

希格斯玻色子——物质质量起源的探索*

曹庆宏^{1,†} 刘佳¹ 张昊²

(1 北京大学物理学院 北京 100871)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2022-10-15 收到

† email: qinghongcao@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20221103

Higgs boson——an exploration of the origin of matter mass

CAO Qing-Hong^{1,†} LIU Jia¹ ZHANG Hao²

(1 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 2012年7月4日, 欧洲核子中心大型强子对撞机上的ATLAS和CMS实验组联合宣布发现了一个标量粒子, 其性质与标准模型理论预言的希格斯粒子初步吻合, 随后被大量实验数据进一步证实。作为唯一的基本标量(自旋为零)粒子, 希格斯粒子在标准模型中占据极其特殊的地位, 因此, 希格斯粒子相关性质的理论研究是理论粒子物理研究的热点。文章简要介绍了希格斯粒子物理的理论问题及其进展。

关键词 希格斯粒子, 对称性自发破缺, 等级问题, 电弱相变, 标准模型, 基本标量粒子

Abstract On July 4, 2012, the ATLAS and CMS collaborations at the Large Hadron Collider at CERN jointly announced the discovery of a scalar particle with properties similar to the Higgs particle predicted by the Standard Model; this was confirmed afterward by a large number of experimental data. As the only fundamental scalar (spin-zero) particle, the Higgs boson occupies a unique position in the Standard Model, so the study of its properties is a hot topic in theoretical particle physics. This paper briefly discusses the theoretical problems and progress of Higgs particle physics.

Keywords Higgs particle, spontaneous symmetry breaking, hierarchy problem, electroweak phase transition, Standard Model, fundamental scalar particle

1 粒子物理极小标准模型与希格斯玻色子

粒子物理标准模型(Standard Model of particle physics, 简称标准模型)是基于量子场论框架建立的理论模型, 描述了电弱能标尺度(约100 GeV, 10^{-18} m大小)处构成物质世界的基本粒子类型及其相互作用规律。与原子尺度(约 10^{-10} m大小)上有

超过100种不同的原子相比, 在电弱能标尺度处, 物质世界的构成要简单得多。标准模型只有12种物质粒子和3种规范相互作用。这12种物质粒子分别是6种夸克、3种带电轻子以及与之相伴的3种中微子, 如图1所示。在这些基本物质粒子之间, 存在3种规范相互作用, 分别是电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用, 与之相应的, 是光子、弱规范玻色子和胶子这三类传递规范相互作用的规范玻色子。迄今为止, 物理学家还没有找到描述引力的量子理论, 因此, 引力相互作用

* 国家自然科学基金(批准号: 12235001)资助项目

没有被包含在标准模型中。

在标准模型的3种规范相互作用中，弱相互作用是较为特别的一种。20世纪50年代，李政道和杨振宁分析指出，弱相互作用很可能破坏宇称守恒定律。这一理论推测很快得到了实验的证实。其后果是，标准模型中粒子的质量会破坏弱相互作用的 $SU(2)$ 规范不变性。这种对规范不变性的明显破坏，将导致标准模型粒子在高能散射中表现出病态的行为。因此，标准模型理论的自洽性要求这些粒子的质量为0。然而实验结果告诉人们，标准模型中的

3种弱规范玻色子和至少11种物质粒子都具有非零质量。这就意味着，物理学家必须找到一种既能赋予基本粒子质量，又不明显破坏弱相互作用规范对称性的机制。这就是著名的对称性自发破缺机制。

简言之，如果物理规律满足某种对称性，而物理系统的基态(真空)在对称性变换下发生变化，人们就说这样的对称性发生了自发破缺。因此，对称性自发破缺要求系统具有不止一个真空解(能量极小值解)。在有限自由度量子力学系统中，除了一些人为构造的情形，由于量子隧穿效应的存在，系统的真空态是唯一的。所以，严格的量子系统对称性自发破缺，只能出现在具有无穷多自由度的量子场论中。在标准模型中，弱相互作用 $SU(2)$ 对称性的自发破缺，是通过引入一个 $SU(2)$ 二重态的基本标量场——希格斯标量场——实现的。如果希格斯场在真空处具有不为零的真空期望，那么这样的真空就不具有 $SU(2)$ 变换的不变性，也就实现了标准模型弱相互作用对称性的自发破缺。标准模型的12种物质粒子，除3种中微子外，都可以通过与这个希格斯场发生相互作用获得非零质量，并且不同物质粒子质量的大小，正比于它们与希格斯场相互作用的强度。

弱规范玻色子质量的产生，要更为复杂一些。这是由于零质量的矢量玻色子只有两个横向极化



图1 粒子物理标准模型粒子表 (电量单位为e)

自由度(横波)，而具有非零质量的矢量玻色子与前者相比多出一个纵向极化自由度(纵波)。因此，要想使3个零质量的弱相互作用矢量玻色子获得非零质量，就要求系统提供3个新的(纵波)自由度。20世纪60年代，理论物理学家证明了对称性自发破缺中的戈德斯通定理，这个定理告诉我们，4维平直时空量子场论中每一个整体对称性的自发破缺，都会导致体系中出现一个零质量的赝标量粒子，这个粒子被称为南部—戈德斯通玻色子。进一步的研究表明，在规范对称性的自发破缺过程中，相应的南部—戈德斯通玻色子将会与零质量规范玻色子耦合起来，成为后者的纵向极化自由度，从而使规范玻色子获得非零质量。这样的物理机制，就是著名的希格斯机制。在标准模型中，希格斯场包含4个自由度，其中3个在对称性自发破缺后作为南部—戈德斯通玻色子，通过希格斯机制成为了弱规范玻色子的纵向极化自由度。余下的一个自由度，成为了标准模型中唯一的一个中性标量粒子，这就是标准模型中的希格斯粒子。

简单小结一下，希格斯场触发的对称性自发破缺，是标准模型物质粒子和弱规范玻色子质量的来源。所以，为确保标准模型理论自洽，希格斯场必须存在，并且其性质要与标准模型的预言

精确相符。因此，希格斯玻色子及其自相互作用，作为希格斯场及其标量势函数存在的重要证据，其存在性、物理性质和精确检验，是当今粒子物理研究的核心课题。

2 标准模型希格斯物理理论研究的进展

随着标准模型的检验和希格斯玻色子的发现，近年来，希格斯物理理论的研究，取得了一系列进展。其中，有在标准模型框架内对希格斯物理进行的理论研究，也有在超出标准模型的新物理中对希格斯物理的探索。

2.1 标准模型希格斯玻色子散射与衰变过程的理论计算

粒子物理学对于标准模型希格斯玻色子的研究，主要是通过大型对撞机实验实现的。为了与实验结果进行对比提取标准模型中的物理参数，物理学家需要精确地知道希格斯玻色子的各种产生截面和衰变分支比。这些物理量的精确计算，依赖于量子场论精确计算技术的发展。

由于当今世界上能够产生并精确研究希格斯玻色子的对撞机只有大型强子对撞机(LHC)，精确计算希格斯玻色子在LHC上的各种产生过程的截面就是理论物理学家面对的首要课题。由于LHC是一台质子—质子对撞机，微扰量子色动力学(QCD)的高阶修正效应很可能显著地改变理论计算的结果。以LHC上希格斯玻色子最主要的产生过程——胶子融合(gluon fusion)过程为例，物理学家很早就知道，1阶QCD修正会将这个过程的截面提升一倍左右。这就意味着，如果不计算高阶QCD修正，理论对于截面的预言将可能出现巨大的偏差，对希格斯玻色子性质的精确研究也就无从谈起。

过去很长一段时间内，高阶QCD修正的计算一直是一个理论难题。近十年来，随着螺旋度振幅方法的系统发展，理论家计算高阶QCD修正的能力得到了极大的提升，代数几何等数学领域的前沿结果也被发现与量子场论的高阶微扰计算存在某种深刻的联系。目前，对于胶子融合过程，

理论家已经可以完成3阶QCD修正的理论计算，从而大幅提升了理论计算的精度。

希格斯玻色子在LHC上的成对产生过程，由于能够反映希格斯玻色子与自身相互作用的强度和性质，进而反映希格斯场势函数的性质，因此具有特别的重要性。在2016年以前，对该过程微扰QCD修正的计算，都只能在特定近似下完成。直到2016年，理论家才完成了第一个完整的1阶QCD修正的计算结果，并发现完整结果与之前各种近似结果均有较明显的不同。这再一次显示了精确计算的重要理论意义。

相比于QCD修正，标准模型高阶电弱修正的理论计算难度往往更大。一般而言，由于电弱修正在数值上要小于QCD修正，所以人们往往更为关注QCD修正。然而随着QCD修正计算精度的不断提升，电弱修正计算的重要性也逐渐显现。这方面的工作，目前也在进行中。

2.2 标准模型希格斯玻色子在重离子对撞实验中的行为

传统上，物理学家利用LHC上的质子—质子对撞过程研究标准模型希格斯玻色子的各种物理性质。这样做的原因在于，质子对撞的环境相对重离子对撞而言较为“干净”，有助于排除其他复杂的物理过程对希格斯玻色子性质测量的影响。然而近年来，理论家开始探讨利用LHC以及下一代强子对撞机上的重离子对撞过程研究希格斯物理的可能性。尽管重离子对撞的环境相对质子对撞要复杂得多，但高能强子对撞机重离子对撞瞬间产生的夸克胶子等离子体(QGP)，是少有的能在可控的实验室环境中模拟早期宇宙热环境的场合。尽管其典型温度仍然显著低于电弱相变的温度，却可以帮助人们了解希格斯玻色子在有限温度和高密度环境中的行为。目前，相关的研究已经取得了一些初步的有趣结果。比如，人们发现重离子对撞中的希格斯玻色子产生过程可以用来研究其衰变宽度。另外，某些理论研究显示，希格斯玻色子在QGP环境中可能存在“熔化”等特别的物理现象。

2.3 标准模型希格斯场的真空稳定性

标准模型的电弱对称性自发破缺是否能够发生，高度依赖于希格斯场势函数(以下简称希格斯势)的具体形式。在希格斯玻色子发现之前，人们无法确定其形状。随着2012年希格斯玻色子的发现及其质量的测定，理论上，标准模型希格斯势就被完全确定了。利用标准模型的这些参数，可以计算经典势函数的量子对应——

有效势。有效势的计算，由于要考虑各种量子修正效应，不仅依赖希格斯玻色子的性质，还与标准模型中其他粒子与希格斯玻色子相互作用的形式和强度有关。这其中，最显著的量子修正效应来自顶夸克和弱规范玻色子的贡献。经过计算，理论学家发现，如果希格斯玻色子的质量就是目前实验上测到的数值，那么我们今天所处的真空，并不是有效势的全局最小值，而只是局域极小值。于是，量子隧穿效应会使得我们的真空“衰变”到那个全局最小值的真正的真空处。也就是说，我们今天所处的世界，是一个随时可能衰变掉的不稳定的状态。这当然是一个严峻的理论问题。然而，事情有两个微妙之处。首先，这个结论敏感地依赖于顶夸克的质量，假如顶夸克的质量比目前实验测量的中心值要轻一些(百分之一量级)，那么电弱真空就将是稳定的，上述问题也就不复存在。其次，即便电弱真空会发生衰变，其衰变寿命也远远大于宇宙的年龄。因此，目前人们通常说标准模型的电弱真空是准稳定的。另外，这时另一个真空的位置几乎在普朗克能标附近，而物理学家普遍认同在如此高的能标处，量子场论将不再是合适的理论框架。所以这样高的真空期望代表什么含义，仍然是一个值得探讨的问题。

2.4 标准模型希格斯玻色子与电弱相变

标准模型希格斯场的行为，在宇宙极早期演化中也扮演着重要的角色。20世纪物理学的另一

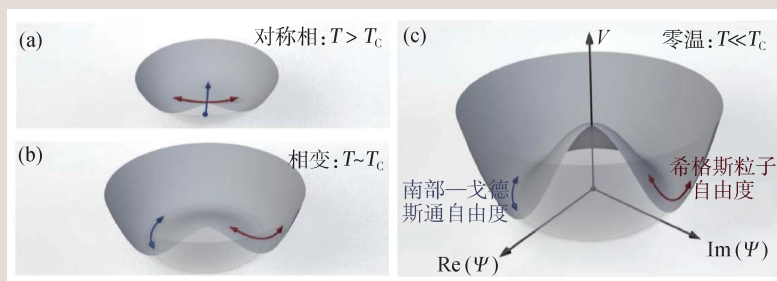


图2 希格斯粒子与电弱相变。按照温度降低的顺序：(a) 温度远高于临界温度时，系统处于对称相，系统基态也是对称态；(b) 温度接近临界温度时，系统发生电弱相变；(c) 温度远远低于临界温度时，例如今天的温度，系统处于对称破缺相。系统存在希格斯粒子自由度，是有质量的基本标量粒子；另外还有南部-戈德斯通自由度，被W和Z矢量玻色子“吃掉”后，形成有质量的规范玻色子

大成就——宇宙学标准模型告诉我们，宇宙早期是一个非常高温高密的环境，时间越早，温度越高。在这样的环境中，希格斯场有效势会随着温度改变形状。当温度升高到某一临界值时，具有SU(2)对称性的解开始成为真正的真空，在这一临界温度以上，真空具有SU(2)对称性，因此电弱对称性没有自发破缺。这样的温度被称为临界温度，随着宇宙膨胀温度降低，整个系统从电弱对称性到电弱对称性破缺的状态转变的过程，就是物理学家常说的电弱相变，如图2所示。电弱相变发生的这个临界温度，就是电弱相变温度。

早期宇宙的电弱相变过程，可能伴随着其他丰富的物理过程。比如，电弱相变可能是可观测宇宙中物质远多于反物质的原因，电弱相变可能会产生引力波信号，等等。当然，这一切都依赖于电弱相变的相变属性。数值量子场论的研究表明，如果标准模型成立，且希格斯玻色子的质量大于约72 GeV，则电弱相变是一个连续相变过程。也就是说，该过程更像蜡的熔化而非水的沸腾，不伴有相变潜热的释放。在这种情况下，电弱相变不会导致宇宙正反物质不对称，也无法产生相变引力波信号。

2.5 希格斯物理与一阶相变和引力波

相变描述了系统或者物态发生的变化，通常由某些序参量来描述。相变分为一阶相变和二阶

相变。其中，二阶相变又被称为连续相变，典型的例子包括铁磁相变、超导和超流相变。而一阶相变会有明显的潜热吸收或释放，在这个过程中温度不变而系统热能增加或减少。同时，一阶相变是在系统中多点发生的，例如水烧开之后，存在多个翻滚的气泡。在早期宇宙演化中，如果相变是一阶的，潜热会转化为气泡壁的动能并且扩张。多个迅速变大的气泡在宇宙中扩张，并碰撞在一起，合成更大的气泡并占满整个宇宙，使得宇宙处于新的真空态。气泡的碰撞会导致能动张量的剧烈变化，并释放引力波^[1]，但是更大部分的引力波能量来源于等离子体的声波^[2]以及磁流体动力学湍流^[3]。

在早期宇宙中，希格斯粒子在标准模型中的势能导致的电弱相变是接近于连续的。但是，如果有其他新标量粒子或者其他新的高温项对希格斯势能进行修正，那么早期电弱相变有可能是一阶的。它可以影响正反物质不对称的产生以及产生足够强的引力波信号，从而被引力波探测器（例如，我国的空间引力波探测计划“太极计划”和“天琴计划”）所捕获^[4]。

3 超出标准模型的新物理中希格斯物理理论研究的进展

现在物理学家越来越认识到标准模型应该视为电弱能标附近的有效场论。譬如仅就标准模型不包括引力相互作用这一条而言，就注定其不可能是终极理论，更不用说它还面临其他很多无法解释的理论和唯象问题。因此，在某个更高能标处，应该有一个更为完整的紫外理论，标准模型只是它的低能有效理论。这就意味着，标准模型中的物理参数应当在紫外理论的退耦能标处输入，而后通过重正化群跑动得到电弱能标处的参数值。希格斯玻色子的质量也是标准模型中的物理参数，所以也应该由紫外理论在退耦能标处输入，并叠加上量子修正给出。这就像分子动力学中水分子的质量应该由更为微观的氧原子和氢原子的质量相加，并叠加上它们之间的结合能给出一样的自

然。然而，希格斯玻色子的质量参数从退耦能标处到电弱能标处获得的量子修正效应（不依赖于紫外理论，完全被标准模型所决定）正比于退耦能标，因此，如果电弱能标远远低于退耦能标，为了给出电弱能标处的希格斯玻色子质量，势必需要其在紫外理论中的输入值和之后的量子修正值都正比于退耦能标，且二者符号相反，使得它们相减之后得到一个很小（电弱能标）的数值。在很多理论物理学家看来，这是非常不自然的事情。这一问题，就是标准模型中十分著名的等级问题（hierarchy problem）。除此之外，还有其他各种唯象学相关的问题。我们接下来简要介绍一下希格斯物理理论研究和超出标准模型相关的新物理问题。

3.1 多希格斯粒子模型

在标准模型中，希格斯粒子是电弱二重态，并且只有一个。人们自然要问，还有其他的希格斯粒子吗？答案自然是完全有可能，并且粒子物理实验已经在搜寻这些新的希格斯粒子。这种可能性有多重考量。第一，历史上人们在找到最轻的带电轻子电子的反粒子之后，很快又找到了比电子质量重200倍，其他性质一模一样的带电轻子——缪子。诺贝尔奖获得者拉比提出了一个有名的问题：“谁订购的缪子？”再后来，人们又找到了电子的第三代翻版——更重的陶子。因此，自然界存在更多的希格斯粒子是完全有可能的。第二，在超对称理论中，超时空对称性需要至少两个希格斯二重态粒子；一个和上三代夸克耦合，一个和下三代夸克耦合。因此，双希格斯二重态模型是研究得很多的一种理论模型，它包含了额外的中性和带电希格斯粒子。第三，在标准模型中，希格斯粒子耦合的是每种费米子的质量本征态。在加入更多希格斯粒子后，希格斯粒子可以具有味破坏的耦合，是实验上一种新的预言。第四，不同于标准模型的希格斯粒子，例如电弱三重态，可能与中微子质量产生相关。因此，多希格斯粒子的模型具有各自的物理动机，并且在实验上产生不同于标准模型的物理现象，是当前实

验正在搜寻的重点之一。

3.2 等级问题与超出标准模型的新物理模型

等级问题的另一个表述是为什么弱相互作用力强度(参考费米常数)和引力相互作用强度(参考牛顿常数),两者相差了大约 10^{33} 倍?这个问题也表明了物理学家的终极梦想,统一包括引力在内的所有已知力,这是一件非常困难的事情。等级问题还可以表述成如果标准模型作为有效理论的截断能量是普朗克能标 M_{pl} ,为什么希格斯粒子的质量远低于该能标,如图3所示。因此,无论是理解希格斯粒子性质的点点滴滴,还是统一所有力的终极梦想,仔细和深入地研究希格斯粒子是万里长征的开始。

物理规律通常都是分层次的,由截断能标表明该规律的适用范围,而且截断能标之上的紫外物理不会显著影响到该物理规律。例如,氢原子的能级并不直接受到夸克运动等紫外物理规律的影响。然而,希格斯粒子是个例外。通常,粒子在传播过程中会受到相互作用的影响,例如光子在等离子体中获得质量,中微子在物质中传播振荡模式会受到影响(MSW效应)。同理,希格斯粒子在传播过程中,会受到真空中虚顶夸克圈的影响。在圈图中顶夸克的动量可以是任意值,并且按照量子路径积分的精髓,不同动量的贡献是按照相同权重加起来的。问题在于,标准模型中紫外大动量的贡献没有额外的压低,因此希格斯质量对未知的紫外贡献格外敏感。所以,实验观测到的希格斯质量大小经过了自然界的某种精细调节,这也称为自然性问题。

等级问题引起了众多理论物理学家的兴趣,他们提出了诸多深刻的理论来解决这个问题。解决的方法大致分为两类:

第一类解决办法认为,截断能标 M_{cut} 没有想象中那么高,它实际上在希格斯粒子质量附近。这也是为什么人们认为TeV($1\text{ TeV} = 1000\text{ GeV} = 10^{12}\text{ eV}$)能标附近可能存在新物理。这其中,一部分理论采取了新的对称性、新的粒子和相互作用,使得截断能标 M_{cut} 到普朗克能标 M_{pl} 对希格斯粒子

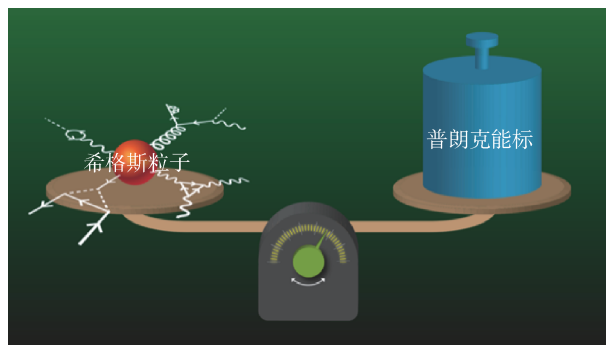


图3 在粒子物理标准模型中,希格斯粒子质量的量子修正对紫外能标异常敏感。因此希格斯粒子质量不和普朗克能标同量级,反而比普朗克能标小 10^{17} 倍这个事实,让人们非常困惑(图片来源:美国物理学会/Alan Stonebraker)

的影响比原来预期小。

例如,长期受人关注的超对称理论,采用了一个更高的时空对称性,使得玻色子和费米子之间互相关联^[5]。原来虚顶夸克圈的紫外部分贡献被顶夸克的超对称伴子精准地抵消了,因而希格斯粒子的性质不再受到普朗克能标附近的紫外物理影响^[6, 7]。在新理论中,希格斯质量在量子意义上可计算的紫外敏感被去除,结果正比于顶夸克超对称伴子的质量。

复合希格斯粒子模型,采用了一个全局对称性,其中希格斯粒子是全局对称自发破缺后的赝戈德斯通粒子,而戈德斯通粒子的特性保护希格斯粒子质量不受紫外物理的影响^[8]。理论需要提供额外的粒子来满足全局对称性,同时上述全局对称性除了自发破缺,还需要含有显式软破缺的相互作用,否则希格斯粒子质量是零。在这类理论中,希格斯粒子的质量最后正比于参与显式软破缺的新粒子质量。

还有一部分理论认为,截断能量没有那么高,是由于新空间维度的引入,使得原来从引力相互作用估计得到的截断能标需要修改。在大额外维模型中^[9, 10],除了我们目前看到的4维时空,还存在着其他的空间维度。标准模型中的强、弱和电磁相互作用力仅存在于4维时空,而引力相互作用存在于所有的时空维度,这也解释了为何引力相互作用看起来很弱。在尺度小于额外维度的典型长度后,引力得到加强。在5维弯曲时空



图4 除了中微子，每个左手费米子和右手费米子均通过希格斯粒子牵线，组成了一对舞伴，中微子的舞伴是谁呢？(图片来源：Sandbox Studio, Chicago with Corinne Mucha)

(Randall—Sundrum)模型中^[11, 12]，我们处于一个4维时空膜并具有TeV的典型能量，而在第5维的另一端连接着普朗克膜并具有 M_{pl} 的典型能标。由于时空沿着第5维的弯曲，使得能标的大小指数型地决定于所处的第5维 y 的位置， $M_4^{eff} \sim M_{pl} \times e^{-ky}$ 。总的来讲，上述理论认为在大尺度上，引力由牛顿引力和广义相对论描述，但是在小尺度上，引力对应的有效截断能量可以降低到TeV量级，因此希格斯质量不再需要精细调节。

第二类解决办法是近年来理论研究的新发展。它们认为电弱能标可以是截断能标之下的任意值，而电弱能标比普朗克能标低很多是早期宇宙演化选择出来的结果。在弛豫子(relaxion)模型中^[13]，弛豫子的行为和轴子场类似，并且和希格斯粒子的质量项有相互作用。在宇宙演化初期，希格斯粒子质量是正的，并且接近于极大的阶段能量。当弛豫子势能随着早期宇宙演化，希格斯粒子质量开始逐渐减小并最终变为负值。同时，弛豫子对应的强相互作用产生一个非微扰的三角函数势能，使得弛豫子停止演化，帮助希格斯物理中的电弱真空相变在此时发生。所以，希格斯质量是弛豫子场在早期宇宙演化的一个结果。在大 N 自然性模型(Nnaturalness)中^[14]，理论假设宇宙中有大 N 份标准模型的备份，在每个备份中，希格斯粒子的质量平方是 $[-M_{cut}^2, M_{cut}^2]$ 之间的随机变量。对于大部分随机分布，质量平方的最小值大约在 M_{cut}^2/N ，我们需要该质量平方取这类最小值并且是负值，来产生希格斯电弱相变。因此，我们需要宇宙选

择出符合这种条件的备份，这可以通过重加热子场来完成。重加热子场平等地和每个备份里面的希格斯场耦合，但是在取最小负值的备份中，加热子衰变得最快，于是宇宙能量密度由这类备份占据主导。所以，宇宙的重新加热过程选择了今天我们看到的电弱能标，解决了等级问题。

纵观各种解决办法，都会引入新粒子和希格斯粒子进行相互作用，因此在未来的粒子物理实验上可以搜寻这些新粒子。即使这些新粒子太重，不能直接在对撞机上产生，他们可以与希格斯粒子和其他粒子相互作用，在树图水平或者圈图水平上产生修正。因此，在对希格斯粒子的精确测量中，有望发现希格斯粒子性质对标准模型预言的偏差，从而找到这些背后的新粒子以及新物理规律。

3.3 希格斯粒子与中微子质量和振荡起源

中微子是粒子物理标准模型中的基本费米子，它是唯一电中性的基本费米子，并且质量是最小的。在标准模型的早期，人们并不需要中微子具有质量，直到中微子振荡实验现象的发现，表明中微子确实具有极小但是非零的质量^[15]。这是一个明确的超出标准模型物理的实验现象。

通常，在标准模型中费米子分为左手和右手两个部分，左手费米子和右手费米子是完全不同的客体，它们具有不同的规范相互作用。希格斯粒子是两者的桥梁，它可以将左手费米子转化为右手费米子，反之亦然；此外，希格斯机制赋予了基本费米子质量，如图4所示。这个机制在标准模型其他费米子身上运行良好，除了我们无法解释不同费米子的质量为何相距甚远。

同样的机制简单运用到中微子身上会有两个问题。第一，我们已经找到的中微子全是左手费米子，而没有找到右手费米子。目前粒子物理标准模型的物质场列表里面，还没有右手中微子。第二，假设存在右手费米子，同时假设中微子是狄拉克费米子，那么由于中微子极其微小的质量，希格斯粒子与中微子的汤川耦合系数大约为 $O(10^{-13})$ 量级。这个系数比希格斯粒子和带电轻子的系数小至少 10^{-7} ，需要额外的理论构造来解

释这个压低。因此，人们认为一种更加吸引人的可能性是，中微子是马约拉纳费米子。这意味着它的反粒子就是它自身，这是标准模型其他费米子没有的性质。在这种情况下，中微子的质量破坏了轻子数守恒，可以产生一种全新的实验现象——无中微子双贝塔衰变。同时，中微子的质量项可以和5维的温伯格有效算符相联系，

$$\mathcal{L}_5 = \frac{1}{\Lambda} (\ell \cdot H)(\ell \cdot H),$$

这里的 ℓ 是外尔旋量形式的左手费米子， H 是标准模型希格斯粒子， $\Lambda \sim 10^{15}$ GeV是高质量算符的质量压低。当希格斯粒子 H 取真空期望值的时候，这一项对应中微子的质量。中微子质量的紫外理论多种多样^[16]，例如著名的跷跷板模型，但是从低能有效理论的视角出发，它们都可以回归到温伯格有效算符。因此，希格斯粒子与中微子质量起源和振荡有很深的关联。

3.4 希格斯之门

天文学和宇宙学的大量观测结果都支持宇宙中存在一种未知物质。它参与引力相互作用，因不发光(不参与电磁相互作用)而被称为暗物质。我们对它知之甚少，既不知道它参与的其他相互作用也不知道它的质量，其物理本质至今是一个谜。在暗物质热退耦机制中，如果暗物质湮灭的截面和电弱相互作用截面大小一致，那么暗物质可以自动获得今天观测到的暗物质宇宙丰度，人们称之为弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particle)奇迹^[17]。这强烈暗示着暗物质可能具有和电弱能标或者希格斯质量相接近的质量，由于希格斯机制是

标准模型电弱相关粒子的质量来源，因此暗物质有很大概率和希格斯粒子有关^[18]。

除此以外，暗物质比普通物质多4倍，鉴于我们世界的粒子和物质形式多种多样，暗物质及其相关粒子可能更加丰富多彩，人们称之为暗世界。希格斯粒子自身和它的复共轭可以组成一个量纲为2的规范不变的算符($H^\dagger H$)，这个算符可以连接其他暗世界的粒子或者暗物质本身，因此该算符被称为希格斯之门(Higgs Portal)^[19]：

$$\mathcal{L} \supset (H^\dagger H)X.$$

希格斯之门的相关拉氏量中， X 代表未知的暗世界算符。另外，希格斯之门算符同时也是希格斯的质量算符，因此，希格斯之门的研究和暗物质物理以及希格斯自己本身的性质都有关系。

如果暗物质和希格斯粒子相关，那么希格斯粒子可能衰变到暗物质和其他难以探测的粒子，形成在大型强子对撞机上不可见的衰变。这种不可见衰变可以通过对撞机上的丢失动量事例来探测，目前实验可以限制希格斯不可见衰变分支比小于18% (95%置信度)^[20]。该分支比可以根据对应理论模型，来限制暗物质和希格斯粒子的相互作用强度，同时也可以限制暗物质通过希格斯粒子与标准模型核子作用的散射截面。该限制可以与

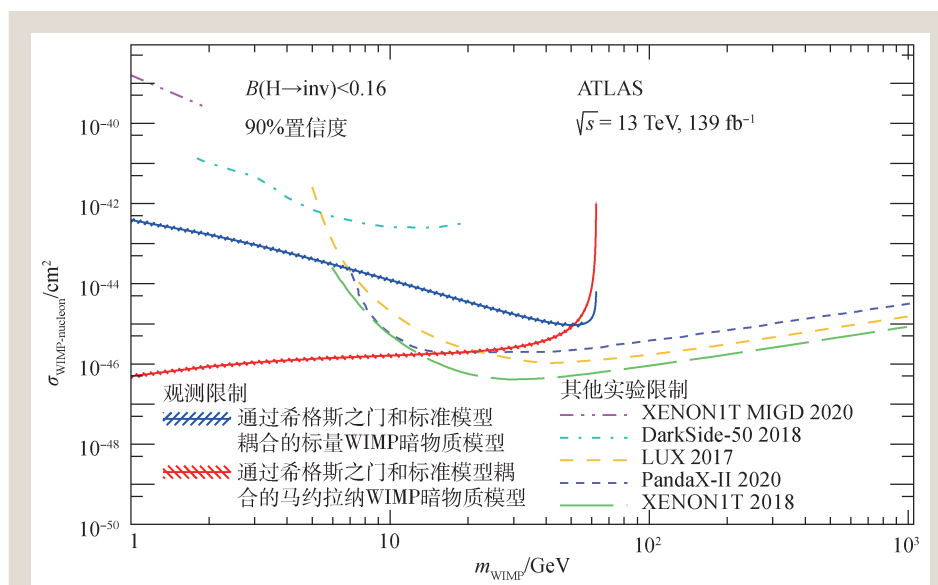


图5 将希格斯粒子不可见衰变分支比的限制(90%置信度)，通过希格斯之门相关理论模型转化为对暗物质与核子的散射截面的限制，并且和暗物质直接探测实验结果进行对比^[21]

暗物质直接探测实验(例如我国锦屏深底实验室的 PandaX 和 CDEX 实验)形成良好的互补,因为在暗物质低质量区域,直接探测实验受到实验阈值的影响,而对撞机实验对低质量暗物质有很好的探测效果,如图 5 所示^[21]。

4 总结

从 2012 年到 2022 年,十年过去了。我们从发现标准模型理论预言的希格斯粒子开始,到今天积累了大量相关实验数据。这些数据表明已经发现的这个粒子的性质与标准模型的希格斯粒子基本符合。作为唯一的基本标量粒子,它在标准模型中是一个非常特殊的存在。从历史的角度来看,发现希格斯粒子不是故事的结束,而是新故事的开始。对于希格斯粒子,我们仍然有非常多的问题没有得到解决。从有效理论的叙事角度来看,物理规律是分层次的,具有一定的适用范围。当能量高到一定程度,旧理论失效,新的理论出现,上述规律屡试不爽。但是希格斯粒子极其特殊,它没有告诉我们切换理论的能标在哪里。或许如往常一样,它就在拐角不远处,但是人们还需要跳得再高一点才能够得着;亦或许事情和往常的预期完全不一样,它的背后存在着前所未有的新理论。

参考文献

- [1] Kosowsky A, Turner M S, Watkins R. *Phys. Rev. D*, 1992, 45: 4514
- [2] Hindmarsh M, Huber S J, Rummukainen K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:041301
- [3] Caprini C, Durrer R. *Phys. Rev. D*, 2006, 74:063521
- [4] Gong Y, Luo J, Wang B. *Nature Astron.*, 2021, 5: 881
- [5] Wess J, Zumino B. *Phys. Lett. B*, 1974, 49:52
- [6] Fayet P. *Phys. Lett. B*, 1976, 64:159
- [7] Dimopoulos S, Georgi H. *Nucl. Phys. B*, 1981, 193:150
- [8] Kaplan D B, Georgi H. *Phys. Lett. B*, 1984, 136:183
- [9] Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G R. *Phys. Lett. B*, 1998, 429:263
- [10] Antoniadis I, Arkani-Hamed N, Dimopoulos S *et al.* *Phys. Lett. B*, 1998, 436:257
- [11] Randall L, Sundrum R. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83:3370

千里之行,始于足下。当前的大型强子对撞机会继续积累更多的数据,同时,人们正在准备建设正负电子希格斯工厂,例如未来环形对撞机(future circular collider, FCC)、环形正负电子对撞机(circular electron-positron collider, CEPC)等大科学装置。目前粒子物理方向的国际共识,例如欧洲的粒子物理战略(European Strategy)、美国物理学会粒子与场分会组织的粒子物理学规划(Snowmass)、国际未来加速器委员会(ICFA)等,认为正负电子希格斯工厂是优先级最高的下一个对撞机。正负电子希格斯工厂信号高、本底低,比高亮度大型强子对撞机灵敏度更高,因此希格斯粒子的全方位测量可以达到极高精度。高精度希格斯粒子测量是新物理寻找的最重要方向之一。无论解决希格斯粒子相关问题背后的新理论是什么,希格斯粒子有很大概率会和超出标准模型的新粒子有新的相互作用。这将在树图或者量子圈图水平对希格斯粒子和标准模型粒子的相互作用造成影响。希格斯工厂有利于发现希格斯粒子对标准模型的吻合以及偏离,从而帮助人们找到背后的新物理理论。希格斯粒子是自然界留给人们的一把钥匙,对希格斯粒子的深入理解,必将使人们对自然界规律的认识得到巨大的提升。

- [12] Randall L, Sundrum R. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83:4690
- [13] Graham P W, Kaplan D E, Rajendran S. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115(20):221801
- [14] Arkani-Hamed N, Cohen T, D'Agnolo R T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117(25):251801
- [15] Gonzalez-Garcia M C, Maltoni M. *Phys. Rept.*, 2008, 460:1
- [16] Fritzsche H, Xing Z Z. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2000, 45:1
- [17] Dodelson S. *Modern Cosmology*. Elsevier Science, 2003
- [18] Burgess C P, Pospelov M, ter Veldhuis T. *Nucl. Phys. B*, 2001, 619:709
- [19] Patt B, Wilczek F. Higgs-field Portal into Hidden Sectors, arXiv: hep-ph/0605188
- [20] Tumasyan A *et al.* *Phys. Rev. D*, 2022, 105:092007
- [21] Aad G *et al.* *Phys. Lett. B*, 2022, 829:137066