

Experimental Tests of Time-Reversal Symmetry -- Search for a Permanent Electric Dipole Moment in Atoms

Zheng-Tian Lu

Physics Division, Argonne National Laboratory
The Department of Physics and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago

时间反演对称性的实验检测 -- 寻找原子固有的电偶极矩

五十年前，李政道和杨振宁提出宇称不守恒（P-不对称）的猜想，从此人们对物理定律的基本对称性有了崭新的认识。基本对称性包括电荷对称（C-对称），空间反演对称（又称宇称，P-对称），时间反演对称（T-对称），以及它们的各种组合（CP, CPT）。吴健雄等的实验首先证明在弱相互作用中宇称在最大程度上不守恒。在随后的一系列高能物理实验进一步发现在 K-介子和 B-介子的作用中 CP-不对称。因为在理论上 CPT 是一个更加基本的对称性，并被迄今为止所有的实验所证实，所以在此前提下 CP-不对称与 T-不对称是等价的。反过来说，假设 CP 是完全对称的，那么宇宙大爆炸在理论上就会产生数量完全相等的物质与反物质，随后完全互相湮灭。CP-不对称直接影响到时间的性质并解释物质世界的存在，它是物理学中最基础的问题之一，因此倍受理论与实验物理学界的关注。

原子固有的电偶极矩是 T-不对称的一个表现（见图）[1]，它可能来自电子，夸克，或者夸克相互作用中的各类 CP-不对称效应。根据基本粒子的标准模型，原子电偶极矩极小，以当今的技术水平是无法观测到的。但是，在标准模型上扩展的一些模型，包括超对称模型，多个希格斯模型，及左右对称模型等，普遍预测在下一代的实验中可能观察到比标准模型值大的多的原子电偶极矩。寻找原子电偶极矩是一个很有希望的并且很有意义的研究方向，对它的测量和理解可以加深对 CP-不对称的认识，并可以由此寻找未知的物理定律。

电偶极矩实验中具体测量的是原子的角动量（自旋）在磁场和电场中的进动频率，电偶极矩会使得进动频率因为电场反转而发生微小的变化。在实验中，为极化原子自旋并观测其进动频率使用的是激光光抽运技术。高精度的测量要求电场大，磁场稳定，连续进动时间长，原子数目多。下面我们讨论两个有代表性的实验：

铯原子实验[2] – 铯原子基态($^2P_{1/2}$)的角动量 $J = 1/2$ ，有一个未成对电子。由于相对论效应，铯原子电偶极矩比电子电偶极矩大 600 倍。这个放大系数大致与原子数的立方成正比，所以一般来说原子越重越好。极化自旋和观测进动是在原子束装置中完成的，连续进动时间就是飞行时间，因此比较短，大约几个毫秒。实验结论是铯原子电偶极矩小于 1×10^{-24} e cm; 电子电偶极矩小于 1.6×10^{-27} e cm（单位：电子电荷乘以厘米）。新一代的实验准备利用激光冷却技术，因为冷原子在激光阱中的连续进动时间可以长达几十秒，从而可以显著的提高进动频率的测量精度。

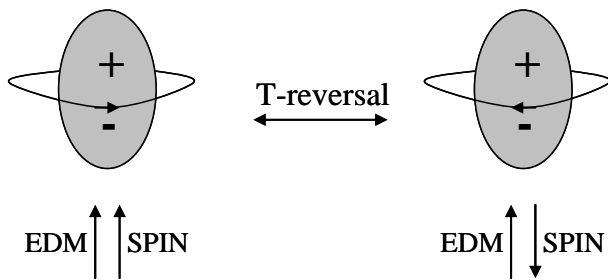
汞原子实验[3] – 汞原子基态(1S_0)的角动量 $J = 0$ ，没有未成对电子，不能用来找电子电偶极矩。但是，因为没有磁偶极矩，它受磁场噪音影响小，是寻找原子核电偶极矩的理想系统。原子核电偶极矩受到周围电子壳层的屏蔽，只有极小部分表现成可以测量的原子电偶极矩。未屏蔽掉的核电偶极矩在理论上用席夫极矩来描述。在选择原子时也是越重越好。另外，核自旋 $I = 1/2$ （如汞-199）可以增长连续进动时间并且减少系统误差源。实验测量是在厘米大小的汞-199 蒸汽玻璃管中完成的。实验结论是汞-199 原子电偶极矩小于 $2 \times 10^{-28} \text{ e cm}$ 。近期有理论提出镭-225 是寻找席夫极矩更理想的系统，预测它的原子电偶极矩比汞-199 大 2-3 个数量级。新一代的实验正在探索测量镭-225 电偶极矩的方法。

虽然目前为止这些实验还没有观察到原子电偶极矩，但是通过测量所给出的上限已经给新的理论发展起到了引导作用。例如，一些超对称模型中所用的参数的取值范围就已受到了电偶极矩上限的压缩与限制。

极化分子很可能是寻找电偶极矩的一个新的突破口。在高真空中，电场最高只能加到大约 10^5 V/cm ，但在极化分子中电场却可以高达 10^{10} V/cm ，由此可以将测量分子中电子或者原子核的电偶极矩的灵敏度增加 5 个数量级！新一代实验正在探索利用新的技术控制分子的方法，包括分子冷却，分子囚禁，分子光谱等。

基础研究与应用技术往往相辅相成，电偶极矩这个课题也不例外。所有这些实验对磁场控制要求都极其高，磁场相对稳定度需要达到 10^{-9} ，磁场变化需要小到皮高斯。在这些实验中发展了一些高精度的磁场测量与控制方法，可以应用到生物磁场研究，医疗监控，及国防技术中。

作者感谢姜承烈，蒋蔚，丁昀对本文的建议与帮助。This work was supported by the U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Physics, under Contract No. DE-AC02-06CH11357.



图的说明：在时间反演下，自旋方向反转，电偶极矩方向不变。如果原子同时有自旋和电偶极矩，那么时间反演就会改变原子的一些固有性质，这样，时间反演对称性就被破坏了。

参考文献

- [1] Norval Fortson, Patrick Sandars, and Steve Barr, *Physics Today*, 33 (AIP, June 2003).
- [2] B. C. Regan, E. D. Commins, C. J. Schmidt, and D. DeMille, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 071805 (2002).
- [3] M. V. Romalis, W. C. Griffith, J. P. Jacobs, and E. N. Fortson, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2505 (2001).