

捕获离子测试基本粒子物理学

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Nicholas R. Hutzler, *Physics*, October 9, 2017)

科学无法解释，宇宙大爆炸后物质是如何产生的。所有已知的物理过程都留给我们一个物质和反物质基本等量的宇宙，那么为什么现实中一切都是由物质构成的呢？这个宇宙重子不对称(BAU)是现代物理学所面对的最大谜团，也是粒子物理前沿全方位攻坚之驱动力。最近，美国实验室天体物理联合研究所(JILA)由Eric Cornell领导的研 究组，利用桌面实验系统探索了这一前沿(采用捕获的分子离子探寻基本对称性的破坏)。研究人员特别寻找“电子电偶极矩”(eEDM)的迹象：他们没有发现痕迹，从而证实了以前实验的正确结论。

1967年，俄国物理学家萨哈罗夫研究了宇宙重子不对称(BAU)，发现：一个看似无关的对称性，即时间反演对称性(T)，必须被违背(对物质压倒反物质而言)。T违背过程会引起电子这样的基本粒子具有电偶极矩(EDM)，这可以被经典地认为是粒子内部电荷的不均匀分

布。既然这种电荷不平衡只能源自T违背过程，既然T违背通常出现在新物理的模型(如超对称)中，基本粒子的EDM搜寻显然是对高能量新物理的探索。

将电子放在电场中，如果它有一个EDM，这将产生一个力矩(对电子)。这力矩会引发电子自旋角动量进动。然而，一些极性分子内部的电场比实验室中产生的外部场，强约一百万倍。因此，实验上更好的办法是选择重的(重，是因为电子的高速运动，将导致相对论性之质量增强)极性分子，对一个外层电子(或价电子)搜索自旋进动迹象。这种测量的一种常见的方法，是送一束中性分子通过真空室，使用激光或微波探测分子光谱。然而，分子束实验伴有分子束移动局限性，最终分子会离开仪器。即使使用低温冷却实验技术，对分子最终观察时间也只有几毫秒。

JILA的EDM实验完全去除了这一局限性，通过捕获分子，百倍地增长了观察时间，从而实现了每分子敏感性的百倍增加。在开始他们使用紫外激光，把一个电子从选定分子 HfF^+ 剔除。由此产生的 HfF^+ 离子则被捕获在超高真空室内的旋转电场中(见图)。由于静电力是如此强大，离子被束缚围绕离子阱中心旋转，留出了大量的时间，完成一个非常精密的测量。

研究小组使用激光把电离分子置于一个特殊状态，其中最外层电子的自旋指向某一特定方向(相对于分子内部电场而言)。制备了这种状态之后，实验者让自旋自由进动大约一秒钟。进动速率被几个效应控制，这包括事先假定的eEDM与分子电场的相互作用。在进动时间结束时，研究人员使用一种激光(能选择特定的自旋方向)将分子离解成原子。然后原子离子用离子计数器探测，完成总进动角的测量，这是实验感兴趣的量。

在一个给定的实验配置，进动角依赖于eEDM，以及大得多的其他贡献的集合，后者不一定具有基本兴趣。因此，测量被重复，但令一些实验参数反转，例如，相对于离子捕获场的分子取向。这个参数反转会改变eEDM对进动角贡献的符号，但不影响其他贡献。然后再重复一些其他参数反转的测量，如此等等。通过测量实验参数的所有可能组合，实验者从无用信息中隔离出eEDM信号。这种隔离足够有力，足以将系统误差和不确定性，抑制到统计学低水平。换言之，离子越多，数据采集越多，实验就可以达到更高的灵敏度。

JILA的实验中并没有看到eEDM信号，这允许他们设定一个限制，eEDM不大于 $10^{-28} e \text{ cm}$ (其中 e 是一个电子电荷)。这意味着，他们的实验是敏感于几个TeV尺度的新物理，甚至超越大型强子对撞机(LHC)之能量尺度，对于耦合到电子的T违背物理学。

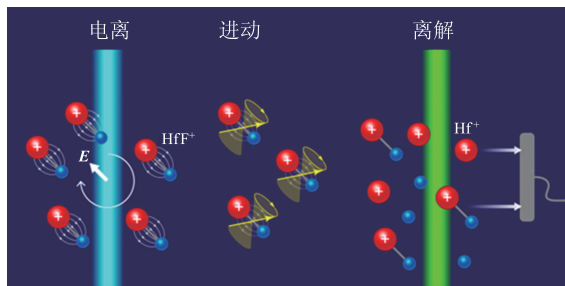


图1 一个样本 HfF 分子被电离，并被限制在带有旋转电场 E 的圆柱状势阱中；旋转电场 E 可以迫使分子取向(左)。每个分子都有一个强的内部电场，如果eEDM存在，内部电场将影响围绕分子的电子自旋进动(中)。最后一步(右)，激光离解分子(根据分子的进动角)，并且一台离子计数器记录最终的 Hf^+ 离子数