

对反物质进行光谱测量的实验进展

高凌云 译

激光被首次用来成功制造出反氢原子，这样就可以对反物质原子进行精确的光谱测量。

哲学家威廉·詹姆斯说过：“如果你想推翻所有乌鸦都是黑的这个论断，那么不必证明它们都不是黑的，只要你找出一只白乌鸦就足够了。”同样，如果你想检验所谓的 CPT 定理——根据 CPT 定理，一个由反物质构成的世界其行为与一个由物质构成的世界完全相同，所以你也不必制造出整个“反物质世界”。只要能够证明反原子有一次发生跃迁的频率值与相应的原子在同样的跃迁中频率值不同，证据就非常充分了。

问题是在多大程度上实验已经能够探测到 CPT 定理的破坏？即这个世界在电荷共轭变换、空间反射和时间反演的联合变换下的对称性有多大程度的破坏。作为对这个结果的预期，没有人认为物质和反物质之间有什么不同，即使有，也非常微小。

能够用于对普通氢原子跃迁频率进行高精度测量的激光光谱仪也可以用来测量反氢原子的跃迁频率。这使反氢原子成为测量 CPT 定理的极好场所。现在，欧洲核子研究中心(CERN)的 ATRAP 研究组的科学家们，通过利用激光控制反氢原子的产生，已经沿着这个充满险阻的道路向目标迈出了重要的一步。

定轨的困难

反氢原子由一个正电子和一个反质子经库仑力束缚在一起而构成。自然界中并不存在反氢原子，因为它们会瞬间与普通物质发生湮灭。1995 年 CERN 在 PS210 实验中第一次制造出反氢原子，但是因为产生的反氢原子能量过高、速度过快，而无法用来精确检验 CPT 定理。当 CERN 的两个实验组 ATHENA 和 ATRAP 于 2002 年首次制造出“冷”反氢原子后，

球定位器官”。在海龟航行的大部分水域，磁场密度和倾斜面随方向的不同而变化，形成一个类似经纬线的网络。这些区域中的任何一点，都能用一组唯一的密度和倾角确定。所以，能够检测到这两个参数的海龟，可以在大脑中绘制出一张用来导航的“磁场地图”。海龟定期在觅食和巢穴海滩之间作长途航行。

情况才发生了转变。

实验原理类似于将空间探测器送入遥远的行星轨道——为了防止探测器从一端进入行星轨道，但因速度过快而在另一端逃离行星轨道，必须在探测器进入轨道的瞬间采取某种精细的操作，使探测器减速。同样的道理，正电子如果在进入反质子的周围时不释放一些能量和动量，它也不可能进入环绕反质子运行的轨道。空间探测器的减速是利用行星大气层的阻力或向相反方向喷射燃气而实现的。然而，正电子的减速只能通过有第三体参与的情况下才能实现，即正电子到达反质子的周围时，必须有另外一个正电子或电子及时带走必要的能量和动量。

另外一个严重的问题是，产生出来的反质子和正电子通常以接近光速的速度飞行。因此，即使它们能够相互靠近，也不会有足够的时间形成束缚态，而且为了带走正电子过多的动量，必须要求第三体在这一极短的时间段内接近这个短暂的束缚态。这些在技术上都难以实现。因此，为了能够真正制造出反氢原子，必须将产生出来的反质子和正电子提前减速。ATRAP 合作组应用了多种减速和预冷技术，将反质子和正电子的相对速度由 10^6km/s 降低到 1km/s ，这相当于把温度降低到 4K 。接下来，研究人员将反质子和正电子束缚在静电势阱中，这样就增加了正电子和反质子结合在一起的机会。

因为正电子带正电，而反质子带负电，所以正电子的势阱对于反质子来说就成了势“峰”。因此，ATRAP 小组采用势阱嵌套的结构，势阱中心包含一个势“峰”。这使得反质子与正电子被限制在势阱的不同区域，并诱使这些粒子相互结合。然而这一结合

例如，海龟孵化于佛罗里达的海滩，出壳后投身位于北美和非洲之间的波浪之中。当它们要产卵的时候，最后总是回到它们出生的海滩。萨尔蒙说，上述发现是一项“令人激动的成就”，这一发现同样可以用来解释其他很多动物的导航机制。

(安徽省淮南职业医学专科学校 232001)

过程导致了超热的反原子,其速率相当于 2400K 的气体温度(0.2eV 的动能)。此外,这些呈电中性的反氢原子会很快从电磁势阱中逃逸。

这是需要在光谱测量的实验中极力避免的情况,实验中被测原子必须限制在激光束能够覆盖的小范围内,且其速率相对较低。可以利用“多极”磁场对反氢原子磁偶极矩的作用产生中心回复力来实现这一过程,但是这样的磁势阱不可能做得深于 0.5K。

积极的解决办法

1988 年,当时在伦敦大学学院工作的麦克·查尔顿(Mike Charlton)和丹麦奥尔胡斯大学的伯纳德·戴奥奇(Bernard Deutch)首次提出了这些难题的解决办法。他们指出,电子偶素是由相互围绕对方运转的电子和正电子组成的,其实已经具备了用于带走多余能量和动量的第三者,即电子。然而,由于电子偶素是一个由物质和反物质构成的系统,所以很快就自行湮灭了。更糟糕的是,它是电中性的,这意味着势阱束缚不住它。因此,每个电子偶素原子只能有很少的机会进入围绕反质子运转的轨道,形成一个反氢原子。

然而,通过增加电子偶素的轨道半径,这一问题可以在一定程度上得到解决。一个增大了的电子偶素原子会为反质子提供一个更大的“靶子”或者说有效截面,并且距离进一步拉开后,电子与反电子就不会很快发生湮灭。

ATRAP 小组现已公布了利用新方法合成反氢原子的第一批实验结果。研究者们首次从 CERN 的反质子减速器上积累了 2.5×10^4 个反质子,从放射源上积累了 1.4×10^6 个正电子。然后,他们把不同的反粒子云置于电荷符号相反的势阱中,而不是以前的嵌套结构势阱。这些反粒子云都被用液氮冷却到 4.2K。

该小组接着又用可见光波长的激光激发铯原子束流,使其外层电子的束缚能只有 0.01eV,而处于正常状态的铯原子其外层电子的束缚能为 3.9eV。当这些原子注入约束正电子的势阱中时,“被解放”的外层电子就会跃入围绕正电子运转的轨道。

这个电荷交换过程中有一个著名的效应——共振效应,当电子的束缚能在末态和初态中同时就会发生共振效应。因而势阱中约有 1/4 的正电子会形成电子偶素原子;接着,需要一个能量为

6.79eV 的光子把电子偶素原子激发到足够高的状态,但是目前能够产生这一波段光子的强光子源在技术上还无法实现。因为电子偶素原子是电中性的,它会从正电子势阱中逸出,并进入含有反质子的相邻势阱。在这里,第二次电荷交换反应会产生反氢原子,它具有与铯原子和电子偶素原子相同的结合能。

进一步的研究

运用光电激发方法制造反氢原子比利用早期的嵌套势阱方法具有显著的优越性。

首先,两次电荷交换反应保证了产生的反原子具有很小的动能,只相当于 4.2K 的温度,而不是 2500K 的高温。未来先进的低温技术可以使现在可以达到的温度进一步降低到几百毫开,这样就易于把产生的反原子束缚在磁多极势阱中进行研究。

其次,通过调节铯原子的激发态使微调反原子系统的主量子数 n 成为可能。另一方面, n 值的增大也使原子系统的寿命和半径增加了,这意味着高 n 值的反氢原子要花较长时间才能衰变到基态,这对高精度光谱测量是至关重要的。虽然测量技术已经有了长足的进展,但是要想看到正式发表的研究结果仍需多年的等待。

(译自 *Physics in Action*, 2005 年 3 月)

(北京中国科学院高能物理研究所 100049)

科苑快讯

冰封木卫二将成为人类最大科研仪器

冰封的木星卫星——木卫二将会成为人类最大的科学研究仪器之一,它将成为飞向太阳系遥远太空带电粒子的传感器。木卫二是研究中微子的理想靶场,在地球上利用水探测器来捕获中微子,具有高能的中微子在地球上很难成功发现而在与探测器相互作用时仍相当罕见。

因此具有月球大小的冰封木卫二是中微子的天然探测器,科学家当然不会不利用这一机会。为了记录木卫二物质与中微子相互作用的踪迹,在木卫二周围的轨道上需要有几颗科学研究卫星。

这一昂贵设想未必能在最近几年实现,但是对于今天的航天工艺水平来说也并非是一种幻想。

(周道其译自俄《宇宙信息分析高架网》2004/12/9)

现代物理知识