

μ SR 技 术

王 朝 俊

近年来, μ 子自旋转动(μ SR)技术已广泛地受到人们的关注. 在世界各大物理实验中心的许多科学家都在利用 μ SR 技术开展新的物理实验. 西欧核子研究中心的科学家在 600 MeV 质子同步加速器上利用飞行中的 π 介子朝前衰变的 μ 子束开展 μ SR 物理研究.

μ SR 技术引人注目的原因在于, 它为各种学科提供了一种新的探索工具, 同时开辟了一个全新的研究领域. 因而从 1978 年到 1983 年先后召开了三次国际会议专门讨论了有关 μ SR 技术的研究与应用, 其目的都是希望在粒子物理与核物理、化学和凝聚物质物理之间建立类似桥梁. 会议规模越来越大, 报告内容涉及各个学科. 研究课题包括: μ 原子的超精细结构, μ 子偶素化学, 在半导体和绝缘体中 μ 子偶素的形成和特性, 弱电相互作用等等. μ SR 技术已在磁学、金属物理和半导体物理、化学动力学、辐射化学和新的表面科学得到了广泛应用.

将极化 μ^+ 子束打入要研究的物质, 并停留在其在, 在物质内部场和外部场的作用下, μ^+ 子自旋方向就发生变化. 根据这种变化, 可获得 μ 子周围物质局部状况的资料. 另外, 当极化 μ^+ 束注入适当靶物质, 并停留在靶内, 未衰变前被捕获的 μ 子在局部磁场中作进动, 衰变时放射出的正电子是由弱相互作用所制约的. 用探测器探测正电子的动量分布, 就能反映被物质捕获的 μ 子的性能, 从而也反映了被研究样品的基本性质.

在许多物质中, μ^+ 子与电子配成对形成 μ 子偶素——具有 μ 子的类氢原子, 在化学研究上是很有意义的. 这是 μ^+ 子代替了氢原子中的质子而成的原子, 它具有与氢类似的化学性质和电离势, 只不过质量只有氢原子的 $1/9$, 因而有人把 μ^+ 子比拟成很轻的质子, μ^+ 子和质子被认为是相同元素的同位素. 考察 μ 原子和氢原子之间的同位素效应, 有助于对化学反应动力学的研究, 有助于对基团物质的平衡结构、振动和转动的认识. 与氢原子一样, μ 原子是活性很大的, 可用它作为有机化合物的探针.

在 SIN (瑞士原子核研究所) 的工作组首先完成了 μ 子束缚在铁磁性材料(镍)的基核探索对内部场的观测. 这种场可以和含有低浓度钆杂质核的镍中的类似场比较, 他们发现了“超精细异常” $-2.82 \pm 0.03\%$, 它反映内壳电子极化在核边界之外的空间分布, 这个分布是其他方法无法探测到的.

在 SIN 的另一个工作组观测从 μ 子注入硅晶衰变产生正电子的“沟道效应”. 沟道效应是准确控制沿晶体内平面和晶轴的粒子轨迹, 对研究滞留 μ 子将提供新的可能性. 在实验中, μ^+ 子是停止在弯成球壳的硅晶片上(这种结构使无论在晶片内任一点的晶轴都能在球心得到很好聚焦, 以使研究的表面区域加大). 离开晶体衰变的正电子飞行 3.4 米后用多丝正比室和闪烁体组成的探测器加以探测, 记录正电子的角分布并和 X-射线衍射图象比较表明正电子是被某一晶面阻塞, 由于晶轴阻挡使中间具有最小值. 这样就提供了一个重要讯息以帮助确定 μ 子终于停止的填隙位置. 沟道效应也在 π 介子衰变粒子的实验中观测到.

在 TRIUMF 和 SIN 的工作组已把 μ SR 应用于表面科学, 首次研究了 μ 子偶素与超细硅粉末的裸表面的相互作用.

工作在 TRIUMF 的伯克利组在寻找右手弱流的工作中完成了 μ^+ 衰变的正电子能谱端点处的不对称的精细测量, 获得右手弱流新的上限. 实验测量是在靠近靶(在此靶内产生 π 介子)表面的静止 π^+ 衰变产生的几乎完全极化的 μ^+ 束上进行的(第一个这样“表面” μ 子束是十年前工作在伯克利 184 英寸迴旋加速器发展起来的). 当 μ^+ 完全极化和只存在左手耦合时, 在 μ 子自旋的相反方向上不会有最大能量的正电子发射. 相反地, 对右手耦合, 这样衰变达到最大值. TRIUMF 的“表面” μ 子只有 4MeV, 它具有精确射程. 实验上用作 μ 子滞留靶是纯铝、铜、银和金的薄箔. 数据获取是在两种情况下进行的, 外加 1.1T 纵向磁场以维持滞留 μ 子自旋的方向, 70 高斯横向场使它产生自旋进动. 用螺线管场透镜对衰变正电子进行聚焦, 用圆柱形对称聚焦谱仪分析正电子的动量, 在谱仪的共轭焦点处充甲烷气的漂移室可达到 200 微米的测量精度, 在 0.2 球面角接受度内获得的正电子动量分辨率小于 100 keV. 数据分析表明: 如果右手 W 玻色子存在, 它必定比 380 GeV 重. 另一个同样有启发性的实验是日本 KEK 报导的在 κ 介子衰变中寻找右手流, 达到的精度虽不那么令人满意, 但其结果和最大左手流是一致的.

在 CERN 的工作组对 μ^+ 在金属中的量子扩散和被捕获展开了研究; 并利用 μ SR 技术对反铁磁性绝缘体静态和动态磁性特征获得第一个完整图象. 在探测器方面将建造新的多丝正比室, 它的建成必将打开 μ SR 技术新的应用.

在 KEK 的工作组利用脉冲 μ 子束研究当温度降到 0.09K 时在纯铜中零场 μ^+ 自旋弛豫.

从上面简单的介绍中可以看出, μ SR 技术已渗透到各个学科, 正显示出它巨大的生命力和科学价值. 精细的 μ SR 技术不仅具有广泛的应用前景, 也将在基础科学的领域内作出贡献.