

TIME
AND LIGHT:
The History of Physics

时与光

一场从古典力学到量子力学的思维盛宴

琴琴◎著

清华大学出版社

TIME
AND LIGHT:
The History of Physics

时与光

一场从古典力学到量子力学的思维盛宴

琴琴◎著



清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

时与光:一场从古典力学到量子力学的思维盛宴/琴琴著. --北京:清华大学出版社, 2015

ISBN 978-7-302-40745-4

I. ①时… II. ①琴… III. ①物理学史 IV. ①O4-09

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 162072 号

责任编辑: 胡洪涛 王 华

封面设计: 杨雪果 蔡小波

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 **邮 编:** 100084

社 总 机: 010-62770175 **邮 购:** 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 165mm×240mm **印 张:** 25 **字 数:** 366 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版 **印 次:** 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

产品编号: 065409-01

献 给

从 12 岁到 120 岁
所有对世界充满好奇的孩子

第一章 波,还是粒子:
光的故事

反射与折射//004

最短时间原理//007

柴郡猫的微笑//009

彩虹的颜色//011

干涉与衍射//012

穿越狭缝//012

泊松亮斑//014

电与磁//018

力与场//019

光的兄弟姐妹//022

光与电//026

与星光对话的人//027

剥开原子的人//030

光电效应//031

行到水穷处 坐看云起时//034

醉心历史的小王子//035

电气公司的意外收获//040

握手言和//042

第二章 一沙一世界:
力的故事

斜塔与椭圆//046

坠落的连体球//048

“金鼻子”与“占星师”//050

像苹果一样思考//055

于沙粒中见乾坤//056

地“心”引力//059

第三章 μ 子正传：
狭义相对论的故事

称量地球的人 // 062

牛顿三定律 // 063

拉普拉斯妖 // 065

三个问题 // 067

“相对”与“绝对” // 068

时间之矢 // 069

三体 // 070

真空，抑或“假空” // 075

民主的空间 // 075

民主的时间 // 077

相对，还是绝对 // 080

“以太”在哪里 // 082

μ 子正传 // 086

奥林匹亚科学院 // 086

“同时”并不同时 // 089

μ 子简历 // 090

时间延缓 // 091

变与不变：双生子佯谬 // 093

不变与变：时钟佯谬 // 094

空间收缩 // 095

时空初相逢 // 096

时空方差 // 096

芝诺悖论 // 099

闵可夫斯基光锥 // 102

类时、类空与类光 // 103

事件光锥 // 106

质量与能量 // 107

$E=mc^2$ // 110

第四章 时光恋曲：
广义相对论的故事

飞屋历险记 // 114

等价性原理 // 115

时间弯曲 // 118

第五公设谜题// 120

舍卒保车? 这还不够! // 122

属于星星的几何学// 125

空间扭曲// 128

舞动的时空// 130

床垫与力场// 131

铁钉与绳索// 132

普林西比之行// 135

爱因斯坦最大的错误// 138

坍缩佯谬// 138

奥伯斯佯谬// 141

宇宙常数// 143

宇宙岛// 146

红移的谱线// 148

大爆炸// 153

α 、 β 和 γ // 155

聆听宇宙的第一重歌声// 157

恒星之殇// 158

宇宙是顿免费的午餐? // 160

暴涨理论// 161

搜寻宇宙的第二重歌声// 162

还有几个“大”问题// 164

宇宙的形状// 164

宇宙的年龄与大小// 166

宇宙的未来// 166

宇宙之“外”是什么? // 167

第五章 骰子出没： 量子的故事

黑体辐射// 170

普朗克常数// 172

再探光电效应// 175

“原子”进化史// 176

布丁模型// 177

行星模型// 177

轨道能级// 181

大与小// 185

电子自旋// 186

泡利不相容// 187

矩阵，还是波动// 190

海森堡矩阵力学// 192

薛定谔波动力学// 194

狄拉克量子代数// 196

不确定，你确定？// 198

海森堡不确定性原理// 200

拉普拉斯妖的挑衅// 203

骰子出没注意// 206

电子组曲// 210

实验一 子弹实验// 210

实验二 水波实验// 211

实验三 电子实验// 212

实验四 “偷窥”电子// 213

互补原理// 216

风云对决// 217

第一回合 上帝掷骰子吗？// 218

第二回合 爱因斯坦光箱// 222

第三回合 EPR 佯谬// 224

薛定谔之猫// 227

哥本哈根：当我望向你// 230

维格纳的朋友：意识是什么// 230

冯·诺依曼：无限递归// 233

休·艾弗雷特三世：大千世界// 235

延迟选择// 237

提问和回答// 239

指尖与月亮// 241

第六章 微观尽头：
粒子的故事

玻色子与费米子// 246

玻色—爱因斯坦统计// 246

费米—狄拉克统计// 248

现代炼金术// 251

质子的发现// 251

第七章 上帝是个偏心眼？ 对称的故事

中子的发现 // 253

能量失窃案 // 259

疑犯一：中微子 // 259

疑犯二： π 介子 // 261

夸克 夸克 夸克 // 264

对称 vs. 不对称 // 268

空间平移 // 269

时间平移 // 270

空间转动 // 270

洛伦兹变换 // 271

全同粒子 // 272

旋转运动 // 272

放大与缩小 // 273

可逆 vs. 不可逆 // 274

杯中窥墨 // 275

猴子与莫扎特 // 277

熵 // 279

麦克斯韦妖 // 280

物质 vs. 反物质 // 281

狄拉克之海 // 281

寻找“反世界” // 284

左手 vs. 右手 // 287

柯尼斯堡的思想者 // 288

细菌王国的探险家 // 292

镜子的另一端 // 295

OZMA 谜题 // 298

宇称守恒吗 // 302

τ - θ 之谜 // 304

上帝是个左撇子？ // 305

轮盘上的物理学 // 310

驴子的困境 // 310

自发对称性破缺 // 311

第八章 雅典娜与对称美：
守恒的故事

诺特定律 // 318

第九章 重回起点：
光的故事

路径积分 // 325

芥子与须弥 // 332

迪克，我们爱你 // 333

第十章 大设计

量子岔道口 // 336

隐变量 // 336

贝尔不等式 // 339

平行宇宙 // 345

量子永生 // 350

万物源于比特 // 352

历史求和 // 356

137 之谜 // 359

常数无常？ // 360

爱因斯坦的“错误” // 363

统一之路 // 364

弱电统一 // 366

量子电动力学 (QED) 与量子色动力学 (QCD) // 367

最后的阵地 // 368

弦 // 370

启程 // 372

附录一 费马最短时间原理的证明 // 374

附录二 牛顿与苹果 // 378

附录三 质能方程的简单推导 // 379

附录四 重力加速度 g 的推导 // 380

附录五 玻尔对爱因斯坦光箱的破解 // 381

附录六 // 382

参考文献 // 383

后记 // 386

第一章
波,还是粒子:
光的故事

光是生命体最为熟悉却又最为陌生的物质。它绵延亘古，穿越层层时空来到你我面前；它刺破浓郁的黑暗，所过之处万物无不心神摇曳，虚实交错间漾起圈圈涟漪；它无声无息、了无行迹，却又如同血管中跳动的脉搏，一旦消逝，大千世界亦将崩塌于不复。自从智慧的火炬点亮了宇宙一隅这颗祥云缭绕的蓝色星球，星球上一代又一代的探险家们在好奇心的驱使下便从未曾停止追问：与我们朝夕相伴的光，它到底源自何方？竟是何物？

最初，在古希腊那帮思维漫步者中，有人提出了这样一种猜想：光是从眼里伸出的某种触手状物质，能够向着四方延展并攀附于各物体上。因此，我们看到某样东西，实际上是目光触摸到了它。但该结论很快就被先哲们那历经逻辑熔炉千锤百炼的头脑给否定：假若看见东西是因为眼球自带发光功能，该如何解释夜晚的存在呢？只要我们从撕开眼皮的刹那，时刻不停地释放光须，黑暗将无处藏身。“两眼泛光说”不攻自破，但光线形同触手这一想法并未就此销声匿迹。若干年后，一幅更具说服力的图景诞生了：我们之所以能够看见，是因为物体表面散发的光须钻入了双瞳。如此说来，为了能被人类感知，周围所有的石头、树木都在悄无声息地制造着光芒？为了不被视而不见，每个生命也都必须努力使自己光彩夺目？新理论勉强能够解释光明的另一面——黑暗——的存在：只需令所有生物/非生物同时停止发光即可。不过，依据“实体泛光说”，搭建一间小黑屋倒是勉强可行，而若想泯灭苍穹，其难度大概不亚于创生三界吧。为了绘制无边的暗夜，难道寰宇设计师需要在一切物质背后都偷偷装上同一型号的亮度开关？

遗憾的是，还没等这群可敬的幻想家沿着新开辟的小径走出多远，罗马人的铁骑便肆意地践踏起了他们的家园。凯撒(Julius Caesar)征服埃及之时，被誉为文明灯塔的亚历山大图书馆意外地遭到战火吞噬，总馆布鲁却姆七十万卷藏书被损毁四十余万。但更致命的打击还在后面。公元4世纪，帝国最后一位君王狄奥多西一世^①决意将基督教设作国教。为了从灵魂深处掌控他的子民，狄奥多西一面疯狂迫害异教徒，一面倾尽全力誓将异端留下的遗迹在其管辖地域内一一抹去。闻名遐迩的亚历山大城自然首当其冲，大教长圣·狄奥菲鲁斯亲自披挂上阵，率领大队乌合之众一路摔抢打砸，恨不能立刻把塞拉比斯神庙夷为平地。位于其中的图书馆分馆也难逃厄运，滔天的烈焰之中，流传千年的哲思妙想须臾间化作一片灰烬。怎奈倚仗强权打造的“统一”终不过一副虚空的躯壳，狄奥多西死后，罗马帝国迅速走向分裂，可被他推向顶峰的基督教会却兀自壮大起来，不但凶残地肆虐着每一个与其不相偕同的思想流派，更逐渐凌驾于皇权之上，成为地中海沿岸真正的统治者。

公元415年3月的一天，一伙儿暴徒在新任主教西里尔的授意下，埋伏到亚历山大城最美丽的女儿、数学与天文学家海帕西娅(Hypatia)出门授课的必经之路上，将她从两轮车中强行拽出，一路拖进教堂，剥得一丝不挂，然后用削磨锋利的蚌壳一块块剥下她的皮肉。这位直到生命尽头依然勇力捍卫着自由与尊严，怒斥教廷无耻行径的非凡女性，此刻已是血肉模糊、息若悬丝。但穷凶极恶的暴徒仍不肯罢休，竟抡刀剥去了她的胳膊和双腿，将那尚在颤抖的残肢投入冰冷的火焰之中……希腊化文明的最后一颗星辰就这样浸没在无际的血海，陨落于历史深处。此后的漫漫长夜里，恐惧像癌细胞一样徐徐扩散，而以其为食的愚昧和妄诞则如同蛆虫一般大摇大摆地爬过街头巷道，将它们圆滚滚的身躯挤进每一户屋舍，胀满每一颗脑袋。

然而，人类精心培育的智慧萌芽岂是蛮力能够轻易摧折？西罗马覆亡之后，大量的书籍与残片被转移至东罗马。继续东行，它们终于找到了新的用武之地——为崛起中的伊斯兰文明提供养分。与此同时，波斯人与阿拉伯人在继

^① 即弗拉维乌斯·狄奥多西·奥古斯都大帝，Flavius Theodosius Augustus “the Great”。

承了这笔宝贵的财富之后,也不忘对其进行扩充与拓展。最终,升级版的知识库又通过地中海反哺回欧洲各君主国。这一过程断断续续耗费了近千年光阴,直到公元13世纪,远古的星辰才再次照耀大地。历经了三十六万日日夜夜的蛰伏,此刻,它已然炼作万道霹雳,灼目的光亮凌空划过将中世纪的阴云驱散殆尽。

千年之间,随着铜镜等光学构件在工匠的巧手下变得越来越精致,人类逐渐意识到,事物不但可以通过眼睛来认识,还可以利用仪器从不同角度进行观察。暗影中的镜片清澈如水,但只要把它移至阳光下,表面就会泛起灿烂的光华;在暗室的墙上凿一小孔,其对面的影壁就能把屋外的斑斓景象一一收纳,但图案却呈倒立状……千奇百怪的现象共同揭示着一个道理:“看”确实是外部光线投射到视网膜而激起的神经信号,但并不是唯有发光的物体才能被感知,不会发光的物体也可倚赖穿梭于近旁的光线来勾勒自己的轮廓。而所谓黑暗,不过是由于特定区域内的光源暂时熄灭或受到阻隔,令不发光的物体恢复了本来面貌而已。关于“看”的谜题似乎找到了答案,可更深层的困惑也随之而来:究竟要依据什么才能判断一个物体是在“发光”还是“借光”?光的本质到底是什么?为探寻谜底,让我们暂且将自己融入时空之中,化作一团无形无质的泡沫,跟随跃动的光斑来一场奇幻大冒险吧。

反射与折射

这是光源发出的一束光,在真空自由漫步。忽然,前方出现一面镜子,它直直撞了过去,却发现身体不听使唤地被弹回空中,这便是“反射”现象。继续游走,这一回,挡住去路的是一潭清泉。它捂住眼睛,准备迎接新一轮的冲击。可是——啊哈,光竟然钻入了一种全新的介质中,运动方向也因此发生偏转,该过程即是“折射”。

如图1.1所示,穿过两种介质的交界面作一根垂线(即“法线”),入射光与垂线之间的夹角叫做“入射角”,反射回原介质的光线与垂线之间的夹角叫做

“反射角”，而进入另一种介质的光线与垂线之间的夹角叫做“折射角”。那么，各角度之间有什么内在联系呢？

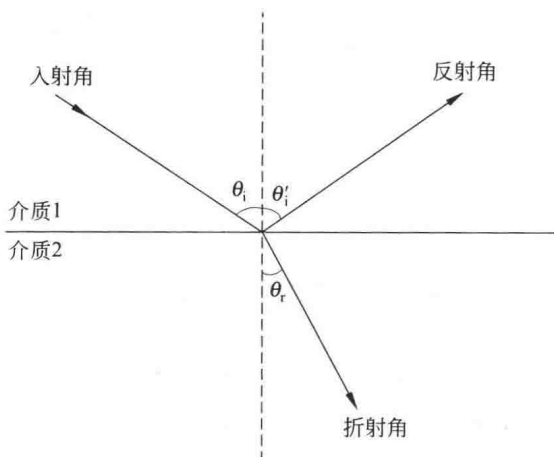


图 1.1 反射与折射

人们首先注意到，不论反射还是折射，其角度都会随着入射角的开合而变换。经测量可确定，反射角的大小总是与入射角相等。而折射的情形则更为复杂，光在两种介质间穿行时，折射角虽总有偏移，却始终保持与入射角同比例增减。可究竟是什么因素决定着那个至关重要的比值呢？直到 17 世纪初，荷兰莱顿大学的数学教授威里布里德·斯涅耳(Willebrord Snell)把积累多年的观测数据加以拟合，才第一次掘出了这层规律：光束的偏转率取决于各介质如何“搭配”。

这真是了个了不起的发现。以方才所举为例，若把光的传播方向上下颠倒，令其从水中进入真空，由于改换并未触及原先设定的介质，因而只需顺势将箭头翻转——折射光变作入射光，而真空中的入射光则成了折射光——即可预知实际情形。此时，入射角 θ_i 反比折射角 θ_r 更小，但折线的形状却维持不变(图 1.2)。物理学要寻找的，正是那千变万化中难得一见的不变性！

把斯涅耳的结论转换成数学语言，即是大家再熟悉不过的“折射定律”：

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = n_{r-i}$$

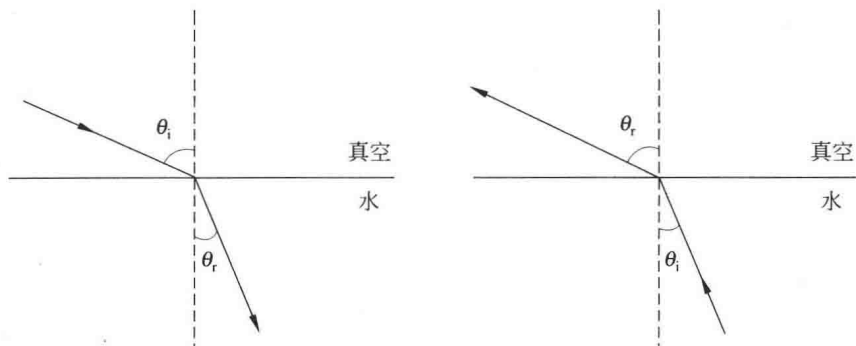


图 1.2 光从真空入水和从水入真空

其中, θ_i 、 θ_r 分别为入射角、折射角的大小, n_{r-i} 则为光在两种介质间的“相对折射率”。依据该定律, 我们只需将任意介质放在真空中, 测定光束从真空进入该介质的“绝对折射率” n , 就能预测光的传播路径了。例如: 已知光从真空钻入水中的绝对折射率为 $n_{\text{水}}$, 又已知其钻入玻璃的绝对折射率为 $n_{\text{玻璃}}$, 由折射定律(斯涅耳定律):

$$\frac{\sin\theta_{\text{真空}}}{\sin\theta_{\text{水}}} = n_{\text{水}}$$

$$\frac{\sin\theta_{\text{真空}}}{\sin\theta_{\text{玻璃}}} = n_{\text{玻璃}}$$

可得

$$\frac{\sin\theta_{\text{水}}}{\sin\theta_{\text{玻璃}}} = \frac{n_{\text{玻璃}}}{n_{\text{水}}} = n_{\text{玻璃-水}}$$

即使尚未将玻璃置于水下, 也可由此预先确定光束的偏转情况。但若继续往根源处追索, 你将发现, 不论反射定律还是折射定律, 以上两条我们自中学时代起早已熟稔于心的光学法则其实都比较“唯象”——须得对特定现象进行无数次测量, 才能从海量的数据之中总结出某个经验性的表达式。这样的公式源于归纳, 却止于推演。以光的折射为例, 如果摆在面前的是两种陌生介质, 你尚无机会令一束光从真空穿入其间以记录偏转角度, 那么此时若想推知光在两介质交界面的行为模式, 即使精妙如斯涅耳定律也将束手无策。换句话说, 由庞