

# 粒子物理学发展的历史考察

乔笑斐, 路昊明

山西大学科学技术史研究所, 太原 030006

**摘要** 粒子物理是现代物理学的重要分支,也是人类文明的标志性成就之一。1955—1995年,约1/3的诺贝尔物理学奖授予了粒子物理相关理论或实验研究。为分析其发展历程,按照时间顺序,将粒子物理的发展分为初步探索期、理论成熟期、实验验证期和继续完善期4个阶段。其中,初步探索期(1930—1951年)是粒子物理的起步与独立阶段;理论成熟期(1952—1967年)是粒子物理的理论体系构建阶段;实验验证期(1968—1985年)是粒子物理理论体系得到实验验证阶段;继续完善期(1986年至今)是粒子物理的接续发展阶段。现在人类比以往任何时期都更加接近于超越标准模型的新物理。

**关键词** 粒子物理学;粒子加速器;高能物理

粒子物理,又称高能物理,是研究基本粒子及其相互作用的一个物理学分支,代表了人类在亚原子领域的最前沿探索。20世纪以来,人类对微观物质世界的研究取得一系列突破性进展,原子物理与核物理深刻改变了人类的生活方式以及对自然的理解。粒子物理研究原子核更深层次的微观世界中物质的结构与性质,以及在极高能量下物质转化的原因与规律。作为原子物理与核物理在亚原子领域的延伸,粒子物理在第二次世界大战结束后立刻受到美国、欧洲和苏联的重视,并在此后的40多年里成为发展最为迅速的科学领域之一。

20世纪50年代之前的粒子物理处于起步与独

立阶段,尽管加速器已经出现,但宇宙射线实验仍然是发现新粒子的主要方式,粒子物理正在从核物理中独立出来。20世纪50—60年代是粒子物理的理论构建与成熟阶段,夸克模型、希格斯机制、电弱统一理论相继被提出,创造了影响深远的理论;采用新原理的加速器和探测器逐步取代了宇宙射线实验,成为发现和研究基本粒子的最主要工具,粒子物理研究进入高能领域。20世纪70—80年代中期是粒子物理的实验验证与完成阶段,诸多理论得到实验证实,发现了一系列标准模型中预言的基本粒子,对于微观物质世界基本图景的认识更深一步。20世纪80年代中期至今是粒子物理的完善与

收稿日期:2022-02-27;修回日期:2022-04-01

基金项目:国家社会科学基金重大项目(16ZDA113,19ZDA038)

作者简介:乔笑斐,副教授,研究方向为物理学哲学、物理学史,电子信箱:qxf@sxu.edu.cn;路昊明(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为物理学史,电子信箱:luhaoming1997@163.com

引用格式:乔笑斐,路昊明.粒子物理学发展的历史考察[J].科技导报,2022,40(9):6-13;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.09.001

再发展阶段,希格斯粒子得到验证,标准模型遗留的许多问题还有待进一步研究,超越标准模型的“新物理学”成为重要目标。由此,将粒子物理学的发展按照年代划分为初步探索期(1930—1951年)、理论成熟期(1952—1967年)、实验验证期(1968—1985年)、继续完善期(1986年至今)4个阶段。

## 1 粒子物理学起步与独立阶段 (1930—1951年)

早期的亚原子研究可以追溯至20世纪早期,例如欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford)发现质子。20世纪30年代初期则可以在广义上概括为现代粒子物理研究的起点,尽管此时的高能亚原子粒子还无法以人工方式获得。

### 1.1 宇宙射线实验

1930年,沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)从理论上提出了中微子假设;欧内斯特·奥兰多·劳伦斯(Ernest Orlando Lawrence)提出了回旋加速器原理,并因此获得了1939年诺贝尔物理学奖。1931年,哈罗德·克莱顿·尤里(Harold Clayton Urey)发现氘核;劳伦斯和斯坦利·利文斯顿(Stanley Livingston)在加州大学辐射实验室建成了全球首台回旋加速器。1932年,詹姆斯·查德威克(James Chadwick)发现中子,获得了1935年诺贝尔物理学奖。同年,约翰·科克罗夫特(John Cockcroft)和欧内斯特·沃尔顿(Ernest Thomas Sinton Walton)发明的科克罗夫特-沃尔顿加速器首次实现人工加速粒子束引起的核反应,后获得1951年诺贝尔物理学奖。1933年,罗伯特·范德格拉夫(Robert Van de Graaff)发明的范德格拉夫加速器的能量可以达到7 MeV。

科克罗夫特-沃尔顿加速器和范德格拉夫加速器均为直流高压型加速器,其能量在10 MeV以内,实用意义有限。相比之下,改进后的回旋加速器能够达到25~100 MeV,但即便如此,回旋加速器在此后的20年间仍不足以达到发现新粒子的能量要求,其主要被用于寻找同位素和核物理研究。而新粒子的发现主要由宇宙射线实验与探测器配合

完成,例如在此时期发现的正电子、 $\mu$ 子、 $K$ 介子、 $\pi$ 介子和 $\Lambda$ 粒子,包揽了1936、1948、1950年诺贝尔物理学奖。其中,大气中的宇宙射线提供了高能粒子,云雾室、核乳胶等径迹探测器用于记录粒子径迹,进而分析和计算粒子的性质。多年间,虽然物理学家在宇宙射线实验中发现了诸多新粒子,但粒子物理仍未完全从核物理中独立出来,其主要原因是粒子加速器尚未具备达到更高能量的能力,这种情况在战后出现了转机,也为粒子物理学的进一步发展奠定了基础。

### 1.2 冷战初期的影响

1944—1945年,采用调频方法的自动稳相原理由苏联科学家弗拉基米尔·维克斯列尔(Vladimir Veksler)和美国科学家埃德温·麦克米伦(Edwin McMillan)分别独立提出,基于此原理建造的同步加速器突破了回旋加速器的能量限制,为夸克层次的粒子研究创造了条件。此类加速器在20世纪50年代成为主流,其能够将质子加速至GeV级(1 GeV=1000 MeV),随之而来的是建造成本的迅速提升,主要原因是高昂的磁铁造价。

由于核物理带来的巨大效益,以及对基础研究的重视,美国将更深入的亚原子领域研究列为战后的重要科研方向之一,成立了原子能委员会(AEC)和国会原子能联合委员会(JCAE),组建了布鲁克海文国家实验室(BNL),并于1948年批准了2个不同规格的GeV级同步加速器项目。基于美国在核物理领域的领先地位及强大经济实力,一大批优秀的核物理学家转入粒子物理,先进的加速器设备也吸引了来自世界各国的科研人员。苏联则在临近伊万科夫水库的杜布纳成立了水利工程实验室,隶属于伊戈尔·库尔恰托夫(Igor Kurchatov)领导的苏联科学院第二实验室,并以水利工程的名义开展粒子加速器建设。自动稳相原理的提出使苏联在加速器领域拥有了追赶美国的机会,1944年以来,苏联的核物理和粒子物理以齐头并进的方式迅速发展。这些努力最终在1949年开花结果:8月,原子弹核试验成功;12月,同步回旋加速器建成。冷战时期,美苏在科技领域的对峙关系也在一定程度上加快了粒子物理的发展。

## 2 理论构建与成熟阶段(1952—1967年)

1952—1954年是粒子物理学史上的关键时期,也标志着粒子研究进入新阶段。此后的10余年里,粒子物理得到了重要且快速的发展。一方面,关于基本粒子分类、核子结构及其相互作用的理论被系统化构建,对于基本粒子的理解更为深入,相关研究走向成熟;另一方面,高能亚原子粒子可以通过更为强大的粒子加速器获得,人工条件下的加速粒子轰击核子取代了不稳定的宇宙射线实验,成为发现和研究新粒子的主流方式,探测器技术同步发展,百余种新粒子被发现,一时被称为“粒子动物园”。尽管一些理论还无法完全被验证,但其真理性已初见端倪,并为进一步的实验探索做好了准备。

### 2.1 理论进展

同步加速器虽然成功地突破了回旋加速器的能量限制,但磁铁成本成为限制加速器能量进一步提升的新问题。苏联在680 MeV质子同步回旋加速器取得成功以后,便着手以同样的方式建造其扩大版本,最终于1957年建成10 GeV质子同步加速器。尽管这台加速器创造了能量新高,但建造过程中消耗的 $3.6 \times 10^4$  t磁铁同样令人震惊,高昂的成本使得能量在10 GeV以上的同步加速器变得不现实。1952年,利文斯顿、欧内斯特·库朗特(Ernest Courant)、哈特兰·斯奈德(Hartland Snyder)和约翰·布莱维特(John Blewett)提出“强聚焦原理”,又称“交变梯度聚焦原理”<sup>[1-2]</sup>,以较小的磁体达到了更高的能量。例如,如果依照苏联10 GeV质子同步加速器的方式建造500 GeV加速器,则需要 $1.8 \times 10^6$  t磁铁,而使用强聚焦原理的费米实验室主环加速器(main ring)在能量达到500 GeV时只需 $9 \times 10^3$  t磁铁。真空盒尺寸和磁铁造价大大降低,加速器有了向更高能量发展的可能,此后的环形和直线加速器普遍采用了强聚焦原理。

1954年,杨振宁与罗伯特·米尔斯(Robert Mills)提出了基于局域规范对称的非阿贝耳规范场论,即杨-米尔斯理论<sup>[3]</sup>。该理论尽管起初并未受到足够重视,但对后世影响深远,成为电弱统一理

论、量子色动力学以及整个粒子物理标准模型的一般性框架。1960—1961年,南部阳一郎与杰弗里·戈德斯通(Jeffrey Goldstone)、乔瓦尼·乔纳-拉希尼奥欧(Giovanni Jona-Lasinio)提出了南部-戈德斯通定理<sup>[4-5]</sup>、南部-约纳-拉希尼奥模型<sup>[6]</sup>,自发对称破缺机制被引入粒子物理领域,南部阳一郎因此获得了诺贝尔物理学奖。自发对称破缺使得杨-米尔斯理论得到更多重视,同时也成为希格斯机制的基础。

1964年,以彼得·希格斯(Peter W. Higgs)、弗朗索瓦·恩格勒(François Englert)和杰拉德·古拉尼(Gerald Guralnik)为代表的3个研究小组分别独立提出了希格斯机制与希格斯粒子理论,解释了基本粒子的质量来源<sup>[7-9]</sup>。经过几十年的探索,希格斯粒子最终在2012年由欧洲核子研究组织(CERN)的大型强子对撞机(LHC)发现,希格斯与恩格勒共享了2013年诺贝尔物理学奖,成为粒子物理学史上重要的标志性事件。

1964年,默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann)与乔治·茨威格(George Zweig)分别独立提出了夸克模型,解决了繁杂的粒子结构与分类问题,认为基本粒子由上、下、奇3种夸克组成<sup>[10]</sup>。多年来,没有任何实验证据表明夸克的存在,S矩阵、部分子模型和中国学者朱洪元、胡宁等提出的层子模型<sup>[11-13]</sup>等理论在当时也颇具影响,夸克模型在20世纪70年代获得广泛认可。

1967年,史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)和阿卜杜勒·萨拉姆(Abdus Salam)将杨-米尔斯理论和希格斯机制引入谢尔登·李·格拉肖(Sheldon Lee Glashow)的电弱统一理论<sup>[14-16]</sup>,创立了自洽的电弱统一理论,弱相互作用和电磁相互作用实现了统一,这项成果在1971年由杰拉德·特霍夫特(Gerrard't Hooft)证明了可重整化<sup>[17]</sup>。电弱统一理论成为粒子物理标准模型的重要组成部分,温伯格、萨拉姆与格拉肖共享了1979年诺贝尔物理学奖,特霍夫特与其导师马丁纽斯·韦尔特曼(Martinus J. G. Veltman)共享了1999年诺贝尔物理学奖。

### 2.2 实验进展

根据是否采用了强聚焦原理,20世纪50—60年代的主要加速器可以分为2类:弱聚焦加速器和

强聚焦加速器。第一类是未采用强聚焦原理的质子同步加速器,以美国的 Cosmotron(3.3 GeV, 1953年)、Bevatron(6.2 GeV, 1954年)和苏联的 10 GeV 质子同步加速器(1957年)为代表,其特点是能量上限随着建造规模及磁体成本的升高而增加,只在设计上做出有限调整而不对原理做出改进,其结果是成本逐渐达到了即使是超级大国也难以接受的地步。第二类是采用了强聚焦原理的质子同步加速器,以欧洲的质子同步加速器(PS, 28 GeV, 1959年)、美国的交变梯度同步加速器(AGS, 33 GeV, 1960年)和苏联的 U-70(70 GeV, 1967年)为代表,其以更低的成本达到了更高能量,例如 AGS 的能量达到了 Bevatron 的 5.3 倍,但所用磁体的总重量仅为 Bevatron 的 40%。此时期极具代表性的加速器还有斯坦福直线电子加速器 SLAC Linac(50 GeV, 1966年)和环形正负电子对撞机 AdA(500 MeV, 1962年),前者以加速电子和正电子的方式将电流强度提升至其他加速器的 50 倍,后者则开创了以 2 束加速粒子直接碰撞的方式获得更高能量的现代对撞机,对此后的加速器发展产生了深远的影响。

成果方面,埃米利奥·塞格雷(Emilio Segrè)和欧文·张伯伦(Owen Chamberlain)于 1955 年使用 Bevatron 发现了反质子( $\bar{P}$ ),两人因此获得了 1959 年诺贝尔物理学奖。1956 年,美国物理学家克莱德·考恩(Clyde Cowan)和弗雷德里克·莱因斯(Frederick Reines)在中微子实验中证实了泡利于 26 年前提出的中微子假设,莱因斯后续对中微子进行了长期研究并于 1995 年获得诺贝尔物理学奖(考恩因突发心脏病于 1974 年逝世而未获奖)。1959 年,王淦昌小组使用苏联 10 GeV 质子同步加速器发现了反西格玛负超子,这是第 1 个被发现的带电反超子。1962 年,利昂·莱德曼(Leon Lederman)、梅尔文·施瓦茨(Melvin Schwartz)和杰克·施泰因贝格尔(Jack Steinberger)在 AGS 加速器中发现了  $\mu$  中微子( $\nu_\mu$ ),3 人因此获得了 1988 年诺贝尔物理学奖。1964 年,美国物理学家詹姆斯·沃森·克朗宁(James Watson Cronin)和瓦尔·洛格斯登·菲奇(Val Logsdon Fitch)使用 AGS 加速器进行中性 K 介子衰变实验,发现了 CP 破坏现象,2 人因此获

得了 1980 年诺贝尔物理学奖。

粒子探测器方面,美国物理学家唐纳德·格拉泽(Donald Glaser)于 1952 年发明的气泡室取代了云雾室与核乳胶,其搜集到的各种信息大约是云雾室的 1000 倍,解决了核乳胶无法把中性粒子与事件准确联系起来的困难,探测器的检测和分析能力大大提高。多年间,Bevatron、PS 等加速器在气泡室的帮助下,发现了反质子、 $\Sigma$  和  $\Omega$  重子和数以百计的共振粒子。后来,路易斯·沃尔特·阿尔瓦雷茨(Luis Walter Alvarez)改进发展了氢泡室技术和数据分析方法,格拉泽与阿尔瓦雷茨分别获得了 1960 和 1968 年诺贝尔物理学奖。20 世纪 50 年代末出现的另一种具有代表性的探测器是火花室,其在 AGS 的  $\nu_\mu$  探测中发挥了重要作用。

### 3 实验验证与完成阶段(1968—1985年)

如果说 20 世纪 50—60 年代是粒子物理的理论成熟阶段,那么 20 世纪 70—80 年代就是粒子物理的实验验证阶段。一大批采用强聚焦原理的大型对撞机将人工能量上限提升到了前所未有的高度,在粒子束的高能对撞中发现了众多自然条件下无法存在的新粒子。以理论中预言的粒子或现象为目标,大批实验得以目的明确地开展,标准模型的正确性得到了充分验证。

#### 3.1 实验成果显著

1968 年,杰尔姆·弗里德曼(Jerome Isaac Friedman)、亨利·韦·肯德尔(Henry Way Kendall)和理查德·爱德华·泰勒(Richard Edward Taylor)在 SLAC 的深度非弹性散射实验(DIS)中首次证明质子存在内部结构,其含有 3 个更小的点粒子,虽然这在后来被认为是证实夸克切实存在的重要证据,但在当时无法立即确认点粒子是否为夸克,故夸克模型的有效性仍未被普遍接受,3 人后于 1990 年获得了诺贝尔物理学奖。1969 年,盖尔曼因“对基本粒子的分类及其相互作用的研究发现”获得了诺贝尔物理学奖。1970 年,格拉肖、约翰·李尔普罗斯(John Iliopoulos)和卢西恩·梅安尼(Luciano Maiani)在论文《弱相互作用中的轻子-强子对称

性》中提出 GIM 机制<sup>[18]</sup>,在夸克模型的基础上预言了第 4 种夸克——粲夸克。

1973—1974 年在粒子物理学史上具有重要意义。1973 年 4 月,美国物理学家戴维·格罗斯(David Gross)与他的学生弗兰克·维尔切克(Frank Wilczek)解释了夸克之间的强相互作用大小的问题,提出了渐近自由<sup>[19]</sup>。此概念由哈佛大学的休·波利策(Hugh Politzer)于 1973 年 5 月独立提出<sup>[20]</sup>,2 篇论文同时在 1973 年 6 月的《物理评论快报》上发表<sup>[19-20]</sup>,3 人后来共享了 2004 年诺贝尔物理学奖。1973 年 7 月,CERN 使用加尔加梅勒(Gargamelle)气泡室,在 PS 加速器中发现了弱中性流<sup>[21]</sup>,这是电弱统一理论的预言之一,也是  $Z^0$  玻色子存在的第 1 个实验证据,尽管尚未直接发现  $W^\pm$  和  $Z^0$ ,但电弱统一理论已经得到广泛认可。1973 年 11 月,盖尔曼、哈拉尔德·弗里奇(Harald Fritzsch)和汉里奇·劳意特维勒(Heinrich Leutwyler)正式命名了量子色动力学(QCD)<sup>[22]</sup>,其由夸克模型、渐近自由、夸克禁闭、色荷等理论共同构成,强相互作用得到了精确描述。1974 年 11 月,丁肇中小组和伯顿·里克特(Burton Richter)小组分别独立发现  $J/\psi$  介子<sup>[23-24]</sup>,粲夸克被证实,夸克模型的正确性成为学界普遍共识,被称为粒子物理学史上的“十一月革命”,丁肇中与里克特因此获得了 1976 年诺贝尔物理学奖。

1972 年 3 月,美国费米实验室的主环加速器正式投入运行,其对撞机采用强聚焦原理的设计,使其以最低的成本获得了最高的能量。主环运行之初,2 个加速到 200 GeV 的质子束相撞,能够产生 400 GeV 的碰撞能量;而至 1976 年 5 月,主环已经能够将质子束的能量提升至 500 GeV。1973 年 2 月,日本物理学家小林诚和益川敏英发表论文《弱相互作用可重整化理论中的 CP 破坏》,在卡比博矩阵的基础上提出了 CKM 矩阵,以解释 1964 年发现的 CP 破坏现象,同时预言了底、顶 2 种新夸克的存在<sup>[25]</sup>。与粲夸克不同,底夸克和顶夸克拥有更高的质量,需要能量更高的加速器才能发现,费米实验室在此领域作出了重要贡献。1979 年,费米实验室的 Tevatron 超导质子-反质子对撞机开始建造,主环于 1981 年被改造为 Tevatron 的质子注入器。Tevatron 于 1983 年投入运行,并在 1986 年提升至

900 GeV $\times$ 2=1.8 TeV(1 TeV=1000 GeV)能量。费米实验室分别于 1977 年和 1995 年发现底夸克和顶夸克,小林诚和益川敏英后于 2008 年获得诺贝尔物理学奖。就这样,夸克的种类从最初的 3 种扩充至 6 种,每种夸克还有相应的色荷与反夸克。

至 20 世纪 70 年代中期,电弱统一理论、量子色动力学、CKM 矩阵、希格斯机制等理论共同组成了粒子物理标准模型,成为一套描述强相互作用、弱相互作用、电磁力及组成所有物质的基本粒子的理论,涵盖了除引力以外人类已知的全部 3 种基本相互作用,是当代理论物理学的最重要成就之一。根据标准模型,自然界中一共存在 61 种基本粒子,它们构成了一切物质的基础,基本粒子之外的粒子皆由这些基本粒子复合而成。多年间,标准模型预言的多种基本粒子相继被发现,对其性质的预测也与实验数据高度吻合。

1975 年,马丁·佩尔(Martin Perl)发现了第三代轻子  $\tau^-$  并于 1995 年获得了诺贝尔物理学奖(与莱因斯共享)。1979 年,德国电子同步加速器研究所(DESY)在 PETRA 正负电子对撞机中观察到了三喷注事件,证实了胶子的存在<sup>[26]</sup>。1983 年,CERN 的 UA1 合作组在卡洛·鲁比亚(Carlo Rubbia)的领导下发现了规范玻色子  $W^\pm$  和  $Z^0$ <sup>[27]</sup>,鲁比亚与西蒙·范德梅尔(Simon van der Meer)共同获得了 1984 年诺贝尔物理学奖。其中,范德梅尔是加速器束流随机冷却技术的发明者,此技术使得反质子能够大规模制备与储存,1976 年建成的超级质子同步加速器(SPS)得以在 1981 年改造为超级质子-反质子同步加速器(SppS),而  $W^\pm$  和  $Z^0$  正是在 SppS 中发现的。至此,规范玻色子胶子、 $W^\pm$ 、 $Z^0$  已经全部被找到,加上先前已经发现的多种轻子与夸克,标准模型的正确性得到了极为精确的验证,人类对微观物质世界的理解达到了前所未有的水平。

### 3.2 政策支持调整

一方面,多年以来,尽管粒子物理在探索自然方面取得了辉煌成就,但它更多的是一种纯科学的知识探索,而对日常生活和工业生产的贡献十分有限,这与曼哈顿工程的发起者万尼瓦尔·布什(Vannevar Bush)所倡导的“基础科学引领技术发展”有着明显区别。虽然能量在 10 GeV 以内的小型加速

器有着重要的应用价值,例如放射诊疗和同步辐射光源在材料、能源、生命科学等领域的应用,大型加速器工程也间接带动了低温超导、工业控制等技术的发展,如费米实验室工业联盟(FIA)自1978年以来与通用电气、西屋电气和壳牌石油等公司之间的技术转移合作<sup>[28]</sup>,且粒子物理还带来一项重要技术——互联网,其源自蒂姆·伯纳斯-李(Tim Berners-Lee)于1989年在CERN搭建的全球首个网站及网站服务器,但这些都并非建造大型加速器的主要目的。粒子物理发现的多数新粒子无法在自然条件下存在,仅能在加速器创造的极端条件下瞬间衰变,人类暂时还没有发现其对现实生活的价值,其研究目的是为了理解自然本身。尤其是在加速器走向巨大化以后,由于其建造和运维成本实在过高,经常占据国家拨款的较大份额,其他领域的科学家抱怨研究经费被挤压,民众与媒体质疑为何不优先解决医疗和教育等民生问题,政府关心加速器工程能够带来多少经济效益和就业机会,种种争论在粒子物理学史上可谓屡见不鲜。

另一方面,出于冷战对抗的需要,加速器经常以“国家威望”为由而获得美苏政府的支持,粒子物理政策也因国际政治形势的转变而多次调整。在冷战的前20年,苏联在粒子物理领域进行了十分积极的探索,曾长期拥有全球能量最高的加速器。作为科技实力的一种体现,美苏之间开展了“加速器竞赛”。20世纪70年代初期,美苏关系缓和,也正是由于远离军事与工业的特性,粒子物理成为了两国科技交流的主要领域之一,大量苏联科学家前往费米实验室等研究机构,多年间开展了许多实验合作,CERN也在粒子物理领域长期与美苏两国保持着合作关系。

#### 4 完善与再发展阶段(1986年起)

20世纪80年代中期以来,粒子物理的发展进入了新阶段,尽管还有顶夸克、 $\tau$ 中微子( $\nu_\tau$ )和希格斯粒子3种预言中的粒子尚未找到,但标准模型的精确性却表明这只是时间问题(后分别于1995年、2000年和2012年找到)。标准模型固然是粒子物理的重大胜利,这个学科似乎已经完成了,杨振宁

将其称为“盛宴已过”<sup>[29-30]</sup>,之后还能做什么?

对标准模型遗留问题进行修正成为了此后的主要研究方向,例如暗物质与暗能量、夸克禁闭、质子衰变、强CP破坏、广义相对论与标准模型的统一、重子不对称性、中微子质量、规范等级等问题。近35年来,物理学家做出了许多尝试,尽管在部分领域有所突破,但成果与发现的数量同1950—1985年的“黄金年代”相比已经相去甚远,新的理论和实验出现诸多困境。理论上,量子引力是通往统一4种基本相互作用的重要尝试,以超弦理论和圈量子引力为主要代表,但理论与实验严重脱节,争议与问题颇多。实验上,超导超级对撞机(SSC)在耗资近20亿美元后于1993年被终止,13 TeV的LHC在运行的近15年时间里(2008—2022年)也未能找到超对称粒子等任何超越标准模型直接或间接实验证据。始于1999年的BaBar、Belle实验和后来的LHCb实验在B介子半轻衰变中观测到了轻子普适性破坏的迹象<sup>[31-33]</sup>,BNL和费米实验室也在 $\mu$ 子反常磁矩实验中观测到了标准模型理论计算与实验数据的偏差<sup>[34-35]</sup>,这些迹象展现了超越标准模型的新物理之可能性,但距离真正意义上的新发现还存在一定距离。

除了希格斯粒子的发现,此时期最具代表性的成就还有中微子振荡现象的观测。日本超级神冈探测器(Super-K)于1998年观测到的大气中微子振荡<sup>[36]</sup>,加拿大萨德伯里实验(SNO)于2001年发现的太阳中微子味道转变的现象<sup>[37]</sup>,表明中微子具有质量,是首个与标准模型不相符的实验结果,梶田隆章与阿瑟·麦克唐纳(Arthur B. McDonald)因此共同获得了2015年诺贝尔物理学奖。

20世纪90年代至今,中国的粒子物理研究也取得了一系列成果,例如 $\tau$ 轻子质量的精确测量<sup>[38]</sup>、大亚湾中微子实验发现中微子的第3种振荡模式<sup>[39]</sup>、高海拔宇宙线观测站(LHAASO)发现超高能宇宙射线<sup>[40]</sup>、北京正负电子对撞机(BEPC)发现四夸克态候选粒子 $Z_c(3900)$ <sup>[41]</sup>、中国科学家在LHCb实验组发现3个 $P_c$ 五夸克态候选粒子<sup>[42-43]</sup>等。

目前仍在运行的加速器还有BNL的相对论性重离子对撞机(RHIC)、托马斯·杰斐逊国家加速器设施(JLab)的连续电子束加速器(CEBAF)、日本高

能加速器研究机构(KEK)的 SuperKEKB 对撞机以及由 KEK 和日本原子能研究所(JAERI)联合建造的大强度质子加速器(J-PARC)等。未来几年, J-PARC 将以与费米实验室和 BNL 完全不同的测量技术和方法进行低动量超冷缪子实验, SuperKEKB 的 Belle II 实验将继续提高亮度, SPS 的 AMBER 将成为 COMPASS(Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)实验的继承者, LHC 的 ALICE、ATLAS、CMS、LHCb、LHCf、MoEDAL、TOTEM 和 FASER 实验也将继续进行。2022年4月7日,费米实验室的CDF 合作组公布了迄今为止对  $W$  玻色子的最精确测量结果,而该数据比标准模型的预测高出了7个标准差<sup>[44]</sup>,这一结果令人意外且震惊。尽管还需要 LHC 的进一步验证,但可能正如粒子物理学家艾达·卡德拉(Aida El-Khadra)所说:“我们正在接近某些事情爆发的临界点——真正地超越标准模型。”<sup>[45]</sup>

## 5 结论

粒子物理研究周期长、资金投入大、合作范围广、发展阶段明显,具有纯科学与大科学两方面的特征;粒子物理也是理论与实验相结合的典范,在长达半个多世纪的持续探索中,取得了极为辉煌的理论实验成就。经过初步探索、理论成熟、实验验证、继续完善4个阶段,粒子物理在理论和实验上均面临一定瓶颈,但同时人类比以往任何时期都更加接近于超越标准模型的新物理。期待粒子物理的进一步发展。

### 参考文献(References)

- [1] Courant E D, Livingston M S, Snyder H S. The strong-focusing synchrotron—A new high energy accelerator[J]. *Physical Review*, 1952, 88(5): 1190–1196.
- [2] Blewett J P. Radial focusing in the linear accelerator[J]. *Physical Review*, 1952, 88(5): 1197–1199.
- [3] Yang C N, Mills R L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance[J]. *Physical Review*, 1954, 96(1): 191–195.
- [4] Nambu Y. Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity[J]. *Physical Review*, 1960, 117(3): 648–663.
- [5] Goldstone J. Field theories with "Superconductor" solutions[J]. *Il Nuovo Cimento*(1955–1965), 1961, 19(1): 154–164.
- [6] Nambu Y, Jona-Lasinio G. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I [J]. *Physical Review*, 1961, 122(1): 345–358.
- [7] Higgs P W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(16): 508–509.
- [8] Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(9): 321–323.
- [9] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global conservation laws and massless particles[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(20): 585–587.
- [10] Gell-Mann M. A schematic model of baryons and mesons [J]. *Physics Letters*, 1964, 8(3): 214–215.
- [11] 朱洪元, 何祚庥, 汪容, 等. 强相互作用粒子结构的相对论性模型[J]. *原子能*, 1966(3): 137–150.
- [12] 刘连寿, 胡宁, 赵光达, 等. 强相互作用粒子的结构模型[J]. *北京大学学报(自然科学)*, 1966(2): 103–112.
- [13] 戴元本. 怀念朱洪元先生[C]//朱洪元论文集. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2003: 321.
- [14] Weinberg S. A model of leptons[J]. *Physical Review Letters*, 1967, 19(21): 1264–1266.
- [15] Goldstone J, Salam A, Weinberg S. Broken symmetries [J]. *Physical Review*, 1962, 127(3): 965–970.
- [16] Glashow S L. Partial-symmetries of weak interactions[J]. *Nuclear Physics*, 1961, 22(4): 579–588.
- [17] Hooft G. Renormalization of massless Yang-Mills fields [J]. *Nuclear Physics: B*, 1971, 33(1): 173–199.
- [18] Glashow S L, Iliopoulos J, Maiani L. Weak interactions with lepton-hadron symmetry[J]. *Physical Review D*, 1970, 2(7): 1285–1292.
- [19] Gross D J, Wilczek F. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories[J]. *Physical Review Letters*, 1973, 30(26): 1343–1346.
- [20] Politzer H D. Reliable perturbative results for strong interactions? [J]. *Physical Review Letters*, 1973, 30(26): 1346–1349.
- [21] Hasert F J, Faissner H, Krenz W, et al. Search for elastic muon-neutrino electron scattering[J]. *Physics Letters B*, 1973, 46(1): 121–124.
- [22] Fritzsche H, Gell-Mann M, Leutwyler H. Advantages of the color octet gluon picture[J]. *Physics Letters B*, 1973, 47(4): 365–368.
- [23] Aubert J J, Becker U, Biggs P J, et al. Experimental observation of a heavy particle J[J]. *Physical Review Letters*, 1974, 33(23): 1404–1406.
- [24] Augustin J E, Boyarski A M, Breidenbach M, et al. Discovery of a narrow resonance in  $e^+e^-$  annihilation[J]. *Physical Review Letters*, 1974, 33(23): 1406–1408.
- [25] Kobayashi M, Maskawa T.  $CP$ -violation in the renormalizable theory of weak interaction[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 1973, 49(2): 652–657.

- [26] Brandelik R, Braunschweig W, Gather K, et al. Evidence for planar events in  $e^+e^-$  annihilation at high energies[J]. *Physics Letters B*, 1979, 86(2): 243–249.
- [27] Arnison G, Astbury A, Aubert B, et al. Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/ $c^2$  at the CERN SPS collider[J]. *Physics Letters B*, 1983, 126(5): 398–410.
- [28] Fermilab. Who are the industrial affiliates[N]. *Fermi-News*, 1981–05–21(1).
- [29] Henry Tye S H. Supplement to the "Giant Collider in China" debate: Background on Prof. C.N. Yang's opinion on high-energy physics[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2016, 31(30): 1630056.
- [30] 杨振宁. 杨振宁国科大演讲全文: 辩论对年轻人有很大的好处——杨振宁在中国科学院大学谈学习与研究经历 [EB/OL]. (2019–07–28) [2022–04–07]. <https://news.ucas.ac.cn/index.php/cmjj/493784>.
- [31] Lees J P, Poireau V, Tisserand V, et al. Evidence for an excess of  $\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau$  decays[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(10): 101802.
- [32] Huschle M, Kuhr T, Heck M, et al. Measurement of the branching ratio of  $\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau$  relative to  $\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \ell^- \bar{\nu}_\ell$  decays with hadronic tagging at Belle[J]. *Physical Review D*, 2015, 92(7): 072014.
- [33] Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Measurement of the ratio of branching fractions  $\mathcal{B}(\bar{B}_0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau) / \mathcal{B}(\bar{B}_0 \rightarrow D^{*+} \mu^- \bar{\nu}_\mu)$ [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(11): 111803.
- [34] Bennett G W, Bousquet B, Brown H N, et al. Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL[J]. *Physical Review D*, 2006, 73(7): 072003.
- [35] Abi B, Albahri T, Al-Kilani S, et al. Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.46 ppm[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(14): 141801.
- [36] Fukuda Y, Hayakawa T, Ichihara E, et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(8): 1562–1567.
- [37] Ahmad Q R, Allen R C, Andersen T C, et al. Measurement of the rate of  $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$  interactions produced by  $^8B$  solar neutrinos at the sudbury neutrino observatory [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(7): 071301.
- [38] Bai J Z, Bardon O, Becker-Szendy R A, et al. Measurement of the mass of the  $\tau$  lepton[J]. *Physical Review D*, 1996, 53(1): 20–34.
- [39] An F P, Bai J Z, Balantekin A B, et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(17): 171803.
- [40] Cao Z, Aharonian F A, An Q, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources[J]. *Nature*, 2021, 594(7861): 33–36.
- [41] Ablikim M, Achasov M N, Albayrak O, et al. Observation of a charged charmoniumlike structure  $Z_c(4020)$  and search for the  $Z_c(3900)$  in  $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$ [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(24): 242001.
- [42] Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Observation of  $J/\psi p$  resonances consistent with pentaquark states in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K p$  decays[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(7): 072001.
- [43] Aaij R, Beteta C A, Adeva B, et al. Observation of a narrow pentaquark state,  $P_c(4312)^+$ , and of the two-peak structure of the  $P_c(4450)^+$  [J]. *Physical review letters*, 2019, 122(22): 222001.
- [44] Aaltonen T, Amerio S, Amidei D, et al. High-precision measurement of the  $W$  boson mass with the CDF II detector[J]. *Science*, 2022, 376(6589): 170–176.
- [45] Wood C. Newly measured particle seems heavy enough to break known physics[EB/OL]. (2022–04–07) [2022–04–13]. <https://www.quantamagazine.org/fermilab-says-particle-is-heavy-enough-to-break-the-standard-model-20220407>.

## A historical investigation of the particle physics development

QIAO Xiaofei, LU Haoming

Institute for History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

**Abstract** Particle physics is an important branch of modern physics, as well as one of the landmark achievements of human civilization. From 1955 to 1995, about one-third of the Nobel Prizes in Physics were awarded to the theoretical or experimental research related to particle physics; studying its history can help to truly understand the discipline. Chronologically, the development of particle physics can be roughly divided into four stages: the preliminary exploration period, theoretical maturity period, experimental verification period and continuous improvement period. The initial exploration period (1930–1951) was the initial stage of particle physics, the discipline gradually moving from nuclear physics to independence. The theoretical maturity stage (1952–1967) was the construction stage of the theoretical system of particle physics, paving the way for further experimental verification. The experimental verification period (1968–1985) was the preliminary completion stage of particle physics, and the theoretical system represented by the Standard Model was fully verified. The continued perfection period (1986–present) is the stage of continued development of particle physics, mankind being closer than ever to a new physics beyond the standard model.

**Keywords** particle physics; particle accelerator; high energy physics ●



(责任编辑 王志敏)