

论中微子超光速与洛伦兹对称性破坏 以及质量产生

何红建



2011年9月位于意大利 Gran Sasso 地下实验室

的 OPERA 中微子实验国际合作组发表了一篇预印本 (T. Adam *et al.* (OPERA Collaboration), “Measurement of the Neutrino Velocity with the OPERA Detector in the CNGS beam”, arXiv:1109.4897v2), 声称测到了来自 730 千米外的欧洲核子中心 CERN 通过高能质子打靶产生 μ 中微子束流的超光速现象, 这一消息很快在 *Nature* 和 *Science* 等新闻媒体上报道, 激起了公众的极大好奇。据 OPERA 于 11 月 17 日在 arXiv 预印本网站上更新的结果, 声称测得的 μ 中微子速度 v 超过光速 c 的偏离为: $(v - c)/c = [2.37 \pm 0.32(\text{stat}) + 0.34 - 0.24(\text{sys})] \times 10^{-5}$ 。许多大街上的老百姓们误以为这就已经推翻了现代物理学的根基, 然而绝大多数行内的专家们却或者持谨慎的保留态度或者不屑一顾。美国纽约州立大学石溪分校的一位中微子实验家, 就公开对记者打赌说他怀疑这个结果是由一系列的系统误差所引起, “我将不会拿我的夫人和小孩打赌, 因为那样他们会发疯”, 他说, “但是, 我将拿我家的房子下赌注”。有常识的人们能够看得出来, 这样的赌注对于一个科学家来说已经不小了。那么, 如果中微子超光速, 它在实质上究竟意味着什么? 这与爱因斯坦的狭义相对论会有什么关联? 相对论的实质是什么? 它是否可以被破坏? 如果真的被破坏的话, 究竟应该在什么样的能量尺度和物理过程中被破坏? 回答这些关键问题将有助于人们更加客观地审视 OPERA 所进行的测量和声称的结果。

“中微子超光速”在实质上可以被认为是破坏了自然界最基本的时空对称性(洛伦兹对称性), 从而违背狭义相对论。狭义相对论有两个基础: 一个是相对性原理, 一个是光速不变原理; 这两者共同决定了万物赖以生存的时间空间的对称性, 这个对

称性在数学上对应于洛伦兹对称群, 它既基本又简单, 描述的就是人人生活于其中的 1+3 维时空中的转动不变性。狭义相对论的这两个基础不是物理学家凭空想象出来的, 而是已经隐含在描述电磁相互作用力的麦克斯韦方程之中。爱因斯坦的伟大贡献在于从中首次揭示了这两个原理并由此建立了对电磁学与力学的统一描述——狭义相对论, 其中麦克斯韦方程被完整保持, 但牛顿力学却作为相对论的宏观低速近似而被修改。这个理论成功地经受了一百多年来所有实验的考验。

狭义相对论从本质上说是一种关于自然界时空对称性的理论。自然界除引力以外的三种基本相互作用力——电磁力、弱力和强力(核力)均遵从狭义相对论。它揭示了基本的时空对称性, 称之为洛伦兹对称性。相对性原理的实质就是洛伦兹对称性的不变性, 光速不变的实质就是光速成为洛伦兹对称性的最基本的不变量。描述自然界电、弱、强这三种基本力的理论称之为基本粒子物理学的“标准模型”, 它非常成功, 自 20 世纪 50 年代以来, 为奠定标准模型所颁发的诺贝尔物理奖已达 17 次之多。这个理论包含两大基本对称性: 时空对称性(即洛伦兹对称性)和内部对称性(即规范对称性)。但是规范对称性在弱力中必须被破坏, 而且必须被自发破缺(这方面的研究已获 1999 年和 2008 年诺贝尔物理学奖, 我鼓励有兴趣对此进一步深究的读者, 去直接查阅著名诺贝尔奖网站对公众的详细介绍, 那里图文并茂)。弱力的规范对称性自发破缺的尺度由著名的费米常数 G_F 决定, 它带有质量量纲为 -2 , 从其实验测定值 $G_F = 1.166367 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2} \approx (250 \text{GeV})^{-2}$, 我们就可以直接推断 G_F 揭示了一个独特的能量尺度, 大约是 250GeV 的量级(1GeV 等于千兆电子伏特), 它更详细的分析表明这个尺度位于 100~1000GeV 范围, 因此导致弱规范对称性自发破缺的新粒子——希格斯粒子(或称“上帝粒子”)的质量必须位于此范围。目前正在欧洲核子中心运

行的大型强子对撞机 LHC 的能量尺度完全覆盖 $100\sim 1000\text{GeV}$ 范围,它预期将发现或排除这个“上帝粒子”。若此粒子被排除,标准模型将被一个新的革命性理论所修改。我们注意到,标准模型中的这个“上帝粒子”的确起了非凡的作用:它担当为一切基本粒子产生质量!这些基本粒子包括带分数电荷的夸克,带与电子同样电荷的轻子,不带电的中微子,以及带电的和中性的弱规范粒子。例如,凡是上过高中物理课的人大概都会好奇电子的质量是从哪里来的?为什么这么小,只有 9.1×10^{-31} 千克?那么我现在告诉你,电子的质量在标准模型中也由这个万能的“上帝粒子”来提供!你会很惊奇吧?不仅如此,中微子的质量只有电子质量的千万分之一左右,其质量的产生也需要借助于“上帝粒子”。因此,这个“上帝粒子”的存在与否,关系到自然界一切基本粒子质量的起源,无论它最终在 LHC 上被发现或者被排除,都将是整个物理学与科学中划时代的重大事件,而若是后者的话,就必将引发现代物理学的一场革命。

现在再来谈标准模型的时空对称性与超光速。如果超光速是真的,标准模型的另一个基本对称性——时空对称性(洛伦兹对称性)就会被破坏。那么,人们要问:洛伦兹对称性破坏预期的能量尺度究竟在哪里?不幸的是,与内部的规范对称性破缺不同,标准模型自身无法提供这样一个尺度。但是,我们知道在大家熟悉的牛顿万有引力定律中,恰好有一个基本引力常数 G_N (通常称为牛顿引力常数),它的实验值为 $G_N = 1/(1.22\times 10^{19}\text{GeV})^2$,其质量量纲也为 -2 ,与费米常数 G_F 类似,它提供了整个物理学的另一个基本能量尺度——普朗克尺度 $M_P = 1.22\times 10^{19}\text{GeV}$,在那里量子引力效应变得非常重要;不仅因为狭义相对论无法描述引力,而且爱因斯坦的广义相对论也无法完满描述量子引力,所以这是物理学家们预期产生洛伦兹破坏最自然的能量标度。由于标准模型本身的对称结构不包含这样一个尺度,洛伦兹破坏效应就只能作为“高阶效应”出现,受到普朗克尺度倒数的压低。具体讲,就是 E/M_P 压低,这里 E 是相关过程的能量;对于欧洲核子中心与意大利的 OPERA 中微子实验来说, $E=17\text{GeV}$,因此这个压低因子 E/M_P 就小到 10^{-18} 量级,远远、远远小于 OPERA 合作组声称的 10^{-5} 量级的超光速效应。虽然我们还不敢说 10^{-5} 量级的洛伦兹破坏效

应绝对不会发生,但可以肯定,其发生的可能性非常小。因此,如果 OPERA 结果没有得到其他实验的独立验证,物理学家们绝对不会感到任何意外。

我想强调的是,半个多世纪以来,对于标准模型中狭义相对论的洛伦兹时空对称性的检验已经非常广泛而精确了,无数实验基于相对论框架做了大量测量,能量上从兆电子伏特(MeV)、到千亿电子伏特(100GeV)乃至目前的万亿电子伏特(1000GeV)尺度,结果仍然与狭义相对论完全符合。OPERA 实验却声称在 17GeV 能量发现中微子超光速,而中微子不带电,只有弱作用,恰好是包括电子在内的所有高速运动的基本粒子中在实验上最难控制和测量的,因而也最易出错!为什么超光速只发生在中微子?也许中微子本身有神秘特性?其实,中微子在相对论框架中完全可以被完满描述,并不神秘;甚至连中微子的微小质量(大约 0.1 电子伏特量级)也可以通过著名的“跷跷板”(Seesaw)机制得到完美解释,从而在相对论框架下与电子等其他基本粒子一起得到统一描述。目前我国大亚湾中微子实验正在进行测定由其非零质量引起的关键混合角 θ_{13} 的重大研究。

从理论上讲,如果超光速是真的,不光狭义相对论,就连广义相对论也将面临相应的修改。要对整个现代理论物理体系进行如此庞大的修正,而又要让这些更改符合之前所有支持相对论的无数实验证据是非常困难的。举个具体例子,OPERA 实验中用到的一个关键手段是 GPS 卫星同步仪定时,其中必须考虑计入由于爱因斯坦狭义相对论和广义相对论引起的修正效应,后者还比前者大得多,而这个修正的大小与目前 OPEAR 的实验误差和声称的超光速偏离相比无法忽略。假定狭义和广义相对论对 GPS 定时的修正效应正确无误,进而在实验数据分析中导出狭义相对论被破坏的大小这个逻辑推理本身就受到严重质疑。此外,最近美国理论物理学家格拉肖(S.L.Glashow)与其合作者发表计算表明(A. G. Cohen and S. L. Glashow, “Pair Creation Constrains Superluminal Neutrino Propagation”, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 181803 [arXiv:1109.6562]): 由显示洛伦兹破坏引起的超光速中微子在传播过程中将会发生衰变,这意味着它们到达探测器的能量和角度分布,以及时间结构都会发生改变,远不像 OPERA 合作组声称的那样简单。这篇论文出现在

OPERA 实验论文之后大约一周,但是却在投稿后仅仅三周左右就被 *Phys.Rev.Lett.*正式发表。

值得一提的是,这篇论文的作者之一格拉肖应该也是人们熟悉的名字,他作为“标准模型”的奠基人之一与温伯格(S.Weinberg)和萨拉姆(A.Salam)分享了1979年诺贝尔物理奖;如上面所提到,目前这个标准模型预言的“上帝粒子”正在等待欧洲核子中心LHC实验的判决性检验;国际物理学界公认,这应该是能够引发一场真正的现代物理学革命的最可靠的和最佳的线索。不仅如此,我在上面已经指出,中微子质量只有电子质量的千万分之一左右,而其微小质量的产生也需要借助于这个“上帝粒子”;中微子质量之小也导致在同样能量下,它比电子以更加接近于光速的速度运动;但在狭义相对论中,一切已知的有质量粒子的速度小于光速;理论家曾研究过一种称之为“快子”的怪异粒子,其速度永远大于光速,而且速度越大能量越低,这样的粒子不稳定,会引起灾难性后果,幸而自然界中并不存在这种假想的粒子。一个粒子的速度与其质量大小密切相关,这是众所周知的事实;倘若中微子真的超光速,那它的质量一定非常特殊,而这又必然涉及帮助中微子产生质量的“上帝粒子”:其特性如何?它与中微子如何相互作用?归根结底,在实验上没有搞定“上帝粒子”之前,其他一切基本粒子(包括中微子)质量的起源与产生都是未解之谜。我们已经发表的研究结果表明(D.A. Dicus and H.-J. He, “Scales of Mass Generation for Quarks, Leptons and Majorana Neutrinos”, *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 221802; “Scales of Fermion Mass Generation and Electroweak Symmetry Breaking”, *Phys. Rev. D* 71 (2005) 093009),直接探索包括中微子在内的一切基本粒子质量起源的物理过程,必须

利用高能散射过程,这些散射过程需要达到1.2~170 TeV的能量尺度,因为我们证明了一切基本粒子质量产生的能量尺度的上限正是1.2~170 TeV范围。这里1 TeV = 10^3 GeV,恰好是一万亿电子伏特。这与我上面提到的由费米常数 G_F 所确定的能量尺度(100~1000 GeV)相当接近,都在TeV能标附近,但远远低于普朗克能标 10^{19} GeV,因此与我们预期的洛伦兹对称性破缺的尺度很不一样。

与大多数理论家一样,我也对OPERA实验持严重怀疑,虽然各自怀疑的原因大概会很不相同。因此,我觉得有必要在这篇短文中与读者分享一下我本人的观点。正如我上面所述,没有任何理论上的可靠证据或者迹象表明在17 GeV能量尺度洛伦兹对称性会遭到破坏,倒是恰恰相反,有很充分的理由预期洛伦兹破坏应该发生在普朗克能标 10^{19} GeV区域。

历史经验表明,一般在理论上完全没有把握的时候,物理学家只能主要依靠实验;但在实验很容易出错而理论又是如此严密可信的地方,应该正是值得实验家们慎思和反省的时候。

很显然,现在来谈意大利这个实验对爱因斯坦相对论的冲击,还为时过早。这也正是OPERA实验组自己的态度,他们把文章预印本放到网上而没有正式投稿的一个主要目的,就是希望国际同行们能够帮助他们找错,并促进其他实验组进行独立检验。

(清华大学近代物理研究所和高能物理研究中心 100083)

本文是2011年10月14日作者在科技部“中微子超光速研讨会”上的发言稿。

科苑快讯

电子是圆的吗?

许多人想象认为,电子是圆形球对称的自旋的点粒子。然而,假如电子具有偶极矩,这将打破通常的图像,圆形将被拉长而变成椭圆形。现在,英国伦敦帝国大学的J.J.哈德孙(J. J. Hudson)与他的同事一起,利用超冷的氟化钷分子设置了电子的电偶极矩(edm)的最低值。分子的edm值反映了非成对的电子的可能的偶极矩。

研究团队利用干涉技术进行测量。测量中,外电场和外磁场使两个态能量的差别正比于电子的电偶极矩。这是世界上获得的电子的电偶极矩的最低值,目前,这个值是小于 $10.5 \times 10^{-18} e \cdot cm$ 。这个值对应于任何新物理的能量标度为万亿电子伏特。这个值意味着超对称理论会有麻烦,因为超对称理论预言,在这个范围,电子有非零的电偶极矩。研究组计划把他们的实验测量结果再降低10倍。

(高宣译自2011年6月《欧洲核子中心快报》)