

# 凝聚态物理学中的量子场论 (第一版)——前言翻译

Alexei Tsvelik

写这本书的目的是为了让读者了解量子场论的最新进展。这本书其实主要面向凝聚态物理学家，但是我希望其他领域的物理学家也对此感兴趣。量子场论在过去的十五年中已经得到了极大的发展且其语言和风格也发生了改变。不幸的是，对于大多数的研究生和博士后，甚至那些没有直接参与这个改变进程的研究员来说，量子场论中快速发展的成果仍然是遥不可及的。在凝聚态圈中，这种文化上的落差阻碍了人们之间的思想交流。唯一可以减小这种落差的方法就是尽可能多的出版一些包含这些新进展的书。一些好的书已经出现，我在书末的参考文献中已将它们引用。然而研学过这些书后我发现这里仍有我可以发挥余热的空间。我在写作这本书的时候尽量使其简单，且已将理论形式体系的数量减少到最小。还要再补充一句，为了让新手的生活不那么痛苦，我将用路径积分和费曼图这些传统的主题作为我们讨论的开始。然而，我这样做是假定读者已经熟悉了这些主题，相应的章节是作为这些内容的一个回顾。我推荐那些刚入门这一领域的读者在看本书的同时也看一看量子场论的一些导论课程。这种课有很多，比如其中有由阿布留科索夫，戈尔科夫和加洛辛斯基创作的长青作品。我极力推荐这本我曾经受训的书。

为什么要学习量子场论？我相信对于凝聚态物理学家还有其他领域的物理学家，学习这一课题有几个原因。第一是量子场论为我们的研究提供了精妙且有力的工具。用这些工具所取得的成果是不计其数的；对于任何一个正統的理论学者，学习这其中的奥妙是其成功的关键。第二个原因是这些工具非常的优雅和漂亮。这样一来人们将陶醉在研究的过程之中。我不认为这种美是一种偶然的巧合；我坚信科学中的美学标准同经验主义领域的美学标准同等重要。美和真理不能分开，因为“真理产生美”(弗拉基米尔·索洛维耶夫)。这一信念有科学史作为强有力的支持：所有伟大的物理理论都是如此之美。比如，爱因斯坦公开承认在构建广义相对论的时候美学的思考发挥了很重要的作用，而在构建这一理论时实验的支持非常之少。爱因斯坦绝不孤独，我建议读者去读维尔纳·海森堡的哲学论文，他在物理学领域的权威性不容置疑。美学研究的是形式；因此，在量子场论中感受到一丝几何的味道是绝不奇怪的：比如，真空存在于空白的空间却有某些对称性，即真空有与它相联系的几何图形这一观点。接下来我们有不止一次的机会去讨论这个特殊的题目并且去理解几何构建在物理模型的行为中扮演了很重要的一个角色的这一事实。

学习量子场论的第三个原因与前两个原因有联系。量子场论具普适性。这一语言在我们这个时代扮演了一个统一的角色，如同拉丁语在牛顿和莱布尼兹时代所起的作用。学习它等价于学习文字。这绝不夸张，量子场论的方程既描述了磁性金属中的相变和早期宇宙，又描述了夸克的行为和细胞膜的涨落；人们用这个语言可以同样好的描述经典和量子系统。后者的特征是十分重要的。从一开始，我将从计算的观点使大家清楚量子场论和经典统计力学没有任何区别。这两个科目都可以在一个相同的框架下去讨论。因此在接下来的每一处，我将会把量子场论和统计力学统一缩写成 QFT。这个语言帮助我们<sup>1</sup>

一沙一世界  
一花一天堂  
把无限握于手掌  
永恒不过是刹那时光

到目前为止，我希望上面的讨论能充分地激励读者为以后的工作而努力。因此我现在将转而去说一些不那么激动人心的内容。让我们现在开始讨论这本书的内容。本书的一个目标是为了让读者去解决凝聚态物理中未来的一些问题。这些问题比过去那些更加难以处理，所有简单的问题已经被解决完了。剩下都是难的，不过却很有趣。

---

<sup>1</sup>威廉·布雷克，天真的预言

在 QFT 中最有趣, 最重要和最复杂的问题是关于强相互作用系统的. 事实上, 在过去的十五年中大多数的发展都是在这一领域. 一个被人们熟知且相关的问题是量子色动力学 (QCD) 中的夸克禁闭. 据我所知, 这个问题仍然没有解决. 一个不那么被熟知的问题是在金属-绝缘体转变附近的金属中的强关联电子. 这后一问题与高温超导问题密切相关. 强相互作用问题不能用传统的微扰论方法去解决. 然而这不意味着学习传统的方法没有必要. 相反, 对简单问题没有一个彻底的认识, 复杂的问题是不可能被解决的. 因此本书的第一部分将致力于讨论 QFT 的路径积分公式和费曼图展开这些传统的方法. 然而, 读者不应该从这本书里去学习这些方法. 正如我之前所说, 有很多讨论这些传统方法的书籍, 本书第一部分的目的是不是作为它们的替代品, 而是让读者回忆起他们在别处学过它们. 因此我将相当简略地讨论传统方法, 且主要是针对这些方法关于非微扰应用的方面.

本书的总体规划是想展示强相互作用是如何在 QFT 的各个部分中产生的. 我没有很细地讨论所有现存的凝聚态理论; 我略去了局域化理论和量子霍尔效应, 重费米子理论也只是被简单地讨论了一下. 唉, 人们不可能接受不可预知的事物! 尽管我没有讨论所有相关的物理模型, 但是我确实确实讨论了所有可能的重整化图景: 只有三个. 第一个, 在一个裸的多体哈密顿量的水平上相互作用可能是很大的, 但是对于低能激发而言相互作用则有效地为零. 这发生在  $3+1$  维量子电动力学和费米液体中, 在费米面上准粒子之间的散射仅改变它们的相位 (向前散射). 另一种可能性是相互作用在裸的水平上是弱的, 但对于低能则变得更强, 这导致在低能区产生一个很大的变化. 这种类型的理论被描述为所谓的渐近自由理论; 其中有 QCD, 有描述导带电子被金属中磁性杂质散射的理论 (特别是安德森模型和  $s-d$  模型), 二维磁体模型, 等等. 第三个图景将我们引向临界行为. 在这种情况下, 准粒子之间的相互作用是有限的. 这种情况发生在二阶相变点. 在过去的几年中, 二维二阶相变理论已经取得了很大的成就. 一个全新的学科已经出现, 其被称为共形场论, 对于二维所有可能类型的临界点, 它为我们提供了一个潜在的全面描述. 其分类包括在相变点的二维理论和  $T = 0$  时临界点上的  $1+1$  维量子理论 ( $S = \frac{1}{2}$  海森堡模型是后者一个很好的例子).

在本书的第一部分, 我集中于形式化方法; 在几处我讨论了 QFT 的路径积分公式, 描述了以费曼图为形式的微扰展开. 这块没有多少物理; 我选择了一个简单的模型 ( $O(N)$  对称的矢量模型) 去阐述形式化的操作, 并没有沉溺于对所得结果的物理意义的讨论. 正如我已经说的, 读者如果不熟悉这些材料, 在读这部分的时候应该同时看一些关于费曼图的教科书, 这是非常有必要的. 第二部分不会那么枯燥; 我在这里讨论了多方面的且相对简单的应用. 其中之一非常重要: 即正常金属中的电动力学, 在一个相对简单的水平上, 我们可以讨论违反朗道费米液体理论的行为. 为了理解这部分内容, 读者应该知道什么东西被违反, 即应该熟悉朗道理论本身. 再说一次, 为了了解朗道理论, 我实在是不知道还有哪本书比阿布留科索夫, 戈尔科夫和加洛辛斯基的更好. 在第三部分和第四部分, 我们将致力于非微扰方法, 真正有趣的东西开始了. 我希望你们喜欢它们.

最后, 那些熟悉我的研究领域的人可能会因为这本书缺少严格解和 Bethe ansatz 而惊讶. 这不是因为我不再喜欢这些方法, 而是因为对于任何一个在这个领域工作的理论学者而言, 我不认为它们是最小知识体系的一部分.

Alexei Tsvelik

牛津, 1994