



量子场论 引言

王青

清华大学

2024年9月2日-12月20日



课程安排

教材与书

教学大纲

量子系列课

量子场论在现代物理学中的地位

历史

现状

未来



教材与书

Volume III Supersy

THE
QUANTU
THEORY
FIELDS

STEVEN WEIN

量子场论

第3卷

CAMBRIDGE
世界图书出版公司

Volume II Modern Ap

THE
QUANTU
THEORY
FIELDS

STEVEN WEIN

量子场论

第2卷

CAMBRIDGE
世界图书出版公司

STEVEN WEINBERG

THE
QUANTUM
THEORY OF
FIELDS

Vol. 1 Foundations

量子场论

第1卷

CAMBRIDGE

世界图书出版公司
www.wpcbj.com.cn



- ▶ **《The Quantum Theory of Fields》 Volume I <Foundations>**
Steven Weinberg(1995)
- ▶ **《Field Theory: A Modern Primer》** Pierre Ramond(1981)
- ▶ **《An Introduction to Quantum Field Theory》**
Michael E.Peskin, Daniel V.Schroeder (1995)
- ▶ **《Quantum Field Theory》**
Claude Itzykson, Jean-Bernard Zuber(1980)
- ▶ **《Quantum Field Theory and Critical Phenomena》**
Jean Zinn-Justin(Third Edition1996)
- ▶ **《Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics》**
Alexei M.Tsvelik(1995)
- ▶ **《Particles and Fields》** David Lurie(1965)
- ▶ **《Relativistic Quantum Fields》** James D.Bjorken, Sidney D.Drell (1965)
- ▶



数学大纲

年度 Year	2024																		2025	
月份 Month	八月 (Aug.)	九月(Sep.)			十月(Oct.)				十一月(Nov.)			十二月(Dec.)				一月(Jan.)				
周次 Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
星期一 (Mon.)	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6
星期二 (Tues.)	27	3	10	17 中秋节	24	1 国庆节	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7
星期三 (Wed.)	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1 元旦节	8
星期四 (Thur.)	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9
星期五 (Fri.)	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10
星期六 (Sat.)	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	1
星期日 (Sun.)	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	

2025年1月12日课程结束;



教学大纲

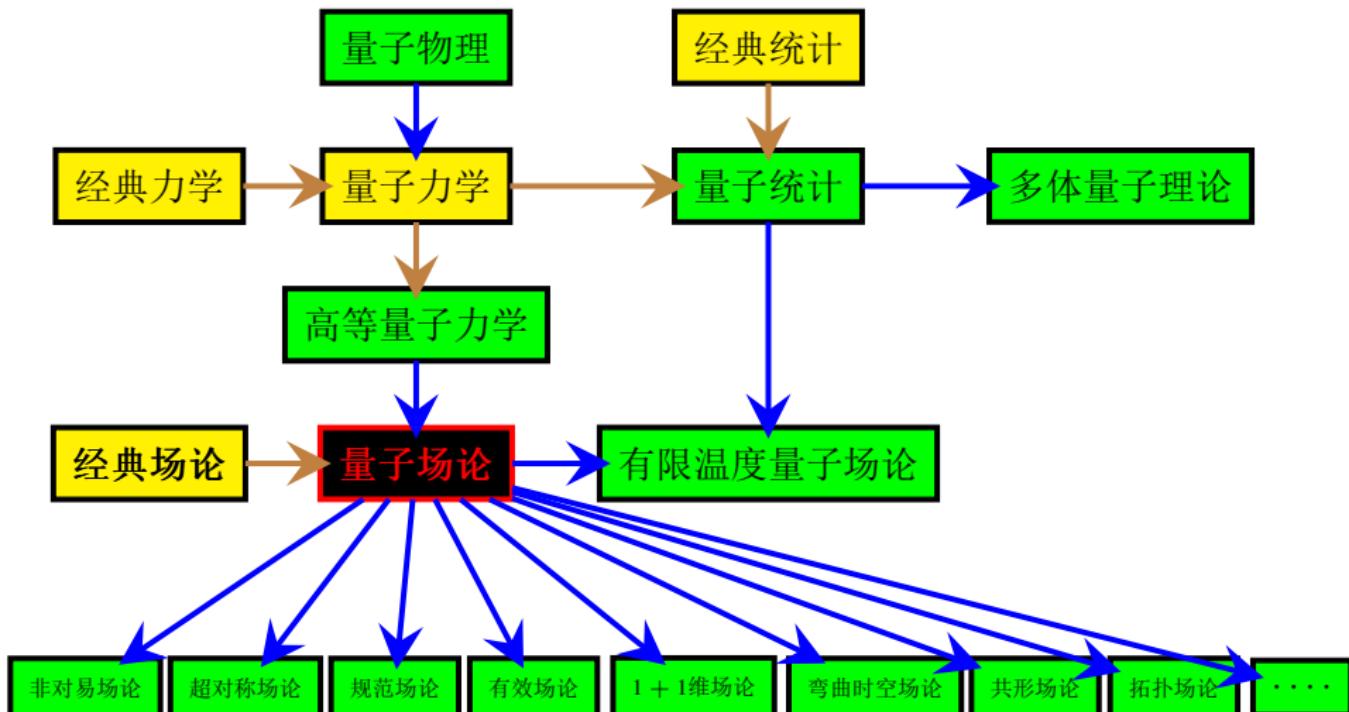
- ▶ **量子力学与狭义相对论** 引言一次(1)+四次：量子力学基本原理与希尔伯特空间，对称性(群论ABC,对称性表示,连续对称性)1，狭义相对论基本原理与非齐次洛伦兹变换(狭义相对论,态矢量的洛伦兹变换)4，单粒子态按非齐次洛伦兹变换和内部对称性变换分类(时空平移,时空转动,有质量正能单粒子态,无质量正能单粒子态,空间反射,时间反演, $U(1)$ 内部对称性变换)4,7
- ▶ **自由量子场, 粒子与反粒子** 七次：多粒子态,玻色子与费米子(多粒子态,玻色子与费米子)7,进态、出态与S矩阵(进态和出态,S矩阵,S矩阵的微扰展开,反应率与碰撞截面)8,量子场(产生与湮灭算符,产生与湮灭算符在坐标空间的表达,平移,推进与转动)8,标量量子场(反粒子的引入,标量场的分立对称性变换性质,自由标量场的场方程、哈密顿量和作用量、正则对易关系)9,旋量量子场(γ 矩阵,费米统计,旋量场的分立对称性变换性质,自由旋量场方程、哈密顿量和作用量、正则反对易关系)9,矢量量子场(按自旋分类,矢量场的分立对称性变换性质,自由矢量场的场方程、哈密顿量和作用量、正则对易关系)10,任意自旋量子场(非奇次洛伦兹群一般不可约表示、有质量、无质量、分立变换)10
- ▶ **相互作用、格林函数与路径积分** 四次：约化公式和格林函数的极点(绘景及Wick定理,约化公式,格林函数极点)11,路径积分(量子场算符本征态矩阵元,时间演化算符矩阵元,波函数)11,格林函数与顶角生成泛函(玻色场,费米场,拉格朗日体系)12, $\lambda\phi^4$ 理论与四费米理论($\lambda\phi^4$,4费米理论)12
- ▶ **量子电动力学** 三次+小结一次(14)：理论基础(拉格朗日量,生成泛函与微扰论,格林函数的相互关联)13,一圈图(光子传播子,费米子传播子,相互作用顶角)13,重整化(关于重整化的一般分析,一圈图的重整化,跑动耦合常数)14,基本物理过程与物理量(基本物理过程, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$,电子磁矩)14



教学大纲

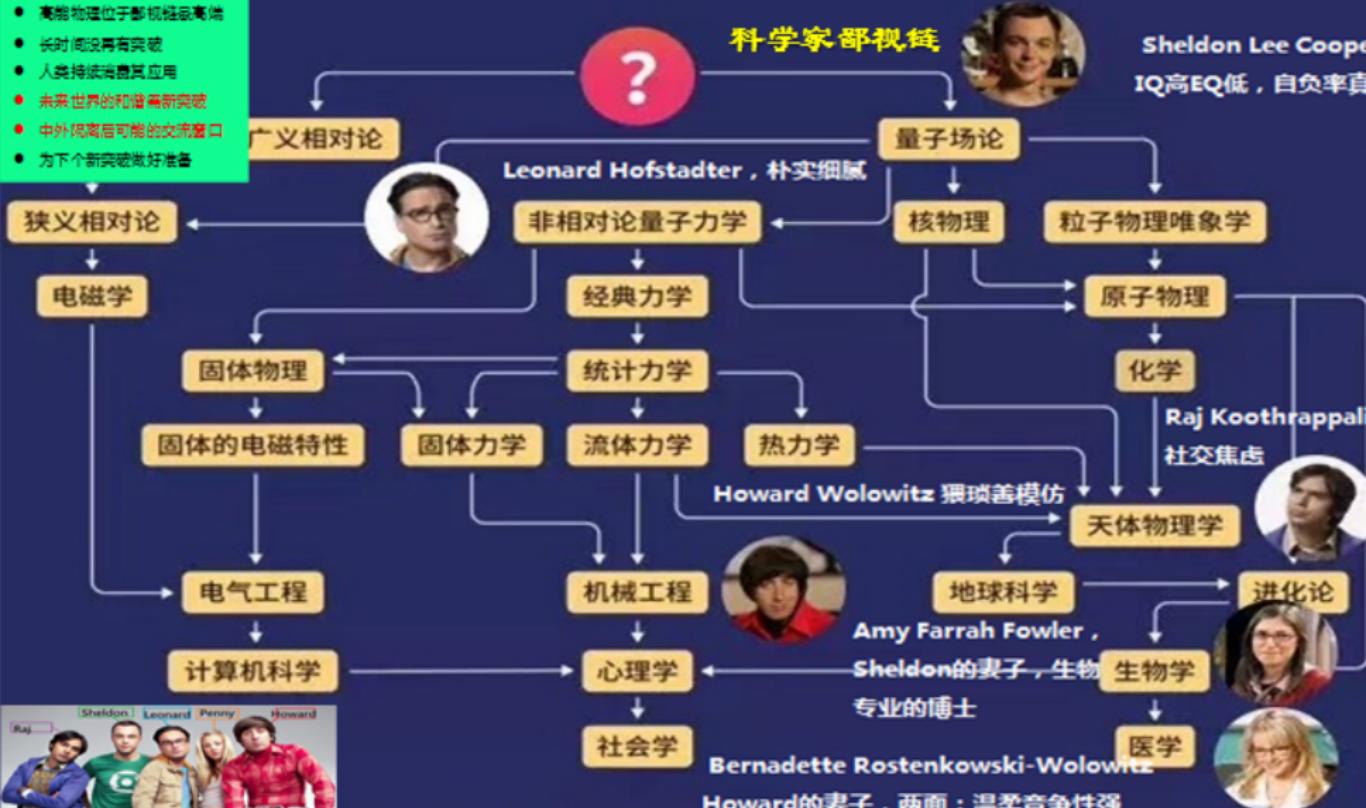
作业、助教、答疑、考试

- ▶ 2011年教案、A.Zee课笔记、李靈峰notes已放到班级微信群里，pdf格式.
- ▶ 第一、二、三章有作业，作业题也已放到班级微信群里
作业可做可不做；可交可不交；交要用Latex编辑电子文件发给老师。
量子场论的建立需要大量的推导和演绎，这些工作一部分将作为正文讲授，另一部分作为作业。
- ▶ 教案上只有公式，翻译和解释在视频里给出，必须通过预习加课堂上讨论和记录及作业和自己思考
- ▶ 教师联系方式: 13910565577
wangq@mail.tsinghua.edu.cn 需答疑或讨论,请单独联系
- ▶ 助教: 唐寅, 15956325166, tangyin@westlake.edu.cn
- ▶ 鼓励同学们对课程学习中碰到的问题进行深入研究.如某课题十分深入,可单独写小论文
- ▶ 对指出教案中的错误的同学可以适当奖励！
- ▶ 无期中考试，期末考试时间待协商，方式：小论文加答辩答辩后提交论文电子版和答辩PPT
- ▶ 小论文题目考试前一个月发布，每人选一题不能重叠；可自选，需老师批准





- 高能物理位于鄙视链最高等
 - 长时间没有再突破
 - 人类持续需要其应用
 - 未来世界的和谐离不开突破
 - 中外脱钩后可能的交流窗口
 - 为下个新突破做准备



王青



对量子场论的感觉：



美妙无比



高深莫测



极其复杂



莫名其妙



没有定义



自从海森堡和泡利关于一般量子场论的论文 **W.Heisenberg and W.Pauli, Z.f.Phys.56,1(1929);ibid 59,168(1930)** 发表起:

传统的量子场论介绍体系

- ▶ 依赖于对电磁学的场论经验, 承认场的存在
- ▶ 将正则或路径积分量子化的规则应用于各种简单的场论

优点

- ▶ 高效率的尽快接近量子场论的核心主题
- ▶ 实用性, 会算

留下太多的问题: 学了量子场论, 甚至多年工作在需要应用量子场论的领域的人经常会疑问的问题

- ▶ **为什么是这个样子? 为什么如此复杂? 是否存在更简单的表述?**
- ▶ **为什么要承认和相信应该有场论书中所提的那些场?**
- ▶ **粒子为什么要有自旋?**
- ▶ **为什么我们要相信正则或路径积分量子化的规则?**
- ▶ **为什么我们要承认简单的量子场方程或文献中给出的拉氏量?**



理论物理的目的不仅仅是描述我们所发现的世界，还需要依赖少数基本原理去解释为什么世界是它现在这个样子

亚里士多德充满神性的第一性原理

在每个系统探索中存在第一性原理。

第一性原理是基本命题和假设，不能被省略和删除，也不能被违反。

第一性原理的代表：欧几里得的 五条公设

1. 任意两个点可以通过一条直线连接
2. 任意线段能无限延伸成一条直线
3. 给定任意线段，可以以其一端点作为圆心，该线段作为半径作一个圆
4. 所有直角都全等
5. 若两条直线都与第三条直线相交，并且在同一边的内角之和小于两个直角，则这两条直线在这一边必定相交

第一性原理代表人物：[张首晟](#)—以简驱繁，回溯本真；[马斯克](#)—拨开表象看本质，从本质一层层往上走



理论物理的目的不仅仅是描述我们所发现的世界，还需要依赖少数基本原理去解释为什么世界是它现在这个样子

利用公理体系 二十世纪物理学的两项最重大发现：希尔伯特23问中的第6个问题—物理学的公理化

► 量子力学

► 狹义相对论

以Wigner把场的量子(粒子)定义为非齐次洛伦兹群的表示作为出发点：

► 量子力学规定场量子的粒子性 粒子（量子）与波动（场）的统一：波粒二象性

► 狹义相对论的非齐次洛伦兹变换确定这些粒子的分类 相对论量子场
自然和谐地结合量子力学与狭义相对论

课程讲授思路：

► 从量子力学与狭义相对论的 5条基本假设 演绎出所有结论

可能要引入部分实验结论

► 前半段强调基础(理解),后半段强调技术(会算).

► 需要大量的演绎和推导 归纳与演绎

建议不准备花大量时间和精力进行深入思考和复杂演绎的同学不要坚持学此课（三阶段：今天；第一章；第二章）！



量子场论诞生之前,描述物质及其相互作用的理论:

- ▶ 描述波动的理论-经典场论 麦克斯韦经典电磁场理论; 广义相对论
- ▶ 描述粒子的理论-量子力学

波动理论

- ▶ 引入法拉第提出的场的观念: 充满并弥漫在空间的场作为波的载体, 它随时间的变化导致了波动.
- ▶ 为满足相对性原理, 并且与光速不变的事实相符合, 爱因斯坦提出了描述基本相互作用的波动理论必须满足的狭义相对论.

它不能描述波的粒子性. 而对电磁波, 光电效应实验显示出光所具有的粒子性.

粒子理论

- ▶ 经典力学 $\xrightarrow{\text{量子化}}$ 量子力学
- ▶ 粒子不同时具有确定位置和动量, 由德布罗意提出的几率波描述

如果将波函数看成是经典场, 量子力学可被看成是一种经典场论, 似乎描述粒子和波的理论都被统一到经典场论的框架下来进行描述



经典场论对物质世界的波和粒子的描述并不是完备的

光波的粒子性在经典场论的体系中并没有得到体现

波动理论中经典场不具有量子力学波函数作为几率幅的物理诠释

量子力学与狭义相对论简单地结合起来的相对论量子力学不完备：

► **负能问题:** $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \Rightarrow E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$

- 经典物理中假定只有带正能量的是物理粒子。正能解和负能解之间有很宽大的能隙，没有连续过程可以把粒子从正能移到负能态。
- 相对论量子力学中的电子辐射相互作用可使电子通过辐射两个光子实现从正能到负能态的跃迁。

为什么物质是稳定的？ \Rightarrow “空穴理论”：存在无穷大几乎被充满了的负能电子海，泡利不相容原理

禁戒多于一个电子占据同一状态，正能电子由此禁戒落入负能态。负能电子海少数空穴态的行为就像具有相反量子数（正的能量和正的电荷）的粒子一样，由此预言了反粒子被以后安德森发现的正电子所证实。

- 由无所不在的负能电子的无穷大电荷密度所导致的电场在哪？狄拉克选择将麦克斯韦方程组中的电荷密度翻译成对世界上正常带电态的偏离。
- 空穴理论只适用于解决费米子体系的负能困难，对玻色子体系中的负能困难仍无能为力。

► **粒子数不守恒问题:** 相对论量子力学 \Rightarrow 粒子数守恒 \Rightarrow 无法描述粒子数不守恒的物理过程

► **负几率问题:** 波函数解释为“几率幅”导致负几率问题 \Rightarrow 狄拉克方程 量子场论中波函数不被看成“几率幅”，而只是描述粒子的产生与湮灭的各种模式的场算符。从量子力学到量子场论，不仅是对波函数的量子化，还必须放弃原来的物理诠释。只把它看成普通的场。通常称之为“二次量子化”的提法是不妥当的！

所有这些问题通过对经典场论中的“经典场”进行“量子化”而得到解决！



经典场论对物质世界的波和粒子的描述并不是完备的

光波的粒子性在经典场论的体系中并没有得到体现

波动理论中经典场不具有量子力学波函数作为几率幅的物理诠释

量子力学与狭义相对论简单地结合起来的相对论量子力学不完备

所有这些问题通过对经典场论中的“经典场”进行“量子化”而得到解决！

传统的量子场论—量子化相对论协变的经典场： 从波到粒子

- ▶ 为什么要假设场？
- ▶ 为什么要有标量场、旋量场、矢量场.....？
- ▶ 场方程是怎么来的？

我们要讲的量子场论—量子力学+相对论： 从粒子到波

- ▶ 出发点是量子力学的态，它既可以是波也可以是粒子！
- ▶ 用洛伦兹变换生成元的本征态定义粒子态，粒子的分类既群表示的分类
- ▶ 粒子产生湮灭算符在坐标空间体现为量子场，质壳条件化为自由场方程



现状

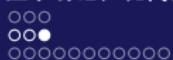
作为将量子力学和狭义相对论结合在一起的理论，量子场论所取得的成就：

- ▶ 波与粒子被自然地以场的概念为基础统一在一起. 场是物质世界的基本组分:波是其运动和变化;粒子是其激发,给出了对粒子 及其全同性 的诠释.
- ▶ 克服了相对论量子力学中的负能、负几率和粒子数不守恒等问题.
- ▶ 加上因果性的要求,可以自然地导出自旋与统计的关系.
- ▶ 可以解释除引力外目前几乎所有观测到的实验现象, 并给出像轻子反常磁矩和兰姆位移等目前人类所能达到的与实验相符最精确的理论预言.
- ▶ 在量子场论框架下建立的粒子物理的标准模型给出了强、弱和电磁作用的统一的描述, 并且与实验符合得很好.
- ▶ 除引力外的基本相互作用目前都通过规范原理来引入, 它要求传递相互作用的规范粒子为零质量的自旋为1的粒子. 而在量子场论框架下, 零质量的自旋为1的粒子满足规范原理是相对论的必然要求.
- ▶ 加入相互作用后,有可能产生”非粒子”

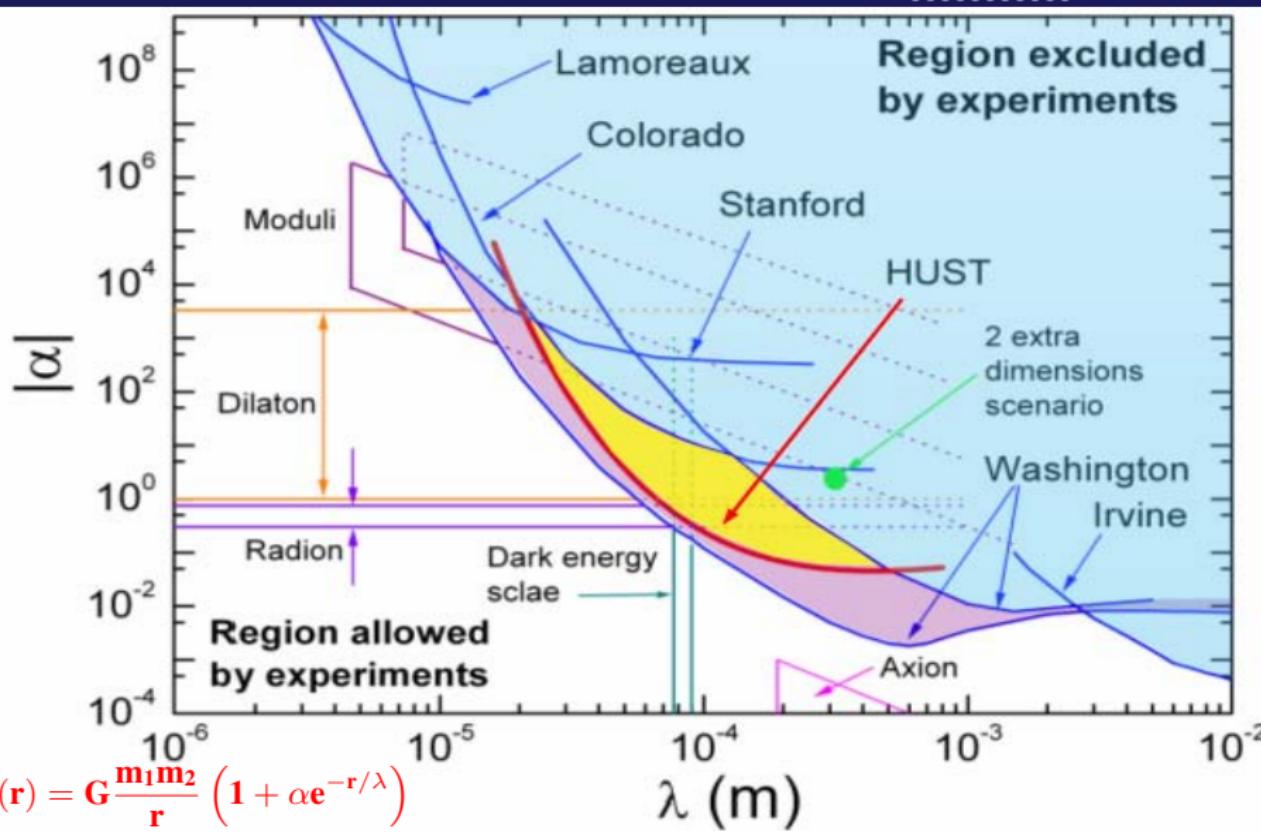


量子场论碰到的困难：

- ▶ **发散困难**: 紫外发散; 红外发散; 共线发散; … 紫外发散本质上由对更深层次的物理的无知导致。一类称之为可重整的量子场论对更深层次的物理是不敏感,更深层次的物理效应在理论中可以被吸收到理论参数的重新定义之中。而不可重整的量子场论对更深层次物理比较敏感, 要求理论可重整既可以被看成是对理论简单性的一种要求,也可以看成是对不同层次的物理之间的弱关联的要求。量子场理论的可重整性目前已经成为基本相互作用理论所必须满足的基本条件之一。
- ▶ **计算困难**: 非微扰效应。 目前比较有效的只有微扰论, 它依赖于存在小的展开参数。当不存在小的展开参数时, 微扰论的计算不再可靠。目前还没有非常有效的解析地处理非微扰效应的方法。将量子场论放到分立的格点上, 利用计算机进行数值计算是目前人们主要依赖的非微扰计算方法。
- ▶ **引力困难**: 引力的量子理论至今未能成功建立, 量子引力理论目前仍不可重整。 由于引力直接关联和影响时间和空间的结构, 引力的量子理论不可重整也许反映人类对很小尺度区域的时空结构的无知, 同时也指引着人们对小尺度区域的时空结构的探索。传统上人们相信引力的效应只到普朗克尺度 $10^{19} GeV$ 或 $10^{-33} cm$ 才起作用, 但仔细的考察发现实际上目前并不存在对小于1mm的引力效应的实验证, 因此还存在在比较低的能量尺度或比较大的空间尺度, 引力就开始起重要作用的可能性!



现状





量子场论是唯一将量子力学和狭义相对性原理和谐地结合在一起的方式!

温伯格的观点 S. Weinberg: Physica, 96 A, 327 (1979)

Folk theorem: any quantum theory that at sufficiently low energy and large distances looks Lorentz invariant and satisfies the cluster decomposition principle will also at sufficiently low energy look like a quantum field theory !

尽管存在问题，量子场论是最重要的物理理论体系

任何一个相对论性的量子理论在足够低的能量和足够大的距离下都将以量子场论的形式出现(低能 \neq 低速). 无论更深层次或更高能量下的基本相互作用理论以什么形式出现, 只要它是量子理论并且满足狭义相对论, 它在我们目前所观测到的范围都将表现为量子场论. 量子场论在此意义上是狭义相对论和量子力学结合的必然产物. 同时, 它也指明: 我们现在在量子场论框架下建立的所有描述物质世界基本相互作用的理论都应该只是某种有效理论, 它只是那些也许不是以量子场论形式出现的更基本的相互作用理论的低能有效场论. 存在一个特征的尺度或能量标度, 当小过这个特征尺度或高过特征能标时, 现在用的有效场论不再适用, 只有更基本的相互作用理论才能起作用.



量子场论本身还有很大的发展空间！

已有很多理论反对量子场论作为一个基本理论

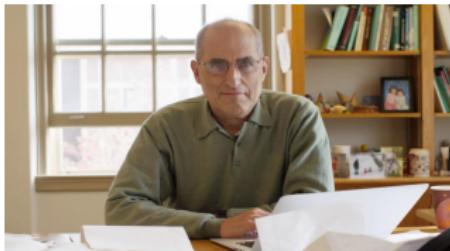
背后的基本理论可能不是一个场或粒子的理论，而是一种相当不同的东西，如弦的理论。按这种观点，量子电动力学和其它我们引以为自豪的量子场论，仅仅是某种更基本理论的低能有效场论。我们所用的场论工作的很好并不是因为他们是基本的真理，而是因为任何相对论性量子场论当被应用到足够低能量的粒子时都表现为场。

大量的尚未解决的问题和基本理论的未知为量子场论提供了巨大的发展空间

很多常年未能得到解决硬骨头问题，随着人类掌握的数学和物理知识的增加和计算机技术的快速发展，相信在未来都会得到解决。另一方面，天文观测和宇宙学的最新发展告诉我们，我们现在用量子场论所描述的宇宙间的物质最多只占宇宙总成分的4%,剩下那么大比例的物质是否能用现有的量子场论描述？如果可以，应该怎样描述？这些都是未来量子场论可以大大发展的方面。

量子场论的重要性：

- ▶ 现代粒子物理的基础
- ▶ 对相对论效应不重要的物理领域,量子场论的结论可作为研究的出发点
- ▶ 为核物理、原子物理、凝聚态物理和天体物理提供了必要的研究方法
- ▶ 为物理和数学之间的密切联系建立了桥梁



A Physicist's Physicist Ponders the Nature of Reality
Edward Witten reflects on the meaning of dualities in physics and math, emergent space-time, and the pursuit of a complete description of nature.

[Jean Sweep](#) for Quanta Magazine

November 28, 2017

I'm not certain what we should hope for. Traditionally, quantum field theory was constructed by starting with the classical picture [of a smooth field] and then quantizing it. Now we've learned that there are a lot of things that happen that that description doesn't do justice to. And the same quantum theory can come from different classical theories.

Now, [Nati Seiberg](#) would possibly tell you that he has faith that there's a better formulation of quantum field theory that we don't know about that would make everything clearer. I'm not sure how much you should expect that to exist. That would be a dream, but it might be too much to hope for; I really don't know.

There's another curious fact that you might want to consider, which is that quantum field theory is very central to physics, and it's actually also clearly very important for math. But it's extremely difficult for mathematicians to study; the way physicists define it is very hard for mathematicians to follow with a rigorous theory. That's extremely strange, that the world is based so much on a mathematical structure that's so difficult.



未来

Duality

$$H = \frac{1}{2m} p^2 + \frac{k}{2} q^2$$

$$q \rightarrow \frac{p}{\sqrt{mk}} \quad p \rightarrow -\sqrt{mk}q$$

Small fluctuations in $q \leftrightarrow$ large fluctuations in p

Small fluctuations in $p \leftrightarrow$ large fluctuations in q



2+1维电磁场对偶于自由标量场：

$$F_{\mu\nu} \sim \epsilon_{\mu\nu\rho} \partial^\rho \phi$$

3+1维电磁场具有电磁对偶：

$$F_{\mu\nu} \sim \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \tilde{F}^{\rho\sigma}$$

$$E \sim \tilde{B}, \quad B \sim -\tilde{E}$$

- 3+1维N=4超对称理论中的规范群G和耦合强度 α 对偶于 另一个规范群G' 和耦合强度 $1/\alpha$
- 1+1维的玻色化：费米子理论等价于玻色子理论
- 2+1维有质粒子耦合到Chern-Simons规范场可实现玻色子和费米子的自旋统计的相互转化

严格的对偶性

红外对偶性

- 3+1维QCD随夸克味道数不同可以是：红外自由、准自由、标度不变、empty theory-gap 拓扑序
- N=1超对称的电理论G和磁理论G' 具有相同的非平庸红外固定点，甚至可以红外近似自由
- 2+1维无质费米子和无质玻色子分别耦合到规范场的两个理论具有同样的非平庸红外固定点
- 2+1维的一些相互作用玻色子耦合到规范场的理论在红外变成无质量的自由费米子理论

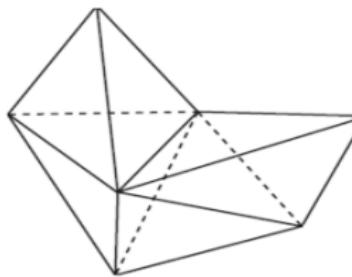


未来

What happens during the scattering process of elementary particles?

振幅可以约化为
某个辅助空间的
积分因而是体积

散射振幅 几何化！



颠覆传统量子场论计算原则！

整数

\cap

有理数 \subset 实数

代数数 可数 \cap 超越数 不可数

有理系数方程解 定义

周期 通常是超越数，但可数

通过定积分定义 \cap

复数

$$\sqrt{2} = \int_{2x^2 \leq 1} dx$$

$$\pi = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} dx dy$$

at least in a specific case....

量子场论是否需要重塑：

- ①是否仍需以拉氏量为基础？
- ②数学上不严格
- ③向非局域推广



王青



关于在量子场论中相对论的地位的争论：

我某资深老师对量子场论的认识

量子力学的基本概念是物质的波粒二象性，这一点已为许多实验所证实，包括各种各样的复合粒子，及Bose-Einstein凝聚体这样的宏观量子体系。

DeBroglie和Schrodinger的量子力学回答了给经典粒子赋予波动性问题，而量子场论回答了给经典波动赋予粒子性的问题。这是一枚硬币的两个面。二者相结合给出了波粒二象性的完整含义。事实上，量子场论的建立使量子力学回到了它的最原始的出发点：Planck的光量子假说那里，而那个假说比相对论早5年。所以，相对论不是量子场论的不可或缺的物理基础。



未来

关于在量子场论中相对论的地位的争论：

我某资深老师对量子场论的认识续

Weinberg书毫无疑问是对相对论性量子场论最完美的阐述，但在我看来，强调”任何场论模型都是有效理论”也是该书的意图之一，而这恰好为其它的物理分支（比如凝聚态物理）利用量子场论留出了空间。

总之，在”量子场论”这门课中突出相对论的作用和地位，是值得商榷的！

我的回答：

你说的这些都是对的，但我想强调的是，在场量子理论中放弃狭义相对论的代价是要作出种种不那么自然或好像挺牵强的假设，而在相对论的物理基础上看这些假设是那么的自然、和谐与优美，因为我们完全可以从相对论和



我的回答续:

量子力学的结合推导出它们. 甚至连您喜欢的”任何场论模型都是有效理论”的结论都必须在相对论和量子理论的联合要求下才能成立。量子场论本来就是既适用于高速也适用于低速的理论，它能够应用于凝聚态问题也是很自然， 并不值得惊奇的事情。我在”量子场论”课的前一小半所做的基本是按照我很欣赏的Weinberg书的前言中的一段话来做的：“....I aim to present quantum field theory in a manner that will give the reader the clearest possible idea of why this theory takes the form it does, and why in this form it does such a good job of describing the real world.”



我的回答续:

就我这些年听到的和我自己的实践教学经验看，很多非粒子专业或以后并不打算搞粒子的同学因为这些内容更增加了对量子场论的兴趣，因为他们除了学到了场理论的计算技术还体会到了场论的优美，特别是知道了为什么。在这些同学中做得比较好早的如许岑柯，最近的如张剑、王靖等。

对我回答的回答：

你所说的我有些地方同意也有些地方不同意，但是要再说下去就涉及太多的问题了，恐怕我们的共识会越来越少。

所以，不如我们就此打住，各自保留自己的意见吧。



FAST

Rocketship near lightspeed,
no need for QM

The marriage of quantum
mechanics & special
relativity

SLOW

Classical physics

Slow moving electron
scattering off a proton, no
need for special relativity

BIG

实际是看 \hbar

SMALL

人的尺度~1米~ 1.97×10^{-7} eV; 原子尺度~ $1\text{\AA} = 10^{-10}$ 米=0.1纳米~1.97keV; 质子尺度, 电子经典半径~1费米= 10^{-15} 米~197MeV

In the peculiar confluence of special relativity & quantum mechanics a new set of phenomena arises: particles can be born & particles can die.

A new subject in physics, quantum field theory, is needed to describe birth & death, & some kind of life in between.



未来



三生三世十里桃花

生死轮回将正是量子场论所特别关注之事！

王青

清华大学