

反物质与反氢原子

杨晓段 陈鸿林

(总装备部指挥技术学院物理教研室 北京 101416)

1996年1月,欧洲核子研究中心庆祝在一次实验中合成了11个反氢原子,人类第一次真正看到了反物质原子.1996年底,美国报道位于美国伊利诺州巴达维亚的费米国家实验室也制成了7个反氢原子.反氢原子的制造成功打开了反物质研究的大门.

寻找反物质的艰难历程

1898年英国的亚瑟·舒斯特(Arthur·Schuster)预言反物质存在,他推测存在着恰好和一般原子物质相反的原子.

1928年狄拉克(Paul·Dirac)提出了相对论性电子运动方程(即狄拉克方程).他的方程有两个解,一个相应于已知电子,另一个是存在着无穷多负能量状态的解.起初,狄拉克试图把第二个解解释成质子,但质子的重量要比电子重约2000倍,因此这种观点不能成立.一些量子力学先驱如海森堡(Werner·Heisenberg)经常被狄拉克的推论深深打动,但又发现无法解释的新解难以忍受.为了克服这一困难,狄拉克假设真空是充满了负能电子的状态,为此,他在1930年提出了“空穴理论”,假设负能态为电子海所填满.根据泡里不相容原理,正能态的电子不可能跃到负能态,但负能态的电子吸收了电磁辐射后可跃到正能态成为普通电子,负能电子海中同时产生一个“空穴”.当普通电子返回“空穴”时,它们将同时湮没而放出 γ 光子,这个“空穴”相当于一个质量与电子相同而电荷相反的正电粒子,并且因缺少了负能而具有正能量,这就是狄拉克预言的正电子.他的方程预

言了“反物质”世界的存在.

1932年卡尔·安德森(Carl·Anderson)在宇宙线中发现了正电子.狄拉克的预言初步得到证实.人们的下一个目标就是寻找反质子,为此美国加州大学伯克利分校建造了高能量的Bevatron回旋加速器用以产生反质子,1954年开始运行.1955年欧文·张伯伦(Owen·Chamberlain)和艾米利奥·塞格雷(Emilio·Segre)等人发现了反质子.由于该项贡献,使他们获得了1959年诺贝尔物理奖.

根据CPT定理(电荷共轭、宇称反映、时间反演)宇宙中每一种粒子都应该有一种对应的反粒子,带有数值相等而符号相反的电荷.当一个粒子和它的反粒子相遇时,发生湮没形成 γ 射线.反粒子是否可以组成反原子,反原子能否组成反分子乃至反物质呢?例如物质世界中最简单的氢原子是由一个质子和核外电子组成的,那么是否存在由反质子和正电子组成的反氢原子呢?地球上肯定没有反物质,太阳系中也没有反物质,因为如果太阳系中有反物质,那么物质与反物质相遇而湮没所产生的 γ 射线早已把我们烘干.天体物理学家确认:我们的星系和星系团以至包括我们的超星系团在内的大约一亿光年范围内是由物质所组成而没有反物质.但是量子力学认为,各种基本量(例如电荷和动量)是守恒的,宇宙创生时产生了物质必然产生相等的反物质.因为反物质与物质所产生的光应该是一样的,所以从光谱上无法确定反物质的存在.分辨物质与反物质的唯一办法

或弹丸实现壁涂层的更新等新技术.不过,在这些新技术完善之前,薄壁涂层仍会是未来装置保持洁净等离子体的一个重要途径.

对于惯性约束聚变来说,其关键是驱动器技术.目前科学家用钨玻璃激光器进行能量得

失相当和高增益的研究.但是它能否满足将来作为能源聚变堆的需要尚难以确定.因此,科学家正在加紧研究轻离子束、重离子束和氟化氪激光等新驱动器.

是对所研究的星系物质样品进行物理检验。宇宙射线就是原子和由超新星遗留物、恒星或别的天体碎屑放出的原子类物质。由反物质形成的宇宙线必定来自一亿光年之外的星系，它只占全部宇宙线的百万分之一。到目前为止用各种方法所接收到的宇宙射线中仅发现少量的反质子而没有发现反物质的存在。因此人们只能在实验室中产生反原子乃至反物质。

反氢的制造

反氢原子是最简单的反物质。要在实验室中产生反氢原子必须做两件十分困难的事情：一是要产生大量的反质子。这是因为反质子与正电子合成截面很小，为 $6 \times 10^{-33} \text{cm}^{-2}$ ，预计要产生 9 个反氢原子必须有 5×10^{12} 个反质子。每个原子存在时间为 $2.5 \times 10^{-11} \text{s}$ ，通过距离为 10m。在反应中必须有第三种粒子介入，以维持动量守恒和能量守恒。二是要使反质子和反氢以低于 14eV 的低能量状态存在，使反氢原子不会立即蒸发而变成组成它的粒子——反质子与反电子。

欧洲核子研究中心 (CERN) 于 1980 年建成了世界上第一个制造反质子的工厂，研制了仪器，产生了物理实验所需要的大量反质子束。他们用这些反质子束进行质子-反质子碰撞，并在 1983 年发现了带有弱核力的 W 和 Z 粒子。

为了使反质子和正电子处于低能状态，欧洲核研究中心于 1983 年建造了低能反质子环，用来减慢粒子以便探测质子-反质子在较低能态时的湮没。生成的反氢原子能从低能反质子环的直线轨道逃离而到达磁捕获器。磁捕获器的出口连接在环的直线部分上。磁铁的设计保证这种粒子不会被挡住而返回。

1996 年 1 月，欧洲核子研究中心召开庆祝会宣告德国尤里什 (Julich) 物理研究所的沃尔特·奥勒特 (Walter·Oelert) 小组在核子研究中心的低能反质子环上合成了 11 个反氢原子 (预言 9 ± 2 个)，这是人类第一次制造的反原子。物理学家预言，如果技术上有进一步的改进，大量生产反物质原子将是可能的。

早在 1992 年，美国斯坦福直线加速器中心的斯坦·布鲁斯基 (Stan·Brodsky) 指出：气体

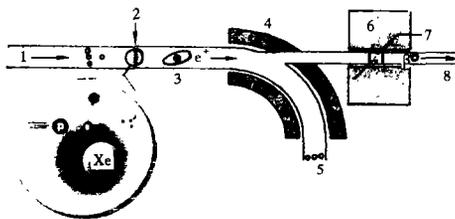


图1 低能反质子环结构与实验示意图

1. 反质子束；2. 氙原子簇；3. 中性反氢原子；4. 弯形磁铁；5. 低能反质子环；6. 碘化钠 X 光探测器；7. e^+ 湮没的硅计数器；8. 到磁谱仪飞行时间计时器

核与反质子间的碰撞同样也会形成副产品电子-正电子对。米歇尔·切耐尔 (Michel·Chauel) 等指出：如果反质子和正电子速度很接近，则出现的正电子被邻近的反质子俘获而形成反氢原子。低能反质子环结构与实验见图 1。经过收集的反质子束穿过 Xe ($Z = 54$) 原子簇靶，形成原子核正电荷库仑场。偶尔会有反质子在当场中被散射，将它的部分能量转化为 e^+e^- 电子对，个别正电子速度较低，接近被散射的反质子的速度，以至结合形成反氢原子。由于反氢原子不带电荷，当通过加速器中的环形磁铁时就偏离束流而到达硅探测器上。由于反氢原子与周围的物质一起会很快湮没，所以反氢原子很难直接探测到。让它们通过薄硅探测器把反氢再分离成反质子和正电子，利用高性能探测器分别探测从低能反质子环轨道上逃逸的反质子-正电子对。

反物质研究的未来

目前反物质粒子虽然发现和制造得并不多，但反物质的一种形式——正电子已经有了许多实际用途。例如正电子发射 X 射线层析照相术 (PET)。医生利用 PET 扫描不仅能得出病人软组织的详细图象而且能够观察他们体内的化学过程，其中包括在进行认知活动时大脑各部分消耗“燃料”的速度。

反物质的一个潜在的且十分诱人的用途是被利用来制造星际航行火箭的超级燃料。将反氢与氢混合湮没来加热氢，那么这种燃料的 0.01 克所产生的推力就相当于 120 吨由液态氢和液态氧组成的传统燃料。

科学家下一步的任务就是制造并贮存大量的反物质,进行精确的光谱测量,以验证反物质是否真是物质的一个镜像,是否存在着微妙差别,CPT联合变换是否真的具有不变性.

要贮存大量的反氢,一个较好的办法就是利用1936年荷兰科学家彭宁(Penning)设计的电磁势阱.它利用一个装有液态氮的腔室,使其中空部分的温度维持在4.2K左右,这个液态氮腔室的四周又有一个装满液态氮的腔室.在使用前将中空部分抽成高真空,然后将余下不多的几个空气分子冷凝,使其附着在冰冷的收集器壁上.这样,中空部分就完全真空了,这时将带负电的粒子(例如电子)注入中空部分的中心,那里的许多线圈和电极产生的强大磁场把电子挤压到沿收集器中心轴的空间.调节电磁场,能使电子速度降低到几乎是静止的程度,即让电子“冷静”下来.然后再把反质子送进收集器,它们运动时要通过一大群冷的电子,这会慢下来.

CERN设想进行的反原子光谱实验如图2所示.来自贮存环中动量为100MeV/c的反质子束通过金属箔,在彭宁阱中冷却到keV量级,随后继续冷却到meV量级.来自放射源的正电子通过与气体的碰撞、冷却,收集在另一个彭宁阱中.在第三个彭宁阱中,反质子和正电子相遇结合成反氢原子.外加的不均匀磁场对正电子有磁矩作用,产生的磁力将反氢维持在中央,避免与阱壁碰撞.由激光束探测这些几乎静止的反氢原子.

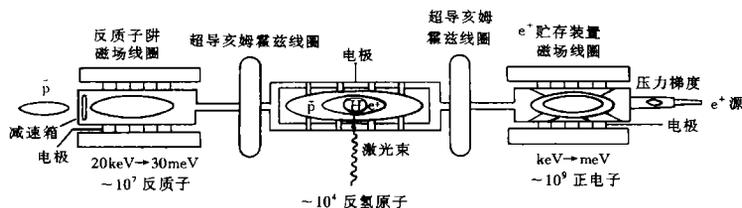


图2 CERN进行反原子光谱测量的实验设想

反氢原子这一基本物理体系给物理学家、化学家、天体物理学家带来了一系列新课题,也给人类带来了新的憧憬.

科苑快讯

第一届亚洲粒子加速器会议

第一届亚洲粒子加速器会议(APAC98)是亚洲加速器科学史上的里程碑.1998年3月23日至27日,来自亚洲各地的400名专家、学者、会议代表聚集日本KEK实验室,出席了这次盛会.

虽然这是亚洲的首次加速器盛会,但是加速器科学和技术对亚洲而言却并不是刚刚起步.低能加速器-高压产生器,电子直线加速器和回旋加速器,已遍及亚洲许多国家.80年代以来,随着同步辐射装置的广泛建造,亚洲加速器的分布情况已经发生了很大的变化.

同步辐射装置能够提供从紫外光到X射线光的强光源,所以吸引了物理、化学、生物和医学等众多领域的科学家.亚洲已经建造了许多光源,还有更多的同步辐射光源正在筹建中.

为了适应这一形势,亚洲未来加速器委员

会(ACFA)于1996年成立.它的宗旨是反映亚洲加速器科学的快速发展,促进相互了解,加强亚洲国家间的国际合作.

亚洲未来加速器委员会的首次会议是在韩国的浦项举行的,那儿有一个同步辐射光源.会议决定定期召开亚洲加速器会议,首选会址是日本的筑波.

在这次亚洲加速器会议上,中国、印度、印尼、日本、韩国、马来西亚、泰国和越南等国家的代表报告了各自的加速器研究情况.

高能物理方面的报告有中国的北京正负电子对撞机(BEPC)和日本KEK的B粒子工厂(KEKB).

(卞吉 秦宝 编)