

让物理学家们着迷的两张图

闫同民

(华能伊敏电厂 021134)

我们力图猜中自然界的奥秘，并始终使我们的猜测服从于实验的检验。

——[美]史帝芬·温伯格

科学研究就是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不断地追求真理，是人类现代文明的重要组成部分。然而，物理学家们自己却大都不愿意把本身从事的工作完全归于社会责任感的驱使。他们宁愿把自己当成一个充满好奇心的孩子，愿意问一些诸如宇宙从何而来和物质的最小单位是什么——这样我们一般人通常只是耸耸肩的问题。他们却要试图找到答案！于是“他们进入了夜幕笼罩着的森林，探寻着自然的基本设计，并且狂妄不羁地宣称，已经发现了一些蛛丝马迹”(徐一鸿《可怕的对称》)。他们工作的热忱是来源于科学理论的优雅、严谨和完美(可能对于一个完美无瑕的艺术的作品也是这样)。遗憾的是，与图画、话剧或小说中遇到的艺术形象相比，我们对物理图像还不太习惯。但是对于很有鉴赏力的人来说，它的魅力并不差。本文试图通过两张图来帮助那些虽然爱好科学，但还没有跨入物理学家这一特殊职业的人窥视物理世界一角，同物理学家们一起分享一下科学研究的快乐与烦恼。

第一张图：电磁力、强核力和弱核力在某一能量尺度上会统一吗？

早在1974年，美国理论物理学家温伯格(S. Weinberg)、乔治(H. Georgi)以及出生于澳大利亚的女理论物理学家奎因(H. Quinn)就做过一个非常有趣的计算：证明强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的强度在 $10^{11} \sim 10^{17}$ 千兆电子伏能标处近似相等。2000年，乔治和奎因还因此得到了国际理论物理中心(ICTP)颁发的数学和理论物理领域的

最高荣誉——狄拉克奖(Dirac Prize)。

上述结论显然需要更精确的证明，这不仅要求更精确的算法，还得需要更精确的实验数据，但在大型正负电子对撞机(Large Electron Positron Collider, LEP)运营之前，其精确度并没有明显改观。不过，很多物理学家们还是很相信标准模型下，这三种相互作用会精确地汇聚在一个大统一的能标点上。著名美籍华人物理学家徐一鸿在他的著名科普著作《可怕的对称》(注意这部书是1987年出版的)一书中，以幽默生动的比喻描述了这三种力的统一(见图1)：“要使世界大统一，我们需要耦合强度在某一能量上相遇。如果只有两个徒步旅行者，一个上行，另一个下行，那么他们当然会在某一点上相遇。但是，如果有三个旅行者，两个上行，第三个下行，那么一般情况下，他们三人将不会在同一时间在某一地点相遇。假设我们知道每一名旅行者移动的速率，也知道两个旅行者的出发位置，那么三个旅行者全部在同时到达同一地点这一要求清楚地确定了第三个旅行者的出发位置。除非第三个旅行者在完全正确的位置出发，他就不会赶上汇合。”

但不可思议的是，随着实验测量数据的越来越精确，和这一预测的结果不是越来越吻合而是差距越来越

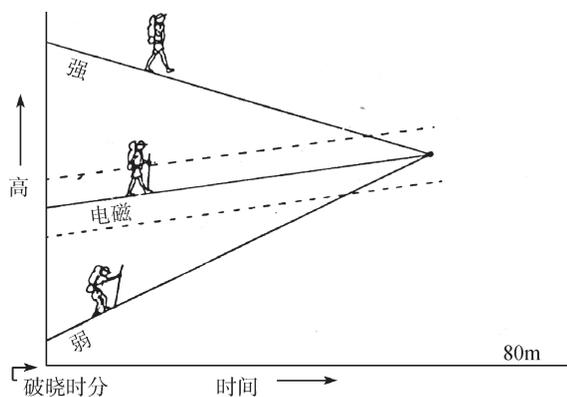


图1 徐一鸿形象地把三种力汇聚比喻成三个旅行者的相遇

越大。如图 2 所示：1987 年用世界平均值得到的三个耦合常数不能汇聚同一点的结论的置信度只有 2 个标准偏差 (图 2(a))。1990 年从 LEP 的 DELPHI 合作组获得的数据计算结果表明置信度已越过了 7 个标准偏差 (图 2(b))。

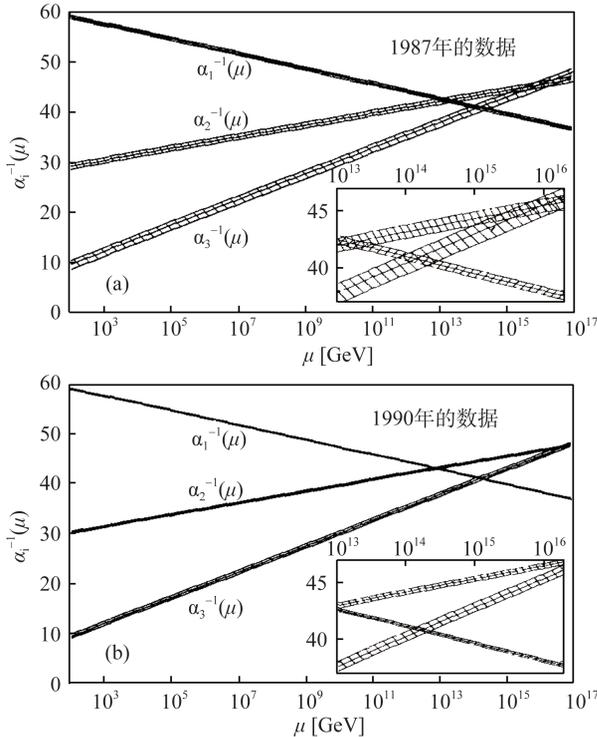


图 2 随着实验测量数据的越来越精确，三个耦合常数在标准模型下随能标的演化不是汇聚于一点的

但奇迹很快在 1991 年初发生了，有多个研究小组几乎同时得出：最新的数据表明，虽然在标准模型理论下三个耦合常数不能汇聚同一点上，但在 20 世纪 80 年代初由多个理论物理学家提出的最小超对称

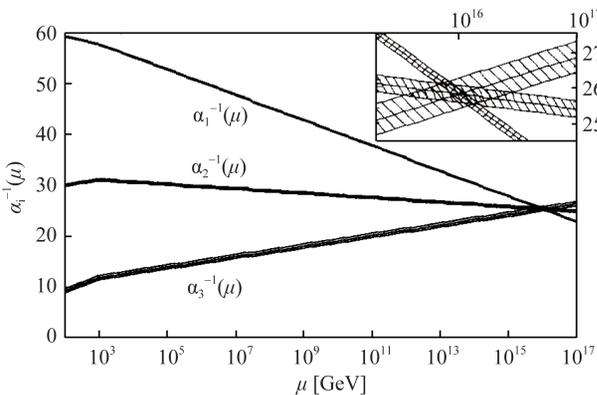


图 3 最小超对称理论下三个耦合常数几乎很精确地汇聚同一点

理论下三个耦合常数几乎精确无误地汇聚同一点上 (见图 3)！这在当时轰动了整个物理学界，使相信超对称理论的人们欢欣鼓舞。

让我们也做些简单的计算 (如果对简单的数据和公式也感到头痛的读者，可以越过这段)：

三个相互作用规范耦合强度定义为：

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (5/3)g'^2/(4\pi) = 5\alpha/(3\cos^2\theta_W), \\ \alpha_2 &= g^2/(4\pi) = \alpha/\sin^2\theta_W, \\ \alpha_3 &= g_s^2/(4\pi) \end{aligned} \quad (1)$$

这里 g' , g 和 g_s 是通常的 U(1) 群、SU(2) 群和 SU(3) 群的耦合常数, α 是精细结构常数, 定义 $\tan\theta_W = g'/g$ 为弱作用混合角。

实验数据给出^[4]：

$$\begin{aligned} \alpha^{-1}(M_Z) &= 127.916 \pm 0.015, \\ \sin^2\theta_W(M_Z) &= 0.23116 \pm 0.00013, \\ \alpha_3(M_Z) &= 0.1184 \pm 0.0007, \end{aligned} \quad (2)$$

由 (1) 式算出： $\alpha_1(M_Z) \approx 0.017, \alpha_2(M_Z) \approx 0.034, \alpha_3(M_Z) \approx 0.118 \pm 0.001$ 。

根据重正化群方程三个耦合常数随能标的演化关系如下 (单圈图近似)

$$\frac{d}{dt}\alpha_a^{-1} = -\frac{b_a}{2\pi} \quad (3)$$

$$(a=1,2,3), \quad (b_1, b_2, b_3) = \begin{cases} (41/10, -19/6, -7) & \text{标准模型} \\ (33/5, 1, -3) & \text{最小超对称} \end{cases}$$

这里 $t = \ln(Q/Q_0)$, Q 是重正化群方程能标。读者一定会问这 b 因子的数据从何而来？在这里只能告诉你：是算出来的。这恰恰是只有专业物理学家才能做到的，否则，人人都成为物理学家了。如费因曼 (R. Feynman) 所说：“这需要七年的时间——四年大学和三年研究生——才能把我们物理系的研究生训练得会用这个复杂微妙而有效的方式进行计算。”有了这结果，接下来中学生就能做了，(3) 式对应下标 ($a=1,2,3$) 是一个简单的直线方程，其结果绘制成图就是图 4。

然而，如果仅凭这就断定超对称一定存在，那么物理学就不是一门严肃的科学了。超对称的存在最终还得靠加速器发现超对称粒子来确定。但直到目前为止，实验没有发现一条对超对称有利的证据，相反，最近对电子形状的最精确测量实验，为超对

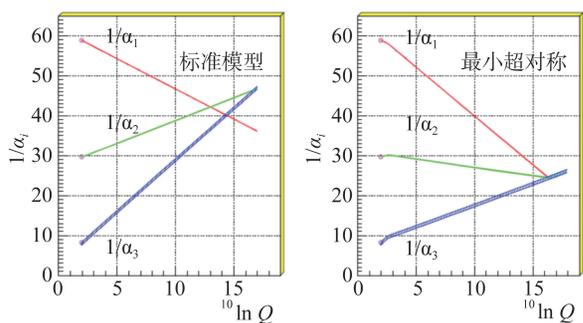


图4 三个耦合常数的统一分别在标准模型和最小超对称模型理论蒙上了阴影。但如果超对称真的不存在，这难道只是一个巧合吗？或许，这真是一个巧合——那只是上帝为了掩盖他的设计而给人类使用的障眼法罢了。

第二张图：真空会在某一高的能量标度崩溃吗

这个问题和前面第一个问题一样，可以追溯到20世纪70年代，如图5，由于当时希格斯粒子和顶夸克都没有发现，其研究重点是真空稳定性对希格斯粒子质量和顶夸克质量的约束，目的是指导当时的大型加速器发现这两种粒子。1989年林德纳(M.Lindner)等人根据真空稳定性对顶夸克质量希格斯粒子质量的限制做了较悲观的预测：如果费米实验室的Teratron上不能发现顶夸克，希格斯粒子也不会出现在LEP对撞机上发现。

然而1995年3月3日，美国费米实验室宣布发现了顶夸克，其质量比预想的大得多。但一些物理学家对希格斯粒子质量做出了更小的估计，因为真空有可能处在“亚稳定”状态，其大概意思是：真空可能在高的能标但低于普朗克能标变的不稳定，但在低能情况下，其寿命远远大于宇宙的使用寿命。这样，如图6即使希格斯粒子质量只有115GeV，需要顶夸克质量 $m_t < (175 \pm 2)\text{GeV}$ 。

2012年7月4日，欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)的CMS合作组和ATLAS合作组同时向全世界宣布：发现了期盼已久的“上帝粒子”——希格斯玻色子(当时只是宣布发现了“类希格斯粒子”，第二年3月14日，CERN才宣布确认就是希格斯粒子)。其质量大约是125GeV。很多物理研究小组争先恐后的进一步精确计算希格斯粒子处于这样一质量标准模型的真空稳定性如何。我国

的理论物理学家邢志忠等人，因比身在CERN的几位国外理论物理学家的该类论文晚了半天而追悔莫及，特在科学网贴出一篇题为《科研感悟：关键时刻，怎能睡觉》的博文，总结这场惊心动魄的学术竞争

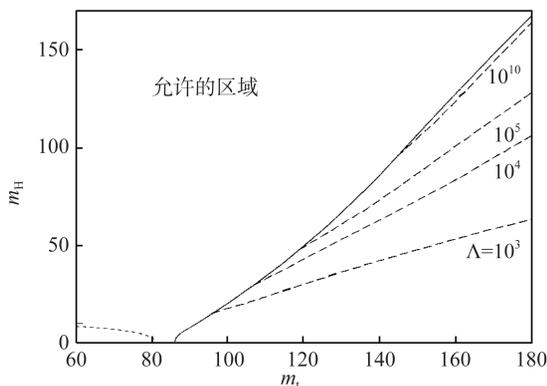
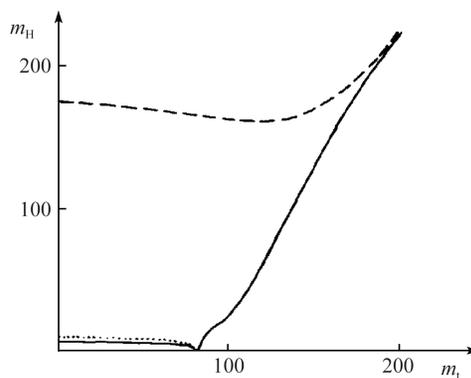


图5 真空稳定性要求希格斯粒子的质量下限是顶夸克质量的函数(其中 m_t 为顶夸克质量, m_H 为希格斯粒子质量)

游戏的经验和教训。

计算的结果是耐人寻味。希格斯粒子的质量一旦确定，它将决定标准模型另一重要参数——

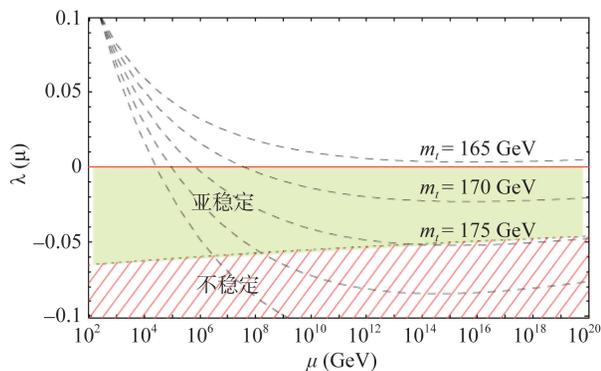


图6 希格斯四次耦合常数随能标的演化 $m_H=115\text{GeV}$ 和 $m_t=165, 170, 175, 180$ 和 185GeV [$\alpha_s(m_z)=0.118$]

希格斯四次耦合常数 λ ，其定义来源于标准模型势： $V = -\frac{1}{2}m^2|H|^2 + \lambda|H|^4$ 且与希格斯质量有明确关系： $m_H = \sqrt{2\lambda}v$ ，其中希格斯场真空期望值 $v = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} = 246.21971 \pm 0.00006 \text{ GeV}$ ，所以 λ 也叫希格斯自耦合常数，它和标准模型的其他耦合参数一样也是随能量跑动的，但这一参数是不能为负数的，因为这将导致弱电统一理论所依赖的真空的不稳定！而计算结果 λ 变负的能标大概为：

$\Lambda = \mathcal{O}(10^{10} \sim 10^{12}) \text{ GeV}$ 。耐人寻味的是，我们还是不能完全确定我们的真空是到底处在亚稳定还是完全稳定的，因为如图7所示，只要顶夸克的质量比现在测量的中心值小三个标准差，真空就是完全稳定的直到普朗克尺度。由此可见，建造“希格斯-顶夸克工厂”是即迫切又必要。我们必须对希格斯粒子和顶夸克的各项参数进行更精确的测量。希格斯粒子发现后，中国科学家于2012年提出建造下一代环形正负电子对撞机(CEPC)并适时转为质子对撞机(SppC)的方案，科学目标是精确测量希格斯粒子的性质以及搜索标准模型背后更基础的物理规律，在国际上引起了巨大反响。诺贝尔物理奖获得者、美国物理学家格罗斯(D. Gross)认为：“现在中国有一个很好的机会在自然科学基础研究方面起领导作用……这会和万里长城一样引人注目，会比长城作用更大。”希望这一方案早日实现，中国能够在不久的将来成为“希格斯工厂”的拥有国。

考虑到顶夸克质量实际可能比现在测量小三个标准差的可能性很小，我们的真空或许真的处在亚稳定的临界区域(图7)。尽管低能状况下，真空其寿命远远大于宇宙的年龄，使得我们不会因真空衰变最终崩溃而灭亡。但标准模型的真空这种在更小的尺度与其不协调性质，是其理论的一大难题。然而，这对于善于接受挑战的物理学家来说，或许是件好事。如同邢志忠研究员所说：“真空的稳定导致的能标截断，意味着规范作用‘沙漠’的结束和新物理‘绿洲’的出现。”

2015年4月5日，经过两年的升级维护和数月的精心准备，当今世界上最大的粒子加速器——欧洲大型强子对撞机(LHC)正式重新启动，开启第二阶段运行。具备更高能量的LHC的投入使用，为物理学家提供更多的研究机会。通过LHC，物理学家或许能建立新的物理学理论，从而更全面深刻地解

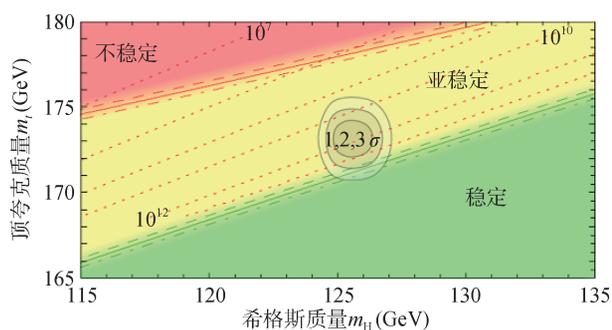


图7 我们的真空似乎处在一个亚稳定临界区域

释整个宇宙。而更大的可能是，我们还得走更长的路。但动人的剧情总是蕴于创作的过程而不是它的结果之中。美国费米国家实验室CMS研究员、伊利诺伊大学的卡瓦诺(R. Cavanaugh)说：“觉得能成为一名物理学家真的是太太好了，一想到我的工作，每天早上我都会笑醒。”和物理学家们一起陶醉于洞察大自然美妙而令人惊奇的设计，我们会感到生命充满着活力和喜悦。我们敬佩这些在人类知识的“黑暗深处”进行探索的科学家们，我们更敬重那些能够在百忙之中还抽出时间为科学的普及与传播辛勤付出的科学家。本文用温伯格的话开头也用他的话结束：“我热爱物理学——就算有机会从头再来一遍，我也不会选择任何其他职业。但这是一份相当冷僻和孤寂的职业，特别是像我这样的理论学家，大多数时候都是单枪匹马。我做的研究与世间事无关；人类的兴趣和情感根本不涉及其中。只有少数专业研究人员能够理解我的工作。为了到这座象牙塔外透透气，我喜欢想点别的东西，并把它们写下来。而且，和大多数科学家一样，我很清楚我们的研究是由公众资助的，如果不尝试着向公众解释我们在干什么以及我们希望怎样去做，他们的资助我们是受之有愧的。”

