

利用原子束研究光的力学效应

王育竹¹⁾

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

本文介绍了我们利用原子束研究光的力学效应的原理、方法和主要结果。我们测量了激光偏转原子束的原子空间分布,观察了在光场作用下原子动量的扩散,验证了二能级原子共振荧光中亚泊松光子统计分布,研究了慢原子在驻波场中的运动行为,提出了沟道原子光谱技术的新方法,并用这种方法观察了钠原子的超精细结构。

人们很早就知道光具有光压。在1619年,开普勒就曾提出太阳光的的压力使彗星的发尾总是背着太阳方向拖泄。但是光压太小,在通常的物理实验中不产生明显效应。自激光出现后,由于激光的高亮度,原子吸收和散射光子的次数增多,光的辐射压力也随之增大。光压已显著地影响原子的运动状态。因此,近年来光的力学效应研究已成为量子光学领域中十分活跃的前沿课题。目前,国际上已利用光压阻尼原子的热运动,称为激光冷却气体原子,现已获得温度极低的超冷原子气体^[1,2]。利用光压可以控制、准直和聚焦运动原子,已观察到原子物质波的衍射,称为原子光学^[3,4]。总之,光的力学效应研究为高分辨光谱、超低温原子物理等研究提供了新的研究对象和研究手段。我们小组在这个领域中做出了一些具有自己特色的工作,受到国内和国际同行的重视和好评,已经四次应邀重要国际会议的邀请,报告了我们的工作。我们主要的研究结果是:利用多光束偏转原子束验证了亚泊松光子统计规律;观察到行波场中的原子动量扩散;观察到驻波场中负失谐条件下原子速度聚束和正失谐条件下的原子沟道效应;提出并实现了沟道准直原子光谱技术;观察到钠原子超精细结构。

一、多光束偏转原子束验证半经典辐射压力的理论

人们早已建立了半经典辐射压力的理论^[5-7],但是80年代初尚无足够精确的实验结果与理论比较^[8,9]。我们用多光束偏转原子束的方法测量了辐射压力的大小,并与理论进行

了比较^[10,11]。为了说明这个实验,首先介绍一下什么是辐射压力。原子在激光照射下,吸收一个光子后跃迁到激发态,同时也获得了一个光子动量。然后,原子又自发辐射一个光子回到基态。但自发辐射是各向均性的,所以原子在自发辐射时所得到的光子反冲动量多次平均为零。原子在吸收和发射光子的过程中净得一个光子动量,这就形成了光的辐射压力。我们的实验有两个特点:一是用多光束,增大了原子束偏转的效果;二是用激光诱导原子发光的方法,探测偏转原子在空间的分布。由于采用了光学探测方法,我们得到了到目前为止最佳的实验结果。我们的实验系统的分辨率很高,可以分辨一个光子反冲所引起的原子速度变化,信噪比也较前人提高一个量级。实验结果与理论计算完全一致,说明了半经典理论在共振条件下得到的结果是正确的。由于偏转原子的偏转量和原子与光束作用时间有关,即与原子速度有关,从而实现了一种利用多光束偏转原子束测量原子速度分布的新方法^[11]。

二、行波场中原子动量扩散与亚泊松光子统计规律的验证

在激光照射下,原子不仅受到光的辐射压力,而且原子的动量还发生扩散,这个过程相当于光场加热原子,在利用激光冷却原子时,原子的动量扩散限制了激光冷却的极限温度,因此,从实验上观测到动量扩散就十分重要。为什么

1) 本文作者于1989年获中国物理学会第一届饶毓泰物理奖,其获奖成果即本文所介绍的研究工作成果——编者注。

发生原子的动量扩散呢？因为原子每吸收一个光子，总要自发辐射一个光子而返回基态。但是，自发辐射的光子在空间的发射方向上是随机的，单位时间发射的光子数在时间上是起伏的。因此，原子发射光子时所受到的光子反冲在空间上也是随机的，在时间上是起伏的，具有布朗运动的形式。原子在光的照射下，其动量不断扩散。从另一方面看，原子发射光子所遵守的统计规律是量子光学中一个重要问题。量子理论预言^[12,13]，原子在共振激发下，发射光子数的统计分布是亚泊松分布，即在给定时间间隔内发射光子数的方差小于平均光子数，称为亚泊松分布。从实验上证实这个理论预言是十分重要的，它能说明用量子电动力学分析辐射场所得到的结果的正确性。由于原子动量扩散与发射光子相联系，所以它们遵守相同的统计规律。因此，可以通过测量原子的动量扩散验证光子发射的统计规律。有人曾提出过利用激光偏转原子束方法验证光子统计规律^[14]，但在所提的方法中，原子速度分布引入的误差很大，动量扩散效应湮没在速度分布的宽度之中，长期未能实现^[14]。我们提出了用多光束偏转原子束的方法验证亚泊松光子统计规律^[15,16]。图1表示了这种方法的基本物理思想。原子在往返多光束作用下，平均光压不改变原子的运动轨迹，不论原子具有什么速度，均不改变原子束的发散角。但是，自发辐射使原子动量扩散，改变了原子束的发散角，在改变了的发散角中，携带着光子发射的统计信息。我们利用这种关系，从实验上测出了度量光子统计分布的 Q 参量。我们测出的 Q 小于零，证实光子统计分布为亚泊松分布，支持量子电动力学的结论。另外，这种方法能从原子速度分布中分离出原子动量扩散的信息，因而使我们第一次在行波场中观察到原子动量扩散现象。

三、慢原子在驻波场中的运动

当前，国际上激光冷却中性原子的研究获得极大成功^[1,2]。利用“光学粘胶”（Optical Molasses）使钠原子的热运动被冷却到 $40\mu\text{K}$

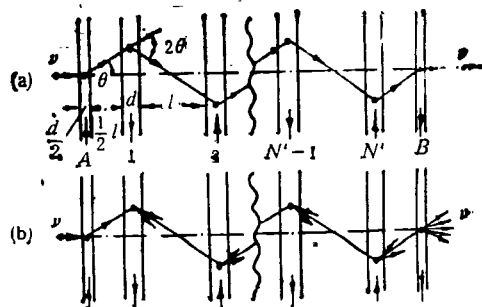


图1 多光束验证光子统计规律原理
(a) 平均光压作用下原子运动的轨迹；
(b) 原子动量扩散和原子束发散

以下^[2]，远远低于理论计算所得到的极限温度 $240\mu\text{K}$ 。这个事实说明，在理论上对激光冷却的机制，或慢原子在激光场所受到的光压力的性质尚不十分清楚^[1]。因此，搞清楚慢原子在光场中的运动行为是十分重要的课题。什么是“光学粘胶”呢？设有三维光束交汇于空间，原子在交汇区域内运动，不断地散射光子，原子就如同在“光子海”中运动一样，处处受到光子的阻尼，逐渐停止其热运动，这就是所谓“光学粘胶”。原子在三维光束的作用下，所受到的光压力与三维光场的强度、失谐量、偏振方向以及原子速度的大小等有关，是一个十分复杂的问题。首先要搞清楚一维“光学粘胶”，即原子束与驻波场相互作用，有助于了解三维“光学粘胶”的性质。我们让原子束垂直于驻波场的传播方向，将原子束的横向分速度看成是慢原子的运动速度，经过与驻波场作用后观察原子束横向速度的变化，就可得到一维“光学粘胶”的信息。我们用这种方法观察到在负失谐条件下的原子速度聚束^[17,18]以及在正失谐条件下的沟道原子和原子束准直等^[19,20]。这里仅介绍一下原子束准直与沟道原子的一些新现象。

驻波场对二能级原子在空间形成以半波长为间隔的势垒，在正失谐情况下，驻波场的波峰为势垒的最大点，波谷为势垒最低点。这样，沿驻波场的波节就形成了势垒沟道，如图2所示。原子束飞过驻波场时，光场沿传播方向与原子交换光子动量，使原子受到横向辐射压力，改变了原子的横向运动速度。原子受到的力由两部

分组成：一部分为偶极力，它是原子爬越势垒所受到的力，是位置的周期函数；另一部分为迟后偶极力，它是由于自发辐射改变了原子偶极矩的相位所受到的力，它与原子的运动有关，是一个耗散能量的力，如同摩擦力一样。当原子穿过驻波场时，偶极力使原子趋向于势垒的底部，沿沟道运动。同时，迟后偶极力又使原子的横向运动发生衰减。所以，原子束经过驻波场作用后就分裂成以半波长 $\lambda/2$ 为间隔进行排列的原子束组(见图 2)。

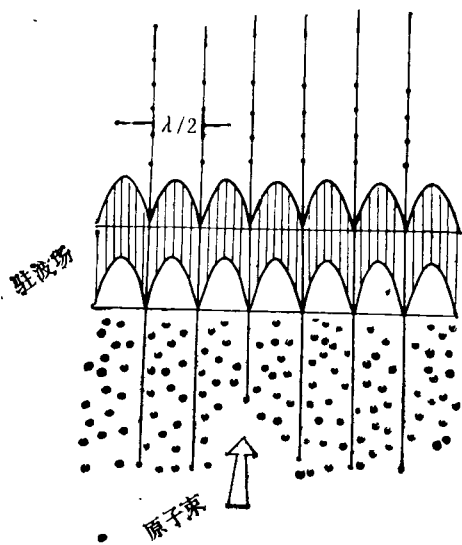


图 2 原子束穿过驻波场

由于每一原子束的横向速度被衰减，所以原子束的准直度要比原来原子束的准直度提高很多。图 3 表示实验测得的结果。图 3 中的 (a) 表示驻波场很高时得到的准直原子束。它是由沟道原子所组成，其横向速度分布的半宽度值约 0.15m/s ，比原来的 0.57m/s [见图 3 中的 (g)] 约小四倍。它对应的温度约为 $60\ \mu\text{K}$ ，比理论极限 $240\ \mu\text{K}$ 要低得多。这说明用两能级原子模型的理论仅能定性描写实验结果，不能精确解释原子的运动行为。在实验中我们还看到，当激光功率降低时，在原子束中部出现一个宽度为 0.8mm 的“肩膀”，它正好等于原子束准直孔的直径。它说明功率降低时势垒高度降低，仅能使速度小的原子被冷却并进入沟道。所以，我们能在驻波场外 1.08m 处探测

物理

到这些准直度极好的沟道原子所形成的“肩膀”。这种现象是我们第一次观察到，受到国际同行的关注。最近，在这项工作的基础上，我们提出了沟道原子光谱技术，即在吸收池中，当气体压力很低时，原子的自由程可大于吸收池半径，原子在吸收池中的运动可视为无碰撞运动。我们用一束强激光束组成驻波场。原子穿越驻波场时被辐射压力冷却和准直，形成了无数的沿驻波场沟道运动的原子束组。然后，在驻波场外，用一平行于驻波场的探测光束测量这种原子束的吸收光谱。用这种方法我们观察到了钠原子的超精细结构。实验结果显示这是一种新型的高分辨光谱技术，仅用一个吸收池就可以得到在原子束装置上所能得到的结果，因而是一种有应用价值的光谱技术。

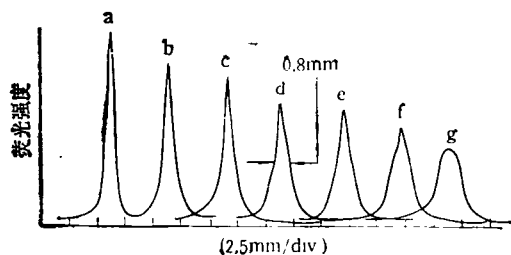


图 3 沟道原子的空间分布随光强(饱和参量 P) 的变化
(a) $P = 0.34$; (b) $P = 0.21$; (c) $P = 1.28 \times 10^{-1}$;
(d) $P = 0.07$; (e) $P = 2.8 \times 10^{-2}$; (f) $P = 6.2 \times 10^{-3}$;
(g) $P = 0$

光的力学效应研究是一个重要的学术领域。这项研究可以获得超冷原子气体，为光谱学研究、超冷原子碰撞研究和超冷原子与固体表面碰撞研究等提供了新的可能性。高度准直的原子束为原子光学研究提供了条件。总之，有很多新的物理现象需要我们去努力探索，需要更多的科学工作者去占领这个学术领域。

先后参加过这项工作的有周汝材、蔡惟泉、程与旦、刘亮、黄维刚和周善钰。作者感谢他们的合作及对本工作所作的努力，感谢王之江教授的有益讨论。

- [1] S. Chu et al., *Laser Spectroscopy VIII*, Springer-Verlag, (1987), 58.
- [2] W. D. Phillips et al., *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988),

(下转第 730 页)