

量子世界

—— 通俗量子物理简史 ——

李海涛◎著



文化发展出版社
Cultural Development Press

量子世界

— 通俗量子物理简史 —

LIANGZI
SHIJIE

李海涛◎著



文化发展出版社
Cultural Development Press

贵州师范学院内部使用

图书在版编目 (CIP) 数据

量子世界 / 李海涛著. —北京 : 文化发展出版社
有限公司, 2019.5

ISBN 978-7-5142-2632-4

I. ①量… II. ①李… III. ①量子力学—普及读物
IV. ①0413.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 083995 号

量子世界

著 者: 李海涛

责任编辑: 侯 铮

产品经理: 杨郭君

监 制: 白 丁

出版发行: 文化发展出版社 (北京市翠微路 2 号)

网 址: www.wenhuafazhan.com

经 销: 各地新华书店

印 刷: 三河市文通印刷包装有限公司

开 本: 700mm×980mm 1/16

字 数: 338 千字

印 张: 23

版 次: 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

I S B N : 978-7-5142-2632-4

定 价: 49.80 元

本书若有质量问题, 请与本公司图书销售中心联系调换。电话: 010-82069336



目 录

001 欢迎词

第一篇 旧量子力学

010 第一章 量子革命的第一枪

022 第二章 惊世骇俗的光量子

036 第三章 鬼怪式的跃迁

054 营地夜话（1）

第二篇 新量子力学

058 第四章 梦幻金三角

070 第五章 王子的物质波

085 第六章 矩阵力学诞生

101 第七章 波动力学登场

113 第八章 波粒之乱

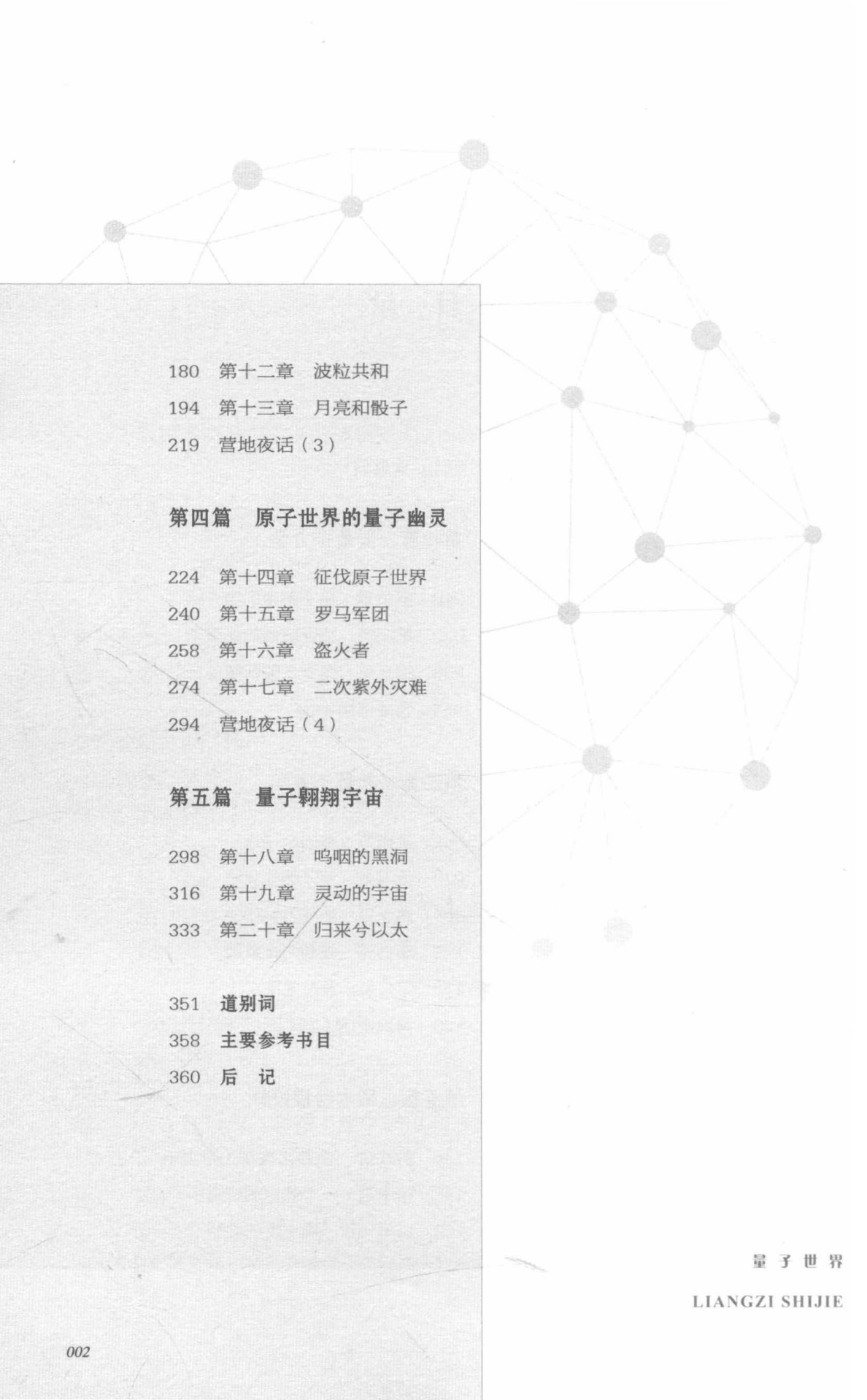
125 营地夜话（2）

第三篇 哥本哈根诠释

130 第九章 上帝之鞭和上帝之手

148 第十章 一个绝对的奇迹

163 第十一章 确定性的终结

- 
- 180 第十二章 波粒共和
194 第十三章 月亮和骰子
219 营地夜话(3)

第四篇 原子世界的量子幽灵

- 224 第十四章 征伐原子世界
240 第十五章 罗马军团
258 第十六章 盗火者
274 第十七章 二次紫外灾难
294 营地夜话(4)

第五篇 量子翱翔宇宙

- 298 第十八章 呜咽的黑洞
316 第十九章 灵动的宇宙
333 第二十章 归来兮以太

351 道别词
358 主要参考书目
360 后 记

欢迎词

女士们、先生们：

欢迎大家参观量子共和国。我们将一起度过一段愉快或不愉快、美好或不美好，但一定兴趣盎然和惊心动魄的时光。

诸位来自美丽的牛顿王国。这个王国，是牛顿国王以简洁优美的伟大宪法——《自然哲学的数学原理》（简称《原理》）来构建的。中国有句古话：知己知彼。为了能更好地领略量子国的异国风情，有必要把牛顿王国的基本国情做一个简单的概括。

在《原理》这部宪法的序言中规定了两项基本原则：“绝对空间”和“绝对时间”。

所谓“绝对空间”，牛顿形象地比喻为一个“空箱子”。它是绝对静止的、无限延伸的、匀质的，与时间无关的独立存在。绝对空间的性质跟具体的物体和运动也是无关的，哪怕是空无一物，它也是一样。绝对空间给物体和运动提供量度，比如物体的长、宽、高多少多少米，位移了多少多少公里。

所谓“绝对时间”，我们可以想象为一条匀速流淌的空河流，它跟空间以及占有空间的物体没有任何关系，不管“河”里有没有“水”，它都会不舍昼夜地流逝。但这条“河”却为一切“水”提供了一个绝对精准的时钟。一个物体，不管是静止还是运动，是运动得快还是运动得慢，时间都是以同样的速度流逝的。

绝对空间和绝对时间还有一个性质——连续性，这是牛顿可以使用微积分这个数学工具的客观基础。比如，速度是距离和时间的比率（ $V=S/T$ ）。我们这车一小时走 80 公里，叫“时速”；我可以继续问：半小时走多少？10 分钟走多少？10 秒钟走多少？1 秒钟走多少？0.1 秒走多少？一直到我知道了足够短（趋于 0 但不等于 0）的时间内车走的距离，我就知道了“瞬时速度”。求瞬时速度的客观前提是，距离（空间）和时间都是可以无限分割的。

牛顿《原理》就是给物体的运动立法，这么一个三维的空间和一维的时间就是一切运动的场景舞台，有了这个舞台，我们才好定规矩。最根本的规矩，也就是我们的宪法条文有三条：

第一条：如无外力作用，物体将永恒静止或永恒做匀速直线运动。我们这辆车，只要不点火启动，它就会永远待在这里，直至生锈腐烂，它都不会动一丝一毫。但一旦我们把它加速到每小时 80 公里，然后关掉发动机，它就会一直保持这个速度，永远向前方奔跑下去。但实际为什么不是这样呢？注意我刚才讲了“无外力作用”这个条件，实际上行驶时车轮跟地面有摩擦力，空气有阻力，爬坡有地球引力，如此等等。只要我们加速到了 80 公里每小时，只要我们不想更快些，我们的汽油就都是耗费在克服这些阻力上面的。比如月球，没有我们这车那么复杂的阻力，创世之初上帝把它推动到这个速度，几十亿年了，它就一直保持着这个速度围绕着我们这个地球转，让我们夜夜都有一轮明月。

第二条：运动的改变，与物体的质量成反比，与外力作用成正比。旁边这个手推车比较轻（质量小），任何一个人都可以把它推起来，但这辆汽车重（质量大），我们就得齐心协力了。而且我们三十个人一起推，就可以把它推得快一点，十个人推就会很慢。

第三条：作用力和反作用力大小相等，方向相反。推车的话，我们给车一个向前的推动力，车同时也给我们一个向后的阻力，这两个力是一样大的，因为方向相反，所以二者的和恒等于零。

这三条律令叫“牛顿运动三定律”。

哦，那位小姐说了，我在讲第一条时举例不对——月亮如果是做直线匀速运动的话应该是飞离地球，怎么会绕着地球转呢？这得补充一下。在讨论天体运动时，牛顿又增加了一个宪法修正案（在《原理》第三卷）——万有引力定律。这条定律说的是任何物体都有对外物的吸引力，两个物体间的引力与两个物体的质量乘积成正比，与距离平方成反比。就是说越重的东西引力就越大，反之越小。距离越近引力越大，远了就小。好学生拿笔算一下：月球的运动受两种力作用，一个是第一推动的直线匀速运动的力，另一个是垂直向地球下落的引力。两种力的合力使月球运动既不水平向前，也不垂直向下，而是向前下方，这样无数个向前下方运动的点的积分，正好就构成了一个围绕地球运动的椭圆形的轨迹。当然不只是月球，太阳系的八大行星，都有这样的围绕太阳的椭圆形轨迹。噢，太完美了！

哇，牛顿国王真是伟大！就凭着这四条宪令（三大定律加一条万有引力定律），就把天上人间的一切运动都规范得井井有条——斗转星移、朝晖夕阴、潮起潮落、风霜雷电。当然也不像我吹得那么简单。“牛四条”相当于欧几里得几何学的五条公理，还要从公理推出许多定理、定理体系。牛顿自己就推演了不少，他的徒子徒孙又接着推。比如，牛顿的《原理》还是质点力学，就是说不管是西瓜大的太阳，还是芝麻小的地球，都当作一个只有质量没有大小的“质点”来研究。后来的科学家又建立了把西瓜当西瓜，把芝麻当芝麻的刚体力学，还有许多芝麻合谋运动的流体力学。但不管怎么折腾，统统都是“牛四条”长出的枝枝蔓蔓，而且都可以还原到“牛四条”。就像一个国家，它不仅有《宪法》，还要有《刑法》《民法》《刑事诉讼法》《民事诉讼法》等具体的法律，但是后者是从前者推演出来的，并且不能与前者相矛盾。

到19世纪下半叶，《原理》问世（1687年）二百年之际，随着电磁学和热力学理论体系的建立，牛顿帝国的旗帜就已经插遍了全世界，放眼望去，当时就觉得再也没有待发现的新大陆啦。

哎，那位先生问了，怎么不在牛顿王国老实地当良民，又折腾一个什么量子共和国？我不幸学过美国历史，记得不少美国人的先辈在1620年甘冒艰

险乘“五月花”号奔赴美洲大陆，又是为何？不就为一个简单的信念——“到一个能够容忍我们的地方去”？这里也有异曲同工之妙，接下来，“牛四条”就容不下我们了。还是听我慢慢道来吧。

电磁学和热力学这最后的两个殖民地还有一点点问题，就是学科的力学基础。

首先是电磁学的客观基础。麦克斯韦把电、磁和光都统一为波动现象，并发明了美丽的波动方程。但是波是怎样传递的呢？比如光（电磁波的一种），牛顿认为是粒子，我之所以能看到大家，就是因为光源（比如电灯）发射出许多“光子”打到了你们的身上，又反射到了我的眼睛。这事有点麻烦。比如，我说话大家能听到，并不需要我发出很多“声子”击中大家的耳膜，而是我的声带振动了就近的空气分子，然后分子们接力式地互相振动，一直把振动传递到你们的耳膜，就像我在这儿推倒了一块多米诺骨牌，然后一块块的骨牌连锁式地倒下，最后一块砸中了你的耳朵。这里空气就是传递声波的介质——多米诺骨牌。在没有空气的地方，我就是喊破嗓子，你们都会把我当哑巴的。那么电磁波是否也在一种介质中传递呢？如果是，我们就可以想象电磁波的传递是介质中无数质点的运动形式——瞧！这不就完美地还原到了“牛四条”？对，这种介质就是传说中的“以太”，它充满在广袤的宇宙空间。尽管以太还没有被发现，但前景还是很美妙的。

其次是热力学的客观基础。我们可以合理地设想热现象是微小的空气粒子（原子或分子）的运动形式——运动激烈时，温度就高，反之就低；它们密集时，压力就大，反之压力就小。如果有一个“麦克斯韦妖”（麦克斯韦设想的一种能控制到单个分子的装置）能一览无余地看到每个分子（或原子），我们就可以用“牛四条”计算每个分子的运动轨迹，以及它们合在一起的合力，从而发现热变化的铁的必然性。不过现在，分子和原子都还只是个假说呢。

然而以太和原子这最后的两个城堡藏着的却是上帝的最后秘密。两千多年前古希腊哲学家就指出世界无非二物——原子和虚空，由原子构成的万千事物在虚空中存在和运动变化。一幅多么简洁优美的图画啊！只要拿到这两件宝物，

人类认识世界的任务就在我们的手里全部完成，剩下的事情就是如何按照我们的意愿控制这个世界，使它变得尽善尽美。现在我们猜想虚空城堡藏着的是以太，电磁光赖它以传播。那咱们就去一探究竟。遣一路精兵强将进去，却是白茫茫的一片，真干净，铆足了劲但无妖可擒。唉，英雄无用武之地！原子城堡估计没有什么货，无非就是组成万物的性质单一的材料，古老的圣殿金碧辉煌，拆开了残砖烂瓦会有啥看头？可是进得门去却傻了眼——那是什么妖孽呀？时而青烟缕缕，时而金光万点，出没无常，飘忽不定。从《原理》诞生以来二百年，所有宝典翻烂，竟找不到一招伏魔良法。唉，用武之地无英雄！

我们的故事将从这里开始。大家将会看到，不是成心造反，实在是没辙。“牛四条”尽管明快悠扬，但已是遥远的田园牧歌。经典物理学搭建得最蔚为壮观的时候，基础处却暗流涌动，吱吱呀呀。尽管不乏忠勇之士，拾遗补阙，严防死守，挽狂澜于既倒，扶大厦之将倾；无奈原认为坚如磐石的基石，却是似是而非的幻象，不明就里的迷雾，越探明真相越感觉到它的脆弱。

一场洪灾发过，大水淹没了田园屋舍，大人们正为一辈子的心血打了水漂而痛不欲生，孩子们却欢天喜地于一个全新的世界。广袤的田野已经汪洋一片，巍峨的建筑竟似零落的孤岛。打捞上游漂来的浮木，搭建自己的无敌战舰，以自家露出水面的屋顶为假想的敌岛，发动有声有色的跨海战役。唉！商女哪懂亡国恨，少年安知愁滋味？一部人类历史，每每皇宫贵胄和元老权威占据着舞台，轰轰烈烈地书写春秋；平头百姓无名小卒，只能在幕后平平淡淡地生生灭灭。而我们将要游历的这个物理学乱世，完全颠覆了历史的纲常。少年天才，不是一个两个，而是成批成批地涌现。经常冷不丁地就冒出个黄口小儿，单枪匹马闯进科学圣殿，狂剑乱枪，捣毁神器如摔打玩具一样无所顾忌。也许应了中国的老话：乱世出英雄，英雄出少年。奥地利物理学家泡利说过，量子物理学是“男孩物理学”（Knabenphysik）。此言不虚。来看一看我们量子共和国的元勋名单和他们成名时的年龄——爱因斯坦（26岁）、玻尔（28岁）、海森堡（24岁）、泡利（25岁）、约尔当（22岁）、狄拉克（26岁）、德布罗意（31岁）、奥本海默（26岁）、费米（25岁）、朗道（19岁）、费曼（21岁）、钱德拉塞卡

(25岁)、霍金(28岁)……

这个名单还可以一直开列下去，直到大家不胜其烦为止。这就奇了怪了！牛顿力学二百年，大学研究所里多少老教授、老权威，饱读经典，学富五车，怎么就让这些乳臭未干的年轻人建功立业，自己却甘愿充当陪衬红花的绿叶？其实道理也很简单。

刘谦在央视春晚于众目睽睽之下让一枚硬币“穿”过玻璃，不会有人信以为真。“魔术是假的”，这是常识。科学家还可以用力学原理分析一枚硬币要穿过玻璃需要多高的硬度，即便硬度足够，它也必须留下穿过的痕迹——一个洞，因为空间是连续的，这是科学。在这个例子中，我们都宁可相信“常识”和“科学”，而不相信眼见的“事实”，这是对的。魔术行家会告诉我们“事实”会有第二枚硬币，“穿”的过程无非是巧妙地让第一枚硬币由显变隐，第二枚硬币由隐变显。问题在于，在量子世界，我们将会看到很多“硬币穿过玻璃”之类违背常理的“事实”。大多数科学家特别是老权威会根据“常识”本能地拒斥，并根据“科学”去寻找“第二枚硬币”。等到大家折腾得筋疲力尽时，会有个毛头小伙子跳出来说：“没有第二枚硬币。”他会“愚蠢地”相信硬币穿过玻璃是真的，并创造出一套“如何”(how)穿过玻璃的新“科学”。之所以大多是年轻人，是因为这类人缺乏对老科学的感情和信仰，创新的冲动又过于充沛。当然，还有未被岁月洗磨掉的、无忌的童真。当满朝文武和街市百姓都在盛赞皇帝的新衣奢华美丽的时候，只有小孩会喊出：“皇帝没有穿衣服！”

啊，这是一个青睐年轻人的时代！一旦闯进了量子世界，个中天地奇幻迷离、波谲云诡，过去赖以生存的常识和理论往往都成了累赘。在这里睿智当然必要，但更需要的是信马由缰的敏思、清澈澄明的洞察和初生牛犊不怕虎的勇气。遥看量子百年战事，一大批相当于我们现在“80后”，甚至“90后”年龄的孩子前赴后继，披坚执锐，攻城拔寨，叱咤风云，令人不由得唏嘘感叹，自惭形秽！

朋友们都在下面说小话，不耐烦了吧？磨刀不误砍柴工。我这通唠叨，只是希望大家准备一颗天真无邪的童心，把你们的“常识”和“科学”都暂时收

在行囊里。无论将看到什么，哪怕是穿墙遁地、乾坤挪移，你都要相信自己的眼睛。当然，这样的世界，我会通过一架电子显微镜，一个盖革计数器，一个宇宙空间站，一个粒子加速器，或者其他什么科学仪器（当然它们都会呈现眼能见、耳能闻、手能触的感性现象）呈现给你们。科学仪器是人类的“眼睛”，相信它们。跟牛顿同时代的一个老乡，英国哲学家贝克莱说过：“存在就是被感知。”翻成大白话就是：眼见为实，看见的是“什么”（what），它就是什么，看不见的就“什么”都不是。

哦，那位老先生说了，我这像是宣扬迷信和主观唯心主义。这话有道理。科学不是巫婆神汉，不能指天画地地说东道西。科学不仅要告诉你“什么”，还要告诉你“如何”（how）成为“什么”的内在机制。而且这个“如何”还不能用似是而非的概念来讲。近代科学之父伽利略说过：“自然这本大书是用数学写的。”这个“如何”必须使用精确的数学语言，让你能定量地观察到是或者不是“什么”。这个“如何”我是一定会让大家看到的，否则我落个江湖骗子的名声也不划算。

这还没完呢。这个“如何”的背后还有一个“为什么”（why）。如果说“如何”是科学的话，“为什么”就是哲学了。这一百多年来，科学家们也俨然是哲学家，为这个“为什么”伤肝上火，唇枪舌剑，大打出手。如果大家不讨厌，我也会带你们去看他们打架、听他们吵架的。

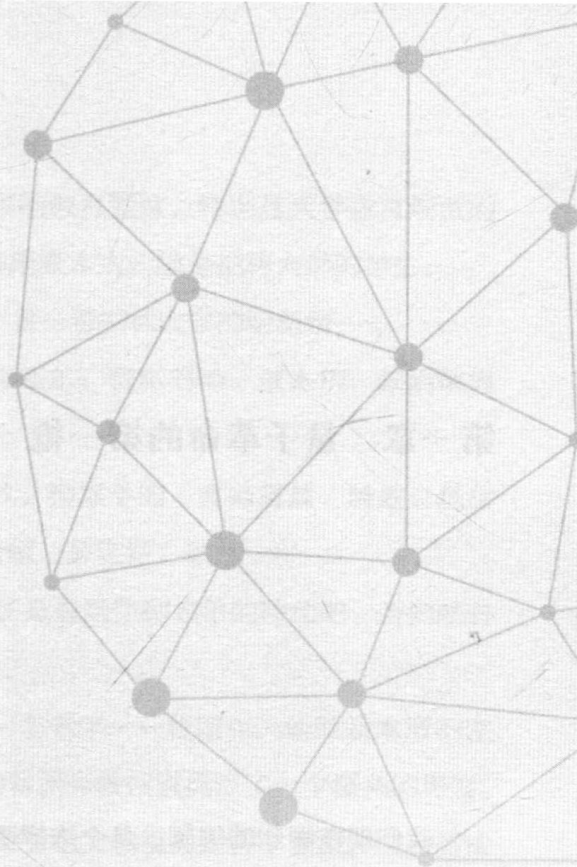
哎，别别别，别闹退团呀！这小伙子一定跟我一样：小时候不好好读书，看见公式就头疼，听到哲学就瞌睡。我只是说有这些道道，并不是要大家都成为科学家和哲学家。为了喝牛奶，难不成还得自己吃草料当奶牛？量子世界是“什么”，已经由疑似哲学家的科学家们制造出来了，我们只需要去看就是啦。我只是要说明这个“什么”是很扎实地制造出来了，不是信口开河的产物。至于这个“如何”和“为什么”，我会尽量用大白话说。万一出现数学公式和外文词什么的，尽可看作漂亮或怪诞的装饰。瞧一瞧它们的模样，能产生美感或神秘感足矣。或者干脆跳过去，不搭理它们，也不会影响我们的旅程。根据“霍金定律”，科普著作出现一个公式，读者就会减少一半。我又

不傻，当然希望各位轻松愉快，犯不着故弄玄虚吓唬大家。要犯傻，今后生意还做不做？

废话少讲，我们出发。安全第一，头莫探，手莫伸，晕车的吃药，有心脏病的准备好硝酸甘油。

量子世界

LIANGZI SHIJIE



第一篇 | 旧量子力学

Number

1



第一章 量子革命的第一枪

—

我们现在看到的德国，是个边界明晰的国家，它位于欧洲中北部，面积 35 万平方公里，人口八千余万。但要说到历史上的德国，那就像我们将要见到的“波函数”，边界模糊，飘忽不定，似有似无，忽大忽小。直到 19 世纪初，1806 年，德国诗人阿恩特还提出了一个很诗意的问题：“德意志的祖国在哪里？”这一年，法国皇帝拿破仑的铁蹄踏进了德意志第一帝国最大的一个邦——普鲁士，国王威廉三世被迫割地赔款，德意志名存实亡。

令人惊讶的是，四年之后（1810 年），柏林大学在一片战争废墟中建成。已经被战争赔款压得喘不过气的威廉三世国王可是拼尽最后一点家底，为了省下建筑费用，他捐出了豪华的王子宫作为校舍。他说：“这个国家必须以精神的力量来弥补躯体的损失。正是由于穷困，所以要办教育。我从未听过一个国家办教育办穷了，办亡国了。”普鲁士教育大臣洪堡在创建柏林大学时提出的“学术自由”“大学自治”“教授治校”等办学思想成了现代大学制度的思想滥觞，柏林大学因此被誉为“现代大学之母”。

仅仅一个甲子的时间，柏林大学就给予德国丰厚的回报。1871 年，在普鲁士被法国攻陷 65 年之后，俾斯麦金戈铁马横扫法国，在巴黎南郊的凡尔赛宫宣布德意志第二帝国建立。这是德国历史上第一次真正意义的统一。与其说这是

俾斯麦武力征讨的胜利，不如说这是德国的教育制度，特别是大学教育制度的成功。而德意志第二帝国的第一任首相俾斯麦本人，就是柏林大学的学生。

岂止回报德国，全世界都受惠于她！看一看柏林大学的明星榜——

诗人海涅，哲学家费希特、谢林、黑格尔、费尔巴哈、叔本华，政治家俾斯麦、马克思、恩格斯、李卜克内西……

数学和自然科学领域的更是数不胜数，物理学的：亥姆霍兹、赫兹、基尔霍夫、迈克尔逊、维恩、普朗克、爱因斯坦、薛定谔、玻恩……

光诺贝尔奖得主就有 29 位。不过我还是遏制住列名单的冲动吧，否则就有为柏林大学做广告之嫌啦。

注意到了吧，上面的名单里出现了一个名字——普朗克，他就是本章的主人公。1858 年春天，德国北部城市基尔的普朗克教授家诞下了一个漂亮的男婴，起名马克斯·普朗克（Max Planck）。他的曾祖父和祖父是神学教授，父亲是法学教授，算是个知识分子家庭。在他 9 岁时举家迁往慕尼黑。中学时的普朗克可算是标准的好学生，数学、物理和音乐方面的才能尤为突出。在小普的一张报告单上写着这样的评语：“为老师和同学们所喜爱。他在班级里年龄最小，虽然有些稚气，但头脑非常清醒，逻辑性也强。他很有出息。”

到中学毕业，小普为专业的选择就烦恼甚至是痛苦上了——是音乐还是物理和数学，这是个问题！还好，小普在中学尝试作曲，但他自己沮丧地发现，模仿痕迹太重而创意不足。如果这个阶段他就像日后那样撞了个大运，写出一首好曲子，那世界上就会多个不大可能改变音乐史的音乐家，而物理学史则一定会改写。总之小普最后一咬牙一跺脚就考进了慕尼黑大学攻读物理，这年（1874 年）他才 16 岁。物理学教授祖利（Philipp von Jolly）挺喜欢这个聪明乖巧的孩子，因此为他误入歧途而惋惜。他跟普朗克说，物理学“这门科学中的一切都被研究了，只有一些不重要的空白需要填补”。但这孩子看来也不是个有志青年，他说：“我并不期望发现新大陆，只希望理解已经存在的物理学基础，或许能将其加深。”

德国的大学，入学后可以选专业、选老师，甚至是跨校选老师。贪玩的学生，可以利用这种政策在大学期间游历各个城市。不过小普可不是那种

人。到大四，他就选了柏林大学（那个拼老命的国王创立的大学）的亥姆霍兹（Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz）教授和基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff）教授的课。这二位是当时科学最前沿的热力学和电磁学的泰斗（比如亥姆霍兹，是热力学第一定律的提出者）。到了这儿，小普才感觉到自己原先不过是井底之蛙，慕尼黑大学教授给他的只是地方性的学问，而柏林大学则是世界性的。不过很可惜，小普选的两位物理界大佬尽管思想很深邃，但讲课却烂得可以，用小普的话说，讲课的和听课的同样无聊。不过理论的先进性摆在那儿，师父引进门，修行在自身嘛。普朗克认真自学了热力学的著作特别是克劳修斯的《力学的热理论》，并立志去寻找像热力学定律那样具有普遍性的规律。1879年，他拿出的博士论文就是《论热力学第二定律》，提出了后来被命名为“开尔文-普朗克表述”的热力学第二定律的第二种表述方式（第一种是“克劳修斯表述”）。普朗克在慕尼黑大学获得博士学位后，先后在慕尼黑大学和基尔大学任教。1888年基尔霍夫逝世后，柏林大学任命30岁的小普为他的继任人和理论物理学研究所主任。1894年，普朗克成为普鲁士科学院院士。有次他应邀做一个演讲竟忘了教室的房号，于是找到了系办公室，可是他得到的回答是：“别去了，年轻人。你太嫩，肯定理解不了我们资深的普朗克教授所做的演讲。”

在提出热力学定律的普朗克表述时，非但不被接受，还激起一片反对声。郁闷的小普说的一句话日后成了名言：

“一个新的科学真理取得胜利并不是通过让它的反对者们信服并看到真理的光明，而是通过这些反对者最终死去，熟悉它的新一代成长起来。”

这就是著名的关于科学发展的“普朗克定律”。

现在，前辈们已经陆续乘鹤归西，该轮到小普们建功立业啦！

二

基尔霍夫不仅给普朗克留下一个教位，还留下了一笔巨额遗产。不过不是一笔可以立马花出去的现钞，而是一把打开一个蕴藏无限宝库的钥匙。但也不