

物理领域中的新课题——超冷中子简介

杜復欽

在高能物理研究中,通常是向高能量方面发展,但是另一方面,有些科学家则从相反方向进行工作.从1960年以来,几个国家的科学工作者如夏彼罗(Shapiro)在杜布纳(Dubna),和史蒂也罗(Steyerl)在穆里哈(Munich)等却研究有效温度为 10^{-3}K ,能量为 10^{-7} 电子伏极低能量的超冷中子.

早在1965年福黎(Folly)提出了根据全反射的原理建造中子瓶,那时主要困难是中子气体的温度必须低到 10^{-3}K ,而瓶中中子的密度很低(每立方厘米不大于一个中子).1968年夏彼罗和史蒂也罗为首的两个组都在有效温度为 10^{-3}K 得到几乎纯粹的慢中子.1969年夏彼罗建立了一个中子瓶,开始有了贮存超冷中子的工具.产生超冷中子还有下列几种途径:

1. 在一垂直导管中通过重力减速使很冷的中子进一步冷却.

2. 通过转动一组平面镜组成的中子镜(称为“中子透平”)的连续反射,中子每次反射都损失一些能量,因而逐渐冷却而成为超冷中子.

3. 从一个反应堆的活性区(堆芯)使中子扩散,通过一个由铜或不锈钢制成的有三或四个弯曲处的真空导管,这堆芯的末端由冷却的 ZrH_2 (或 H_2 或 D_2 或 H_2O)的减速剂(“换能器”)所关闭.从一个通量为 5×10^{13} 热中子/厘米²·秒的反应堆.

超冷中子与可见光有一种截然不同的特性,虽然它的波长类似于可见光,但它在任何媒质中都能产生全反射,与入射角大小无关.这种性质使它有可能贮存在瓶中,因为它与瓶壁碰撞损失的几率很小(都全反射回来).

目前贮存超冷中子有两种方法:一种是物质瓶的方法,把超冷中子贮存在一立方米体积的无硼玻璃瓶中,或贮存在冷却到液氮温度的铍制瓶子中.另一种方法称为“磁瓶”或“中子贮存环”方案,利用外加磁场和中子磁矩之间的相互作用,使超冷中子约束在贮存环中.1978年在西德建成第一个这样的装置;环的直径1.2米,利用超导磁铁,其六极矩磁场最大场强为3.5特斯拉,最大梯度为1.2特斯拉/厘米.本来希望装入无硼玻璃瓶的中子按照 $N = N_0 e^{-\frac{t}{T}}$ 指数律减小,这里 N_0 是时间 $t = 0$ 时的中子数. T 是测量达到被吸收的容许时间(单位为秒).实际找到的 T 只有100秒,最多只达到400秒,比理论预期小到二个数量级.实验证明,一个中子从各种入射角对容器壁一次碰撞的平均吸收系数 μ 约为千分之一,这与理论预期

的约为十万分之一不同,因此实际贮存在瓶中的时间就短了.

到底超冷中子有什么用途呢?

第一可以用来测量中子的电偶极矩,因为中子电偶极矩的存在,意味着时间反演不变性的破坏.从1964年在长寿命 K^0 介子衰变中发现 CP 不守恒,又根据 CPT 守恒定理,导出时间反演 T 不变性被破坏以来,还没有发现这种破坏的第二个例证.中子电偶极矩的实验已陆续进行了二十多年,测量的上限不断降低.最新的结果是电偶极矩 $D = (0.4 \pm 1.1) \times 10^{-24} e$ 厘米(e 是电子的电荷 $= 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑).和理论上比较,基本上排除了时间反演不变性破坏来自电磁相互作用的可能性.为了弄清反演不变性的破坏来源于弱相互作用,需要进一步提高这类实验的灵敏度,于是人们想利用超冷中子.利用获得超冷中子的方法将中子有效速度减小四个数量级(能量从电子伏降低到 10^{-7} 电子伏),估计测量灵敏度可以提高到 10^{-26} — $10^{-28} e$ 厘米.这是多么高的灵敏度啊.如果把电偶极矩考虑成两个单位电荷 $\pm e$ 相距 D 厘米,那么 $10^{-26} e$ 厘米就相当于两个电荷之间的距离 D ,只是中子本身直径的 10^{13} 分之一,也就是说要是把中子放大成地球那么大,这个距离也只有0.0001厘米.

第二个应用是研究中子 β 蜕变过程,为了检验现有的弱相互作用理论——弱相互作用矢量流守恒理论,需确定基本常数 $|\lambda| = G_A/G_V$,这里 G_A 是轴矢量耦合常数, G_V 是矢量耦合常数,可用自由中子 β 蜕变测定轴矢量耦合常数.要求测量中子寿命过程达到1%的精度,过去都采用测量热中子衰变产物的方法.这样需要两个独立的绝对测量值:一是测衰变数目,由电子或质子探测器测量;另一是在束体积内的中子数目,由中子探测器测量.这样,几何因素和探测器绝对效率的误差都会带来不确定性.如果利用贮存的超冷中子进行实验,就可以象通常放射性物质那样,作衰变随时间变化(衰变率)的简单测量,可以显著提高测量精度.西德中子超导贮存环已被考虑用于这个目的.

第三个超冷中子应用的例子是超冷中子的表面流动(或滚动),研究在一个板上贮存它们的可能性.人们观察它们在固态表面流动的快慢来确定固态表面的光滑程度和表面的结构情况.

第四是利用超冷中子获得更准确的相干散射长度和中子捕获截面数值.

第五是利用超冷中子来检验物质的磁性.

第六是为原子核实验提供一个纯中子靶.

综上所述我们可以看到超冷中子对研究弱相互作用起着重要作用.