具有十分广泛现实意义的新物理概念。

(上接第16页)

Nd-Fe-B 永磁材料上的应用是一个很重要的方面。

我国近年来稀土工业和稀土永磁材料工业发展很快。宁波、吉林、包头、鞍山、常熟、无锡、肇庆等地已建立起一批 Nd-Fe-B 永磁材料生产工厂,产品已销往世界各地。