



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century



基础物理学 教学参考书

陆 果 陈凯旋



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

基础物理学 教学参考书

陆 果 陈凯旋



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京) 112号

图书在版编目(CIP)数据

基础物理学教学参考书/陆果,陈凯旋. —北京:高等教育出版社,1999

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-007458-3

I. 基… II. ①陆… ②陈… III. 物理学-高等学校-教学参考资料 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 27203 号

基础物理学教学参考书

陆 果 陈凯旋

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1999 年 10 月第 1 版

印 张 23.5

印 次 1999 年 10 月第 1 次印刷

字 数 430 000

定 价 24.60 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果，是“面向 21 世纪课程教材”。本书是为配合“面向 21 世纪课程教材”《基础物理学》和《基础物理学教程》而编写的教学参考书。《基础物理学》和《基础物理学教程》从现代科学技术的发展及理科对人才培养的要求出发，对理科非物理类专业基础物理课程的框架作了较大的变动，在课程内容的现代化方面作了较大幅度的改革，涉及面较广。为了帮助使用《基础物理学》和《基础物理学教程》的教师和学生更深刻地掌握其基本内容并开阔视野，本书简明扼要地讲述了以下三方面的内容：物理学和高技术前沿、习题精析提要以及常用的数学结果等。由于在内容上保持了相对的独立性，对于那些并不采用《基础物理学》或《基础物理学教程》作为教材的读者，本书也是学习物理学的一本很有用的参考书。

本书可作为高等学校理科非物理类专业的教学参考书，也可供其他专业选用和社会读者阅读。



序

20 世纪初，物理学家揭开了原子内部结构的奥秘，建立了相对论和量子力学。1995 年，顶夸克的发现向人们宣告，六种夸克及其反粒子和胶子是构成质子和中子等强子的更为基本的粒子。1998 年，“发现号”航天飞机搭载阿尔法磁谱仪首次升空试验取得了成功，开始了直接到太空中探测和寻找宇宙中的反物质和暗物质的大型国际合作科学试验。今天，人们已经建立起了粒子物理的标准模型和宇宙学的标准模型，并继续探求着浩瀚的未知世界。在研究领域不断取得丰硕成果的同时，科学与技术迅速地、创造性地融合在一起，形成了一系列高、新技术部门。

随着科学技术的飞速发展，学科发展的方向日趋综合，新型的交叉学科不断出现并迅速发展。同时，近代物理学的概念、研究方法和实验技术在生物学、化学和地学等学科中已得到了广泛的应用。特别是，近代化学和生物学的发展已经深入到了微观领域，近代数学的发展与近代物理学的发展更是密切相关和相互促进的。因此，物理学，特别是近代物理学，已经成为各类人才所必须具备的基础知识。

我们正在培养 21 世纪的人才，教学和教材内容的更新势在必行。特别是对于大学理科非物理类专业，除了普通物理课程之外，一般没有物理方面的后继课程。然而，原来的普通物理课程基本上是参照物理专业的普通物理课程设置的，近代物理学的内容很少，更缺少反映当代物理学及其前沿发展的内容。

为此，从现代科学技术的发展以及理科各个学科人才培养的要求出发，我们对物理课程的框架作了较大的变动，编写了《基础物理学》（陆果. 北京：高等教育出版社，1997），内容分为以下五个部分：1) 力学和相对论，2) 电磁学，3) 光学，4) 量子力学，5) 热物理学。在内容上，不论原来是普通物理的内容还是理论物理的内容，不论是经典物理的内容还是近代物理的内容，只要是当今理科大学学生应该掌握的物理基础，就在精心选择、重新组织和整理之后编写在本套书中。我们希望，即使是大学低年级的学生，也能够有限的时间内将发展到今天的物理学的基础和精华学到手，为他们未来的创造性工作打下较好的物理基础。

《基础物理学教程》（陆果. 北京：高等教育出版社，1998）是在面向 21 世纪课程教材《基础物理学》的基础上，根据近年来的教学实践及读者的意见改写而成的，删减了部分涉及数学较深或理论性较强的内容，减少了篇

幅。该教程是教育部“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果，希望能够达到如下的目标：不仅牢牢地把握住《基础物理学》的基本要求，保持并发扬《基础物理学》在课程现代化方面的成功之处，而且更适合于各类高等理工院校学生使用。

由于近年来物理学在各个领域里都有重大的发展，而且《基础物理学》和《基础物理学教程》涉及面很广，因此无论对于教师还是对于学生，在使用这一套教材的过程中都会遇到一定的困难。为了帮助有关师生更深刻地掌握其基本内容并开阔视野，我们编写了本书，简明扼要地讲述了以下三个方面的内容：物理学和高技术前沿(包括粒子物理的标准模型、宇宙学的标准模型、非线性科学的基本概念、生命科学中的物理问题和高技术研究等五章)、习题精析提要以及常用的数学结果，最后还给出了直到 1998 年的诺贝尔物理学奖获得者的简况表。由于在内容上保持了相对的独立性，因此对于那些并不采用《基础物理学》或《基础物理学教程》作为教材的读者，本书也是学习物理学的一本很有用的参考书。

本书的第二部分第一章到第十四章以及第三部分由陈凯旋编写，其余由陆果编写。全书的计算机排版工作由北京大学薛立新同志完成，高等教育出版社胡凯飞同志为本书的出版做了大量的工作。通过立项，我们得到了教育部和北京市教育局的资助。许多专家和学者对我们的工作给予了热情的支持和帮助。《基础物理学》、《基础物理学教程》以及本书的第二部分(习题精析提要)在北京大学多年使用的过程中，广大教师和学生提出了许多宝贵的意见和建议。对于所有这些帮助，我们在此谨致以衷心的感谢。

由于我们的学识有限，缺点和错误在所难免，诚恳地希望读者提出宝贵的意见。

陆 果 陈凯旋

1999 年 6 月于北京大学

责任编辑	胡凯飞
封面设计	张楠
责任绘图	尹莉
版式设计	陆果
责任校对	胡凯飞
责任印制	陈伟光

目 录

第一部分 物理学和高技术前沿

第一章 粒子物理的标准模型	1
§ 1-1 粒子物理的发展	1
一 第一阶段(1897 - 1937)	1
二 第二阶段(1937 - 1964)	2
三 第三阶段(1964 -)	3
§ 1-2 粒子的内禀属性和守恒定律	6
一 质量、质量宽度和寿命	6
二 电荷	7
三 自旋	8
四 同位旋	10
五 重子数和轻子数	11
六 奇异数、粲数、底数和顶数	11
七 宇称和 CPT 定理	12
§ 1-3 粒子物理的标准模型	13
一 粒子的分类和基本性质	13
二 粒子之间的基本相互作用	15
三 粒子世界探秘	16
参考文献	18
第二章 宇宙学的标准模型	20
§ 2-1 宇宙和宇宙学	20
一 亮星、银河和星系世界	20
二 宇宙大尺度特征的观测事实	21
§ 2-2 宇宙学的标准模型	28
一 爱因斯坦宇宙和弗利德曼宇宙	28
二 宇宙膨胀的规律和宇宙物质状态的描述	32
三 热大爆炸的观念	35
四 宇宙演化的过程	36
五 宇宙学标准模型的成功和困难	41

参考文献	44
第三章 非线性科学的基本概念	46
§ 3-1 非线性科学的研究对象	46
§ 3-2 混沌	48
一 混沌现象	48
二 非线性映射的宏观特性	48
三 洛伦茨方程和奇怪吸引子	53
§ 3-3 分形	55
一 分形理论的创立	55
二 分形维数	56
三 分维的计算	58
四 分维的测定	60
§ 3-4 非线性科学的一些研究方法	62
一 重正化群方法	62
二 实验数学方法	64
三 元胞自动机	64
参考文献	65
第四章 生命科学中的物理问题	66
§ 4-1 生命科学与物理学	66
一 近代生命科学的发展	66
二 生命科学与物理学的交叉	67
§ 4-2 细胞	69
一 细胞的大小	69
二 细胞的化学组成	70
三 细胞膜	71
四 细胞质和光合作用	73
五 细胞核和遗传基因	76
六 细胞的全能性和克隆	76
§ 4-3 蛋白质和核酸	78
一 蛋白质	78
二 核酸、遗传和分子生物学的中心法则	81
三 生物大分子中的相互作用	86
四 生物大分子中的电子	87

五	生物大分子的手征性	89
六	结构生物学的形成和发展	90
§ 4 - 4	生命信息的遗传和表达	92
一	遗传密码	92
二	基因工程	93
§ 4 - 5	生命过程中的自组织现象	94
一	生命过程的热力学	94
二	生命起源的自组织问题	97
参考文献		99
第五章	高技术研究	100
§ 5 - 1	概述	100
§ 5 - 2	我国高技术研究发展计划概述	101
一	生物技术	101
二	信息技术	102
三	自动化技术	103
四	能源技术	103
五	新材料技术	103
§ 5 - 3	现代通信的新兴领域	104
一	卫星通信	104
二	新型光纤通信	108
三	移动通信	109
§ 5 - 4	新能源技术	110
一	研究开发新能源的必要性	110
二	太阳能	111
三	核能	112
§ 5 - 5	新材料技术	113
一	超导材料	114
二	纳米材料	114
三	精密陶瓷材料	114
四	化合物半导体与光导纤维材料	114
五	金属合金材料及高分子无机功能材料	115
参考文献		115

第二部分 习题精析提要

第一章 质点运动学	116
第二章 动量守恒和质点动力学	122
第三章 机械能守恒	135
第四章 角动量守恒	151
第五章 连续体力学	162
第六章 振动和波	176
第七章 相对论	186
第八章 电相互作用和静电场	195
第九章 静电场中的导体和电介质	202
第十章 电磁相互作用	209
第十一章 恒定磁场和磁介质	225
第十二章 电磁感应	230
第十三章 电路	240
第十四章 电磁场和电磁波	251
第十五章 光的干涉	256
第十六章 光的衍射	261
第十七章 光的偏振	267
第十八章 光的吸收、散射和色散	270
第十九章 从经典物理学到量子力学	273
第二十章 波函数与薛定谔方程	282
第二十一章 力学量与本征态	296
第二十二章 有心力场和电磁场中的粒子	304
第二十三章 自旋和全同粒子	310
第二十五章 热力学基础	317
第二十六章 统计物理学基础	329
第二十七章 热力学第二定律和第三定律	334
第二十八章 均匀物质的统计热力学	338
第二十九章 相变和临界现象	347

第三部分 附 录

附录一	常用的数学结果	350
§ 1	偏导数和全微分	350
一	偏导数	350
二	全微分	350
三	复合函数的微分法	351
四	隐函数的微分法	352
§ 2	矢量分析和场论	352
一	标量场的梯度 矢量场的散度和旋度	352
二	定理	353
三	常用的运算公式	353
§ 3	积分	354
一	高斯积分和 Γ 函数	354
二	其他积分公式	355
附录二	诺贝尔物理学奖获得者简介	356
附录三	常用的物理常量和数据	361

第一部分 物理学和高技术前沿

第一章 粒子物理的标准模型

§ 1-1 粒子物理的发展

粒子物理学(particle physics)又称为高能物理学,是物理学的一个分支学科。粒子物理学研究比原子核更深层次的微观世界中物质的结构性质,以及在很高能量(GeV)下这些物质相互转化的现象和产生这些现象的原因与规律。人们一直在探索物质世界微观结构和相互作用的基本规律。在不同的能量尺度上,人们发现了物质世界不同层次的微观结构,最终的层次很可能并不存在。

在实验和理论密切结合的发展过程中,大致经历了以下三个阶段。

一 第一阶段 (1897-1937)

1897年汤姆孙(J.J.Thomson, 1856-1940)在实验上发现了电子。1911年卢瑟福(E.Rutherford, 1871-1937)利用 α 粒子大角度弹性散射实验证实了原子中原子核的存在并发现了质子。1932年,查德威克(J.Chadwick, 1891-1974)在用 α 粒子轰击原子核的实验中发现了中子,海森堡(W.K. Heisenberg, 1901-1976)和伊凡宁柯(Д.Д.ИВАНЕНКО, 1904-)随即提出了原子核由质子和中子构成的假说并得到了实验的验证。

1905年,爱因斯坦(A.Einstein, 1879-1955)提出电磁场的基本结构单元是光子,并在1922年为康普顿(A.H.Compton, 1892-1962)等人的实验所证实。1930年,泡利(W.E.Pauli, 1900-1958)从理论上提出了 β 衰变时放出中微子的假说,并在1956年为雷恩斯(F.Reines, 1918-)和考恩(C.L.Cowan, 1919-)的实验所证实。

1928年,狄拉克(P.A.M.Dirac, 1902-1984)提出了电子的相对论性波动方程,其能量和动量满足相对论关系式

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4.$$

若给定电子的动量 p , 则电子可以有正负两个能态, 即

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}.$$

在正能范围的最小值 $m_0 c^2$ 和负能范围的最大值 $-m_0 c^2$ 之间, 有一个宽度为 $\Delta = 2m_0 c^2$ 的能隙。在经典物理中, 一切运动和变化都是连续的, 一个原先为

正能的物体是不可能通过连续变化而越过如此巨大的能隙变为负能的, 因此可以只保留正能解而舍去负能解。然而, 量子力学不仅允许这种不连续的变化, 而且利用狄拉克方程可以算出正能电子跃迁到负能态的概率。这意味着正能电子是不稳定的, 而且由于负能级没有下限, 电子可以无限制地跃迁下去。为了克服这个负能困难, 狄拉克在 1930 年提出了空穴理论。

狄拉克假设, 可以把真空看成是所有负能级都已填满电子的负能电子海。由于泡利不相容原理, 正能电子不能跃迁进入负能电子海, 从而是稳定的。然而, 只要有大于 $2m_0c^2$ 的能量传递给负能电子, 就可以把一个负能电子激发到正能态, 从而在负能电子海中产生一个空穴。这个空穴相当于负能电子海中的一个正能粒子, 它除了电荷和磁矩与电子相反外, 质量、自旋及其它性质均与电子相同, 称为正电子(positron)。1932 年, 安德森(C.D. Anderson, 1905 -)在宇宙线中观测到了正电子。

按照狄拉克的空穴理论, 一切粒子都有其相应的反粒子。反粒子最突出的特点是会与其相应的粒子发生湮没, 正、反粒子的产生和湮没是粒子物理中的普遍现象。这个发现所揭示的正、反粒子对称性, 是粒子物理最基本的对称性, 从此对称性一直是粒子物理研究的基本观念之一。

二 第二阶段 (1937-1964)

1934 年汤川秀树(H. Yukawa, 1907-1964)提出, 强相互作用是由核子之间交换介子引起的, 介子质量是电子质量的 200~300 倍^①。1936 年, 安德森和尼德迈耶(S.H. Nedermeyer, 1907 -)在宇宙线中发现了 μ 子, 尽管它的质量是电子质量的 207 倍, 但后来发现它并没有强相互作用。1947 年, 鲍威尔(C.F. Powell, 1903-1969)等人在宇宙线中发现了汤川秀树所预言的介子—— π 介子。后来发现, 这些 π 介子的质量是电子质量的 270 倍, 分别带有正电荷和负电荷, 称为 π^+ 和 π^- 介子。1950 年, 又发现了不带电的 π^0 介子。

为了克服宇宙线流强太弱的限制, 人们从 20 世纪 50 年代开始建造能量越来越高、流强越来越大的粒子加速器, 并相继发现了新的强有力的探测手段, 如大型气泡室和火花室等。到 60 年代初, 实验上观测到了大量的称为强子的

① 对于两个核子之间通过交换虚介子而发生相互作用的过程, 可以把核子能量的不准度 ΔE 估计为介子的能量 mc^2 , 若介子的传播速率用光速 c 估计, 则虚介子从一个核子传播到距离 Δx 的另一个核子处所需要的时间约为 $\Delta t \approx \Delta x / c \approx a / c$, 其中 a 为强相互作用的力程。若设 $a \approx 2 \text{ fm}$, 则由不确定性关系 $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$ 可得介子的能量约为

$$mc^2 \approx \Delta E \approx \hbar / \Delta t \approx \hbar c / a \approx 100 \text{ MeV} \approx 200 m_e c^2.$$

粒子^①，并证实了所有粒子都有相应的反粒子^②，有的粒子的反粒子就是它自身。这些所谓的“基本粒子”的大量发现，使人们对它们的基本性产生了怀疑。

在这个层次上，所谓的基本相互作用包括强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用等四种。已经发现的粒子，按它们参与相互作用的性质，可以分为规范玻色子(各种相互作用的媒介粒子)、轻子(不直接参与强相互作用的粒子)和强子(直接参与强相互作用的粒子)，强子分为介子和重子，重子又分为核子和超子。

这个阶段理论上最重要的进展是量子场论和重正化理论的建立以及关于相互作用中对称性的研究。例如，确立了对称性在弱相互作用中的破坏，提出了强子分类的 SU(3)对称性，确立了量子电动力学(quantum electrodynamics, 简称 QED)是微观领域电磁相互作用的基本理论。

三 第三阶段 (1964 -)

粒子物理学是 20 世纪 40 年代开始从原子核物理学中分出来的，它从一开始就作为研究场和粒子的性质、运动、相互作用和相互转化规律的学科出现，但它作为研究粒子内部结构规律的学科，则是在 60 年代才充分发展起来的。在 60 年代，它取得了两个重大的突破性进展：一个是强子结构的夸克理论的确立，另一个是电弱统一理论的成功。

(1) 强子结构的夸克模型的建立

强子是参与强相互作用的粒子。自旋为 $\hbar$ 的整数倍的强子，称为介子；自旋为 $\hbar$ 的半奇数倍的强子，称为重子。强子并非基本粒子的想法，最早是由费米(E. Fermi, 1901 - 1954)和杨振宁(1922 -)在 1949 年提出来的。1956 年，能量约为 1 GeV 的电子在核子上的散射实验表明，核子不是一个点粒子，而是在半径为 0.8×10^{-15} m 范围内有着确定的电磁分布的物理实体。

1961 年，盖尔曼(M. Gell-Mann, 1929 -)和奈曼(Y. Neeman, 1925 -)提出了用 SU(3)对称性对上百种强子分类的“八重法”。这种分类很好地说明了强子的自旋、宇称、电荷、奇异数及质量等性质的规律性，它就是粒子物理中的周期表。不但当时已经发现的粒子在八重法分类中都有自己的位置，而且还准确地预言了一些新粒子。1964 年，排在十重态重子(见后，如图 1-3 所示)的最

① 这包括了大量的共振态粒子，分为重子共振态和介子共振态两类。共振态粒子由两个或更多个更基本的粒子通过强相互作用产生和衰变，因而寿命极短，约 10^{-24} s ~ 10^{-22} s。

② 1996 年 1 月，欧洲核研究中心宣布制得了 11 个由正电子和反质子组成的反氢原子。

后一个的重子 Ω^- 的发现,标志着粒子物理SU(3)对称性理论的确立。

1964年,盖尔曼和兹维格(G. Zweig, 1937-)从SU(3)对称性的三维基础表示的三个基出发,设想它们是一种数学符号,称为三种**夸克**,即**上夸克**u、**下夸克**d和**奇异夸克**s。由这三个基的叠加可以构成各种八维表示和十维表示。这种一开始只是数学符号的三种夸克一经提出,很多物理学家就从物质结构的思想去理解它。60年代末实验和理论的进展使物理学家认识到,夸克不再只是一种解释SU(3)对称性的数学符号,而是真实存在的实体^①,所有强子都是由夸克q和反夸克 $\bar{q}$ 组成的(见后,如图1-2所示),这就是**强子结构的夸克模型**。

1973年,格罗斯(D.J. Gross)、威尔切克(F. Wilczek)和波利泽(H.D. Politzer)等人建立了**量子色动力学**(Quantum Chromodynamics, 简称QCD),认为夸克有内部的色空间自由度,即每一味有三种不同的色^②,夸克间的色相互作用是通过传递胶子而产生的。由于胶子带有色荷,其本身也参与色相互作用,结果起了反屏蔽作用,使耦合强度随着夸克间距离的增大反而增强。因此,夸克在近距离下表现为**渐近自由**,远离时表现为**夸克禁闭**。

1974年,丁肇中(1936-)和里希特(B. Richter, 1931-)等人分别发现了一种新的粒子,即J或 ψ 粒子。这种粒子有着非常独特的性质,它不能由上述三种夸克及其反夸克构成,而只能解释为它是由一种新的夸克——**粲夸克**c及其反粒子 $\bar{c}$ 构成的。

1977年,莱德曼(L.M. Lederman, 1922-)等人发现了又一种独特的新粒子Y,它的性质只能以它是由一种新的夸克——**底夸克**b及其反粒子 $\bar{b}$ 构成得到解释。1984年,欧洲核研究中心发现了可能存在第六种夸克——**顶夸克**t的迹象。1995年3月2日,美国费米国家实验室正式宣布,该实验室的两个小组各自独立地发现了顶夸克t。

(2) 电弱统一理论的建立

① 1968年,利用能量高达20 GeV的电子作为探针,在研究质子内部结构的电子深度非弹性散射实验中发现,大角度散射的截面比原来估计的要大得多,这意味着质子内部电荷有着点状的结构。另外的一些迹象还表明,这些点状结构在质子内可以认为是自由的。类似的实验后来也在中子上进行了,70年代还进行了用高能中微子作为探针的实验,都得到了同样的结论。

② 为了解决夸克的自旋统计问题,必须对夸克引入一个新的量子数——**色量子数**。例如,重子 Ω^- 是由三个处在轨道运动为s态的奇异夸克s构成的,而按照泡利不相容原理,不可能有三个相同的费米子(s夸克)处在相同的运动状态中。引入色量子数之后,问题迎刃而解。

1961年,格拉肖(S.L. Glashow, 1932-)首先提出了把电磁相互作用和弱相互作用统一起来的对称性模型。1967年和1968年,温伯格(S. Weinberg, 1933-)和萨拉姆(A. Salam, 1926-)在格拉肖理论的基础上,独立地发展和完善了**电弱统一理论**^①。

电弱统一理论认为:电磁相互作用和弱相互作用在能量远高于中间玻色子质量时是统一的,它可以用一种统一的量子规范场来描述,这一规范场与相互作用的夸克和轻子遵从规范不变的内部对称性。统一的电弱相互作用通过传递四种体现这种对称性的规范玻色子(光子和中间玻色子)来实现,而精确的规范不变性要求它们是无质量的。在能量较低的范围内,这种对称性自发破缺^②,使中间玻色子获得了质量,统一的电弱相互作用表现出两种不同的相互作用——电磁相互作用和弱相互作用。电弱统一理论预言了:中间玻色子 W^+ 、 W^- 和 Z^0 的质量;弱相互作用中存在电荷中性流,即不改变粒子电荷状态的弱相互作用过程;中性弱流不改变夸克的味量子数,提出了存在粲夸克 c 的理论;存在希格斯粒子。

1973年,实验上发现了弱中性流的反应。1974年,实验上确认了粲夸克 c 的存在。1983年,欧洲核研究中心的质子-反质子对撞机实验相继发现了中间玻色子 $W^\pm$ 和 Z^0 ,实验测得的它们的质量与电弱统一理论的预言惊人地一致。电弱统一理论的巨大成功,促进了超对称大统一理论(试图把强相互作用和电弱相互作用统一起来)的探索研究。迄今为止,还没有任何一个大统一理论得到了实验的判定性检验。

① 1954年杨振宁和米尔斯(R.L. Mills)发展了量子电动力学(QED)中关于传递电磁相互作用的电磁场是矢量场,其相应的粒子——光子是矢量粒子的观念,提出了定域规范理论,并将它应用到了强相互作用。由于该理论中的规范场粒子的质量必须为零,而实验上没有发现其它质量为零的矢量粒子,因此该理论遇到了困难。1964年,希格斯(P.W. Higgs)找到了使规范粒子获得质量的途径,提出了定域规范对称性的自发破缺机制——**希格斯机制**。此后,杨米尔斯理论才得到了广泛的应用,成为各种相互作用的统一理论的基础。

② 对称性自发破缺的概念,是1960年左右由南部阳一郎等物理学家从固体物理引入到粒子物理中来的。我们知道,物理规律本身具有某种精确的对称性,但基态是简并的,实际的物理基态只是这些可能的基态中的某一个。因此,在这个特定基态的基础上所发生的物理现象,将不显示或只部分地显示物理规律的固有的对称性。在这里,对称性并未受到外界因素的破坏,对称性的破缺完全是自发产生的。实际上,这时物理规律的对称性并没有任何破缺,只是在特定的背景下不能显示出来。因此,对称性的自发破缺又称为隐含的对称性。