

电子的电偶极矩及其对新物理的可能限制

邢志忠

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2023年7月7日,著名的 *Science* 期刊发表了美国科罗拉多大学 T.S. Roussy 等十一位学者的论文,标题为“电子的电偶极矩的新上限”(An improved bound on the electron's electric dipole moment)。这篇论文针对电子的电偶极矩 d_e , 在 90% 的置信度水平给出了最新实验上限 $|d_e| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e cm}$ 。基于这一结果,并对某些相关参数做了特殊的假设,作者发现可将电偶极矩做出贡献的新物理模型的有效能标限制到 $4 \times 10^{13} \text{ eV}$ (即 40 TeV) 以上,远高于正在运行的大型强子对撞机的质心能量 14 TeV。

特别值得关注的是, *Science* 杂志在同一期还刊发了加州大学圣塔芭芭拉分校物理系的 M. Fan 和 A. Jayich 两位学者的短评文章,标题为《用分子探索基本粒子》(Probing fundamental particles with molecules)。该文在引述了 T.S. Roussy 等人的主要结果后,夸张地指出:“利用一张桌子就摆得下的真空装置,他们得以探索尚未被发现、质量高达 40 TeV 的粒子,后者比欧洲核子研究中心的大型强子对撞机所能观测到的粒子能量大 10 倍——大型强子对撞机的建造花费了约 47.5 亿美元,而其每年的运行费为 10 亿美元。”这里作者刻意将一台仅可探测电偶极矩的分子谱仪与一个多功能、最先进的高能粒子加速器及其探测器集群相对比,给人造成一种似乎廉价的蚂蚁比昂贵的大象还强悍的假象。

针对上述两篇论文在粒子物理学方面的主要结果和观点,本文将通过简要回答下面两个重要问题,给予必要的澄清:

一、T.S. Roussy 等物理学家所得出的对新粒子

质量的限制,依赖哪些具体的新物理模型和假设,其结论在多大程度上是可信的?

二、Fan 和 Jayich 将一个小型精确测量仪器与一个开拓人类能量前沿、旨在直接发现新粒子的大科学装置做比较,存在哪些误区?

电偶极矩的测量对新物理模型的可能贡献

众所周知,电子之所以拥有不为零的电偶极矩,是由于它参与的相互作用违背时间反演不变性(T),或者说该相互作用同时破坏电荷共轭对称性(C)和宇称反演对称性(P)。在粒子物理学的标准模型框架内,电子所参与的弱相互作用是破坏时间反演对称性的,但该相互作用在四圈量子修正的水平才会使电子获得电偶极矩,后者的大小低于 10^{-38} e cm , 即比 T.S. Roussy 等人的最新实验上限低近 10 亿倍。如此微小的物理量,即便在遥远的未来也难以在实验上被测量。因此多年以来,理论物理学家提出了各种超越标准模型的新物理模型,试图给出更接近实验上限的电偶极矩 d_e 的可能数值,从而使得针对 d_e 的测量成为发现新物理的一个低能突破口。这也意味着,那条联系电子的电偶极矩与新物理(包括新粒子和新相互作用)之间的纽带,是强烈模型依赖和参数依赖的!

为了简单起见,我们在这里就以 T.S. Roussy 及其合作者在他们的论文中所引用的超对称、双希格斯和左右对称模型为例,简要说明这几类新物理模型

在单圈量子修正的水平对电子的电偶极矩的贡献:

$$d_e \sim \left(\frac{ea_0 \alpha m_e^L}{4\pi} \right) \frac{g^L}{M^2} \sin \varphi$$

其中 e 和 m_e 分别为电子的电荷和质量; α_0 代表玻尔半径; α 是电磁相互作用的精细结构常数; M 表示新物理所在的能标, 即新粒子的质量; g 为新粒子与电子的有效耦合常数; φ 是 CP 破坏相位, 描述的是新相互作用破坏 CP 对称性的强度。上述发表在 *Science* 期刊的论文之所以得到了 $M \geq 40$ TeV 的结果, 是由于作者假设了 $\sin \varphi \sim 1$ 和 $g \sim \sqrt{\alpha}$ 。毫无疑问, 这两个假设目前得不到任何基本理论和可靠实验的支持。一方面, CP 破坏相位在标准模型和目前已知的任何新物理模型中都是未知的“味”参数, 需要通过实验测定或者借助特定的“味”对称性确定, 而后者依然需要做很多理论假设才可能实现。另一方面, 假设新相互作用的强度与电磁相互作用的强度相当也是毫无根据的, 纯粹只是一个示意性的数值特例而已。

由此可见, 尽管 T.S. Roussy 等人改善了对电子的电偶极矩的实验测量灵敏度并获得了 d_e 的最新上限, 但他们关于新物理能标的限制却依赖特定的新物理模型和特定的参数取值——这些模型无一得到任何实验支持, 其相关的参数空间也完全无法确定。因此我们切不可对 $M \geq 40$ TeV 这样的示意性结果当真。尤其需要注意的是, 新物理的限定不能只依靠低能标的精确测量实验。基础物理学的发展史一再表明, 发现新粒子并测定其各种量子数离不开高能对撞机的决定性贡献。

高能加速器直接发现新粒子的不可替代性

接下来以贝塔衰变的费米有效理论与带电流相互作用的标准理论之间的关系为例, 说明亮度前沿(即通过量子效应在较低能标精确测量物理现象, 从而间接发现新物理的存在并限定其参数空间)和能量前沿(即通过相对论效应将稳定粒子加速到极高的能量并使之发生对撞, 从而直接发现新粒子并测量其量子数)相结合才是探索新物理的最佳途径。

早在 1933 年, 费米就发展了原子核贝塔衰变的低能有效场论, 其中描述核子流与轻子流之间相互作用强度的有效耦合常数就是著名的费米耦合常数 G_F 。不过直到粒子物理学的标准模型建立以后, 人们才实现了对费米的有效耦合顶点的“解扣”——它其实是由传递弱相互作用的带电重玻色子 W^- 及其与费米子的基本耦合常数 g 构成, 因此 $G_F \propto g^2/M_W^2$, 如上图所示。可见这一已被实验精确检验过的关系式与 T.S. Roussy 等人所考虑的 $d_e \propto g^2/M^2$ 新物理部分如出一辙, 即表征新物理的重自由度在低能标的特征有其相似性, 这就是低能精确测量实验有助于发现新物理存在的间接证据的典型体现。

但是, 仅靠测量有效费米耦合常数本身并不能真正揭示新物理的本质, 也无法证实标准模型的正确性。直到 W^+ 玻色子于 1983 年在欧洲核子研究中心的正反质子对撞机上被发现, 粒子物理学家才真正揭开了弱相互作用的神秘面纱, 并通过随后的大型正负电子对撞机实验精确测量了 W^+ 玻色子的质

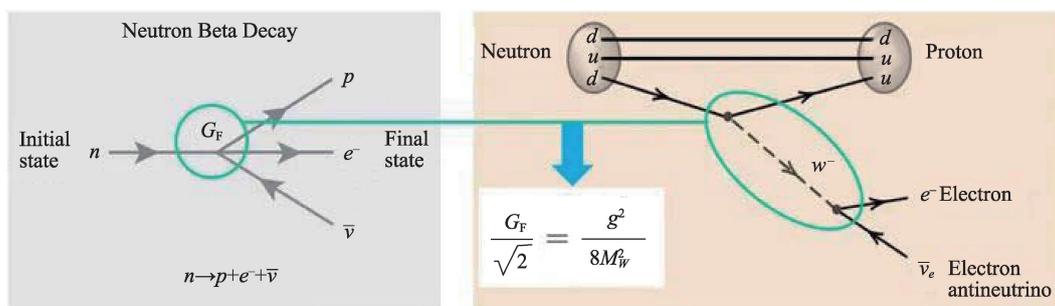


图 1

量和其他量子数,从而确定了基本弱相互作用耦合常数 g 的数值。毫无疑问,做一个贝塔衰变实验的花费远低于正反质子对撞机和大型正负电子对撞机的造价和运行费,但是前者的科学收益也远低于后者,完全不可同日而语。因此 M. Fan 和 A. Jayich 在其评论文章中将小型分子谱仪实验与大型强子对撞机实验作对比,并强调后者高昂的费用,实属以偏概全,有误导读者之嫌。

特别值得一提的是,电子、中子等基本或复合粒子的电偶极矩的实验上限在过去半个多世纪得

到了大幅度的提升,如图2所示。给定一个具体的新物理模型并假设特定的参数空间,每一次实验测量结果都会限制相应新粒子的质量,后者的下限也随着实验精度的提高而不断增大,但是却从来没有真正或实质性地揭示新物理的存在。换句话说,历史上这些来自低能实验对电偶极矩的限制并没有对标准模型的发展和物理的探索产生令人耳目一新的启发和引领作用。这并非否定相关实验的科学价值,而是表明单靠间接寻找新物理存在的证据是远远不够的。

