

Memories of a Theoretical Physicist

一名理论物理学家的回忆

Joseph Polchinski

Kavli Institute for Theoretical Physics

University of California Santa Barbara, CA 93106-4030 USA

V1.05

译序

在8月31日的早晨，arXiv上发布了超弦领域的开创者之一Polchinski的自传。开篇第一句就是“While I was dealing with a brain injury and finding it difficult to work...”看到这句话，很多人都感到心情非常沉重。此前就有各种各样的传言说Polchinski教授被查出患有脑癌，但具体情况大家都知之甚少。而这次的自传，无疑是证实了这个消息。

Polchinski的超弦教材是很多相关方向理论物理学工作者的入门读物。这部精彩的著作带领很多人进入了弦论领域，而人们也爱屋及乌地对作者产生了敬佩之情。因此张建东就在某个主题是讨论数学和物理的群里提议一起把本文翻译成中文，并得到了很多人的支持。随后我们就建立了一个微信群，并拉进来很多也有相同想法的朋友，一起商讨具体的安排。讨论的结果是首先要取得Polchinski教授的授权。随后张建东和付子操代表翻译小组向Polchinski教授发送了邮件，申请获得将本文翻译成中文的授权，邮件全文如下：

Aug 31, 2017, at 13:12 UTC+8

Dear Prof. Joseph Polchinski,

We are young physics students from China who have learned a lot from your books and research papers.

Today we saw your memories announced on arXiv. After reading it, we were deeply touched by this article and benefited a lot from it.

We don't know whether you plan to publish this article or not. But we would like to translate it into Chinese, and then much more people can benefit from your article. Currently, we plan to make the translated version free online.

As this article has 150 pages, I (Zhang) convened some friends who are also physics students to translate it together. One of my friends Zicao Fu is also a PhD student in UCSB. I think you may be familiar with him, so we wrote this email together. If you have any question, you can ask either me or him.

We sent you this email to ask for your permission to translate this arti-

cle. May we get your permission of translation?

We wish you a good health!

Thank you very much!

Best Wishes

Jian-dong Zhang, Zicao Fu, et al

很快，我们就收到了病中的Polchinski教授的回信，同意我们翻译本文，全文如下：

Sep 1, 2017, 9:56 UTC+8

Dear Jian-dong Zhang, Zicao Fu, et. al.

I am honored that you wish to translate this, and I am happy to grant permission. There is one typo that needs correction, brane cancer → brain cancer on page 150. Likely there will be others, but this one is especially bad.

I do not know at this point about plans to extend this or publish it, but I am happy that it will be read.

Best, Joe

收到回复之后，我们立刻开展了任务分配工作，将全文均分成十五部分，交给不同的人来翻译。每部分翻译完之后再分别找一个人进行校对，过程中的问题都在微信群中讨论。因为人力有限，有不少人都承担了多项任务。此外为了统一全文的名词翻译、人名地名以及语言风格，最后又进行了可能并不够完善的统稿。在缩写词是否翻译这一问题上，我们并没有完全达成一致，因此目前完全按照原译者的方式保留。此外因为篇幅很长，所以必然在统一名词的翻译上有很多遗漏指出，这一点将会在之后的版本中进行修正。在历时一个月的努力后，终于完成了初稿的制作。翻译组中每个人的物理和英语水平也不尽相同，再加上人力有限，并且很多人都是第一次参与翻译工作，因此最终的版本必然会存在很多不足和错误之处，还恳请各位读者的谅解。

这次发布的版本算是一个初稿，以后也会不断改进升级。这一版本基于Polchinski教授在8月31日放在arXiv上的版本，此后Polchinski又进行了更新修正了他发现的一些问题。因时间有限，而且版本更新时我们的工作已经进行了一部分，所以我们并没有按照最新的版本进行翻译。翻译的

过程中我们只修改了一些明显的笔误，基于新版本的翻译我们会在后续升级的时候完成。目前的版本排版和格式上完全遵循了Polchinski教授发布的L^AT_EX源文件，并使用L^AT_EX编译。后续的版本除了对现有文稿的修订和校正以及排版的美化，还可能会增加诸如参考文献、名词索引、人物简介、一些题图和插图以及一个美观的封面等内容，也欢迎各位提出相关的建议。如果各位在阅读的过程中发现了什么问题，恳请您通过邮件告知小组负责人（地址见下段），我们将非常感谢您的意见和建议。

本文原文及出版版权归Polchinski教授所有，译文版权归翻译小组所有。小组负责人为张建东，如有疑问，请联系zhangjd9@mail.sysu.edu.cn

最后，祝愿Polchinski教授早日康复！

2017年10月2日

Polchinski教授回忆录翻译小组成员名单：

（名单按拼音字母排序，不分先后。包含：翻译、校对、统稿）

安宇森 白书旭 付子操 高 昕 谷 伟 李 婕 厉岳洲 李泽阳
梁桂荣 刘 畅 刘峻宇 陆佳雯 罗竹悉 孙昊宇 王 斌 吴洁强
肖煌煜 谢天佑 徐浩岚 颜 浩 颜 俊 姚志邦 尹倩青 翟宸宇
张建东 赵 俊 钟德亮 庄益豪

前言：

当我在治疗脑损伤并因而难以工作的时候，两个朋友（一个是来自KITP的朋友德里克·韦斯滕，另一个是最近与我有过合作的史蒂夫·申克）建议到选择一个新的方向可能会是个不错的主意。Steve特别提到我是一个很好的写作者，并建议我尝试一下。我很快就接受了Steve的建议。因为我只具有两方面的知识，也就是关于我自己和关于物理的，我决定写一部关于我作为一名理论物理学家的成长过程的自传。

这并不是为任何特定的读者而写的，只是为了给我自己一个目标而已。对于一位非专业的读者来说包含的物理可能太多了，而对于物理学家则是太少了，有些部分可能会很乏味。但是，我认为它某种程度上是唯一的，是一个关于我从何开始到达何处的及其详尽的历史。

可能目标的读者是理论物理学家，特别是那些可能会乐于将我的奋斗与他们自己的相比较的年轻人。¹一些免责声明：本文基于我自己的记忆，并拼接上了arXiv和INSPIRE上的记载。这里肯定有错误和疏漏。同时请注意标题：本文是关于我的回忆的，而这可能会和其他人的有所不同。此外，对我来说提及所有工作与我有交叉的作者是不可能的，因此本文不应该被当成一篇可供参考的作品。

最困难的决定之一是在提到别人的时候是用名还是用姓。但是因为名字更加难于区分，所以我会统一用姓，即使这样对于一些好朋友来说会感到不自然。

我要感谢史蒂文·波尔钦斯基和比尔·扎伊茨仔细阅读了草稿。

最后，我欠多罗茜太多了，她在四十多年里为我们共同的生活付出了很多，特别是在此前的二十一个月中。

目录

1 早年

9

¹我应该提到在2009年我做了一个美国物理学会的口述历史，和物理学史研究者迪安·里克斯有过三次长采访。在我完成之前我故意避免了重读那些采访，以使得本文尽量独立。当然，本文与那几次采访有很多重合之处。我认为采访更加关注精彩的部分，而本文更侧重于我作为一名物理学家的完整的发展过程。而且，美国物理学会的采访迫切需要我进行编辑，而我之前并没有意识到这一点。

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.1 | 家族历史 | 9 |
| 1.2 | 早年的科学和数学 | 10 |
| 1.3 | 家庭 | 12 |
| 1.4 | 兴趣 | 13 |
| 1.5 | 特质 | 16 |
| 2 | 加州理工, 1971-1975 | 16 |
| 2.1 | 抵达 | 16 |
| 2.2 | 扎伊茨 | 17 |
| 2.3 | 恶作剧 | 18 |
| 2.4 | 费曼 | 19 |
| 2.5 | 索恩 | 21 |
| 2.6 | 课程 | 21 |
| 2.7 | 汤布雷洛 | 22 |
| 2.8 | 量子场论, 广义相对论, 量子色动力学 | 23 |
| 3 | 伯克利, 1975-1980 | 25 |
| 3.1 | 继续前进 | 25 |
| 3.2 | 选择方向, 以及东西海岸的差异 | 26 |
| 3.3 | 曼德尔斯塔姆 | 27 |
| 3.4 | 同事及来访者 | 29 |
| 3.5 | 多萝茜 | 31 |
| 3.6 | 其它物理 | 32 |
| 3.7 | 然后继续前行 | 33 |
| 4 | 斯坦福直线加速器中心 (SLAC) / 斯坦福大学, 1980-1982 | 34 |
| 4.1 | 从斯坦福直线加速器中心起步 | 34 |
| 4.2 | 萨斯坎德 | 35 |
| 4.3 | 超对称 | 36 |
| 4.4 | D -项 | 37 |
| 4.5 | 超对称破缺 | 38 |
| 4.6 | 时间到! | 39 |
| 5 | 哈佛, 1982-1984 | 41 |
| 5.1 | 怀斯 | 41 |

| | | |
|----------|-------------------------------|-----------|
| 5.2 | 科尔曼 | 41 |
| 5.3 | 经营马戏团的孩子们 | 43 |
| 5.4 | 低能超引力 | 44 |
| 5.5 | 重整化和有效拉氏量 | 45 |
| 5.6 | 磁单极催化 | 46 |
| 5.7 | 唯象学 | 47 |
| 5.8 | 该长大了 | 49 |
| 6 | 奥斯汀第一部分, 1984-1988 | 50 |
| 6.1 | 小组 | 50 |
| 6.2 | 温伯格与物理 | 51 |
| 6.3 | 弦理论 | 52 |
| 6.4 | 休斯, 刘, 和蔡 | 54 |
| 6.5 | 关于物理, 同事, 以及学生的更多趣事 | 57 |
| 7 | 奥斯汀第二部分, 1988-1992 | 59 |
| 7.1 | 那本书 | 59 |
| 7.2 | 对偶的乐趣 | 61 |
| 7.3 | 宇宙学常数 | 64 |
| 7.4 | 科幻小说与科学 | 68 |
| 7.5 | 短篇故事 | 69 |
| 7.5.1 | 非微扰弦 | 69 |
| 7.5.2 | 和布赖斯一起工作 | 70 |
| 7.5.3 | 费米液体 | 71 |
| 7.6 | 学生 | 72 |
| 7.7 | 告别奥斯汀 | 73 |
| 8 | D膜和定向轨型, 1992-1995 | 74 |
| 8.1 | UCSB和ITP | 74 |
| 8.2 | 信息丢失 | 76 |
| 8.3 | 与马修的合作 | 78 |
| 8.4 | 95年的弦论大会 | 78 |
| 8.5 | D-膜 | 81 |
| 8.6 | 家庭时间 | 84 |

| | |
|--|------------|
| 9 宇宙学常数与离散统, 1996-2000 | 85 |
| 9.1 后续发展 | 85 |
| 9.2 第三次和第四次革命 | 86 |
| 9.3 改-改-改变 | 88 |
| 9.4 反德西特/共形场论 | 91 |
| 9.5 施特拉斯勒 | 93 |
| 9.6 布索 | 95 |
| 10 物理学的终结之后, 2001-2007 | 97 |
| 10.1 贝纳、格拉纳和弗雷 | 97 |
| 10.2 西尔弗斯坦和卡克鲁 | 99 |
| 10.3 泡利、海森堡、狄拉克 | 101 |
| 10.4 更多的细枝末节 | 102 |
| 10.4.1 和霍洛维茨的碎碎念 | 102 |
| 10.4.2 层展引力? | 103 |
| 10.4.3 可积性 | 104 |
| 10.5 格罗斯、卡弗里、诺贝尔和未来 | 104 |
| 10.6 宇宙弦 | 105 |
| 10.7 停机时间 | 108 |
| 11 2007-2011 在火墙之前, 2007-2011 | 109 |
| 11.1 量子引力: 虫洞, 黑洞模型, 虚无泡沫, 圈 | 109 |
| 11.2 理解AdS/CFT | 112 |
| 11.3 反德西特/凝聚态对偶 | 113 |
| 11.4 更多的细枝末节 | 116 |
| 11.4.1 反德西特层级 | 116 |
| 11.4.2 威尔逊圈 | 116 |
| 11.4.3 标度和共形 | 117 |
| 12 火墙的时代, 2012-2015 | 117 |
| 12.1 黑洞里的薛定谔的猫 | 117 |
| 12.2 比特、膜、黑洞 | 118 |
| 12.3 个人的评论 | 120 |
| 12.4 后续 | 121 |
| 12.5 膜 | 123 |

| | |
|------------------------|-----|
| 12.6 先驱者们和混沌 | 125 |
| 12.7 好吧，这糟透了 | 127 |
| 13 尾声 | 128 |

1 早年

1.1 家族历史

每当被问到 I 来自哪里时，我总想回答：“加州理工。”事实上，在 I 从亚利桑那州图森市的高中毕业前，I 从没踏足过加州理工的校园，甚至连加州也几乎没怎么去。但是加州理工在我的生命中如此重要，以至于 I 遇到她之前的所有事物都黯然失色。不过 I 还是会按照惯例，在开头简单介绍一下我的家族史。这些事情会为讲述 I 之后的生活提供一些背景，而且说不定还能提供一些意想不到的启发。

在纽约市韦斯特切斯特县的霍桑镇上，你可以找到一间叫约瑟夫·波尔钦斯基的公司，它从 1883 年就开始卖陵园纪念碑。它是我曾祖父创立的，而我继承了他的名字。我父亲也用了同样的名字，但我的爷爷叫亚瑟。所以我是“小约瑟夫·波尔钦斯基”。家里人会叫我“乔伊”以做区分，而且其中一些人到现在还是这么叫我。

我父亲的祖辈作为当时饱受饥荒并在野心的驱动下到来的大量欧洲移民中的一员，在 1870 年前后来到了美国。祖辈中的约瑟夫来自波兰和德国的交界处，而另外三个都来自爱尔兰。J 约瑟夫精于石雕，后来成立了那家卖纪念碑的公司，还在旁边开了一家花店。在他们按照普通美国人的方式在美国开枝散叶前，这两间店成为了两代人的经济支柱。尽管如今的纪念碑公司被另一个家族所持有，但是每当看到他们为了历史价值而保留了公司的名字时，我都会感到十分荣幸。

I 对母亲琼·桑顿的家族了解甚少。她从很小的时候就开始在好几个寄养家庭中度过了童年。最终她留在了一个热情的美籍德裔家庭中，但或许因为童年生活的艰难，她看上去始终有些忧郁。我只了解一些她过去的概况，而她也从来没有想让我了解到更多。她出生于宾夕法尼亚，但最后

的寄养家庭在纽约市，与约瑟夫·波尔钦斯基纪念碑公司在同一个城镇。她的祖辈是爱尔兰人与不列颠群岛其他地区的人的混血。

我的父母J乔·波尔钦斯基和琼·桑顿在同一个小镇上长大，并在1951年结婚，当时乔22岁，琼19岁。我在3年后，即1954年出生，又过了3年，我的妹妹辛迪也出生了。20世纪50年代，在数目不断增长的美国中产阶级家庭中，我们家是相当典型的一个。我的父亲为了获得会计学学位，离开了家族生意。后来他去了一家叫申利的酿酒公司工作，每天搭地铁去帝国大厦上班。我母亲曾在办公室里工作过几年，后来成为了一名全职家庭主妇。

我的父母都没有表现出对科学的兴趣。我的父亲曾说过他本想去研究化学，但因为不懂德语而放弃了。我们之间也很少聊到科学话题。通常我们之间的话题都是关于体育和游戏的，不过我们确实很喜欢玩桥牌一类跟数学相关的游戏。他非常好胜，而我也继承了他的这一特点。在阅读方面，我父亲青睐于历史方面的书籍，我母亲喜欢阅读小说。

1.2 早年的科学和数学

我很早就表现出了对科学的兴趣。我6岁时就对《什么是什么——奇妙的科学之书》充满热情。这是一套有好几本的系列丛书，每一本都会以某个主题为中心，例如恐龙、原子能、化学和岩石矿物。虽然每本只有48页，但里面充满了大量信息。插图是手工绘制的，却很有吸引力。我总是渴望着每一次的新书发布。有一次我非常调皮地去玩篝火里的灰烬，结果有好几天我都被禁止去看新书；对我来说这是种很有效的惩罚措施。

过了几年之后，艾萨克·阿西莫夫写的关于数学和科学的书促进了我的兴趣。他、克拉克和其他人写的科幻小说，激发着我去思考科学是否能够实现那些虚构的图景。遗憾的是，高中时的课本和老师给我的印象不深。那个水平的科目都太着重于描述了。

我记得我曾问过物理老师，引力的速度是多大？就算我画出了一幅图去解释如何测量它，他也没有理解这个问题。更早些时候，我在考试中遇到了一个会引起误解的问题：“以下哪一个力最强？a) 压力，b) 电力，c) 引力，d) 磁力。”我知道这个问题毫无意义，但出于对考试的本能理解，我明白他们想要的答案是“引力”。但这个答案并不正确：我可以抵抗整

个地球对我的手的引力而举起我的手。因此我随机选了另一个答案，拒绝选择那个我知道是错误的答案。或许当时我还象征性地跟老师争论了一下，但是我已经习惯输给他们了。不过，引力的微弱性是物理学的原理之一。

2

另一方面，也有让我激动不已的时刻——当我读到（还不涉及到方程）电场是如何产生磁场、磁场也能产生电场，两者一起形成的波就是光波的时候。所以尽管我还是花了好些年才知道其中的细节，但很明显未来我会从事科学研究工作。因此，从很早的时候我就被物理的基本原理吸引。我也感到很幸运，自己能投身于研究物理，并且贡献出新的理解。

通过数学，一个人在很年轻的时候就能深入理解现实事物，课程也逐渐变得更加有趣起来。我匆匆地完成了我的课程，并在5年级时遇上了新数学计划。这是一个因为人造卫星成功发射而出现的计划，美国已经意识到他们在科学方面落后于苏维埃了（《什么是什么》一书也可能因为同样的原因出现）。我还记得，学校在集会上让所有学生和家长去学这套新东西。这个计划有点荒唐，学生们先去学习一堆抽象的概念和运算法则，把理论理解后才真正去计算。难以相信会有人认为这是个好主意，这个计划在那几年也实行得举步艰难，但对于我来说这是件完美的事情。³

不幸的是我错过了新数学计划带来的好处，因为一年之后我就搬去了亚利桑那州图森市。当时，我父亲在找一份更好的工作，他想去美林证券公司做一个客户经理，而图森市刚好有这样的职位提供。而且或许我父母也刚准备好要离开这座他们从小长大的小镇。因此，我超前学习数学的机会被往后推迟了一些。大约在同一个时间点，我还错过了另一个机会：我父亲在所有申请高等研究院的业务员职位的申请者中排行第二，而如果去了那里我就能加快与科学产生关联。

我的初高中在金色峡谷（CDO），一所新建的小规模学校，她在某些

²事后再回想，基于上下文，引力确实应该是正确答案。因为引力是唯一一种总是吸引的力，只要物质足够多，那么物质相互间的引力就会足够的强。所以再极端情况下，引力确实会胜出。

³我刚刚才从维基百科上知道原来理查德·费曼是当时加州的课程编制委员会的成员，并且是批评新数学的。

方面对我有所限制。幸运的是，埃德·巴切斯基负责我的第一门数学课。巴切斯基先生热爱数学，他让学数学成为了游戏。例如，完成一组问题后，就有一个密码需要解开（你也可以逆推回去，从而找到解决问题的捷径）。回想起来，巴切斯基的教学方式和新数学计划有点相似，虽然对于通常的学生来说并不是理想的教学方式，但是对我和其他几个人来说非常有效。从早期他就提出了从1加到100的高斯问题，而在后面几个问题都被我解决之后，我就被允许提前自学教科书了。我1年就自学完了4年的几何学知识。印象最深刻的是，当我开始自学三角函数时，我无法理解“正弦”和“余弦”。但过了几天我就突然明白了，这种感觉非常奇妙。

次年，我选了高等代数，这所小学校里最高级的课程。这门课是橄榄球教练教的，他容不得学生有半点异议。现在回想起来，他这样做可能既有好处又有坏处吧。

上完了所有数学课后，在我高中一年级时，我父亲和一些学长每天晚上都会载我去亚利桑那大学学习微积分。不幸的是，这并不顺利。一部分原因是那个讲师没有洞察力，也无法启发学生。某天有个代课老师来上课，他给我们讲了很多数学故事，而且还故意用伟大数学家在更加年轻的时候就完成了的例题来向我的早慧发起挑战。（他看得出我有些骄傲自满，需要被治一治）。但是后来又换回原来的老师上课了。

第二个原因是，我并没有真正领会微积分，就像之前有段时间我没有真正弄懂三角函数一样。但这次整整花了三年时间，直到我选了大学物理后才发现微积分的真正目的。（数学家可能会告诉你它有其它用途，但他们可能是错的。）

由于对课堂的失望，我决定要自学数学。我选了本群论的书。可惜我缺少学习它的诀窍，因此我的努力也白费了。高中最后两年的大部分时间里我再也没有学习数学了。科学也是如此。这间小学校里没有高级课程，所以在提前学完所有能接触到的科学知识后，接下来的一年里都没再学过数学和科学，而是把时间花在能让我提前一年毕业的其它课程上。

1.3 家庭

我妹妹辛迪和我看起来就是完全不一样的两种人，无论在性格、兴趣

还是职业生涯方面。我喜欢物理而她喜欢动物，尤其是马。她只上过一年的大学，而且只是为了安抚父亲而已。后来她去了圣芭芭拉附近一个大马廐里做驯马员。几年后她有了属于自己的马，还让它们繁育、参加比赛，最近她还作为马戏表演的负责人在全国巡演。

为了支撑自己的兴趣，她还做了近20年的警员。这是我连想都不敢想的事情：我无法为一件事快速地下决定。而她却非常的泰然自若。虽然辛迪不是以学术的角度对待她的兴趣，但是她有超强的能力做好这些事情。我们还有另一个区别，我一直以来都有点害羞，不过也从年轻时的极度羞怯逐渐转变为如今的有点内向。我妹妹刚好相反，无论跟社会哪个阶层的人士都能做到谈笑风生。

尽管我们如此不同，但一直以来我们都相处得很融洽，她也是我的一个重要支持者。她经常跟我说，她很期待等我拿到诺贝尔奖之后，和我一起瑞典旅行。尽管这个愿望无法实现了，但几年前我还是带她去了大型强子对撞机。

鉴于我的父母完全无法理解我这个外星人在他们的家里一直在做什么，他们已经竭尽所能来帮助我了。我父亲是那种想要总揽大局的人。当我告诉他我在学校学了什么的时候，尤其是之后谈到相对论时，他跟我说这绝不可能是真的。对于我父亲，虽然这样说很不好意思，但我觉得他有点像个民科。尽管从来没学过科学，但是仍然觉得自己很有资格提出理论的人着实很多：显而易见，其中99%都是男性。我妈妈也确实不会提出那些理论。多年后她告诉我，她以前在学校里是很聪明的。不幸的是，那些对妇女的限制阻碍了她的追求。

1.4 兴趣

我从课外的东西也获得了一些启发，尤其是科幻小说、望远镜和国际象棋。前文中我已经提到过科幻小说了。奇妙的是，回想起来我对科幻小说的了解几乎都是通过读书。那时星球大战还要等到7年以后才会出现，除了少数的诸如《世界大战》和《2001太空漫游》之外，以前科幻小说改编的电影都没什么市场。科幻电影如何在当前占据了主导地位，是非常值得注意的。

我对望远镜的兴趣始于12岁那年父母送给我的一份惊喜——一个4英寸的反射望远镜。这个主意真是棒极了。图森市是一座很小的城市，我们住在城市边缘，这里房屋逐渐减少变为荒漠。视宁度（空气的清晰度）和暗度都是令人难以置信。我的兴趣转到辨认星系上，我会尽自己所能去寻找尽量多的梅西耶星表上的星系。不过我的兴趣也仅仅停留在观测上，我还太小，无法去弄清楚其中的科学。

在把4英寸反射望远镜的潜能都发掘出来后，我打算造一个8英寸的反射望远镜。但我既没有充足的预算，也没有机械加工的才能，因此结果综合了这两个缺陷。我在一块玻璃上放上细沙子用另一块玻璃去打磨，并在亚利桑那大学天文社的帮助下测量我的进展，最后做出了一块值得称赞的镜子。不过力学支架则是用我所能找到的任何木头制作而成的，并且模仿了Hale望远镜的比例图。非常值得炫耀的是这个架子最后竟然真的能用，虽然远远配不上8英寸望远镜的真实能力。直到现在，寻找蟹状星云还是我最喜欢挑战的项目之一。仙女座大星云即使用肉眼也很容易看出来，而且我仍然能够在圣芭芭拉天气晴朗的时候辨认出来。

国际象棋占据了我大部分的校园时光。我小时候就从父亲那里学会了怎么下棋（除了对兵的走法有些困惑）。在偶尔和父亲或者朋友下过几局之后，当我来到CDO并发现了一群可以一起下棋的人时，我的兴趣大大增加了。接下来的5年中，几乎每次午餐时间或者其他的休息时间，我们都会打开棋盘下几局。随着我下得越来越好，我参加了当地的锦标赛，还在凤凰城参加过一次比较大型的比赛。这非常有趣，也几乎是我唯一的社交活动了。中学的最后两年，当我已经上完数学和科学的课程后，我花了很多时间去研究棋谱，特别是如何开局和进攻。

但有一件反常的事情一直使我感到困惑。根据我研究物理的过程，首先学习越来越多的高级课程，然后去做一个原创性的研究，最后做出意义重大的发现。你可以说我在物理学中是相当厉害的特级大师的段位了。但是在象棋界中，我也是先从一个初学者开始，几年后我努力地把自已提升到很不错的业余选手水平，并且在我中学的最后两年，我几乎就是像全职棋手一样努力。我当然希望我会继续得到提升，然而我的水平却似乎一直停滞不前。但是有一件反常的事情，让我一直很困惑。基于我研究物理的

过程，首先学习越来越多的高级课程，然后去做一个原创性的研究，最后做出重大发现。你可以说我在物理学中类似于相当厉害的特级大师了。但是在象棋界中，我也是从一个初学者开始，几年后努力提升到很不错的业余选手水平，在我中学的最后两年，我几乎把全部时间花在了下棋上，并期待能继续提成。然而我的水平似乎却一直停滞不前。

国际象棋有个很好的数值系统，称为ELO。基于棋手的胜场和败场，每一名玩家都由一个数值评定。如果把它们排列起来，分别是
... < D < C < B < A < 专家 < 大师 < 高级大师 < 特级大师。

粗略地说（完整的理论更加精妙），如果两个玩家的等级差是 M ，那么等级较高的玩家的相对胜率是 3^M 。我一开始是D级，即初学者，3年后我升到A级。但我从来没有达到专家级，大师级以上就更不用说了。

我一直很奇怪这究竟是因为什么。物理和国际象棋是否真的如此不同，就算我在两者间都做了差不多的努力，我在一方面可以是特级大师，另一方面却连一个专家都不是。看到有越来越年轻的少年达到了特级大师的水平，我总是感到惊讶不已。

直到多年以后我遇见一个高中棋友，才得到了一点线索。我在学校第一次遇到基思·纳尔逊的时候，他就要和我单挑一局。对于身经百战的我来说，我原以为很快就会赢，没想到他打败了我。我坚信如果我再认真一点，我肯定会赢。结果我又被他打败了！虽然后来我也赢过他几场，但是明显他比我下得更好。大约20年后我再次遇见了基思。我一直不知道他也对科学感兴趣，他现在是MIT的实验化学教授了。正当我们开始回忆从前的时候，他竟然还记得我只有模糊印象的我们前两局比赛的每个细节，这真的让我大吃一惊。显然，至少与我相比他的记忆力惊人。

事实上，我也一直觉得自己没有特别好的记忆力。在大学中我的某门课程的第一节中，老师告诉我们做物理不需要很好的记忆力，因为你可以从第一原理出发推导出所有东西。如果我曾经对于我的专业是否适合我哪怕有过那么一丁点怀疑的话，这番话都打消了我的疑虑！

除了记忆力外，我也没有什么真正的下棋套路。我比较保守，只会用几个基本的进攻套路，然后等着对手犯错。我不喜欢将兵升变，因为这个效果是不可逆的。而特级大师不会这样想的！或许经过训练我能下得更好，

但我肯定不是这方面的天才了。其实我很好奇，是什么让每个人的脑力不一样呢？

1.5 特质

我一直想做的一件事就是回顾自己成为一名物理学家的历程。在这个过程中，我的一些特质起到了作用。其中的一些在我的早年生活中讨论过了。

作为开始，我的父母和亲戚很早就发现我并不是一个正常的孩子。我能解决一些远超我那个年龄水平的难题和游戏，我的常识是超前的。因此从很小的时候，我的特质就是：非常聪明。随着我不断提升水平直到开始研究弦论，这一点一直伴随着我。

另一方面，我已经提到，在校期间我非常羞怯。我会尽量缩短和别人的对话，这样就不会让人厌烦。直到大学以后，这个习惯才慢慢消失。

我还认为自己有些缺乏常识。我设计的那个劣质望远镜就是一例。另一个例子就是高中时期，我有两年时间没有学习数学：如果我有常识的话，我应该去请教别人。我在国际象棋的道路上看起来也是缺乏常识的。

某种意义上，羞怯和缺乏常识就如同硬币的正反面。如果你愿意跟别人交谈，你就会学到东西。如果你不愿意，那么你只能自己去解决一切。就算我从羞怯慢慢好转为内向，我也不太倾向于问问题或寻求帮助。这可能是我的科学生涯直到比较晚才达到顶峰的一个原因吧。

2 加州理工，1971-1975

2.1 抵达

现在的大学申请者可获得的信息比我们当时要丰富很多。对我来说，主要的资料来源是《读者文摘》（Reader's Digest）和《世界年鉴》（World Almanac）和《事实书》（Book of Facts），但这些也足够了。上大学前几年，我读了一篇读者文摘上关于著名的C加州理工玫瑰碗恶作剧的文章。

当时华盛顿队计划举办一场表演：在看台上由几千名球迷操纵一组卡片，从而来制作体育场大小的图片。整个过程一直顺利地进行，直到最后两张卡片的出现，“Huskie”被换成了“Beaver”，而“Washington”则被换成“加州理工”。这需要加州理工工人的精心策划，最终在比赛之前的那天晚上当他们更换了数千条独立指令时达到了极致。那篇文章还提到了加州理工学院独一无二的科研环境。

由于我之前没有听说这个地方，我转而搜寻另一个信息来源——年鉴。它有一张很好的各大学的介绍表，从中我了解到加州理工的学生-教师比例大约是2-1，相比之下其他学校的这一比例一般是20-1。恶作剧加上顶级师资配置—我深深为之着迷。我甚至没有读过其他学校的资料——这样做也许有悖常理，但这次却行之有效。我早早地就决定了申请加州理工，之后便屏息以待。由于我是来自于小州的一所名不见经传的地方学校，因此我不确定结果会如何。但收到回信时，结果是榜上有名，而我则是坐下来笑了很久。这正是我一直期待的结果。

于是在1971年九月，我全家开车从图森出发。这是整整一天的驱车旅行，但我的父母都喜欢开车。然后我们到达了在布莱克之家的学生宿舍，也就是我即将生活四年的地方。告别的时候我的妈妈流泪了，而这在我的记忆中并不多见，我的新生活也随之拉开了序幕。

2.2 扎伊茨

在校园的第一个星期，我遇到了三个了不起的人：理查·德费曼，基普·索恩，和威廉·比尔·扎伊茨。50多年前，当我还在上小学时，费曼就获得了诺贝尔物理学奖。而索恩可能摘得次年的诺贝尔奖。扎伊茨，可能对大多数读者来说是最不熟悉的，同样是一个杰出的科学家。他在布鲁克海文领导了PHENIX重离子探测器的发展。这项研究工作也许不会获得诺贝尔（但谁知道呢？），但它揭示了核物理学中的熵与弦理论中的熵之间的联系。在我们相识的时候，费曼已经是一个明星了，索恩是一个冉冉升起的新星，而扎伊茨，则和我一样，是一个刚在加州理工校园迈出第一步的有点傲慢的年轻人。

扎伊茨，和我一样，住在布莱克之家，因此我们在第一天就相识了。

他同样很快就对我的人生产生了巨大的影响。正如我之前所提到过的那样，离开高中时我还完全不知道物理究竟是什么。但在加州理工，我却沉迷在物理之中。扎伊茨在其中起了很大作用。在威斯康辛念高中时，他已经读过了一部分费曼讲义，即费曼的三卷本物理学导论。实际上，这份讲义被用于介绍性物理学课程的进阶方案。因此，扎伊茨到加州理工时对什么是物理已经了然于胸了。

扎伊茨性格外向（作为一个加州理工人），而且喜欢谈论物理学。我很快就学到了我之前遗漏的知识。当扎伊茨告诉我一些惊人的事实，然后我们解决了一些关键的方程，我首次看到了微积分和物理是如何紧密地结合在一起。我认识到我就是为此而生的。之前我还把棋盘带到了学校，计划每天练习一个小时，但却从来没有打开过。

大学四年中，比尔和我一起上了很多相同的课程，一起学习物理。但不仅是物理学，我还记得比尔、我、以及其他朋友之间释放精力的方式。比如开车去买汤米的汉堡，以及去参加各式各样的运动。我们中一群人成为了一群狂热的自行车手，骑车去圣莫妮卡的海滩并且骑车探索了洛杉矶几乎一个世纪（100英里）。我们的特别挑战是骑车上到威尔逊的山顶。

2.3 恶作剧

探索加州理工的校园来发现隐藏的秘密是我们的另一种消遣。最无伤大雅的方式是在物理或其他部门的走廊徘徊闲逛，看看那里发生了什么。更有趣的是夜间游玩，爬进建筑工地，越过加州理工精心设计的蒸汽管道网，或者干脆利用在加州理工学生中代代相传的开锁秘诀（而物理大厦，Bridge，被认为是最容易的）。我们总能找到一些有趣的或许是具有历史价值的科学设备的残片作为嘉奖。

就这样，我们进行了一些（虽然比不上玫瑰碗的规模！）最初吸引我来这里学习的那类恶作剧。我们最著名的恶作剧之一是在图书馆楼顶上。加州理工的图书馆在第九层，耸立在校园中。这是大学生经常进行恶作剧的一个地点，通常包括把一些可燃或不可燃的东西从楼顶扔下或者使它们漂浮起来。屋顶的门是锁着的，但可以被更有才能的加州理工人撬开。

加州理工安全部门当然不认为这是一件好事，所以原来的锁被换成了

一种“牢不可破”的新锁。实际上我们最好的锁匠也没法打开它。这是一个令人愤慨的行为，因此我们需要一个B计划。这附近有一个通风竖井，每层都开着直通到屋顶上面。竖井的盖子是可以拧开的，所以为了完成这个计划只需要一个没有常识的人通过竖井从顶层爬到屋顶就行。我在这方面有些天份，于是一天深夜，我在通风竖井里缓慢地攀爬着这最后的十二英尺，我从没尝试过只系着一根登山绳在九楼的高度这么做。还好，除了在那个紧张的时刻我因为被卡住了而无法向任何方向移动，这次攀登相对容易。最终我上到了顶楼并从后面打开了门。

攻克了号称“牢不可破”的锁之后，我们就得庆祝一下了。我们把门从铰链上拆了下来，十几个人一起把它从楼上搬到了图书馆地下室，然后穿过地下蒸汽管道来到了加州理工的安全办公室。开锁专家打开了办公室的门，然后包括扎伊茨和我在内的团体在之前那个拆下的门上集体签名，并把它留在了那里。这看起来好像是件很愚蠢的事情，但是我们认为安全部门能够理解这些加州理工人，也会宽容我们；实际上，后来根本就没有处罚（警告：现在情况不同了，请不要去尝试）。而且还有一个很不错的奖励。安全部门没有抹去或掩盖我们的签名就将门重新安装上去了。所以在几年前，也就是事发40多年后，仍可以在图书馆楼顶的门上看到我、扎伊茨、以及其他人的（也许其中有一两个是假的）的签名。

2.4 费曼

当我第一次遇见费曼的时候，是把他当成一个偶像而不是一个人。在达布尼之家的庭院，挨着布莱克的地方，有一幅多年前制作的描绘历史上伟大的科学家的大型浮雕。当费曼和朱利安·施温格、朝永振一郎在1965被授予诺贝尔奖后，达布尼的学生将最显眼的伽利略换成了费曼。因此，当时我们一直被费曼所环绕，包括他的照片、他的书、和许多其它与他相关的东西。对我们中的许多人来说，费曼就是我们想要成为的那种人。

不久我就有了一次见到费曼的机会。每周费曼都会举办一次物理X的讲座，在此期间新生和二年级学生可以提出关于物理的问题，或者当我们想不出问题的时候由他来谈论一些他的想法。其中有一个例子就是关于如何求出傅立叶变换的平方根，也就将这个造作对某个函数连续作用两次后

得到的结果会与进行一次傅立叶变换后的结果相同。感兴趣的读者可以在脚注中找到答案，⁴ 但是先自己试着想一下。这种令人愉快的创新性活动非常吸引人。还有一个问题是，负概率是什么？遗憾的是，我那天对课程的主要贡献就是在前排睡了一天，这让我的一些同学取笑至今。

在B布里奇大厅最引人注目的东西之一是一对小物件，一页微缩文本和一个微型马达。两个的灵感均来自费曼的演讲“底部有足够的空间”。他预见到了物理和技术能够达到越来越小的尺度。除了强大的计算能力和超强的个人魅力，费曼摆脱框架进行遥想的能力也是极好的。另一个例子是关于量子计算的想法，此时“充足的空间”不是来自物理空间而是来自希尔伯特空间。

所以，当时我们很多人都想模仿费曼。当我开始在课堂上脱颖而出时，几个同学宣称我将成为下一个费曼。听到这个我当然很高兴，但我知道得更清楚。与费曼惊人的原创性相比，我一直觉得自己在这方面很薄弱。这不仅是我在自谦；在一起工作的时候你就可以得出判断，但我只是单纯根据我的直觉而冲动行事的。

虽然我经常在那个校园中见到他，不过我过于害羞而没有很好地利用和费曼在一起的时间。我在一次教职工聚会上听到了他的轶事，其中有些轶事后来还出现在了书中。最让我们兴奋的是，在我和扎伊茨到了高年级时和另外两个高年级生一起，被费曼叫去给他的初等量子力学作业进行评分。我对这门课最深刻的印象是最开始时，他并没有用一些深奥的自然原理，或者实验，而是复习了高斯积分。当然，有一些计算工作是不可避免的。

有一次我克服了自己的羞怯，问他关于出现在量子场论（QFT）中的无穷大的问题：它们有一个物理解释么？费曼回答：“没有”。现在回想起来，从威尔逊、温伯格和其他人的工作中，他一定已经知道了更多。但这些似乎并不能使他满意，因为他并没有自己推导出来。但这个问题在接下来的八年里一直困扰着我，而且是我取得的第一个有深刻意义的成果。⁵

⁴在相空间中， $x \rightarrow p \rightarrow -x$ 的傅立叶变换对应着 90° 的旋转。所以答案应该是 45° （或者 225° ）的旋转，结果不唯一。

⁵扎伊茨让我记起了我们和费曼的另一个互动，是询问旋转物体是否会产生引力辐射，

2.5 索恩

基普·索恩是我的指定新生顾问，所以我们每个学期都见面。我第一次去他办公室的时候，他的第一个要求是“叫我基普”。这是我办不到的，所以我这一年都没用他的名字来称呼他。

索恩办公室的门上挂满了有趣的艺术品。最有名的是基普和斯蒂芬·霍金之间的一个赌约，关于射电源天鹅座X-1是否是一个黑洞：索恩打赌是，霍金打赌不是。如果是，它将是实际中第一个被确认的黑洞。其实两人都非常预期并希望答案为是，但霍金更改了他的赌约：如果他因结果不是黑洞而失望，至少他能赢得索恩订阅的杂志。但事实上是它很快被确认为黑洞。

索恩是广义相对论领域中的佼佼者，对黑洞丰富的天体物理特性有着特别的兴趣。这项研究需要一个团队才能进行，所以人们总是能看到他和一群热情洋溢的研究生和博士后在一起。正如我们所看到的，当索恩开始研究黑洞时，虽然其理论是令人信服的，但依然只限于理论。但很快就出现了天鹅座X-1，并逐渐观测到越来越多的，从类星体到塌缩恒星的对象。最近，索恩以LIGO 项目的领导人之一的身份结束了他卓越的职业生涯。这个价值数十亿美元的实验首次观测到了近100年前预言的引力辐射，以及黑洞的并合。

但当我还是学生的时候除了上他的广义相对论课程外并没有和索恩有太多的接触。这项研究对于本科生来说太高深了。几年后，我确实和他有过一次有趣的关于科学/科幻小说的交流，后面我会讲到这件事。

2.6 课程

身边环绕着这些以及其他众多杰出科学家，我受益匪浅。费曼的课是前两年的亮点之一。它们并不完美：跟费曼所做的每件事一样，他用自己的方式重写了这个学科。这很鼓舞人心，但也充满挑战。课程中比较缺乏实例和计算，但是这由另外两个高水平的教授罗伯特·莱顿和罗胡斯·福格特编纂的习题集来进行补充。

这是之前令我们迷惑不解的问题。

还有许多其他课程——天文学、化学、高等微积分、电子学。我修了太多的课程，而这在加州理工学院很常见。要学的东西太多了，每个人都想把它一下子全塞进脑子去。令人高兴的是，每学期只需要修一门非科学性的课程。在我的大学四年里，我没有学过很多数学：高等微积分，复变函数，以及一门我没能理解的关于群论的课。我想我是受了来自费曼随便说的一句话的影响，他认为一个人不需要知道太多的数学，但这对我很有用。

2.7 汤布雷洛

在学校里的乐趣太多了，以至于我不想夏天的时候离开。今天，本科生科研是顺理成章的，但在那时却是漫无目的的。值得高兴的是，汤姆·汤布雷洛在那里。汤布雷洛是一位核物理与原子物理学家，主要工作是通过测量核衰变率去推断被测物质的化学元素组成。他也是一位了不起的人。当他看到的四个物理系的尖子生（比尔、我、罗兰·李、和肯·扬恰蒂斯）正在寻找研究项目后，他把我们都招了过去！

这里是我们做研究的天堂：在布里奇我们四个共享一个地下的办公室，领取一份适度的津贴，整个白天都在讨论物理而晚上则是放松。汤布雷洛不是让我们四个一起研究某个大课题。我们每个人分别都有自己的课题（可能是一些更大的合作课题的一部分），这些课题来自于汤姆的广泛兴趣。一段时间以来，我研究过波导形状的估算、核衰变率的计算以及探索用于研究中等能量的原子对撞的方法。他在访问加州理工学院时，甚至向霍金展示了我的一个数据图。

汤布雷洛是一位罕见的同时做理论和实验的物理学家。他用范德格拉夫起电机去研究原子核的相互作用，所以我抽了一段时间去学习如何使用它。他还指导了我的毕业论文，试图以提炼镓来探测太阳中微子。

汤布雷洛告诉我应该走他的道路，也就是费米的道路，既做实验也做理论。但我天生就是个理论家。我记得我和汤姆一起花了几个小时来移动铅块，而我不想把我的职业生涯都浪费在搬运铅块上。但显然做理论也有它自己的苦差事，比如寻找使之分成两部分的分解因子。不过当我在我的毕业课题中成功地损坏了多通道分析仪和一些昂贵的玻璃器皿后，也许令

汤姆幡然醒悟了。

即使大学毕业之后，汤布雷洛也和我保持联系。他寄给我一份霍金在访问加州理工期间所写的信息悖论的论文，附带有一张纸条“乔，你应该致力于这个”。他是对的，但我要等几年之后才会去研究这个问题。

汤布雷洛在我们四人毕业后休息了一段时间，但几年后他创立了物理11作为正规的本科研究课程。几年前汤姆突然去世了（2014年——译注）。在他的追悼会上，知道了有关他生活的各个方面后更是令人钦佩。在得知他所影响到的人的数量之多，特别是他聚集人才方面的天分之后，让人感到非常欣慰。

2.8 量子场论，广义相对论，量子色动力学

进入高年级后，物理变得更加迷人了。我选弗罗斯基的QFT课程，和索恩的广义相对论。我并没有很好地掌握这两门学科。目前来说理论物理专业的高年级学生上这些课是很常规的，但当时的科目要更难。

QFT正在快速发展，而教材还没有赶上它的发展速度。由比约肯和德雷尔所撰写的两卷教材是最常见的选择。这本书在写成的时候非常出色，但是快速发展的十年之后，一本新的教材是必不可少的。

广义相对论确实有了一本新的教材，但这本身就是问题所在。查尔斯·米斯纳，索恩和约翰·惠勒刚刚重写了一部被广泛地称为大黑书的关于这个科目的史诗般的教材。不幸的是，几乎不可能用它来学习，特别是对我来说。它试图用几何的方式来介绍这个科目，这原本对大多数人来说都是件好事，但它走得太远了，所以看它就像是在看图册一样。几年后，罗伯特·瓦尔德用更传统的方式呈现了几何的故事。对我来说温伯格的书是最理想的，因为它尽可能地遵循粒子物理学的思路，而我在读研究生时学习过这种方法。温伯格明确地降低了几何在引力中的作用，甚至没有提到黑洞。⁶

在场论中，我们有一个著名的由大卫·普利策主讲的客座课程，他是

⁶这使我突然想到即使在今天，我们对黑洞的最精确的描述依然是规范理论，而不是几何学。

物理系的一个新成员。三年前，大卫·格罗斯、普林斯顿的·弗兰克·维尔切克哈佛的普利策，发现了渐近自由的原理。由此可见，由于量子回路的存在，强核力的相互作用强度会随着距离的增大而增大。这解释了高能下夸克间的弱力是如何与长程下的夸克禁闭相符合的。从而他们确定了强核力的本质，即所谓的QCD，并建立了作为粒子物理的正确框架的QFT。

可惜的是，在加州理工没有人对此进行研究。费曼和盖尔曼都喜欢按照自己的方向走，但具有讽刺意味的是渐近自由解释了费曼的部分子和盖尔曼的夸克之间的关系。所以普利策是第一个和新物理有直接联系的人。

另一个激动人心的粒子物理实验的进展是发现了一种之前从未见过的新的长寿的重粒子， J/ψ 粒子。这是一个很大的新闻，甚至连本科生们都知道他们应该去参加相关的座谈会。在观测到的现象被描述出来后，不同的研究人员都提出了他们自己的理论。费曼认为这可能是自由态夸克，而年轻的格伦尼斯·法勒教授则指出，这是一个粲夸克及其反夸克的束缚态。很快，后者被证明是对的。实际上粲夸克的存在以及它的质量和其他性质，在几年前就被谢尔顿·格拉肖、约翰·伊利奥普洛斯和卢恰诺·马亚尼准确地预言了，这是一次理论的巨大成功。

对非专业读者，下面是一个便于阅读的缩写词清单：

AdS/CFT: 某一弯曲时空的量子引力和低一维的超对称规范理论的等价关系。

AdS/CM: 将 AdS/CFT 应用于强关联凝聚态系统。

AdS/QCD: 将 AdS/CFT 应用于强相互作用核系统。

BFSS: 矩阵理论，对 M 理论的严格描述。

BHC: 黑洞互补性原理 (Black Hole Complementarity)。

BPS: 部分具有超对称的态。

CGHS: 一个两维中的引力模型。

GR: 广义相对论 (General Relativity)。引力起源于空间和时间的弯曲。

GUTs: 大统一理论 (Grand Unification Theories)。

KKLT: 第一个具有稳定的弦真空的完整模型。

QCD: 量子色动力学 (Quantum Chromodynamics)。关于强核力的

理论。“色”来自于盖尔曼异想天开地将三种夸克标为红绿蓝。

QED: 量子电动力学 (Quantum ElectroDynamics)。电磁学的量子理论。

QFT: 量子场论 (Quantum Field Theory)。基本变量是场的量子理论，在1971年被确认为量子力学和物质的基本框架。粒子出现在场的量子力学的解中。

SUSY: 超对称 (SUperSYmmetry)。

3 伯克利, 1975-1980

3.1 继续前进

四年之后，到了选择研究生院的时候了。我知道自己想从事理论物理，因此把目光放在了伯克利、斯坦福、哈佛和普林斯顿这四所学校上。我试着以科学的态度对待我的选择，但包括扎伊茨在内的数位好友的选择，以及我对加州的喜爱，使我更倾心于伯克利。同时，我有幸获得了赫兹奖学金，而在当时这份奖学金仅提供给很少一部分学校，伯克利恰在其中。

那时，赫兹奖学金有很强的国防倾向。也许有人会觉得倾向自由主义的伯克利会被其排除，但伯克利同附近设计核武器的劳伦斯·利弗莫尔实验室确实有很密切的关系。我接受了奖学金并去了伯克利。该奖学金并不强制要求我投身国防，但需要我承诺在必要时为国出力。我自己同国防的关系只限于在劳伦斯·利弗莫尔实验室的一日游了（但也只是在围墙外，因为我没有对应的进入许可）。

在我选择研究生院时还有一段插曲。当时哈佛的物理系主任保罗·马丁恰好路过，并留下做了一些招生工作。他试图说服我去哈佛的主要理由，是东海岸的物理比西海岸更加优秀。我从没听说过类似的事情，毕竟伯克利有着辉煌的历史。最后我没有认真对待这个建议，按原计划启程去了伯克利。如果当时他更直接的给我建议，之后的事可能就完全不同了。

3.2 选择方向，以及东西海岸的差异

我也曾是一个认为开始做研究前必须把一切都学完的学生。重新学习量子场论和相对论自然十分重要。场论还是由比约肯和德雷尔讲授。这次我学习了公式，但仍旧认为基本原理不够清晰。好在相对论是温伯格教的，于是我彻底弄明白了这个主题，尽管是从粒子理论家的角度而不是相对论学者的角度。

我当时隐约觉得我应该多了解其他可能的方向，但我确切的知道我最终会选择粒子物理。因此我选择导师的时候相对较迟。也是在那时我才意识到当初哈佛的招生官想表达的意思。以费曼和盖尔曼这两位富有魅力的教授为首的加州理工，阻滞了对渐进自由的发现和由此推出的一切的研究。在伯克利，另一位领袖型的教授起到了相同的作用。

在 1948 年，费曼、施温格、朝永振一郎和戴森发现了融合量子力学、狭义相对论和电磁学的正确理论。这个现在被称为量子电动力学（QED）的理论建立在量子场论的基础上。它作出了无比精确的预言。因此，人们很自然地开始尝试寻找同类型的理论描述核力。这个理论必须能处理更强的耦合：因为量子电动力学的耦合常数是方便做微扰论的 $1/137$ ，而强力的耦合常数则接近 1。

但用这种方式来描述强力看起来并不成功。因此整个二十世纪六十年代人们都在寻找新的方法。⁷ 有一种受到广泛关注的方法被称作自举；在这个架构里不需要场，而仅仅只需要几条基本原理，比如洛伦兹不变性和交叉对称性。一些实验数据支持了这一理论，尤其是大量重激发态能谱的发现。自举方法的领导者是伯克利的杰弗里·丘。据说他对这一想法的狂热非常虔诚。即使是众所周知极其坚定的场论家，比如大卫·格罗斯和史蒂夫·温伯格，在来伯克利做研究生或博士后的时候，都会害怕提到量子场论。

自举确实带来了一些很有意思的工作。它可以被阐述成双关共振模型，而这最后导出了弦论。但是这个理论太超前了，而且它回答的问题是错误的。因此，对于渐进自由的发现和对强相互作用的理解并没有在伯克利完

⁷回顾 1967 年索尔维会议是件很有趣的事。当时有些猜想相当激进，比如猜想时空在核子内部被破坏了。但几乎没有猜测接近真相。

成，而是发生在东海岸。即使四年之后，当我寻找导师时，依然几乎没有人在研究量子场论。一个可能的导师对我说：“你当时应该去伯克利。”另一位告诉我他已经不再指导学生了。但幸运的是，我还有一个选择。

3.3 曼德尔斯塔姆

如果说杰夫·丘是自举的精神领袖，那么斯坦利·曼德尔斯塔姆便是它的引擎，解决了亟待解决的困难问题。当世界由自举转向量子场论时，曼德尔斯塔姆略微花了一段时间就赶了上来，但他依旧保持着他自己的强悍风格。曼德尔斯塔姆的风格绝不是从简单的问题学起。他会选择那些最为重要和最为困难的问题。⁸

在量子色动力学中，他主攻夸克禁闭的本性的问题。量子色动力学的基本场是夸克和胶子，它们并没有在实验上被直接观测到。相反，我们看见了介子和强子，它们是夸克的束缚态。出于某些原因，夸克被禁止逃逸并作为单个粒子而被观测到。渐近自由提供了一个思路：长程下增大的耦合束缚住了夸克。但我们需要更加明确的解释。

曼德尔斯塔姆看似偶然的想法受到了超导的启发。在超导体中，迈斯纳效应会将磁场排斥在超导体外。如果将磁场源放入超导体中，磁场将会被限制在管内并线性增长。为了禁闭类似电场源的夸克，我们需要一种对调电磁场的“对偶超导体”。实际上，这暗示了一种对偶对称性，也就是变量变换后电磁场理论的等价性。

曼德尔斯塔姆看起来是我唯一的选择，于是我问能否同他一同做研究。也许是因为刚刚接手了另外两个学生，他犹豫了一会，但最终同意了。

学生们一般都会以一个用来热身的小问题为出发点。这对学生而言可以进入导师研究领域，而对导师而言则能衡量学生的水平。然而因为曼德尔斯塔姆只研究最困难的问题，他自然也会把同样的问题布置给学生。我的热身问题是找出一个具有同时带有电荷和磁荷的粒子的量子场论。而这同已知的、粒子只带电荷的量子电动力学是冲突的。

⁸从我的个人倾向来说，也作为一个例子，我也会这么做。弗兰克·维尔切克有一次和我说：“乔，重要的问题不一定很困难呐！”

我没能解决这个问题，同时向曼德尔斯塔姆论证了为什么这是不可能的。在一个同时存在电荷与磁荷的理论中，狄拉克证明了量子力学要求电荷 e 与磁荷 g 需要被量子化： $eg = 2\pi$ 。在量子电动力学中， $e = 1/\sqrt{137}$ 非常小，因此我们可以在 $e = 0$ 附近用微扰论作展开。但当 e 趋向于 0 时， g 会趋向无穷大。在这一极限下，我们没有办法计算，甚至无法知道理论是否还有意义。

其实还是有解决方法的，虽然我并不知道这是否是曼德尔斯塔姆最初的想法。方法要求电和磁的基本单位不同：电荷是通常的场的量子，而磁荷是孤子——有点类似多粒子的束缚态。我不清楚这是否超过了问题的范畴，但它牵涉了太多对我来说新颖的想法了。

事实上，现在看来每种带有电荷的量子理论一定同时带有磁荷。我也许不是第一个清楚的表述这条原理的人，但我在 D-膜中已经非常频繁的使用它了，当然接下来我会再次提到它。那传统的量子电动力学呢？我可以胜券在握地打赌，其实也有磁荷存在其中。但现在赌局的双方都没法收回赌本，因为事实需要到普朗克尺度才能真正确定。

因此曼德尔斯塔姆给了我另一个课题作为我学位论文的主题。课题的目的是构造特·霍夫特涡旋算子。同之前的问题一样，这是曼德尔斯塔姆试图用电磁对偶理解禁闭的宏伟蓝图的一部分。肯·威尔逊已经证明了我们可以通过测量特定算符，区分规范理论中不同的态，尤其是那些禁闭态。这个通过矢势沿一维路径做积分定义的算符，后来被叫做威尔逊圈。除了曼德尔斯塔姆以外，杰拉德·特·霍夫特磁矢势，威尔逊算符也应该有其对偶。我的目标就是补足这个想法的细节。

于是我在一年间大约每周都要同曼德尔斯塔姆就此讨论一次。曼德尔斯塔姆总是很乐意花时间讨论。但他也是个很难跟随的导师，因为他的想法是深邃的，但他的解释却经常是玄妙难解的。我从没搞清楚自己是否取得了进展。有时候，听了问题之后他会转向黑板先思考几分钟。我从来都不知道这到底是表明我提了一个好问题还是蠢问题。

我一直觉得我的课题并不成功。但过了很久之后我首次回顾时，我意识到自己基本上解决了问题。我们需要的算符，物理效应仅出现在一维，并且同时还要有奇异的规范部分作用在三维。但我还混入了许多不相关的

东西。我在那时没有真正掌握当时尚未出现在标准教科书中的路径积分。所以我用了正则化方法，而这对这类问题显得非常笨拙。

相当令人震惊的是，我当时关注的中心问题直到25年后才被安东·卡普斯京彻底的解决。这需要一些新的概念，比如当时还没被应用的共形不变性。他同时还能处理非阿贝尔的情形。这可真是典型的曼德尔斯塔姆，他的想法超前了多远哪！另一个例子是，现在人们学习朗兰兹纲领时最先读的文章，就是曼德尔斯塔姆40年前让我阅读的那篇。

还有一个令人震惊的例子是11维超引力。我清楚地记得，有好几次我们在讨论量子场论和夸克禁闭时，曼德尔斯塔姆会给出一些关于11维超引力和弦论的评论。这对于在4维量子场论中挣扎的人，或认为弦论只是过去的某种人造理论的人来说，是非常令人印象深刻的。我并不知道该怎么应付，只能等着曼德尔斯塔姆结束他的空想。但几年后弦论重新回到了前沿研究的中心，因此曼德尔斯塔姆又一如既往的领先于时代了。

3.4 同事及来访者

曼德尔斯塔姆当时的另外两名研究生是苏珊·埃尔玛·穆尔和奥马尔·卡伊马克贾兰。曼德尔斯塔姆的每个学生都有不同的课题，但这些课题都被量子场论和量子色动力学以各种方式联系在一起。苏珊的课题是基于态的威尔逊圈模型，找到重夸克的变分态。曼德尔斯塔姆在自己的工作中从不跟随大流，而他指导学生时也一样。据我所知这对学生来说很有挑战性。以穆尔为例，她完成论文后就改变了领域——先是用了几年时间尝试进军演艺界，之后成为了一名医生。

卡伊马克贾兰的研究生课题是试图理解希格斯相的非阿贝尔性质。提交论文后，奥马尔去了锡拉库扎，同锡拉库扎研究组的成员们合作完成了不少题目。他的一些文章得到了很多引用，比如关于手征拉格朗日量、质子衰变和强耦合希格斯动力学的几篇。但令人悲伤的是，卡伊马克贾兰在那段时间被诊断出患上了癌症，很快就去世了。

其中一个著名的同学是丹·弗里丹。在弗里丹的博士讨论班上，他证明了广义相对论的基本方程——爱因斯坦场方程，可以被主导量子场论能标的贝塔函数这一基本概念重新表述，这使我十分震惊，我相信别人也一

样。我那时并没有看出这意味着什么，但几年后这被视作弦论的中心思想之一。（我并不觉得弗里丹那时知道这个联系——至少他当时在论文中没有提到。）他同时还教给了我一个那个时代量子场论教科书上从来没有出现过的重要概念。这个概念是算符可以分为“相关”“非相关”和“边界”算符，而这在系统的处理量子场论时至关重要。

弗里丹在寻找导师时也碰上了一些困难，但他通过在物理系找了挂名导师，而实际上与数学系的伊西多·辛格一起工作而解决了问题。⁹ 辛格是位著名的几何学家，因阿蒂亚-辛格指标定理而享有盛名。他刚开始对量子场论有浓厚的兴趣，认为这将会给数学和物理带来丰富的联系（而这在之后的发展被弦论进一步加速了）。因此他很喜欢讨论量子场论，对我而言就像个很好的参谋。

另一位很有帮助的教授是科尔库特·巴尔达茨基。同曼德尔斯塔姆一样，他也正在从双关模型向量子场论过渡。他也许不像曼德尔斯塔姆那么深入（几乎没有人能做到这一点），但有些时候清晰的阐明比深入的理解更有用。我记得我当时还经常接受两位教授的建议：我对大卫·杰克逊的印象是他的那句“仅仅聪明是不够的，你还需要努力”，之后我还会再提起他那本著名的教材。这确实是个好建议，考虑到我的缺乏常识，就显得更重要了。另一位是伯克利附属实验室劳伦斯伯克利实验室（LBL）的一位新晋教授罗伯特·卡恩。他同样帮助我填补了常识的空白，尤其是在我寻找新工作的时候。此外，LBL 当时还有一个正在成长中的主攻场论和粒子唯象学的博士后小组，包括豪伊·哈伯、埃利泽·拉比诺维奇伊恩·欣奇利夫等人。他们带给了我很多活力。

来访的报告人带来了许多伯克利没有的新想法，它们现在还令我记忆犹新。来自康奈尔的一位学生史蒂文·申克思考的既深又广，他教给了我一些量子场论和格点规范理论中的一些关键点。来自哈佛的知名量子场论家和教学好手西德尼·科尔曼讲到了磁单极子，而我很高兴我独立的发现了他的一些结果。来自斯坦福的伦尼·萨斯坎德，讲了所谓的“热夸克汤”，之后我还会多次提到他。当时量子场论同高温间的联系对我而言非

⁹同时期另一位伯克利学生安迪·施特罗明格（之后我们会更多的提到他）解决的方法是转学去了麻省理工学院。

常新颖，但他类似费曼风格的报告是最值得回忆的部分。另一位斯坦福的来访者，博士后斯图尔特·拉比带来了人工色，也就是用强耦合取代希格斯场的想法。

我最后要提起的来访者是爱德华·威腾，他当时是哈佛的博士后。威腾向我问了几个关于曼德尔斯塔姆的课题的探索性的问题。我感到很震惊，其一是因为他是我遇到的第一个理解曼德尔斯塔姆那些非传统和技术性方法的人，其二是因为他比我这个研究了好几年的人理解的更深。我之后了解到，大家都对威腾有这样的反应。

3.5 多萝茜

我本想写一部科学意义上，而非个人意义上的自传。我仅仅会在给出一般背景时，才加入一些私人的东西。但是，我必须告诉你们我和多萝茜的故事，在来到伯克利的那年我遇见了她，五年后我毕业时我们结婚了。多萝茜认识一些在加州理工读书的人，包括一个兄长和一个前男友。她原先是加州理工附近的西方学院的学生，但我们在来到伯克利读研究生之前从未见过彼此，她在德语系就读。我们实际上是通过另一个加州理工的校友认识的，这个校友在伯克利很积极的组织排球游戏和派对。我确定自己喜欢多萝茜，并且用了好几个月的努力让她相信了这一点。提交了毕业论文的几天后，我来到了多萝茜大多数家人居住的夏威夷，我们在那儿结婚了。

每次我遇见汤姆·汤布雷洛时，他都会提醒我选择多萝茜是多好的决定。虽然在加州理工学习了一些社交技巧，但我仍有很多棱角。和多萝茜在一起，这些棱角被渐渐抚平了。

我总是害怕她问起我为什么会爱上她，因为我能想到的第一个回答是：她是我所知道的最理智的人。这看起来并不浪漫，她也还有很多其它美妙的特质。但我们在一起度过了这些时间之后，我想，如果要列举伴侣的品质，对我来说理智也许是最重要的一条。¹⁰ 所以在我们各自在研究生院努力工作时，闲暇时间则一起享受美食、排球、滑雪，与朋友们和家人共同

¹⁰她对我的回答是，”因为你总是能让我开怀大笑。“我猜，笑容与理智是很好的互补。

度过。

3.6 其它物理

在研究曼德尔斯塔姆的课题的时候。我把我大部分的时间用在理解量子场论上。我阅读了我能找到的所有参考文献。曼德尔斯塔姆有一本篇幅较短的教材。这篇文章很好地补充了比约肯和德雷尔的书，放弃了许多技术问题以便将注意力集中在物理上。西岛的一本书也有一些优点。斯特里特和怀特曼的《PCT，自旋、统计和其它》也很著名，之后我还会讨论。

重整化理论——即为了得到物理的结果而消除无穷大的方法，相关的经典文献来自波戈留波夫和希尔科夫，但非常冗长且技术化。重整化在波戈留波夫和希尔科夫的文章中，同在比约肯和德雷尔的教材中，也几乎是以相同的方式展现的。它大体上是一个组合学的论证，将费曼图在每一阶求和，并证明无穷大在每一阶都会被消除。但这个阐释有一些困难，证明的一个早期版本对六圈及以下阶数的圈图成立，却在七圈却失效了。我感到很苦恼，因为如此关键的原理要依赖于这么复杂的一串证明；当弗里丹和申克向我展示了重整化的很大一部分不过是量纲分析之后，我的苦恼加剧了。

但除了这个令人痛苦的问题，量子场论还有大量奇妙之处。特·霍夫特和玻利亚科夫发现了量子场论中的磁单极子，而玻利亚科夫和他的合作者发现了瞬子及其非微扰效应。科尔曼（重新发现了凝聚态物理已有的结果）证明了玻色子和费米子，这两种不同的量子统计，在 $1+1$ 维下可以互相转化。他还写出了一系列关于上述话题同其他量子场论话题（对称性自发破缺，大 N 展开，拓扑孤子，……）的精彩综述。他的演讲首先出现在几年里的埃里切暑期学校上，后来被收集整理到他的著作《对称性面面观》之中，这些讲义在70年代里很好的填补了通常教学的空白。史蒂文·温伯格的一些文章也是很好的资源，它们是如此的清晰与系统，显得十分优美。

3.7 然后继续前行

过了五年，到了写毕业论文的时候了。对理论物理方向而言，毕业论文的传统是简单的将同导师或其他人合作完成并发表的论文拼起来，同时加入一些综合性的概括。但我遇到了一个问题：我完全没有发表过文章（同汤布雷洛完成的本科阶段的论文不能算在内）。这种情况非常罕见。仅有的类似的例子是伟大的肯·威尔逊，他也度过了几年没有论文的日子。但当时他在忙于重铸量子场论的本质。而我的糟糕处境只能归咎于自己缺乏常识、没有一丁点合作意识，以及一位在这些方面和我半斤八两的导师。总之我拼凑出了 130 页自己对涡旋算子和其它相关的场论问题的理解。但是这篇文章对任何其他读者来说都没有帮助。

多罗茜还需要两年时间来完成她的博士学位，所以尽管我也申请了其他几打做类似物理的去处，我的第一选择还是斯坦福。没有发表文章并没有那么致命。研究同行的推荐信实际上给出了更多信息。我也很确定我的“教父”鲍勃·卡恩的几通电话在消除对申请人没有论文这一问题的疑虑中扮演了重要角色。最终，在经历了等待其他有竞争力的候选者们做决定的、折磨人的几周后，我最终如愿以偿地获得了职位。

总之，这对我来说是一次磨练。我曾经习惯于站在顶点。但我有好几个伙伴已经发表了重要的工作（有些是同导师合作完成的，但很多都是他们独立完成的）。这些人里有丹·弗里丹、史蒂夫·申克、马克·怀斯、约翰·普雷斯基尔（他还获得了著名的哈佛青年奖学金）、拉里·亚夫、史蒂夫·帕克、苏巴斯·古普塔，还有年长一些的爱德华·威腾。他们之后大多都成了我很好的朋友，有一些成为了合作者，但这对当时的我来说是一段艰难的体验。

博士后阶段对年轻学者来说非常宝贵，他们可以接触各种研究物理的方式。对于本性缺乏常识的我来说，我接下来的两站，斯坦福和哈佛，就极其重要。

4 斯坦福直线加速器中心 (SLAC) / 斯坦福大学, 1980-1982

4.1 从斯坦福直线加速器中心起步

我的博士后工作地点实际上是在斯坦福直线加速器中心，距离物理楼大约两英里。尽管这是一个实验室，当时大部分的理论工作者也被安排在这里。理论主任是锡德·德雷尔，他是那本我花了很多时间学习的量子场论教材的作者之一。我跟德雷尔初次见面的情形几乎和九年前我跟T索恩初次见面的情形一样：“您好，德雷尔教授。”“你叫我什么？”所以那之后我就称呼他锡德了。那时，锡德密切地参与军备控制项目，但也与同事海伦·奎因和马尔温·魏因施泰因合作研究一些物理，主要是关于格点规范场论的一个变种。虽然他们与我的兴趣并不接近，但他们是一个友好的团队，跟他们交流很愉快。那里还有一位风趣且精力充沛的教授斯坦·布罗德斯基，但他当时的研究兴趣也与我的不同。然而，20年后我重新记起了他的研究兴趣，并最终启发了一系列论文。弗雷德·吉尔曼也在那里，他指导马克·怀斯做的研究，使得后者成为了哈佛研究学会的初级研究员。然而弗雷德·吉尔曼的兴趣主要集中在弱相互作用的现象学上，这和我兴趣同样不相近。

我还应该提到另一个博士后斯蒂芬·帕克，他后来也做了很多重要工作。我们经常一起讨论物理，也一起社交，但是没有合作研究。本来与他合作研究应该是自然的，但是当时我还没有合作意识。博士后组里的其他成员还有杰夫·鲍德温，伊夫·科瓦奇和汤姆·韦勒，但他们主要做现象学。

博士后阶段是学习新事物的契机。一般来说，一个人不应该在这个阶段仅仅继续在他的博士论文方向进行研究。而我当然又做了这不该做的事——在一段时间里。我相信我可以证明曼德尔斯塔姆想论证的事情——夸克以无限的强度被禁闭。我学过量子场论中的几个可以被严格证明的重要结果。最好的例子是科尔曼定理：在 $1+1$ 维中，自发对称性破缺被禁止。我认为在 $3+1$ 维中，类似的机制会禁止自由夸克的存在。斯特里特和怀特

曼对PCT定理(宇称、电荷、时间同时正负变号, 观测量不变)和自旋-统计定理的证明, 也显示了严格证明的威力。

从这当中, 我确实收获了一篇小论文。特·霍夫特对电磁守恒流的可能相所做的分类令我非常感兴趣。有一个格点规范场论模型似乎与这个分类存在矛盾。这个矛盾不应该存在, 而进一步研究也确实揭示了修改后的理论拥有两倍于常规的电磁守恒流。当这些更多的守恒流被考虑进去时, 特·霍夫特的条件被恰当地满足了。为了理解那些相, 人们必须确保所有守恒量都被包括进去。

这是一篇不错的小文章, 虽然不是特别重要。尽管如此, 在35年中, 它也应该得到大于3的引用量。但我又花了很长一段时间才意识到, 不仅写论文是重要的, 给学术报告同样重要。这不只会让人们注意到你的工作, 更会强迫你自己对工作做出清楚的阐述和进行透彻的思考, 并得到宝贵的反馈。即使在八年之后, 对第一篇关于D-膜的论文, 我也没有做任何报告。如果我做了, 那么历史可能会前进得更快。

但是几个月后, 我没有取得真正的进展。此外, 我意识到, 在对量子场论的研究中, 试图进行严格证明通常不是能带来丰富产出的路数。乍一听上去, 严格证明好像当然很好, 因为量子场论的基础本质明摆着仍是未知的, 做严格化似乎能为我们提供理想的基础。但是, 当我看到其它的证明工作时, 我意识到在很多情况下, 人们可以理解的东西远远多于他们可以证明的东西。例如玻利亚科夫论证了在 $2+1$ 维中, 瞬子导致夸克禁闭。这个论证只有几行字, 并且令人信服。但是格普费特和麦克在1981年对此结论的证明总共有100页。看起来, 对于 $3+1$ 维中的夸克禁闭的证明几乎可以确定会更长。我的兴趣是物理学, 是那个简单的物理论证, 而不是100页的细节。另外, 特·霍夫特的工作表明, 证明夸克禁闭可能是困难的。那时他正在研究量子色动力学的相结构。他指出, 如果夸克的自由态和禁闭态之间存在相变(似乎确实存在), 那么就不可能有一个简单的原理说夸克总是禁闭的。所以我也不是完全没有常识, 我开始四处寻找其它方向。

4.2 萨斯坎德

斯坦福直线加速器中心大约每周都会有一次“旋风”光顾——伦尼·

萨斯坎德和访问学者与资深的博士后（威利·菲德勒、彼得·尼勒斯和迪米特里·斯科利罗）的研究组会聚集在萨斯坎德的小办公室里，谈上大半天的物理。与大多数被安排在直线加速器中心的理论工作者不同，萨斯坎德的正式职位在斯坦福大学，但他在直线加速器中心也有一个办公室。

那时我是极端内向的，而萨斯坎德极端外向。即使学会了合作，我的风格仍然更倾向于，可能讨论一个小时，然后在接下来几天里独自思考。不过萨斯坎德似乎能够通过不间断的说话来工作，并以这种方式取得进展。在我认识他的这些年里，他几乎总是被年轻人包围着，讨论困扰他的难题。

虽然我们的个性差异很大，但我们对物理的兴趣是一样的：我们想理解基本原理。我们两人都不是因数学自身的缘故而被数学吸引：我们只使用不多不少足够解决手上问题的数学。当然，那时我自己的工作风格还在形成过程中，并且肯定受到了萨斯坎德的影响。¹¹

4.3 超对称

当我到那时，超对称正在让萨斯坎德和朋友们兴奋。所以 I 将从对大统一理论和超对称的简短回顾讲起。

在我到达加州理工学院的前后，强相互作用和弱相互作用都被人们理解了。与电磁相互作用一起，这三种力（或者四种，如果你将希格斯场算作一种力的话）似乎解释了所有的粒子物理，这个理论被称为“标准模型”。当然，自然界中还有引力，但是它在粒子尺度上强度极弱，可以暂时被忽略。所有三种力都基于量子场论这一框架，更确切地说是规范场论。这些和电磁场理论是类似的，但是场被拓展成了矩阵： 3×3 矩阵描述强相互作用， $2 \times 2 + 1 \times 1$ 矩阵描述弱电相互作用。

这些相互作用之间的相似性暗示着它们可能有更统一的起源。格奥尔基和格拉肖在1974年注意到，这三种相互作用可以很好地被放进一个 5×5 矩阵，这就是所谓的大统一理论(GUT)。此理论至少做出了两个预言。一

¹¹最近迪米特里·斯科利罗注意到，我关于微扰弦论的工作使他想起了陈省身。是的，陈省身的一本很薄的书是我喜欢的几本数学书之一。虽然如此，我也没能把它读完。

个是电磁相互作用和弱相互作用的比例(弱混合角), 这在很高精度上与实验符合。另一个预言是质子衰变。标准模型所具有的对称性要求重子数守恒, 但在 5×5 理论中并不存在此限制。这些场在类似于 $qq \rightarrow \bar{q}l$ 的过程中起介导作用, 将三个夸克变成一个轻子。质子衰变虽然还从来没有被观测到过, 但似乎是很有希望被发现的。

超对称(SUSY)是另一个想法, 它很好地补充了大统一理论。大统一理论中, 在自旋0(标量)、自旋1/2(费米子)、自旋1(规范场)内部可以有对称性, 但是在不同自旋之间不可以存在对称性。人们可能会预期, 一个完整的理论应该能联系不同的自旋。一个定理表明, 这个想法与量子场论是相容的(这不是一个平凡的结果)。所以在我即将离开伯克利的时候, 人们正开始探索这个理论。

实际上, 超对称解决了大统一理论里的至少三个问题。第一, 大统一理论预测的弱混合角与实验结果仍然有一点偏离。在添加超对称之后, 对弱混合角的预测结果与实验符合得更好了。第二, 当时对质子衰变的寻找逐渐开始排除大统一理论的预言, 但在添加超对称之后, 能量标度变得更高, 因此质子衰变速率大大减小了。第三个问题更具理论意义。在标准模型中, 所有的相互作用都是无量纲的, 除了那个对希格斯场赋予质量的相互作用。量子修正(圈图效应)会自然生成一个很大的质量尺度, 并把它赋予给希格斯场。这是大统一理论的能标, 比人们预期的标准模型中的能标要高很多。超对称不仅会导致仅源于对称性的抵消, 它也可能消除对希格斯场的质量修正。当然, 超对称预言, 自然界中存在的粒子种类是已观测到的两倍。但是由于超对称的破缺, 这是自洽的。

来自未来的叙事: 对于大部分篇章, 我都按照时间顺序写作, 但是这里需要一个评论。众所周知, 在过去40年里到今天为止, 超对称都没有被发现。事实上, 唯一我认为“基本的”发现就是宇宙学常数, 我会在后面谈到它。但是现在让我们重回过去的黄金时代, 那时一切似乎都是可能的。

4.4 D -项

正是超对称对量子修正的消除引起了很多理论物理学家的兴趣, 包括萨斯坎德和他的朋友们。他们对 D -项特别感兴趣。 D -项是超对称理论中的

一类特殊的质量项(更常见的是 F 项)。¹² 威腾的工作表明, 在 高能区, 对任何被嵌入非阿贝尔理论的超对称理论, 对 D -项的量子修正会互相抵消。如果整个故事仅仅是这样, 将意味着低能区的物理学依赖于极高能区的能谱。这在量子场论中不是常态, 并可能会导致重要的后果。

因此萨斯坎德和朋友们聚在办公室里, 思考怎样计算对 D -项的量子修正。他们很高兴有我这个新人来听。对于已经自学过超对称理论中的主要计算的我来说, 这显然是一个令人振奋的方向。很快, 我从保持沉默变为提出建议。不久之后, 我们解决了这个问题, 我做出了实质性的贡献。

我们的结果是, 对 D -项的量子修正为零的条件是, 能谱中的所有粒子的荷的总和为零, $\text{Tr}(Q) = 0$ 。这是一个简单的结果, 只有五页。这意味着人们不需要任何新的在 高能和低能之间的连接。这是我对理论物理学的第一个真正的贡献, 也是我首次与其他人合作进行科学研究。

4.5 超对称破缺

几个月后, 拉比, 尼勒斯和菲施勒去了别的地方担任教职。萨斯坎德和我继续定期讨论, 但我们心中都没有一个具体的课题。马克·怀斯在斯坦福直线加速器中心的一个报告改变了这一情况。马克怀斯, 和马克·克劳德森、路易斯·阿尔瓦雷斯-高梅以及其它几个研究组一起, 着手构造起现实的超对称物理模型。

萨斯坎德看到, 在他们的模型里, 人们可以很方便地研究三个重要能标之间的关系。第一个是观测到的弱相互作用的能标。第二个是玻色子和费米子的能量差异。如果对量子修正的消除要成立, 那么这个差异不能大于弱相互作用能标。第三个是由超对称自发破缺设定的能标。萨斯坎德注意到, 在怀斯的模型中, 玻色子和费米子的能量差异与超对称破缺能标有差别, 这一差别由参数 $\alpha = \text{超对称}/(\text{玻色子}-\text{费米子})$ 给出。萨斯坎德问怀斯这个参数是否可以很大, 怀斯说可以。

萨斯坎德想知道这种情况是否真的稳定, 或者量子修正是否会破坏这

¹²非专业人士请勿将它与D-膜的D混淆! 请注意, 字体是不同的。D是狄利克雷的缩写, 而据我所知, D 是随意选择的一个符号。

些能标间的分离。幸运的是，我能够做出实质性的贡献。这种涉及几个不同能标的物理问题在今天很常见，但在当时是相当新的。我用在思考量子场论上的那些时间，使得我为解决这个问题做好了准备。¹³

所以我们进行了分析，并且发现多能标结构确实是稳定的。这意味着造成玻色子和费米子能量差异的原因可以出现在更高的能量尺度例如(弱相互作用能标 \times 大统一理论能标)^{1/2}，甚至可能是(弱相互作用能标 \times 普朗克能标)^{1/2}。的确，连接超对称与引力这一想法在接下来的几年里引领了许多工作。

做这个课题的一大乐趣是撰写论文。萨斯坎德是唯一的与我实时写论文的合作者。我们两人坐在他的客厅里，每人都有一小杯葡萄酒，一行一行地写论文。

之后，我想做出一些更明确的模型。但是，由于已经了解关键点，萨斯坎德对细节没有兴趣。所以我自己写了两篇论文。这两篇论文处理了之前模型中的规范费米子的能谱和标量势的能谱。回顾这些早期的论文，我记得一些好的点子，今天它们仍然令我愉快。

我们花了一些时间构造超对称的格点理论。我们尝试了一些方法，我也将一篇论文完成了三四十页。可惜超对称和格点这两个结构难以相容，我们没有完成这项工作。其中的一些想法后来被重新发现并且被进一步研究，但对于把握超对称理论中丰富的强耦合动力学来说，这个方法似乎不是最佳的。

所以，在我离开后的那一年，萨斯坎德接下来写的几篇论文都是关于引力的。这里面包括他与汤姆·班克斯和迈克尔·佩斯金合作的著名的工作，指出了信息在黑洞中的丢失会导致巨大的能量不守恒(正如斯蒂芬·霍金所提出的)。

4.6 时间到!

虽然两年是那时一期博士后的标准时间，但实际上只有1.25年，因为

¹³几年后，史蒂文·温伯格评论说，他可以分辨这篇论文中的哪些部分是由我完成的，哪些部分是由萨斯坎德完成的。我很高兴，因为萨斯坎德深远地影响了我对这个问题的理解。

人们必须要在秋季申请下一份工作。那时我有三篇论文：博士论文的精简版(写于我离开伯克利时)、不为人知的关于格点相的论文、以及五位作者合写的关于 D -项的论文。即使对于一位第一次申请的人来说，这份论文列表也是不起眼的，更不用说对于第二次申请的人了。然而，似乎我再次给我写推荐信的人留下了深刻印象，以至于我在哈佛拿到了一个位置。我想在东海岸度过几年，接触新的想法和新的人。

多罗茜刚刚取得了她的博士学位。在她的领域，接下来做几年短期教学是普遍的情况。她申请并获得了麻省理工学院德语教学的短期职位。

婚礼之后不久，我们从伯克利回来，跳上我们的达特桑B210汽车，驶向东海岸。途中，我们在阿斯彭物理中心度过了几个星期。正如任何到过那里的人所知，那里是科学和娱乐的卓越结合。我在那里第一次见到了许多优秀的科学家。实际上，我和玛丽·K·盖拉德、拉里·霍尔、布鲁诺·朱米诺、弗朗西斯科·德尔阿吉拉、以及格雷厄姆·罗斯合作写了一篇论文。这是一个杰出且多样的组合。我们在阿斯彭花时间讨论我们共同的兴趣——超对称破缺模型的能标。两周后，我们感觉有了足够的内容可以写出来。

即将在哈佛指导我做研究的西德尼·科尔曼也在阿斯彭，所以我们提早开始了对量子场论的讨论。西德尼是步行和远足的狂热爱好者，也是阿斯彭的常客。他给了我们这些首次访客一些关于怎样到达附近一万四千英尺高的山峰的建议。我们误解了他的指示。这差点让多罗茜、我、汤姆·韦勒和劳伦斯·霍尔和一个大石头一起从堡垒峰上翻滚下来。

离开阿斯彭之后，我们经历了一段难忘的去往东部的旅行：穿过中西部的、炎热的驾驶(多罗茜仍然开玩笑说这差点使我们离婚)；加州人不曾见过的壮观积雨云；与我的合作者拉比和他的妻子在安娜堡停留；驱车穿越尼亚加拉大瀑布；以及在剑桥安顿下来的过程中，与彼得·加利森(粒子物理和历史学初级研究员)共同度过的时光。

5 哈佛, 1982-1984

5.1 怀斯

我想从马克·怀斯这位对我帮助很大的导师谈起。马克是一位伟大的物理学家的同时也是一个很好的人。作为一名学生, 他早已在弱相互作用物理领域里做出了重要的工作, 而作为一名博士后他将会在超对称和宇宙学中取得重要的结果。为人方面, 他慷慨而又谦和, 同时也极具幽默感。几年前当他60岁的时候, 大多数功成名就的科学家会选择通过一个重要的会议庆祝生日, 但Mark 却坚持以租滑冰场玩冰壶的方式庆祝。

我第一次与怀斯见面时的场景大概就像这样: “所以你就是波尔钦斯基。我早就听说你这家伙从来不写文章, 我们来一起写一篇吧”。然后我们就写了一篇。不像曼德尔斯塔姆, 萨斯坎德和我感觉中自己的表现, 怀斯不会坚持每篇文章都要很重要。当然, 许多最后成了重要的文章, 但是他总是乐于去思索任何物理领域中的问题。在这里他的困惑主要在于处理超对称破缺理论中玻色子和费米子质量的问题。他们的质量不需要相等, 但是在许多模型中有一个关于质量平方的求和法则, 大概就是 $\sum_i b_i^2 = \sum_j f_j^2$ 。这在许多树图近似的模型和少数其他种类模型中就有出现, 而问题则是这个法则有多普遍。所以我们分析了这个问题——这是我们各自技能的一次完美融合——然后发现求和法则适用于一阶的超对称破缺的情形, 并且在其它的相互作用中是严格成立的。

这是一个很不错的结果, 从完成, 引用, 到刊印只花了两个月的时间。但是, 它却没能产生什么影响, 因为其对大多数有趣的模型并不适用。事实上, 在35年间这篇文章仅被引用了3次, 每次我们见面的时候怀斯想起这件事还都会忍不住发笑。但显然我通过了, 他说我们应该去寻找更大的问题。

5.2 科尔曼

在哈佛只有三位高能物理领域的终身教授, 而史蒂文·温伯格已经离

开去了奥斯汀了。¹⁴ Glashow与学生接触不太多，所以西德尼·科尔曼和霍华德·乔吉各自指导着一半的学生和博士后，并以‘科尔曼家’和‘乔吉家’的形式每周聚集一次。他俩都很随和，喜欢与学生和博后打交道，并且对时间都很慷慨，尽管我认为乔吉的行政任务更加繁重。作为一名正式的学生，我到了科尔曼家。但是当乔吉家有自己感兴趣的方向时，我们也可以去乔吉家，并且也确实这么做的。

科尔曼的写作和他的为人一样令人感到愉悦。他每天下午一点准时到办公室，一直待到很晚。他总是时刻准备与人交流，但是每周的交流高潮是家庭会议。会议有时是一个学生或博士后展示其工作以得到批判性建议，或者科尔曼侃侃而谈一些他自己的观点，或进行一次全员参与的讨论。

科尔曼经常带着他的学生和博后在附近散步，或者去新罕布什尔州的莫纳德诺克山徒步旅行。他也常常和我们一起共进晚餐。他还喜欢和我们说他去年刚刚结婚，买了自己的第一套房子，学会了骑自行车，被诊断出得了糖尿病之类的事情。我同他一起去了一个他早期的骑行路线，帮助他越过一些在剑桥的困难弯道。

我觉得科尔曼没有从事超对称领域的研究是一件不幸的事情，因为这意味着我们不能期待得到他对这个领域的洞见。但是或许是他觉得已经有足够多的人从事这一课题了，而他觉得在纯粹的量子场论研究中依然存在一些有意思的问题。确实，我还在那里的时候他拓展了他对磁单极子的整体见解，与他的一个学生研究特·霍夫特反常抵消，发现了令人惊喜的一类新的拓扑孤子。

这其中的最后一项在潜在的粒子和宇宙学模型中影响广泛。我在这个工作中扮演了一个小角色。科尔曼乐于描述他的构造，这基于一个他记为 q 的荷，当他描述起这项圆满的工作的时候，他总是提起这个 q 。然后他说：“我需要为它起一个好的名字。”听了他的长篇大论之后，脑海中立即浮出唯一可能的名字：Q-ball（就像台球中母球（cue ball）那样），这也就成了它的名字。

¹⁴在温伯格的方块状的1980年办公室电脑上有一段标记：“与表面上相反，这里不是史蒂文·温伯格（的办公区）”。写下这段话可能是保罗·金斯帕格

5.3 经营马戏团的孩子

有时我们会有一群年轻人，他们如此优秀以至于主导了这里的学术秀。而这就是这里的情况。Sidney非常优秀，但是对最新的轰动并不感兴趣。但这不只是学生和博士后营造起来的。我依然惊奇于这个团体的卓越，他们当中的许多人现在仍然是领导者。

所以在这一节中我将简单的列举在这个卓越群体中的成员（那些我还记得的），他们现在在哪里，以及他们在干什么。

非终生教职职员：约翰·普雷斯基尔(加州理工), 劳伦斯·霍尔(伯克利, 唯象学)

初级职员：马克·怀斯(加州理工), 保罗·金斯帕格(康奈尔, 量子场论和arXiv的创始人), 劳伦斯·克劳斯(亚利桑那, 宇宙学和公众演讲家/作家), 路易斯·阿尔瓦雷斯-高梅(CERN, 场论和弦论), 彼得·加利森(哈佛, 物理和历史)

博士后：¹⁵ 塔德乌什·巴拉班 (罗斯大学, 数学物理), 史蒂文·金 (南安普顿, 唯象学), 史蒂文·夏普(华盛顿, 格点), 以及我。

研究生：¹⁶ 罗伯特·布兰登贝格尔(麦吉尔, 宇宙学), 安德鲁·科恩(波士顿, 弦论和唯象学), 本·格林施泰因(San Diego, 唯象学), 大卫·卡普兰(华盛顿, 量子场论和核物理), 格雷格·基尔卡普(俄亥俄州立, 格点), 大卫·科索尔(萨克雷, 振幅), 阿尼什·马诺哈尔(圣地亚哥, 唯象理论), 罗伯特·默威尼(南佛罗里达, 格点), 伊恩·麦克阿瑟(西澳大利亚, 弦理论), 格雷格·穆尔(罗格斯, 数学物理和弦论), 安·纳尔逊(华盛顿, 唯象学), 菲尔·纳尔逊(宾夕法尼亚, 数学物理和生物), 斯蒂芬·德拉·彼得拉(复兴, 数学物理), 丽莎·蓝道尔(哈佛, 唯象学), 雅克·迪斯特勒(奥斯汀, 数学物理和弦论), 理查德·伍达德 (佛罗里达, 相对论)。

对于我来说这群年轻人并不是一样的。我可以想起我和他们所有人都谈论过物理以及度过的其他一些愉快的时光。在这一章和其他章中我们会

¹⁵初级职员和博士后的区别就在于职员可以在法学院获得免费的午餐，每周他们由此盛大的晚餐，尤其配备了高级的酒，巧克力和雪茄。但是我不吸烟，真的，我不喜欢雪茄

¹⁶我没有包含哪些当时我并不知道的，比如鲍里斯·施赖曼，凯瑟琳·卡林，和苏比尔·萨契戴夫。

看到许多这中间的人。

5.4 低能超引力

早期构建超对称模型的尝试都是基于经典的弦论作用量。法耶-伊利奥普洛斯 D -项允许一种超对称破缺的简单途径。但不幸的是，它看起来并没有给出正确的对称破缺和谱。

当时由萨斯坎德，我以及其他几个组提出来的超对称会在更高的能标上破缺的想法，其实允许其他的可能性。关注点在于超引力模型假设了超对称破缺的可能的最高的能标。考虑在粒子物理和（超）引力之间的耦合是一件激动人心的事情，但是这非常的不直接。因为引力场非常的弱，所以其除了设定一个能标外并没有起其他直接作用。

所以顺着这条路线，怀斯，他以前的合作者阿尔瓦雷斯-高梅以及我着手于构建一个更加贴合实际的模型。我们从最简单的假设出发：（1）以标准模型作为起点。（2）扩展到超对称：即对任意已经存在的粒子加一个自旋与之相反的场，以及额外的希格斯多重态。（3）加入软超对称破缺。软破缺意味着加入所有质量平方为正的规范不变项。（4）这样做遗留下数十个参数，因此我们采用了由温伯格引入的简化假设。超对称破缺被认为对所有的标量场来说都是一样的。温伯格是根据对统一理论里的一个猜测提出来的。从后面弦论的发展来看，我们可以说这是不具备充足动机的，但是它使得一些东西得到化简，所以我们采纳了。

所以，以此为出发点，让重整化群在一个没有更多选择的巨大的参数空间中跑动，然后得到标准模型。最微妙的地方是我们刚好需要一个标量场，一个希格斯场，来得到负的势能从而使它的对称性破缺。但是这使得下面的事情自动发生：单圈重费米子与标量粒子的耦合将在单圈水平上贡献一个负质量平方给标量粒子。最重的费米子是顶夸克，所以与其耦合最强的标量场破坏了它的对称性。这显得非常的优美：有一大类最简单的超对称模型会恰好流动到添加了超对称破缺的标准模型。¹⁷

¹⁷我需要在這裡作出一个道歉。有几个组在构建超引力模型，但是我们问了一个稍微不同的问题。不同于一个具体的高能模型，我们积掉了高能理论，并用依据温伯格的假设的软超对称破缺代替了它。因此我们并没有太多关注于具体的模型。但是结果中最漂亮的部

在这之后我对电偶极矩（同学生本·格林施泰因一起）和W玻色子以及Z玻色子的衰变做了详细的研究。

5.5 重整化和有效拉氏量

从萨斯坎德, 怀斯, 科尔曼以及其他那里, 我学会了处理许多物理问题, 撇开了那些我作为一名学生的时候吸引我的一些更加形式化的问题。但是问题依然在这里, 并且有一天会卷土重来。John 普雷斯基尔在教量子场论, 我坐在教室后面, 记录着与重整化有关的讲座内容。在最后的关于无穷发散抵消的讨论中, 他说, “我认为应该有更好的办法来处理这个问题”。我立刻意识到确实有这样的办法。

再一次让我烦扰的是重整化是有效的证明看起来极具拼凑性和技术性, 但是最后却可以归结为维度分析的结果。我意识到, 如果我们不像通常的做法那样通过微扰论方法一阶阶展开路径积分, 而是按逐级能标来描述, 那么事情将变得非常的平凡。当我得到这些想法的时候, 我就知道我能证明他们。当然, 之前我提及过我曾置证明而不顾, 但是这一次是特殊情况。

我仅仅花费三周的时间就完成了证明并撰写成文。也许当时如果我花费更长的时间使得文章更加清楚会更好, 但是我又害怕别人抢先完成——也许这很愚蠢, 但是你永远不会知道。我觉得我写的非常不错——首先是提出想法, 然后一个二分量模型, 之后再精确描述需要证明的是什么, 最后给出证明。该证明尤其不同的地方是它不需要图的组合或者温伯格's 定理。¹⁸

按照能标一阶阶地组合路径积分是非常麻烦的: 我们要考虑一个微分方程, 不仅仅要包含小数量的重整化耦合系数, 而且还需要考虑完备且无

分, 也就是对称性从顶夸克开始破缺, 已经由路易斯·伊巴涅斯和格雷厄姆·罗斯最先发现并发表了。我们应该引用这篇文章的, 但是直到我们的文章发表后我们才知道这篇论文。

¹⁸温伯格定理是一个关于高圈积分在高能极限下行为的复杂描述。我对温伯格和他的定理没有任何意见, 其实我还花了不少时间学习他的定理。但是我想要一个仅依赖于维度分析的证明。

穷的不可重整化集。但是这个观点比传统的量子场论更加灵活。在很多情形中，我们只知道在某个能标下理论是什么样的——这意味着，它是一个有效场论——而这使得按能标展开的概念变得精确。

这项工作使我非常激动。这是第一次我感觉到我改变了人们对这个世界的看法。当然，除了证明的细节，大多数想法早已为世人所知，特别是威尔逊和温伯格的工作。¹⁹在接下来的几年中，有效场论的思想就变得非常的普遍了

我的文章要感谢三个启发我的人。首先是丹·弗里丹，感谢他教会了有效场论的思想。第二就是约翰·普雷斯基尔，感谢他在课堂上的评论。如果不是这样，我也许永远不会把我知道这些东西结合起来。第三就是阿拉伯咖啡。令我失望的是竟然没有任何这篇论文的读者问过他是谁。其实，阿拉伯咖啡是一种咖啡因植物。那段日子在约翰的课堂上我异常地活跃，这同样也起到了关键的作用。

这项工作同样使得我去与塔德乌什·巴拉班讨论，他是阿瑟·贾菲德组的一名博士后。巴拉班当时正处于证明渐进自由的过程中，而最终他将结果发表在好几个数学物理方向的通讯杂志上，加起来近300页。可以说这是一个里程碑式的结果，但是却几乎不为人所知。这个例子再次说明了一个一页就能描述完的令人信服的物理论述可能需要较之高几个量级的内容才能完成证明。

5.6 磁单极催化

我将不会去讨论我写过的每篇文章，而仅仅讨论那些有故事的。有一篇我写于重整化论文之后的文章没有产生什么影响，但是却发生了许多故事。

这些年来，一群物理学家评论我说我的论文独具一格，其中许多论文的目的并不是去发现新的东西，而是想通过一个新的途径诠释我们已经知

¹⁹在著名的场论学家爱德华·布雷钦一次访问期间我展示了我的工作。我非常高兴他理解并赞赏了论证中的精妙之处，他也曾告诉我他听说威尔逊说他把自己的工作当作证明。我同意，尽管当时不是很多人都持这种观点：一旦你说出了逐级能标展开，剩下的就仅是教科书中的内容

道的东西。重整化的那篇文章就是最好的例子。这并不是因为我一开始就计划这么做，而是因为我必须理解一些东西，如果没有理解我将无法前进。我的下一篇文章也同样属于这种情况。

如特·霍夫特和玻利亚科夫指出的那样，像 $SU(5)$ 这样的大统一理论将会有磁单极子。这些都是孤立子态，不是点粒子而是有一个由大统一理论能标决定的尺寸大小。我们知道在大统一理论里重子数并不守恒，所以应该存在一个磁单极子参与且重子数守恒被破坏的散射过程。令人惊讶的是，如瓦列里·鲁巴科夫和柯特·卡兰指出的那样，决定这个衰变过程速率的并不是大统一理论的能标，而是取决于更重的重子能标。

这与我孤立子振幅的理解相违背。对于我来说鲁巴科夫和卡兰关于对称（反常）的论证太不直截了当了，但是最后我找到了一个玩具模型来帮助我理解这个过程的细节，并发现他们确实是正确的。按理说我对量子场论有着不错的直觉，但是鲁巴科夫已经两次完成了我认为不可能完成的事情。

另外一件事发生在几年之后，也与重子数破坏有关。特·霍夫特已经指出瞬子会破坏重子数守恒，但是过程非常缓慢，要花费超过宇宙年龄的时间。这看起来就是用欧式路径积分做的简单计算。但是鲁巴科夫和合作者指出，如果你加热系统，那么系统不是经历非常缓慢的欧式隧穿过程，而是几乎不受压制地进行热力学移动。同样，这看起来违反我的直觉，因此我与我的合作者迈克尔·戴恩，威利·菲施勒，奥拉夫·莱希滕费尔德以及崎田文二又写了一篇论文，来解释给我们自己听。

因此别和瓦列里·鲁巴科夫在量子场论上打赌！（另一个来自鲁巴科夫和他的合作者的惊喜是“膜世界”，远在其流行之前）

5.7 唯象学

在哈佛的博士后期间我渡过了一段非常幸运的时光，在这个理论和唯象界限模糊的地方我做了我的一点唯象学工作。在我在那儿的那段时间里，我非常激动的目睹了40GeV 下顶夸克的发现，超对称，和 $\zeta_{8,3}$ 。不易轻信他言的读者会指出十年后人们才在170 GeV找到了顶夸克，超对称还没有被发现，而且 $\zeta_{8,3}$ 又是什么呢？这就是在西大荒（或者我应该说交替的真理？）

生活的日子物理。

哈佛的文化看起来像是人们总期待着大多数最新的实验观测都是错的，因此你需要在它们被抛弃之前写完你的论文。这里甚至有几段出自霍华德·乔吉的座右铭：“每篇论文不要有多于一个半的想法”以及“不要将你的光芒隐藏在一蒲式耳大小的篮子下。”后一条明显是引用圣经来反对缓慢的发表过程。

对于40GeV顶夸克的情况，我们的结果与实验几乎同时出现，但是却与实验并不吻合。在费城举办的第四届超对称统一理论年会上，卡洛·鲁比亚展示了他在CERN发现的40GeV顶夸克的迹象。我报告了我们的最小SUGRA模型。它更倾向于重的顶夸克，大约在150GeV，尽管这很粗糙，因为有其他可以调节的参数。在我的报告中我说我们的结果与40GeV顶夸克相违背，但是随意一个理论学家的想法与实验结果相比几乎没有什么份量。这个结果很快就被撤销了，我猜是因为对统计学有了更好的理解。但是我们的模型也没有坚持多久。我们所做的最少的假设给出了超对称伴子的质量上限，而这很快就被排除了。

不久之后，鲁比亚报告了几个单喷注候选者的观测结果，只有一个动量不守恒的喷注。丢失的动量可能被各种类型的新粒子携带走，尤其是伴胶子或超夸克对。假设我们过去正寻找超对称伴子，那第一个问题就是它们是不是伴胶子或超夸克。劳伦斯·霍尔和我意识到对于高能标的超对称破缺，重整化群流在这些超对称伴子上将有一个极大的效应。特别地，超夸克将获得质量，而伴胶子不会，所以后者会比较轻。这是一个不错的预言，但是后来发现单喷注信号是因为错误地识别了标准模型粒子的导致的，因此这个预言也就被排除了。

第三个观测是在康奈尔的水晶球探测器发生的。这原本计划用来研究底-反底态 Υ, \dots 在10GeV附近的行为。它报告了几个在8.3GeV的反应过程 $\Upsilon \rightarrow \gamma + \zeta$ 中产生的事件。这里没有明显的候选者出现；它可能是一个轻的希格斯粒子，甚至是一个带有颜色的态。一个困惑是 ζ 粒子在 Υ, Υ' 不同态反应过程中产出的速率非常不一样。斯蒂芬·夏普，特德·巴恩斯，和我认为这可能是一个波函数效应，于是我们开始计算相对论性波函数；潘塔莱奥内，佩斯金，和泰伊也独立地完成了这个工作。这是一个有趣的计算，

我之前从没做过。这并没有解决问题，但是当人们意识到这个明显的信号是由于探测器缺陷导致的时候，问题就自动解决了。因此，两年过的万分激动却劳而无获。但是这个经历很好：我学会了很多物理，而这在其他地方是学不到的。

5.8 该长大了

在东海岸我度过了两年精彩的时光。我学习到了许多新的物理知识，新的做物理的方法，并写了一些重要的文章。我遇到了许多杰出的科学家，既有在哈佛的也有在东海岸访问的各类学者，我与他们中的许多至今仍保持着联系。现在到了走向下一步的时候，找一个教职。

物理领域的就业市场总是循环起伏的，主要受经济条件控制。在这时，就业市场形势并不是非常乐观。但是基于我在过去两年的工作，我非常的自信。

事实上，一年前我曾拒绝过一个教职。在哈佛，普林斯顿，以及其他几个地方，大家都认为非终生教职就只是荣誉博士后而已。人们并不指望之后会升为终生教职。所以在我看来，这仅仅意味着投入教学以及更少的科研时间。我觉得这震惊了他们，因为之前拒绝他们的人应该寥寥可数。但是我意识到我进入研究状态的过程非常缓慢，而且我现在取得了进展，因此我不想打断这种状态。同时，我有一个两人的问题，多罗茜在麻省理工的位置马上就要到期了，她找到的下一个职位在厄巴纳-尚佩恩。因此我想有自由的时间去她那里。

我们又一次遇到了两人问题，所以我们各自在自己的领域中寻找工作，发现只有非常小的交集。多罗茜有一个非常好的留在加州大学的机会，从她现在的临时工作转变为终身教职。约翰·科格特，在加州大学的一位格点规范场论学家，认为他可以帮我找到一个配偶雇职。如果我是一位凝聚态理论学家这将成为极好的选择，但是这里看起来没有人从事于高能理论，这样我会感觉到极致的孤独。对于我来说，在普林斯顿或者SLAC我有拿到非终生教职的机会，但是这两个地方都没有给多罗茜的位置。

幸运的是，德克萨斯大学来拯救我们了，提供给我了一个温伯格组的职位，以及一个德语讲师的职位，并答应之后转为终生教职。这都不是我

们各自的第一选择，也没有人料到会这样，但是这是一个非常不错的权宜之计。德克萨斯有着非常长远的德语历史，可以追溯到早期的移民，而且有一个非常大的院系。

6 奥斯汀第一部分, 1984-1988

我之前曾以我在某一时期的工作地点来划分章节。但我在奥斯汀待了八年，这使得它会成为一个非常长的章节。经过几番考虑后，我想到了一件恰逢我在奥斯汀时期的中点所发生的事：即我开始着手编纂我的弦论教科书的时候。因此这一章节便分成了第一部分和第二部分。

6.1 小组

奥斯汀有着很强的理论物理历史。艾尔弗雷德·席尔德，一个最近刚刚过世的早期相对论学者，曾是这一小组的组长。布赖斯·德威特，量子引力的先驱之一，同时也是一个量子力学多世界诠释的鼓吹者，也在这里工作。约翰·惠勒也在到了普林斯顿大学强制退休年龄后来到奥斯汀（但是几年后他又回去了，因为他们又修改了规定）。乔治·苏达山，弱相互作用中V-A理论的共同发现者，以及尤瓦尔·尼尔曼，强相互作用中 $SU(3)$ 色对称性的共同发现者，也都曾在这里。杜安·迪克斯，唯象与宇宙学学者，以及理查德·马茨纳，相对论学者，也都是很好的同事。

几年前，温伯格和他的妻子路易斯正想要解决两人的二体问题，而奥斯汀也在着眼于石油金钱的消费途径。因此温伯格和路易斯便很快来到了奥斯汀。史蒂文的薪资一直是众人揣测的话题，而他自己也从未提起过。他同时还有着可以雇佣四名教职同事的协议，以及充裕的博士后和学生资源。他最初的三名雇员分别是菲利普·坎德拉斯（相对论专家，并紧接着成为了第一次超弦革命的领军人物）^{/footnote}翻看记录，我发现坎德拉斯比温伯格更早到奥斯汀，因此他们间一定经历了一番讨价还价后才将他算入温伯格的组里，威利·菲德勒（我在斯坦福的合作者，隐轴子的发明人之一），以及我。瓦季姆·卡普卢诺夫斯基在几年后也加了进来。

温伯格一直像一个独行侠。比如，他的大部分论文都是单人署名的。但是他为他的小组感到骄傲。他开设了和哈佛一样的每周的组内家庭会议，并且每周领着他的整个小组去系里的社团。他倾向于在午餐时开辩论会，而且我曾经也开玩笑说他谈话的三大议题：英国历史，以色列政治，以及DOS与Windows的对比。关于最后一点，史蒂夫显然是一个基于文字的思考者；比如，他在他的书和论文中只用很少一些图片，因此他也是最后几个DOS支持者之一。

这里还有一组非常出色的研究生，对于这样一个地方来说并不寻常。也许是很低的学费起了作用，不论是州内，州外，还是国际学生都很出色。确实，这里有很多国际学生。这些学生给组里带来了极大的活力。最后还要提到阿代莱·特拉韦尔索，组里的秘书。她是一个令人愉快但又很现实的人，她会对任何违反规定的新组员进行斥责，这样他们就可以知道这里谁说了算。

总而言之，这里是一个很激动人心的地方。

6.2 温伯格与物理

我曾详尽地学习温伯格关于相对论的书和论文，也听过一些讲座，但在来到奥斯汀之前并没有和他有过互动。我有些尴尬的承认他给我的第一印象有一点迟钝：在交谈过程中，他会被一些显而易见的事情卡主。不过很久以后我才意识到这正是他天才之处的一部分。通过对人们认为理所应当的观点保持质疑，他可以一再发现一些被人们忽略的可能性。

举一个很小的例子，也就是他在我刚到的时候正在研究的“类黎曼几何”。当引力被表示为关于联络的形式时，曲率会同时出现在度规场和标架场中。通常情况下两者基本是相同的，但是他却问如果他们是两个独立的场时会发生什么。据我所知，这并没有导致什么重大收获，尽管这预言了弦紧致化的某些方面。但是更有趣的例子还在后面。

温伯格对于自己物理研究的专注度是出了名的。当他需要学习某些我也许知道的东西时，他会非常详细地询问我。但当我所知道的知识被问尽，而我企图转变话题时，他的眼神会明显暗淡下来，然后我便知道这次会面已经结束了。许多人也有着相同的经历。

但我对此并无微词：这正是他的伟大之处。即便是在1979年获得诺贝尔奖后各种公众互动与其他干扰纷至沓来时，他仍然保持着创造力。在得奖后的几年内，温伯格发表了五篇引用上千次的文章，包括一篇引用超过3400次的论文。而在这期间我有足够的机会与他互动，就像其他组员尤其是那些学生一样。

6.3 弦理论

当我刚在奥斯汀安顿下来时，第一次超弦革命席卷而来。在此之前我对弦论的了解微乎其微。当我回到加州理工参加一个会议时，约翰·施瓦茨告诉我我应该读一读他最新的论文。我进行了尝试，但他的行文都采用非协变式，这使我很难阅读下去。伦尼告诉我还有玻利亚科夫新的更协变的表述形式，但是它并不容易理解。同时，威腾着手于撰写给弦理论更多提议的论文，例如他与阿尔瓦雷斯-高梅关于高维反常的合作论文，以及他关于玻色化下不同弦作用量的等效性的研究，而且他也在鲁比亚和我进行了演讲的同一个GUTS会议上做了关于这一工作的报告。

但这一切都在1984年的秋天达到了高潮，当时格林和施瓦茨发现了新的反常抵消机制，格罗斯，哈维，马丁内茨，和罗姆发现了杂化弦，而坎德拉斯，霍洛维茨，施特罗明格和威腾发现了卡拉比-丘空间解。这些发现给出了弦理论与标准模型之间更紧密的联系。我当时已经花了数年时间 on 统一问题上。我的工作集中在超对称上，但我也一直在关注GUTS和卡鲁查-克莱因理论。他们在限制粒子能谱的同时，也预示着费米子与玻色子间，不同规范群间，和规范场与引力间的统一。此外这三个想法互相之间有着很好的相容性，而且可以合理猜测它们都属于一个更大的结构。

然而即便当这些都放在一起后，还有一件事没有考虑。它们每一个都在选择规范场，物质谱，质量，以及耦合常数上有很多随意性。一个统一的理论应该有唯一性，然而在当下的框架中很难看出来如何达成唯一性。但是弦理论明显可以做到这点。例如，引力耦合常数不应是自由的；相反，它的值由胀子场的取值决定。其他所有的常数也应该以同样的方式决定，作为场的值，由场方程分别决定。所以这并没有解决所有问题，而是将其

转化，从选取理论的自由性变为一个固定理论中求解场方程的自由性。²⁰ 这是物理学中人们时常看到的一类过程，比如麦克斯韦或爱因斯坦那样通常表示起来只有几行，但却有很多解的方程。但我们将在以后再回到这一问题上来。

回顾我在奥斯汀时所写的论文，它们依旧符合我的早起工作特色。它们中的大部分不是用来写新发现的事物，而是用来解释一些我们已经知道的事物，可能只是表述得更清晰一些。这使得论文中有很多都被人们几近遗忘了，但其中也有一些不错的文章，尽管它们都不曾改变所属领域的发展方向。

在我开始学习弦论时我首先将注意力放在一个问题上，当我们知道弦化的孤立子存在于任意维度，比如4维中时，为什么弦本身被迫存在于临界的维度，比如玻色子对应的26维中。当然我意识到弦化的孤立子是一种有效表述，只在长程下有效，而临界弦必然是零宽度。但我猜测临界弦和孤立子弦应该有一些统一描述。但是几个月后我碰壁了并转向了更有把握的方向。数年以后，安迪·施特罗明格来访于是我们一起重新思考了这个难题。这一次我们的思路更加清晰，而且我们利用共形对称性得到了一个漂亮的构造，这在某种程度上有一些帮助。

我下一阶段的自我授业便是玻利亚科夫路径积分。从前弦的振幅都是基于光锥计算的，但是玻利亚科夫的理论预示着一个协变的起点。因此我搬出了路径积分：一个很直接的练习手段，但是也很有用。对于这一方法我最喜欢的地方是它允许我用来计算无粒子的振幅（顶点算子），从而确定宇宙学常数（在这个玻色理论中是非零的）及有限温度配分函数。因此我可以将一些有趣的物理问题与玻利亚科夫的计算联系在一起。之后的数篇论文也都新颖的用到了真空振幅。²¹

我与安迪·科恩，格雷格·穆尔和菲尔·纳尔逊有过数篇后续论文，他们三个是我在哈佛期间最杰出的学生。我们之前聊过很多，但是并没有一起写过论文，直到我们在一次会议上相遇并发现我们都对玻利亚科夫路

²⁰ 汤姆·班克斯向我强调了这一点。

²¹ 顺带一提我的另外两篇在这一时期关于玻利亚科夫路径积分技术的论文，一个是关于顶点算子的，一个是关于振幅的因式分解的。

径积分感兴趣。我们的第一个课题是构造离壳弦振幅。我们认为我们成功了，但是我不认为我们搞对了规范对称性，因为我们现在知道了只有物理振幅是规范不变的。我们最显然的例子就是入射弦与出射弦收缩到点的情况，我想实际上就是我们现在所诠释的 $D(-1)$ -膜， D -瞬子。从此开始我们接近了 D -膜但是一种没有抓住重点在的十年时光。另一篇与穆尔和纳尔逊的论文是将玻利亚科夫路径积分拓展到超对称情况，但这里我更多只是跟着他们做。²²

6.4 休斯，刘，和蔡

我做了尽可能长时间的博士后，但我现在有了责任。指导研究生是件很棒的事情。与学生相处的普遍模式是由我提议一个想法然后我们每周都要见面。通常来说这些想法对于学生来说都太难了，所以我们最后都要一起工作。令我欣慰的是我与几乎所有学生最后都可以完成一篇或几篇出色的论文。因此学生得到了不错的研究经验，而且很多时候我都做出了其它情况下只能任其发展的很好的想法。

我最初的三个学生是吉姆·休斯，刘俊，和蔡云海。我在奥斯汀指导的九名学生恰好可以分成三人一组，因此我一直这样记他们。他们每个人都有自己的课题，但最后他们时常会合作完成课题。俊和云海都是通过李政道主持的CUSPEA项目来到奥斯汀的。这一项目将大量优秀中国学生带到美国的研究院攻读研究生。

超对称唯象学建立在 $\mathcal{N} = 1$ 超对称破缺上。其中一个论点是你无法在四维中得到例如 $\mathcal{N} = 2$ 到 $\mathcal{N} = 1$ 的部分破缺。但我通过构造知道这是错误的。我们知道兰开斯特发现了 $\mathcal{N} = 2$ 破缺到 $\mathcal{N} = 1$ 存在涡旋解。这本身还不算是反例，因为它们也涉及了 D 到 $D - 2$ 的洛伦兹破缺。但是当取低能极限时，这就变成了在 $D - 2 \rightarrow D - 2$ 的同时有 $\mathcal{N} = 2 \rightarrow \mathcal{N} = 1$ ，这违背了论点。当然，我是在说BPS态，一个现如今很普遍，但在当时很新鲜的概念，而且通常被应用到磁单极子而不是涡旋中。

²²为了参与到这些项目中，我需要到计算机中心并取得一个叫“比特网”的授权，这样我们便可以通过我们的计算机进行通信。

因此我将求解 $\mathcal{N} = 2$ 破缺到 $\mathcal{N} = 1$ 的四维作用量的问题交给了吉姆，二维问题则作为热身。就像与我许多学生的模式一样，这对他来说实在是太难了，以至于最后变成了一个合作项目。²³ 这对于我们双方都有教育意义，我们学习了非线性超对称破缺的沃尔科夫-阿库洛夫方法和格林-施瓦茨作用量。虽然是一个很明显的量子场论问题，它还是用到了许多弦理论的思路。

吉姆和我做出了 $D = 4 \rightarrow D = 2$ 的情况，然后我和俊将它拓展到 $D = 6 \rightarrow D = 4$ 。²⁴ 就如我们提到的，这里有几个应用：1) 我们完成了 $D = 4$, $\mathcal{N} = 2 \rightarrow \mathcal{N} = 1$ 超对称构造；²⁵ 2) 我们找到了一个全新且更一般的格林-施瓦茨作用量形式，它基于一个标量场而不是矢量场；3) 这使得我们可以构造超对称膜作用量，我们所研究的正是3-膜在 $D = 6$ 的情况。

我有一个缺点，有时会不贯彻自己的想法。在解决了原本的难题后，我们转向了新的方向，比如用重整化群来描述弦场方程。这很有意思，但并不惹人注意。但是别尔绍夫，塞兹金和汤森将所有可能的超膜进行了分类，发现其中最大的情况，也就是11维中的2-膜，与超引力中的最大维数相同。这导致了弦理论和膜理论数年的平行发展，两者间很少有交流。膜不能和弦用相同的方式量子化，因此许多弦理论学家，包括我，都假设他们相较真正的理论是旁门左道。²⁶ 而那些在超引力方面的专家却知道这其中有很关键的东西。在到了第二次超弦革命，也就是八年后，完整的对偶图像才变得清晰起来。

²³据我所知，这个问题由一个来自罗马尼亚的博士后卢卡·梅津切斯库提出。我对此印象不深，而且不知道为什么他没有参与合作。我想在早期比起博士后我更容易与学生合作，而且我推测这是因为他们能更好的完成我布置的任务。

²⁴俊实际上是温伯格的学生，但他的所有工作都是与吉姆和我完成的，因此我一直认为他是我的学生。但是许多学生确实从温伯格那得到了很好的思路。

²⁵简单介绍一下不可行定理是如何可能被违背的，其论证基础哈格-洛普赞斯基-佐纽斯命题限制了S-矩阵的可能对称性，但是作用量可以有附加的荷。

²⁶迈克尔·达夫驾车从德州农工大学到奥斯汀来给我们做关于膜理论的报告。我自作聪明的告诉他我在发明了超膜理论后一直被嘲笑。他巧妙地回答道“很多真理都出自玩笑，”一个明显出自于乔叟的谚语。所以不要輕易在英国人面前卖弄自己的嘲讽水平。而且他对物理的报告也是对的。

与云海的合作依旧是将一些已经知道的东西解释的更为清晰。格林和施瓦茨证明了开超弦理论只在规范群为 $SO(32)$ 时自洽。他们通过 $\mathcal{N} = 1$, $D = 10$ 超引力的有效场中的计算证明了这一点, 它仅在规范群为 $SO(32)$ 时不存在反常。但是这种反常应该可以通过基本的弦理论来加以了解, 而不是仅仅通过低能近似。这就是云海和我打算做的工作。弦路径积分的关键项又是我喜欢的类型, 真空图。这里有三个图, 圆柱的, 有一个交叉帽的圆盘, 以及有两个交叉帽的球面。他们的和是 $(N - 32)^2(\infty)$ 。其中无穷项来自时空的体积乘一个正规化因子。

平方项中的三个因子来自真空图, 而 N 用来计数边界上的陈-佩顿因子。将其解释为胀子的真空-真空振幅是很自然的。这对于NS-NS (玻色平方) 分支的积分是正确的, 但这里却同时存在一个没有对应的粒子的来自R-R(费米-费米)分支的相等贡献。这应该是一个非动力10-形式场。现在我们知道这是 $D9$ 膜上的形式。

这项工作中我有两点感到遗憾。首先, 这篇论文的作者是以“约瑟夫·波尔钦斯基与蔡云海”来署名的。在高能理论中的惯例几乎完全是字母表顺序的。在这个情况下, 这是以合作课题开始的, 云海贡献了一些不错的评论和计算, 但是它的发展方向很快便偏离了最初的想法。我仍然非常独立的按照自己的方式工作, 并在这个工作变得很有意思后开始竞速般的完成了它。这确实发生了, 因此我最后几乎只靠自己完成了这篇长论文。所以我并不认为有其它署名这篇论文的方式。但是这对云海而言, 无论是教学上还是当他申请工作时都是不利的。当然, 正确的做法是将速度稍微放慢并给云海一些属于自己的课题。但是我只能说学到了教训, 并在很久之后成为了一个好导师。

第二件遗憾的事就是我一直没有就这个研究成果给出报告: 我依旧对谈论自己的工作很害羞 (我想是因为我很少觉得自己的工作足够重要的)。当时我曾参加一个在圣芭芭拉召开的弦论会议, 而且没有请求上台演讲。当我告诉迈克尔·格林我的结果时, 他说你本应该讲的。²⁷ 确实, 这

²⁷ 这个会议以其宴会而闻名, 上菜速度太慢以至于某一桌子打电话叫了外卖披萨。它也以其餐后演讲而闻名, 弗兰克·维尔切克在此解释过为什么他应该得诺贝尔奖, 而十五年后他真的做到了。

篇论文有超过400次引用。但是，就像我同一时期的几篇论文（包括与吉姆和俊合作的两篇）一样，最初的引用数很少，但在第二次超弦革命后爆炸般的增长起来。也许如果我不那么羞涩于演讲，物理学本应发展的更快。

吉姆，俊和云海都在做了几个博士后然后转去做其他事情了。吉姆在微软工作，俊在经济学方面拿到了第二个博士学位并且现在成为了UCLA的一名经济学教授，而云海成为了SLAC的磁铁设计员。即便在第一次超弦革命后，仍然没有多少地方可供弦论学家工作。由于关于弦论是否是物理的质疑广泛传播，只有屈指可数的几个地方愿意雇佣弦论学家。所以如果有人同时在弦论和“正常”物理均取得成就那便是最好的。只有在第二次超弦革命后，在于其他物理方向关联的网络涌现出来后，大多数物理学院才真的觉得应该雇佣一两名弦论学家。我个人认为，年轻人应该着眼于一个广泛的大方向，但是我想随着一切变得专业化这将变得很困难。

6.5 关于物理，同事，以及学生的更多趣事

通过玻利亚科夫路径积分，共形对称性引起了更多人的注意，在其中它是对称代数的一部分。一个共形变换类似于一个依赖位置的尺度变换，而有一点便是任何标度不变理论也必然是共形不变的。相应的论点看起来很弱：共形代数有更多的元素因此应当有更少的不变量。因此我着手去研究真相。此前有文章讨论了经典场论下的这个论点。但是标度和共形维度通常都需要量子修正，因此我需要一个量子版的论点。

在1+1维的情况下很容易能给出证明，这用到了一个扎莫洛奇科夫的重要结论。他证明了标度变换的单调性，而一个很小的扭动便得到了缩放意味着共形不变的结论。这里面有一些技术性条件，最重要的便是么正性；没有它便会产生例外。我尝试找出一个其他维度中的结论，尤其是3+1维的，但是失败了。我既不能找到证明也不能找到反例。这个工作在当初只吸引了很小的注意力：尤其是与弦论相关的。但是数年后人们重新对这类问题产生了兴趣，我会以后再来讲。

在当时关于弦的讨论主要是用来处理低能激发态的小圈。但可以想象高能激发态下它可能变得非常长，也许延展到整个宇宙。宇宙学甚至可以导出这样的弦。威腾最近思考了超弦中的这个问题并发现了它们产生时面

临的障碍。我会再以后再回头讲，但是现在观察弦在不同条件下的行为依旧是很有趣的。

一个有趣的问题是，如果两个弦互相交叉会发生什么？是互相穿过对方，还是它们会重新相连？我的同事马茨纳从GUTS的角度研究了宇宙弦的这一问题。他发现在这种情形中，弦的表现是经典的，它们总是重新相连。但是对于基本弦而言回答会变得更加量子力学，即对各个结果都有一个概率，而算出这个概率是一个非常有趣的练习。所以阐述这一问题的最简单方法便是引入一些大周期性的维度空间将长弦包裹起来，然后将这个问题转变成更容易的S-矩阵。我将这一问题在开弦情况下的讨论留给了我最新的学生戴瑾。这其中有两种过程，一个开弦会断成两个（或者相反），或者一个闭弦在开弦断裂时出现。这些计算已经完成，这对与瑾是一个很好的热身。他们会在宇宙弦再次回来时产生一定的关联性，但主要还是”弦中的乐趣“。

在继续之前，我应该提一下这段时间我的同事都在做什么。我们每一个人都以自己的方式为弦理论做贡献，而我从他们每一个人的工作中受益。菲利普·坎德拉斯作为卡拉比-丘空间的发现者之一，在当时是最成功的。而卡拉比-丘空间将弦理论和标准模型简单地联系到一起。我本应该更好的理解他的工作，但是我们理解问题的方式相互对立，他从几何的角度出发而我是从场理论化，只需要最少的几何学（将线包裹进一个周期维度的空间已经是我的极限了）。我见证了他发现镜像对称，而这也是卡拉比-丘空间都能通过非微扰效应相关联的第一个线索。这些都非常迷人，可我手头却没有工具去跟随。

而温伯格此时正试图学习一些弦论，和我的方式差不多，从简单的计算上手。我不知道为什么我们没有一起工作过，我猜是因为我们两人都不太善于与他人配合（尽管我一直有所改进）。但我又确实发现他的工作非常有趣。他的第一篇文章详细的求解了顶点算子的形式，并注意到了归一化及么正性。他的第二篇与玻色开弦理论相关，证明了 $N = 2^{13} = 8192$ 的陈-佩顿态的有限性（不过会有高阶修正），类似于云海和我曾研究的 $N = 32$ 。但是弦论不能一直抓住温伯格的兴趣点。我想这是因为他想要用量子场论中那些驾轻就熟的原理来推导理论，而弦论中那些看似新颖的方面并没有

与他产生共鸣。在他的一个会议演讲，“没有弦的弦论”中，他提示我他早期的哲学思想，即几何并不是广义相对论的中心。

大多数的早期弦论工作都集中于超对称态，其中胀子可在弦微扰理论中逐阶消失。但很快我们便需要处理一些超对称破缺的态，此时胀子能量需要涉及到不同阶之间的相互抵消。这在场论中比较容易处理，而不用到弦场论时则会变得笨拙。所以菲德勒，以及萨斯坎德，一起证明了应该如法去做，通过抵消弦振幅来抑制圈发散。

所以即便我没有与我的同事们一起工作我还是从他们那里学到了很多。我还应该提一下克利福德·伯吉斯，安娜玛丽亚·丰特，以及费尔南多·克韦多这三名国际学生，他们独立写下了一个非常好的办法用来处理超弦中的低能有效作用量。他们在理论界中都发展的相当不错，费尔南多最近还刚好完成了的里雅斯特的国际理论物理中心主任的一任任期。²⁸

7 奥斯汀第二部分, 1988-1992

7.1 那本书

在1988年的夏天，我发现我可能成不了一个伟大的科学家，于是我决定写一本书。

这实际上算得上是个意外。一切不都发展得很不错吗？我研究的题目很有趣，而且时常还能得到我所钦佩的人的正面评价。尽管如此，我还是没觉得我在推动科学的进步。那段时间中，最激动人心的事情是发现了杂化弦与观察到的标准模型的联系，但是我却没有趁手的办法来解决它。实际上，回顾往昔的时候，我都是在处理一些看起来非常奇怪的东西，而不像那些真正的问题。在那段时间，我唯一一篇引用数较高的弦论文章是我的第一篇弦论文章，主题是玻利亚科夫路径积分，而那篇文章可以说只是一篇介绍性的文章罢了。而与此同时，其他人在做的东西看起来都会是重

²⁸我不会试着做一个像哈佛一样便于理解的清单了，这实在是太难了。我会在文中提及那些跟我一起工作的人，但这里还要提到其他一些人——卡洛斯·奥尔多纳，唐·马洛夫，和斯科特·托马斯（两位已经离开了），还有布雷恩·沃尔（他去世得太早）。

大的进展。

在这些人里面，最耀眼的就是爱德华·威腾。十年来，他的新点子持续地推动高能理论界前进，就像费曼，盖尔曼，温伯格，玻利亚科夫，以及特·霍夫特曾经做的那样”。我还记得，即使在弦论诞生之前，我也很喜欢读威腾的文章，并从中学到了关于量子场论的我未曾预料到的新知识。但同时他的推进又是势不可挡的。

费曼在他的诺贝尔奖的获奖演说中讲了可怜的斯洛特尼克的故事，其博士论文被费曼在一个晚上重复了出来。并不令人意外地，斯洛特尼克再也没有写过别篇文章。像这样的费曼影响了其他人的故事发生了不止一次。在前文我提到了与威腾的第一次会面，那感觉就像斯洛特尼克与费曼的会面一样。然而我觉得爱德华从不像费曼那样表现的锋芒毕露；相反的，他把他的锋芒对准了历史。尽管如此，他的每篇文章都在带给了我非常愉悦的体验的同时，还会让我进而思考“既生威腾何生我？”。

当然，虽然没那么夸张，但我可能也对我在加州理工的一些同学产生了类似的影响。但是科学毕竟是宽阔无际的，他们都找到了自己的方向。幸运的是，即使理论物理也是很广阔的，但是在那个时候我并没有意识到这点。在继续讲我的书之前，先容许我对你们幸灾乐祸一会儿。我最近看了电影《莫扎特》，在我看来（可能有点不准确），这部电影讲了萨列里因为没有莫扎特的天分而饱受折磨。我对萨列里感同身受。我在我办公室的门后面贴了一副威腾的画像，免得到了见面的时候我过于紧张。（对，我就是这种笨蛋）。

我写书，很大程度上是因为我刚刚教完一年长的基于玻利亚科夫路径积分的弦论课程。格林，施瓦兹和威腾，即GSW，刚刚写了两卷的弦论书，然而他们并没有包含玻利亚科夫路径积分的内容，而是使用了以前的光锥的办法。我想，既然我这一年内的课程笔记与GSW没有太大的重复，我实际上可以把它弄成书。看起来人们喜欢我的写作，而我也喜欢写点东西，尽管我没能解释写篇文章和写本书之间巨大的耗时差距。此外我一直在追求进步，而弦论也的确持续发展了九年。这段时间我每年都花了差不多30%的时间在我的书上，基本上都是在夏天。有一年因为D-膜的发现，我休息了一段时间，但是第二年我就意识到我需要完成它，然后几乎

把一整年都花在了写作上。

既然当了萨列里，我索性也当了次米开朗基罗。他给教皇朱利叶斯做坟墓的那些时光真是令人难堪。浪费最有创造力的年华在这种事情上，真是不知道他是怎么想的。直到我完成我的书后很久我才意识到我也是一样。

我不太多的涉及这本书具体的内容了。它与我生活的其他部分，乃至研究都没有太大的交集。可能会让人惊讶的是，它甚至拖慢了我的研究进程。想象一下，它剥夺了我30%的时光。然而我还是很后悔，自己在刚开始写这本书的时候放弃了一些物理研究。我那时正在重新思考单极催化的问题，并试图完善这个理论。我有了一个不同寻常的有效场论，其有效场比单极子更轻但是比其它的都要更重。我意识到这在很多情况下都会遇到，比如重-轻夸克，甚至质子-电子。所以我找到了马克·怀斯，问他是否见过这样的东西。他觉得这看起来很有意思，并认为我们应该一起把它弄清楚。然而我才开始写书，并且不想停下来，于是我让怀斯和南森·伊斯格尔去搞这件事。最终得到的重夸克理论非常有用。怀斯因此常和我开玩笑说他在我刚到哈佛时给了我一个项目，而我则在后面还给了他。

最后说三个对我产生重要影响的人。史蒂夫·温伯格，他用他优美的引力论教材设定了一个标准，而我想要达到这一标准。最开始我们讨论过合作写一本书，但是我的不按照历史顺序的做法很难与他的写法融合起来。另外就是爱德华·威腾了，原因已经说过了。第三位就是简·哈格，她是我第一个孩子一岁时的贴身保姆。她这个人很有趣，曾经环游了世界，并且计划写一本自传。于是我就想着，既然我的保姆可以写自传，我当然也可以啦。

7.2 对偶的乐趣

看看我那时候的工作，可以看到我研究弦论的样子就是我学生时代研究量子场论的样子：尝试去理解这个理论到底是什么。量子场论中的点粒子已经被研究了一个世纪了。而当时无限细的相对论性弦则是新的内容。它们会有什么特性呢？

弦的一个非常令人惊讶的现象是 T -对偶性。如果你在盒子中放一个粒

子并不断地缩小这个盒子，由于动量量子化，只会得到越来越高能的激发态。但是对于弦来说，在盒子变得足够小之后，能谱上就会有越来越低的能级，而且大盒子和小盒子之间有非常好的对称性关系。很显然，这样你就会有一个最小长度，恰好可以作为有最短长度的理论中的那个特殊的长度。大盒子与小盒子的量子理论的等价性也是对偶的体现，而且这种对偶甚至在弱耦合的情况下就很明显。而且按照更现代的说法，这种就是层展空间的一个例子。

在这一领域，大家几乎都在以对真实世界的微扰来研究闭玻色弦（来热身）和杂化弦。然而也存在很多种其他的弦论：无定向的玻色开弦理论，I型超弦理论、IIA 型超弦理论和IIB 型超弦理论等。以及，我又有了两个新学生，罗布·利和戴瑾，他们也需要题目来做。最开始我想让他们分别处理不同的弦论，但是不久后就合并成了一个大项目。

IIA/IIB的情况很容易就做得出来了：他们彼此 T 对偶，这意味着他们是同一个理论在不同极限下的行为。对偶变换把费米子变号了，从而把IIA和IIB 弦互相转换。这个结果非常不错，不过不久后我们就了解到几个月前戴恩，休伊特和塞伯格（DHS）就发现了这个结果。但是我们的论文的其余部分是互不相关的。

其他的情况处理起来更难。我们发现 T -对偶会把正常的诺依曼边条件固定的狄利克雷边条件互相转换。边界条件的变化就是说在开弦中，两个端点在某些方向上不能自由移动，但是其内部的部分以及闭弦则依然可以自由移动。我们在思考了一阵之后意识到弦的端点必须得受制于某些更低维度的物体，其维度可以由 T -对偶的数量来得到。²⁹

所以这是非常值得注意的工作：我们从开和闭弦的理论出发，在非常小的空间的极限下找到了一个具有开弦和闭弦的新的大空间，而且这些新的物体每个都有相应的陈-佩顿因子。与此同时，我们还论述了在引力的作用下，这些物体不能是刚体，并且定义了弦能谱中的激发。它们并不受限于 T -对偶的形式，可以是任何形状和大小。阿丘卡罗，埃文斯，汤森和威

²⁹彼得·霍拉瓦和迈克·格林同时也都对这些新的 T -对偶感兴趣，而霍拉瓦的工作与我们的一些内容有一些重合。

尔特希尔造了 p -膜这个词来描述超引力中的膜³⁰，所以我们管我们的新膜叫狄利克雷膜，或者简称D-膜，来和他们的膜区分开来。 T -对偶实际上可以从什么都没有（的真“空”中）产生出一些东西（D-膜），这个问题后来因为人们认识到空间中充满了D9-膜而自然地消解了。

无定向弦的 T -对偶带来了新的困难和新的东西。我们可以想象 T -对偶作用在左行和右行的部分上使得 $(x_L, x_R) \rightarrow (-x_L, x_R)$ ，而无定向理论则是通过对方向投影既 $(x_L, x_R) \rightarrow (x_R, x_L)$ 来定义的有。共轭的方向会被 T 反号，我们就有了 $(x_L, x_R) \rightarrow (-x_R, -x_L)$ 。这种新的操作像是视界面反射乘一个时空反射。无向空间因此与半空间上的有向弦理论是 T -对偶的。这种新的边界我们命名为定向轨形，因为它是轨形和反向的结合。

我看起来喜欢简单成分的组合（Q-球，D-膜，定向轨形，以及后面的增强子和离散统）。虽然可能是其他的人发现了这些东西，但是我通过命名而留下了自己的印记，而这让我很自豪。但是定向轨形实际上几乎是一个笑话的产物，是一个笨拙到我觉得没什么其他人会觉得有趣的词。于是至今我听到它的时候都会偷笑两下。

我们做的最后一个 T -对偶并不是很正确。Type I超弦同时有D-膜和定向轨形，但是我们错误地认为它们会混在一起成为一个东西。对于最小的D-膜数量（ $\frac{1}{2}$ 定向轨形）来谈这是正确的，但是数量更多的时候他们就有可以运动的自由度了。不过不管怎样对于一个十页短的文章来说这也是一个很好的结果了。

你可能会想，我既然有了这么多重要的结果，我完全不需要去写那本见鬼的书了。（其实当时确实一度停下来那本书了，因为我写了四个月的书之后面临研究要被撤回。）但是我对我的成果并不满意。我认为下一步是去找到杂化弦的D-膜，因为这被认为是真正的理论。狄克逊，卡普卢诺夫斯基和瓦法给了一个漂亮的论证指出标准模型没办法从I型或者IIA,B型理论中得出。但是如果我有点想象力的话，我就会意识到从D-膜这一新的角度来说这个论据就不再站得住脚了。但是我还是坚定且无果地尝试着找到杂化D-膜。

³⁰膜（brane）这个词最早出现在1987年一篇文章的标题中，而如今已经出现在8,500篇文章的标题中了

缺乏常识和自信让我没有给任何关于这篇论文的报告。我忘记了格奥尔基的名言“不要将你的光芒隐藏在一蒲式耳大小的篮子下。”我但凡给几个报告，某些听众，或者甚至在我自己准备报告的过程中，都有可能让我找到缺失的一环。我很享受我和云海的文章展示了D9-膜有10-形式RR势，而与瑾和罗伯的文章则说明了所有不同的D p -膜都与T-对偶有关。但是我花了六年的时间才把这两件事整合到一起。或者更准确的说，也许我知道这些内在的联系，但是不知道这意味着什么；我需要有些人来问出正确的问题。

一如既往地，这些文章在头五年里只有两次引用。不过其中一篇是利自己写的关于D-膜有效场论的文章，结果非常出色且重要。利继续做了很多优秀的弦论、粒子物理和量子场论的工作，现在是UIUC的教授。戴则在上海的IT企业工作，尚还在起步阶段，但已经有了100多个专利。

顺便一提，这一节的标题本身是我打算作为那篇文章的标题的，但是罗伯是一个严谨的人而且坚定地否决了它，所以我们最后用了“不同弦论中的新联系”来做标题。紧接着，K·S·纳拉因表明了两种杂化弦理论是T-对偶的，我们和DHS发现了两种II型超弦理论理论是T-对偶的，然后我们发现I型超弦理论和II型超弦理论是对偶的，并且I型的基态对偶到II型的D-膜激发态。I型超弦理论和有D-膜的II型超弦理论的对偶意味着D-膜处在BPS态，其重要性虽尚不清楚但很快就会被探明。通过考虑所有D-膜的激发，我们可以总结出这是II型理论的本征激发。而最后的联系，就是杂化理论和I、II型的对偶联系，不是从微扰，而是从非微扰T-对偶角度出发的。

7.3 宇宙学常数

我想我是在西德尼·科尔曼关于对称性自发破缺的讲座上第一次听说宇宙学常数（CC, Cosmology Constant）问题的。当然了，爱因斯坦关于宇宙学常数的经典故事大家都知道，但是完整的量子问题，尽管像泡利早早地就知道了，却仍然没有被在量子场论广泛讨论。但是如同科尔曼所解释的，对称性自发破缺揭示了真空的本质，以及基态并不是最对称的态。因此有一个对称性自发破缺尺度的能量是很自然的。不仅如此，即使这个

参数经典部分抵消了，它仍可以得到很大的量子修正。

我在博后期间思考了很多与此相关的问题，并且理解了它为什么不好解决。每一个粒子都对真空能量有很大的量子贡献，而且某种程度上来说这些都会恰好抵消掉。一般来说我们会需要一个对称性来保证这点。超对称可以做到，但是它是一个破缺的对称性，因此这种抵消并不严格。其实也可以找到一种动力学机制，使得宇宙学常数会反过来影响物质场从而抵消。但是引力是一个无关的相互作用（在重整化群的意义下）。这就意味着在 l 尺度上的量子效应会作用在一个更长更弱得多的尺度 l^2/l_P 上（其中 l_P 是普朗克尺度），这远不足以抵消掉宇宙学常数。实际上，我们所需要的是找到某种长程物理可以反馈到短程作用中的方式。

大部分的弦论学家在见过了 T -对偶这样卓越的性质之后都会期待弦论还有尚未被发现的奥秘。所以就像以前的重整化问题一样，宇宙学常数在那段时间也是萦绕在我心头的重要问题。当我写作第一篇关于玻利亚科夫路径积分的弦论文章时，我首先计算的就是宇宙学常数。³¹ 最终的结果是没有特殊的抵消效应，尽管这只是针对玩具的玻色理论。但即使像其他人研究的那样，有(破缺的)超对称性，也没有什么现象发生。³²

就在这段时间出现了一些新的想法。它们与弦论无关，而是纯量子引力的。在那两三年里这些想法非常让人振奋，不过随后就消退了。如今人们甚至都不会向学生提及这些东西，这是学生们可以省下时间精力不去学习的。

我曾想这是一个好的故事，但是现在看来它太难了。记住那些一度很有希望但最后发现不顶用的点子实在是没什么意思。所以我尽量简短地说。实际上有两个故事。一个来自于科尔曼，他基于轴子虫洞而想到的。另一个则是霍金(还有杜夫和P·范·尼乌文赫伊曾，和奥里利亚，尼科莱，和汤森)基于四-形式的势能而想到的。

³¹更准确的说我计算的是伸缩子势，而不是一个常数。早期的论文中有一种把这两者整合的趋势，寄希望于高阶的效应可以固定伸缩子并得到一个常数。

³²罗伯·迈尔斯的一个出色的文章展示了弦论中实际上并不强制性地要求十维和零真空能。与一名做温伯格的推广引力的博后尚塔·德·阿尔维斯，以及坎德拉拉斯的学生罗尔夫·西姆里克一起，我们试图推广这一结论来给出取值很小的宇宙学常数和超对称破缺，不过收效甚微。

科尔曼的故事的精华是：量子引力加上轴子会给出将不同时空点连起来的虫洞解。乍看之下，穿过这些虫洞会破坏信息，但是科尔曼，吉丁斯和施特罗明格论证说，对路径积分中的所有位型求和之后会使得虫洞（婴儿宇宙）相干但随机。所有的自然常数会得到随机的贡献，但是如果去重复的测量一个常数则会在各处测到相同的值。但是通过考虑完全的路径积分，会有任意多的德西特区域通过任意多的虫洞互相耦合，科尔曼发现路径积分在宇宙学常数为零的时候有一个无穷大的峰，即当 $g \rightarrow 0$ 时， $\Lambda, e^{e^{1/G\Lambda}} \rightarrow \infty$ 。

这是一个非常棒的结果。而且这也满足了长程物理需要反过来修正短程作用量这一想法，大的欧几里得德西特空间反过来作用在婴儿宇宙的作用量上。但是这也是存疑的。双重正指数在场论的其他地方都没出现过。从哈密顿量出发导出路径积分是一般的手段，而这通常会给出一个负号，或者是行列式的相位。威利·菲德勒，伊戈尔·克列巴诺夫，伦尼·萨斯坎德还有我的组都在研究这一事情。除了没找到宇宙学常数为零出的峰的证据外，我们成功实现了伦尼·把古戈尔普勒克斯（Googolplexus, $10^{10^{100}}$ ）这个词放到文章标题的意愿（得到一个小的宇宙学常数所需要的态数量）。而那些研究对其他自然界常数的预言的人都发现了这写预言并不物理，或者有歧义。³³

几年之后，这一领域就变得完全无趣了，甚至到现在来说尝试重新构造这些论述都是很痛苦的一件事。我当时想象过这个想法里面的一些特性在未来会重返物理学，但是看起来并没有。在书中的16年之后，我会回到这一想法。

霍金的想法则更简单，他用没有虫洞的德西特空间中的量子力学来处理事情。不过他加了4-形式的场强这一额外的自由度。在四维中，这样一个场是没有动力学的：它在时空中是一个常数，但常数大小可以任意。如果对这个常数求路径积分，通过与科尔曼类似的计算一样也可以得到宇宙学常数为零，但这次是 $e^{1/G\Lambda}$ 这样的单重指数。

但还有另一个问题。即使其他的都成立，这种机制会使得宇宙是空的。宇宙存在激发，尤其是向我们的宇宙一样高度激发，是会被指数抑制的。

³³一个有趣但毫无指导意义的量子引力玩具模型，是把弦世界面处理成1+1维时空

所以菲德勒，我的学生丹尼尔·摩根和我想要看看是否存在能量从虚空中隧穿过来的过程。³⁴法里和古斯其实已经从路径积分的鞍点角度考虑论述过这一点，但是还有很多疑点。我们从哈密顿量的角度确认了这一点，但是其对我们的目的来说效果太不明显了。³⁵

还有另一个新的关于宇宙学常数的想法，就是人择原理。当你超出标准模型去做某种统一理论的时候，往往都会遇到需要自然界常数变化的某种机制。我们在上面已经见过了两种，4-形式场和欧几里得虫洞。其他可能的办法可以使缓慢起伏的标量（班克斯），向下扩散的标量（艾伯特）或膜（布朗和泰特尔鲍姆），或任何复杂的有多个极小点的势。在这些条件中，自然界常数可能会随时间或空间而不一样，或者是在波函数的不同支中有不同取值。

温伯格在林德和班克斯的想法基础上，基本上说了这就是你所需要的全部了。在这些条件下，基本上所有的观察者会看到非常小的宇宙学常数。这种论据是，为了让观察者或者任意的有组织结构能形成，必须得有很多空间（比特）和时间（事件）去构成，而这这就要求宇宙学常数非常小。因此，如果“常数”实际上是某种变量，观察者只能在非常有限的宇宙学常数够小的区域里面存在。

温伯格的最令人诧异的能力是他能想出新的想法，而且即使是最激进的那种他都可以把它转化成可以检验的计算。把‘观察者’替换成‘星系’，他可以说明宇宙学常数不能够比物质密度的100倍大，这就比原来的普朗克尺度 10^{120} 或者弱化的尺度 10^{60} 要进步了很多。

这对我来说影响很大，我感到十分沮丧。我花了大量时间在这个问题上，被认为可能引领我得到量子引力理论的本质，其实并不需要一个解答，它几乎就是自发的。但是这需要放弃自然常数这一想法的可能性，而这是我和我的同事们的终生目标：它取决于天体物理学甚至部分生物学的细

³⁴丹尼尔还有一些不错的单作者文章，是关于重整化群的形式（表明温伯格的形式和我是等价的），并研究了存在截断下黑洞的行为。他毕业之后去了公共科学政策这一领域。

³⁵此外还有一个问题，直到很后面才发现。注意到我和蔡工作中 $D=4$ 4-形式和 $D=10$ 10-形式的相似性。霍金的形式应该被解释为D-膜场，从而被量子化，而不是抵消宇宙学常数所需要的连续取值。

节。

但是温伯格有一个预言：宇宙学常数没有道理是严格的零。不仅如此，它应该是小于100倍物质密度的随便一个数。当然，观察到的上界已经被压低了一两个量级，但这可比60或者120 个量级要好太多了，而且我们可以想象更精确的计算可以进一步增设限制。

而且确实有一些非零宇宙学常数的迹象能观察到，比如年龄问题(星系表现得要比宇宙年龄长)，而这如果有非零宇宙学常数就能够解释。因此我在接下来的十年里面非常期待这种迹象逐步消失。我不知道有多少其他人也是和我一样的心态。对我来说，温伯格的论据太清晰了，其他的人也应该知道。但是我与温伯格的面对面谈中，如同在我个人长时间的失败的尝试中一样学到了很多。而其他的大部分的人则认为还是坚持否认非零来的好。

如果我把苦恼的时间花在想“弦论导致的动力学是否也是温伯格论据所需的？”这一问题上可能会更好。幸运的是，这个问题留给了拉斐尔·布索和十年之后的我。这是对一般的‘人不择’的一种测量，而在我们之前没有人意识到这个问题。这一结果也是对温伯格用其独特的方式研究科学，甚至提出令别人害怕的问题的一种致敬。

7.4 科幻小说与科学

在这段时间，我看到了一个非常有趣的预印本，它是由基普·索恩及其同事一起写的。广义相对论中存在着带有闭合类时线的解，由此观测者可以回到过去发生的事件中。他们有一个构造这类解的方案：有这样一个虫洞，它的两端靠近同一个点，接着将其中的一端加速很长一段时间，再让它回到静止状态。由于时间膨胀，时间改变了，观测者从没有加速的一端进入，却在过去的某个时刻离开加速的那一端。索恩，莫里斯和尤尔特塞韦尔想要知道在这样的空间中物理是否有意义，也许还可能有可观测的结果。

作为科幻小说的忠实读者，我太熟悉祖父悖论了，我想索恩也是一样的。观测者可以回到遥远的过去，然后在他自己出生前杀害祖父，这样他就不可能完成穿越、杀人这个过程。这里包含了太多的自由意志，因此它

不够成一个有力的论证。然而我意识到可以很容易地回避这个悖论。你可以把观测者想象成一个球，让它从虫洞的未来一端进入，穿过虫洞并从过去一端离开，要做的是让它和自身之前的轨迹相交并把自己撞飞，然后它就不能在合适的位置穿越虫洞了。这样的话，关于球是否穿过了虫洞似乎没有一个自洽的答案。

后来，我给索恩发了一条消息说起了这个想法，他看到后表示很激动。他的下一篇文章就是关于物体在虫洞空间中的运动的。对于刚才说的悖论，他有一个可能的解决方案。如果球仅仅偏离一点，在穿过虫洞后它可以在合适的地点与过去的它相遇，这样一切就变得自洽了。对于我的注解，他很热烈地向我表示感谢，这让我感觉好极了。但是我也在想索恩写完这篇文章后会不会受到重视，尤其是他正在试图让斥资数十亿美元的LIGO项目被通过。

我命名过很多东西，但我以自己名字命名的却不多。波尔钦斯基方程只是威尔逊方程的一个改良。然而波尔钦斯基悖论，这个由科幻小说激发的想法，虽然我从未因此写过任何文章，却似乎让我出名了。

我的另一些科幻小说归功于温伯格。他另辟蹊径，问了这样一个问题：我们如何知道量子力学是线性的？因此他设计了一个非线性的量子力学的推广理论，这个理论满足特定的自洽条件。它可以和实验进行对比，随后他发现任何非线性的结果都必须非常地小。当时我正在研究他的模型，意识到EPR问题是躲不过去了。信息可以超光速地传播（吉森也发现了这件事）。我们想要找到避免这个问题的替代理论，但结果发现波函数的不同分支间也可以相互通信。换句话说，温伯格的原始理论允许我们构造EPR电话，它可以以超光速的形式传递信息；而修正后的理论可以允许我们构造埃弗里特电话，它可以实验波函数不同分支间的相互通信。几个月后，这些想法变成了《幻想与科幻》上的一个专栏。

7.5 短篇故事

7.5.1 非微扰弦

尽管弦理论给人的印象深刻，但它仍然只是一个微扰理论。找到完全

的描述是一个大问题。即使对于标准模型，我们也知道非微扰效应导致了非常丰富的物理，并且对于禁闭，手征对称性破缺及其它一些事情是至关重要的。加入了量子引力效应，我们能够期望在非微扰理论中有更多激动人心的进展。

最简单的猜想是复制粒子物理中的结构，将量子场论替换为某种弦场论。等效地来看，这相当于将弦的世界面分成对应于弦传播子和相互作用的很多部分，而这将来自于一个弦场作用量。但是对于粒子来说奏效的并不是对弦来说奏效的事情。闭弦的经典作用量要求无穷多项的求和。更糟糕的是，量子理论要求在 \hbar 的每一阶都有无穷多的额外项。等效地来看，振幅被手动的加入了作用量中——这在我看来更像是有效理论，或者一个像强子一样的复合物体的作用量。在这个方法下有一些很好的构造，像威滕的开弦作用量，森的孤子解以及茨维巴克的BV对称性，但这些看起来并不足够。

这时出现的一个不同的方向是可解的矩阵量子力学，由格罗斯，米格德尔，道格拉斯，申克，布雷钦，和卡扎科夫等人建立，而在1+1维的时候，它是等价于弦理论的。在这个低维下，仅有的自由度是一个标量，但是这个模型依旧足够丰富以至于很有意思。效果上，这是全息早期版本，玻利亚科夫在之后尤其强调它的和AdS / CFT的联系。这对我来说很有吸引力，我写了六篇或者七篇文章关于它的论文。它们大多关于1+1维空间和矩阵模型的联系，包括空间和引力的演生，所有经典解的寻找和它们的一些有趣的性质，1+1维之上更进一步探索，以及关于非微扰定义相关的一些问题。

从这个系统中得到的最有意思的结论来自史蒂夫·申克，他展示了非微扰效应按照 $e^{-C/g}$ 随尺度变化，这里 g 是闭弦的耦合系数，而 C 是一个常数。在量子场论中，非微扰效应按照 e^{-C/g^2} 随尺度变化。因此弦理论和量子场论相比有着更强的非微扰效应。它们是什么？也许我应该读一下我自己的文章。

7.5.2 和布赖斯一起工作

布赖斯·德威特是一个主观意识很强的人。他很乐意谈论拓扑变化

(他反对的)、多世界诠释(他支持的)等等。我很高兴加入他所在的项目。

在一个有很多学生和博士后的大课题组的帮助下(成员有若热·德·利拉, 冯斯奇(译注: 原文See Kit Foong, 新加坡人, 现在名古屋大学任教。因没有在网上查到对应中文名, 故暂订用此译法, 后续邮件沟通如果收到回复的话, 会在之后版本进行修正), 蒂莫西·加利文, 罗布·哈林顿, 阿里·卡普金, 和埃里克·迈尔斯), 布赖斯想要尝试通过在格点上直接进行路径积分, 来直接回答量子引力是否是非微扰可重整的。虽然不知道他所做的工作是否有重整化群下的意义, 这样选择研究方向并开展工作正是Bryce的特色所在。无论如何, 这是一个难题, 也许我们可以从这种方法中学到一些东西。

至少他用自己的某些论证确定的格点作用量, 把度规换成 $O(2, 1)/O(2)$ σ 模型, 从而使得过程大大被简化了。因此, 路径积分在四维下包括了两个场。我注意到有了这个特定的作用量, 理论可以分解成一个自由场和一个自相互作用的场。这样一来, 一半的积分可以手算, 另一半仍需要通过数值方法来计算。这需要大量的检验, 而我会用一些简单的计算来检验那些很长的电脑计算。印象最深的是有一次发现一个很大的偏差。我意识到一个施温格项需要被加入计算, 结果数值果然直线降低了。布赖斯评论说, 在他从数据中看到施温格项之前从来不相信它们的存在。

然后就有了一个结论: 没有高能下的不动点。我想知道这一点和渐进安全是否存在有用的矛盾。

7.5.3 费米液体

当我第一次学习费米液体理论的时候, 我对我们怎么能够忽略电磁相互作用这一点感到很迷惑。当我用达维多夫的书来教授研究生量子力学的课的时候更加加深了我这种迷惑, 那本书里详细的介绍了BCS超导理论。它声称, 尽管忽略了看起来很大的效应, 我们仍可以非常准确的计算能隙。这本书说这一点奏效是因为我们利用的是准粒子, 而不是电子。

我在量子场论中从来没有遇到过准粒子这个词, 并且我我不知道任何可以让我们忽略一个相互作用的类似方法。我所知道的就是有效场论, 因

此我用它来尝试，并且成功了。有限的费米子密度对于一个相对论理论学家来说是不熟悉的，但是放到合适的标度下使得它是对的。除了导致超导凝聚的那一项是边缘相关的，所有其它的相互作用都是无关的。因此超导性是因为渐进自由，就像禁闭一样。我做的事情在费米液体理论中已经是众所周知的了，但是我将它用有效场论的语言表述了出来，使得它对于场论学家更清晰。

按照我的特定风格，我并没打算就此给任何报告或者写任何文章。但是那时我正在和杰夫·哈维共同组织1992年的TASI，有人建议我给一系列即兴课程。因此我上了一节关于有效场论如何工作的课，包括对于我的重整化证明的一个非常高效的总结。第二节课解释费米液体理论是如何适用于此框架下的，包括对于BCS理论的处理。这是一个很有价值的综述，而我差点就没有写它。我不应该将自己的光芒藏在一蒲式耳大小的篮子下！

与此同时，高温超导的问题依然是一个很大的谜。它的低能行为，比如导电性，并不满足费米理论。低能相互作用更大，但是我们并不知道其它稳定的低能场论的存在。因此我想，可能我关于费米液体理论的新理解会解决这一问题。我在这方面研究了几个月，尝试了几件事情，但是最终发现我没有贡献什么东西。似乎现在它还是一个谜。

7.6 学生

下面，我想说说我的第三批的三位研究生，他们是埃里克·史密斯，德约里·米尼克和夏梅诚。他们都是在奥斯汀的时候开始跟我工作，并在我搬去UCSB之后完成学业的。德约里和夏梅诚一直跟着我，而德约里则和他的妻子一起留在了奥斯汀。他们每人从事多个课题的研究。对于你们中的大多数，可能对接下来的内容并不感兴趣并选择跳过。但当我回忆起这些时，依然感到非常有意思，也很高兴看到这些学生仍在从事科研。

史密斯的第一个工作是证明 T 对偶在一类时间依赖的解中依然成立，这一点在之前的文章中并不是很明显。之后，他算出了光锥作用量和1+1维弦论的能谱。我们谈论了我在凝聚态里的工作，他有一些自己的想法，并一步步往前走，现在在圣塔菲研究所工作。

米尼克、我以及博士后杨铸写了一系列关于1+1维弦论解的文章。之

后米尼克和杜安·迪克斯合作研究夸克动力学，与希亚莫利·沙迪瑞合作研究1+1维弦黑洞，自己还从事拉廷格液体的研究。那时要找到一个工作很不容易，米尼克在弗吉尼亚理工大学得到教职前做了很多期的博后，现在他在那里研究做得很好。他和妻子乔伊做了很多的牺牲，但他始终对物理有着很大的热情，美妙的是最终物理也给他们带来了回报。

我给夏梅诚的第一个课题是跟随我和施特罗明格关于非临界弦的工作，揭示有效场论可以从一个可重整的场论里导出，从而证实我们的构造。第二个工作有些冒险，想看他是否能将弦论的散射矩阵推广到高维的物体（结果并不是很成功）。他还独立地在1+1维弦论的散射矩阵上做出了很出色的工作。另外他也完成了一些关于弦论黑洞的 α 修正，这是很有挑战性的。除此以外，他和我一起解释了1+1维弦论中的引力场。夏梅诚最终在KEK安定下来，除了研究以外，也用日语撰写了大量关于弦论和AdS/CFT的科普书和教科书。

7.7 告别奥斯汀

多罗茜和我在奥斯汀的时光非常快乐。我们的两个儿子都在那里出生，史蒂文是1986年出生的，丹尼尔是1989年出生的，他们操着德州口音长大（虽然和我们在一起的时候没有这种口音）。我们享受在奥斯汀的生活，除了那里的天气。院系给我们提供了一个很好的成长环境。因此我们并不着急去找其他的地方，有几次我试探性地去找但都不是很满意。

但加州始终是我们的家。尽管我们都出生在离它2500英里远的地方，甚至方向完全相反，但我们最终在加州相遇，而且各自在那里都有很多经历和回忆。因此，如果有机会回去的话，我们也一定很高兴。可是多罗茜的专业是德国文学，这个领域太小众，在可预见的将来没有找到空缺职位的希望。

就在这时，UC圣芭芭拉满足了我们的需求，要知道那时的大学对于家属问题并不像现在这样有求必应。而UCSB不同，它有着渴望成为顶尖院校的决心。多罗茜的职位不像奥斯汀的那么理想，那是一个和她自身兴趣不那么吻合，而且体量也更小的院系。但至少她可以继续追求她的研究，没过多久，她就制定出一个漂亮的计划。当然，那也会让我们离我们的家庭

更近。另外对于我来说，这将是一个非常好的机会，既能和优秀的同事工作，又可以在可以让我专注于科学研究的理论物理研究机构有一席之地。

因此我们没有犹豫太久。对于我来说，最痛苦的莫过于将此事告知温伯格。他是一个伟大的人，他为自己建立的研究组感到自豪。

8 D膜和定向轨型，1992-1995

8.1 UCSB和ITP

加州大学圣巴巴拉分校具有一个世界领先水平的弦论组，其中有安迪·施特罗明格、加里·霍洛维茨，他们是卡拉比-丘紧化的发现者中的两位；马克·斯雷德尼奇，他是不可见轴子的发现者之一，也是一位在粒子物理和量子理论方面很有创造性的思考者；史蒂夫·吉丁斯，他是弦论界年轻的领导者之一，而现在我也加入了这个弦论组。这个弦论组也许是除去新泽西之外全世界最大最强的弦论组。当然新泽西中有P普林斯顿/高等研究院（其中有威腾，玻利亚科夫，格罗斯，克列巴诺夫，米格德尔，维尔切克，纳皮，卡兰，韦尔兰德）以及罗格斯（其中有班克斯，申克，塞伯格，弗里丹，扎莫洛奇科夫）。

我经常会对UCSB物理学的发展感到震惊，从USCB于1944年建校到现在其物理系甚至能再美国排得上前五。所有的其他的顶级物理学院都至少从上个世纪开始。研究相对论的吉姆·哈特尔，粒子物理的雷·索耶，数值凝聚态物理的道格·斯卡拉皮诺和格点规范场论的鲍勃·休格组成的四人团体虽然不是这个发展的开创者却很大的加速了这一进程。

在1978年，在自然科学基金会的高能物理项目主任看到了增进不同物理研究所不同领域合作，以及支持那些因缺少经费可能离开物理学研究的博士后的需要。³⁶ 他劝说上级部门每年调拨约一百万美元支持这个项目。项目组向各个研究所收集提案，而过程按照胜利者所讲的：所有的研究所都说，“我们知道那这笔钱干什么，所以给我们吧。”但是USCB的四人小

³⁶这条信息是从best bits网站上得到的，也许需要修正。我希望best bits上的结果是正确的。

组提出了一个独一无二的想法：他们打算用这笔经费把全世界的科学家聚集到一起“相互作用”长达六个月，而不是举行一次常见的一周长的会议。这样将有足够长的时间提出新的想法并完成合作。同时著名的沃尔特·科恩同意来UCSB作第一任主任。

在所有提案中，自然科学基金会最欣赏UCSB的提案，但是他们希望UCSB可以做出更大的贡献。于是四人小组提出一个其他学校所不能匹及的价码：UCSB可以提供四个终身教职。这些“终身教职”将指导博士后并设计推进科学项目。但是四人小组不得不说服他们的新任校长罗伯特·赫滕巴克支持他们。赫滕巴克刚刚从加州理工来到UCSB，加州理工那面提案的负责人默里·盖尔曼曾向他吹嘘加州理工的提案将会胜过UCSB，所以赫滕巴克也知道这个项目。于是赫滕巴克为四人小组提供了他们所需要的四个额外教职，而UCSB也得到了理论物理中心（Institute for Theoretical Physics 简称ITP），四人小组成为中心的奠基人。所以我的职位的存在也得益于默里·盖尔曼的吹嘘。

研究所最初的四位终身教授是粒子物理学家弗兰克·维尔切克和徐一鸿，凝聚态物理学家吉姆·兰格以及引力学家D道格·厄德利。在我去ITP时，维尔切克已经去了IAS而兰格已经成为ITP的主任。科恩已经结束五年的主任任期并成为物理系的一位正式成员，罗伯特·施里弗已经完成了第二任主任的五年任期并去了佛罗里达州立大学，而吉姆·兰格已经成为了第三任主任。我去那里接替了维尔切克，³⁷ 而在我去的第二年马修·费希尔接替了兰格作为终身教授。

ITP的第一个十五年坐落在埃里森大楼的6层，大楼其余部分包括历史、地理、以及政治学。整个研究所的每一间办公室都可以从中间的一点看到，其中左右各有一个走廊，以及一条垂直的。我比较喜欢这种舒适感，但这大大增加了占地面积。我到这里的一年之后，学校建成了一座专用的ITP大楼，不久后以沃特尔·科恩命名。新的大楼由迈克尔·格雷

³⁷IAS的历史可以命名为“谁得到了爱因斯坦的办公室”。维尔切克去IAS后并没有得到爱因斯坦的办公室，但是却协商得到了爱因斯坦的房子。而我得到了维尔切克在ITP的办公室。所以在某种程度上，这个回忆录可以被命名为“谁得到了那个住在爱因斯坦家里家伙的办公室”

福斯设计，非常漂亮，其一侧坐落在太平洋尽头崖壁之上，这座新的大楼使ITP的容量增加了一倍。

8.2 信息丢失

ITP头20年的日程安排是相同的：上半年和下半年各两个项目，每个项目长达五个月。一般在高能物理、凝聚态物理、以及天体物理这三个主要领域会各有一个项目；而第四个项目可能会是一个新的方向、交叉学科或者某一个方向中的二级学科。如果一些新的问题或方向提出，ITP也肯能临时通知组织一个月的短期项目。

在1993年的开始，也就是我刚刚到ITP时候，两个项目的领域是高能物理和相对论。各自的主题是非微扰弦论和时空小尺度结构。有效的来看这是一个二倍于常规问题的项目，把弦论工作者和相对论工作者聚集在一起。而最终它发展为一个有关黑洞信息疑难的巨大项目。

当霍金的文章首次出现时，我的反应与多数量子场论工作者一样。当我们烧一块煤炭时，无序性会单调的增加，所以熵在最后就会最大。但是这是粗粒化后的热力学熵。如果我们看微观的量子态，对于一个开始于纯态的煤块，他的最终态一定也是纯态，而冯诺依曼熵一定也是零。霍金声称，对于黑洞甚至微观的无序度也会单向的增加，因此最终态将不再是纯态而是混合态，这也就意味着信息已经丢失而量子力学的薛定谔演化不再成立。

所以最单纯的反应是霍金混淆了粗粒化和微观描述，而通过更仔细地描述量子态将会发现霍金的错误。在萨斯坎德在奥斯汀的一个报告中，我第一次学到了为什么霍金的疑难如此困难。大约在我离开SLAC的时候，萨斯坎德开始思考这个问题。他解释一个煤块和黑洞的最大区别是黑洞含有一个视界面。所以对于煤块，一个量子的自由度可以进入这个系统并离开，而对于一个黑洞，一旦物体掉进视界面就不会再逃逸出去。

当这个问题刚刚开始时，我并不确定为什么这个问题会变得重要。我个人认为伦尼的报告向很多弦论工作者们介绍了问题的难度和重要性。与此同时卡兰、吉丁斯、哈维和施特罗明格（CGHS）在近期得到了一个看起来可解的二维黑洞模型，而这个模型可以通过精确计算来研究这个问题。

但是看起来在模型的定义上有一些任意性，所以杰夫·哈维声称：这好像一个罗氏测试，我们可以得到任何想要得到的结果。

ITP的合作项目并没有解决这个问题。第一个重大的推进是七年之后的AdS/CFT，而时至今日它依然是一个需要解决的重大问题。但是ITP的合作的确成功地促进大家交流了这个问题是什么以及可能的解决方法有哪些。实质上，几乎所有想法都可以归为以下三类之一：a) 信息会以霍金所描述的方式丢失；b) 信息从黑洞内部逃逸，看起来需要传播速度超过光速；c) 黑洞并不会一直蒸发，而会留下普朗克ian尺度的残余物。每一种问题看起来都会产生不可接受的结果。

在项目最后的会议上，我主持了一次讨论，在讨论中我组织了一次关于支持哪种解决方案的投票。其中只有很少人投会有残余物或以上都不是，其余的绝大多数在信息逃逸和信息丢失的选择上是60对40。这也反应了听众中有60前者准备放弃相对论，而后者准备放弃量子力学。至于我自己，我是一个不可知论者，前后考虑各种可能来寻找一个解决办法。

另一个会议的亮点是萨斯坎德的两个报告。在开始的一周他介绍了黑洞互补原理的想法，但是在会议结束的那一周，他的想法改进了很多因此坚持要求再讲一次。而组织者（几乎就是我）延长了这一节。

回头看我自己在这一阶段的工作（我很强的依赖于INSPIRE来完成自己的回忆）。这个项目导致了我的几篇有关信息疑难的文章：1) 与吉丁斯、哈维、申克和施特罗明格共同完成的弦论中黑洞的构建；2) 论证了（和施特罗明格一起合作，而他之后推广了这个论证）黑洞内部自由度逃逸到婴儿宇宙模型的模型并不会摧毁信息，而是残留物方案的一种实现。这与科尔曼-吉丁斯-施特罗明格关于幼年宇宙的分析是类似的；3) 一个由大卫·洛·提出并与洛、萨斯坎德、索尔拉休斯，乌格鲁姆合作的关于弦论局域性的讨论。如果弦论是非局域的，那将没有信息疑难的问题。伦尼理解了我们的结果并表示它的确是非局域的。我个人认为这尚无定论：我们并不确定是否选择了正确的测量量。这仍然是一个开放性问题。我们也分析了良好切片（这是一个最初由罗伯特·瓦尔德引进的坐标系统），在这个坐标中切片通过黑洞但并不靠近奇点。

8.3 与马修的合作

事情即将有所巨大改变，但是首先介绍一个关于凝聚态物理的小插曲。刚刚到ITP的马修·费希尔，与一位宾州大学的助理教授查利·凯恩一样都对分数量子霍尔系统中的边缘电流感兴趣。甚至对于最简单的 $\frac{2}{3}$ 的情况，在实验和理论上都有不一致，实验表明电荷只沿着一个方向移动，而理论预言电荷会向两个不同方向移动。费希尔和凯恩系统中的无序性会导致左行和右行部分之间的相互作用，进而变成一个新的相。

他们并没有研究出如何求解得到的哈密顿量，但是认为我应该有一些想法。正如我们在弦论中遇到的一样，这是一个共形场论。但是这里有两个困难：无序性，和不存在洛伦兹不变性。但是令人惊讶的是，只要对理论进行少许修正就可以得到一个意料之外的对称性，进而得以求解理论。于是就可以得到我们所期待的电荷只沿着单向移动结论，但是也得到了一个意料之外的结果：一个沿着相反方向移动的中性流。

这是我的很少的几个可被观测的预言。但是非常遗憾，这个中性流没有被观测到。在超过20年之后，最近这个中性流被明显的观测到，但是其中的故事是更加复杂的。不过我了解到了在凝聚态物理中，作者们不是按照字母顺序排名，而是从年轻到年老。另外，我在那个时候也没有见过凯恩，费希尔是我们的中间人，但是他那时已经因为他的拓扑绝缘体的工作而著名。

8.4 95年的弦论大会

这是弦论发展的缓慢时代。弦论第一次革命产生的兴奋已经过去，而很多被探索过的方向都没有得到清晰的结果。在这个时候，一些新的东西正在酝酿。除了D-膜以及超对称膜，霍洛维茨和施特罗明格的黑膜，方特，伊巴内斯，拉斯特和科维多的强弱对偶，杜夫和施特罗明格的5-膜猜想，在对偶方面施瓦兹和森对有效作用量和谱的研究以及瓦法、威腾和塞伯格在规范理论中的研究。所有这些都是强弱对偶，被方特等人命名为S-对偶，与简单的T对偶并不相同。但是在“战争的迷雾”阶段，这些不同领域的联系并不明显。正如安迪·施特罗明格所提醒我的一样：他、加里·霍洛

维茨和我每天一起共进午餐长达三年，却没有意识到黑 p -膜和D p -膜是相同的。

一件真正让我震惊的是塞伯格的关于 $\mathcal{N} = 1$ 规范强耦合理论的文章。几个月后他与威腾合作了关于 $\mathcal{N} = 2$ 的后续文章则是更加广泛的情况，因为更高的对称性允许进行更多计算。但是让我印象很深的是，即使对于更加物理的 $\mathcal{N}=1$ 的情况也可以做准确的计算。我不能完成塞伯格所做事物的。我需要看到一些事实被证明，这也许首先需要首先搞清楚如何做截断，而这有可能进入一种无路可走的地步。但是塞伯格说如果一个强耦合对偶通过了很多不平庸的检验，那他一定有一些原因，而对偶只是结果。他想要认识什么是真实的情况而不是什么可以被证明。随着越来越多的对偶被发现，他们建立了自洽网络。

对于我自己，我重新研究了D膜。与研究员迈克尔·格林一起，我们研究了一种可能的新的关于D膜的理解，但是最终没有结果。我也考虑了申克的论点，也就是非微扰弦论的效应应该是 $e^{-C/g}$ 的量级的，并意识到D-1维膜也恰好是这个量级。这有一点不平庸：我们要认识到这些D维物体是彼此无关的，所以我们不仅要弦世界面上的自由度求和，还要对所有D膜的自由度求和。我也给过一系列Le Houches报告题目为“什么是弦论？”这由我书（还记得吗？）中的很多介绍章节，以及现在很多可以尝试的方向组成。我也包含了一小节讨论了上面提到的各种对偶。

当95年弦论大会在南加州大学开始时，有一种忧郁的气氛。其中既有职业方面的也有科学方面的影响。首先一个问题是有大量的杰出的博士后找不到工作。组织者专门组织了一个环节让博士后发泄他们的不满。我被要求安慰他们但是不知要说什么。科学方面的问题是弦论革命后的发展减速，以及没有实验的前景。萨斯坎德在晚饭后的包括中强调了这一点。他的观点是我们并不需要实验，我们可以不通过实验就搞明白弦论。他通过讨论各种过去的理论发现来支持这种观点，并展示了这些时候人民怎么来通过单纯的思考得到最后的结果。但是我并不确信我们可以不通过实验发现量子力学。

但是萨斯坎德的一个观点让我印象深刻。他说他想要知道方程的数学而不是解的数学。例如在几何中，求解一个问题的技巧比定义一个问题的

技巧复杂得多。就像萨斯坎德一样，我总是想要找到最简单的例子来理解问题。

讽刺的是两天后这两个问题都被解决了，而那正是弦论的第二次革命开始的时候。每一个人都听了威腾的报告，而他的完整的内容需要花一些时间来吸收。我记得这个报告开始时威腾所组织者要求报告人考虑一些大的问题，所以他要将在所有维度中每种弦论的强耦合效应。报告的想法很简单（他强调这建立在近期赫尔和汤森的工作上）。概要来说，如同塞伯格等人近期在超对称规范场论中做的，假设强弱对偶（ S -对偶）是正确的并检验这是否自治。

取任意的五种已知的十维弦论中的一种，其中有伸缩子场 ϕ 和一个有效作用量 $S(g_{\mu\nu}, \phi, \dots)$ 。对偶意味着在 $\phi \rightarrow -\phi$ 的变换下，可能再要求某些其它变量随着改变，变换后的作用量将依然是某种弦论的有效作用量。的确，对于IIB型弦论这个想法是正确的，因为他对偶于自身。对于 $SO(32)$ 杂化弦，它的对偶是I型弦论（反过来也成立），两者有相同的规范群以及超对称。IIA型弦论有一点曲折：他的强耦合极限是11维超引力。最后杂化 $E_8 \times E_8$ 在报告最开始还没有被解决，但是威腾和彼得·霍拉瓦认出来它是一个轨形上的11维超引力。对于每一个10维弦论和11维超引力，有一个独一无二的强耦合对偶的候选者。更进一步这种对偶可以用一种高度关联且自治的方式推广到BPS的激发态，以及到低维的态。把这些 S -对偶和 T -对偶结合起来，看起来所有的弦论都被联系起来了。³⁸ 对我以及其他的听众这实在是令人无所适从。甚至威腾自己也认为与 T -对偶相比，这个猜想不是很牢靠。但是一年前塞伯格和威腾的工作已经证明了在超对称规范理论中这种推论是可靠的，所以人们并没有花多久就相信了弦论的这种更加奇妙的性质。

在威腾报告的最后，我和迈克·格林对视了一眼说，“这看起来很像D-膜”。对于我来说最引人注意的是我前面提到的 $e^{-C/g}$ 的效应频繁的出现在威腾的对偶中。但是其中有很多需要考虑的事情。威腾的报告大约60页，

³⁸在他的报告中，威腾引入了“M理论”这个词来称呼这个于IIA型超弦和 $E_8 \times E_8$ 杂化弦对偶的十一维理论。当这个理论更加有名时，“M”可能代表迷（mystery），魔法（magic），或者膜（membrane）。而BFSS（见9.2节）则会加上矩阵（matrix）。

而且其中很多观点都是新的。我最终完成了14道作业题来理解这个报告。就像报告中一样，其中有一系列关于K3的问题。而开弦的问题再报告和列表中接近结尾。

8.5 D-膜

第二次超弦革命刚开始的时候，我的进展并不顺利。以威腾的报告记为第零天，而第二天我才和博后们有些作用不大的讨论。（而在前一天，我自己的会议报告是对黑洞信息问题的回顾）。第十四天，我去的里雅斯特的ICTP给一系列有关弦理论的春季学校课程。我当时的已有计划是大量重复我在Le Houches的演讲“弦理论是什么？”。我在八个月前教的这些课程进展是很顺利的，而现在这些内容显得像是过时很多年了。我当时还没时间去吸收领域中新的发展。一系列有关D-膜的讲义都已经非常好了，但是他们的重要性还没有体现出来。因此我还是重复了我更早些讲义的内容，由于诸如塞伯格和Sen等其他报告者已经迅速进入了新的领域而使得我在当时感到非常沮丧。由于这些并且在飞行旅途中睡得很差倒着时差，我在我自己的授课中都睡着了。如果你对此感到难以置信，你可以去问塞伯格。

然而我逐步跟上了新进展的脚步。我和希亚莫利·乔杜里一起研究了一些她已发展的模型的对偶，涉及保持时空最大超对称的杂化弦紧化。并且我同时和我在UCSB的第一个学生，埃里克·吉蒙，一起研究了类型 I 弦理论的紧化。这两个研究课题都涉及到K3曲面—我正在做我的家庭作业。由于找到了一些关于弱 / 强耦合对偶，已经消除了我的一些自然而然的怀疑。

八月时我认为自己已经学习了足够多的弦论对偶知识，从而可以给一些领域专家以外的人做一些总结性质的报告，而我在汤川理论物理研究所就做了一次报告。我以前的学生夏梅诚也刚好回到日本，并且带我游玩了京都，其中包括一个传统浴室和一些风景优美的地方。³⁹ 然而最有意思的

³⁹ 尽管我总是觉得我让夏梅诚处于尴尬的境地，这是因为我总是迷路，或者丢失了火车票而不得不向售票员解释我应该去的目的地。

部分是我自己去京都的一个小的自助洗衣房。当东西放进洗衣机后，我花了一点时间阅读日本的杂志，然后坐下打算做一些物理。下一步是有关开弦的练习功课。而我立刻遇到了问题。

威腾的报告中的SO(32)杂化弦与类型 I 弦之间之间的弱/强对偶已经通过了一些诸如作用量层次上考察，但整体上对偶的研究还是比较缺乏的。这些弦论和唯象学的联系也不是很清楚，并且对于定向反演和开弦还有一些额外的复杂性。其中一个检验就是把系统紧化在一个小圆圈上，在两边都进行T-对偶变换，从而看是否物理上行得通。然而这并没行得通：有一段参数空间使得两边都是弱耦合理论。但这将会是个矛盾：一个理论给出两个不同的结果。

当我回到ITP, 我发了邮件给威腾表达自己认为其猜想中有一不自洽的地方。因此我们一开始对一些非-BPS态做了计算（BPS态是自动满足的从而不会提供一个检验），在杂化弦部分确实有一些态并没有相应的态在类型I理论中。我们发现了问题所在。这时因为类型I的可定向性，T-对偶类型I'理论不是平移不变的。而这就意味着伸缩子是位置的函数，而其非零的平均值意味着在它还可能在空间中出现，产生额外的态。因此我们计算了这些额外的态并且它们严格满足对偶。

这是一个非常规的计算，沿着八维平面有不连续性。我提到这些是D8-膜，威腾问道，“这些怎么能是D8-膜，它们是超对称的？”我解释了D-膜是BPS态，携带拉蒙-拉蒙（R-R）荷。威腾好像非常震惊，并说我应该把这些写成文字（我觉得我们当时没有见面，也不记得他的震惊是否从电话还是邮件中传递过来的）。因此我放下其它事情而开始写文章。

文章仅仅花费了一周多的写作时间。其中大部分内容在我和蔡，戴以及雷的文章中已经有了很好的表述。但有一个新的计算我觉得我需要去做。两个空间维度相加为六的D-膜形成一个电-磁对，并且他们的荷必须满足狄拉克-奈玻梅奇-泰特尔鲍姆量子化条件， $qq' = 2\pi n$ 其中 n 为整数。否则，理论不能自洽的被量子化。这计算是我最喜欢的类型，真空振幅，但是这次有两个D-膜构成的圆柱形边界。我的第一次计算结果， n 为 $\pi\sqrt{2}$ ，而第二次它是 $1/\sqrt{2}$ 。这些都不是自洽，但是这都是人们在进行新的计算时容易范的一类错误。在第三次计算的时候得到了精确的 $n=1$ 。D-膜严格满足量子

化荷，强烈的表明这些是R-R场的源，而之前这没有弱耦合极限并且被认为是带荷的奇点。

正当我做上面计算的时候，我开始听到一些从威腾那里传来我正在写重要文章人的消息。从而我意识到最终，在时机成熟的41岁高龄，做了一些改变科学方向的工作。更有甚者，对我以及领域其他人，这是一个冲击波。我已发现并研究D-膜近八年，但由于缺乏杂化D-膜而并没有收到严肃的对待（在弱耦合并不需要D-膜，但是它们必须出现在强耦合中去理解系统动力学）。但对于大部分其他人，它是一个新事物：弦理论不再仅仅是弦论，它也有D-膜。这些使得许多新的计算变得可能，并且相当快速的弦论变成了D-膜理论。当然，两年后它变成了AdS/CFT 理论，其还是我们最完整的图像。⁴⁰

在这八年的时间里，D-膜是仅属于我和一些其他粉丝的，但是现在他成了世界上所有人的研究对象。在接下来的几周里，人们发现许多之前从没预料到的应用。威腾用它们计算了弦和膜的束缚态。道格拉斯和威腾联系了D-膜和瞬子。威腾和我完成了我们的文章，其也证明了I型的D1-膜和杂化弦之间的对偶。施特罗明格确立了膜终止在其它膜上的规则。汤森和施瓦茨做出了D-膜和十一维M2-膜的联系。（M是被威腾加进去表示十一维理论）。瓦法，伯沙斯基，萨多夫和大栗博司，做了有关它们的拓扑工作然而我还不理解也不完全赞成。⁴¹ 巴卡斯确定了D-膜的散射振幅。施特罗明格和我写了一个有关D-膜和卡拉比-丘流形的他做主要贡献的文章（他总是很大方）；我的主要贡献是早期的在膜相交时的膜-产生的研究。并且，新年的一些天，施特罗明格和瓦法（SV）用D-膜第一次给了黑洞熵一个统计解释。

你可能疑惑，我已经知道威腾问题的答案多久了？我已从我和蔡的工作中就知道D9-膜是耦合R-R场的BPS态，并且从我和戴和雷的工作中已知

⁴⁰我的过去没有太多有关自己的个人生活，但这里有一个奇怪的记录。我的儿子史蒂文正练习曲棍球，并且需要一个教练。我在这方面没有任何资质，而其他人也同样没有，因此我做了自愿者。这对于我来说是很有压力的，并且这几乎和D-膜同时进行。而我记得的是对比D-膜作为教练我花费了更多的精力。

⁴¹我已经告诉瓦法我生命中的一个目标就是理解他的一篇文章，然而还没成功。

道所有 Dp -膜在 T -对偶下都是等价的。但是我认为直到威腾提出这个问题时我才完全的将它们联系起来。

8.6 家庭时间

在这里改变话题似乎显得有些奇怪。然而实际上这是合适的，因为犹如我的物理生涯正在进行的惊人跨越，我的大部分脑力活动实际上都用在做了史蒂文和丹尼尔的曲棍球队教练去了。

多罗茜和我在大学前都不怎么运动，她来自于天主教学派而我是属于一般的书呆子。但在大学里我们都非常热爱运动，并且学校第一年我们一起玩了排球。我们的第一个孩子史蒂文的出生加速了这个过程。在他一岁左右他总是让我扔或者踢球给他。丹尼尔貌似更温顺一点，但他也加入了这些活动，因此我们大部分生活重心是有关运动的。

在史蒂文六岁的时候他开始玩曲棍球，并且一些年后我被邀请成为了他的教练。这对我来说并不是很轻松自然的。即使教物理都总是使得我焦虑，而曲棍球我完全是外行。我接受了这个任务，因此花了一季度时间去弄清楚如何去做。而这恰好同时是 D -膜到来的时间：不知怎么的这些都顺利完成了。

仅仅为了这任务，甚至多罗茜也开始玩曲棍球了。过了一段时间，我们都在同一个曲棍球队里。最终，我转向了围绕圣芭芭拉附近高处的骑自行车运动，史蒂文转到冰球而丹尼尔转到摔跤和武术。⁴²

不顾保罗·马丁的建议，我们整个家庭都从伯克利毕业。史蒂文毕业于经济与统计系。在金融行业从事几年工作后，他正在进行心理学方面的工作。丹尼尔毕业于分子与细胞生物专业，而在UCSF成为了药医，而现在是斯坦福医疗中心的药剂师。

⁴²不过多罗茜和我已随船到了一个新的固定点，匹克球。

9 宇宙学常数与离散统, 1996-2000

9.1 后续发展

因此接下来有了很多报告和学术讨论会议。D-膜是一个有意思的故事：基本上只是系统的对于T-对偶的应用，而从中我们就可以得到很多物理，但它对于大部分人来说是新的东西。在我完成D-膜文章后，我在ITP给了一系列报告，并由克利福德·约翰逊和希亚莫利·邱德利记录；过了几个月我又在TASI给了扩充版本的课程。对于学术讨论会议，最有趣的一点是对偶图（如图所示）。这强调了五种弦论和M理论是联系在一起的，而且各个理论对应某个单一量子理论模空间参数的极限。理论之间应该有对偶联系它们，分别为 S 和 T 对偶。但是我不知怎么的在学术讨论会议和我的书里面转颠倒了那两种杂化弦理论。⁴³

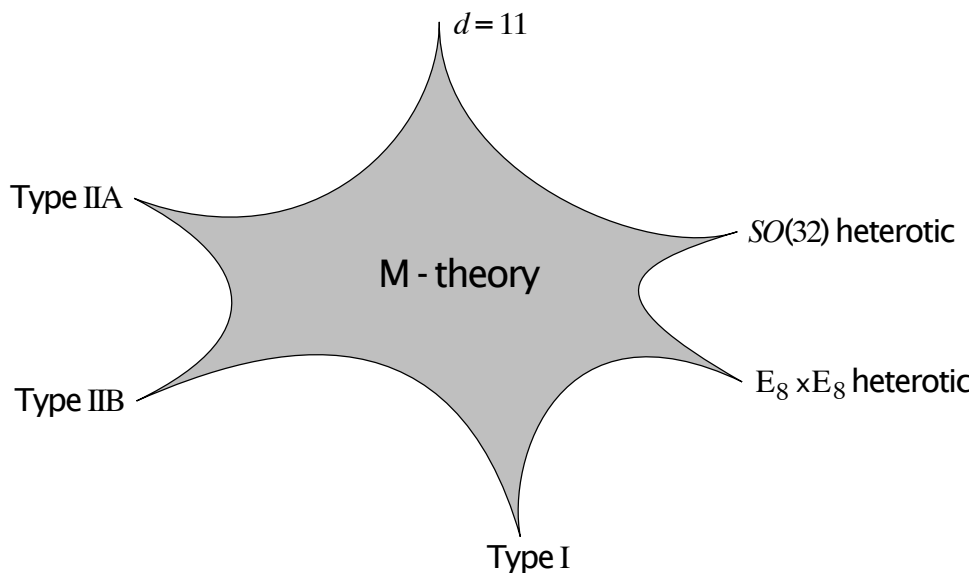


图 1: 对偶图, 其中 $SO(32)$ 和 $E_8 \times E_8$ 不小心被写反了。正确的画法是边界上的 S -对偶和 T -对偶互相交换。

⁴³在费米实验室，其中一个听众，或许可能是猎人，提到那对偶图看起来像个鹿皮，因此我总是认为这是鹿皮图。

因此接下来干了什么？翻看INSPIRE，我发现了那时除了那些综述性文章的三篇文章，是关于定向轨形和K3曲面的。这比我平常做得东西更几何一些，但是定向轨形使得D-膜动力学变得更丰富从而还是有点意思的。而K3曲面，作为最简单的卡拉比-丘流形，有一种轨形极限满足了我对无曲率的偏爱。因此吉蒙和我完成了他的文章，这篇文章是对应D-膜出现前相关研究内容在相当程度上的扩充。⁴⁴ 伯库兹, 雷, 施瓦兹, 塞伯格, 威腾和我进行了对六维K3曲面解的研究, 我想应该是我先和爱德华合作相关研究, 然后由于其他组也正在研究相同的问题从而扩充到整个大的研究团队。我的最后一篇文章又是一篇单独作者的文章, 还是有关K3曲面的难题, 而我喜欢这篇文章是因为我用了迈克尔·道格拉斯的用D-膜做探针的想法。

96年弦论大会在圣芭芭拉举行的。前年施特罗明格就和我谈, “我们应该举办下一年弦论大会,” 而他实际上指 “Joe, 你应该操办下一年弦论大会。” 我轻松的教学任务使得我无法拒绝, 尽管之前我从来没当过一个好的组织者。但是在ITP博后 (希亚莫利·邱德利, 克利福德·约翰逊, 和凯特琳·贝克尔) 以及特别那些优秀的ITP职员帮助下, 弦论大会进展很顺利。然而我对我自己的报告不是很满意。在我八月前改变世界研究潮流的文章后, 我觉得我应该有一些高端响亮的未来项目, 但是所有我已做的都是某些定向轨形的微妙的不自洽性。

我记得两个很有意义的事件发生在会议中。第一个是署名史蒂文·霍金的邮件, 其标题是 “我改变了我的想法, 信息并不丢失”。但是这是一个恶作剧, 因为我们立刻收到了真正的霍金的邮件, 标题为 “为什么我没改变观点”。第二个事件是98年矩阵理论的提出, 作者为班克斯, 菲施勒, 申克和萨斯坎德 (BFSS)。我相信萨斯坎德宣称他们在弦论大会会议中发现了矩阵理论 (并且我记得他被要求给了第二个报告)。

9.2 第三次和第四次革命

几乎在我D-膜文章出来之后, 施特罗明格兴奋的找到我说他能计算黑

⁴⁴ 吉蒙和克利福德·约翰逊还有另两篇相同研究课题的文章。他分别在加州理工, 普林斯顿和伯克利做了三期博后, 写了许多非常好的文章。他现在的工作是在能源政策, 可持续发展, 和慈善事业上。

洞态密度。再从温伯格那里学了广义相对论后，我没有对这问题有过多的思考，而施特罗明格，一个更偏重引力的物理学家，告诉我这问题和信息疑难一样重要。他的计算仅仅差一个正确的常数，并且他在寻求帮助。这些对我来说都太新了，从而我没有什么可以贡献的地方。但是他找到了瓦法，瓦法有正确的计算工具，从而他们第一次严格的数了黑洞态。他们已把弦论到量子引力的新方面联系了起来。

加里·霍洛维茨也对黑洞熵长期保有兴趣。他回到了这个问题，也就是我们如何数普通施瓦西黑洞的态，而不是仅仅保持很大超对称的施特罗明格瓦法黑洞。我们无法得到和SV一样的精确答案，但是通过推广了萨斯坎德的一个想法，我们的确得到一些粗略但有用的结果。想象关闭黑洞的弦耦合，黑洞变小，并且最终达到弦长度。在那一点，我们应该匹配黑洞态密度与弱耦合的D-膜和弦系统的态密度。这给出了一个对应原则，匹配许多黑洞态近似的计数。接下来我们研究了长弦到黑洞的相变。

在数黑洞态上取得成功后，人们很自然地去考虑对比黑洞动力学与D-膜，以此为一个视角去理解霍金辐射并最终信息问题。在阿斯彭，道格拉斯，施特罗明格，和我研究了以膜为动力学探针的而一丛D-膜的相互作用之后，同样也研究了以膜为探针与相关对偶黑洞的研究。两个系统的研究在一圈层次上吻合，这是D-膜和黑洞的一个动力学对偶。而它们在二圈上不吻合。我们找了很多方案去解决这问题，然而我认为最终我们一定得计算某个只在一圈意义上是BPS的量，而这是一个再早期对偶研究中令人困惑的问题。不管怎么样，在那后比较D-膜的动力学与黑洞的变成了一个活跃的问题，并且没有预料到的两边吻合的结论是导致马德西纳发现AdS/CFT的一个暗示之一。

在96弦论大会提出的BFSS矩阵模型，是令人入迷的。它整合D-膜，十一维度超引力，和矩阵模型为一个M-理论完整的描述，此神秘的理论定义在十一维并且对偶于弦论。在当时，大家对这个理论的含义有一点疑惑。现在我们理解其为一种对偶，一个理论的两种不同描述分别在不同的参数区间下都是弱耦合的。但理论所展示的方式，被我们更多地解释成一种弱耦合-弱耦合对偶，而此时我们能通过具体的矩阵理论的计算去得到对偶引力相互作用。

因此去研究BFSS计算能走多远是有意思的。BFSS理论中对纵向和横向的处理是不同的，但是它们不得不结合在一起得到洛伦兹不变的形式。最初的有关引力散射的计算是所有有关横向动量的。纵向方向的计算更加困难，涉及到瞬子修正而不是矩阵理论的圈图修正。然而我们有一个新的博后，菲利普·普利奥，具备一些有关瞬子方面研究的经历，从而我们一起发现瞬子满足纵向过程的要求。这对于我来说是有趣的，我的第一个关于瞬子的具体计算，使我在M-理论的研究中站稳了脚跟。

另外两个博士后，凯特琳和梅拉尼·贝克尔姐妹，也将BFSS的计算从一圈推广到两圈。这是她们喜欢的困难的计算。阿尔卡季·采特林和我一起去理解这些结果是引力理论的吻合程度。我们再一次发现它们是吻合的。

BFSS理论在几个方面上很不同寻常，其中之一是其需要无限维矩阵。萨斯坎德提出即使对有限维 N ，矩阵模型及其对偶模型也有一个物理解释。纵向方向变成周期性的，并具有量子化荷 N 。这是一个有趣的量子系统，我和我在UCSB的第二个学生，西梅昂·黑勒曼，揭示了关于这个具有一个周期性类光方向的系统一些微妙的地方。我当时想在这个方向上做的更多点，但有其他事情而耽搁了。

我经历了连续五个潮流的第二次超弦革命：前四个是威腾的弦论大会报告（加上先前赫尔-汤森的文章），D-膜，SV 黑洞熵微观解释，和BFSS矩阵模型。AdS/CFT成了第五个潮流并且是最好的一个。每一次潮流都依赖于前面的发展，并且每一次都极大的丰富了对弦论的理解。

9.3 改-改-改变

我有一年没有理会写书的事情，但是现在已经到了无论如何我都不得不去完成它的时候了。因此，我决定在我完成这本书前不去做任何其他事。人们告诉我在那段时间我就像一具僵尸，他们知道试图去和我交谈是没有意义的。

为了约束我自己，我把每天要写几页写在一张纸上。这个清单在我办公室的公告栏上贴了二十年，但在写这个章节之前我从未看过它。当我去看的时候我实在是被震惊到了。在九年里，我写完了现在被称作卷一的部

分——还不到整本书的一半。这和坎德拉斯的格言是吻合的，放弃写书要趁早。我想要不是我把写书这件事搞得人尽皆知的话，我早就放弃了。至少超弦革命没有让事情变得更糟糕。有个章节是关于超弦对偶，还有的是关于 D 膜，但在给过学术报告和讲座之后这些都变得很容易写了。之后，正好在期限之前，还写了一节分别是关于黑洞熵和矩阵理论的内容以提供一些基本的观念，最后还有一点关于 AdS/CFT 的段落，只是为了赶上最后的期限。

我在卷一上花了些时间的原因之一是我重写了开始的几章很多次。比如刚开始我认为BRST对称性可能是最核心的原理，但后来我却删减了它的内容，并把相应的东西补充到了共形场论的章节里面。我有个想法，我要写一本非常清晰的书，以至于有学生在某个夜晚拿起它后就无法放下，在第二天清晨他们就会知道什么是弦论。我从未觉得这本书好到令我感到满足，但人们似乎觉得它很有用。

根据我的记录，在六个月里我花了 83 天进行写作，创作了卷二的 500 页：六个月里基本上每周我都有三天在写作。这还不包括对书中许多课题的研究时间，因为之前我本人并没有进行过与这些课题相关的工作。在这期间我有三次短暂的休息，去完成了与贝克尔，贝克尔以及采特林合著的论文和与霍洛维茨合著的论文还有与黑勒曼合著的论文。我还有一些日常生活：记录里显示曾有一次到红杉国家森林公园和克恩河的四天家庭旅行，并且我还继续给我儿子的曲棍球队担任教练。不过我很确定通常时间我依然是一具僵尸。

就是在此期间，我做出了把整本书分为两卷的决定，因为内容量的多少已日渐清晰。整部书的书名，很长一段时间就叫《弦论》。刚开始的时候我也曾用过《弦论现代导引》这样的标题，以表明使用了对玻利亚科夫描述，但我意识到很快这个题目就会过时了。不过假使我今日动笔，也依然想不出其他的写法。我还曾用过《乔的弦论大作》作为早期不正式的标题；我本应该更努力的去让这个标题成为官方的正式标题。

在完成写作后，又有六个月的苦差事：校验，检查方程，设计习题，做编辑要求的修正，写上术语，参考文献和索引。在每一步我都不得不从头到尾去检验，共有800页。索引至少还是有趣的，需要翻开每一页去看是

否有一些东西是读者需要去寻找的。最后我终于完成了所有工作。

我曾稍微降低了我“易读”的目标，也稍微降低了“没有排版印刷错误”的目标。我曾检查过每个方程，但我不得不面对的事实是，关注细节的确不是我的强项。并且在800页包含许多环环相扣的主题的书中保持自洽的符号习惯是尤其困难的。所以现在勘误表超过了400个，其中至少有200个来自于班克斯曾经的学生卢博斯·莫特爾。

最后，我计划添加一些关于超弦理论有限性的证明。我认为我已经很好地解释了为什么模掉快子后玻色弦是有限的。但那篇文献中并没有给出证明，而且在几次尝试之后我意识到，在合理的时间内证明它，已经是我无法做到的事了。的确，这个证明是在最近才被威騰在一系列长论文中做出来。

之前我提到过，因为写书，我错过了在重夸克理论上有所突破的机会。另一个是更多的和西梅昂·黑勒曼合作的机会。他是一个非常出色的学生，有着独特的生活方式（例如，他现在的研讨班包括3000个幻灯片，以定格模式被展示出来）。我们写了两篇论文深入矩阵理论，但就他的关键时期我不得不进入行尸走肉模式一年。他和肖恩·卡罗尔（当时是ITP的博士后）和马克·特罗登一起写了两篇关于畴壁的非常棒的论文。他之后去SLAC/斯坦福和IAS做博士后，之后在东京IPMU拿到了教职，他总是写一些新奇的论文。⁴⁵

我并没有回想起有过任何特殊的庆祝活动，这仅仅是一个回到工作并赶上所有最近令人兴奋的工作的机会。我的版税开始进账了，这是一笔丰厚的报酬，但这并非我写这本书的原因。前几年，大卫·杰克逊举办了一个聚会，向我们展示了他靠他的《经典电动力学》所获得的在伯克利山上的大房子。过了一段时间，在佛罗里达，皮埃尔·拉蒙向我展示了他用他的量子场论书的版税购买的非常棒的望远镜。而随着时间流逝，我的书使我获得了一辆宝马，包括税金：价值是房子和望远镜的均方根。

所以因为书籍而获得的自由是第一个重大的改变。差不多在同一时间，

⁴⁵黑勒曼是那种告诉我去斯坦福对他来说是一种进步和提高自己的自以为是的人。而我是那种会回复“是的，并且我不得不通过说谎把你弄进那个地方”的自以为是的人。这是西德尼·科尔曼一针见血的反馈。

大卫·格罗斯到达了，并成为了新的ITP主任，这是第二个重大改变。在科恩的五年和施里弗的五年，吉姆·兰格为了找到他的后继者而多待了七年，吉姆·哈特尔做了临时主任后还继续在寻找。他们的耐心在大卫·格罗斯接受职位的时候总算是得到了回报。

之前我并不十分了解格罗斯，但但后来自然而然地就发现，他的声誉是名副其实的。ITP以它原先的模式运行了19年，并且依然被视作是世界的典范。但是时候需要革新了，而格罗斯就这样隆重登场了。从那开始，就有了改变。浓咖啡师的出现是第一个标志性的进步，之后又出现了针对不同对象的新项目，针对的人群包括：研究生、有着繁重教学任务的在大学做研究的物理学家，中学老师，艺术家以及新闻工作者，还有新的或者被拓展了的科学领域，例如生物物理，数学物理和地球物理。

最重要的是，他重新组织了项目。之前从一开始项目就一致的按照 $2 \times 2 \times 5$ 月年度计划运行。但是新的建筑并没有被充分利用起来。而且所有项目有相同的时间长度本身就不合理：一些领域和子领域应该比其他的多。家庭和学校的变化使得预计的五个月不切实际。所以项目规模扩大了50%，但时间长短不一。说服其他职员花了一段时间，一些人已经用陈旧的习惯工作了好几年，但格罗斯有他自己的方法。我们还有NSF的B博里·凯塞帮助投资项目扩展（但NSF的资助从来都不够）。这一切都让人又有了新的令人感到兴奋的感觉。

第三个重大改变是施特罗明格搬去了哈佛（他的父亲教授化学的地方）。⁴⁶ 第二次超弦革命引发了一股重新洗牌的浪潮。学院能够看出有一些令人兴奋事正在进展着，尽管他们不能确定那是什么。同时大量累积的优秀研究生找到了工作。

9.4 反德西特/共形场论

在我正在完成我的书的时候，第五次革命浪潮来了，那就是AdS/CFT（反德西特/共形场论）。但我刚好在一个完美的地方。一个名为“弦论中

⁴⁶我必须承认，在所有我停滞的时期我都有幸和一些如想象一般的人物联系在一起——温伯格，施特罗明格，格罗斯——因为那是一种我相信我无法学到的品质。所以用格罗斯换施特罗明格符合我自己的守恒律。

的对偶”的项目被计划安排在1998年的一月到六月进行，而马德西纳的论文在一个月前出现了。此外，他正在参与这个项目，并且在第二周讲述了他的工作。论文和报告都没有立即引起什么感觉。这在当时实在是太新了。我们已经熟悉了场-场对偶，还有弦-弦对偶，但居然有弦-场对偶？自由度怎么去契合？

所以，像许多人一样，关于对偶我经历了库伯勒-罗斯阶段：怀疑，反驳，检验，和接受。最直接的矛盾是弦论比场论有更多的自由度。但场论在大 N 极限下使很多事情变得可能了。更确切的说，似乎可以找到没有场论对应的非超对称弦态。但更仔细的研究发现它们都是束缚态。在经过一些这种查证后，对偶变成了一切正在发生的事情最简单的解释。在我持有这种观点后，很长一段时间里人们会说AdS/CFT只是个猜想而非对偶性就有些使我困扰了。当然，对偶几乎都是猜想，但是“对偶”指明了以上的一些进一步的测试。并且AdS/CFT很快就通过了大量测试且尚未发现反例。

在我完成我的书后，我很慢才进入AdS/CFT这个领域。但我已经习惯了。因为我总是试图搞明白所有一切都是怎样的，所以我进入一个新的领域会很慢。由于这个原因，我很少会担心被别人抢占先机；如果其他人能解决一个问题，就不需要我了。

在AdS/CFT中有个紫外/红外联系，那是说AdS的径向坐标和CFT的能标缩放关系相同。使我和博士后阿曼达·皮特感到困惑的是不同的论证会给出在AdS距离/CFT能量关系上不同的弦论常数 g 的次数。我们意识到不同的关系来自于用不同质量进行的不同的探测。如果探针是被它们的尺度而非能量进行标注的，那么AdS/CFT关系就变得一致了。所以有个尺度倒数-尺度关系，而不是尺度-能量关系。

接下来的练习是去得到作为AdS的S矩阵极限的平直时空S矩阵。这是一个很直接的取极限过程，尽管需要非特·霍夫特大 N 极限。巧合的是，萨斯坎德在同一天发表了同样的结果，不够我觉得他的论文有更广阔的视野。

这使我们讨论起AdS/CFT，并且他告诉我他一直被一个悖论困扰着。如果在AdS中心发生一次量子散射，在边界上的能量密度不能在光到达的

时间之前改变。但是边界上的能量密度必须同时变成新的分布。这似乎是违反因果律的，但实际上不是，这完美的符合量子场论。所以我们分析了体空间和边界因果性，给边界算符引入了“前驱核”来表示内部的体空间算符，那是一个现在广泛使用的概念。但这个想法要追溯到一年前，追溯到班克斯,布格拉斯，霍洛维茨还有马丁内茨（BDHM）以及巴拉苏布拉马尼安，克劳斯，劳伦斯和特里维迪（BKLT）。⁴⁷

9.5 施特拉斯勒

我在ITP时有的其中一次非常重大的经历是一位访问学者进入了我的办公室，向我解释一个“重要问题”的解决办法，并且希望得到我的帮助去把问题解决。

但首先来讲一些幕后故事。卡洛什和林德找到了超引力的新解。它们有负的能量奇性并且排斥有质量的物体，所以KL叫它们“排斥子”。博士后皮特和约翰逊，还有我，在AdS/CFT的帮助下，推导出这个奇点应该展开成非奇性的膜构成的壳层。这是一个令人满意的结果，并且使我能告诉相对论物理学家们他们不能解决排斥问题的原因是因为他们没有足够的膜。我们叫把这种壳层称作增强子，因为它增强了规范对称性。

所以马特·施特拉斯勒带着这个他需要解决的奇性问题走进我的办公室。他对对偶于禁闭理论的四维AdS感兴趣。这些能够很轻易地通过给一些或者所有CFT标量场质量被得到，推出 $\mathcal{N} = 0, 1$ ，或者2的超对称；他叫这些 $0^*, 1^*$ ，以及 2^* 超对称色动力学。问题在于这些东西似乎会导致奇性解，这些解的性质无法被计算出来。施特拉斯勒认为曾用来处理排斥子的想法也许在这里也同样管用。

事实上，甚至在他和我讨论之前他就想到了关键的点子，D3-膜通过一个漂亮的机制变成D5-膜已经被罗伯·迈尔斯发现。所以甚至在他第一次走进我的办公室时，施特拉斯勒就有一个对偶两端都相对完整的图像。例如，他知道那里必须要有NS-5膜和束缚态。我主要的贡献是确认了一个小参数，

⁴⁷最初与萨斯坎德的论文被撤回了，并且提交了一篇更长的作者里包含萨斯坎德的学生尼古劳斯·通巴斯的论文。原始的草稿并没有任何错误，萨斯坎德仅仅是想给出拓展解释。

gN/n^2 , 其中 n 是探针膜的数量, 是可以被计算出来的。最终这给出了一个漂亮的图像, 其中有很多的物理。这也是一片非常长的论文, 而且从未被发表过。施特拉斯勒是一个完美主义者, 而我们被一个东西卡住了, 也就是直接得出 $U(1)$ 的规范因子。令人印象深刻的是, 在同一年他给一个非常相似的问题找到了一个完全不同的解。和克列巴诺夫一起, 他找到了一个纯粹几何的没有膜作为源的解。

我非常开心能有更多的机会和施特拉斯勒合作: 我们的不同观点结合是非常有创造力的。在我的记忆里, 一个课题是从SLAC关于斯坦·布罗德斯基在强散射上的工作开始的, 所有强子成分被散射到一起: 这是被限制住的, 但再场论中依然是幂律。AdS/CFT能得到这个结果吗? 通常人们期望的是在弦论描述里的弱散射可以解释, 但其实是空间的翘曲把这转变成了场论中的幂律。因为我们的第一篇论文用了很长时间, 所以我坚持我们要发表在Phys. Lett., 仅有四页长度, 但依然花了一段时间。

接下来我们把这个问题推广到了深度非弹散射, 通过一个强子去散射一个强探针。这是基本的过程, 通过这个过程, 能看到强子的内部性质。当然, 弦有非常不同的内部结果, 并且相应的散射也就非常不一样。在弱和强规范耦合之间有个从部分子算符的算符乘积占优到强子的算符乘积占优的相变。我在QCD早期发展的时候就听说过这件事。现在我们能够有我们自己的关于AdS/CFT的玩具模型, 并且能够搞清楚什么是一样的什么是不一样的。

我们的最后一个课题, 差不多在几年后, 是理解雷吉行为, 在大 s 和固定 t 下的 $s^{\alpha(t)}$ 。在平直空间的弦散射, 雷吉轨迹 $\alpha(t)$ 是关于 t 线性的。许多年前, 查尔斯·索恩告诉过我, 在QCD中, 轨迹在负 t 类时区域是线性的, 但在类空 t 会弯曲并趋于一个常数。这两个区域被指出分别是软和强(或者BFKL)坡密子。所以我的动机是在AdS/CFT下理解这件事。另外一些合作者, 包括里奇·布劳泽和谭崇义, 也许有其他的动机。结果非常好, 感谢翘曲。软坡密子来自于AdS的红外区域, 而强坡密子则来自于紫外区域。所以, 再一次的, AdS/CFT给出了非常漂亮的方法去思考色动力学物理。

我也有一个很好但鲜为人知的与萨斯坎德一起做的后续工作。他想搞

懂规范理论的弦论对偶如何能够有局域流，这在一般的弦论里是不可能的。这个讨论是在我们都在约翰·施瓦茨60岁生日庆典时提出来的，并且我们就在那解决了它。就像非共形场论对偶的很多方面一样，这归功于体空间的弯曲。但我印象最深刻的是一点萨斯坎德的哗众取宠，他让米米·施瓦茨（约翰的妈妈，并不是一位科学家）在讨论中评判一些东西。他证明了一个论点（令人信服的），那些东西是如此清晰以至于他能向米米解释。所以我们把她的名字加进了致谢里。

9.6 布索

1998年，宇宙学常数的强有力证据被发现了，这使几乎每个理论家惊喜。人们希望弦论家丢掉其他东西去想想这个问题，但这很少有反馈。有很大一部分原因是AdS/CFT被发现了，改变了基础理论的面貌。我们需要在应用它前更加深入的去理解这个理论。

我自己的反应倒是不同，这源自我与温伯格的接触。尽管有些害怕，我还是期待着宇宙学常数。事实上，当证据开始显露的时候，我告诉我的博士后，肖恩·卡罗尔，如果的确存在宇宙学常数，他就能拥有我的办公室。这意味着确实存在人择原理，而我不得不放弃物理。我还做了很多类似的评论，不过不幸的是我不记得了——否则的话这篇回忆录会更有意思。但是肖恩记得，并且在他两年后在一个会议中介绍我时，他问我他何时可以得到办公室。

也有其他一些人不感到惊喜，包括林德,卡洛什,萨斯坎德,班克斯，布索，西尔弗斯坦和卡克鲁。值得注意的是，他们都在西海岸。这是东海岸/西海岸区别的新版本。在东海岸的人期待一个没有宇宙学常数的更优雅的理论，甚至也许只有唯一的基态；也许一些微弱效应能解释宇宙学常数的偏离。那些在西海岸的人没有被卷入那些传言，尽管我更倾向于它们是真的。⁴⁸

⁴⁸大卫·格罗斯，在那时正好从东边搬到西边，处于一个奇怪的状态：他知道事实，但仅仅只能装作这是其他人讲的。

我认为看看是否弦论有正确的微观物理去允许温伯格的解存在或许是个好主意去，但我把这件事推迟了。之后拉斐尔·布索，霍金之前的学生，现在是斯坦福的博士后，到来了。他对同样的问题感兴趣，并且激励我与我们一起思考。首先，很清楚的是这是霍金和杜夫·范·纽文惠曾-奥里利亚-尼科里-汤森以前的老点子，连续变化的四形式势的在弦论中不管用了。在弦论中，形式是遍布空间的D-膜的荷，因此是量子化的。以前阿伯特和布朗-泰特尔鲍姆的想法用到了离散荷，但他们需要并不合理的微小量子 and 巨大的荷，有超对称的是 10^{60} ，没有的是 10^{120} ，以求能得到足够小的宇宙学常数。并且他们没有获取物质的机制。布索和我意识到了弦论里有多重通量，它们不相称的依赖于拓扑。用这个方法，许多不同的更小的荷就能用各种方式结合起来。有100个通量，卡拉比-丘紧致化的数量和10阶的荷将给我们 10^{100} 个态。这创造了比单通量情况更无序的谱，我们叫它“离散统”，正好与“连续统”相反。有了很大的紧致维数，即使是四个通量都能在高维模型起作用。

大多数结论都来自于一两次交流。但当布索借个月回来后，他写完了完整的草稿。他加了一个很重要的部分，理论上能够发现所有这些态的宇宙。这就是林德的永恒混沌暴涨：给出任意一个德希特态，其余东西终将会被膨胀和隧穿制造出来。我总是认为这件事并不是弦论的一部分，但事实上它非常自然的出现了。

当然，在我们写我们的论文的时候，还不知道德西特解，我们就只是去讨论一个简化的模型。但这是有最简单的超对称解的弦论的一个很自然的结果，它有负的宇宙学常数，并且接近更加一般的情况。既然第二次弦论革命给了我们一个更加完整的理论图像，年轻的西海岸理论家就很快填补了这个空白。在一段时间里，弦论只允许负的宇宙学常数是一个常识，只有西海岸人除外。

布索的草稿有一个更加重要的观点。如前所述，许多没有宇宙学常数的想法都会导致没有物质的时空。但在他的（还有Linde的）图像里这个问题并不存在。隧穿更够轻易地制造出暴涨势的激发态，这个激发态此后将衰变到通常的物质。所以，在又填补了一些细节后，弦论制造出了在自然界中被看到的极其微小但又非零的宇宙学常数。

待在ITP真的非常棒。在快速的时代交替中，两个出色的年轻人给我带来了非常重要的想法并希望能和我一起完成它们。每一次合作都是极其完美的互补：施特拉斯勒的粒子物理和场论，布索的相对论和宇宙学，还有我的弦论。事实上，想法如此充裕是有些令人窘迫的。在施特拉斯勒带着他的想法来找我几周后，布索就带着他的草稿来找我。我知道我不能在两个如此严肃的课题中进行同时工作，所以布索不得不等了几个月。

对布索来说更糟糕的是我对提到人择原理的厌恶。在文章完成后，文章在引言和最后一段各提了一下人择原理。仅仅是让我在文章上署名都是非常困难的，但他有王牌。我们刚刚提供给他ITP的高级博士后的位置，他说只有我同意在文章中署名他才接受这个职位。如果不是因为我的阻挠，这篇文章会更像后来被萨斯坎德所做的更加开拓性的处理。

这并非因为布索和我在关于物理的某方面上都不一致。正相反：我认为甚至让实验学家都意识到他们正在测量随机数并因此感到沮丧是引人注意的。我不想成为这件事的罪魁祸首。但当然我高估了实验学家对理论学家的信任和在如此大的障碍中取得进展的能力。布索和萨斯坎德都知道，不把你说的说出来是不对的。再次回到格奥尔基的话：“不要将你的光芒隐藏在一蒲式耳大小的篮子里。”就我所知，这是第一篇写关于弦论和人择原理的论文，是一次对人为否定的力量真切的展示。

10 物理学的终结之后，2001-2007

10.1 贝纳、格拉纳和弗雷

我曾告诉卡罗尔，只要发现宇宙学常数，我就放弃物理生涯，现在我该怎么办呢？还好，在我的弦论教材写完时，我才新收了三名研究生，我总该要对他们负责。而且，我们仍然需要确定所有这些德西特真空是否真的存在。另外关于AdS/CFT，还有很多很酷的东西值得去研究呢。所以，生活继续，而卡罗尔并没有得到我的办公室。

来自罗马尼亚的约瑟夫·贝纳也许是最独立的学生。我想，在我所有的学生中，他应该是唯一一个在学生时代没有和我写过论文的人，虽然

我们后来一起合作过。那时，我只给了他一个课题：计算比AdS对称性少的空间的前驱核（参见§9.4）。我们可以称其为“非AdS/非CFT对偶”，或者近来干脆叫它“规范/引力对偶”。我想验证边界上的共形对称不是必须的，于是他考察了一般性 Dp 的情况，而没有借助共形对称。我想，除了这个原始想法，我给过他的唯一建议就是让他说话慢一点以及多检查一下他自己的工作。之后他在我和施特拉斯勒构建的模型中找到兴趣，将我们的 $D3 \rightarrow D5$ 极化扩展到许多其他具有独特性质的膜系统中。他在USC和普林斯顿做了博士后工作（译注：inspire 上记录 Iosif Bena 是在 UCLA 和 Princeton IAS 做的博后），随后在萨克雷获得职位，在那里他是一位超引力解及其应用领域的专家。

来自阿根廷的玛丽安娜·格拉纳在第一次和我一起读弦论的时候，她似乎对如何用 $\mathcal{N} = 1$ 超对称条件来固定坎德拉斯，霍洛维茨，施特罗明格和威腾的卡拉比-丘解特别感兴趣。其实，自从施特罗明格告诉我他从中赚了多少钱之后，我就一直想做一些这个计算。所以，用这种方法重新推导我和施特拉斯勒之前得到的解是一个很有意义的练习。而且，我们随后推广到了许多其他例子中。⁴⁹从那之后，她完全独立地继续寻找在通量中的膜的有效低能超对称破缺，这可是一件重要而且困难的工作。所以她成为了一名弦论中通量紧化方面的专家，而且写了一篇经典的综述文章。⁵⁰在圣芭芭拉，巴黎综合理工学院和巴黎高等师范学校工作之后，她最终也像贝纳那样留在了萨克雷，在那里他们的优势正好可以互补。

来自韦克福里斯特的安德鲁·弗雷的第一个课题也源于我和施特拉斯勒的一个工作。 $N = 1$ 理论有无穷个超对称真空，它们用D5和NS5量子数标记。不同的真空可以用畴壁相连。施特拉斯勒和我考察了一些例子，而弗雷发现了最一般的情况。他得到了令人吃惊的结果：并不是每对解都是直接相连的；在某些情况下，必须通过好几步才能连起来。在同一时期，另一个更加资深的小组却忽略了这一点。除此之外，他在UCSB非常活跃

⁴⁹就在几年前，我六十岁生日时，格拉纳告诉我，当我第一次建议她这么做时，她觉得比较无聊，但是这却最终逐步成为她一生的工作重点。

⁵⁰我在为巴黎综合理工学院撰写报告时指出，在许多年间，这篇综述是在巴黎综合理工学院产出的文章中引用最高的。

而且兴趣广泛。他和我一起写了一篇关于 $\mathcal{N} = 3$ 翘曲紧致化的文章。⁵¹我对翘曲紧致化感兴趣只是因为它有奇怪的性质，因为通常来讲，超对称只以偶数次幂的形式出现在理论中。弗雷也做了一些别的方面的工作，包括 $\mathcal{N} = 1$ 超对称、BPS态、伸缩子稳定性、对翘曲空间的Lorentz破缺的细致研究（这是在我的建议下）、KKLT模型的不稳定性以及新的翘曲解。这些课题中的几个也有其他学生的参与，包括格拉纳、马修·利珀特、布鲁克·威廉斯、阿努潘·马宗达、和博士后亚历克斯·比谢尔。在加州理工和麦吉尔做了博士后之后，弗雷现在在温尼伯找到了教职，研究方向更多偏向粒子天体物理学。

10.2 西尔弗斯坦和卡克鲁

在ITP最好的事情之一就是能和处在事业关键期的卓越的年轻人一起工作，比如我已经提到了的施特拉斯勒和布索。在超弦第二次革命后的那段时期，有许许多多的成果诞生出来。我已经写过了施特拉斯勒和布索，而现在我要写的是在2001年初，来ITP开展项目的伊娃·西尔弗斯坦和沙米特·卡克鲁，以及一直在这里的史蒂夫·吉丁斯。这个项目名义上是关于M理论的。但是对于我们中的大多数，关注的是如何从用来理解M理论的高超对称情形，转向更切合实际的对称性更少的情形。

在粒子物理中，兰道尔和珊德拉姆已经在五维理论中指出，翘曲紧致化提供了一个在四维中产生大规范层级的新机制。这引起了对这种高维度理论的唯一学的广泛兴趣。因此，一个很自然的问题就是这些模型是否可能与弦理论有更紧密的联系。赫尔曼·韦尔兰德已经指出， $\mathcal{N} = 4$ 弦理论的T对偶可以自然地给出翘曲紧致化。吉丁斯、卡克鲁和我指出这可以被扩展到 $\mathcal{N} = 1$ 。特别是，它可以自动地解释层级的稳定化：它来自通量的量子化。许多但并非所有场可以被稳定住。Kähler模空间的稳定化需要非微扰的结果。

⁵¹翘曲紧致化是一种能实现兰道尔-珊德拉姆模型的弦论方案，最早由施特罗明格和K·贝克尔与M·贝克尔发展起来。

直到这时，弦论的德西特真空的例子仍然一个都没有，更别提通过离散统来解释宇宙常数所需的巨量德西特真空了。甚至存在一个被广泛引用的来自马德西纳和努涅斯的止步定理，该定理更早也被德威特、斯密特和哈里·达斯提出过。如果这在一般情况下是真的，那就意味着要不宇宙学常数是错的，要不弦理论是错的。这个结果被广泛的引用，但一直在钻研这个问题的美国西岸的研究组知道这是胡说八道：这个止步定理只在经典背景下成立。就好比说我们也能断言原子不存在，因为它们在经典物理中是不稳定的。当然也有例外，比如迈尔斯工作中的非临界维度。⁵²

所以我们组就这个问题进行了激烈的讨论。早在2001年一月，在孟买举行的弦论大会上，西尔弗斯坦就已经描述了一些该问题所需的关键特征。特别地，一个来源于紧致空间半径的普遍的不稳定性需要被处理。考虑从十维到四维的标度变化，所有的相互作用在半径趋于无穷时变为零。为了得到一个德西特解，我们需要至少三个项来提供一个拥有稳定的最小正值的势场。在ITP，西尔弗斯坦完成了一个有稳定半径的模型，其三个成分为定向轨形、通量和非临界维数。

人们又花了几年来稳定所有的模空间，而卡克鲁和一批合作者利用膜、通量和D-膜瞬子找到了完整的稳定德西特解。他最初是与吉丁斯和我合作这一工作，随后是与皮尔逊和H.韦尔兰德合作，再然后是与卡洛施、林德、和特里维迪（KKLT）合作。正因如此，人们开始认真考虑存在一大族德西特解的可能性，这被萨斯坎德很好的称作弦景观。⁵²

在ITP的项目中，我也曾和西尔弗斯坦以及她的学生艾伦·亚当斯合作过另外的课题。阿肖克·森表示，开弦快子代表不稳定D-膜的衰变，并且他能够用开弦场论描述这种衰变。闭弦快子更复杂一些：他们代表时空自身的衰变，而不是固定时空中膜的衰变。而且，闭弦场论更难处理。但是我们还是设法取得了许多进展。

快子，就像在空间中充满的玻色弦，很可能并没有稳定的末态。但是，我们意识到，在除了有锥形奇点以外处处平坦的时空中，存在像开弦快子那样被局域化的闭弦快子。所以对于这些快子，我们可以通过结合短距离

⁵²很多年来,基于大的卡拉比-丘流形,景观的大小被粗略估计为 10^{500} 。但是泰勒和王一男最近指出,存在一个F-理论几何,维数是 $10^{272,000}$ 。

下的线性 σ 模型和长距离上的时空场方程来理解它们。结果很简单：膨胀壳中的奇点会扩散开。

10.3 泡利、海森堡、狄拉克

大概在这个时候，有一个为四位量子力学奠基者费米、泡利、海森堡和狄拉克举行的世纪纪念活动。我错过了费米的纪念活动，不过在其他三个活动中做了发言。回顾他们每个人的故事以及注意到他们的一些观点是多么地有前瞻性，真是一件好玩的事。

我认为我关于泡利的演讲并不是那么有趣。我在苏黎世的主题只是检视标准模型中费米负责的所有部分，每一个上面都有泡利标记的挺可笑的缩略图。不过听听其他人的演讲还是非常有趣的，尤其是历史学家诺贝特·施特劳曼的。从他那里我才了解到泡利对于宇宙常数的一些未被发表的兴趣。如果我早知道这些话，那么从泡利到多重宇宙的故事将会是一个更有趣的演讲素材。

另外两个演讲就更加有分量了。关于海森堡，主题是统一：从他的世界方程到我们的M-理论。实际上我在加州理工做学生的时候，海森堡曾经在那儿介绍过他的想法。那时的想法还非常原始，只是说费米子有非线性相互作用。他也想对不确定性原理做一些修正，来产生最小长度。但回想起来，他其实距离矩阵理论只有一步之遥：只需要引入一个矩阵结构来得到非线性对易子，然后把理论超对称化。另一个很有先见之明的想法就是S-矩阵。这导致了另一个联系，即海森堡 \rightarrow 丘 \rightarrow 维内齐诺 \rightarrow 弦。⁵³

我关于狄拉克的演讲是在佛罗里达的塔拉哈西给的，那里也是狄拉克退休的地方。在那里我也拜访了他的女儿莫妮卡。我从回顾狄拉克在量子力学建立前后所做的杰出工作开始，并引用了他非常现代的观点：

我们必须准备好跟进理论的结果，而且感觉上只能接受理论的结果，不管它们会将我们引导到哪儿。

⁵³我在慕尼黑做演讲时，维尔纳·海森堡档案馆的馆长赫尔穆特·雷兴贝格告诉我这个联系比我想的要更直接。早在1954年，海森堡在一封信中写道，他在厄巴纳遇到了一位非常好的年轻物理学家，叫做丘，之后他们始终保持通信。

对于他，这个观点导致了反物质的发现，而对于我，它导致了弦景观和多重宇宙。它也引导狄拉克发现了磁单极子。我的演讲的主要内容正是关于磁单极子，并提出了两个原理：（1）任何需要将电荷量子化的理论框架都会存在磁单极子，（2）任何大统一理论中，对于每个规范场，都存在有着最小相对狄拉克量子的电和磁的源。我举了五个例子来说明这两点：大统一、卡鲁查-克莱因理论、格点规范理论、卡尔布-拉蒙理论和D-膜。所以我表明磁单极子是我们对于标准模型以外的物理的最确定的预言，尽管很不幸，我们没法估计它的尺度。值得注意的是，磁单极子没有被观测到，因此狄拉克撤回了自己的名言。不过他应该更有耐心一些：我们只是探索了很小的尺度。⁵⁴

10.4 更多的细枝末节

这段时间还有一些我不想忘记的文章，但并不值得为它们另开一个单独的章节。

10.4.1 和霍洛维茨的碎碎念

火劫理论就是这段时间产生的，这个想法描述了在膜上反弹的宇宙。一个关于自洽反弹的论据是弦论中消解奇点的例子。刘、穆尔和塞伯格研究了一个零轨形的玩具模型，并发现振幅中的奇点被消解了。但是这个结果忽略了反作用。当然，容易理解的弦奇点是类时的，而火劫的奇点是类空的，所以反作用存在的情况下问题将更加严重。霍洛维茨和我使用广义相对论和弦论研究了反作用，结论是单个粒子引起时空塌缩成强曲率的奇点，甚至在距离粒子任意远的区域。这并不奇怪：直觉上讲，一个反弹需要无穷精细的微调。这也并没有排除反弹的所有可能性，但是强调了这个想法需要精心设计的特性。

⁵⁴LHC 上的小型探测器之一叫做MoEDAL，就是专门用来探测磁单极子的。当这个项目被提出时，有人请我基于这个讲座写一些文章作为支持，我非常乐意。

10.4.2 层展引力?

我喜欢怀疑，不管是对我自己还是其他人的工作。我想，正因为我始终在努力思考各种各样的问题，我总是能对新的论断持谨慎态度。我不总是对的——比如我提到过鲁巴科夫就是一位能使我吃惊两次的人——不过在我的简历中确实应该加一项叫做“被我阻止过的论文”。当然，由于温伯格-威腾定理会对层展引力有限制，它就是一个潜在的警钟。当然，AdS/CFT已经表明这个定理是有例外的，但这些例外要求有完整的额外维度。

张和胡提出的模型需要被更好的理解，因为它似乎从4+1维量子霍尔系统的边界上得到了一个3+1维的引力子。所以我和一位研究生亨利埃特·埃尔万一起考察了这个模型，来看看它是如何规避了这个定理。他们俩的想法是把一个量子霍尔系统的平行拷贝，在比如12和34方向上，叠加起来给出一个 $SU(2)$ 对称性。打开一个磁场后，会产生一个势，它在3+1维边界上给出一个无质量的自由度。此外，人们可以得到无质量的任意自旋，尤其是为2的自旋。注意，这不是全息，而是反全息：场论存在于更高维空间中，而所谓的引力子存在在边界上。

为了分析这问题，我们首先做了一个大- N 极限，使得无质量的自由度存在于平坦空间。然后，我们发现能谱不是一个3+1维空间的谱，而是一个1+1维理论的锥体。比如，低能下的态密度更大。所以这个系统可能有些意思，但是它不是洛伦兹协变的，而且不是描述引力的。

亨利埃特后来和加里·霍洛维茨一起合作，并且在引力和场论领域取得了很大的成功。她现在是密歇根的教授。那时我的学生太多了，难以一一照料，而且我觉得如果她做加里的学生的话会更般配。我喜欢给学生一些定义不明的问题，因为我相信它们隐藏着瑰宝。这种做法通常都奏效，不过喜欢计算的学生还是跟加里一起做研究会更好。⁵⁵

⁵⁵还有两个学生我在这里略过了，一个是唐·马洛夫，他曾和布赖斯·德威特一起工作，现在是我的同事和合作者；另一个是斯科特·托马斯，他曾经和威利·菲施勒一起工作，现在是粒子唯像学的领军人物。不过我觉得如果当初我不是他们的导师，他们也许会做的更好。

10.4.3 可积性

我们的博士后拉杜·罗伊班、我曾经的学生贝纳和我曾经一起讨论是否能够对禁闭有一个解析的理解，至少在大 N 极限，以及可能需要超对称的情况下。我们的想法是运用AdS/CFT，并通过2维弦世界片来重写边界的4维场论（不过由于共形不变性被破坏了，弦作用量将会比较复杂）。所以我们当时希望用2维方法解决这个理论。

作为热身，我们研究了共形 $AdS_5 \times S^5$ 理论。我们知道通过卢舍和波尔迈尔的方法可以找到很多非线性 σ 模型的无穷对称代数。确实，当我们考察这个问题的时候，我们了解到曼达尔、苏里亚纳拉扬和瓦迪亚最近已经在 $AdS_5 \times S^5$ 玻色弦中找到了这个代数。于是我们推广到超弦，挺成功的。

无穷维对称性的存在似乎意味着我们可以做很多新计算，但我们很快意识到这种杨代数不同于通常物理的代数，因此我们仍然面临很多问题。我们也了解到同样的方法，也就是可积性，已经在几个月前被米纳汉和扎伦波应用在理论的CFT一面，而我们的工作是在AdS那一面。于是，可积性成为一个活跃领域，而罗伊班最终成为一篇巨型综述的26个合作作者之一。

之后我自己在这上面的尝试都不太成功。学习这个课题的必要技术体系并不是我做问题的方法。我觉得，“这就是个对称，而我了解所有的对称”，然后准备在我最后一个学生内利亚·曼的帮助下把它做出来。我们都很努力，而且有能力做一些有趣的计算，但最后发现这不是个好方法。我非常擅长做那些物理和数学紧密相连的问题，但是当不得不开始面对那种物理实质并不清楚的问题时，我就失去了方向，这是我的一个弱点。后来内利亚继续和其他学生与博士后一起写了一系列优秀的文章，也和芝加哥研究玻色子唯像学的杰夫·哈维合作过，他现在是联合学院的一名青年教师。

10.5 格罗斯、卡弗里、诺贝尔和未来

这一部分有点偏离主线，但是我必须解释一下ITP项目是如何突然变成KITP项目的，以及一些事情的前因后果。在格罗斯领导下，因为充分利

用新楼，最初的ITP已经有了超过50%的增长。随着时间的推移，他引进了三个新的永久成员（拉尔斯·比尔德斯滕替换了道格·厄德利，利昂·巴伦茨替换了马修·费希尔，还有鲍里斯·施赖曼，他代表了在生物物理上的新努力与决心）。

这样的扩增使得天体物理和生物物理方面多了许多成员，因此不久之后新楼也显得太小了。于是格罗斯去寻找捐助者，并带来了弗雷德·卡弗里。我不知道他们是怎么联系上卡弗里的，也不知道他们的谈判细节：格罗斯对此只字不提。不过最终，我们拿到了基金，并给大楼来一个漂亮的扩建，最后大概有1993年前最初ITP的2.5倍大。此外，扩建使得建筑更加紧密并且增加了许多公共区和办公区。所以在2002年，ITP变成了KITP。一开始，这显得挺奇怪，但是几年后，ITP如果没有K的话就显得光秃秃了。

我们本来打算筹够足够的资金来扩建大楼并且建立一个捐赠基金，不过建造费用飞涨，所以基金泡汤了。但我们确实觉得这是我和卡弗里关系的开始，并且将来能够创立一个捐赠基金。所以当一年后卡弗里提供了同等的捐赠来建立斯坦福卡弗里天体物理研究所时，我们吃了一惊：我们居然成为了连锁店！从那之后，已经陆续成立了20个卡弗里研究所。我们的确又得到了卡弗里更多的支持，不过也仍然需要一个捐赠基金来确保我们的科研活动不受NSF不稳定支持的影响。

但我们最终有了新楼：一个美丽而令人兴奋的工作场所。为了庆祝，在2004年10月，我们以格罗斯的气派作风开了一个三天的会议，邀请了物理学所有领域的领军人物来讨论未来发展。令人高兴的是，就在那个会议的前两天，格罗斯、维尔切克和普利策得了诺贝尔奖。所以会议变成了庆典，大家为了（K）ITP成立25周年，为了新大楼，也为了大卫期待已久的诺奖而庆贺。维尔切克也出席了，表达了他对第一次获得诺贝尔奖的喜悦之情。

10.6 宇宙弦

Higgs机制的其中一位发明者，汤姆·基布尔，也率先研究了宇宙学中的拓扑缺陷。例如，孤立子弦可以在相变中形成，并且以宇宙尺度与膨胀

的宇宙一同伸展。在第一次超弦革命的早期，威腾注意到基本弦也可以做到同样的事情。如果是这样的话，那这将会产生明显的观测效应。

然而，威腾注意到这个想法有一些困难的地方。基本弦有接近普朗克能标的弦张力，而这将导致宇宙微波背景辐射的明显波动。⁵⁶ 并且，这将会出现可能的不稳定性。杂化弦携带轴子荷，因此这些弦会提供一个束缚势，从而约束轴子畴壁，限制它们的生长。I 型弦是不稳定的，会分裂成很多小的开弦。而IIB型弦会被NS5膜瞬子禁戒。

然而在2003年KITP的弦宇宙学项目中，西尔弗斯坦做了一个关于超弦真空的报告，参考了F弦（基本弦）和D弦（狄利克雷弦）的想法。对于宇宙学家埃德·科普兰来说，有两种宇宙弦以及它们的束缚态的想法非常新颖，他对此感到十分兴奋。我意识到了这个想法的一些问题，但那是一个重新考虑这些问题的好时机，因为KKLT的弦紧致化理论以及相应的KKLMMT宇宙学已经建立了。实际上，最后这些问题都被解决了。

首先，KKLT是一种翘曲紧致化，降低了弦的张力，并且很容易满足限制。再者，任何的不稳定性都会被紧致维数的分离，以及翘曲所压低。Tye和他的合作者们论证了，宇宙弦可以在KKLMMT型的膜暴涨中自然产生。因此科普兰和我，以及膜理论专家罗伯·迈尔斯，计算了这些可能的宇宙弦的现象学效应。

一如科普兰，我对此感到非常兴奋：这是一个可能的，接近普朗克能标的物理效应。因此这成为我后几年研究的重要部分。一个首要的问题是，如果我们发现了宇宙弦，我们可以判断它是基本弦还是场论中的孤立子吗？实际上我们可以。正如我们在6.5节关于马茨纳的讨论中注意到的那样，两根弦相互接近的时候，如果它们是孤立子，那么它们的端点将会重新连接在一起，这是一个经典过程。但对两根基本弦，这是一个量子过程：它们的端点或许会重新连接，或许会彼此远离。在与戴瑾研究玻色弦之前，我作为一个习题计算出了这个过程。现今，我和KITP访问研究生奖金获得者尼克·琼斯以及马克·杰克逊一起把这个计算推广到超对称的F弦和D弦，以及它们的束缚态的情况。因此，如果宇宙弦确实被发现了，我们可

⁵⁶对于杂化弦，有一个弦张力，规范耦合，以及普朗克尺度的简单关系， $\mu = \frac{g^2}{16\pi^2 G}$ ，这大了好几个数量级。

以做直接测量它们在弦论尺度下的性质。

然而，沿着这条路，这个工作并不仅仅是这么简单。如果我们要做测量，我们可能会测量弦网络的关联函数。有人已经做了数值计算，但不同的组得到了完全不同的答案。一个关键的量是弦圈在网络中产生的典型尺度，这是引力波从网络中逸出的主要来源。重要的是，从视界尺度（这个计算中的唯一明显尺度）降低到普朗克尺度的估计，是一个定义良好的经典问题。因此，和我最年长的一个学生若热·罗沙，以及部分的和一个访问博士后弗洛里安·迪巴合作，我们做了一个尺度模型去解释为什么会出现两个尺度：这其中有紫外发散。我们想要得到其中的更多细节，但塔夫茨的小组的数值方法最终给出了最好的图像。因此，如果宇宙弦被发现了，这些模拟会变得很重要。

我认为若热对黑洞更感兴趣，而非宇宙弦。幸运的是，我在他离开前为他找到了一个好的黑洞题目。这个题目是研究 $\mathcal{N} = 4$ 理论与可以带走能量的场耦合的对偶理论。用这样的方法，我们可以研究AdS空间中黑洞的衰变。我认为这是对于这个耦合系统的第一个研究。（若热回到了西班牙，并且仍然快乐的研究着黑洞）

在这个时候，似乎我们应该等待实验物理学家做出验证。不幸的是，升级的WMAP和普朗克实验只是降低了宇宙弦的实验上限。但有一个好的时机去思考观测的问题是大有裨益的。⁵⁷

思考宇宙弦带给了我们一个令人惊异的观测效应：开的杂化弦只在 $SO(32)$ 理论而非 $E_8 \times E_8$ 理论中能够存在。这来自于考虑一个弦的一般分类。一开始，宇宙弦被分为“整体的”和“局域的”两种。整体的宇宙弦在中心有流，但局域弦没有。但考虑在弦论中的所有例子，我意识到还有两种新的情况，即阿哈诺夫-玻姆(AB)和准AB型。更进一步，区分它们的正确方式并不是看它们的中心有什么（事实上，这取决于对偶），而是看控制了它们的稳定性的长程性质。因此，我们说整体弦会有一个长程轴子场，它们因此被禁戒。局域弦会被破坏成小的开弦。AB弦因为有离散对称性保护所以是稳定的，除非被无质量场（即准AB弦）携带着同样的荷，此时它们

⁵⁷有几次，观测成对的星系会给我们带来惊喜，这可以通过宇宙弦的引力场产生。然而它们也可能是巧合。

会遂穿，并且在垂直方向展开。

应用这种杂化弦的划分，我们可以发现对于 $SO(32)$ 弦，它可以成为局域的，AB型或准AB型中的任何一种，这取决于紧致化。 $E_8 \times E_8$ 弦必须是整体的。开的杂化弦的问题在于，弦的两边演化的自由度是非常不同的，并且没有一致的边界条件。事实上，当在 $SO(32)$ 弦上的一个世界面场触及边界时，并没有发生反射，而是离开了弦并成为了时空自由度的一部分。这个奇怪的图像在开弦场论中得到了详细的讨论。不幸的是，我没有发现任何比较有用的结论。大卫·莫里森注意到了我恰好在D膜论文十周年的时候发表了这个结果。⁵⁸

10.7 停机时间

这段时间的后几年是我人生中的“停机时间”。固然，我拥有很多快乐的时光，以及一些不错的物理。但这段时间我也有着日渐增长的焦虑。有时这只会影响我睡眠的前几个小时，有时候它们会带走我的白天和我的工作。我能清晰的记得当我2005年当选美国科学院院士的时候，本来那是一个值得庆祝的时光，但那时我发现我有某种不稳定的焦虑。

这其中的一部分原因来自依然残留的发现弦论中的人择原理。我害怕人择原理会阻挡我们大多数通往终极理论的道路。并且，那段时间有很多反对弦论的书籍出版。我对此引起注意是因为罗莎琳德·里德，一个KITP的访问记者，美国科学的编辑，让我评论斯莫林写的书。我觉得这或许是一件好事：很多人，包括我们其他领域的一些同事们，都不加批判地接受了弦论。我试图用它来作为机会支持弦论，但我并不认为我做的很好。正如马克·吐温所说，“当真理还在穿鞋的时候，谎言已经走了半个世界”。斯莫林尝试避免直接的谎言，但当我阅读这本书的时候，我觉得“这不是一个科学家的写法”，或许我能表述的更直接一些。在这部书中，真相被扭曲，来给人以作者希望的印象，而非是直接通往真相的描述。

⁵⁸大约十年前，莫里森从杜克来到了UCSB，获得了数学和物理的联席教授职位。他在联系数学和物理方面发挥了独特的作用。我和他在我是否懂很多数学方面持续进行了友好的辩论（我认为我不太懂）。我认为这种区别和萨斯坎德关于“方程的数学”以及“解的数学”的区分有关，而我只关心前者。

除此以外，我认为我的焦虑和我长期的身体状况有关，并且可以追溯到幼年害羞的性格。我认为一直以来我的很多决定都是更多的被焦虑驱动的，而不是被正面的感情所诱导。马修·费希尔也有一些相关的经验，而他坚持精神药物的价值和有效性。事实上经过一些尝试，小剂量的依地普仑能够保持我的心理平衡。因此，可以说人则原理驱使我吸毒。但在科学主导的领域我们必须遵循科学。

多年以来，我注意到一位来访报告会准备一剂阿得拉，另外一位会准备一剂安定（并且他给了我一份）。一位医生告诉我她的半数患者使用依地普仑，这对一个高效工作的人来说是危险的。并且，追随着据说在兴奋剂的影响下写了1500篇论文（！）保罗·厄多斯脚步，我尝试着用了一段时间的阿得拉。我有一些时间感觉它很有效，但总的来说不是很喜欢它的疗效。

11 2007-2011 在火墙之前，2007-2011

11.1 量子引力：虫洞，黑洞模型，虚无泡沫，圈

花了最近的那几年的大部分时间研究宇宙弦，AdS/QCD，可积系统，以及其他的一些奇特的理论后我停了下来，我想更多地思考一些更加基本的问题：“什么是量子引力？”即便人则原理依然晦涩不明，寻找量子引力的理论仍然是一个需要被解决的问题。解决这个问题或许会给我们带来好多惊喜。再者，这是一个可以用理论上的推导来解决的问题。并且我们有重要的工具，AdS/CFT，或者更一般的，规范/引力对应，而这个工具的威力并没有被完全开发出来。

我开始思考的第一个问题就是科尔曼提出的一个关于欧氏虫洞的老问题：它们是否会在量子引力的路径积分中出现？这个想法始于尼马·阿尔卡尼-哈密德的造访，而他对这样的虫洞是否会兼容于一部分的弦景观很感兴趣。和研究生雅各布·奥尔杰拉一起，我们首先发现了时空中欧氏虫洞的对偶场论是已知的，这是一个很困难的部分。接着，推广雷伊的一个论断，虫洞会在某种意义上违反块分解，这会和对偶场论不一致。（一些人建

议这样的办法可以被在对偶场论中增加非局域项的办法解决，但这只会在边界上产生非局域性。) 所以我们的结论是，这些解不会再量子引力的演化中出现。另一点观察也可以支持我们的论断，因为我们发现的这些解的作用量都比BPS 作用量小。⁵⁹

根据INSPIRE数据库，自我写下关于黑洞和信息问题的论文以来已经有十年了。和不少工作在这个领域的同行一样，我认为这个问题可以被规范/引力对应解决掉，或者以BFSS矩阵的形式，或者以AdS/CFT的形式。这三种选项：信息消失，信息逸出和信息残留，只有信息逸出的看法和规范理论的对应吻合。这会导致如下的问题：信息是怎么逃逸出去的？但这似乎和萨斯坎德、普雷斯基尔和特·霍夫特提出的黑洞互补性很吻合：只要单一观测者不能同时看到两份信息，信息可以同时黑洞里面和外面存在。并且很多思想实验都支持这个判断。

诚然，我们的理解可能是不完全的。举个例子，我们在对偶的共形场论这一边只有一个非微扰构造。我们原则上可以计算黑洞S矩阵，对偶到共形场论，再用数值办法解决问题。但在体的区域，黑洞的半径与普朗克尺度相比要更大，这似乎意味着我们需要一个体理论的非微扰构造。因此，尽管我在这个领域的工作不是很积极，但我经常思考这个问题。2001年马德西纳的论文把这个问题转换为长程两点关联函数，这是一种很有见地的想法，对我很有启发。

因此，费斯图恰和刘洪(FL)的一篇很好的论文吸引了我的注意。他们希望做出一个共形场论的玩具模型，能够蕴含马德西纳所讨论的黑洞特点。即在 N 无限大的情况下，黑洞的长程两点关联函数永远指数衰减，但在有限 N 的地方有一个最小值，通过了两点函数无序的地方。FL认为这种行为甚至可以在弱耦合的共形场论中被观察到。

FL的论断基于图的简单子集的一个截断。和博士后饭冢则裕一起，我们希望寻找到一个可解模型来展示这个行为。在一些尝试之后，我们发现一个矩阵模型可以实现这个想法。特别的，我们证明，在 $N \rightarrow \infty$ 时，有一

⁵⁹当我们喝醉了的时候，安迪·施特罗明格告诉我他认为这篇论文对物理有一个负面的影响。我觉得这很可笑，并且每一次有机会我都会对他提这件事。但这反映出来安迪的乐观看法。他认为每个虫洞都是有好的地方的。

个参数区间使得渐进两点函数指数衰减，这 and 黑洞很像。与此同时，在有限 N 情况这一两点函数会指数衰减然后出现无序行为。

或许关于这篇论文最值得注意的事情是这是我唯一一次使用 Mathematica 软件，来解一个非线性的递推关系。⁶⁰ 除此以外都是一些简单的积分，而对于这些积分我更喜欢用格拉德施泰因和雷日克的积分表来解决。我猜测我是一个勒德分子（译注：指的是1811-1816年英国捣毁纺织机械抗议资本家的团体成员，泛指反对新技术者）（多罗茜作为我的信息技术管理员和我的妻子会完全同意这个看法）。但直到最近我还比与我合作的学生和博士后算得更好。直到现在，我总可以找到不需要更多新技术的题目。

紧接着，和博士后奥田拓也，我们找到了一个更大的模型集合，这包括一个可以在大 N 极限下解析求解的简单模型。我们能够计算它的 $1/N^2$ 修正，而我们中的每一个，做法都不太一样：饭冢则裕使用费曼直接求和，奥田拓也用杨表求和，而我用圈方程。不幸的是，这个情况过于复杂，使得我们不能的得到一个一般的项，或者对一个精确的表达式求和。

这段时间的另一篇论文是处理非超对称轨形的稳定性。和霍洛维茨，奥尔杰拉一起，我们讨论了一般的非超对称真空是否稳定。⁶¹ 我们主要关注非超对称轨形（类似的，亚当斯，西尔弗斯坦和我讨论了非翘曲空间）。这些轨形在弱耦合时候有瞬子，但在强耦合没有，但我们猜测那里有一些不稳定。实际上，这正是威腾的虚空泡沫，但现在我们考虑在轨形扭曲的方向翘曲的情形。

在这个章节的末尾我评论一下圈量子引力。圈量子引力研究者普遍认为，高能情况下圈量子引力会预测洛伦兹不变性的破坏。但对那些熟悉量子场论的人来说，这并不正确：重整化会导致任何符合量纲分析的算符产生对称性破坏，而这包括了可以在低能情况下看到的相关算符。我考虑过把这个论断和其它几个一样写出来，但是因为担心被卷入争论，所以

⁶⁰在此之前，在和怀斯合作的一篇论文中，我用Fortran得到了一个质量谱，他感到非常惊讶。

⁶¹奥尔杰拉一开始是格罗斯的学生，但因为格罗斯拿诺贝尔奖之后很忙，我成为了他的导师。我们在一起写了两篇很好的论文。在他念完博士之后，他回到了意大利的私营部门。

没有去写。幸运的是，柯林斯，佩雷斯，苏达尔斯基，乌鲁希亚和武采季奇(CPSUV)写下了这个观点，我认为这有很大的影响力。因此我很开心。

甘比尼和普林，这两位圈洛伦兹破坏的原始作者，写了一篇论文，提出了两种方式来避免CPSUV 的论断。因此，我研究了他们的论文，然后发现这并不能实现他们的目的。其中一个模型依赖于构造一个欧氏网格，另一个需要依赖于洛伦兹对称性在所有能标的弱化。然后，我意识到了使得其可行的办法，那就是超对称！（然后我发现尼贝林克，波斯佩洛夫，贾因，和罗尔斯顿已经注意到了这个问题）。因此，如果洛伦兹破坏被发现，我们可以说这预言了超对称，但反之不成立。

11.2 理解AdS/CFT

任何AdS弦论都有至少三种尺度：普朗克尺度 l_p ，弦尺度 l_s ，以及AdS尺度 l 。为了使得时空在弦尺度和普朗克尺度上变得光滑， l 必须远大于其他两者。在对偶的共形场论中，这对应着大量(N 个)的场和所有不平凡，自旋3或以上的算符的很大的量纲（尽管这些自旋并不能在低能场论中出现）。似乎反过来这也是成立的：任何在算子谱中有超过2的大的能隙的共形场论，和大量的场，应该有一个时空与之对应。

当琼·佩内多内斯来KITP做博士后时，我得以明确了这个问题。他一开始和吉丁斯以及学生迈克尔（米拉）·加里一起工作，推广我曾经的有关于AdS散射的平坦空间极限的论文。他们完成的很好，并且对我来说这似乎可以用来证明大 N 和大能隙可以产生时空。因此，和我的学生伊策·海姆斯凯克以及杰米·萨利一起，我们考虑了最简单共形场论模型和最简单的不平凡算符：四点函数。

我们通过求解自举方程解出了一般的给定了状态谱的共形场论。然后在AdS中，我们因而找到了一般的给定的自旋和量纲的哈密顿量。这形成了可能的体作用量和可能共形场论的一一对应：并不存在这样的共形场论，它有大 N 和大的能隙，却没有一个体对偶候选者。这里，佩内多内斯的计算能力非常重要，这是我关于使用电脑的记录的第一次（但不是最后一次）例外。我们很希望推广这个工作，但我们的办法很笨，很难推广。但我们可以说我们证明了AdS/CFT对应的一个非凡的性质。

我认为多场和大能隙足够产生一个大的时空这个想法是一个一般共识，并且我认为这来源于汤姆·班克斯，他通常会提出这类深刻的洞见。但我和他查证之后，他否定了这个说法。所以似乎这个想法是自然发生的。

和海姆斯凯克一起我们探索了理解AdS/CFT的新途径。我们计算出尺度-半径关系可以被理解为威尔逊的重整化群形式，因此体中的场可以被一次一次的积掉。关于用重整化理解体半径的这个问题有一些其他的论文，但我认为从是否接近威尔逊观点的意义来谈，我们和大多数别的办法都不太一样（福克纳，刘洪和兰加马尼的很相似）。我们的办法说明，双迹算符即使在平面极限下也能自然产生——这令我们感到惊讶。⁶²

最后，我们的论文启发我考虑一种AdS/CFT的新形式，但这并不是对AdS/CFT本质的新理解。然而，这个办法对AdS/凝聚态(AdS/CM)的研究很有用。事实上，那段时间几乎我的所有工作都基于AdS/CFT，这和所有物理都有联系，从黑洞到凝聚态到共形场论。因此，在写这篇自传的时候，我不得不为了清晰把这些学科分开，但有时绝对的界限是模糊的。

11.3 反德西特/凝聚态对偶

我在凝聚态物理中也做过一些工作，我解释了费米液体，涉猎了非费米液体，并且与查利·凯恩，马修·费希尔有过短暂的合作。⁶³ 我思考了借助AdS/CFT来产生非费米液体的可能方式。我记得大约在2003年，Matthew Fisher宣布高临界温度 T_c 超导将要被解决了。他有他自己的新思路，但我回应道，“是的，它会被AdS/CFT解决。”但是直到现在，我们俩的方法无一成功。

苏比尔·萨契戴夫、与克里斯托弗·赫尔佐克、帕维尔·科夫通、达姆·索恩、肖恩·哈特诺尔、马库斯·穆勒等人一起率先发现了AdS/CM有益的作用。萨契戴夫是关于量子临界现象的世界级专家，该现象的临界点

⁶²一段时间以后，和另一个学生埃里克·明图恩一起，我们把这一点应用在高自旋理论中。

⁶³尽管我已经跟温伯格和格斯做了28年同事，但迄今为止我还没有跟任何诺贝尔奖获得者合作过。尽管我们的目标几乎相同，我猜我们的风格还是稍有区别。但是这种空白看起来很快就会被打破了，凯恩因为拓扑绝缘体而获得了诺贝尔奖。

在零温，但趋向这个零点的方式非平庸。反德西特时空（AdS）是少有的研究这种强耦合不动点的工具之一，而且高临界温度 T_c 看起来就在不动点附近。不过在尝试借助 AdS/CM 之前，我很乐于不采取行动，并且让一大群兴奋的年轻人来解决它。

不过正如我们所看到的，呆在KITP就意味着活跃的访问者总会将我带入新的方向。而这一次，则是因为2009年夏天一个关于AdS/CM的一个月长的“小型会议”。这个会议由肖恩·哈特诺尔计划并开展。当他在2008年初将此会提议给KITP的咨询委员会时，在这个主题上还只有大约六篇、大部分由他所写的论文，但很显然这是一个值得开展的好事，而且当一年后它开展的时候成为了我们最受欢迎的会议之一。因为哈特诺那时只是一个博士后，萨契戴夫和我作为协办者来给这个会议增加一些分量。但是因为我在那之前主持一个长达五个月的弦论会议，所以我让哈特诺尔不得不同意去进行全部的工作。我想当我坚持我的态度时他有些不高兴，特别是萨契戴夫看起来也做了同样的事。

但这是一个杰出的会议，并且将我拉回到这个课题。首先，与哈特诺尔、西尔弗斯坦、大卫·唐一起，我们研究了在探针极限下热背景中的带电场的栗弗席兹对称性。我很怀疑探针近似能否适用于高临界温度 T_c 的情况，但值得注意的是若栗弗席兹量纲 $z = 2$ ，我们可以得到正确的电导率的反常量纲。我想我在这个课题中的主要着眼点是有趣的重整化群（RG）流。

托马斯·福克纳、刘洪、约翰·麦格里维、和大卫·维提出了另一个关于高临界温度 T_c /共形场论（CFT）的方法，他们的方法基于一个 $AdS_2 \times R_{d-1}$ 黑洞。在尝试理解他们的构造的过程中，我意识到它被分成了一个普适的短程部分，以及一个并不普适的长程部分。在麻省理工学院（MIT）取得博士学位后以博士后身份加入KITP的福克纳也有过类似的观点。我们意识到有一种可以推导出这种普适表现的简单方法，这就是我们可以考虑一个红外的四维反德西特（IR AdS_4 ）时空（维度与高临界温度 T_c 有关）与一个三维 $d = 3$ 的没有体空间对偶的紫外场论耦合。因为只有一部分的共形场论（CFT）具有体空间对偶，所以我们称之为“半全息”。解决这个题目

带动了很多关于重整化和凝聚态物质的有趣问题。⁶⁴

克丽丝塔·詹森、卡克鲁、克丽丝塔·詹森、和西尔弗斯坦的另一种方法，着眼于膜在两个方向上运动的模型，这一模型对应于固定电荷组成的点阵和运动电荷之间的耦合。它模拟了高临界温度 T_c 下的费米液体的临界现象（不确定是否应为边缘）。如同许多其它的AdS/CM的尝试，反馈的效应没有被完全控制。很多关于AdS/CM的工作都是“唯象的”，也就是说我们会在不知道对偶的CFT的情况下就假设了一个体空间的理论。我们偏爱具有已知的对偶理论的自上而下的构造。但是这也有缺点：这种理论会有额外的场，特别是倾向于不稳定的标量场。例如在西尔弗斯坦称为“费米海疾病”的现象中，被假定处于原点的标量场会成为快子，并且演化出（非零的）期望值。

我和我最近的毕业生艾哈迈德·阿尔姆海里（Almheiri）⁶⁵着眼于实现稳定的自上而下的费米和非费米液体的另一种方法。从事AdS/CM的工作看起来让阿尔姆海里很沮丧，因为他想致力于量子引力的研究工作，但是我告诉他这是一个很好的项目。最终一切都是对偶的。这个想法只是简单地采用了一个熟悉的对偶，比如 $AdS_5 \times S^5$ 或者 $AdS_4 \times S^7$ ，然后加上一个带有 S^5 或 S^7 荷的磁场。用磁场来使对称性破缺会比用标量场或者电场来破缺更加稳定。这个想法源于德霍克尔和克劳斯，他们研究了一个例子；我们在寻找稳定性的时候则是着眼于一般的情况。这个系统计算起来非常有趣。我们发现，当荷的取值非常接近超对称情况的取值时，就会存在稳定解（就是对于伸缩子固定一种可能的模）。我们在第一稿中忽略了一种不稳定性，而这被多诺斯、冈特利特、和潘泰利杜所完善；这使得稳定的区域有所减少但并未消失。

我最后一个由凝聚态物质引发的想法，是将真空态重新解释为更高维中的有限密度理论。该工作与和西尔弗斯坦合作完成。比如，F1+NS5系统通常被解释为二维上的场论的真空。而我们则提出，F1弦可以被解释为NS5真空中的激发，所以这个态是六维的。当然，通过T-对偶和紧化我

⁶⁴我从没想过我会写一篇关系自旋-轨道耦合的论文。我一直认为它们导致了恼人的对称性破缺，而并未意识到它们已经成为了拓扑绝缘体的关键。

⁶⁵他的前两篇论文中的署名是‘Almuhairi’。

们可以改变维度。我们的主要目的是找到一个具有费米和非费米液体中出现的“ $2k_F$ ”这样的奇点的全息系统。这之前还没有在全息模型中被发现，但是它们确实存在。

11.4 更多的细枝末节

11.4.1 反德西特层级

在 $AdS_5 \times S^5$ 中， AdS_5 和 S^5 的特征尺度是相等的。更一般地，在所有的简单例子中， AdS 和紧化半径位于同一量级。但是在景观中，应该存在密集的具有或正或负的宇宙学常数的紧化。而后者则会包含一些 AdS 半径远大于紧化半径的情况。西尔弗斯坦和我着手于找出这种解。在讨论了一般的约束后，我们偶然发现的策略是在紧化中加入7-膜，因为它们会在能量密度中增加一个负值项。我们找到了一些具有想要的形式的假设，但是我不知道我们是否真的成功了：其中有一些超出了我对F-理论认知极限的奇点。西尔弗斯坦很乐观，但我生性就更加多疑。有可能我们找到的解是对于正能和负能的更加零散和无序的求和。

11.4.2 威尔逊圈

雷、伊、和马德西纳已经表明了共形场论中的威尔逊圈对偶于弦的结束在边界环路上的世界面。更精确地说，这对于BPS 威尔逊圈是对的，其中不但有矢量势，还有标量势。我思考过这样一个事实，通常只有矢量势的威尔逊圈是一个非常好的算符，因此应该在AdS这一边也可以被计算。因为这可能和AdS/CM有关，我和我的学生萨利一起致力于这方面研究。很容易就能找出到底发生了什么。BPS环路的弦满足狄利克雷条件，其位置由环路上标量的方位所固定。于是很容易猜出没有标量的环路对偶于满足诺依曼边条件的弦。确实，这与所有的对称性相符。作为进一步的检验，我们考虑了介于两种极限之间的取值的环路，并且表明在紫外下的简单环路算符和红外下的BPS环路之间有一个很好的流。

不幸的是，当我们把我们简短的论文放在arXiv上的时候，我们获知阿尔迪和马德西纳已经在前些时候注意到了这点。不过重整化的部分是全新

的。所以我们重写了这篇论文，扩展了重整化群的部分（添加了在某些方向上是狄利克雷而在其它方向上是诺依曼的弦）并重新提交。但是我并不知道这有哪些应用——实际上这篇文章只被引用了四次。但是我喜欢它，因为它是重整化群的新的应用，也是AdS/CFT的新部分。

11.4.3 标度和共形

大概25年前，基于扎莫洛奇科夫的1+1维重整化群不可逆定理，我证明了在一般条件下，1+1维的标度对称性也蕴含着共形对称性。从那时起，人们就偶尔会尝试将扎莫洛奇科夫的结果推广到四维，但没有成功过。但最近，人们又开始重新关注量子场论，并且科马尔戈茨基和施维默(KS)成功地证明了3+1维不可逆定理。所以很自然的问题就是3+1维标度不变性是否也会蕴含着共型不变性。幸运的是，KITP的一个针对LHC的研讨会上有两位杰出的量子场论专家，马库斯·卢蒂和里卡尔多·拉塔齐。我们首先花费了一些时间来理解KS的推导，它比1+1维扎莫洛奇科夫定理复杂得多。随后，我们就研究了如何用KS定理推广我的1+1维的论证。

这是一个令人愉快的课题，其中有各种各样的迂回曲折之处，而且我们三个全都贡献了重要的见解。最后我们确实得到了一个定理，但它并不像1+1维时的情况那样普适：它对微扰理论成立，但对于非微扰的理论还需要一个技术性(专门)的假设，不过它看起来是可信的。当另一组人同时宣布得了标度不变但不是共形不变的微扰理论的反例的时候，引起了一些骚动。一段时间后，人们意识到他们的理论实际上是共形的。不过那是一个令人印象深刻的计算，在整理它的过程中我们大大改进了我们自己的分析。而且两组人合力去尝试理解奥斯本的经典论文，这篇论文很久以前就得到了很多重要的结果。

12 火墙的时代，2012-2015

12.1 黑洞里的薛定谔的猫

如果薛定谔的猫在一个AdS黑洞的视界的后面，而且还没有坠落到奇

点，那我们可以通过对偶的共形场论上的测量来得到它的态吗？⁶⁶ 一个规范/引力对偶专家会自然地回答“是”。共形场论是对于对偶黑洞的完备的描述，所以我们可以获得这个信息。实际上，与我的学生海姆斯凯克、萨利以及我的同事唐·马洛夫一起，我们表明了如何得到它。⁶⁷

基本的想法，即在AdS体空间中积分场方程，在早些时候被贝纳和其他一些著名的人做出来的。它被汉密尔顿、凯巴特、利夫谢茨、和洛(HKLL)提炼为一系列论文。我们组率先将它用于通常（单边）的黑洞，但是它看起来很好地发挥了作用。你挑出一个黑洞内部的算符，然后先将它反向积分穿过视界，然后在空间上积分到边界以得到共形场论的算符。

这里有很多微妙之处，最值得注意的可能是我们的一些构造要求了非时序的边界算符，这些算符被映射到体空间中的“时间形”。我们那时并没有在考虑混沌，但是现在它发挥了广泛的作用。论文的第二个版本有两个附加上的内容。就在这个时候萨利加入进来，并且添加了一个详细计算了格林函数的附录。同时我们增加了一个注解指出这个构造由于火墙的缘故只在佩吉时间之前有效，此时火墙刚刚被发现。⁶⁸

12.2 比特、膜、黑洞

在2012年春天，KITP开展了一个为期十周的关于“比特、膜、和黑洞”的研讨会。这个研讨会面向量子引力的基本问题：时空的呈展，面积和熵的联系，黑洞信息问题，以及其它的问题。对于我来说，我得说核心的问题是找到一个体空间理论的非微扰的构造，而黑洞信息问题是关键的线索。

在这个会议开始的时候，我和特德·雅各布森受邀介绍我们关于信息

⁶⁶我所谈论的是由普通物质塌缩形成的单边黑洞，所以我们知道它的初态。

⁶⁷我第一次见到马洛夫时他是一个正在寻找物理专业研究生院的16岁学生。我很高兴他选择了奥斯丁，尽管我错过了将他收为学生的机会。但是在他成为了我在UCSB的同事并一起做一些伟大的工作时，也做得非常好。但是我仍然把他当成16岁。

⁶⁸海姆斯凯克在这方面有一个很不错的后续工作，将它从标量场推广到规范场。当他第一次听我讲量子场论课的时候，他对于基本原理有着明确的兴趣，而且之后在这个领域做了一些不错的工作。但是他还是想与实验联系，而我不能向他承诺这一点。所以在他博士毕业后，他转到了生物物理领域，和施赖曼一起研究细胞的发育。

问题的观点。我介绍的内容和我上一章中提到的基本类似：规范/引力对偶向我们表明了信息没有丢失，而黑洞互补性（BHC）向我们表明了没有悖论。但是在找到霍金的错误的过程中仍然有一个问题：信息具体是怎么出来的呢？⁶⁹

我认为我所说的是一个共识，但是我被震惊到了。信息守恒实际上几乎是普遍成立的。但是第二部分，也就是黑洞互补则不是。大概关于这个最普遍的回答就是单纯的不知道BHC的具体含义。所以我定下了我当前的目标，给出一个可以回答这个问题的BHC的模型。

有一些关于黑洞的量子力学的不错的模型看起来在这里很有用。这些归功于萨米尔·马瑟和吉丁斯的“比特模型”只不过是一条线上的一些比特，以及当比特从黑洞中蒸发出来时会发生什么的规则。这些简单的模型表明了最初的悖论：信息不能从黑洞中逃出，或者必须行进得比光更快。所以我让我现在经验丰富的学生萨利⁷⁰和阿尔穆姆海里，去找出一个可以解释BHC的比特模型。这个想法是将比特系统分成更小的系统，每一个都和一个单独的观测者可以看到的一样多(不明白意思)，并且在它们之间有某种连接条件。但是这几乎直接就失败了。

问题在于，存在一个可以看到信息位于黑洞内和黑洞外的两个副本的观测者，因而违背了量子力学。最初研究BHC的思想实验看起来令人信服，但是一篇海登和普雷斯基尔所写的惊人的论文带来了量子信息理论之中的想法，使得人们对于可以进行的可能的测量有了更加清晰的思考。所以我和我的学生每周都变得更加困惑。我很确定我们必须排除这种对黑洞互补性的基本的违背，而且在KITP的会议中的某个人肯定可以纠正我们的错误。但是没有人能做到。

实际上我们自己的同事唐·马洛夫已经通过不同的途径得到了相同的结论，他所考虑的是从黑洞中“挖掘”东西而不仅仅是将东西扔进去。所以

⁶⁹简单起见，我采用了“霍金的错误”，但这只是一个反讽。他在答案上可能错了，但是他在这一问题的重要性和微妙之所在上是正确的。而且他的“错误”40年来已经挑战了无数的理论家。

⁷⁰萨利对于我们的一些早期工作看起来并不总是很热心，而是投入到了时空呈展和量子信息之中去。他在去斯坦福做博士后以后已经做出了一些杰出的工作，而现在他去了麦吉尔。

AMPS 就同心协力了。我们通过不同的论证得到了相同的结果，没人可以简单地对它进行反驳，这增强了我们对它的信心。最终，我们将它在 BHC 的两位创始人身上进行了验证，其中普雷斯基尔就在会议现场，而萨斯坎德则是通过邮件联系。我推迟了跟萨斯坎德的联系是因为我预期的回复是“是的，我在大约十年前就想过这一问题，而你忽略掉的事情是这个”——之前在其它的观点上我从他那里得到过类似的回复。但是普雷斯基尔和萨斯坎德的反应跟我们当初的一样：首先是“这不可能是对的”，然后在一到两个星期之后意识到并没有简单的反驳。

所以我们写出了我们的结果。BHC 的三个原理不可能都成立：（1）霍金辐射最终是纯态，（2）在视界外平淡无奇（不会违背有效场论），以及（3）对于一个坠落通过视界的观测者来说也没有什么特别之处。所以放弃哪一个呢？不能是（1）：鉴于这个问题，我们都不认为它给出了信息丢失的迹象。我的保守倾向是黑洞尺度的距离上有效场论的某些微妙的失效之处会解决问题，从而违背（2）。马洛夫很确定这不会有用，而视界上必须有些稀奇的地方，而他称之为“火墙”，这会违背（3）。我试着提出关于（2）是如何失效的模型，但是我失败了。所以我不得不赞同马洛夫的结论，也可能是最保守的解决方法：向内坠落的观测者会在视界被“烧掉”。他的另一个直觉是当黑洞的“量子记忆”满了的时候其内部就会中止。所以可能“比特墙”会是一个更加精确的名字。

12.3 个人的评论

在继续谈论物理之前，有几条个人的评论。

我轰动了领域的三次工作分别是——D-膜、弦多重宇宙、以及火墙——可能会给你一种我是一个激进分子的印象，但这并非我有意为之。不过我想我更像狄拉克，拥有将理论拼合在一起的本领以及“一个人必须做好跟进结果的准备”的人生观。但是我们当然知道，即使是狄拉克也要花一些时间来接受他所预言的东西，而我也是如此。在意识到其重要性之前，我花了接近十年时间来考虑D-膜。而对于多重宇宙和火墙，我的倾向是温和地宣传这一结果，而推进这些事情向前发展则依赖于我杰出的年轻同事，布索和马洛夫。

第二条评论则是要提一下许多提出过对黑洞内部修正的其他人。查普林、霍尔菲尔德、劳克林和圣地亚哥以及梅热和莫托拉提出了这类论点，但是我不认为他们的物理讲得通。布朗斯坦有一个和我们类似的论证和结论，但是他的黑洞的希尔伯特空间错了。而确实做了一些正确而且重要的工作的人是萨米尔·马瑟。

即使在弦理论家接受了“AdS/CFT + BHC”并离开之后，马瑟还是将他大部分的精力都投入到信息问题之中。他以模糊球的想法而闻名，这种想法通过更高维的膜位形来修改黑洞的视界。这杯建议为信息问题的结局方案。我对此的问题是，他的几乎所有论证都基于近超对称黑洞，而这看起来并不能推广到史瓦西黑洞上。但是沿着这条路，马瑟使得信息悖论更加尖锐了。

特别地，他提出黑洞互补性会违背熵的强次可加性，而这是AMPS给出的一个论据。我很抱歉我们文章的第一个和第二个版本没有在这个方面感谢他；我认为这是因为我们发现他关于模糊球的核心论点不具有说服力的，因此我们对于剩下的问题也没有给予足够的关注。实际上，你可能会疑惑什么是“模糊球”和“火墙”的区别。我们的想法是视界以比特海的形式而终结，而不是某种延伸至更远的几何结构。

12.4 后续

再一次捅了马蜂窝并观察蜂群非常有趣。在我们花了三个月寻找瑕疵之后，两周之内人们就在没有彻底想清楚我们的论证之前写论文解释我们为什么错了，因而我对此有些懊恼。但是很高兴的是他们中最杰出的拉斐尔·布索和丹尼尔·哈洛都意识到了他们的错误并且撤回了他们的论文。萨斯坎德也做了相同的事，然后又改了回去，而现在已经偏离到某些完全无关的方向上了。

当然，我们只有一个依赖于矛盾的论证，而不是一个关于内部发生了什么的证明或是计算。即使在什么时候火墙会形成这一问题上，我们也只得到了佩吉时间这个上界。我对此没有很好的想法，所以我接下来的一年和之后都花在了阅读每一个人所写的对我们的回复上。各种各样的火墙的替代方案被提出和探讨，而每几个月就会有一个相关的研讨会：在斯坦福、

CERN、KITP。

AMPSS，也就是最初的AMPS团队加上一个来自斯坦福的KITP 研究生奖学金获得者道格拉斯·斯坦福，写了一篇阐明论证并使其更加尖锐的后续论文。我们还指出了各种火墙的替代方案所存在的问题。一个进展是将黑洞放在了反德西特时空中，此时边界条件可以被很好地控制。黑洞通常在反德西特时空中不会减小，但是通过与一个附加的热浴耦合（参见我的学生罗沙的早期工作）我们可以进行可控制的理想实验。我们还发现了一个关于火墙的简化的论证。在原始的形式中需要一个非常快的量子计算机。我们借助蝴蝶效应，表明了即使没有它也会存在悖论。

在第二篇后续工作中，我和马洛夫添加了一些新的论证和观察结果。一个常见的问题是：火墙会使得霍金辐射的计算失效吗？通常的计算依赖于视界后面的几何，但是因果性看起来告诉我们视界后的事件不会影响到辐射。通过一个统计角度的论证，我们表明了辐射不会受影响。我们还回到了薛定谔的猫的问题，表明了火墙的论证还使得我们不能在对偶的共形场论中看出反德西特黑洞的视界后面发生了什么。这看起来与共形场论可以看到完整的内部这一普遍假设相矛盾，但是如果时空终结于火墙的话，这是讲得通的。

令我吃惊的是竟然有这么多的人想试图通过修改量子力学来避免火墙。量子力学不是黑洞互补性的明确假设，而是隐含的条件。所以我认为“量子戏剧”是一个新的替代方案，它们与霍金的在黑洞外测量可见的对量子力学的修改不同。这些修改，包含有终态条件（劳埃德和普雷斯基尔），量子计算的限制（哈洛和海登）， $ER=EPR$ （马德西纳和萨斯坎德），和依赖于状态的可观测量（帕帕多迪马斯和拉朱），都只局限于在视界之后的观测。可能这些中的某一个会是对的，但是每一个都有些问题。我对于依赖于状态特别有疑问。它听起来很好：难道可观测量不都是依赖于状态的吗？好吧，但不是用这种需要修改量子力学的波恩定则的方式。所以唐和我写了另一篇论文来阐明这一点。

这些对于量子力学的修正最终都可能被发现是对的，但是如果你想修正量子力学的话就有许多的解释要做。当然，另一种选择——修改几何结构，也需要许多的解释。有好几种可能实行的方案：火墙（AMPS）、模糊球

(马瑟)、弦(西尔弗斯坦)、“非暴力的非定域性”(吉丁斯)。正如我前面提到的,我是一个天生的不可知论者,愿意测试任何一种可能性。

12.5 膜

黑洞信息问题仍旧是关于量子引力本质的最重要的洞见,但一段时间后这个问题似乎仍旧难以攻克。也许我们需要等 AdS/CFT 提供新的思路。所以我预备要中断一下这个问题了。令人开心的是,D-膜仍然有许多待解的问题。

我的合作者卡奇仍旧在研究 AdS/CM, 他的学生孙思纯在作为研究生访问 KITP 时带来了一个问题。考虑相交的 0123 和 0145 D3-膜。相交的 01 自由度带了一个 $U(1)$ 荷的标量场。从而对偶要求也存在一个 $U(1)$ 磁荷自由度,但它从哪里来呢:它是在相交面上的独立场还是一个孤子性的磁单极子?两者似乎都说不通:膜上不存在独立的磁自由度,但一个 1+1 维的交面看起来又容不下一个 3+1 维的磁孤子。

于是,和我最后的学生埃里克·明图恩一起,我们用四个步骤搞清了这件事:(1) $\mathcal{N}=2$ 表明在 1+1 维的交面上,标量场除电势之外,也与磁偶极子耦合;(2) 1+1 维容许高维相互作用存在,而超对称要求它们存在,从而可以导出 1+1 维的孤子;(3) 在经典作用量里存在一个对数发散,它可以被通常的重整化过程处理(学习重整化中的一些沟壑是很好的,这次是向戈尔德博格和怀斯学习);(4) 因为这个对数发散,有效场论在能量无穷大处失效,因而需要用膜处理。所以在一个简单的系统里有很多奇妙的场论。

在思考这个重整化的新应用的过程中使我原先的一个疑惑得到了澄清。一个膜的运动依赖于它与其它膜的相互作用。但该怎么处理通常会发散的自相互作用呢?原先的常见做法是忽视这一点,并引入一个试探膜。这不是一个可控的近似。但现在我们理解了膜的经典重整化,那么显然以上问题应该用有效场论的语言来理解,而试探膜近似也就不需要了。我同明图恩,以及一个优秀的本科生菲利普·萨阿德一起工作时,想到了这个完美的应用。

跟进并部分参与了 KKLt 模型的发展后,我对宣称它不稳定的陈述感

到了困惑。我试着理解相关论证（巧的是，这些论证很多来自于我以前的学生贝纳和格拉纳），但没有做到。所以当他们的学生（我的徒孙）安德烈亚·普姆来圣芭芭拉做博士后时，我再一次试图理解这些问题。这一次，它们被膜的新诠释漂亮的解决了：这些危险的奇点根本不会出现。所以明图恩，普姆，萨阿德，一个新学生本·米歇尔和我一起写下了膜的正确诠释以及 KKLT 模型的稳定性。

参与 KKLT 带来了更多的交流与合作，并最终受邀在 SUSY 15 会议上作报告。许多人都论证过，或至少是直觉认为，德西特真空不可能存在。这个想法风险很高。如果弦论里没有这样的真空，那么很可能弦论是错误的。如果它有的真空太少，也许人择原理就会被排除。但看看这些反对意见吧，它们大部分都显然是错误的；有些甚至在它们刚被写下的时候就要求那些众所周知与此无关的止步论证了。最有趣的反对意见与 KKLT 的构造同时要求 10 维与 4 维分析有关。经过对能量尺度的细致处理，我们证明了这可以利用有效场论来验证。⁷¹

关于膜的另一个问题起始于和米歇尔一起研究弦模空间中的各种不同的对偶参照系。当普姆加入我们时，他带来了在萨克雷那里关于毛球和 KKLT 的观点。在听过了最简单的例子（2 荷）后，我们意识到对偶的参照系尚未被充分考虑。于是这就变成了留给米歇尔，普姆，另一个博士后陈芳和我的一个好练习：一次通向模糊球中心的旅程。我们刚开始的时候从不同的对偶参照系出发，最终却得到了和最初预料不同的几何。⁷² 将范围限于讨论高度超对称的 2 荷几何，意味着我们距离讨论基本问题还有距离，但也许我们会在路上学到一些有用的东西。

说句闲话，有些演讲者将他们的工作称作一场游戏。我绝不喜欢这种说法：物理对我来说从来不是一场游戏。我的所有研究都指向大问题，尽管有些是以迂回的方式。我是为此待在这个领域的，不是为了玩游戏。话说回来，为什么公众会因为这个理由给我们付薪水呢？

⁷¹尽管如此，值得注意的是，由于没有弦论的非微扰构造（即量子引力），KKLT 构造仍然只是个猜想。另一个超出了信息问题的论证是，我们缺少引力的非微扰构造。

⁷²我们后来知道，马丁内茨和萨哈凯亚已经首先完成了零自旋的情况，但不是在模糊球的语境下做的。

12.6 先驱者和混沌

尽管火墙问题很大程度上被我搁置了，但还是有很多相关问题可以跟进的。有些问题的动机来自火墙，但很多问题的动机来自 AdS/CM 关系和量子信息的一些想法。笠-高柳 (RT) 公式的发现引起了对熵与几何关系的巨大关注。笠和高柳在 KITP 做出了他们的工作，他们甚至还在早期来到我的办公室向我询问公式可能的意义。但由于我对熵的直觉太少，以及对结果可能还抱有疑虑，我没能帮上忙，还错失了成为早期支持者的机会。事实上，我至今还没有做过关于 RT 的工作。许多人加入其中，而我则避免做其他人能做的工作。也许我会等到他们转向新的方向后，再去找找还有什么可能被遗漏的东西。

我与阿尔姆海里的最后一篇文章动机来自 AdS/CM，但得到了一些和量子引力相关的结果——它们全都联系在一起。我曾经对 0+1 维共形场论感到困惑，它们常出现在有限密度系统里。当横向是紧致的时候，共形对称性表明态在低能量密度时需要取 $A\delta(E)+B/E$ 的形式。但 A 这一项仅仅在能量为零时有贡献，而 B 这一项此时会发散，从而不能延拓至能量为零处。那么这个系统里怎么可能像它看上去那样，存在动力学态呢？于是我们考察了一个基于 CGHS 模型的简单模型。当 20 年前 CGHS 模型第一次兴起时，我并没有做相关的工作，所以现在我很高兴有机会能研究它。我们发现，相互作用破坏了共形对称性。这与一些最新的研究也有关联，因为在 SYK 模型中也发生了类似现象（见下文）。⁷³

从体到边界的算符映射一直是我很感兴趣的问题，它最近出现在薛定谔的猫问题里。我和其他人一样曾和它周旋过很多次，但我有种感觉，我们所做的所有事情只是在重写古布泽、克雷巴诺夫、玻利亚科夫和威腾的 AdS/CFT 词典。所以当我读到阿尔姆海里，哈洛和董的一篇文章时非常兴奋，文章展示了一些新的想法，也许是二十年来首次将关注点聚焦在量子信息而非微分方程上。在研究这篇论文的时候，博士后弗拉基米尔·罗森豪斯，明图恩和我意识到，在他们漂亮的玩具模型中关于量子信息的论断可以从规范对称性的角度重述。我认为我们现在的成果只处理了特例，

⁷³阿尔姆海里去了斯坦福做博士后，下文还会提到他的一些好工作。

但有时人们必须像这样发出参战的讯号。⁷⁴

申克和斯坦福继续跟进火墙佯谬，并开始研究黑洞微扰的增长和蝴蝶效应（混沌）。这问题很有趣，我也花了一段时间跟进他们的工作，直到我有了自己的想法。他们的文章和许多人一样，把注意力集中在平衡态黑洞上，伊斯雷尔和马德西纳证明了它对应于双边黑洞。我更习惯最初单边态的黑洞信息问题，于是我想看看那会造成多混沌的结果。我很快意识到这解释了一个我已经考虑了很久的问题。

在超过二十年的时间里，特·霍夫特一直在强调他说的是黑洞散射矩阵。这对我来说毫无意义：它是在广义相对论的量子场论框架下的理论，而没有来自弦论或其它完整理论的信息。但萨斯坎德告诉我应该一直关注特·霍夫特说了什么，所以我记下了这个理论。事实上，他计算的并不是散射矩阵，而是蝴蝶效应，也就是当态出现微小变化时可观测量的变化。这可以从算符的编时序列中看出来。作为副产物，这个理论也给出了一种新的、更加物理的方法来导出火墙。⁷⁵

这个主题变得更有趣是在亚历克斯·基塔耶夫证明了黑洞混沌有一个特征李雅普诺夫指数，并且存在一个 $0+1$ 维矩阵模型，即 SYK 模型，来实现这件事时。这同我原先与饭冢则裕和奥田拓也提出的一系列 $0+1$ 维模型有些相似之处，于是我和博士后罗森豪斯学生米歇尔，还有 KITP 访问研究生约瑟芬·杨一起考察了这些为描述黑洞某些行为而提出的模型，看它们是否能实现带有正确李雅普诺夫指数的混沌。意料之中的是，它们太过简单，并没有实现。

基塔耶夫在不愿意发表，或推迟好几年才发表他的工作方面是很有名的。他的工作里有很多值得注意的地方，可惜它们只出现在口头报告中。但罗森豪斯像个顽强的计算器，他开始拉着我一起重复基塔耶夫得到的结果。结果，我们得到了 SYK 模型的能谱和四点函数，在重复出了基塔耶夫的工作之余也得到了一些新结果。罗森豪斯接着同格罗斯一起发展了一系列推广和变种。他们工作很合拍，常常喜欢连续几个小时在一起讨论和计

⁷⁴明图恩现在在不列颠哥伦比亚做博士后。

⁷⁵近来我很高兴的从斯坦福那里听说，我们在 AMPSS 共同工作时关于蝴蝶效应和火墙的讨论，启发了后来他同申克的工作。

算。

与一个新学生亚历克斯·施特赖歇尔一起，我试着理解帕帕多迪马斯和拉朱的最新成果。其成果便是一项关于可解析延拓的配分函数的研究。在一次去斯坦福的路上，我们发现申克和他的学生也在研究同一问题。最终，加上数值计算的人，小组发展到了九个人：科尔特、古尔-阿里、花田、波尔钦斯基、萨阿德、申克、斯坦福、施特赖歇尔、和手冢。

12.7 好吧，这糟透了

2015年11月30日，我在广义相对论100周年的纪念会议上做了题为“广义相对论与弦”的报告。会议在柏林的哈纳克大厦举办，爱因斯坦生前经常在这里工作和演讲。

按照计划，我原本应该在下一周慕尼黑的另一场完全不同的会议上再做一次报告。这个会议旨在讨论弦或暴涨这样的理论能否被称作理论。我对此很期待，我认为需要提出一些许久之前就应该被重视的观点。我的文章《弦理论来救援》指出了弦论虽然常受到各种批评，但实际上也获得了巨大的成功。

但不幸的是，我没能做成第二场报告。在哈纳克大厦报告的三天后，一次癫痫发作把我送进了医院。⁷⁶ 我被诊断出患有脑部肿瘤。经过经年累月的手术、治疗和恢复，如你所见，我可以写作了；但我仍不知道，我还能不能够继续做物理。

于是，罗斯豪森漂亮的完成了我病倒之前我们最后的两篇文章。九人小组的其他成员在完成了他们的工作后，也慷慨的将我的名字列入论文作者，尽管我只在初期参与了这些工作。我的学生米歇尔与他的另一位共同导师斯雷德尼奇，以及数位研究人员、学生和博士后开展了良好的合作，而现在他将要去 UCLA 去做博士后。我最年轻的学生施特赖歇尔和米林德·希亚尼通过斯坦福大学善意的帮助，在那里找到了新的导师。我一直对

⁷⁶大卫·格罗斯热心地代我讲述了我的报告，但和我的原意有些差别。读者可以在 <https://arxiv.org/pdf/1512.02477.pdf> 看到原始的演讲稿，并在 <https://arxiv.org/pdf/1601.06145> 看到其后续。

斯坦福评价很高，他们与我们在共同感兴趣的领域的重要问题上，形成了某种西海岸阵线。

13 尾声

像这样遍览一个人的一生是件有趣的事。从《什么是什么——奇妙的科学之书》开始直到今天，我走了最自然的直路，几乎很少偏离。我至今没有达成我早年科幻小说般的目标，也没有解释清楚为什么万物会存在，但我得到了关于一切科学中最基础问题的印象。可是已经很接近了：当 40 岁的时候，你可以说我还没有发挥出我的潜力。而如果有人在我发现 D-膜的那六年或更久的时间介入，并指出它们有哪些用处，我没能发挥出我的潜力这一点依然会是事实。

我们距离找到物理学的基本理论还有多远，以及我们能从中学到什么？重申一遍，我是不可知论者，并且不擅长做预测。我只是按照自己的直觉行动。好在我的直觉非常忙，考虑过火墙、混沌、纠缠和量子信息。所以，我们或许已经很接近了，也或许我们还有很长的路要走。我希望能帮助人们搞清这个问题。