

观察原子在稀薄环境中的扩散

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Philip Ball. *Physics*, June 30, 2017)

观察原子在低温稀薄环境中的扩散，揭示出单次冲击对原子运动随机化所产生的影响。

扩散描述宽范围的现象，例如大气中花粉和灰尘的传播，以及两种液体的混合等；扩散过程中，小颗粒在流体介质中分散开来。最近德国的一个研究小组已经能够跟踪在稀薄气体介质中扩散的单个原子。他们发现，仅仅单一的碰撞就足以把一个扩散原子，带入与介质中其他原子的平衡中。研究结果将有助于建立在稀薄环境中的扩散模型，如星际空间。

扩散概念在微观层面首先被爱因斯坦解释。他在1905年的一篇论文中阐明：扩散粒子应该遵循随机且曲折的路径，被称为布朗运动，而起因则是由于与周围介质分子的碰撞。在早期的研究中，扩散颗粒比分子大很多，于是为了改变扩散粒子的路径，通常需要数十亿次的碰撞。

对于比较大的粒子，不需要追踪每一次碰撞。相反，冲击的集体效应可以借助于随机涨落力以及粘性(它导致粒子能量损失于周围环境)建模。将这两种效应结合在一个

被修正的牛顿方程中，我们得到质量为 m 的粒子满足的随机微分方程——朗之万方程， $m\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = -m\gamma v + F(t)$ ；式中右边第一项是正比于速度 v 的摩擦力或粘性力，第二项是碰撞涨落力。该方程使研究人员能够计算出许多感兴趣的粒子的性质，例如它的平均速度随时间的演化。

以上我们考虑的是扩散粒子尺寸比介质分子大得多的情况，可以类比为运货船和一个个集装箱货柜的关系。如果扩散粒子与介质分子差不多大，情况会怎样呢？毕竟，这更像是气体或液体混合时发生的情况。为了跟踪单个粒子碰撞的影响，德国凯撒斯劳滕大学的 Artur Widera 和他的同事们，研究了有限数量铯(Cs)原子在稀薄铷(Rb)原子云中的扩散。

研究人员使用光阱捕获铷原子云，冷却至 μK 量级的极低温。然后他们以特定的能量将铯原子一个一个地射入铷原子云中。在这种情况下，气体是如此稀薄，铯原子与铷介质的碰撞是罕见的，平均大约十分之一毫秒发生一次。

一定的时间延迟后，Widera 等人通过打开另一个光场，“冻结”少数铯原子的位置，固定它们于捕获格点的栅格内。然后，他们使用可以激发铯原子发光的激光束，记录被

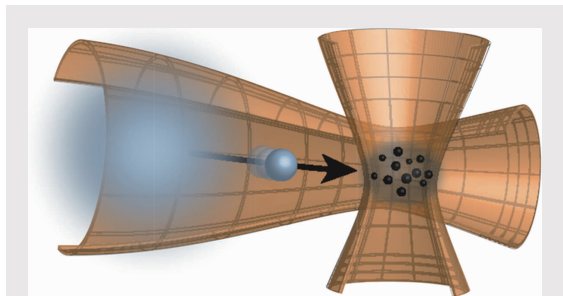
捕获铯原子的位置。

通过设定铯原子“射入”与“冻结”之间不同时长的延时，研究人员可以识别Cs原子的运动是如何通过与周围蒸汽中的Rb原子碰撞而改变的。他们证实，一次碰撞足以使一个Cs原子进入随机热化群组。通过计算机模拟，研究人员推断，这种碰撞可以剥离一半以上铯原子的初始动能。

在这些实验条件下，碰撞很少发生，并且是在远离朗之万方程适用的扩散情况下。对此，Widera说，“每个人，包括我，最初，我敢打赌，都会认为，朗之万的描述在上述情况下会失败得很惨。”

但令人惊讶的是，研究人员发现，一旦一个铯原子经历了一次碰撞，开始热化，朗之万方程将适用，只需事先对方程作一小小修正：让介质的有效粘度依赖于扩散原子的速度。这样一个简单的经过修正的朗之万方程可以描述一些重要的真实世界的情况，例如高层大气中的气溶胶扩散或星际空间中的气体扩散。

德国斯图加特大学的理论物理学家 Udo Seifert 说，“标准的朗之万方程有效工作，仅只做一微小修正，真是令人惊讶。”宾夕法尼亚州立大学的原子物理学家 David Weiss 指出，相似大小物体之间的碰撞动力学是大家都懂的经典物理，被包含在大多数一年级物理课中。但是，他补充说，这些新的结果独特地揭示了单原子层级的过程。



原子示踪。光阱使铷原子(黑色球)云保持在接近绝对零度的低温。当每一个铯原子(灰色球)发射到云中，随后的扩散被监测。结果表明，仅仅单一碰撞就足以将铯原子带入与介质中其他原子平衡的状态