

【专款30周年文集】14. 场论与粒子物理领域发展态势

原创 何小刚等 理论物理专款 2023-12-31 17:43 发表于北京

编者按

1993年，国家自然科学基金委员会设立理论物理专款，并成立学术领导小组。设立专款的目的是：促进我国理论物理学研究的发展，培养理论物理优秀人才，做出国际先进水平的研究成果，充分发挥理论物理对国民经济建设和科学技术在战略决策上应有的指导和咨询作用。理论物理专款是基金委在基金主体申请的主要框架下的一种特别设计，是对基础学科理论物理学支持的一种特别补充。30年来，根据理论物理学的特点、中国经济发展状况和政府经费投入状况，学术领导小组和基金管理者不断地思考、探索和调整有特色的多元化资助模式，起到了促进创新、扶植薄弱、稳定队伍、鼓励交叉、均衡发展、高端引领学科布局、建设创新平台与人才高地、弘扬科学家精神等重要作用。

2023年，为纪念理论物理专款设立30周年，学术领导小组特编写本文集，汇报成绩、总结经验、改进工作、展望未来，以期对从事理论物理研究的科研人员以及科研管理工作有所帮助。

作者简介



何小刚，上海交通大学李政道研究所讲席教授。曾任台湾大学物理系特聘教授，台湾理论科学中心物理部主任。美国物理学会会士。中国科学技术大学77级学士毕业。1981年入选李政道先生倡导和促成的中美联合物理研究生项目（CUSPEA），

1982年到美国夏威夷大学，1987年获得博士学位。长期从事粒子物理研究，研究领域包括：量子拓扑相位，弱电相互作用，标准模型外新物理以及宇宙学。



廖益，清华大学工学学士，中国科学院理论物理研究所理学博士，现任南开大学物理科学学院教授。从事粒子物理理论研究，主要研究方向包括超越标准模型的新物理、有效场论等。



曹庆宏，2005年博士毕业于美国密歇根州立大学，在美国加州大学河滨分校、阿贡国家实验室、芝加哥大学从事博士后研究，2011年入职北京大学物理学院，担任特聘研究员，长聘副教授、教授。长期从事粒子物理理论和唯象学研究，围绕大型强子对撞机实验寻找TeV能量区间的新物理信号，探索基本粒子的质量起源和对称性破缺机制。



郭奉坤，中国科学院理论物理研究所研究员，中国科学院大学岗位教授。2002年毕业于山东大学物理学系，2007年于中科院高能物理研究所获得博士学位，随后在德国于利希研究中心和波恩大学从事博士后研究工作并担任课题负责人，2015年入职中科院理论物理研究所。目前主要从事强子物理的理论研究。



何颂，中科院理论物理研究所研究员。2009年于北京大学获博士学位，先后在爱因斯坦研究所、Perimeter研究所和普林斯顿高等研究院工作，2015年入职理论所。近年来主要从事量子场论、引力和弦论等方向的研究，特别是散射振幅及其在粒子物理、数学物理等领域的应用。



周顺，中国科学院高能物理研究所研究员，中国科学院大学岗位教授。2004年毕业于南开大学物理科学学院，2009年获高能所博士学位，随后在德国慕尼黑马普物理所、瑞典皇家理工学院从事博士后研究工作，2014年入职高能所。主要从事中微子物理和超出标准模型新物理的理论研究。



安海鹏，清华大学副教授。2011年于马里兰大学获得博士学位，先后在Perimeter研究所、加州理工学院做博士后研究。2017年入职清华大学。主要研究方向为粒子物理和宇宙学。近期的研究主要集中在暗物质物理和相变引力波。



刑志忠，中国科学院高能物理研究所研究员。1987年毕业于北京大学物理系，1993年获得高能所博士学位，2001年入职高能所。目前主要从事中微子物理学的理论研究。

导读

粒子物理学是在追求“极小”——探索物质的最深层结构与最基本相互作用的科学研究中发展起来的，其最强有力的理论工具是量子场论以及与之相关的形式或有效理论。本文旨在简要概括场论和粒子物理学领域的现状、问题与未来发展趋势，聚焦于近年来在形式理论、标准模型有效场论、希格斯与顶夸克物理、强相互作用与强子物理、弱相互作用与味物理、中微子物理与暗物质寻找等主要研究方向所取得的重要成果以及面临的挑战和机遇。

一、场论与粒子物理总体发展现状

从 1897 年发现电子到 2012 年发现希格斯粒子，实验和理论物理学家经过一个多世纪的不懈努力，深刻理解了物质世界的微观结构，建立了正确描述电磁力、强核力和弱核力的标准理论——粒子物理学的标准模型（图 1）。标准模型由电弱统一理论和量子色动力学两大板块构成，包含夸克和轻子以及传递相互作用的玻色子，其理论基础可以概括如下：①集狭义相对论和量子力学之大成的量子场论；②由特殊么正群 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 所描述的定域规范对称性，分别对应色量子数守恒的强相互作用、宇称最大程度破坏的弱相互作用和电荷守恒的电磁相互作用；③导致电弱对称性自发破缺的布劳特-恩格勒-希格斯机制，使传递弱相互作用的 W^\pm 和 Z^0 玻色子以及所有带电费米子获得质量；④可重正性。

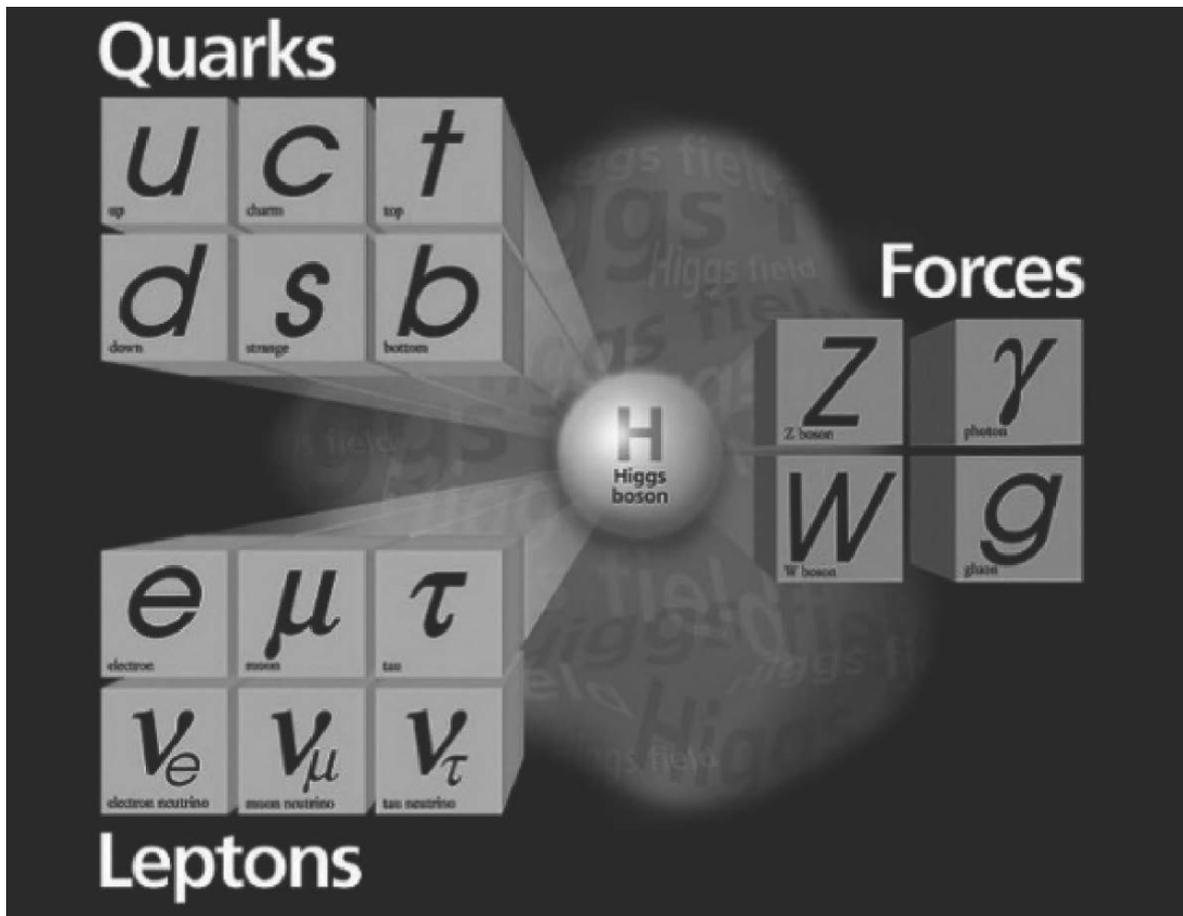


图 1 粒子物理学的标准模型

尽管标准模型的有效性和预言能力从贝塔衰变所代表的低能标到大型强子对撞机正在探索的能量前沿都得到了众多实验的有力验证，且该理论与宇宙学的结合也极大地促进了人类对宇宙早期演化动力学机制的理解和描述，但它仍然不够完备。首先，标准模型的群结构表明它并非真正意义上的统一理论，含有过多自由参数（尤其是与夸克和轻子相关的“味”参数）。其次，标准模型在定量解决低能非微扰问题方面依然面临诸多困难。再次，该理论甚至未能定性理解中微子的质量起源，也未能提供暗物质粒子的合适候选者。最后，该理论与已知的量子引力理论尚无任何实质性、可检验的关联。标准模型的理论框架本身存在的诸如此类的局限性，以及近年来实验观测到的若干“反常”现象，成为探索超越标准模型的新物理的强烈动机。

构建包含量子引力的紫外完备理论，并在电弱能标以有效场论的形式还原标准模型的基本特征以及克服其弱点，是弦论等形式理论研究的主旋律之一。近年来，针对标准模型有效场论的研究几乎臻于极致，与此相关的还包括希格斯有效场论和中微子有效场论等。这些重要进展也为精确检验标准模型和寻找新物理提供了有力的理论工具。

得益于众多高精度的实验结果，粒子物理学的其他理论研究方向也取得了令人振奋的长足进展。在能量前沿，主要研究对象包括希格斯粒子和顶夸克的性质、电弱对称性自发破缺的动力学以及可能的新粒子和新相互作用形式；在亮度前沿，针对重强子衰变、奇特强子态、带电轻子的性质、中微子振荡等重要科学问题的研究取得了一系列重要成果；在宇宙学前沿，针对中微子和暗物质的粒子属性的研究方兴未艾。下面将对上述主要方向的发展趋势逐一介绍。

二、场论与粒子物理的发展趋势和展望

1. 形式理论

21 世纪以来，场论与粒子物理的形式理论研究取得了重要进展；它们集中在场论、引力与弦论、数学物理等领域的交叉前沿，例如，场论与引力高精度计算的新方法、散射振幅新形式、规范-引力对偶、非微扰和严格求解方法等。这些进展的共同特点是大大加深了我们对量子场论本身的理解，这将对基础理论的发展起到非常重要的作用。

散射振幅是量子场论的核心概念，是联系理论和高能实验的桥梁。相关研究的原始动机来源于其在对比理论与实验数据方面的重要应用价值：无论是现有的还是未来的高能实验，都需要更加精确、快速地计算场论振幅；引力和弯曲时空场论的微扰计算对引力波、早期宇宙等物理也有重要意义。在应对高精度计算的挑战中，人们发展了比费曼图更有效的微扰计算方法（例如在壳方法），揭示了在传统场论框架中很难理解的新结构（例如，规范场、引力和弦论隐藏对称性及其内在联系），乃至发现了振幅新的表述形式（例如 CHY 形式、振幅多面体等）。近年来，振幅相关研究进展极其迅速，已成为最受关注的形式理论方向之一。从规范场论和引力振幅的数学结构到量子色动力学的实际计算，从高圈积分的解析性质到振幅与数学的交叉，该方向直接联系了粒子物理、场论基础、数学、引力与弦论等诸多领域。

散射振幅等方向的进展促使我们重新思考诸如规范不变性、定域性、因果律、时空等基本概念，甚至在特定理论中找到了量子场论新的表述形式，例如，从振幅多面体等纯粹几何的表述中，满足相对论和量子力学原理的散射振幅会自然出现，从而在特殊情形下实现了量子场和时空本身从几何中涌现（emergent）。这些进展深化了我们对基础理论的理解，催生了新的数学方向，并为从量子场论出发解决量子引力、时空本质等问题提供了新的思路（图2）。

过去 20 年人们发现了以规范-引力对偶（AdS/CFT）为代表的一系列场论和弦论中的对偶性：例如，被称为“21 世纪的谐振子”的最大超对称杨-米尔斯理论（ $N=4$ SYM）与 AdS 空间中的引力存在强弱对偶；这一对偶定义了 AdS 空间的量子引力，大大加深了人们对黑洞量子性质、全息与量子纠缠等方面的理解，更是首次实现了 $N=4$ SYM 中物理量的非微扰计算和严格求解。AdS/CFT 思想已经被推广和应用到量子信息、夸克-胶子等离子体、强关联系统、凝聚态物理等诸多领域。与之相关，共形场论不仅对偶于量子引力，更是深入理解量子场论及其分类的前提（包括无法用拉氏量描述的场论）。该方向的重要问题包括推动共形场论的非微扰计算（例如自举方法），发展量子可积模型，乃至研究更一般的强耦合理论。

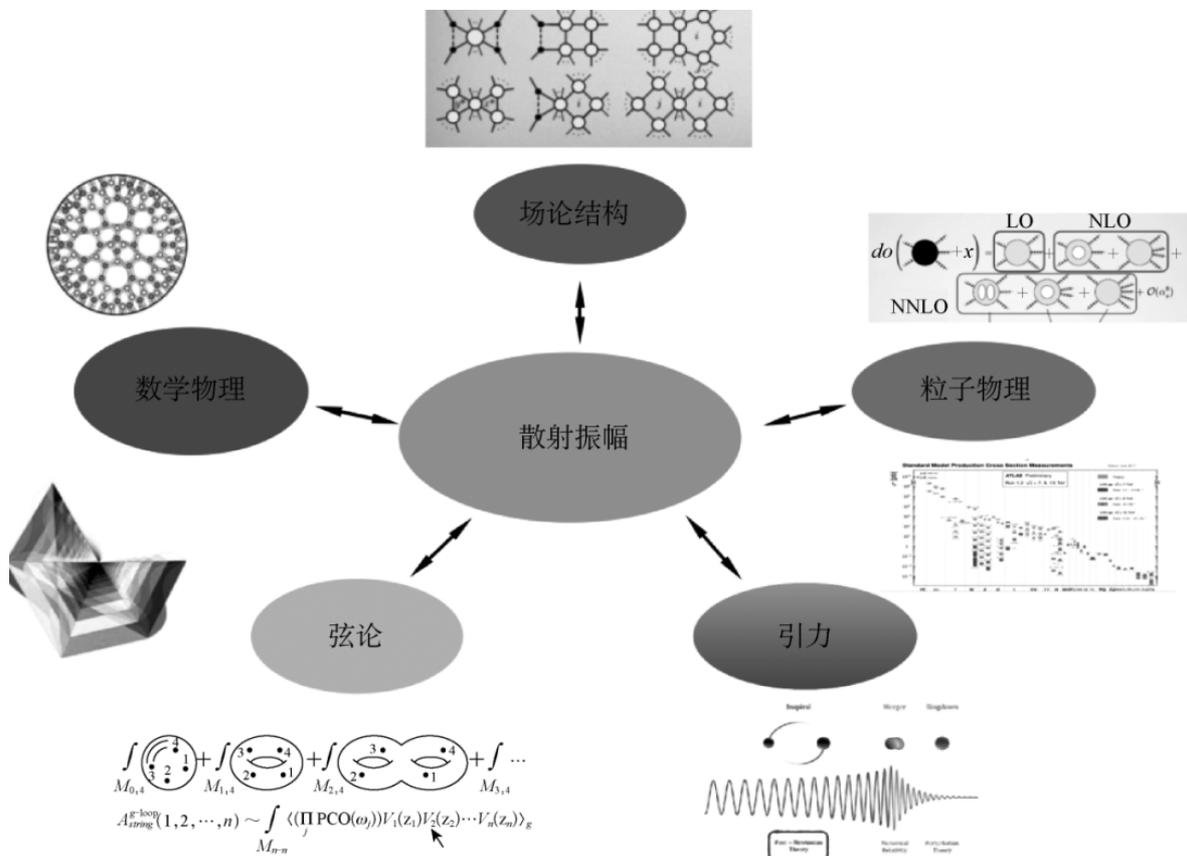


图 2 散射振幅及其相关研究方向

现代物理学和数学的联系越发紧密，尤其是场论和弦论的研究与代数、微分几何、拓扑等方向相互促进。例如，弦论研究与Calabi-Yau 流形、镜像对称性、拓扑不变量等，上述振幅研究直接推动了若干新兴的数学方向（例如正几何、丛代数等）。我们期待物理与数学在未来发生更多美妙而有重要应用的交叉。

2. 标准模型有效场论

物理现象是丰富甚至繁杂的，物理研究则从简单、理想的物理体系出发。在理想体系中，我们将小的量（比如特征长度、质量）置零、将大的量看作无穷大，这样建立的理论能对现象进行简洁而有效的描述，而真实体系对理想体系的偏离，可以通过对小的量或大的量之倒数做微扰展开逐阶包括进来。因此，在这个意义上，物理理论都是有效理论；而小或大是相对所研究的现象而言的，因此，每一个有效理论都有其有限的适用范围。在高速运动的微观世界，物理现象受量子论和狭义相对论支配，这样建立的理论即量子场论。现代观念认为，量子场论也是有效理论，简称为有效场论（EFT）。

粒子物理标准模型（SM）在解释实验结果方面取得了巨大成功。按有效场论的观念，标准模型针对的也是理想情形：除了标准模型的粒子，不存在比电弱能标 $\Lambda_{EW} \approx 100\text{GeV}/c^2$ 更轻的粒子，比 Λ_{EW} 更重的粒子如果存在的话，其质量对应的能量远超目前实验能达到的范围，可以看作无穷大，因此它是一个可重整的场论。由于标准模型未能回答一些基础性理论问题，我们相信在更高的能标 $\Lambda_{NP} \gg \Lambda_{EW}$ 存在新物理。因此，在有效场论框架下，标准模型对应于 $\Lambda_{NP} = \infty$ 极限下的相互作用，很大但有限的 Λ_{NP} 则诱导出有效耦合参数（称为 Wilson 系数）被 $1/\Lambda_{NP}$ 压低的有效相互作用，此即标准模型有效场论（SMEFT）。

SMEFT 适用于新物理能标 Λ_{NP} 和电弱能标 Λ_{EW} 之间的能区，只包括 SM 量子场，遵循其规范对称性 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ，但一般会破坏 SM 中的偶然对称性，如重子数 B 和轻子数 L 守恒。事实上，随着 $1/\Lambda_{NP}$ 展开阶增高，有效相互作用包含的高量纲算符呈现出不同的 B、L 守恒或破坏特征。SM 相互作用对应于量纲不超过 4（取自然单位制及质量量纲为 1）

的完备而独立的算符集，它们保持 B-L 守恒。量纲 5 算符是唯一的，在电弱对称性自发破缺后给出中微子的马约拉纳 (Majorana) 质量，因此破坏 L 两个单位；量纲 6 完备而独立的算符集于 2010 年完全确立，其大部分算符保持 B、L 守恒，少数算符分别破坏 B、L 各一个单位但保持 B-L 守恒。近几年来，完备而独立的 SMEFT 算符集已经推进到量纲 12 水平。比如，量纲 7 算符分为两组，其中一组 B 守恒但 L 破坏两个单位，另一组 B、L 各破坏一个单位但 B+L 守恒。这些守恒律或其破坏特征将导致不同的物理效应，如质子衰变模式、中子反中子振荡、原子核的无中微子双 β 衰变等；一般来说，它们可能来源于不同的高能标新物理。

从唯象学角度看，SMEFT 的一个显著优势是其普适性。在满足前述一般性假设下， Λ_{NP} 能标新物理的动力学细节体现在 SMEFT 中威尔逊 (Wilson) 系数上，而框架本身是通用的。在唯象学研究中，可以利用所有实验数据限定这些未知系数，所得结果在一定程度上是一劳永逸的——任何高能标新物理都必须满足这些限定条件。近年来，人们针对高能对撞机特别是大型强子对撞机 (LHC)，系统研究了量纲 6 算符对 SM 粒子参与的过程的影响，评估了未计入的更高量纲算符带来的理论不确定性。研究主要集中在两个运动学区域，即 SM 粒子在壳或近阈产生和衰变的过程，以及运动学分布的高能端。针对前一个区域高统计量及在壳三粒子过程主导的特点，人们发展了 SMEFT 的几何表述形式 (geometric formulation)；高能端统计量小，但高量纲算符的贡献得到提升。人们开发了一些软件和算法，以便在合理评估理论不确定性的基础上，利用 LHC 实验数据获取尽可能精确的限制。未来发展将集中在几个方面，如：纳入 SMEFT 更高阶的结果，开发拟合新算法，研究对 SM 参数及 Wilson 系数进行整体拟合等。SMEFT 唯象学研究的另一个重点则针对低能高亮度实验，包括夸克和轻子味物理，特别是轻子数破坏的过程，发展了相应的低能有效场论。目前，关于原子核无中微子双 β 衰变的粒子物理分析基本完善，原子核矩阵元的不确定性有待核物理界进一步改善；涉及第二代费米子的轻子数破坏已有一些研究，但亟须研究高亮度的观测手段。

如何利用 Wilson 系数的唯象学限制来排除、挑选可能的新的物理理论？这涉及具体的高能标理论与 SMEFT 之间的匹配 (matching) 计算问题。传统方法一般基于费曼 (Feynman) 振幅来确定 Wilson 系数，在单圈水平变得很复杂。近年来，人们借助于泛函 (路径积分) 方法，结合规范协变导数展开和圈动量区域积分，发展了高效的单圈水平匹配计算方案。目前，多个研究组开发了自动化程度较高的匹配计算软件，并在开发与其他软件的接口。该方案的有效性已在若干热门的新物理模型匹配计算中得到验证，人们在尝试将其推广到其他的有效场论 (如软共线有效理论)。此外，一个有趣的理论进展是，如果有效场论存在一个自治的紫外完备理论，因果性和么正性将对散射振幅施加限制性很强的色散关系，从而得到有效场论 Wilson 系数必须满足的正定性条件。这些正定性约束甚至可以是非线性的，因此有可能给出 Wilson 系数必须满足的上下限，这意味着有效场论的参数空间中，只有某些区域对应于自治的紫外完备理论。有效场论方法还被应用于其他学科分支的研究并取得有趣的新成果，如宇宙大尺度结构和暴胀，引力波天文学，以及凝聚态物理中的非平衡态现象、费米与非费米液体、物质的奇特激发态分形子 (fracton)，等等。

3. 希格斯与顶夸克物理

粒子物理电弱标准模型的核心是部分统一的电磁与弱相互作用的规范理论。作为非阿贝尔规范相互作用，三种弱规范玻色子的静止质量本应为零，但与实验观测相矛盾。另外，弱相互作用对宇称守恒定律的破坏，导致标准模型费米子的质量项会明显地破坏弱 SU(2) 的对称性。因此，标准模型的电弱规范对称性必定是一种“破缺”了的对称性。然而，对称性破缺后使得有质量的规范玻色子具有了纵向极化自由度，而纵向极化的规范玻色子的高能散射行为破坏了么正性，从而使得理论在电弱能标附近失去预言能力。为此，在建立标准模型时，物理学家引入了电弱对称性的自发破缺机制，在 (日后证明) 不破坏理论么正性和可重正性的前

前提下，赋予标准模型的弱规范玻色子和基本费米子非零质量。在极小标准模型中，这一机制是通过引入“布劳特-恩格勒-希格斯场”（以下简称“希格斯场”）实现的。希格斯场通过获得非零的真空期望，实现标准模型中的电弱对称性自发破缺，一方面赋予标准模型粒子非零质量，另一方面在模型中给出一个标量粒子—希格斯粒子。

希格斯粒子是标准模型中最后一种被物理学家发现的基本粒子，人们对它的性质知之甚少（图 3）。2012 年物理学家在欧洲核子研究中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）上发现希格斯粒子之后，物理学家对它的理论研究取得了长足进展。这首先反映在对于各种标准模型产生道的理论计算精度得到了大幅度提升。以 LHC 上希格斯粒子的主要产生道为例，其理论计算的精度已经达到了次次次领头阶 QCD (N^3LO QCD) 的水平。此外，与希格斯粒子相关的各种新物理模型和机制也获得了进一步的讨论，这一方面体现为希格斯粒子各种性质测量结果对这些新物理的限制，另一方面体现为标准模型希格斯粒子所处质量区间带来的诸如真空稳定性问题和早期宇宙电弱相变性质等新物理问题。

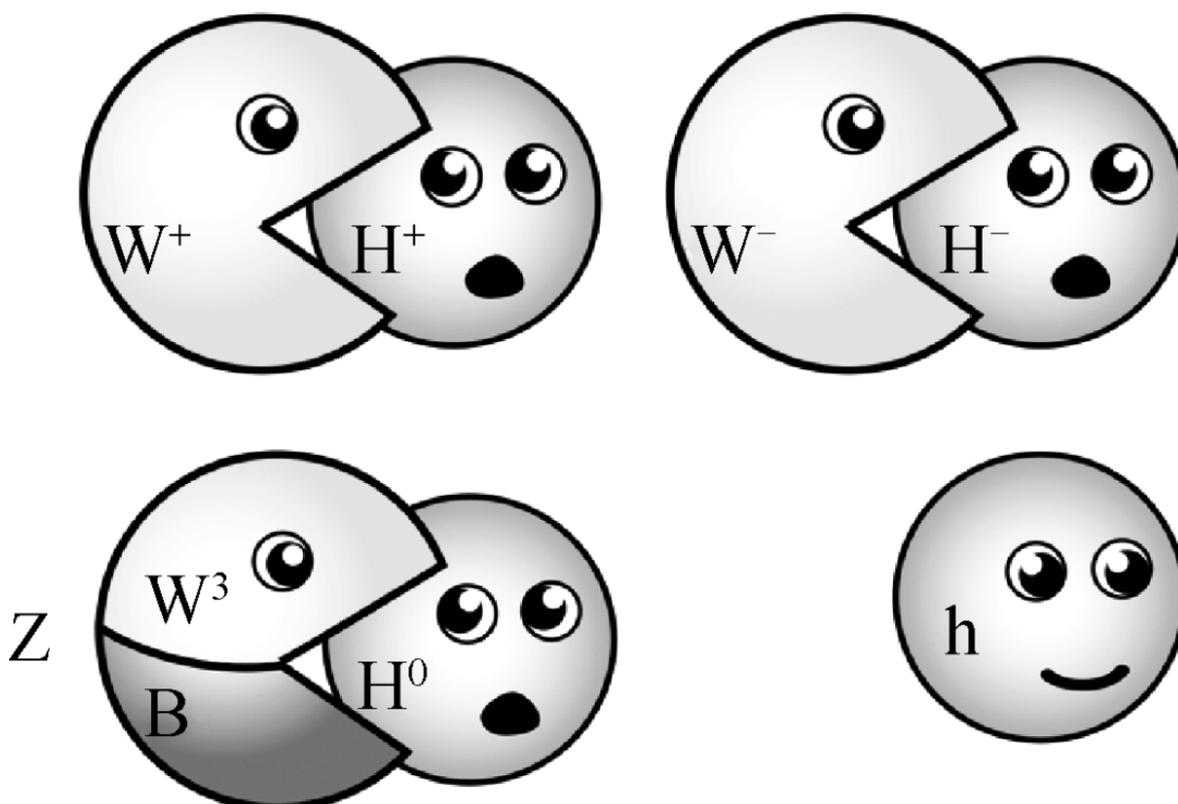


图 3 标准模型中的三个弱相互作用玻色子“吃掉”希格斯场的三个戈德斯通自由度获得质量，希格斯场余下的一个自由度成为标准模型中唯一的一个基本标量粒子

由于物理学家对于希格斯粒子的性质，特别是真空自发对称性破缺的起源等问题仍然知之甚少，在未来很长时间内，对希格斯粒子性质的研究将始终居于粒子物理高能量前沿的核心地位。这主要包括对希格斯粒子的精确研究，特别是对反映标准模型电弱对称性自发破缺起源的希格斯势的研究。对后者最主要研究手段，乃是对于 LHC 以及未来对撞机上多希格斯粒子产生过程的研究。这对于理论工作提出了如下一些要求：首先，要给出尽可能精确的标准模型预言；其次，阐释实验观测结果对于各种重要物理过程—如早期宇宙电弱相变的影响和意义；最后，通过模型相关和模型无关的有效场论框架，给出不同新物理对于希格斯势和实验观测可能的影响。

作为通过电弱对称性自发破缺获得质量的标准模型中最重的基本粒子，顶夸克与希格斯粒子具有很强的相互作用，从而强烈地影响着标准模型的自发对称性破缺。另外，顶夸克是标准模型中唯一在强子化之前衰变的夸克，其极化信息被完整地保留在衰变产物中。所以，研究顶夸克物理能够帮助物理学家更好地理解诸如真空稳定性等对称性破缺的性质；同时，顶夸

克也可以作为相互作用结构信息的携带者，揭示各种相互作用除强度外的更多的信息，比如手征性质、CP 性质等。此外，近年来，顶夸克过程也开始被用来研究高能对撞机上的量子纠缠性质。这方面的研究，仍在进行中。

4. 强相互作用与强子物理

量子色动力学 (QCD) 是描述强相互作用的基本理论，将原子核乃至强子内部的强相互作用还原为点粒子夸克和胶子之间的相互作用，它的基本特点是：在高能区，相互作用弱，从而可以采取微扰论的方法处理；而在低能区，相互作用强，完全由非微扰的动力学主导。由于实验上能直接探测到的参与强相互作用的最小单元是色单态的强子，而不是组成强子的夸克和胶子（这一现象被称为色禁闭），因此，非微扰的强相互作用是强子物理研究的核心，由之导致的色禁闭的物理机制、物质的质量起源、强子的自旋结构等仍是标准模型内的未解之谜。

强子物理研究的前沿是由当前运行和讨论中的实验驱动的，包括强子的谱学、衰变和产生、强子间的相互作用以及部分子结构等，并且也为检验标准模型并寻找超出标准模型的新物理提供不可或缺的输入（如缪子反常磁矩中的 QCD 贡献、QCD 轴子性质的精确计算等）。下面我们简要讨论强子谱学和强子结构两个方面。

强子谱学研究的重要目的是对实验上观测到的强子（包括自旋为整数的介子和半整数的重子）进行分类，并由此探索和认识强子的内部结构和相互作用的规律，从而有助于对色禁闭机制的理解。夸克模型是对强子分类的主要方法。2003 年以来，实验上发现了大量强子共振结构，例如 Belle 在粲偶素能区发现的 X(372)、BES III 和 Belle 发现的带电类粲偶素 $Z_c(3900)^{\pm}$ 、BaBar 发现的粲介子 $D_{s0}^*(2317)$ 、LHCb 发现的一系列隐粲五夸克态 P_c 、BES III 最近发现的轻介子 $\eta_1(1855)$ 等；图 4 以粲偶素为例展示了理论预言与实验观测之间的巨大偏差。这些共振结构超出了三夸克重子和正反夸克组成的介子的图像，从而是奇特强子态（包括多夸克态、胶球、混杂态以及类似于原子核的强子分子态等）的候选者，对这些新发现的共振结构的理解是当前强子谱研究中最受关注的问题。而要对强子进行分类，则需要建立可靠的强子谱。强子态对应于涉及强子过程的 S 矩阵的极点；此外，S 矩阵还有三角奇点等奇异性，它们会带来类似于共振态的实验信号，体现的是特殊的运动学效应。强子谱研究的进一步突破将依赖于新一代的高亮度实验，例如，日本的 Belle-II、北京正负电子对撞机 (BEPCII) 的升级、欧洲的大型强子对撞机 (LHC) 的第 3~5 轮运行、美国的电子离子对撞机 (EIC)、讨论中的超级陶粲装置 (STCF) 和中国电子离子对撞机 (EicC) 等；同时，需要构建考虑了运动学效应的振幅分析，从而给出更可靠的强子谱。

强子中不仅包含对其进行分类依赖的价夸克，还包含真空中量子涨落产生的海夸克以及胶子，强子的自旋和质量等便应是各种味的正反夸克和胶子的贡献之和。实验发现，价夸克的自旋只贡献了质子自旋的一小部分，将质子的自旋定量分解为各种夸克、胶子和轨道角动量的贡献之和目前仍是当前研究的前沿问题。类似地，夸克的质量也只提供了核子质量的一小部分，而超过 90% 的核子质量（从而也对应于可见物质世界质量的绝大部分）则来源于非微扰 QCD 通过迹反常这种量子效应的贡献；核子以及其他强子的质量起源，即将质量定量分解为各种贡献之和，也是当前强子结构研究的热点问题。对强子结构的深入理解需要研究强子内部的部分子分布，包括部分子分布函数、三维动量空间的广义部分子分布和横动量依赖分布等。对核子结构进行研究，从而探索核子的自旋和质量起源将是 EIC 和 EicC 的主要物理目标之一。



扫描二维码
可看彩图

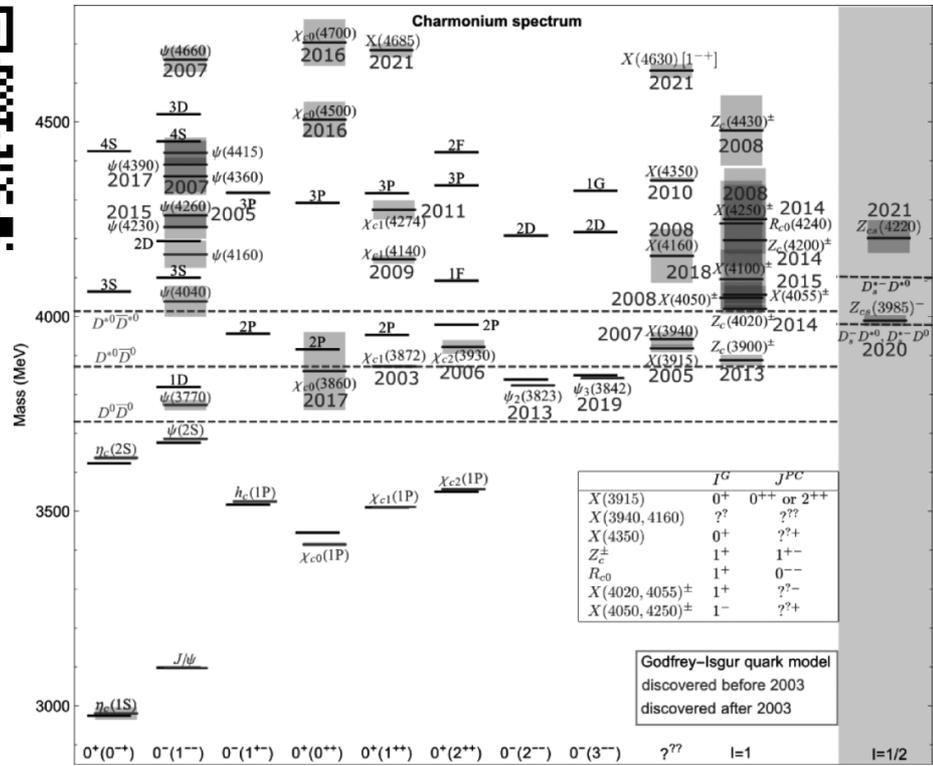


图 4 粲偶素和类粲偶素的质量谱，其中黑线表示 Godfrey-Isgur 夸克模型的预言，红线表示到 2003 年为止实验发现的粒子，蓝线表示 2003 年到 2021 年实验发现的新的粲偶素和类粲偶素（以及相应的发现年份），阴影表示实验测量的质量误差

强子物理研究的主要理论方法包括：将时空离散化并通过路径积分量子化定义的格点 QCD，它是基于第一性原理的、原则上误差可控的方法，并且可以通过调节格点的大小、夸克质量等给出实验上无法测量的信息，为理解各种非微扰 QCD 现象提供输入，随着计算技术的发展，格点 QCD 将越发重要；基于手征对称性及其自发破缺、重夸克的味对称性和自旋对称性等 QCD 的近似对称性构建的有效场论，这类方法也是模型无关并且可系统改进的，是沟通实验测量和格点 QCD 计算之间的重要桥梁；基于解析性（即因果性）、么正关系（即概率守恒）和交叉对称性等基本原理构建的色散关系，它通过解析性建立不同能区的物理之间的联系，将一些非微扰的量表达为实验可测的物理量的积分，随着实验精度的提高，将在标准模型的精确检验方面发挥重要作用；此外，还有基于 Dyson-Schwinger 方程等泛函方法的连续时空量子场论，基于对 QCD 真空中的非微扰效应进行参数化建立起来的 QCD 求和规则，以及组分夸克模型等半唯象或唯象方法，它们将持续为定量和定性理解非微扰现象提供重要的物理图像和理论输入。

可以预期，新一代的高亮度实验和格点 QCD 计算，通过有效场论、色散关系等理论方法搭建其间的桥梁，在唯象方法的协助下，将帮助人们深入揭示非微扰强相互作用的动力学规律。

5. 弱相互作用与味物理

弱相互作用是了解自然规律中非常关键的一环。弱作用的标准模型已建立起来。实验已发现的参与弱相互作用三代不同夸克 (u, d)、(c, s)、(t, b) 和轻子 (ν_e, e)、(ν_μ, μ)、(ν_τ, τ) 等基本粒子被形象地称为不同的味道，如图 1 所示。目前弱作用和味物理研究的主题是研究传播弱相互作用的 W 和 Z，及赋予各种粒子质量的希格斯玻色子，以及这些玻色子与不同夸克、轻子怎么相互作用的特性，进一步检验标准模型和发现新物理。

人类对弱作用的认识开始于贝克勒尔 (A. Becquerel) 1896 年发现的放射线。其发现的射线中包含称为贝塔 (β) 具有很强穿透力的电子。1930 年，泡利认识到要挽救核的 β 衰变过程能量守恒需要中微子的必要性，尔后费米建立了贝塔衰变理论，20 世纪 50 年代证实了费米

理论在弱作用中的普适性。弱作用理论发展中非常重要的一步是由李政道和杨振宁引领的推翻宇称守恒法则的革命性突破。1956 年开始了粒子物理发展的黄金时期：弱作用破坏宇称守恒被验证，中微子被测量到，确认了中微子作用的 V-A 形式；20 世纪 60 年代格拉肖、萨拉姆和温伯格等提出了在杨-米尔斯规范场框架下弱电相互作用的 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 统一标准模型，陆续发现预言的中性流、传播弱作用的 W 和 Z 玻色子、三代轻子以及也参与强相互作用的三代夸克；CP 对称性破缺的发现和模型的建立，以及中微子振荡。在此期间，强作用的色动力学理论也被提出。2012 年弱电统一模型预言的希格斯粒子也被实验证实，找到了建立弱及强相互作用的标准模型的最后拼图。图 1 归纳标准模型的基本粒子和相互作用。

W 和 Z 玻色子的发现以及它们的相互作用在不同过程的精确检验是弱相互作用研究的极大成功。非常有意思的是弱作用的研究获得了意外的电磁和弱作用的统一理论。希格斯粒子的发现，也验证了标准模型粒子质量起源机制的正确性。不同代的夸克或轻子费米子除了质量不同外，在标准模型里其他量子数都相同，表明各代费米子弱作用有普适性。处于弱作用本征态费米子会是质量本征态的混合组合，带来非常丰富的味物理研究内容。费米子的混合由 θ 正矩阵描述。小林和益川发现如果存在三代夸克，其混合包含一个 CP 破缺的相角可以解释观测到的 CP 破缺实验数据，建立 CP 破缺的标准模型，而且由此预言的第三代夸克被实验证实。混合 θ 正矩阵特性已被实验验证。三代轻子也有类似的混合，并且也被实验证实。

标准模型极大的成功，激发人们更深入地研究和检验标准模型并发现新物理。标准模型本身还有许多缺陷。比如，引力作用还不能在同一理论框架下统一起来。标准模型本身要有多余 18 个以上的自由参数来描述。目前也解释不了为什么宇宙中物质多于反物质。有许多能部分回答这些问题的理论框架，如超对称、大统一、多维空间和多希格斯粒子模型等，但都缺乏足够的实验证据。

由振荡现象证实的非零中微子质量，以及宇宙学中需要的暗物质和暗能量是存在标准模型外新物理的有力证据。但是新物理的源头还是不清楚。这些会在中微子和暗物质部分有更多的讨论，就不在这里展开。虽然能量前沿 LHC 研究对探寻新物理能标在不断提高，但还没有确切的新物理迹象。在弱作用和味物理的高亮度研究中，目前有一些与标准模型预言差 3 到 4 的标准误差异常现象，如缪子反常磁矩、一些 B 衰变分支比等，但是仍然需要进一步确认。希望不久的将来通过实验和理论研究不断的努力，能打开发现新物理的突破口。

6. 中微子与暗物质

中微子振荡实验证明了中微子有质量，而天文学和宇宙学观测提供了宇宙中存在暗物质的有力证据。因此，中微子的质量和暗物质的存在是具有坚实实验基础的新物理，而中微子和暗物质的基本性质已成为当前粒子物理学和宇宙学领域的重要前沿课题。

中微子理论研究主要集中在中微子质量的产生机制、轻子味混合背后的对称性、以中微子为焦点的粒子物理与天体物理、天文学、宇宙学的交叉研究。若将粒子物理标准模型视为低能有效理论，则量纲为 5 的温伯格算符在规范对称性自发破缺之后产生中微子的马约拉纳质量。在树图层次上实现温伯格算符的完整理论只有传统的三类跷跷板模型，它们是中微子质量产生的最简单和最自然的选择。跷跷板模型的低能有效场论的构建已被提升至单圈水平，由此得到的截至量纲为 6 的算符及其威尔逊系数为跷跷板模型的低能实验精确检验奠定了理论基础。

探究轻子味混合背后的对称性的最新进展可分为两类：一是基于中微子振荡实验结果推测可能存在的“最小”味对称性；二是在超弦理论框架下通过额外维空间的紧致化实现有限模群的味对称性。在第一类方案中，最具代表性的是 μ - τ 反射对称性，其对味混合参数的理论预言与实验测量结果完全吻合。将 μ - τ 反射对称性与轻子味空间的平移对称性或转动对称性结合可

以进一步限制中微子质量模型的参数并提高其理论预言性。与传统的分立味对称性相比，第二类方案中的有限模对称性要求轻子场与希格斯场的汤川耦合系数是模形式，从而避免引入过多的标量场来实现与观测相符的轻子味混合模式。

中微子是连接粒子物理与天体物理、天文学和宇宙学的桥梁，而极端的天体和宇宙学环境为研究中微子的基本性质提供了独一无二的平台。最新的理论研究发现，在早期宇宙中或超新星内部中微子的自相互作用和正反中微子角分布的不对称可能导致快速味转化的集体效应，后者对宇宙早期演化、超新星爆发机制有深远的影响。当前，天文学和宇宙学观测的实验进展日新月异，相关的理论研究也亟须积极推进。

大量的天文学和宇宙学的观测在各个尺度上给出了暗物质存在的证据，并且测量出了今天宇宙中平均的暗物质能量密度为总能量密度的四分之一。但是人类今天对暗物质的粒子物理属性依然一无所知。

弱相互作用大质量粒子（WIMP）暗物质模型由于其和电弱能标独特的联系最早被人们重视。人们在超出标准模型的各种新物理模型中都尝试构造了 WIMP 暗物质候选者。国内和国际上的主要暗物质探测合作组都以探测 WIMP 为主要科学目标。另外，WIMP 暗物质还可以产生间接探测信号和对撞机信号，因此也是宇宙线实验和对撞机实验研究的重点。但是，目前各种实验探测上都没有探测到令人信服的 WIMP 信号，因此人们（尤其是理论家）开始把主要精力逐渐向轻暗物质和超轻暗物质转移。

质量在 MeV 附近的轻暗物质所携带的动能往往小于传统探测器的阈值，需要一些加速机制才能利用传统暗物质探测器进行探测。近年来，人们不断研究各种各样的利用天体物理现象加速暗物质的可能性。其中包括利用太阳中的电子加速、利用宇宙线中的高能粒子加速等。另外，新的探测技术，包括新的半导体技术、超导技术、超流技术等来实现低阈值的探测的研究也在如火如荼地进行中。

更多的理论家将目标转移到对质量小于 keV 的超轻暗物质的研究之中。超轻暗物质的代表是轴子、类轴子和暗光子。超轻暗物质的质量下限为 10^{-21} eV，因此质量跨度有 24 个数量级。对于每一个区域都需要应用不同的技术手段进行探测。正因如此，近年来涌现出了一批探测超轻暗物质的新方法，比如将量子精密测量技术融入传统的谐振腔探测中，利用射电天文方法寻找超轻暗物质，利用视界望远镜（EHT）探测黑洞超辐射产生的超轻暗物质，利用引力波探测器寻找超轻暗物等。

可以说目前（图 5）人类正在不断地将各种先进的技术用到暗物质的探测中。期待在不久的将来人类能够探测到暗物质的粒子物理属性。



图 5 暗物质研究与探测途径



理论物理专款

ID: lilunwulizhuankuan