

出人意料的电子电偶极矩上限

(中国科学院物理研究所 王如泉 编译自 Bertram Schwarzschild. *Physics Today*, 2014, (4): 15)

几十年来, 实验物理学家都在尝试利用原子或分子束技术来测量电子的电偶极矩(EDM)。尽管还没有测出电子电偶极矩的具体大小, 他们却不断地给出了更精确的电子电偶极矩上限值。这些实验通常在普通实验室的光学平台上进行, 却对粒子物理研究有重要价值, 而粒子物理实验通常是在巨大的粒子加速器上进行的。不少物理学家认为, EDM实验是用于研究超出粒子物理标准模型的新物理的最快和最廉价的手段。

电子在自然定律违反时间反演对称(T), 或者同时违反电荷共轭(C)和宇称反演(P)对称性时才能存在不为零的电偶极矩, 粒子物理的标准模型存在违反CP和T对称性的作用机制, 并且已经在高能物理实验中得到证实。但是标准模型预言的电子EDM大约为 $10^{-38} e \cdot \text{cm}$, 远远小于目前的任何技术能够探测的极限。而不少超越标准模型的新理论, 特别是那些希望解释宇宙中物质和反物质不对称的理论, 预言的电子电偶极矩比标准模型预言的大很多, 而这些理论预言的电子电偶极矩的大小有望被分子束实验测量到。

电子的EDM矢量 d_e 可以通过测量电子在外电场中的能量改变 $-d_e \cdot E$ 来实现。但是将自由电子置于强的外电场将导致电子很快被静电力带走, 所以EDM实验不直接测量自由电子的EDM, 而是测量一类极性很大并拥有一个很重原子核的双原子分子。在这类分子中, 一个靠近重原子核的价电子会感受到很强的分

子内部的有效电场 E_{eff} 。三年前, 伦敦帝国理工的Edward Hinds小组采用氟化铯分子束将电子EDM的上限定在 $10^{-27} e \cdot \text{cm}$ 的量级。这个结果已经进入了很多超对称理论的预言范围, 但是, 最近由哈佛大学John Doyle和耶鲁大学David DeMille领导的联合研究团队(ACME)采用氧化钍(ThO)分子束将电子EDM上限降低了一个数量级, 这一结果将进一步对各种可能的超对称理论进行检验。

ThO分子可以被激光激发到一个特定的亚稳态, H态。只需10 V/cm的外电场就能将H态的分子完全极化。极化的H态ThO分子中的一个价电子能感受到高达84 GV/cm的有效电场, 价电子自旋同向和反向于有效电场的两个量子态由于电子的EDM将会出现微小的能量差。实验上通过测量这一微小的能量差来测量电子的EDM。

实验过程如图1所示, 脉冲的ThO分子束飞过垂直于电场电极的均匀电场和磁场。在电极的始端, 泵浦激光将分子制备到H态, 并在外电场中极化。分子态制备激光将分子泵浦到分子自旋 $M=\pm 1$ 的相干叠加态上, 对于不同的 M , 由于内部有效电场和 d_e 作用对塞曼劈裂能级的移动不同, 分子在外电场和磁

场中飞行过程中进动的速度不同, 从而在电极的末端分子的自旋方向受 d_e 大小的影响, 读出激光可以探测电极末端分子的自旋, 从而对 d_e 进行精密测量。通过对 10^{10} 个ThO分子的测量, 实验小组以90%的可信度将电子EDM的上限确定为 $8.7 \times 10^{-29} e \cdot \text{cm}$ 。这一结果比2011年的结果提高了12倍。

在流行的超对称理论中, 电子的 d_e 意味着存在质量正比于 $1/\sqrt{|d_e|}$ 的新粒子。它们与电子和其他轻子之间违反CP对称性的相互作用能导致宇宙中物质和反物质的不对称性。如果 d_e 的大小在 $10^{-26} e \cdot \text{cm}$ 量级, 那么这意味着新粒子的质量在几百GeV, 正好是弱电相互作用的能量尺度。

但是现在我们发现 d_e 比 $10^{-28} e \cdot \text{cm}$ 还小, “这是对新理论的一个重要约束”, 理论学家Maxim Pospelov说, “看上去预计中的CP对称破缺的新的轻子相互作用不在弱电相互作用的能量尺度, 而是在下一代亚TeV正负电子对撞机所无法达到的能量量级。” CERN的大型强子对撞机能否发现这些新粒子将仍然是个未知数。

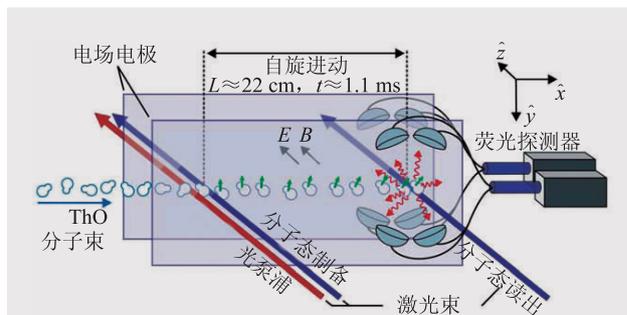


图1 精密测量电子EDM实验装置图