

我们的壮游*

孟子杨[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2019-05-15 收到

[†] email: zymeng@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20191007

题记

奥登在悼念叶芝的时候，写下了这样的诗句：

...

Mad Ireland hurt you into poetry.

Now Ireland has her madness
and her weather still,

For poetry makes nothing hap-
pen: it survives

...

爱尔兰疯狂的现实使得叶芝悲伤，诗人只能转而呼唤理想中的世界。笔者在这里记录下三年来在欧洲漫游的文字，其实也是对于身为其中一份子的国内物理学研究环境的反思，是对理想境界的呼唤。疯狂的爱尔兰伤痛了叶芝，他只能转向诗歌，纵然他的诗歌流传了下来，诗人心中的痛苦又有谁能体会。笔者有时看到身其中的环境和环境中的个人，包括自己，都在狂躁气氛的夹裹之下开始有变得疯狂的苗头，常常感到惶恐却又没有地方可以转向，只能默默地希望一切还会好起来。

历史

The Grand Tour(壮游)是17、18世纪欧洲大陆上浪漫主义时代兴起的活动。英国、荷兰、德国等北部欧洲新教国家富裕的贵族或者商业

家族的青年士子，用一年、两年或者更长的时间，从法国开始，一路向南，经过瑞士、奥地利进入意大利，遍游欧洲古典文明和文艺复兴发生的地方，米兰、佛罗伦萨、威尼斯、罗马、庞贝，一路走到地中海环绕的那不勒斯。观摩罗马建筑的遗迹：万神殿、大浴场、记功柱、凯旋门、斗兽场……；品味文艺复兴大师们创造的艺术精品：米开朗基罗在佛罗伦萨和罗马留下的传世作品(《大卫》、《西斯廷教堂天顶画》)，拉斐尔的《雅典学院》，达芬奇的《最后的晚餐》，但丁的诗句和诗人在佛罗伦萨留下的踪迹，乌菲兹美术馆里美第奇家族的收藏……。游兴更浓者，干脆再上溯到希腊半岛。须知当时的希腊仍在土耳其奥斯曼帝国的统治之下，此行颇不容易，但是斯巴达、雅典的诱惑还是让很多青年士子不顾危险奋身前往，其中知名者如拜伦，更是在浪漫情怀的感召下，将诗句和生命都献给了壮游的行迹。如此宏阔的壮游之旅断续地进行了二百年，是英国、北欧的青年士子追本溯源、开阔视野，完

成人生教育，寻找生命方向的重要步骤。多少日后的学者、文人、艺术家、科学家、政治家，都在这条壮游的路上走过。拜伦、雪莱、吉本、斯宾塞、卢梭、歌德、汉密尔顿、特纳，……一长串闪着光辉的名字都是壮游之旅哺育出来的人杰。

当年欧洲的年青士子在壮游的旅途上深入地体会着希腊、罗马、文艺复兴的丰厚文化沉淀，与沿途的学者、艺术家、科学家、官员、百姓交流，甚至如拜伦、汉密尔顿者，深入到当地事务中(拜伦和希腊人一起闹革命反对土耳其，汉密尔顿成了那不勒斯王国的座上宾，花了三十年时间收集罗马史料和文物)。当时北欧国家都已是新教培育出的文化和思维方式，而青年士子



图1 The Grand Tour。壮游中的青年士子们重温罗马的遗迹，背景中的万神殿、凯旋门，近处的元老院残垣、人物塑像都是古罗马的宏伟建筑，历两千年而不倒。遥想凯撒、屋大维、西塞罗、奥勒留等等人物都曾在此风云际会，不由得让人心驰神往(图片来自 wikipedia)

* 原文刊发于“中科院物理所”微信公众号。本次发表作者有新内容注入。

们在南欧看到罗马天主教、文艺复兴、古罗马、古希腊等遗迹，理解消化了文明的差异与传承。正是因为有了这样深入地体会交流，有如此深度的思想碰撞，有从迷惑抗拒到吸收认同的完整过程，有了壮怀激烈却又潜移默化的熏炙，他们才能厚积薄发，创造出新的文明和文化。18、19世纪席卷欧洲的浪漫主义运动大潮在文学、建筑、音乐、政治、经济等方面的建树，都来自壮游之旅培育出的种子：具象在德国就是狂飙突进；在法国为大革命、为自由平等博爱、社会契约、三权分立；在英国为工业革命、进化论、为资本主义现代国家的形成。

深入的交流，体会文明之间的差异与传承，再孕育出新的文明，壮游的功绩，善莫大焉。

己身

时间又过去二百年，历史总有重演的倾向，彼时壮游士子们所需要的时间、经费与当地熟络的人脉，这些条件在2016年的夏天里，也被我们不经意地具备了，让我们开始了一场为期3年的凝聚态物理学的欧洲壮游。



图2 美因茨(Mainz)河畔童话般的维尔兹堡，老桥和对面山上的城堡。从学生时代笔者就在桥上盘桓，看过桥下四季的流水，看过夜晚头顶的一轮圆月(图片来自 wikipedia)

2016年，笔者有幸获得德国研究基金会(Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) Mercator Fellow的奖项，这个奖项是DFG专门为了在其大型研究项目中邀请国际成员参加而设立的。笔者这个Mercator Fellow就是安排在项目Research Unit FOR 1807“Advanced Computational Methods for Strongly Correlated Quantum Systems”之中^[1]，该项目关注凝聚态物理学强关联量子多体计算领域，网罗了德国、奥地利主要的研究小组，量子蒙特卡罗、严格对角化、密度矩阵重整化群、张量网络态、动力学平均场等等量子多体计算方面的专家都在其中。研究小组分布在德国慕尼黑、维尔兹堡、德累斯顿、哥廷根、亚琛、奥地利因斯布鲁克、维也纳等知名的大学和研究机构，群贤毕至、少长咸集，其中颇有笔者当年在欧洲负笈求学时的师长、同行、朋友。这个奖项支持笔者和学生、博士后等团队成员，每年赴德国、奥地利与整个项目中的成员小组讨论交流，寻找可以展开合作的物理问题。经过与DFG的协商和考虑到各自的时间，商定每年10月或11月，在德国深秋的季节，访问2周

或者3周的时间，连续4年。本文写作的时候，正是笔者与团队第三次访问结束。在返回北京的飞机上，回想三年来的过程，心潮起伏不能自己，遂决计写下这些心里面酝酿已久的文字。

近年来中国的基础科学研究取得

了长足的进步，凝聚态物理学更是如此，国际交流也日益频繁。但是相信许多从业人员都有与笔者类似的感受，我们确实参加了很多国内外的会议，进行了许多看似热闹的交流，但是问问自己到底学到了什么，往往不多，这就是因为走马观花的旅行团式的交流，只是在走过场，只能收获热闹、新鲜与疲惫，没有深入的交流，没有思想的碰撞。

另一个问题就是同质化的会议遍地举行，这个问题在国内尤甚。同样内容的会议北京办完上海接着办，参会者们也跟着整体平移；而且会议的日程又是如此紧张，甚至没有给参会者可以坐下来讨论的时间。遥想当年壮游路上的年青士子们可以在米兰看到《最后的晚餐》的悲悯，在佛罗伦萨感叹《大卫》的雄壮，在威尼斯凭吊圣马可教堂上拜占庭铜马的沉厚和提香的飘逸。不像我们国内诸多名目不同的会议上总是见到几个相同的邀请专家，听到内容重复的报告。如今知识更新的节奏当然加快了，大家都没有了二百年前的充裕和悠容，但是旅行团式的交流确实是不可取的。正是基于这些考虑与感受，笔者和伙伴们开始了我们的壮游，尝试进行一种新的交流方式。

游踪之一

2016年的第一次壮游，我们花了两周的时间，走访了德国维尔兹堡大学Fakher Assaad教授小组，亚琛工业大学Stefan Wessel教授小组，笔者间道德累斯顿的马普复杂性研究所，顺访了Frank Pollmann副教授和Roderich Moessner教授，并在那里偶遇现在物理所的同事万源副研究员和重庆大学的同行张学

峰教授(这些且按下不表)。同游的伙伴是彼时在中科院物理所和中国人民大学攻读博士学位的许霄琰与何院耀,目前二位都已顺利博士毕业,开始各自的第一届博士后,已有让人耳目一新的优秀独立工作问世。

Fakher Assaad 教授是整个 Research Unit FOR1807 的 Speaker,亦是笔者求学欧洲时亲切的师长。他在相互作用费米子大规模蒙特卡罗计算领域,在费米子量子蒙特卡罗方法发展、模型设计与软件开发,在数值计算和解析理论结合研究量子物质科学新范式等等都是世界级的专家,有开拓性的贡献。维尔兹堡虽然是一座中世纪童话般的小城,大学却赫赫有名,远有伦琴发现 X 射线,近有量子自旋霍尔效应的发现。

彼时笔者的团队正在努力计算相互作用下的拓扑物质形态。能带拓扑不变量在相互作用系统中失效^[2-3],相互作用驱动的超越朗道一金兹伯格框架的拓扑相变^[4]等都是那段时间的工作。何院耀、许霄琰与笔者都在 Assaad 教授的小组里报告了我们的工作。而且当时的一些讨论,尤其是关于如何走向费米面与临界玻色子耦合问题的量子蒙特卡罗计算,对于笔者团队接下来推动的方向,都起到了理清思路的作用。这些讨论也直接引发了许霄琰紧接着在铁磁巡游电子量子临界点计算上的突破^[5]。

自 2016 年始,由于受到人工智能思潮的提醒,尤其是受到笔者在物理所的同事王磊副研究员不遗余力地推介,笔者和当时从 MIT 来物理所访问的刘军伟(现为香港科技大学助理教授)、物理所的许霄琰、当时在 MIT 的戚扬(现为复旦大学副教

授)、MIT 的傅亮等人一道发明了自学习蒙特卡罗方法,运用低能有效玻色子模型克服量子多体计算的临界慢化问题(这里的故事,见笔者之前的文章 [6] 和文献 [7, 8])。这些模型设计与计算方法上的进步,对于研究凝聚态物理学量子多体系统中的一些困扰了人

们很多年的基本问题,比如非费米液体的定量刻画,打开了解析和数值得到统一结论的契机。在以强关联系统大规模数值计算为安身立命学问的德国,也受到了很大的欢迎。

就在 Fakher 的办公室里,常常一个下午就在讨论中飞也似的过去,真让人生出二百年前壮游路上年青士子与欧陆人文学者激辩附身般的梦幻。犹记有天晚上 Fakher 带我们去当地酒馆吃饭,何院耀应该是第一次喝德国葡萄酒,不胜酒力的样子甚是可爱,也算是欧洲文化的有趣洗礼吧。

在亚琛,我们一行又受到亚琛工业大学 Stefan Wessel 教授的盛情款待。Stefan 是笔者的 PhD 业师,师生感情自然非比寻常。他在量子磁学自旋系统中的努力开拓,在量子相变与临界行为中的敏锐发现,在运用蒙特卡罗计算解释中子散射和量子磁性材料物性测量实验结果等等的工作,都是业界榜样。我们与其小组成员讨论,介绍我们在北京热火朝天的工作,也感染到对方的学生对北京的研究现状十分



图3 亚琛大教堂。中间圆顶的部分是加洛林王朝的开创者查理曼大帝修建的宫殿,那是欧洲自罗马帝国衰亡之后又一次迎来统一,查理曼大帝钟爱亚琛的温泉,遂以此处为王朝首都。这也是现在这座德、荷、比交界处的宁静小城中人们最感自豪的历史片断(图片来自 wikipedia)

好奇,甘愿冒着在德国宣传到有些妖魔化的空气污染来北京一探究竟。这也就催生了来年春天,亚琛和维尔兹堡的两名 PhD 学生,Stephan Hesselmann 和 Jonas Schwab 来北京回访的趣事,这里也按下不表了。也是在亚琛,许霄琰和何院耀走访了查理曼大帝修建的宫殿(现在的亚琛大教堂),看到在公元 800 年左右,欧洲人也可以修建宏伟精美的建筑,对于欧洲大陆在罗马帝国衰亡后中世纪期间的历史,尤其是我们教科书上对于黑暗中世纪一无是处的错误描述,有了立体的认识。

游踪之二

有了第一次的经历,2017 年的第二次壮游就容易多了。此次同游的伙伴变成了刘子宏、孙光宇和陈闯(三位目前都是笔者组里的 PhD 学生),师徒四人就这样在又一个德国的秋天,为期两周,西天拜佛求经去了。

首先到达的还是维尔兹堡,仍

是深入地和 Assaad 教授小组讨论。一年后我们在巡游电子量子临界行为的大规模数值计算方面刚刚打开局面,铁磁量子临界点^[5],非费米液体的模型定量数值描述^[9],都有了成果。2017年访问时讨论出的许霄琰、何院耀与 Assaad 教授小组合作的相互作用狄拉克费米子问题也在稳步进行中^[10, 11]。

这里还有一个有趣的插曲。维尔兹堡大学在市郊的山上,与在市中心的酒店有些距离,一天下午笔者先回酒店,去 Mainz 河边长跑,而刘子宏、孙光宇和陈闯,三位学生还留在大学准备第二天的报告,笔者跑步完很早就睡了,到了第二天一大早叫学生们一起去大学时,才发现他们还在办公室里,竟然熬夜了一个晚上。笔者立刻担心起来,毕竟这些孩子们第一次到欧洲,身在异国,不能发生安全问题。后来才弄明白,因为在德国商店都早早关门,他们以为酒店亦如是,晚上关门后就进不去了(当然不是这样的),所以觉得反正回不去酒店房间,索性就在办公室里熬夜一晚,准备第二天的报告。第二天下午,看到他们三个略显生硬地向维尔兹堡的学生老师们讲解自己

的工作时,笔者内心却心疼起这三个磕磕绊绊又十分可爱的学生了,如此的经历想来在他们也是难忘的吧。

第二次的壮游,笔者顺访了科隆大学,与 Simon Trebst 教授, Michael Scherer 讲师等人对于自学习蒙特卡罗方法,巡游电子与临界玻色子耦合的数值计算结果和量子场论、高阶重整化群解析计算,在结果吻合与矛盾的地方进行了深入的讨论。这些讨论让笔者看到即使对于线性色散的狄拉克费米子与临界玻色子耦合而产生的量子相变,这样的问题现有的数值和解析结果还有很大的分歧。也就是说,从数值计算的角度,在模型设计、算法优化、降低有限尺度效应方面,还应该有很大的提升空间;同样的,更加可靠的数值结果对于建立更加完善的重整化解析计算方法,验证高能物理、共形场理论和凝聚态物理学的结合等等方面,都有很重要的意义。这些讨论启发了笔者与合作者(包括复旦大学的戚扬副教授,密歇根大学的孙锴教授)进一步优化费米子蒙特卡罗计算效率,设计出鸬鹚算法^[12],抛开晶格模型的微观细节直接模拟场论模型中的低能自由度^[12, 13],

明心见性,直指本心(此事后面还会详细提及)。这样的方向,是笔者与合作者们在大规模量子多体计算领域正在开拓的前沿。

以去禁闭量子临界现象,量子多体模型之间的对偶变换,演生规范场和物质场耦合等等

现象为代表的量子物质科学新范式,以及大规模数值计算可以在其中扮演的重要角色,也是在这次壮游的过程中,在维尔兹堡 Assaad 教授小组,在亚琛 Wessel 教授小组,在科隆与 Trebst, Scherer 等人的讨论和交流中,在笔者的心里渐渐清晰起来。在此期间开始的一系列工作,量子场论模型对偶变换研究^[14, 15],海森伯模型的能谱研究^[16],二维、三维量子自旋液体的动力学研究^[17, 18],去禁闭量子临界点的能谱研究^[19]等等,如鸟鸣涧,如种出土,如万斛泉源滔滔汨汨地涌现出来。这些工作也直接引发了笔者和同事方辰研究员在2018年的夏天于物理所国际合作交流中心举办了为期两周的“International Workshop on New Paradigms in Quantum Matter”研讨会^[20],取得了很好的效果(这里也按下不表了)。

游踪之三

2018年的壮游从德国南部巴伐利亚州首府慕尼黑开始。同行的伙伴增加到了5人,其中两位博士后(马女森博士和从德国来到北京加入我们的Stephan Humeniuk博士),还有二度壮游的陈闯和一年级的PhD学生潘高培。整个行程为期三周。

在我们去访问的那一周因为慕尼黑有冠军杯足球赛,城中的酒店不好安排。我们的host慕尼黑工业大学Frank Pollmann教授(他已从德累斯顿搬到了这里)只得把我们的酒店安排在市郊慕尼黑工大附近的村子里,这样去工大和Frank讨论自然方便,但是到城里观光就要坐地铁了,好在德国的城市都不大,就算慕尼黑这样的地方,在来自北京的朋友看来,出行方面花去的时间



图4 慕尼黑的形胜。巴伐利亚洋葱头的教堂、市政厅的尖顶,还有远处的白雪覆盖的阿尔卑斯山脉(图片来自 wikipedia)

仍是可以忽略不计的。

酒店在小村子里，外面就是大片的田野，笔者在北京时总苦恼于无处去户外长跑，不想到此处却遂了心愿。每天讨论后，朋友们热情邀请晚饭，却总被笔者无礼地回绝，实在是想要去跑步。在德国秋天的田野里，傍晚时候乘着风出去跑几公里，看着夕阳西下，寒鸦在空中盘旋，村庄中升起的袅袅烟气，肃穆的景观让人沉静下来，暂时忘记了日常的琐屑和烦恼，可以思考一些人生中真正重要的问题。想得出神时，天不知不觉黑了下来，澄澈高远的天空中开始出现点点星辰，这才想起多久没有见过星空了。相比于此刻的静与深沉，国内的环境实在太过嘈杂以至于狂躁了^[21]。

讨论自然是不可少的，Frank的团队也开始在DMRG框架下进行自旋系统的动力学计算，这和我们近两年来运用量子蒙特卡罗和随机解析延拓的方法计算量子磁学系统的动力学性质的做法^[21, 22]不谋而合。对于以阻挫磁体和量子自旋液体为代表的量子物质科学新范式，说到底还是要能拿出材料实现和实验中可以观测到的信号。动力学计算(如自旋激发谱)不论运用量子蒙特卡罗方法还是运用DMRG方法，现在已经开始在相对实际的模型中得到严格的结果^[21, 22]。这样的进步一方面弥补了过于抽象的理论让大多数实验物理学家、实验化学家无法看懂的尴尬现实，另一方面也矫正了许多过于简单的平均场计算不负责任地恣意预言对于整个领域产生的负面效果。对于复杂的阻挫磁体模型，数值计算得到的能谱，可以和中子散射、核磁共振、RIXS散射等等实验进行对比。对称性的分数

化、任意子凝聚等等抽象的现象，都已经通过计算得到了谱学行为的预言^[17, 21, 22]。数值计算、场论分析和谱学实验的合奏，正在拉开序幕。

也是在慕尼黑，我们还访问了城中的慕尼黑大学，一周之前刚刚在上海见过的Lode Pollet教授热

情地招待了我们。在整个下午的讨论中，其组内的中国博士后刘科给笔者留下了深刻的印象，除了物理学内容之外，其身上的古风在现在的环境中显得尤为可贵。同行的Stephan Humeniuk博士，正是在这所大学完成了本科阶段的学习，多年之后以中国代表团成员的身份重游故地，即怀旧又新鲜，也是别有一番滋味吧。

告别了慕尼黑，我们分为三路。马女森、陈闯、潘高培赴维尔兹堡，先去与Assaad教授小组讨论交流，Stephan回巴登符腾堡州南部的老家探望父母，笔者则南下奥地利因斯布鲁克访问师兄Thomas Lang博士和Andreas Laeuchli教授小组，三天之后5人再会合在维尔兹堡。

因斯布鲁克(Innsbruck)是阿尔卑斯大山怀抱中的历史名城，神圣罗马帝国皇帝查理五世建筑的著名的金屋顶就在此。因(Inn)河穿城而过故名之(Innsbruck意思就是Inn上的桥)，城市在山谷之中，两旁皆阿尔卑斯山高大的山峰，壁立千尺，松石嶙峋，山顶白雪覆盖。笔者到达时已是夜晚，丰沛的山风沿着川道一刻不停地吹拂着，凉却不冷，



图5 阿尔卑斯山谷中的因斯布鲁克。因(Inn)河水静静地流淌，河边的房子都有数百年的历史，房子背后是皑皑雪山(图片来自 wikipedia)

河里流水发出温柔的声音，河边树影在灯下婆娑，沿河的建筑都应该有百年的历史，也在灯光的明暗交替中显得更加妩媚。遥想当年壮游路上疲惫的士子们来到此处，见到此情此景，怎能不被浪漫主义的情怀所打动呢？

Thomas Lang和Andreas Laeuchli教授亦是笔者多年的朋友，Andreas是量子多体问题严格对角化的绝对专家，而Thomas最近的一个量子蒙特卡罗工作^[23]更是深得我心。如前文所说，近几年来运用量子蒙特卡罗等大规模数值计算方法和运用场论(包括共形场论)重整化群等解析方法的两个领域在解决量子多体和量子临界行为的问题上，有逐步融合的趋势。这种有益的融合使得我们这些数值计算工作者逐步意识到之前一个没有注意到的问题，即当我们研究量子临界行为时，长期以来的做法是从一个微观模型出发(比如Hubbard模型)，通过逐步增大微观模型的尺度，逼近热力学极限。但是我们之前没有足够重视的是，系统的临界行为只被低能自由度所决定，而这些低能自由度，对于微观晶格模型来说，往往具有涌现的

性质，即它们并不是(或者不完全是)微观晶格模型中的自由度，应该想办法抓住这些真正重要的低能自由度，而不是盲目地增大微观模型的晶格尺度。

以现在人们比较关心的相互作用Dirac费米子的相变为例，其实这里真正重要的是具有线性色散的Dirac费米子与临界玻色子涨落耦合之后的结果(术语叫Chiral Gross—Neveu—Yukawa criticalities)，而大家平常用来模拟的graphene六角晶格或者pi-flux正方晶格模型，其实在布里渊区里只有很少一部分费米子模式处在线性色散区域内，大部分的高能自由度并没有参与临界过程，也就是说，其实大部分的计算资源都浪费在了这些不重要的自由度之上。这就使得一直以来大家比拼的微观模型晶格大小，比拼的各国超算平台的计算能力，类似这样的比较，对于与我们想要真正搞清楚量子临界行为来说，显得不得要领甚至颇为可笑了。计算能力(各国超算在top 500 list上的位置)固然需要，但是模型的合理设计才是正道。Thomas最近这项工作就是这样一剂正本清源的良药^[23]。他指出对于相互作用的Dirac费米子问题，其实可以通过借鉴高能物理学家很早就设计出的SLAC费米子框架，使得大部分的费米子模式都处在线性色散的区域之内，如此一来，即使蒙特卡罗计算不使用很大的晶格，因为所有自由度皆临界，其效果仍然超过原来看似很大尺度graphene六角晶格的计算，计算资源得到了很大的节省，临界行为的有限尺度效应也得到了控制。这样的做法与之前的做法相比，打一个不恰当的比喻，好似工业文明和农耕文明在制造能力方面的对比，

高下立见。

笔者与合作者在费米面与临界玻色子耦合的问题上，通过近几年的实践和思考，也提出了精神相似的鹌鹑算法^[12](鹌鹑英文名EMU，我们的算法英文名EMUS-QMC: Elective Momentum Ultra-Size Quantum Monte Carlo Method，简称EMUS，故名之鹌鹑算法)。对于费米面和临界玻色子耦合的问题，只有费米面上少数几个模式(hot-spots)被临界玻色子联系起来，对于临界问题来说，只要把所有的计算资源集中到这几个点附近，增大这里的能量—动量的解析度，就可以抓住问题的本质，有效地提高对于临界行为的准确描述能力，而不用操心原本微观晶格模型中的高能自由度。其实场论模型就是这样设计的，这也就是笔者前文所说，现在的数值计算物理学家，在凝聚态量子多体问题中已经开始直接模拟量子场论模型，通过模型设计和算法的进步(自学习蒙特卡罗，SLAC费米子，EMUS)，逐步克服以前微观模型的局限，明心见性，直指本心。我们的努力在解析计算领域也得到了回应。日前，明尼苏达大学Andrey Chubukov教授(2018年John Bardeen Prize获得者)专门在*Journal Club for Condensed Matter Physics*上，以“Solving metallic quantum criticality in a casino”撰文介绍了近年来量子蒙特卡罗领域在研究费米子量子临界问题上的进步^[24]。

因斯布鲁克短暂的逗留之后，笔者、Stephan与其他三位已经先期到达维尔兹堡的同伴会合。一年之后又见Assaad教授和小组成员，融洽自不待言。在维尔兹堡，马女森报告了她最近在量子相变的奇异有限尺度标度行为^[25]和去禁闭量子临

界点的谱学行为^[19]，这两项优秀的量子蒙特卡罗模拟工作。亦如笔者在前文所述，去禁闭量子临界行为，作为量子物质科学新范式的代表，归根结底还是要与普通的量子临界点在实验观测信号上有所区分。女森最近的工作^[19]就是通过自旋激发谱的计算，展示了去禁闭量子临界点上被释放出来的分数化自旋子所产生的连续谱，并且通过连续谱中权重的强弱变化，揭示了自旋子与演生规范场耦合的现象。这是演生物质场(自旋子)和演生规范场(U(1)场)耦合的实例，是高能物理学问题和凝聚态物理学问题具有本质联系的实例。其实在费米子模型中直接模拟类似的问题，人们也一直在考虑，包括我们自己。自2016年底开始，许霄琰、戚扬、笔者还有合作者们就开始尝试设计费米子和U(1)规范场耦合的模型，最后发现确实可以直接运用费米子蒙特卡罗方法计算偶数组分的费米子和U(1)规范场耦合的问题，得到了基本的相图^[26]。这一系列工作，正在逐步深入地进行下去。我们在慕尼黑、因斯布鲁克、维尔兹堡、亚琛等地的壮游之旅中与当地学者讨论这些认识和结果，都收获了热烈的反响。

此次在维尔兹堡，Fakher安排我们住在城外一个安静古老的葡萄园小镇Randersacker，美因兹河在小镇边静静流过。每天要爬上层层葡萄园走到大学，在山顶上回望山谷，云气缭绕，如童话如梦幻。在河边或跑步或散步，时值深秋，午后的阳光中河边的树木抖落着金黄的叶子，在风中飘飘荡荡，让人明白了为什么大家总说“德国是一个秋天的童话”，也让人生发出望峰息心窥谷忘返的惆怅。

三周的旅行还是结束在亚琛，我们从秋天走进了冬天。就是从从维尔兹堡到亚琛的火车上，笔者和女森定稿了运用诺特定理研究去禁闭量子临界点的最新文章^[27]。在亚琛的讨论亦很到位，而且 Stefan Wessel 教授体贴的安排让已经在路上两周的我们得到了休息和恢复。亚琛的朋友们，物理所的故人韩兴杰博士，还有一年前来北京一探究竟的 Stephan Hesselmann，更带着我们几个饱食了两顿地道的中餐(吃得太多，以至于花了很长时间消化)。亚琛的最后一晚，圣诞市场开幕了，Stefan Wessel 教授带我们去体验，在热闹的人群中喝一杯热腾腾的 Gluehwein(热红酒)，友谊、感动、他乡、故园、历史、己身等等思绪都融化在一片绵长的氤氲之中。

余韵

我们的壮游已经走过了三年，收获和成绩在前面的叙述中层层展开，这里就不再讨论了。我想对于每个参与其中的伙伴，壮游的过程其实是小到生活自理、待人接物、适应环境等等能力，大到物理学、历史、文化的综合教育。二百年前新教国家的青年士子们在欧洲腹地的漫游中开阔眼界，寻找文明的起源，完成学养、胸怀和人格的教育。我们在德国、奥地利的三年漫游也有这样的意思在里面。从物理学的事业来讲，我们见到了这样一批欧洲人，他们依靠着自己强大的传统和独特的创造的方式进行着量子多体计算的研究，我们也像当年那些壮游路上的士子们一样，在吸收、消化和沉淀之后，正在努力着创造出属于自己的凝聚态物理学量



图6 亚琛的圣诞市场。姜饼人是当地的特产，背景里是中世纪时修建的市政厅(图片来自 wikipedia)

子多体系统研究的文化，这样的过程已然开始。

科学研究是求知求真的过程。在我们自己的环境和风气中，每当看到追名逐利、虚伪欺诈的行为，包括自己被环境夹裹不得不违心行事时，笔者总会生出无力改变现实的挫败感。好在我们都走在壮游的路上走过，追寻过真和美，在清醒的时候会常常提醒自己什么是事业中、人生中重要的东西。在这个意义上讲，我们将会继续追寻真和美，一如我们将会继续人生的壮游之路一样。

致谢 能够完成这篇文字，首先要感谢德国研究基金会(DFG)给予笔者 Mercator Fellow 的荣誉和经费支持，使得我们的壮游能够成行。还要感谢的是 Research Unit FOR1807 “Advanced Computational Methods for Strongly Correlated Quantum Systems”，尤其是 Unit 的 Speaker 维尔兹堡大学 Fakhre Assaad 教授，他对于笔者和伙伴们的关怀

与帮助，已经远远超出了职责允许的范围。作为亲切的师长，他在学问的精进、选择课题的品味、团队建设、待人接物等诸多方面，都是笔者的榜样。常常见到他从已经十分紧张的日程中腾挪出时间与笔者及壮游伙伴们畅谈，从容、幽默、优雅，欧陆优秀学者的风范历历在目。还有 Research Unit 中的其他诸位师友，Stefan Wessel 教授、Andreas Laeuchli 教授、Frank Pollmann 教授、Lode Pollet 教授、Thomas Lang 博士、Martin Henadler 博士……，正是有了与他们的思想碰撞和交流，有了理解、吸收与传承，才使得我们仿佛当年壮游路上的士子们，完善着知识、品味和人格的教育。想到他们，总会让笔者忘记现实中的种种烦恼，再勉力创造属于自己的文化。

笔者还要特别感谢中科院物理所理论室齐建为老师和室秘书李晶晶，每年出国繁杂的手续和机票都是由她们为大家安排妥当。笔者和伙伴们能够在壮游的路上受到教



微弱信号检测

半个世纪的骄傲

Model 7210
多通道锁相放大器

全球唯一
通道之最



Model 197光学斩波器



生产商: 阿美特克商贾(上海)有限公司北京分公司
电话: 010-85262111-10 传真: 010-85262141-10
Email: infosi@ametek.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商: 北京三尼阳光科技发展有限公司
电话: 010-65202180/81 传真: 010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net

育, 背后也有她们辛勤的付出。文章初稿完成后, 笔者收到香港科技大学许霄琰博士关于内容的中肯建议和指出的几个时间节点

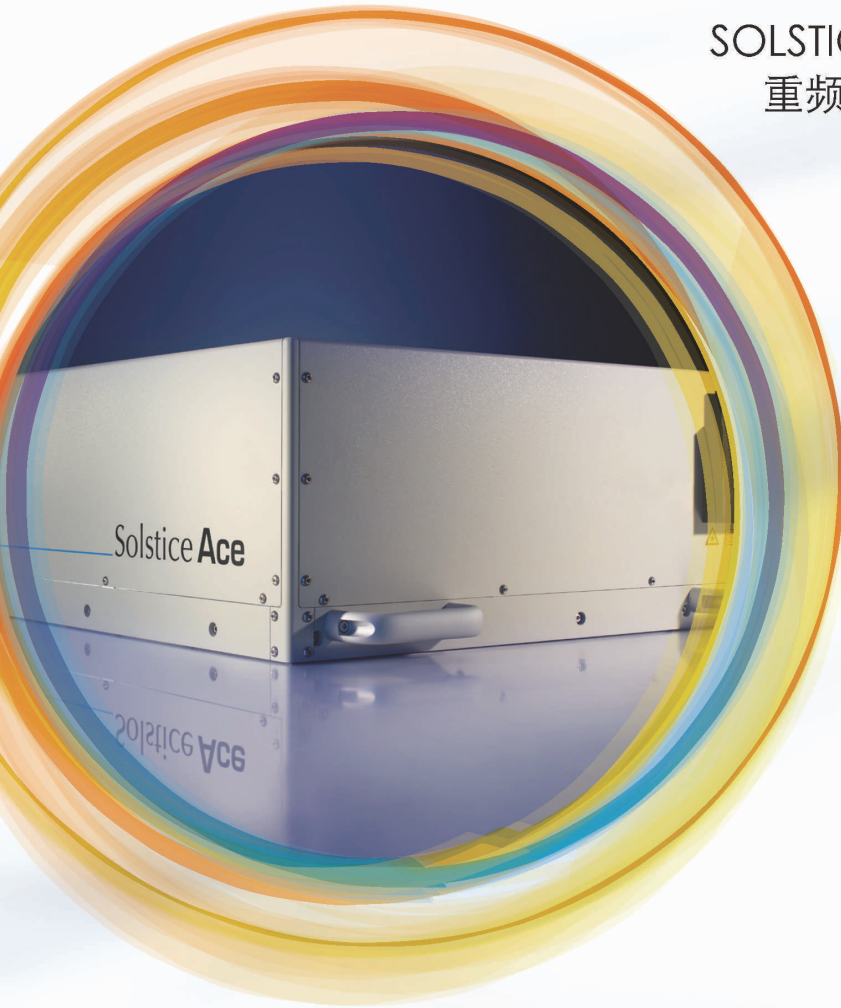
上的错误, 还有 Flatiron Institute 何院耀博士对于文章细节的建议, 在这里一并致谢。

参考文献

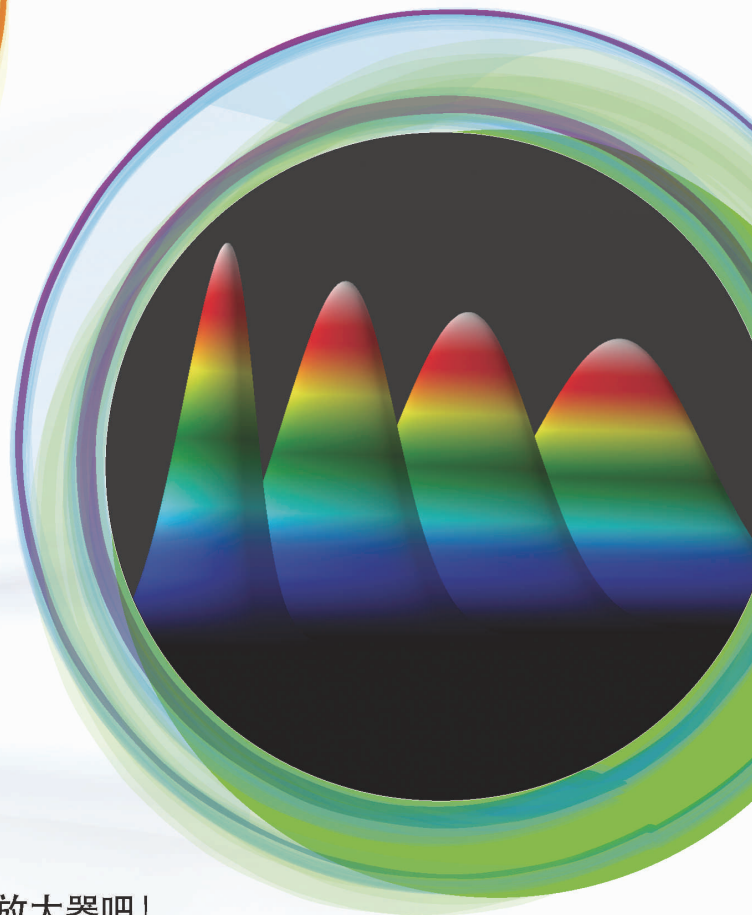
- [1] DFG Research Unit FOR1807 "Advanced Computational Methods for Strongly Correlated Quantum Systems", 项目网页 <https://for1807.physik.uni-wuerzburg.de/>
- [2] He Y Y, Wu H Q, Meng Z Y *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 93:195163
- [3] He Y Y, Wu H Q, Meng Z Y *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 93:195164
- [4] He Y Y, Wu H Q, You Y Z *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 93:115150
- [5] Xu X Y, Sun K, Schattner Y *et al.* Phys. Rev. X, 2017, 7:031058
- [6] 孟子杨. 物理, 2017, 46(4):248
- [7] Liu J W, Qi Y, Meng Z Y *et al.* Phys. Rev. B, 2017, 95:041101(R)
- [8] Xu X Y, Qi Y, Liu J W *et al.* Phys. Rev. B, 2017, 96:041119(R)
- [9] Liu Z H, Xu X Y, Qi Y *et al.* Phys. Rev. B, 2018, 98:045116
- [10] Xu X Y, Beach K S D, Sun K *et al.* Phys. Rev. B, 2017, 95:085110
- [11] He Y Y, Xu X Y, Sun K *et al.* Phys. Rev. B, 2018, 97:081110. Editors' Suggestion
- [12] Liu Z H, Xu X Y, Qi Y *et al.* Phys. Rev. B, 2019, 99:085114
- [13] Liu Z H, Pan G P, Xu X Y *et al.* PNAS, 2019, 116(34):16760; <https://doi.org/10.1073/pnas.1901751116>
- [14] 孟子杨. 物理, 2018, 47(2):101
- [15] Qin Y Q, He Y Y, You Y Z *et al.* Phys. Rev. X, 2017, 7:031052
- [16] Shao H, Qin Y Q, Capponi S *et al.* Phys. Rev. X, 2017, 7:041072
- [17] Sun G Y, Wang Y C, Fang C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121:077201
- [18] Huang C J, Deng Y J, Wan Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120:167202
- [19] Ma N, Sun G Y, You Y Z *et al.* Phys. Rev. B, 2018, 98:174421. Editors' Suggestion
- [20] International Workshop on New Paradigms in Quantum Matter, <http://npqm.csp.escience.cn>
- [21] 孟子杨. 物理, 2019, 48(2):104
- [22] 孟子杨. 物理, 2018, 47(9):595
- [23] Lang T C, Laeuchli A M. <https://arxiv.org/abs/1808.01230>
- [24] Solving metallic quantum criticality in a casino, Commentary by Andrey V Chubukov, on Journal Club for Condensed Matter Physics, <https://www.condmatjclub.org/?p=3482>
- [25] Ma N, Weinberg P, Shao H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121:117202
- [26] Xu X Y, Qi Y, Zhang L *et al.* Phys. Rev. X, 2019, 9:021022
- [27] Ma N, You Y Z, Meng Z Y. Phys. Rev. Lett., 2019, 122:175701

完美的一体化设计

SOLSTICE™ ACE™一体化超快激光放大器
重频、脉宽可调



- >7 mJ, >8 W
- 脉宽<35 fs到<120 fs间可任意指定
- 最大重频1 kHz-10 kHz可选



- 卓越的稳定性
- 最大可靠性
- 前所未有的灵活性

优化您的实验结果

现在就来选择适合您的 Solstice Ace 超快激光放大器吧！

请联系我们+86 10 6267 0065
info@spectra-physics.cn
或登录www.spectra-physics.cn