

自然性标准与大型强子对撞机物理

邢志忠 译

一、科学思想中的自然性

“每一件事都是自然而然的，否则的话，它就不会发生了。”——玛丽·凯瑟琳·巴狄森(美国著名作家和人类学家)

几乎自然科学的每一个分支都有其自身的“自然性标准”。在环境科学中，自然性标准指的是一个地区质朴的程度，即不受人活动影响的程度，以及土生土长的物种所占的比例。对数学而言，自然性标准的含义与某些基本概念的直观性有关，被看作是人类思维方式的一个内在组成部分。自然性标准用于计算机科学，作为软件的可用性和灵活性的衡量标准；用于农业，作为农产品管理的一个颇受欢迎的标准；用于语言学，作为翻译质量的评估标准，即所译成的文字是否反映出该种语言的自然而惯用形式。但是只有在粒子物理学中，自然性才成为颇具影响力的概念，以一种可以意会却很难言传的方式影响着这个领域的发展。

当物理学家试图建立新理论的时候，自然性在美学意义上是一个强有力的指导原则。这一点似乎令人惊奇，因为物理学家最终得到的理论通常都基于深刻而基本的物理原理且其数学形式非常复杂，人们无法相信这样的理论会包含任何主观的美学的东西。然而，事实恰恰是理论物理学家经常从简单和美的标准(换句话说，奈尔森所定义的“结构自然性”)出发得到灵感，从而推导出他们的理论模型。当爱因斯坦被问及，如果爱丁顿1919年对日食的观测实验否定而不是肯定广义相对论的话，他该如何是好，爱因斯坦只说了一句话：“那么我会为亲爱的上帝感到遗憾”。他显然自信广义相对论的结构自然性绝非不值钱的摆设。

结构自然性是一个可以给予理论家灵感的强有力原则，但它却不能用来证实任何理论。此外，由于结构自然性受制于哲学观的影响和每个时代科学知识的局限性，它有时甚至会起误导作用。以当代眼光来看，用日心说理论解释太阳系要比用地心说



更自然，前者的图像是行星围绕太阳在简单的椭圆轨道上运动，而后者要求对每个行星引入不同的本轮。但是在那些与哥白尼同时代的人或他们的祖先眼里，也许地心说理论看起来更自然。第谷·布拉赫以一种刻薄但不令人信服的论调抛弃了日心说，他直言地球是一个“笨重而懒惰的物体，不适合运动”。毫无疑问，这种

信仰的形成，部分地受到亚里斯多德学派和圣经的影响，但错误的科学观念(即认为倘若地球并非静止的话，人就能够感知它在脚底下的运动)也在其中起了很大作用。

出生于萨摩斯岛的古希腊天文学家阿里斯塔克最先假定太阳是宇宙中心，然而其他人却基于下面的“自然性”理由排除了日心说。假设行星轨道的周期和半径之间存在正比关系，他们得出土星距地球比太阳距地球远29倍的结论，原因在于土星的周期是29年。阿里斯塔克利用三角法和天文学观测数据得到土星与地球之间的距离为 $2.0 \times 10^4 R_{\oplus}$ ，其中 R_{\oplus} 表示地球的半径(今天我们知道，土星和地球之间的最短距离为 $1.9 \times 10^5 R_{\oplus}$)。当时 R_{\oplus} 的数值是由数学家伊拉托斯顿从他那个著名实验中提取出来的(当太阳升至希恩城的正上空时，他在亚历山大城测量了太阳光线的倾斜角，从而计算出 R_{\oplus} 的大小)。由于土星是那个时代所知道的最远行星，人们很自然地假设宇宙的尺度大概就是从地球到土星的距离。但如果地球围绕太阳转动，我们在观察半径为 $2.0 \times 10^4 R_{\oplus}$ 的苍穹之上的恒星时就应该产生视差。人马星座 α 星是距地球最近的恒星，它的视差角实际上只有大约1弧秒。当时人们用肉眼没有观测到恒星的视差效应，所以日心说模型就被放弃了。哥白尼驳斥了上述关于恒星距离所做的看起来很自然的假设。他认为恒星和地球之间的距离应该至少为 $1.5 \times 10^6 R_{\oplus}$ ，这样一来，视差问题就不再成为攻击日心说的理由。

我们无法定量地给结构自然性这个标准下定

义，因为它带有明显的个人或者说主观特征。它与1936年度的诺贝尔医学奖得主亨利·戴尔所定义的“下意识的推理——我们称之为本能的判断力”有关。在粒子物理学领域，人们已经发展出一套自然性标准的更为规范的形式。当我们对大型强子对撞机LHC所能够观测到的新现象做出理论预言时，自然性标准将会发挥重要作用。这一标准，被奈尔森称为“数值的自然性”，是这篇文章要讨论的主题。

二、溺死在数据之中

“我对这些数字感到惶恐不安。”——威廉·莎士比亚（《哈姆雷特》剧中的一句台词）

这一节的讨论可以从费米常数 G_F 和牛顿常数 G_N 开始，它们分别代表弱相互作用和引力的强度。我们注意到它们的比值是一个非常大的数，

$$\frac{G_F \hbar^2}{G_N c^2} = 1.73859 (15) \times 10^{33}。$$

上式括号中的数给出了等式右边小数点后最后两位数的一个标准偏差的不确定性。我们在这个方程中采用的是普朗克常数 \hbar 和光速 c 的二次方，以便使比值本身成为一个纯粹的无量纲的数。

人总是对一些纯粹数字有特殊兴趣，甚至神魂颠倒。古希腊数学家毕达哥拉斯甚至确信，数字不仅是描述自然界属性的有力工具，而且含有导致物质各种性质的特殊品质。与苏格拉底和德谟克利特同时代的毕达哥拉斯学派的哲学家菲洛劳斯认为，5 产生颜色、6 导致寒冷、7 描述健康、8 代表爱情。数字被赋予的这些神秘性质可以用毕达哥拉斯学派的座右铭来概括：“一切皆源于数字”。

在现代物理学中，一些常数出现在描述基本物理规律的方程里面，它们常常成为人们冥思苦想的对象。有时这些思考不过是数字练习而已，但偶尔也会得到回报，使人们理解更深刻的物理规律。巴尔末在1885年首先推导出一个简单公式，能够与氢原子光谱线频率的实验数据完全符合，即

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)，$$

其中 m 和 n 为整数，且 $m > n$ 。当时巴尔末为公式和数据之间“令人无比惊奇的一致”感到困惑，然而他却丝毫没有觉察到玻尔在1913年对氢原子光谱的量子解释就隐藏在这个公式后面。

也有一些不太幸运的例子。人们在电磁学和量

子力学的初期就立即意识到精细结构常数 α 的特殊角色，它是由几个基本物理量构成的纯粹的数

$$\alpha^{-1} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar c}{e^2} = 137.03599911 (46)。$$

鉴于 α 的重要性，一直不乏试图用简单的数来“推导” α 的各种尝试。早期的测量结果甚至和 α^{-1} 为整数的信仰并不矛盾。很多人希望，如果找到了 α 的正确公式，就会打开通往比量子电动力学更基本的新理论之门。在五花八门的 α 表达式中，精度非常高的包括 $\alpha^{-1} = (8\pi^4/9)(2^4 5!/\pi^5)^{1/4}$ 、 $\alpha^{-1} = 108\pi (8/1843)^{1/6}$ 、 $\alpha^{-1} = 2^{-19/4} 3^{10/3} 5^{17/4} \pi^{-2}$ 和 $\alpha^{-1} = (137^2 + \pi^2)^{1/2}$ 。甚至海森堡也公然加入这场游戏，提出一个不太精确的表达式 $\alpha^{-1} = 2^4 3^3/\pi$ 。令人遗憾的是，这些尝试都没有特别的启发性。事实上，可以在大统一理论的框架内对精细结构常数做出概念上的推导，但 α 的公式当然不是那些业余数字学家所能轻易猜出来的：在大统一理论中 $\alpha = \alpha_s [\sin^2 \theta_W (b_1 - b_3) + (3/5) \cos^2 \theta_W (b_3 - b_2)] / (b_1 - b_2) +$ 高阶项，其中精细结构常数 α 、强相互作用耦合常数 α_s 和弱相互作用混合角 θ_W 的取值要归一化到相同的重整化标度， $b_{1,2,3}$ 代表规范场 β 函数的系数。要想得到与实验精度一致的预言，上面公式中的高阶项是不能省略的。

对基本常数数值所做的思辨也许是有意义的，理由在于还原论者相信：存在一个更基本的理论，其中所有无量纲的参数都是确定并可以计算出来的。爱因斯坦坚信，最终一定可以把所有力统一在一个理论框架内。他甚至考虑到这个基本理论的唯一性，它的参数是以唯一可能的恰当方式确定下来的，不容许任何不确定性：“使我真正感兴趣的问题是，上帝在创造世界的时候是否有选择的余地；换句话说，逻辑的简单性作为必需的原则还能否留给他任何自主权”。这种还原论的信仰在上个世纪享有盛誉并取得了极大成功，把物理学的各个相互分离的学科（力学、光学、电磁学、热力学等等）统一到标准模型的框架中，只用少量的自由参数就能够精确预言微观和宏观物质世界的性质，包括小到基本粒子内部 10^{-16} 厘米的距离，大到宇宙大爆炸之后1秒时刻的状态。然而，正是这组自由参数仍旧超出我们的理解范围，从而阻碍了我们实现爱因斯坦的计划。弄清楚费米常数和牛顿常数的比值就是我们所面临的难题之一。

前面给出的 G_F 与 G_N 之比的显著特点是它的数值大得惊人。如果基本粒子的标准模型所包含的自由参数最终可以从一个更基本的理论推导出来，那么它们也许携带与更深刻物理规律有关的信息。标准模型中那些被我们看作常数且数量级为 1 的物理量有可能在更基本的理论中具有明确的数学表达式，其中包含诸如 2 和 π 这样的数（这里我只考虑那些由纯粹的数字所给出的常数，而带量纲的常数则用来定义计量单位）。另一方面，倘若一个常数的测量值等于一个很大的数，那么它的最终表达式就不可能是 2 和 π 等数字的简单组合。于是乎我们倾向于认为可以从这个常数的数值获得有关最终理论的某些重要性质。

大数的诱惑尤其令人着迷。特别打动爱丁顿的想法是，宇宙中质子的数目（等于电子的数目） N_E 一定是个严格的整数。他算出 $N_E \sim 10^{80}$ 并确信 N_E 绝非我们这个宇宙的一个偶然特性，而是自然界的一个基本常数。埃丁顿据此推断，在一个包含 N_E 个粒子的系统中电子和质子之间的引力 ($G_N m_e m_p / r^2$) 由两个粒子之间的电力 (e^2 / r^2) 的统计涨落 ($\sqrt{N_E}$) 给出。因而

$$\frac{e^2}{G_N m_e m_p} = \sqrt{N_E}。$$

取 $N_E = 10^{80}$ ，则结果与实验观测值 $e^2 / G_N m_e m_p = 2.85 \times 10^{40}$ 符合得很好。对于今天的读者而言（实际上也包括很多与埃丁顿同时代的人），上述论断含有太多的犹太教神秘哲学的味道。不过狄拉克却受此启发提出了他的“大数假说”。任何出现在自然界的大数都应该和一个单独的大数简单地联系在一起，后者被狄拉克取为宇宙的寿命。事实上，他构造出三个无量纲的数，它们恰巧都很接近 10^{40} ：① 可观测宇宙的尺度与电子半径的比值；② 质子和电子之间的电磁力与引力的比值；③ 可观测宇宙中质子数目的平方根。为了满足大数假说，这三个数中任意两个的比值在宇宙的膨胀过程中应该大致保持为常数。这一点只有在若干基本常数随时间变化从而使三个数的比例保持不变的前提下，才做得到。狄拉克于是推断牛顿常数应该随宇宙的演化而变化，而且预言了 G_N 对时间的依赖关系。这个令人吃惊的结果，以及狄拉克的文章写于他度蜜月期间的事实，促使玻尔做出如下评论：“看看人们结婚的时候

会发生什么事情吧！”狄拉克的预言其实并不很成功。他对宇宙早期引力的修正将改变太阳的能量输出，使海洋在前寒武纪就会沸腾，而实际上生命早在这之前就在地球上发展起来了。

狄拉克的假说告诉我们，自然界中大数的存在也许和基本理论的性质毫无关系，它们更有可能是宇宙演化的结果。美国天文学家罗伯特·亨利·蒂克最先指出：狄拉克分析的那三个数之所以很大，实际上有一个非常简单的解释，而不必要求牛顿常数随时间变化。为了实现我们在地球上所观察到的生物化学的复杂性，宇宙必须生产出碳、氮、氧和其他重元素，它们在主星序恒星的演化中合成，然后通过超新星爆发散布到整个空间。估算一下这些过程所需要的时间，加上宇宙膨胀的信息，我们发现狄拉克所考虑的三个数其实至少应该像我们观测到的那么大。事实上，这几个数也不能太大，否则诸如太阳等氢燃烧的恒星早就都烧尽了。这意味着倘若狄拉克的那三个数大约为 1 的量级或者远远大于其真实数值，我们就应该感到惊奇才对，但其实际数值其实处在最合理的范围之内。一个广阔而古老的宇宙衍生出我们这样的观察者是一个不可避免的结果。观察者的观点在于：虽然在地球上中国人比希腊的阿索斯山居民多上百万倍，然而你如果恰巧漫步在希腊半岛的修道院周围，你不会感到惊奇的是你有更大的概率碰到一个正统的修道士而非一个中国人。简而言之，狄拉克的问题看来是个障眼法。

难道 G_F / G_N 的巨大比值也是由于宇宙的演化或统计概率，而不传送任何超出标准模型的理论信息？稍后再讨论这个问题，而目前更急迫的问题是去理解为何巨大的 G_F / G_N 数值与 LHC 的对撞机实验有关。

三、量子复杂化问题

“任何人，如果他对量子理论不感到震惊，那么说明他还根本没有理解它。”——尼尔斯·玻尔

当我们考虑量子力学效应的时候，比值 G_F / G_N 的真正疑难之处就会显现出来。在量子理论中，真空是一个很热闹的地方。粒子与反粒子对在时间 t 之内通过从真空借取能量 E 而不断地无中生有，破坏能量守恒定律，但遵循海森堡的测不准原理 $Et < \hbar$ 。这些从真空产生出来的“虚”粒子带有与普通粒子相同的量子数，唯一的例外是它们的能量与动量关系不同寻常 ($E^2 - p^2 = m^2$)。在标准模型中，

G_F 的大小是由希格斯粒子的质量 m_H 决定的，即 $G_F \sim m_H^{-2}$ （具体系数对我们的讨论并不重要）。当希格斯玻色子在量子真空中传播时，它感觉到虚粒子的存在并与它们发生相互作用。希格斯玻色子的一个典型特征是它和标准模型粒子的相互作用强度正比于相应粒子的质量。事实上，借用列宁的话：“布尔什维克可以掌握群众”，我们要说：“希格斯机制可以支配质量”^{*}。当虚粒子出现在真空中时，它们与希格斯玻色子发生相互作用，其有效强度由可获得的能量 E 确定。由于量子修正的原因，希格斯玻色子在布满虚粒子的真空里面的运动所受到的影响正比于 E 。因此希格斯玻色子的质量平方 m_H^2 获得一项额外贡献

$$\delta m_H^2 = \kappa \Lambda^2,$$

其中 Λ 是虚粒子所能得到的最大能量，而 κ 是比例系数并且它的典型值为 10^{-2} 的量级（对 κ 的贡献来自于虚粒子，它们带有标准模型自由度的量子数。 κ 的具体表达式将在第六节给出，它的数值为 $\kappa = 3 \cdot 10^{-2}$ ）。

一个简单的类比可以帮助我们理解上述结果。我们不妨把真空的量子涨落用一个人人们更熟悉的温度为 T 且包含大量粒子的热力学系统的热涨落来替代。我们将这些粒子记作 Q ，它们在该热容器中所扮演的角色如同量子真空中的虚粒子，而温度 T 的角色相当于最大可利用的能量 Λ 。现在让我们在容纳 Q 粒子气体的容器里面插入一个不同类型的粒子，它开始是静止的。我们把这个粒子称作 H ，因为它在这个类比中的角色相当于希格斯粒子。在初始时刻， H 的速度为零，所以它的能量 E_H 和质量 m_H 相等，后者的取值远小于温度 T ($E_H = m_H \ll T$)。然而，根据统计力学的观点，我们预期 Q 粒子的碰撞很快就会使 H 粒子处于热平衡状态，因此它的能量很快就会达到 T 的量级。这一点与量子系统的情形很类似，即由于量子涨落效应的缘故，希格斯粒子的质量被提升到 Λ 量级。

在方程 $\delta m_H^2 = \kappa \Lambda^2$ 中，令人烦恼之处在于它所预言的希格斯粒子质量 m_H ($\sim G_F^{-1/2}$) 应该接近理论所容许的最大能量。如果最大能量等于普朗克质量 M_P ($\sim G_N^{-1/2}$)，那么我们发现比值 G_F/G_N 相当接近 1，与测量值 $\sim 10^{33}$ 十分矛盾。

一种摆脱上述困惑的出路是，假设一旦所有的

量子修正效应都考虑在内，那么系数 κ 可能难以置信地远小于它的典型值 10^{-2} 。这要求在不同能标处不同虚粒子对 m_H 的不同贡献必须非常精确地相互抵消。取 $\Lambda = M_P$ 为例，在 κ 的表达式中各项相消的精度必须达到 $1/10^{32}$ 。如此高精度的相消只可能意外发生，是自然界对进入粒子物理学的所有常数都选取了特殊值的结果。不过一个在 10^{32} 水平上完全偶然的相消虽然不能在逻辑上排除掉，看起来却太人为了，让我们无法释怀。这不是爱因斯坦在构思理论时所期望的，因为逻辑简单性决不会给理论留下人为地微调参数的余地。

下面再做一个简单的类比，以便人们对上面所提到的参数微调的程度有所感觉。把一支铅笔的笔尖朝下平衡地竖立在桌面上是一门精巧的技术，需要耐心和毫不动摇的手。问题的关键在于微调铅笔的位置，使其质心刚好下垂在笔尖的表面。如果 R 是铅笔的长度、 r 是笔尖表面的半径，那么把铅笔倒立在桌面上所需的精度为 r^2/R^2 的量级。现在我们把这个结果与 κ 参数的微调程度相比较，发现得到 G_F/G_N 所需的精度等同于把一支长度相当于太阳系尺寸、尖端宽度仅为 1 毫米的铅笔平衡地倒立起来。

这种情形使粒子物理学家们普遍相信，如此奇异的巧合一定有其不为人知的理由。倘若不求助于任何特殊的相消并取定 κ 的期望值 10^{-2} ，我们可以利用方程 $\delta m_H^2 = \kappa \Lambda^2$ 求出最大能量。我们发现 $\Lambda \approx 1 \text{ TeV}$ ，这是现有粒子物理学知识可以被外推的能标。超出 TeV 能标，新理论开始发挥作用，从而修改希格斯粒子的质量对量子修正的敏感度。在 TeV 能标以上研究粒子碰撞的 LHC 实验将探索这一新的能量区域，并能够告诉我们标准模型是否将被新理论所替代。

四、作为原则的自然性标准

“我从来就不依照原则而生活。”——奥托·冯·俾斯麦（德意志帝国第一任宰相）

我们现在可以明确定义自然性标准。考虑一个从低能到最大能标 Λ 都有效的理论，并以 Λ 为单位使它的所有参数都没有量纲（这里按惯例取自然单位 $\hbar = c = 1$ ）。依照 1999 年诺贝尔物理学奖得主格拉杜斯·特霍夫特的表述，自然性标准规定该理论容许

^{*}原文在这里使用了双关语“masses”，它可译作“群众”，但是在物理学中它的含义是“质量”。

它的某个参数远小于 1，但必要条件是设这个参数为零可以增加理论的对称性。如果做不到这一点，那么该理论是不自然的。上面对自然性标准的表述包含了两个基本概念：对称性和有效理论。两者都在还原论方法中扮演关键性的角色，而这一方法已经通过标准模型的建立成功地使我们深刻理解了基本相互作用力。

当代物理学把对称性看作是决定物理规律的基本要求。如果理论的某个参数由于对称性的限制而等于零，那么即便我们把所有的量子修正效应都考虑进来，它依然为零（反常的对称性属于例外，但它们与我们的讨论无关）。这就是小参数并不一定成问题的原因，倘若它遵循上述自然性标准而受到对称性的“保护”。

在标准模型中没有任何对称性保护希格斯粒子的质量，这就是量子修正 $\delta m_H^2 = \kappa \Lambda^2$ 大得足以使 m_H 接近 Λ 的基本原因。通过简单讨论就可以理解，没有对称性保护 m_H 这一点与希格斯玻色子的自旋为零的性质有关。质量为零、自旋等于或大于 1/2 的粒子具有两个自由度，而质量不为零、自旋等于或大于 1/2 的粒子具有两个以上的自由度（自旋为 1/2 的马约拉纳粒子是个例外。但是对称性的论点依然适用于这种情形，原因在于马约拉纳质量项破坏相应的费米子数），因此两种情形之间存在概念上的区别（有质量与无质量粒子之间的差别可以直观地理解。光子有两种极化，代表沿着运动方向的横向模式。但对于一个有质量的自旋为 1 的粒子，我们可以取该粒子处于静止状态的参照系。在静止系中，我们无法区分粒子的横向和纵向模式，因而转动不变性要求它存在三种极化状态。类似的讨论也适用于自旋为 1/2 的粒子。一个质量为零、自旋等于 1/2 的粒子具有确定的手征态。而对于一个有质量的粒子，沿它运动方向的洛伦兹放大使我们可以选择一个参照系，从而改变它的手征态。所以相对论不变性要求质量不为零的粒子拥有左和右两种手征态。同样的论据却不适合自旋为 0 的粒子，原因是没有任何方向能够内在地被粒子本身所定义）。这种差别源于无质量的粒子理论具有一个额外的对称性（对自旋为 1 的粒子而言是规范对称性，对自旋为 1/2 的粒子而言是手征对称性）。多出来的对称性允许我们消除零质量的粒子理论中的部分自由度。这一论点适用于自旋等于或大于 1/2 的粒子，却不适用于

自旋为 0 的粒子。的确存在某些能够保护零自旋粒子质量的特殊对称性，比如超对称等以非线性方式实现的对称性，但是它们并不存在于标准模型中。所以很多人把希格斯粒子看作是“不自然的”。

自然性标准的第二个要素是使用有效场论。有效场论是一个强有力的概念，它的想法在于：在量子场论中有可能用一个简化版理论取代原版理论，从而计算那些动量小于最大能标 Λ 的粒子所涉及的任何物理过程。该有效理论利用定域算符表达，只包含轻自由度。这意味着低能标（长程）动力学可通过把高能标（短程）信息转化成有限的参数来描述和计算。有效场论是还原论方法的强有力体现。随着能标的降低，系统的复杂性增加了，新的现象就会显现出来。这些现象可以由一个有效理论来最好地描述，它背后的完备理论的所有细节都无关紧要；也就是说，那些细节只需被归纳成有限的参数出现在有效理论中。我们可以通过实验手段去测量有效理论的参数，或者通过理论手段去推导它们，也许两种途径都用得上。这种还原论方法的一个很好的例子是热力学，它就是从统计力学推导出来的。

如上所述，自然性标准排除了包含高能标处物理信息的参数与低能标处有效理论的动力学之间相互关联的可能性。这种关联性倘若存在的话，将意味着作为有效理论之基础的思想体系的崩溃（这并不意味着有效理论的方法毫无用处，而只意味着低能标处的有效语言无法独自揭示完整理论的某些性质。如果关于引力可能是最弱的相互作用力的推测是正确的，那么它可以作为一个实例说明，完整理论的这个性质不能通过有效理论的途径推导出来）。倘若自然性标准是一个靠得住的指导原则，那么我们预期在 LHC 将发现新粒子，这些新粒子与解决希格斯玻色子质量的量子修正问题有关。《大型强子对撞机的前景》一书的其他章节会讨论若干描述新粒子的理论方案。如果 LHC 实验发现不了任何与 TeV 能标相关联的新现象，自然性标准就失效了，而对 G_F/G_N 等级性问题的解释则超出了有效场论的范畴。

五、对有关事件的回顾

“历史记录不过是一组达成共识的谎言。”
——拿破仑·波拿巴（法兰西第一帝国皇帝）

自然性的概念及其对弱电物理的含意并不是突然从某一论文中冒出来的，而是通过粒子物理学

界的“集体行动”发展起来的，它们与超出标准模型的新物理的关联得到了界内人士越来越多的强调。这里我将简要介绍理论粒子物理学家们是如何发展针对希格斯玻色子质量的自然性标准的。

从 1976 年开始，艾尔岱德·基尔迪纳和史蒂芬·温伯格分别揭示出当时刚发现不久的大统一理论存在着一个概念性的困难，即所谓的等级问题。人们发觉在大统一模型中，单圈量子修正对希格斯粒子质量的贡献正比于超重粒子态的质量，后者的数量级为 $M_{\text{GUT}}=10^{14-16}\text{GeV}$ 。保持 M_{W} 和 M_{GUT} 能标的等级间隔，需要在比 10^{-24} 更精细的水平上微调理论的参数。这就相当于在具有两个相差很大的能标理论中对希格斯自然性问题的一个具体认识。即便是现在，有些人依然觉得以这种方式理解和接受自然性问题要比其他方式更容易些，因为如此一来根本不必提及有效理论中那些依赖于截断（和正规化步骤）的物理量：米凯尔·沙珀史尼科夫承认，存在 M_{GUT} 能标就会有希格斯粒子的自然性问题。但是他认为，倘若在弱电能标和普朗克能标之间没有任何新的质量标度，那么自然性问题也许就不存在。他的理由是普朗克质量可能在概念上不同于低能有效场论的紫外截断。

伦纳德·萨斯坎德在 1978 年引入希格斯粒子的自然性问题作为他提出人工色模型的主要动机，然而这却使率先指出基本标量粒子的存在会引发概念性困难的肯尼思·杰迪斯·威尔逊获取了全部荣誉。事实上，威尔逊在一篇写于 1970 年底的文章中从有效理论的观点出发明确阐述了自然性问题：“有趣的是，我们注意到自然界中并不存在弱耦合的标量粒子；标量粒子的质量项既不破坏内在对称性也不破坏规范对称性，这种属性在自由粒子中是独一无二的。我们的讨论可以用一句话来总结：一定要‘保护’质量项或者对称性破缺项在大动量处免受各种相互作用（电磁力、弱力或强力）所造成的大幅度修正。即便考虑高阶的强、电磁或弱修正，一个对称性破缺项 h_{λ} 也会受到保护，只要 h_{λ} 的重整化群方程右边正比于 h_{λ} 本身或者正比于其他小的耦合常数。这个必要条件意味着标量粒子不会传递弱相互作用”。他说得再清楚不过了。然而，威尔逊却在 2004 年完全收回了上述观点。回忆起他在上个世纪 70 年代初所得到的结果，威尔逊说：“最愚蠢的错误在于声称，就目前能够测量得到的能标而言，标

量的基本粒子不可能出现在基本粒子物理学中。这种论断没有任何意义”。

自然性标准是特霍夫特在 1979 年的会议报告中以我们前面介绍过的方式明确表述的。其实这一标准的前身是盖尔曼的极权主义原则：“不被禁止的每一件事都是必需做的”。[†]它指的是一个在很大程度上已被实验证实了的性质，即没有被守恒定律明确禁止的每个相互作用项都必须出现在理论中。有效理论中的量子修正似乎是通过给予那些不被对称性禁止的参数很大的贡献而实施了极权主义原则。

尽管早在 1979 年以前人们就已经讲清楚了希格斯粒子的自然性问题，但是超对称作为这个问题的一个可能解决方案却只在鲁卡诺·马雅尼当年的会议报告中被提及：“在超对称理论中，有希望得到 V_{eff} 的裸曲率为零，而且这个结果不会被辐射修正重整化。然而具体的模型尚未建立”。当时一些超对称模型正在发展之中，其中皮埃尔·法耶特的工作最引人注目，但是它们与自然性问题没有任何关联。虽然那时人们已经发现了不重整化定理，但超对称被更多地当作统一引力和规范相互作用力的一种途径，并没有用来讨论等级性问题。或许很多物理学家并不认为希格斯粒子质量的自然性问题特别重要，原因只在于希格斯模型本身似乎并不特别吸引人。正如吉安·伊利奥泡勒斯在 1979 年的爱因斯坦专题研讨会上所说的那样，“有些人，包括我本人在内，确信希格斯机制是对我们一无所知的对称性自发破缺的动力学所给出的一个方便的参数化方案，但基本的标量粒子并不存在”。

情况在 1981 年发生了变化。马丁努斯·韦尔特曼于 1980 年底发表了一篇很有影响的文章，强调了希格斯粒子的自然性问题。1981 年，爱德华·威滕明确指出如何用超对称解决自然性问题，他同时阐明了超对称的动力学破缺所扮演的关键角色。大约 1 个月之后，萨瓦斯·迪摩泡勒斯和霍华德·乔奇艾利用鲁卡诺·吉拉蒂罗和马克·格里萨鲁关于超对称软破缺的结果发展出一个简单而现实的超对称大统一模型。于是乎构造超对称模型的时代拉开了序

[†]尽管极权主义原则无可争议地归功于盖尔曼，我却无法查到它的原始出处。欧利克萨·密龙·毕拉纽克和乔治·苏达山于 1969 年发表在《今日物理》上的一篇文章是我找到的关于这句话最早的参考文献。极权主义原则的表述是从特伦斯·汉伯里·怀特所著的《曾经和未来的国王》（1958 年第一版）一书借鉴而来的。

幕，随后的研究爆炸式地激增。从那时起，希格斯粒子的自然性问题成为粒子物理学中被研究得最多的难题之一，它也成为探索超出标准模型的新物理的主要动机之一。

六、自然界所选择的路径

“我们竟然能够认识宇宙？上帝啊，在唐人街找到你的路就已经足够困难了。”——伍迪·艾伦（美国电影导演、戏剧和电影作家）

自然界如何处理 G_F 和 G_N 之间的等级问题呢？宇宙万物遵从自然性标准吗？LHC 实验将能够在一定程度上澄清这些问题。同时，我们只能发挥我们的想象力。通过研究自然界如何处理其他具有类似特征但已经知道答案的问题，我们可以学到一些有用的东西。

据我所知，一个有趣的类比是由村山齐最先提出的。把电子看作半径为 r 的球体，相应的电磁能等于 α/r 。这份能量一定小于电子的总能量 $m_e c^2$ ，其中 m_e 代表电子质量，我们因此得到

$$r > \frac{\alpha}{m_e} = 3 \times 10^{-15} \text{ m}。$$

也就是说，电子的半径必须大于一个原子核的半径！当像恩里科·费米和弗兰克·拉塞缇在电子自旋被发现后所做的那样，把旋转球体的磁能 μ^2/r^3 ($\mu = eh/2m_e c$ 是电子的磁动量) 也考虑进来时，情况变得更糟。在这种情况下，人们发现 $r > \alpha^{1/3}/m_e$ 。

下面我们讨论这个例子的令人费解之处。要么那些对电子总能量有不同贡献的项以很高精度神秘地相互抵消了；要么某种新物理在能标 $r^{-1} \sim m_e/\alpha$ 之上就开始起作用了，从而在短程处修正了电磁力对电子质量的贡献，维护了理论的自然性。在这个例子中，自然界选择了第二种可能性。事实上，狄拉克证明了结构自洽的相对论性量子理论必须包含一个质量为 m_e 的新粒子，即正电子。正如维克多·弗雷德里克·韦斯科夫所具体计算的那样，在短程处电磁力对电子质量的贡献既不以 $1/r$ 的方式也不以 $1/r^3$ 的方式增大，而是以 $m_e \alpha \ln(m_e r)$ 的方式变化。这一贡献小于电子质量，即便 r 像普朗克长度那样短也是如此。既然这样，结果表明自然界宁愿服从自然性标准的要求。

还可以考虑另外几个例子，其中用有效理论计算出来的物理量有两种选择——或者要求那些对短程效应敏感的贡献相互抵消，或者要求出现新物理

以恢复理论本身的自然性。自然界在很多情形中选择了维持理论的自然性，这就需要新粒子在适当的能标处修改理论。例如，电磁相互作用对带电和中性 π 介子质量差的贡献为

$$M_{\pi^+}^2 - M_{\pi^0}^2 = \frac{3\alpha}{4\pi} A^2，$$

这里 A 代表紫外动量截断，即 π 介子有效理论的最大能量。该方程对 $M_{\pi^+}^2 - M_{\pi^0}^2$ 的预言不应该超过实验测量值 $(35.5 \text{ MeV})^2$ ，这一要求意味着 A 必须小于 850 MeV 。事实上， ρ 介子 ($M_\rho = 770 \text{ MeV}$) 存在于此能标之下，而 π 介子的复合结构削弱了电磁力对 $M_{\pi^+}^2 - M_{\pi^0}^2$ 的贡献。

另一个例子是 K^0 与 \bar{K}^0 介子的混合。利用有效理论在 K 介子质量所对应的能标处计算 K_L 和 K_S 本征态的质量差，结果是

$$\frac{M_{K_L} - M_{K_S}}{M_{K_L}} = \frac{G_F^2 f_K^2}{6\pi^2} \sin^2 \theta_c A^2，$$

其中 $f_K = 114 \text{ MeV}$ 是 K 介子的衰变常数， $\sin \theta_c = 0.22$ 代表卡比博角。如果我们要求该方程的结果小于实验测量值 $(M_{K_L} - M_{K_S})/M_{K_L} = 7 \times 10^{-15}$ ，就会发现 $A < 2 \text{ GeV}$ 。事实上，在达到这一能标之前，一个新粒子（即粲夸克 c ，它的质量 $m_c \approx 1.2 \text{ GeV}$ ）修正了理论的短程行为，使所谓的 GIM 机制得以实现。顺便提及，虽然其他两个例子都是从结果追溯到原因的演绎，我们从 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合推论出新物理的存在却是历史真实的一幕：这其实是在粲夸克被发现以前玛丽·凯瑟琳·盖勒德和本杰明·李用以计算粲夸克质量的论据。

我们可以用相同方式表述希格斯粒子的质量问题。把标准模型当作一个有效理论，我们可以利用它来计算由于希格斯相互作用所导致的对 m_H 的贡献。我们发现领头级的效应是

$$\delta m_H^2 = \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (4m_t^2 - 2m_W^2 - m_Z^2 - m_H^2) A^2，$$

这里 m_t 、 m_W 和 m_Z 分别是顶夸克、规范玻色子 W 和 Z 的质量，而 A 代表最大的动量。有人也许天真地认为，当 m_H 取特殊值时（差不多刚好在 $200 \sim 300 \text{ GeV}$ 的范围内，依赖于重整化标度的数值），方程右边的几项可以相互抵消，那么希格斯粒子的自然性问题就不存在了。不幸的是，这不足以解决问题，因为该方程只给出了辐射修正对 m_H 的红外贡献。某些

质量的数量级为 Λ 的粒子态（超出了有效理论本身的框架）会给予 m_H 同样大小的贡献。比如说，在软破缺的超对称理论中并不存在二次发散项，但这不足以解决等级性问题，新粒子的质量处在 TeV 能标以下也是必要条件。该方程给予 m_H 的贡献不应该大于 182 GeV（标准模型与目前的实验数据相符所得到的具有 95% 置信度的限制），这个要求意味着 $\Lambda < 1.0 \text{ TeV}$ 。只有 LHC 实验能告诉我们自然性标准是否也在这个例子中很成功，以及质量低于 TeV 的新粒子是否存在。

不幸的是，并非所有例子都是成功的。有一个重要的实例可以说明自然界似乎并不总是尊重自然性标准。天文学观测限定了我们所在的宇宙的真空能量密度，从而要求宇宙学常数的标度必须小于 $3 \times 10^{-3} \text{ eV}$ 。由于对宇宙学常数的量子修正随着最大能量 Λ 的增加而变大，自然性标准暗示我们对粒子物理学的理论描述在低至 $3 \times 10^{-3} \text{ eV}$ 的能标处就开始失败了。我们有很好的证据表明事实并非如此。自然界也许会选择超对称以一种“自然的”方式处理这个难题，因为宇宙学常数在超对称的理论中为零。然而，我们已经知道自然界没有采用超对称去解决宇宙学常数的问题，因为超对称在能标低到 $3 \times 10^{-3} \text{ eV}$ 时并没有严格的对称性。

更为棘手的是，只有当我们把引力包括进来时，宇宙学常数才成为一个可观测的物理量，而引力在处理粒子物理学的各种过程时通常可以被忽略掉。倘若关于宇宙学常数的解决方案存在的话，它可能涉及到红外和紫外效应之间错综复杂的相互影响（或许以量子引力为框架），或者它也许只和宇宙的历史有关。无论如何，这些解决方案中没有一个是靠有效场论的方法得到。但另一方面，我们敢肯定希格斯粒子的质量问题也无法用有效场论的方法处理吗？LHC 实验将会宣布它的判决结果。

七、测量自然性

“过去我观测天空，现在我丈量大地。”——约翰尼斯·开普勒（去世前几个月为自己撰写的碑文）

当新的粒子物理学理论被构造出来处理希格斯粒子质量的自然性问题时，并且当对撞机实验开始对新粒子的存在做出限制时，就需要对新理论的自然性（或不自然性）程度给出一个定量标准。一个被广泛采用的标准是把 Z 玻色子的质量（等价于 m_H 或者 $G_F^{-1/2}$ ，除了量级为 1 的系数外）表达成某个潜在理论参数 a_i 的函数。实际上，这种表达方式应该总是存在的，因为在新理论中弱相互作用的能标一定是个“可计算”的物理量（尽管只能用未知的参数来计算）。对自然性的衡量（或者更准确地说，对微调程度的衡量）是由函数 $M_Z(a_i)$ 随 a_i 所作的对数变化给出的，

$$\Delta \equiv \max \left| \frac{a_i \partial M_Z^2(a_i)}{M_Z^2 \partial a_i} \right|。$$

一个 $\Delta = 10$ 的理论遭受精度 10% 以下的参数微调，而 $\Delta = 100$ 的理论则遭受精度 1% 以下的参数微调，以此类推。

例如，在超对称的情况下，要求参数微调的程度小于 10% 则导致了超对称必须在 LEP2 对撞机上被发现的理论预言。这个预言却被证明是错的。事实上，如今只有在百分之几的水平上微调自由参数，超对称模型才能通过实验的检验。其实所有已知的、为解决希格斯粒子的质量问题而扩充了标准模型的模型都面临这种处境。当然，有人也许会说太阳和月亮的半径之比和它们到地球的距离之比刚好在天空被“调”得相等（精度大约 5%），这除了产生稀有而壮观的日食（从而允许我们检验广义相对论）之外没有其他更好的理由。在自然界甚至有更富于戏剧性的数值巧合发生。尽管如此，我依然希望弱电相互作用的新理论（不管它是什么）“自然地”解决自然性问题。

很有可能在某些情况下，从上面的方程得出的 Δ 过高估计了微调的程度。其实 Δ 度量的是 M_Z 的预期值对参数在“理论空间”变化的敏感程度。可是我们根本不知道这个“理论空间”究竟是什么样子，而且使所有参数独立变化的做法也许过于简单了。例如，有些学者指出，如果在大统一能标处对理论参数强加一些特殊限制（譬如 $\tilde{m}_t = \tilde{m}_H$ 和较大的 $\tan\beta$ ，或者 $\tilde{m}_t^2 \approx -4M_g^2$ ），那么超对称模型的微调程度就会变弱。由于缺乏有关这些限制条件的可靠理论动机，很难评估此类做法是否真有什么好处。总之，尽管关于自然性的定量描述可能有益于指导人们构造新的理论，它却很容易滑到完全不切实际和毫无结果的思辨中。在我们距离 LHC 的运行越来越近的

时候，真正的关键在于新理论是否在 TeV 的能量区域预言了可被观测的现象。

八、人择原理与思辨

“一个谈论人择原理的物理学家所冒的风险和一个谈论色情文学的牧师相同：不论你如何宣称你是反对人择原理的，总会有些人认为你对它有点太感兴趣了。”—— 史蒂芬·温伯格

希格斯粒子质量的自然性问题算作一个好的、有助于我们理解自然界基本性质的科学问题吗？有些问题乍一看似乎寓意深刻，最终却不过是些分散人们注意力的假问题而已。也许狄拉克的问题，即“为什么这些数如此巨大”，就是假问题之一。正如我们在前面所看到的那样，狄拉克本人根据 G_N 随时间变化所做的解释与蒂克基于偶然性在观测中所扮演的必要角色而给出的简单解释相比，后者更为成功。登上阿索斯山的外星人会被提醒：在仔细考虑你做观察的环境之前，不要对地球人的神秘意愿下错误的结论。

1595 年，开普勒问了一个显然很好的科学问题，即“为什么存在六个行星”；而且他在《宇宙的奥秘》一书中对此给出了一个漂亮的、基于对称性的答案。行星的轨道取决于与 5 个柏拉图多面体外切和内切的连续球体（注意空间维数是如何在这个假设中扮演重要角色的，这一点很有趣。在三维空间中，只存在 5 个正多面体；但是在二维平面上，存在无穷多个正多边形，因而存在无穷多个行星）。基于这个假设他可以预言不同行星的距离之比，结果与当时的观测数据符合得很好。当然，我们现在知道行星的数目以及它们与太阳的距离并不能传达有关物理学基本定律的任何信息。因此，这是另一个转移人们注意力的假问题。

即使这些问题都是“错误的”，我们也能从中受益。有些特殊事件也许并不是对基本理论某些深刻性质所给予的暗示，而仅仅是观察者在特殊环境或状态下所看到的结果。然而，要想让这种事件发生，必定存在大量的可能事件，使观察者从中挑取了一个特殊情形。这在实践中意味着，我们如果不认为我们的观察结果有特殊意义的话，我们就可以对事件的整体有所认识。我们从大数推断出宇宙必定在膨胀的事实；从邂逅 1000 个正统的修道士得出地球上人口密集的结论；从地球在太阳系中的特殊位置推知宇宙肯定包含大量的恒星。

以此类推，倘若存在大量具有不同 G_F/G_N 值的宇宙，那么我们所测量的看似很特殊的 G_F/G_N 值也许不过是一个已经发展出复杂结构的宇宙中一个似乎很合理的观察结果。绝大多数宇宙的 G_F/G_N 值都是 1 的量级，但是它们不具备合适的性质，未能逐渐演化出观察者。事实上， G_N 的测量值似乎是精挑细选出来的，使我们的宇宙具备了不平凡的化学性质（同样的观点也适用于宇宙学常数，因为星系的存在对宇宙学常数的值非常敏感）。人们通常把存在大量可以相互比拟的宇宙的图像称作“多元宇宙”（与之对应的则是一元宇宙），它可以在弦理论和永恒暴涨的框架中实现。假如这个图像是对的，那么它将代表着哥白尼学说的另一次革命性飞跃：不仅地球不是特殊的，甚至我们所居住的宇宙也只是众多宇宙中的一个。

难道上述图像意味着希格斯粒子的自然性问题也不过是分散人们注意力的问题，而 LHC 实验注定除了找到希格斯粒子之外一无所获？这是很有可能的。然而，有的时候某些值得注意的性质会出人意料地显现出来。有时它们只是巧合，但有时它们隐藏着极其重要的物理含义。剑桥大学的约翰·巴罗在他的《自然界的常数》一书中讲述了一段极为奇特的插曲。未经证实的传说指威廉·莎士比亚可能参与了圣经的英文钦定本中圣歌的英文翻译。伊顿公学的一名男生注意到圣歌 46 写于莎士比亚 46 岁那年（莎翁生于 1546 年），“莎”字是圣歌从开头数起的第 46 个字，而“士比亚”是从结尾数起的第 46 个字。这只是个巧合还是诗人隐秘的署名？

在弱电能标处引入超对称是为了淡化对希格斯粒子质量的量子修正效应。然而，人们注意到超对称粒子刚好具有合适的量子数，能够在一个很大的能标处以令人吃惊的精度统一规范耦合常数。此外，从许多超对称理论中自动出现大质量、电中性、稳定的马约纳拉粒子，它们正好可用于解释在我们的宇宙中所观测到的暗物质。这只是个巧合还是超对称的隐秘信号？

这些看法导致尼玛·阿卡尼·哈米德等人提出了“分裂超对称”的思想，其中规范耦合常数的统一和暗物质被当作理论的基本元素，而关于希格斯粒子自然性问题的解决方案却被放弃了。这一理论具有好几个令人感兴趣的特征，而且它在对撞机实验中具有相当独特的信号。倘若“分裂超对称”被

LHC 实验所证实, 那么它将提供一个确定的、与自然性标准相抵触的实验证据。

九、自然性之于临界性

“没有原因的结果给人的印象更深刻。”——歇洛克·福尔摩斯 (19 世纪末的英国侦探小说家阿瑟·柯南·道尔笔下的神探)

还有另一种途径考虑 G_F/G_N 的等级性问题。在标准模型中, 弱相互作用的能标是由希格斯场的真空期望值决定的, 后者引发了弱电对称性破缺。相变的有序参数可以用与希格斯场势能相关的系数 μ^2 来表达。如果 μ^2 是正的, 那么弱电规范对称性就保持完整; 倘若 μ^2 是负的, 那么弱电规范对称性就会破缺; 因此 $\mu^2=0$ 定义的是对称性破缺与否的临界点。这与铁磁性的金兹堡-朗道描述完全类似。当温度 T 大于居里临界温度 T_C 时, 偶极子的方向是无序的, 总磁化为零, 系统具有转动对称性。当 $T < T_C$ 时, 偶极子呈有序排列产生自发的磁性, 系统破坏了转动对称性。

由于量子修正, 我们期望 $|\mu^2|$ 接近于最大能量 Λ , 而弱电对称性破缺与否则依赖 μ^2 的符号。等级性问题可以因此按下列方式表述: 倘若从基本理论的观点来看, 使两相分开的临界值并不特殊, 那么真实世界的参数为何如此选取, 使我们离临界条件如此接近?

自然界存在一些系统, 它们具有演化成临界状态的趋势, 即便没有外在的动因促使它们朝那个方向发展。这样的过程叫做自组织临界性。典型的例子是一个缓慢加入细沙的沙堆。当沙堆渐渐增高时, 它会达到一个临界状态: 这时只要再增加一粒沙子, 就会发生灾难性的滑坡。所有规模的雪崩都服从一个幂律分布规律, 因此系统的动力学不再可能以单个沙粒的行为理解和描述。远大于沙粒尺寸的距离之间存在着相互关联。系统安排自身接近并保持接近临界状态 (只要我们继续缓慢地加更多的沙子), 存在很多显然互不相关的现象, 它们似乎都遵循这种模式: 从地震强度的分布到生物物种的灭绝、从河流分岔到交通堵塞等等。

一个关于弱电对称性的自组织临界性模式可能导致标准模型处于一个 G_F/G_N 具有很大等级性的状态吗? 如果诸如此类的东西在自然界起作用的话, 那么它不可能被任何有效理论的方法囊括进

去, 它也不会遵从自然性标准。微观物理学的描述将无法正确解释某些大尺度的关联现象, 就如同单个沙粒无助于描述发生在所有规模 (介于一粒沙子的尺度和整个沙堆的尺度之间) 的沙堆雪崩一样。要想实现这样一个想法, 一整套理论似乎是一个必要因素, 因此我们仍然得依靠多元宇宙论。无论如何, 在这种情况下选择我们宇宙的过程将由动力学而不是人为的理由决定。

十、结束语

“数据! 数据! 数据! 他不耐烦地叫喊。没有泥我做不出砖来!”——歇洛克·福尔摩斯 (19 世纪末的英国侦探小说家阿瑟·柯南·道尔笔下的神探)

LHC 实验的主要目标是发现弱电对称性破缺的机制。事实上, 只包含现在已知粒子的标准模型在 1TeV 左右的能标处就变得不协调了。在该能量区域之上实现粒子对撞的 LHC 实验, 其目的就在于探寻弱电对称性破缺的机制, 搞清楚它是由希格斯粒子引起的还是由其他形式的动力学造成的。

另一个更微妙的问题也与是否存在基本的希格斯粒子相关, 也将在 LHC 实验中被研究。问题的本质在于, 在标准模型的框架内, 没有任何对称性保护希格斯粒子的质量项; 因而, 人们期待理论本身可以被“自然地”外推到的最大能标依然是 TeV 的量级。一个新的物理体系应该在这一能标处开始起作用, 假想的希格斯粒子一定伴随着某些与消去对 m_H 的量子修正相关的新粒子。这并非理论的内在一致性问题, 而是一个尖锐的自然性问题。同样地, 自然性标准并不必然地保证新物理出现的阈在自然界的确存在。可是, 倘若在 TeV 能标处确实发现了新粒子, 那将标志着我们利用对称性和有效场论理解物理学取得了成功。

总之, 这就是如今基本粒子物理学理论所面临的自然性问题。如果你觉得这个主题含有太多思辨的成分, 请放心: 用实验数据澄清该问题的时机已经到来了!

(北京市中国科学院高能物理研究所 100049)

本文译自西欧核子研究中心 CERN 理论部 Gian Francesco Giudice 教授的文章, 题为 *Naturally Speaking: and The Naturalness Criterion and Physics at the LHC* (预印本号 arXiv: 0801.2562 [hep-ph], 2008 年 1 月 16 日)。