



期待一个新的黄金岁月 (上)

王玉明 张海青 邹浩 译 李学潜 校

关于基本相互作用的标准模型获得了巨大的成功，但是也遗留下一个有待完成的议程。研究其中一些主要问题的时机似乎即将成熟。我期望下一个 10 年将是一个孕育基本物理学重大发现的黄金岁月。

一、我们当前的状态

标准模型的胜利 目前，粒子物理学的标准模型取得了巨大胜利。它经受了超出构建模型时所涉及的能区高精度实验的检验。

即使是标准模型中丑陋的部分看上去也还不错。标准模型的规范部分只有很少的参数（其实是 3 个），并且这些参数都有漂亮的几何学解释。与此不同的是，模型中涉及费米子质量以及混合的部分包含了很多参数（在最小模型中也有约 20 个参数）。这些参数只是用来描述费米子与一个或多个设想的

发现。量子论和相对论恰恰是 20 世纪两个最大的物理发现和进展。

我们分别分析一下这两个实验的性质以及它们是如何引发两个重大理论发现的。黑体辐射实验导致瑞利-金斯公式，这个公式如果延伸到紫外波段，不仅和实验矛盾，也会引起总能量发散，所谓紫外灾难。普朗克大胆引入能量量子假说，从而避免了紫外灾难，也预言了黑体辐射在紫外波段的性质。这个发现不仅仅解决了黑体辐射问题，更加引发了后来爱因斯坦的光量子概念和玻尔的量子化概念，从而导致全新的不同于牛顿力学的新力学。

迈克尔逊-莫雷实验与黑体辐射实验不同，黑体辐射是发现了一个概念的存在，而迈克尔逊-莫雷实验是否定了一个概念，以太。迈克尔逊-莫雷实验说明麦克斯韦的理论在不同的惯性参照系中都是成立的，没有一个由以太决定的绝对惯性参照系。爱因斯坦发现狭义相对论的原因据说与迈克尔逊-莫雷实验没有直接关系，他只是想将洛伦兹的理论从动力学变成运动学，从而彻底改变了我们的时空观念，否定以太的存在则是狭义相对论的结论之一。

希格斯场的汤川型相互作用强度的抽象数字。在现有理论中，这些参数只能从实验中抽取。无论如何，

Observable	central \pm C.L. $\equiv 1\sigma$	\pm C.L. $\equiv 2\sigma$	\pm C.L. $\equiv 3\sigma$
$ V_{ud} $	0.97383 ^{+0.00024} _{-0.00023}	+0.00047	+0.00071
$ V_{us} $	0.2272 ^{+0.0019} _{-0.0016}	+0.0020	+0.0030
$ V_{ub} $ [10 ⁻³]	3.82 ^{+0.15} _{-0.15}	+0.31	+0.49
$ V_{cb} $ [10 ⁻³] (meas. not in fit)	3.64 ^{+0.19} _{-0.18}	+0.30	+0.44
$ V_{cb} $ [10 ⁻³]	0.22712 ^{+0.00009} _{-0.00013}	+0.00019	+0.00030
$ V_{td} $	0.97297 ^{+0.00024} _{-0.00023}	+0.00048	+0.00071
$ V_{ts} $	41.79 ^{+0.63} _{-0.63}	+1.26	+1.80
$ V_{tb} $ [10 ⁻³] (meas. not in fit)	44.9 ^{+1.2} _{-1.2}	+2.4	+3.8
$ V_{td} $ [10 ⁻³]	8.28 ^{+0.33} _{-0.29}	+0.92	+1.38
$ V_{ts} $ [10 ⁻³]	41.13 ^{+0.63} _{-0.62}	+1.25	+1.87
$ V_{td} $	0.999119 ^{+0.000026} _{-0.000027}	+0.000052	+0.000078
$ V_{td}/V_{ts} $	0.2011 ^{+0.0001} _{-0.0005}	+0.0020	+0.0045
$ V_{ud}V_{us} $ [10 ⁻³]	3.72 ^{+0.15} _{-0.14}	+0.127	+0.195
$\arg[V_{ud}V_{us}]$ (deg)	59.8 ^{+4.9} _{-4.5}	+1.9	+2.1
$\arg[-V_{td}V_{ts}]$ (deg)	1.043 ^{+0.061} _{-0.057}	+0.15	+0.23
$ V_{ud}V_{cb} $ [10 ⁻³]	9.49 ^{+0.15} _{-0.15}	+0.30	+0.45
$\arg[-V_{ud}V_{cb}]$ (deg)	0.0339 ^{+0.0021} _{-0.0020}	+0.0050	+0.0077
$ V_{td}V_{cb} $ [10 ⁻³]	8.27 ^{+0.33} _{-0.29}	+0.93	+1.38
$\arg[V_{td}V_{cb}]$ (deg)	-22.84 ^{+1.00} _{-0.99}	+1.98	+2.93
$\sin \theta_{12}$	0.2272 ^{+0.0019} _{-0.0019}	+0.0020	+0.0030
$\sin \theta_{13}$ [10 ⁻³]	3.82 ^{+0.15} _{-0.15}	+0.31	+0.44
$\sin \theta_{23}$ [10 ⁻³]	41.78 ^{+0.63} _{-0.63}	+1.26	+1.80

图 1 一份定量检验标准模型中丑陋的部分结果样本，这一丑陋的部分描述了夸克与轻子的质量以及混合（图片来自文献 arXiv: hep-ph/0605217）

所以，19 世纪末的两朵乌云和一个发现了什么、一个没有发现什么的实验有关，这一点不同于 20 世纪末的两朵乌云——无论是暗物质和暗能量，我们都是发现了什么。本质上，我觉得暗能量的发现接近于黑体辐射，同样是紫外灾难，虽然具体的对象不同。我个人觉得暗能量的存在极有可能导致物理概念上的深刻革命。与此相反，暗物质的发现既不同于黑体辐射，也不同于迈克尔逊-莫雷实验，因为现有的理论框架完全可以容纳暗物质。

虽然今天看来，弦论面临着这两朵乌云的挑战，历史上弦论的发现完全与宇宙学无关，甚至与量子引力无关，这是弦论历史最引人入胜的一点。

(合肥中国科学技术大学 230026)



作者简介

李森，中国科学院理论物理所研究员，中国科学技术大学教授。主要研究领域为超弦理论和宇宙学，近年来尤其侧重暗能量和早期宇宙学的研究。

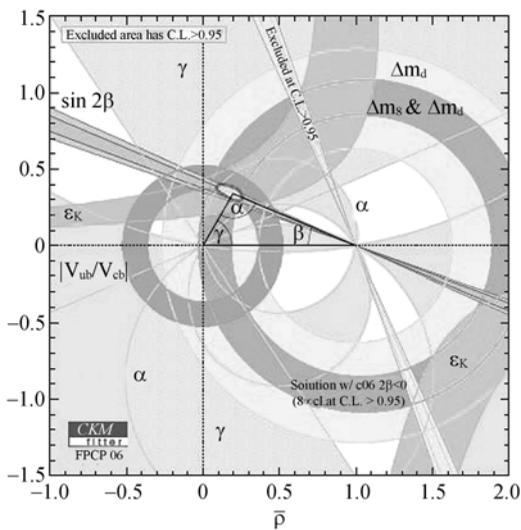


图2 以图画的方式量化的检验 CKM 框架（图片来源同图1）

标准模型的框架是被严格限制的并且具有很强的预言力。基于可重整化的量子场论的基本假设以及三代费米子结构，我们可以推导出一个 3×3 么正矩阵描述大量先前认为是独立的包括 CP 破坏的衰变过程的几率和混合现象，也就是 CKM 矩阵。图1和图2分别通过数值和图画的方式在一定程度上反映了标准模型的精确性和预言能力。

中微子质量以及引力问题在唯象上通常被认为是超出标准模型的，至少是处于标准模型的边缘。当然，如何划定标准模型的边界在很大程度上依赖于个人喜好。但是应该指出目前关于中微子质量以及引力的理解都能够合理而自然地包含在关于强和电弱相互作用的标准模型的核心概念框架内。具体来说，中微子质量可以用维数为5的算符刻画，而引力则可以通过爱因斯坦-希尔伯特曲率项以及与物质的最小耦合来反映（通常，我们还会加上宇宙学常数项）。支配着标准模型的更深层次原理，即基于可能存在的最低阶维数算符的量子场论，同样可以给出关于中微子质量以及引力问题的理论，并且该理论可以用很少的参数描述所有已有的观测实验。

总之，标准模型提供了一个经济、精确和（我们目前知道的）格外正确的方式描述相当广泛的现象。特别地，它为化学（包括生物化学）、材料科学以及天体物理学的大部分提供了牢固且完备的基础。作为跨越地域和年龄的群体，我们应该为所取得的成就而感到自豪。

有待完成的议程 尽管标准模型的成功是激动人心的，但它是不完备的。标准模型具有美学上

的缺陷，并且也存在标准模型不能解释的现象。具有讽刺意味的是，这两种瑕疵是相互印证的。我们希望将美学缺陷的研究用于解决唯象问题。我将讨论几个这种类型的具体例子。



图3 大型强子对撞机的外观和位置 它是古代金字塔的“现代版本”，但是更胜过前者；它是人类好奇心而非迷信的丰碑，同时也是团队合作而非服从的见证

更一般的，通过明确划定已知界限，标准模型给出了未知范畴和定义。下面列出的是根据现在由于我们的无知而亟待解决的一些问题的议程：电弱对称性破缺的动力学起因是什么，规范相互作用是统一的吗，引力的本质是什么，什么是暗物质，什么是暗能量，如何从这些杂乱无章的信息中整理出一些规律来，标准模型之外还有些什么。由于国际社会的慷慨投资以及许多极具天赋者的杰出工作，我们即将有一个宏伟的新工具（大型强子对撞机）来研究上述许多问题。

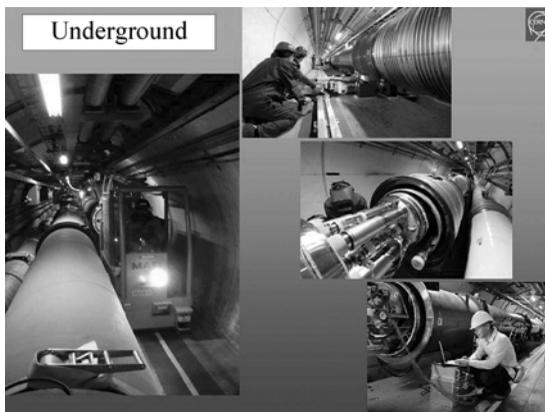


图4 大型强子对撞机的内部结构 不仅工程浩大，更重要的是它凝结的人类智慧以及高精度使其格外引人注目

当然，我不知道将来我们会发现什么，但是我想仍然可以作出一些有意义的猜想，这也是我在这

里想要说明的主题。让我们回到那份议程，那些看起来将取得突破性进展的问题已经用黑体标出，那些用仿宋体标出的则是一些会有重要发展的问题，余下用普通字体显示的是我们真正不太清楚的问题。对这些问题的上述判断将在本文的余下部分给出。

- 电弱对称性破缺的动力学起因是什么？
- 规范相互作用是统一的吗？
- 引力的本质是什么？
- 什么是暗物质？
- 什么是暗能量？
- 如何从这些杂乱无章的信息中整理出一些规律来？
- 标准模型之外还有什么？

二、电弱对称性的破缺

宇宙超导体 弱电标准模型的成功启发我们，我们感受到的真空其实是一个宇宙超导体；当然，在其中不仅存在电磁场，也存在与 W 和 Z 玻色子耦合的场。我们并不知道导致宇宙超导体的机理或根源，即何种物质在宇宙超导体中扮演着与库珀对在普通金属超导体中相对应的作用。现有的任何物质都不能具有那种作用，因此一定有我们未知的物质存在。

最小标准模型以及希格斯粒子的寻找 按照物质的自由度，关于到底丢失了什么，最经济的假设就包含在最小标准模型中。在这个最小模型中，除了我们知道的费米子场和规范场，我们还引入了复标量的 $SU(2)$ 二重态希格斯场，在引入的这个复的二重态对应的四个“量子”中，三个已经被观察到，它们对应于 W^+ 、 W^- 以及 Z 玻色子的纵向部分。余下的 $1/4$ 则是所谓的希格斯粒子。

多年以来，希格斯粒子一直就是实验寻找的目标，并且我们将在接下来的几天中听到很多关于它的报告，因此在这里过多的讨论是没有必要的，我仅以一幅图画来说明（图 5）。

这幅图描述了寻找希格斯粒子的一个重要过程：胶子聚变产生希格斯粒子，然后希格斯粒子衰变成两个光子。“昨天激动人心的感受就是今天的基准”表达了我们社团勇于创新的品质，这令我们自豪。但是有时候回过头来欣赏我们在科学征途上走了多远也是不错的感受。这个描述质子对撞到共振双光子产生的过程涵盖了标准模型的每个部分，而且还包括下面深邃的问题：质子中的胶子分布结构，普适的 QCD 色相互作用，正比于质量的希

斯粒子的基本耦合，电弱杨-米尔斯顶点。更为重要的是，这个过程的两个子过程都是纯粹量子力学的。两个圈图都表明有量子涨落发生，希格斯粒子与虚粒子的耦合在其产生和衰变过程中都是非常必要的。尽管如此，我们宣称已对这个稀有、棘手而且微妙的过程有了足够理解，因为我们可以计算这个过程的发生几率并将其与许多可能的背景分开。它确实是很好的基准。幸运的话，它即将成为明天的直觉！

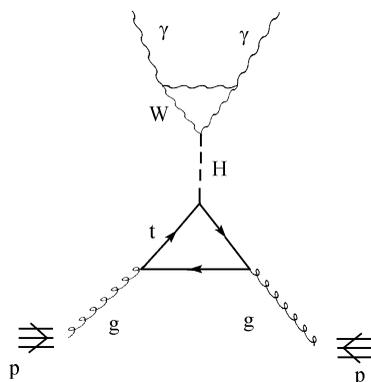


图 5 已经提出的一种可以产生并观测到希格斯粒子的机制，它是一个包含标准模型所有部分的纯粹量子过程

三、统一与超对称

荷的统一 标准模型中规范部分的结构对它进一步的发展指明了方向。图 6 显示了标准模型中规范部分的显著特点。利用一小部分输入参数（也就是 3 个连续参数），强、弱电相互作用规范理论成功描绘了大量数据。因此，这些理论既经济、又精确。对于很大范围的现象来讲，这个理论似乎代表了自然的最终理论或者接近最终理论。

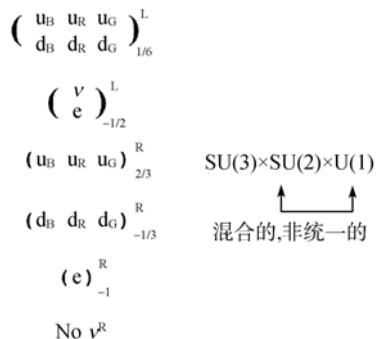


图 6 标准模型的群以及多重态

美学缺陷：有 3 个不同的规范群以及相应的耦合；5 个独立的费米子多重态（不计算家族的 3 倍）；以及与实验相适应的奇特超荷分配

但是，这个理论还是有发展空间的。 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的乘法结构，费米子表象的可约性，及超荷的奇怪数值都暗示可能存在一个更大的对称，它将包括这三个因子、统一表象及固定超荷。困难在于细节，而且可观测物质的复杂形式也不是很自然地安放到一个简单数学结构中。但是在很大程度上它确实可以做到。 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 可以嵌入的最小单群是 $SU(5)$ 。 $SU(5)$ 可以将单态家族的所有费米子归入两个表象 $(10 + \bar{5})$ ，并且超荷也就合理确定了。

图7 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 是扩展对称群 $SO(10)$ 的子群；标准模型的规范理论中的 5 个全异费米子表象被统一于一个单一内部空间的 16 维旋量，这个旋量包含一个附加的自由度，它在中微子质量理论中起很重要的作用；超荷现在与弱荷及强荷联系在一起

	R	W	B	G	P
u	+	-	-	+	-
u	-	+	-	+	-
u	-	-	+	+	-
d	+	-	-	-	+
d	-	+	-	-	+
d	-	-	+	+	+
u ^c	+	+	+	-	-
u ^c	+	+	-	-	-
u ^c	+	-	-	-	-
d ^c	-	+	+	+	+
d ^c	-	+	+	+	+
d ^c	-	+	+	+	+
v	+	+	+	-	-
e	+	+	+	-	-
e ^c	-	-	-	+	+
e ^c	-	-	-	+	+
N	-	-	-	-	-

SO(10)
 尼尔斯·玻尔：
 一只手就统治了他们所有！

超核 $Y = -1/6(R+W+B) + 1/4(G+P)$

图7展示了一个更大的对称群 $SO(10)$ ，它将这些费米子以及另外一个 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 单态粒子放到一个单态表示——16 维旋量中。那个另外的粒子确实很受欢迎。它拥有右手中微子，而此右手中微子在非常有吸引力的中微子质量“跷跷板”模型中起到了一个关键作用（参阅下面，如果想得到更广泛的有关这些专题的介绍，请参考文献 astro-ph/0401347）。

也许最显著的就是，根据这个扩展的对称，超荷不再是任意的，也不再与色荷及弱荷无关。公式 $Y = (1/6)(R+W+B) + (1/4)(G+P)$ (1) 连接了超荷 Y，色荷 R、W、B 以及弱荷 G、P，这是对对称性的结果。有了它，以前有些看似任意的标准模型超荷才跟统一规范理论挂上了钩。

耦合的统一 荷在 $SO(10)$ 对称群内的统一，在物理现实与数学理想间起到了一个不可思议的对应。乍一看，它在现实中的应用似乎在数量上失败了。因为量子数的统一尽管很具吸引力，但依然是形式上的，除非把它嵌入物理模型。为此，我们必须将此增强的对称性在局域规范理论里实现。但是非阿贝尔的规范对称要求普适性。 $SO(10)$ 对称要

求 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 耦合的相对强度必须相等，而这不是我们看到的。

幸运的是，有一个拯救这种局势的方法。如果这个更高的对称在大能量尺度上（等价地，小距离尺度）破缺，然后我们在小能量（更大距离）尺度的作用——这个作用的内禀强度被真空极化所影响，所以那些改变了的耦合常数就不必相等了。在比较好的情况下（基本上对弱耦合是这样），耦合常数跑动的效应可以被非常精确地计算。给定一个关于粒子谱的具体猜测，我们可以得到耦合常数变形的具体预测，我们可以此对照实验观测。在这种情况下，我们可以量化地检测由一个单一的统一值推导而来的观测的耦合常数值的方法。

这些计算结果都是非常迫切的。如果我们只包含由我们所知最小标准模型中粒子诱导出的真空极化，我们只会得到近似统一。图8展示了这个近似程度。

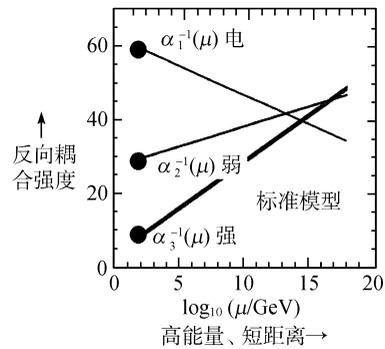


图8 只考虑到由最小标准模型中粒子诱导出的真空极化的耦合常数跑动，线的宽度意味着测量值的不确定性

尽管大体趋势是令人鼓舞的，但在实验的不确定范围内，不同的耦合常数并不最终相等。如果我们遵从从哲学家卡尔·波普所谓的科学目标是产生虚假的理论，那么在此我们可以宣告成功了。因为我们大体如图9所示的荷统一想法变成了一个不仅虚假而且确实错误的理论。

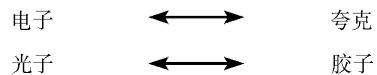


图9 荷统一的示意图

规范粒子主要包含光子、胶子，统一于一个普通表象中，费米子也如此，主要包含电子和夸克

统一与超对称 我们的回应大相径庭：我们不能满足于这些空洞、虚伪的胜利。在拥有了一个几乎成功的漂亮理论情况下，我们寻求一个在细节上

更加漂亮的理论去改进它。也就是，我们寻找 truthification^①。当然，这次学术大会的核心议题就是另外一种对称性的可能性，它就是超对称 (SUSY)。SUSY 使得我们在另外一个方向实现统一，图 10 中进行了大体描述。

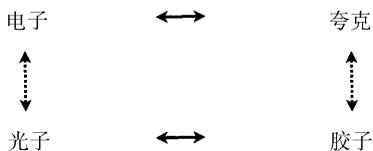


图 10 超对称统一的示意图
现在不同自旋的粒子进入普通的多重态

如果我们包含了粒子的真空极化，并且将标准模型扩大到包括在 TeV 能标上软破缺的超对称，我们见到了图 11 所示的非常精确的统一。

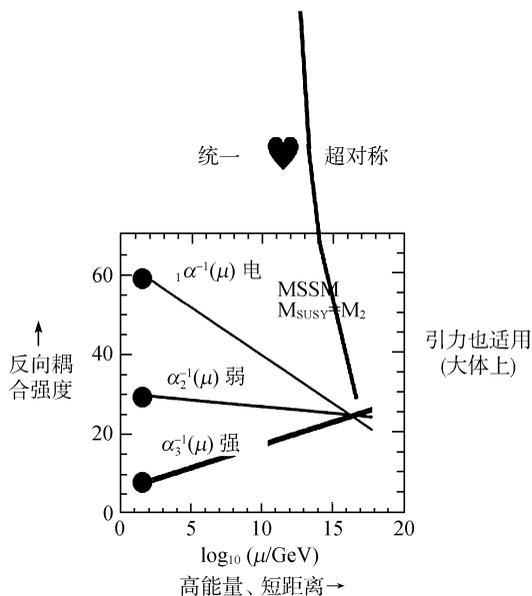


图 11 从能标 1GeV 开始的耦合常数跑动，考虑了最小超对称模型中所有场的真空极化；线的粗细代表了测量值的不确定度；引力仍是经典跑动；在所能达到的标度里它是非常小的；但是在一般统一能标下，我们将它大略外推到与其他的相互作用相等

在这个所谓的“低能超对称”思想里，我们预测 TeV 范围内会出现一个全新的粒子世界。每个现在所知的粒子都有超对称伙伴。它们必须拥有与原粒子相同的量子数，但在自旋上相差 1/2，质量也是不同的。所以就会有自旋 -1/2 的超规范子 (gauginos)，它包括量子色动力学 (QCD) 中色胶子 (gluons) 的超对称伙伴——超胶子 (gluino)、W 粒子的超对称伙伴 (wino)、Z 粒子的超对称伙伴 (zino)，光子 γ 的超对称伙伴 (photino)、自旋为 0 的超夸克 (squarks)，超轻子 (sleptons) 以及更多，

如超 Higgs 子 (Higgsinos)、超引力子 (gravitinos)、超轴子 (axinos)。这些粒子中有一些将在大型强子对撞机 (LHC) 运行时观测到。

从另一方面来说，超越标准模型的许多提议，如人工色模型 (Technicolor models)、大额外维方案、膜世界方案，破坏了作为计算耦合常数大统一的基础，从而使成功显得很偶然。

下面介绍展展尺度 (Emergent Scale) 的重要性。统一发生在一个非常大的能标 $M_{统} = 10^{16}$ GeV 上。这一成功强烈反对在 SUSY 破缺的尺度上进行小的改变。而且只要它们能够形成完整的 SU(5) 表象，它们也不会被加入的额外粒子多重态所影响。

完全基于低能标数据的耦合常数跑动引导我们去推测，会存在一个非常大的质量标度。这个标度正是统一发生的地方。标度的分离是由于耦合常数倒数的缓慢跑动 (对数的) 引起的。这就暗示了观测到的耦合常数中的不算太大的区别必须由长间距跑动形成。

大质量尺度的出现意义深远，在某些背景下也是受欢迎的。

• 前面我们通过非重整化耦合，在标准模型下讨论了中微子质量配置和混合。通过统一理论，我们实现了将耦合常数由低能近似到更加基本的具有比较好的高能行为的耦合常数转变。这也类似于由费米 (Fermi) 理论推演到现在的电弱理论。

确实，右手中微子可以跟轻子二重态进行正规的、维数为 4 的汤川 (Yukawa) 耦合。在 SO(10) 里，这些耦合是具有强制性的，因为通过对称它们跟具有荷 -2/3 的夸克质量相联系。另外，在 SU(3) × SU(2) × U(1) 下，右手中微子是中性的，所以它们并不跟标准模型中的费米子一样，它拥有 Majorana 型自能质量并保证不破坏那些低能对称性。我们也许应该希望在 SO(10) 破缺尺度上，一旦得到允许，自能质量将会出现 (或者在其他统一模型中，它们的精神是一致的)。这么大的质量会把右手中微子可观测到的粒子谱中除掉，但是它们却起到了非常重要的间接效应。在二阶微扰理论中，左手中微子可以通过一般的汤川耦合虚跃迁变到右手中微子，然后再变回来，或者可以在传播子中做以下的适当代换 $1/(\not{p} - M_{\nu_R}) \rightarrow 1/(-M_{\nu_R})$ 。这样可以产生普通中微子 (比其他轻子、夸克质量小得多的粒子) 的非零质量。

这种方式下预测的中微子质量与观测到的非常小的质量非常吻合。这就是说，与有效非重整化耦

合相联在一起的质量标度大体上与由耦合常数统一推出的统一尺度一致。尽管不是所有的，但是许多具体的 $SO(10)$ 统一模型都预测到 $M_{\nu_R} \sim M_{\text{unification}}$ 。因为这个模型的相对细节都不好预测，所以仅仅是数量级上能够取得一定的成功。

• 统一是要消除夸克和轻子之间的差别，然后开启质子衰变的可能性。一些大胆实验如今都没有观测到这个过程，在某些道里能够限制的寿命达到 10^{34} 年。除非统一的标度非常大，很难确定这些衰变过程是大大压低的。甚至耦合常数跑动和中微子质量所显示的更高尺度都不足。我们认识到要正确解释这个事实，寻找质子衰变的实验依然是最重要的，而且也是检验统一理论的最有前途的方法。

• 类似的，要排除统一理论给不同家族引进的新联系也是非常困难的。奇异数改变的中性流以及轻子数破坏的实验限制也是非常苛刻的。这些以及其余的奇异过程都必须被压低，所以就要引入高标度。

• 为了补偿弱耦合，轴子 (Axion) 物理要求一个高能标的 Pecci-Quinn (PQ) 对称性破缺，这叫做“不可见”轴子模型。如今的观测只能限定 PQ 的最低标度大约为 $M_{\text{PQ}} > 10^9 \text{ GeV}$ 。再一次预示需要一个高能标。许多 (尽管不是所有) 实现 PQ 对称性的具体模型都确实暗示了 $M_{\text{PQ}} \sim M_{\text{unification}}$ 。

• 电弱相互作用与引力的统一似乎是可能的。牛顿常数具有单位 M^{-2} (M 具有质量的单位)，所以它按照经典方式运动。或者，比较粗糙的技术处理便是，因为引力直接对应能量-动量，引力对于短波、高能量的是更加强的探针。

因为在实验室范围内，引力跟其他相互作用相比是非常微弱的，所以只有在大尺度上它们才可以与普朗克能量 $\sim 10^{18} \text{ GeV}$ 相比拟。这跟 $M_{\text{unification}}$ 不同。数值上的一致只是巧合；但是我们可以更好地去猜想它预示着所有作用的家族都来自一个源头。注意，这些耦合具有相似的几何解释，那就是场 (规范的或者度规的) 对于曲率的阻力测度。

SUSY 作为标度 如果低能超对称是我们这个世界的特征，那么我们在 LHC 将会发现它的某些粒子。当然，这自身就是非常伟大的发现。正如我们所看到的，在那些引人注目的统一物理定律的建议中，它将是令人鼓舞的。而且，也是对超越于量子力学和相对论经验源头的大胆延伸。

但是明天的轰动将会成为后天的定标，我们希望用超世界作为工具进行进一步探索。

• 一些超伙伴的质量和耦合常数，就像规范耦合常数一样，必须由统一的值来确定。由于有真空极化，这些值可以不同，但这是可以计算的 (图 12)。探寻这些关系会促进规范统一成功地耦合到繁荣的生态学。

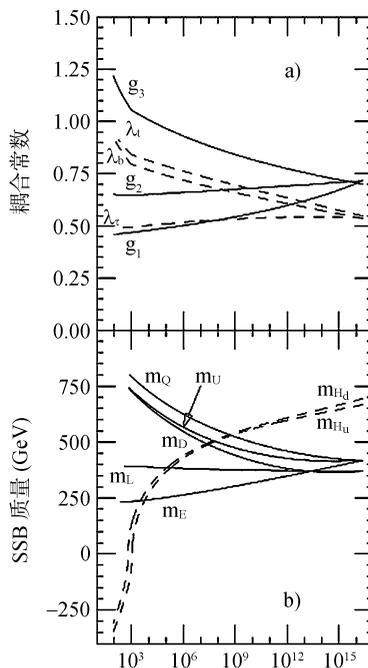


图 12 低能超对称中包含质量源，或者耦合常数的许多模型，它们被统一的规范对称性限制着；耦合常数的跑动类似地预言这些质量和耦合常数间观测值的数值关系

• 如今还没有关于超对称破缺机制的一致性意见。这是一个非常宽广的、未被解决的领域，我不应该在这里太认真地谈论它。但是如图 13 所展示的，SUSY 破缺机制的主要想法是令人激动的新物理，这是一定要存在的，而且预示了彼此不同的特征。

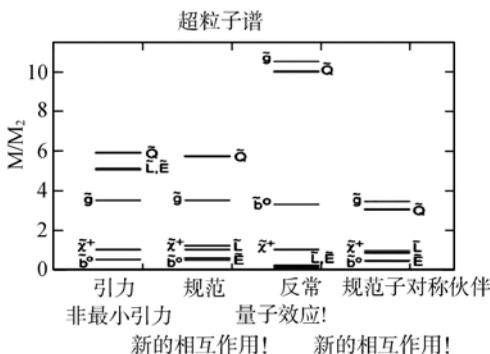


图 13 不同媒介机制的超粒子谱：超对称破缺的首要推论导致现今所知的物理定律的深远发展，它们也预测了很有特色的粒子谱

奇点与奇点定理简介 (下)

卢昌海

讨论

我们对奇点定理的介绍就要结束了。有些读者可能会提出这样一个问题：那就是我们证明霍金-彭罗斯 (Hawking-Penrose) 奇点定理所用的是排除法，即通过证明测地完备性与奇点定理的四个前提不相容，来排除测地完备性，从而确立奇点的存在。但是，当一组命题不相容时，究竟哪个 (或哪几个) 命题应该被排除，在逻辑上是有很大随意性的。因此从逻辑上讲，由上面介绍的不相容性，原则上可以通过排除不同的命题，而得到不同的定理。为什么我们偏偏要选择时空的测地完备性作为被排除的命题，从而得到霍金-彭罗斯奇点定理呢？

这是一个非常好的问题。我们知道，一个物理上有价值的定理必须能对物理世界做出某种程度的描述。因此，在所有逻辑上成立，并且能进行物理诠释的数学命题中，只有那些其前提在物理上能够实现的定理才能成为有效的物理定理。如果已经知道物理世界不满足某一性质，那么把该性质作为前提的数学命题就不会成为有效的物理定理。从这个意义上讲，我们可以通过考察霍金-彭罗斯奇点定理所涉及的四个前提在物理世界中实现的可能性，来分析这一定理的合理性。

在霍金-彭罗斯奇点定理的四个前提中，前提 4 属于初始及边界条件，并且实现的可能性极大。事实上，早在霍金-彭罗斯奇点定理提出的年代，天文观测及理论研究就已经在很大程度上显示出这个前提的三个子条件很可能部分甚至全部得到满足。前提 1 和 2 与人们在宏观世界的观测经验相符，因为迄今所知的所有宏观物质的能量动量张量都满足强

能量条件，而现实宇宙中物质 (包括宇宙微波背景辐射) 及引力波的分布无疑遍及全空间，从而满足一般性条件，因此在以大尺度宏观世界为主要描述对象的广义相对论中，这两个前提是适用的。前提 3 所要求的不存在闭合类时曲线也具有不错的经验基础，因为时间的单向性是宏观世界中最基本的经验事实之一。因此所有这四个前提都有其可信赖之处，但如果一定要在这些前提中找出一个最有可能在现实物理世界中不成立，能量条件 (即前提 1) 将是首选，因为理论与观测都表明它事实上就不成立。不过，能量条件的破坏主要来自量子效应，而我们所讨论的奇点定理是经典广义相对论中的命题，两者在所涉范围上有出入。如果不考虑量子效应，或者说只考虑经典广义相对论，又有哪一个前提最值得怀疑呢？一般认为是时序条件 (即前提 3)。这一条件要求不存在闭合类时曲线。它之所以值得怀疑，主要有两个原因：一是因为广义相对论的某些特殊解事实上允许闭合类时曲线存在，虽然迄今为止那些解还没有一个得到过任何观测上的支持；二是由于闭合类时曲线实际上是一种抽象的时间机器，这是一种在很多方面都很引人入胜的东西。因此，有些物理学家把广义相对论没有在原理层面上禁止闭合类时曲线，视为是一个很值得探索的理论问题。

如果时序条件有可能被破坏，那就产生了一个很自然的问题：即我们是否可以通过作一个与霍金-彭罗斯奇点定理不同的选择，把测地完备性作为定理的前提之一，而把时序条件的破坏 (从而允许时空中存在闭合类时曲线) 作为定理的结论呢？当然，



• 许多低能超对称的模型都包括了非常长寿命的粒子，它们跟一般的物质相互作用很弱，而且作为大爆炸的产物，它们是大量产生的。这些粒子是天文学家所观测到的暗物质的候选者。这个方面值得一个关于它本身的新章节来讨论 (更多评论参阅所附文献^②)。

(王玉明、张海青、邹浩，北京中国科学院高能物理研究所 100049；李学潜，天津南开大学物

理学院 300071)

本文译自美国麻省理工学院教授、2004 年诺贝尔物理学奖得主 Frank Wilczek 2007 年 2 月发表在 <http://arxiv.org/> 上的文章 *Anticipating a New Golden Age* (hep-ph/07084236)。

①[译者注]这可能是作者自创的新字，意思大概是终极真理。

②M. Yu. Khlopov *Cosmoparticle physics* (World Scientific, 1999)；M. Yu. Khlopov and S. G. Rubin *Cosmological Pattern of Microphysics in the Inflationary Universe* (Kluwer, 2004)。