

新书推荐：

Holographic Duality in Condensed Matter Physics

孙雅文^{†,1)}

(西班牙马德里自治大学理论物理研究所 (IFT-UAM/CSIC))

2015-11-03 收到

† email: yawen.sun@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20160313

在2007年以前，几乎没有人会意识到弦论和凝聚态理论这两个看上去毫不相关的理论会被联系在一起，并且成为相互关联互为对偶的两个体系。作为现代高能理论物理最激动人心的进展之一的弦理论，诞生于上个世纪60年代末，并从上世纪70年代中期起被期望于作为描述量子引力并且统一自然界中各种相互作用的理论。也许现在很多人对弦论的了解还停留在弦论是一个高能标的无法被目前实验所验证的大统一理论的阶段。而实际上近十几年来，得益于弦论中的引力全息

对偶的研究进展，理论物理大厦中的各个理论领域不再是孤立的个体，而是被联系起来的对偶的一个整体。弦论也不再是一个孤立于其他理论的孤岛，其中一个近年来进展颇丰的研究领域便是弦论(引力理论)和凝聚态理论的对偶的研究。

具体来说，弦论描述的是非常高能标的物理，远远高于我们目前在实验室能实现的最高能标。而最早可追溯到19世纪初，具有悠久研究历史的凝聚态理论作为描述宏观尺度低能标上的有效理论，不管是从研究对象(图1)还是研究方法

黑洞解具有热力学性质，并且其热力学熵正比于视界面积，这直接促使1993年和1994年物理学家G. 'tHooft和L. Susskind分别提出了全息原理的概念，指出一个量子引力体系可以由一个低一维的场论体系来描述。作为全息原理的一个具体实现(图2)，AdS/CFT对应是指一个定义在d+1时空维数上的强耦合共形场论等价于一个定义在d+2维渐进anti-de Sitter(AdS)空间的弱耦合经典引力理论。这里所谓的AdS空间，是指带有负宇宙常数的爱因斯坦场方程的最大对称性真空解，而CFT则是共形场论的简称。在平时的研究工作中，我们有时也直接称其为全息对偶。

上看，都跟弦论没有多少相通之处。然而在1997年由物理学家Juan Maldacena提出的“AdS/CFT对应”^[1]，在之后的近20年里已经逐渐建立起了一个联系目前理论物理学中多个领域的桥梁，包括弦论和凝聚态理论。

上世纪70年代，人们就发现广义相对论中的

强弱对偶的本质，使得AdS/CFT对在研究一些无法解决的强耦合问题上有着得天独厚的优势。在AdS/CFT对对应提出之后，人们逐渐开始将此对对应应用到不同的领域，包括QCD，流体力学等。最早的一个甚至可以说是得到了实验认可的成功案例就是，用AdS/CFT对对应研究某些强耦合场论的流体力学极限下的剪切粘度的性质。剪切粘度是流体力学描述中刻画一个流体远离理想流体的程度的一个物理量，人们更关心的是剪切粘度与熵密度的

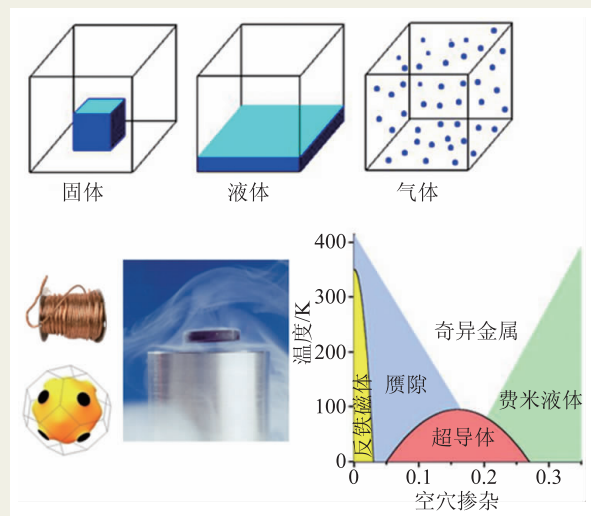


图1 凝聚态理论的研究对象包括日常生活中随处可见的固体、液体、气体等，也包括金属、铜氧化物，超导体等实验室中可实现的物质

1) 孙雅文(YA-WEN SUN)是本书作者之一。她于2010年获得中国科学院理论物理研究所理论物理博士学位，2010—2013年赴荷兰莱顿大学做博士后研究，现为西班牙马德里IFT的Marie Curie fellow，研究方向是弦论、黑洞物理、AdS/CFT对对应及其各种应用。

比例,因为在自然单位制(普朗克常数和玻尔兹曼常数取为1)下,这个比例是一个无量纲的量,具有可观测的意义。自然界中,我们日常生活中可以见到的流体,比如水等,用弱耦合的微扰场论计算出来体系的剪切粘度与熵密度的比值都在大于1的量级。这个比值一般对于强耦合的体系会更小,从2001年开始,人们用AdS/CFT对应来研究强耦合体系的这个比值,发现对偶于爱因斯坦引力的强耦合场论的剪切粘度与熵密度的比值总是大于等于 $1/4\pi$,这个促使三位物理学家提出了KSS下限的假定^[2](KSS分别为三位物理学家的姓氏首字母),认为 $1/4\pi$ 是自然界中流体的这个比值的下限。从2003年开始,人们观测到在布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(relativistic heavy ion collider, RHIC)实验中生成的QGP(夸克胶子等离子体),其剪切粘度与熵密度的比值非常接近但是仍然大于 $1/4\pi$ 。这是弦论以及AdS/CFT对应第一次与实验的碰撞,大大提升了物理学界对AdS/CFT对应的兴趣和关注;并且用AdS/CFT得到的这个下限,其单位由凝聚态理论中大家熟知的普朗克耗散时间决定,此剪切粘度与熵密度的比值的下限相当于给出了普朗克耗散强度的一个上限。

2007年,一篇由凝聚态理论物理学家和高能理论物理学家合作的文章^[3]揭开了AdS/CFT对应应用在凝聚态理论中的应用的序幕,其作者之一是著名的哈佛凝聚态理论物理学家Subir Sachdev。在此之后,这个被简称为AdS/CMT(CMT是凝聚态理论的缩写)的新兴交叉领域开始了

迅速的发展。将AdS/CFT对应应用到凝聚态理论中有很多好处,首先因为它是一个强弱对偶,只需要研究一个经典引力体系就可以解决很多强耦合的多体系统的问题;其次对于需要在近平衡的扰动下研究

的传输系数,AdS/CFT有非常简单的对应计算方法,可以直接在闵科夫斯基度规下进行计算;另外,这也给一直无法被实验所检验的弦论提供了与实验密切接触的机会。

AdS/CMT迅速吸引了一批富有物理直觉和才能的高能和凝聚态物理学家的加入,并在几年之内在研究有限密度的物质方面取得了非常重要的进展,研究对象包括对平衡态和非平衡态的研究,研究方法包括用top down(从弦论或者超引力出发的模型)的方法和bottom up(直接唯象构造的模型)的方法。一些广受关注的进展包括对全息超导、奇异金属、非费米液体、量子霍尔效应、金属绝缘体相变、量子相变、手征反常体系、非平衡态、纠缠熵、平移对称性破缺的体系等领域的研究。

基于AdS/CMT的迅速发展,本书的作者之一荷兰莱顿大学Jan Zaanen教授²⁾2012年曾应邀作为Solvay教授在布鲁塞尔的Solvay institute做了一系列关于AdS/CMT的讲座。我们最早也是2012年春天在荷兰的时候开始了本书的雏形的写作,当时是作为Jan Zaanen在Solvay institute的相关讲座的讲义,并在2012年10月完成了最初的接近300页的版本,讲义完成之后被上

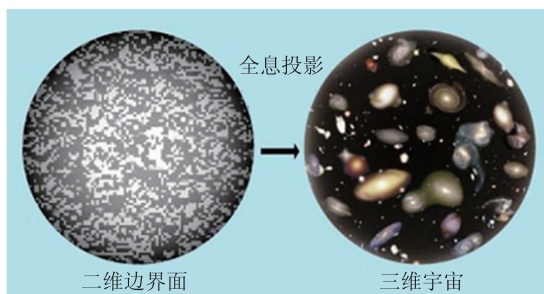


图2 全息原理示意图

传到了网站作为讲座的参考书。Jan Zaanen本身是一位极负盛名的凝聚态物理学家,但一直都对弦论和广义相对论有很大的热情,还曾在美国的圣巴巴拉卡弗里理论物理研究所听过一系列关于弦论和广义相对论的讲座,他也是最早积极加入到AdS/CMT领域的凝聚态物理学家之一。2013年初,Jan跟我们讨论关于这个讲义的去向问题,当时的考虑是可以直接贴到预印本网站arXiv上面,这样可以增加引用和影响力。与此同时,AdS/CFT及其应用作为一个迅速发展并且得到广泛关注的领域,也引起了学术界最大的出版商之一剑桥大学出版社的重视。剑桥大学出版社在学术领域具有重要影响力,从1584年印刷第一本书,至今已经出版了超过25000本学术书籍,这些书籍来自超过140个国家的50000多名作者。当时Jan Zaanen收到剑桥大学出版社策划编辑发来的出版邀请,我们讨论之后决定考虑在剑桥大学出版社将它出版。

在我们将讲义的几章发到剑桥大学出版社并且通过了其审稿程序之后,就开始了最紧张的为期一年的写作过程,逐渐将300页左右的讲义增加到了近600页。其最大的原因是,AdS/CMT是一个发展非常

2) Jan Zaanen 是荷兰莱顿大学洛仑兹研究所的理论物理学教授,荷兰皇家科学院和美国物理学会成员,曾获得荷兰Spinoza奖。

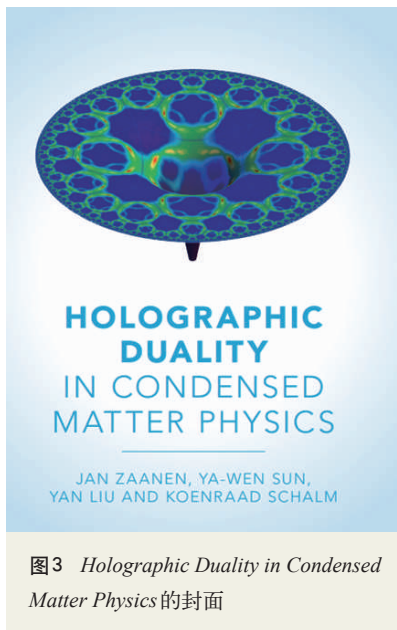


图3 *Holographic Duality in Condensed Matter Physics* 的封面

迅速的领域，就在那一年的写作时间里，不停地有新的有趣的进展涌现，并被我们加入到书里面，直到我们在2014年初决定对新出现的内容给了一个时间点上的截断。

我们写这本书的出发点是把它作为一本AdS/CMT方向的教科书，既包含由浅入深的入门知识，又有综述性的最新进展，所有的内容都是从物理图像出发，而将技术性细节放入到穿插在正文中的单独计算细节版块里面。Jan Zaanen一直被公认为是具有物理大图像的物理学家，也被本书的审稿人之一称赞为是最适合写这本书的人，因为他既在研究工作中触碰到凝聚态物理中最基本的问题，又对AdS/CFT以及弦论引力理论等有足够的了解，因此可以最大程度地做到在弦论引力的技术性细节中提取凝聚态物理学家所关心的信息，并将其表达出来，打破凝聚态物理学家不能读懂弦论语言的障碍。同时在书中，我们也做到了深入浅出地将一个个物

理图像传达给读者。

本书面向的主要是对AdS/CMT比较感兴趣的凝聚态物理学家和AdS/CMT方向的研究生以及研究人员。考虑到部分不太了解凝聚态理论的对AdS/CMT领域感兴趣的高能物理学家们的需要，书中先用第二和第三章介绍了一些相关的凝聚态物理知识，接着在第四章和第五章介绍了AdS/CFT的基本知识和对应规则等等。第六、七、八章分别介绍了AdS/CFT在热力学中和流体力学方面的基本知识，以及在有限密度体系中的应用，然后从第九到十三章，我们把每章作为一个专题，分别介绍了AdS/CMT在几个重要领域的进展，包括奇异金属、非费米液体、超导、平移对称性破缺和top down方法等领域的方方面面。书中第十四章主要是总结和展望，列出了一些重要而未解决的问题的同时，也简单介绍了与量子信息相关的一些全息对偶的研究。我们用总共14章的篇幅，勾勒出了一个整体的大图像，即AdS/CFT已经成为连接起理论物理中各个领域的桥梁，包括弦论、引力理论、凝聚态理论、QCD、量子信息等等。

这本书已经陆续收到了业内相关著名物理学家的高度评价，包括哈佛大学的Subir Sachdev教授等等，其中美国斯坦福大学的助理教授Sean Hartnoll，也是本领域的开创者和领导者之一，他评价说：“The authors have done an impressive job marshaling the disparate results from holographic investigations of condensed matter physics into a coherent narrative. They have provided helpful introductions both to open

challenges in contemporary condensed matter physics and also to the string theoretic notions underpinning holographic duality...”。这个书评精确地描述了这本书的一个很重要的特点：它是为高能物理出身但对凝聚态理论不是很熟悉的AdS/CMT领域的工作者，以及对此领域感兴趣的高能理论工作者而写的一本著作，贯穿全书的主线是从凝聚态物理的角度去描述我们从事AdS/CMT研究的动机，并强调在弦论和引力的计算中呈现出的最令凝聚态物理学家感兴趣的物理信息，提出未来需要解决的问题，所以对于这一部分读者，这本书中的内容可以构建出未来研究工作的物理大图像并起到一定的指引作用；与此同时，书中对全息对偶中所涉及到弦论方面的字典和技术性概念以及计算等等也都有非常详尽的介绍，对那些对本领域感兴趣而又没有高能物理背景的凝聚态物理学家也可以起到入门和指引的作用。同时这本书也特别强调了AdS/CFT对应对连接现代理论物理中多个领域所起到的桥梁作用。

据悉，这本书已经在2015年11月5日由剑桥大学出版社正式出版，可以在剑桥大学出版社官网或者各国的亚马逊网站上购买，售价为49.99英镑。

参考文献

- [1] Maldacena J M. *Adv. Theor. Math. Phys.*, 1998, 2: 231
- [2] Kovtun P, Son D T, Starinets A O. *Journal of High Energy Physics*, 2003, (10): 064
- [3] Herzog C P, Kovtun P, Sachdev S *et al.* *Phys. Rev. D*, 2007, 75: 085020