

# 杨振宁学术成就

## ——量子不可积相位因子和规范场的积分表示\*

李 华 钟<sup>†</sup>

(中山大学高等学术研究中心 中山大学物理系 广州 510275)

**摘 要** 简要介绍杨振宁的一项重要学术贡献. 一般物理学界人士都熟悉杨振宁在现代物理学中的三项伟大贡献(1)非阿贝尔规范场理论(2)杨-Baxter方程(3)弱相互作用宇称不守恒. 文章介绍的是在这三大贡献之外的一项较少为人知的重要贡献:量子不可积相位因子和规范场的积分表示.

**关键词** 不可积相位因子,规范场,整体表述

### ANOTHER GREAT ACHIEVEMENT OF C. N. YANG ——THE QUANTUM NON-INTEGRABLE PHASE FACTOR AND GLOBAL FORMALISM FOR GAUGE FIELD

LI Hua-Zhong<sup>†</sup>

(Advanced Research Center and Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract** It is well-known that C. N. Yang made three great contributions to modern physics. Another of his important contributions is less known but not less important ——the quantum non-integrable phase factor and global formalism for gauge fields.

**Key words** non-integrable phase factor, gauge field, global formalism

2002年10月1日<sup>[1]</sup>是杨振宁教授的80大寿,为杨振宁教授八秩荣庆,北京清华大学于2002年6月17日—19日举行了一次国际学术会议,研讨国际前沿的物理、化学、生物等课题.与会的有全世界诺贝尔奖获得者十余人,国内外参加者近400人,极一时之盛.我在2002年4月《物理》上发表了《规范场理论在中国》<sup>[2]</sup>,也是为杨振宁教授80寿辰而作,论文记述了20世纪70—80年代杨振宁对中国理论物理的巨大影响;而我在会上提出的报告则是记述在杨振宁开辟的方向和研究影响下,我个人和合作者(包括中山大学和国内外的合作者)在1973—1990年期间的工作<sup>[3]</sup>.作为上述两篇记述提供物理知识的基础,我在2001年11月的《物理》上发表了另一篇文章,题目是《量子力学相位因子》,论述量子力学不可积相位因子的物理概念.这三篇文

章浅近地解释了20世纪物理基础理论最主要的发展之一:非阿贝尔规范场理论的发展和杨振宁在这个方向的伟大贡献,以及中国国内学者的研究贡献<sup>[4]</sup>.今天要介绍的是杨振宁教授通常为人所熟知的三大贡献<sup>[1]</sup>之外的另一项重要贡献.

在这里先引述杨振宁教授的几句名言:

(1) 量子化,对称性和相位因子——20世纪物理学的主旋律 (引自杨振宁在中国科学院成立50

\* 同一文章题目的英文稿是作者在庆祝杨振宁80大寿的国际科学前沿研讨会分组会上的报告(2002年6月18日,北京),将发表在新加坡世界科技出版社出版的会议论文集(2003年出版),本文的中文副题虽然相同,但内容有所不同.

2002-11-11收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: puuazc@zsu.edu.cn

1) 杨振宁对物理学的三大贡献是(1)非阿贝尔规范理论(2)杨-Baxter方程(3)弱相互作用之宇称不守恒

周年大会上的学术报告<sup>[5]</sup>)

(2) 局部与整体的关系通过 20 世纪的拓扑学、李群和微分几何的发展变成了数学中的显学。近年来物理学中的整体观念也在多方面有重要的发展 [摘自杨振宁为《简单物理系统的整体性》(李华钟著)所写的序言<sup>[6]</sup>]

(3) 假如今天……问我,你觉得你这一生最重要的贡献是什么?我会说,我一生最重要的贡献是帮助改变了中国人自己觉得不如人的心理作用。”(引自《杨振宁文集》扉页<sup>[7]</sup>)

参考文献中列举的文献 [2—4] 是对应于杨振宁的上列 (1) (3) 两段名言所作的个人理解的注释, 本文就是对第 (2) 段名言的注释。

现在全世界物理学者都知道, 杨振宁是现代规范场理论的奠基者, 这一理论框架是自然界物质相互作用的基础。杨振宁和米尔斯于 1954 年发表的论文<sup>[8]</sup> 是物理学历史上最主要的经典文献之一, 但是有另一篇论文发表于 1974 年, 题目是《规范场的积分表示》<sup>[9]</sup>, 1975 年与吴大峻 (Wu T T) 合作的论文题目是《不可积相位因子与规范场的整体性》<sup>[10]</sup>, 这两篇论文虽然不像 1954 年论文那样著名, 但是它们却掀开了物理基础理论的一页新篇章, 那就是物理现象的整体描述, 应用了拓扑学的重要观念——纤维丛理论。

所谓物理现象的整体 (global) 描述是相对于局域 (local) 描述而言, 从大学的物理学里已经知道和熟悉用微分方程表述物理定律, 描述物理现象和过程。这种微分形式的物理表述方式, 到麦克斯韦已完善。物理学的基本动力学规律表达为微分或偏微方程加上初始条件或边界条件, 相互作用是点接触作用, 通过“场”作用为传播的媒介, 从时空一点传到邻近一点。这是从麦克斯韦以来至今已牢固建立起来的。这就是从一点及其邻近处的局域描述外推及于整体。

但是, 事实上物理世界中有一些现象是不能单纯用这种方式来表述的。例如一个经典的例子是磁单极势。1931 年, 狄拉克已发现不可能用单一个无奇异性的磁单极势在全空间描述磁单极的效应。这些奇异点构成一根曲线, 后来通称为狄拉克弦。吴大峻、杨振宁的规范场整体描述方法, 就是用了纤维丛的拓扑概念解决了这个问题, 得到了用纤维丛这种拓扑学数学工具表述无奇异弦的磁单极势。

物理现象的整体描述其实历史悠久, 下面是一个粗略的年份:

指南车 (South - Seeking Chariot) <sup>[11]</sup>	公元约 300 年 <sup>1)</sup>
傅科摆 (Focault Pendulum) <sup>[12]</sup>	1851 年
狄拉克弦 (磁单极矢势) <sup>[13]</sup>	1931 年
狄拉克不可积相位因子 <sup>[13]</sup>	1931 年
Aharonov - Bohm 效应 <sup>[14]</sup>	1959 年
杨振宁规范场积分表示 <sup>[9]</sup>	1974 年
吴 - 杨磁单极的纤维丛表述 <sup>[10]</sup>	1975 年
Berry 量子几何相位 <sup>[15]</sup>	1984 年
Simon B 关于量子几何相位的拓扑解释 <sup>[15]</sup>	1983 年

20 世纪 80 年代开始的量子场论的弦理论有大量的整体理论工作, 但未能与实验比较。本文不包括这些领域。我们更有兴趣的是能与实验比较, 为实验所证实的物理整体现象。

### 局域 (微分) 描述 + 整体 (拓扑) 描述

#### 物理世界的完整认识

整体的现象有何特点?

(1) 局域无改变而整体有改变的物理量 (global change without local change)。例如, 矢量沿曲面上闭曲线平行移动一周的方向改变, 量子力学波函数的几何相位。

(2) 对路径同伦类 (homotopy class) 和几何敏感的物理量。例如, 量子力学波函数相位, Aharonov - Bohm 效应, 二维全同粒子的分数统计。

(3) 拓扑结构。例如, 磁单极纤维丛结构, 规范场纤维丛结构, 流形上的联络 (connection), 同伦 (holonomy) 与量子几何相位, 二维全同粒子系统的任意子 (anyon), 辫子群 (braid group) 的一维表示, 量子霍尔效应的拓扑量子数, 凝聚态物理中拓扑不变量, 陈类 (chern class) 示性数。

从上述可见, 物理基础理论的一项重要方面是整体性现象, 在这一方向的历史发展过程中, 杨振宁的贡献也是里程碑性的重要贡献, 虽然在现时并不像规范场那样已为人所共知。我相信, 这一方向的研究已经并且将会继续渗透到物理学的各个领域, 是自然界物理描述不可缺少的部分。如果说它也是 21 世纪物理学教学和研究工作者必需的认识, 恐怕不会是夸张和过分的。

### 参 考 文 献

- [1] 杨纲凯. 物理, 2002, 31(4):254 [Young G K. Physics (Wuli), 2002, 31(4):254 (in Chinese)]

1) 即中国历史上的三国时代, 发明人为马钧

- [ 2 ] 李华钟. 物理, 2002, 31(4) :249[ Li H Z. Physics( Wu-li) 2002, 31(4) :249( in Chinese ) ]
- [ 3 ] Li H Z. Quantum Non-integrable Phase Factor and Integral Formalism of Gauge Fields. In : Proceeding of International Conference on Frontier of Science. Beijing, 2002 ; Modern Phys. Lett. , 2002 ,A17 :1995
- [ 4 ] 李华钟. 物理, 2001, 30(11) :668[ Li H Z. Physics ( Wu-li) , 2001, 30(11) :668( in Chinese ) ]
- [ 5 ] 百年科技回顾与展望——中国科学院成立五十周年学术报告文集. 上海 :上海教育出版社, 2001[ Science and Technology Development : A Retrospective View Over the Past Century and a Prospective Look Into the Future. Shanghai : Shanghai Education Publishing Co. , 2001 ( in Chinese ) ]
- [ 6 ] 李华钟. 简单物理的整体性——贝里相位及其他. 上海 :上海科技出版社, 1998[ Li H Z. Global Properties of Simple Quantum Systems——Berrys Phase and Others. Shanghai : Shanghai Science and Technology Publishing House , 1998( in Chinese ) ]
- [ 7 ] 杨振宁文集. 上海 :华东师范大学出版社, 1998[ Collection of Essays by Chen Ning Yang. Shanghai : East China Normal University Press , 1998 ( in Chinese ) ]
- [ 8 ] Yang C N , Mills R L. Phys. Rev. , 1954, 96 :191
- [ 9 ] Yang C N. Phys. Rev. Lett. , 1974, 33 :445
- [ 10 ] Wu T T , Yang C N. Phys. Rev. , 1975, D12 :3845
- [ 11 ] Santanden M. Am. J. Phys. , 1992, 60 :782
- [ 12 ] Berry M V. Phys. Today , 1990( 12 ) :34
- [ 13 ] Dirac P A M. Proc. Roy. Soc. ( London ) , 1931, A133 :60
- [ 14 ] Aharonov Y , Bohm D. Phys. Rev. , 1959, 115 :485
- [ 15 ] Berry M V. Proc. Roy. Soc. ( London ) , 1984, A392 :45
- [ 16 ] Simon B. Phys. Rev. Lett. , 1983, 51 :2167

· 物理新闻与动态 ·

## 美欧专家论述肿瘤放射治疗技术的进展

美国斯坦福大学医学院放射肿瘤学系放射物理部主任 Boyer , 哈佛医学院荣誉教授 Goitein , 瑞士 Paul Scherrer 研究所物理学家 Lomax 和 Pedroni 联名发表文章论述肿瘤放射治疗技术的进展。

X 射线发现后几个月 , 它就被用于乳腺癌的治疗 , 以后又利用质子、中子、轻离子( 碳等 ) 进行放射治疗。目前使用得较多的是峰值能量在 15MeV 的 X 射线和 200MeV 的质子。放射剂量用人体质量沉积的能量表示 , 其单位是 Gray , 1Gy = 1J/kg。X 射线在路程上以近似指数函数不断衰减 , 质子则在一定深度内( 和质子能量有关 ) 提供剂量。X 射线在最初的几个毫米范围内音量较低 , 因为在这里还没有二次电子的大量积聚。

放射治疗的关键是 : 剂量集中在肿瘤体积内、同时使周围的正常组织能够忍受。对深部肿瘤来说 , 单一方向的 X 射线照射将使肿瘤前组织难以忍受 , 因此需要采取多方向交叉照射的大型装置。

放射治疗专家一般认为 : 肿瘤体积内的剂量应尽可能均匀 , 但对于近旁有敏感正常组织的肿瘤部分需要适当降低剂量。受到计算机层析( CT ) 的启发 , 十几年前 , 几位专家( 包括文章最后一位作者 ) 独立地提出 , 历史上采用的截面内均匀射线束应该被很不均匀的射线束代替 , 并通过计算达到上述目标。不仅如此 , 专家们还在研究肿瘤和正常组织的剂量响应方面的生物物理模型 , 以获得最佳方案。

对于质子等带电粒子放射治疗来说 , 还可以改变它的能量 , 以得到不同剂量 - 浓度分布函数。

Physics Today 2000 年第 4 期第 25 页、1996 年第 5 期第 34 页、1993 年第 7 期第 36 页和 1983 年第 7 期第 26 页上的文章可以参阅。

( 吴自勤编译 )

## 致歉启事

2001 年 10 月《非线性光学——原理与进展》一书( 钱士雄、王恭明编著 , 复旦大学出版社 ) 出版和发行后 , 我们发现书中有不少错误 , 谨在此向读者表示深深的歉意。近悉出版社又增印了 2000 册 , 为了帮助读者顺利阅读该书 , 我们已制订了一份勘误表。需要的读者可通过 E - mail : sxqian@ fudan. ac. cn 或 gmwang@ fudan. edu. cn 与我们联系 , 以电子邮件或邮寄方式索取该表。

我们诚恳地欢迎读者对本书提出中肯批评和修改意见。

( 钱士雄 王恭明 复旦大学物理系 上海 200433 )