

FROM QUANTUM  
TO UNIVERSE

# 从量子到宇宙

颠覆人类认知的科学之旅

高鹏◎著

谁要是不为量子理论感到震惊，那就是因为他还不了解量子理论。

——尼尔斯·玻尔  
*Niels Bohr*

我想我可以相当有把握地说，没有人能理解量子力学。

——理查德·费曼  
*Richard Feynman*



清华大学出版社

# 从量子到宇宙

——颠覆人类认知的科学之旅

高 鹏 著

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以各种不可思议的量子现象为主线，以物理学家们所做的各种令人惊奇的实验为脉络，循序渐进地介绍了人类探索量子世界的整个过程。作为一本科普读物，本书涵盖了波粒二象性、叠加态、概率幅、纠缠态、隧道效应、电子云、超流体、量子真空涨落、费曼图、超弦理论等量子力学中引人入胜的大部分内容，也介绍了扫描隧道显微镜、量子计算机、量子隐形传态等量子工程技术，同时还把相关的历史趣事穿插其中。另外，书中还介绍了一些与量子物理相关的粒子物理、相对论、宇宙学等内容，其中就包括了目前更前沿的领域，如反物质、希格斯粒子、暗物质、平行宇宙，以及引力波等。

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

从量子到宇宙：颠覆人类认知的科学之旅/高鹏著. —北京：清华大学出版社，2017  
ISBN 978-7-302-45210-2

I. ①从… II. ①高… III. ①量子论 IV. ①O413

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第264046号

责任编辑：宋成斌

封面设计：肖东立

责任校对：刘玉霞

责任印制：刘海龙

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈：010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者：北京亿浓世纪彩色印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：145mm×210mm 印 张：7.25 字 数：186千字

版 次：2017年1月第1版 印 次：2017年1月第1次印刷

定 价：45.00元

---

产品编号：070910-01

# 目 录

1	光的本性之争：光是粒子还是波？	001
1.1	惠更斯的波动学说	001
1.2	牛顿的粒子学说	002
1.3	杨氏双缝干涉实验	003
1.4	泊松的乌龙球	004
1.5	光就是电磁波	006
2	电磁波能量谜团：能量竟然不连续？	007
2.1	黑体辐射谜团	007
2.2	光电效应谜团	009
2.3	原子光谱谜团	010
2.4	石破天惊的量子化假设	011
3	量子化与连续性之辩	014
3.1	芝诺悖论：你能追上乌龟吗？	014
3.2	玄而又玄的无穷	015
3.3	时空是量子化的	017
3.4	运动是连续的吗？	017
3.5	量子化才是世界的本质	018
4	光的波粒二象性	020
4.1	爱因斯坦的光子理论	020
4.2	光子理论是牛顿粒子论的回马枪吗？	022
4.3	原子能量量子化与原子光谱	024
4.4	量子理论与光的本性	026

5	爱因斯坦的疑问: 什么是光子?	028
5.1	光与电磁波: 剪不断理还乱	028
5.2	波动光学与量子光学: 为什么有两种?	030
5.3	光的偏振: 光子也会思考吗?	031
5.4	光速不变: 相对中的绝对	034
5.5	静止质量为零: 有还是没有?	035
6	实物粒子的波粒二象性	038
6.1	德布罗意的惊人假设	038
6.2	实物粒子波动性的观察	041
6.3	实物粒子的双缝干涉实验	042
6.4	德布罗意波的应用	045
7	量子力学的建立	047
7.1	薛定谔的波动力学	047
7.2	概率构成的物质波	049
7.3	玻尔的对对应原理	051
7.4	海森堡的矩阵力学	052
7.5	量子力学正式建立	054
7.6	概率论与决定论的争论: 上帝掷骰子吗?	056
8	单个粒子的波粒二象性	059
8.1	单个电子的双缝干涉实验	059
8.2	概率波与概率幅	061
8.3	观察电子的轨迹	065
8.4	跟人类捉迷藏的电子	067
9	量子力学正统解释: 哥本哈根解释	068
9.1	不确定原理	068
9.2	互补原理	070
9.3	叠加态: 人为测量竟如此重要?	072
9.4	波函数坍缩	076

附录 量子计算机	077
10 神奇的量子隧道效应	079
10.1 隧道效应: 穿墙而过不是梦	079
10.2 扫描隧道显微镜	081
11 独辟蹊径的路径积分	084
11.1 路径积分: 所有路径求和	084
11.2 路径积分对双缝实验的解释	086
11.3 路径积分的广泛应用	088
11.4 费曼图: 物理学家的看图说话	089
12 坚持决定论的隐变量理论	093
12.1 德布罗意的导波理论	093
12.2 玻姆的量子势理论	095
13 量子力学的其他解释	098
13.1 意识论: 我思故我在?	098
13.2 热力学不可逆过程	099
13.3 退相干理论	100
13.4 GRW 理论	101
13.5 多世界理论: 人人都能创造平行宇宙	102
14 人类和光子的博弈	106
14.1 单光子偏振实验	106
14.2 单光子广角干涉实验	108
14.3 单光子延迟选择实验	110
14.4 量子擦除实验	113
15 幽灵般的超距作用: 纠缠态之谜	115
15.1 玻尔与爱因斯坦过招	115
15.2 EPR 佯谬: 纠缠态登场	119
15.3 纠缠态的实验证明	120

15.4	GHZ 三粒子纠缠	124
15.5	量子隐形传态：超空间传送能实现吗？	125
16	原子内部的世界	128
16.1	古人的物质组成观点	128
16.2	原子论的胜利	129
16.3	原子还不是最小	130
16.4	原子内部结构	132
16.5	原子结构的初期模型	134
16.6	电子云：电子在哪儿？	136
16.7	电子云节面之谜	139
16.8	电子的自旋	140
16.9	电子自旋之谜	142
17	组成世界的基本粒子	145
17.1	物质的镜像：反物质	145
17.2	宇宙隐形人：中微子	148
17.3	世界的基石：夸克	149
17.4	世界的基石：轻子	152
17.5	四种基本力和力的传递粒子	153
17.6	上帝粒子：希格斯粒子	156
17.7	标准模型	157
附录	高速粒子对狭义相对论的检验	158
18	宏观量子现象：玻色-爱因斯坦凝聚	161
18.1	费米子与玻色子	161
18.2	泡利不相容原理	163
18.3	玻色-爱因斯坦凝聚	165
18.4	液氦超流现象	168
19	量子场论	171
19.1	场与粒子的统一	171

19.2	粒子的产生与转化	172
19.3	真空中隐藏的奥秘	174
19.4	再析费曼图: 时间能倒流吗?	177
19.5	量子电动力学: 精确度惊人的预测	180
19.6	量子色动力学: 夸克禁闭	182
20	超弦理论: 万物至理?	183
20.1	统一理论的探索	183
20.2	宇宙的琴弦: 超弦理论	185
20.3	M 理论: 终极理论?	188
20.4	平行宇宙	190
附录	是否存在交叉宇宙?	191
21	宇宙大爆炸	193
21.1	膨胀的宇宙	193
21.2	广义相对论与宇宙学	196
21.3	宇宙理论的发展	199
21.4	宇宙的演化	202
21.5	恒星的演化	204
21.6	暗物质与暗能量之谜	208
21.7	时空的颤抖: 引力波	210
	后记	215
	参考文献	217



# 1

## 光的本性之争： 光是粒子还是波？

“量子”这个概念最早源自科学家对光的认识，所以就让我们从光的性质说起吧。

自古以来太阳就是人类膜拜的对象。阳光是人类必不可少的生命源泉，但人们对于光到底是个什么东西却说不清楚，所以古人只好把太阳当作神灵来崇拜，把太阳作为光明的象征，也把太阳看作是世界的统治者。

在很长一段时间内，人类对光的认识只限于某些简单的现象和规律描述，例如，战国时期的《墨经》中记载了投影、小孔成像等光学现象；古希腊学者欧几里得的《反射光学》论述了光在传输过程中的直线传播原理和光的反射定理。

随着科学的发展，人们逐渐开始以科学的方法来研究光，并发现了反射、折射等一些基本的光学现象。到了17世纪，人们开始研究光的本性，但对于光的性质却发生了似乎是水火不容的争论：牛顿认为光是一种粒子，而惠更斯却认为光是一种波。

### 1.1 惠更斯的波动学说

荷兰物理学家惠更斯认为，如果光是一种粒子，那么光在交叉时就会因发生碰撞而改变方向，可人们并没有观察到这种现象，所以粒子说是错误的。他认为，光是发光体产生的振动在“以太”中的传播过程，以球面波的形式连续传播。当时人们认为以太是充满了整个空间的一种弹性粒子，当然，现在已经证明这是一种子虚乌有的东西。惠更斯认为，

以太波的传播形式不是以太粒子本身的移动，而是以振动的方式传播。

1690年，惠更斯出版了《光论》一书，阐述了他的光波动原理。他指出：

“光波向外辐射时，光的传播介质中的每一物质粒子不只是把运动传给前面的相邻粒子，而且还传给周围所有其他和自己接触并阻碍自己运动的粒子。因此，在每一粒子周围就产生以此粒子为中心的波。”

惠更斯在此原理基础上，推导出了光的反射和折射定律，解释了光速在光密介质中减小的原因，同时还解释了光进入冰洲石所产生的双折射现象（1669年，丹麦学者巴尔托林发现了此现象，透过它可以看到物体呈双重影像）。

惠更斯的波动学说虽然冠以“波动”一词，但他把错误的“以太”概念引入波动光学，对波动过程的基本特性也缺乏足够的说明。他认为光波是非周期性的，波长和频率的概念在他的理论中是不存在的，所以难以说明光的直线传播现象，也无法解释他发现的光的偏振现象。惠更斯的光学理论只是很不完备的波动理论。

## 1.2 牛顿的粒子学说

牛顿则坚持光的粒子说。他做过很多光学实验，其中就包括著名的三棱镜色散实验。其实这个实验在他之前就有人做过，不过做得不好，只获得了两侧带有颜色的光斑，而牛顿则获得了展开的光谱。而且他用各种不同的棱镜以及不同的组合方式严谨地研究了色散现象，所以不少人都认为色散现象是他最早发现的。

牛顿认为，既然光是沿直线传播的，那就应该是粒子，因为波会弥散在空间中，不会聚成一条直线。最直观的实验证明就是物体能挡住光而形成阴影。他在1675年12月9日送交英国皇家学会的信中鲜明地指出：

“我认为光既非以太也不是振动，而是从发光物体传播出的某种与此

不同的东西……可以设想光是一群难以想象的微小而运动迅速的、大小不同的粒子，这些粒子从远处发光体那里一个接着一个地发射出来，但我们却感觉不到相继两个粒子之间的时间间隔，它们被一个运动本原所不断推向前进……”

牛顿在 1704 年发表了《光学》一书，书中论述了关于光的反射、折射、拐射以及颜色等问题的实验和讨论，也提到了对于光的衍射现象的一些观察实验。虽然《光学》一书主要叙述了他的微粒说观点，但是他也不得不含糊地借用一些波动理论来解释一些实验现象。实际上，牛顿在后期的研究中精确地测量了各种颜色光的波长，但他并不将其称为波长，而且声明：

“这是何种作用或属性，究竟它在于光线或媒质，还是别的某些东西的一种圆周运动或是振动，我在此不予探究……”

由于牛顿和惠更斯都提出了有理有据的论证，但又都有一些破绽，所以科学家们分成了两大阵营，为光的微粒说和波动说吵得不可开交。虽然牛顿含糊地借用了一些波动论的观点，但由于他的巨大声望以及著作中实验和理论分析的严谨性，一时间光的微粒学说占据了上风。

### 1.3 杨氏双缝干涉实验

一个世纪以后，情况发生了变化。1807 年，英国科学家托马斯·杨发表了一篇论文，这篇论文里描述了他发现的光的干涉实验：

“使一束单色光照射一块屏，屏上开有两条狭缝，可认为这两条缝就是两个光的发散中心。当这两束光射到一个放置在它们前进方向上的屏上时，就会形成宽度近于相等的若干条明暗相间的条纹……”

这个实验现在叫做杨氏双缝干涉实验，是物理学史上最著名的实验之一。一束光照射到两条平行狭缝上（见图 1-1（a）），如果按照牛顿的

光粒子理论，这束光只能在两条狭缝后的屏幕上照出两条亮条纹，但实验结果却是整个屏幕上都出现了明暗相间的条纹（见图 1-1 (b)），这不就是波的干涉条纹吗？托马斯·杨终于找到了支持波动说的有力证据：光从两条狭缝中通过后，波峰和波峰叠加形成亮条纹，波峰和波谷叠加形成暗条纹。

托马斯·杨成功地完成了光的干涉实验，并由此测定了光的波长，从而为光的波动性提供了重要的实验依据。

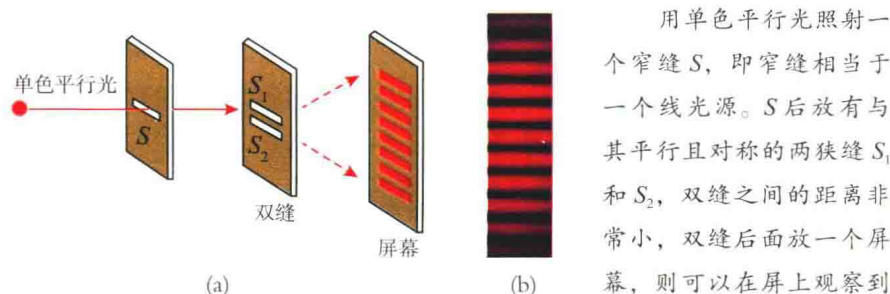


图 1-1 杨氏双缝干涉实验示意图

## 1.4 泊松的乌龙球

杨氏双缝干涉实验拉开了光的波动说对微粒说的反击序幕。1818年，菲涅耳和泊松又发现光在照射圆盘时，在盘后方一定距离的屏幕上，圆盘的影子中心会出现一个亮斑。这是光的圆盘衍射，是波动说的又一个有力证据。

当单色光照射在宽度小于或等于光源波长的小圆盘上时，会在后面的光屏上出现环状的互为同心圆的衍射条纹，并且在圆心处会出现一个极小的亮斑，这个亮斑被称为泊松亮斑（见图 1-2）。

泊松亮斑的发现说起来还是一段歪打正着的佳话呢。

1818年，法国科学院提出一个征文竞赛题目：利用精确的实验确定光线的衍射效应。

当时只有30岁的菲涅耳向科学院提交了应征论文，他提出一种半波带法，定量地计算了圆孔、圆板等形状的障碍物产生的衍射花纹，得出的结果与实验吻合得很好。更令人惊奇的是，菲涅耳竟然用波动理论解释了光沿直线传播的现象。

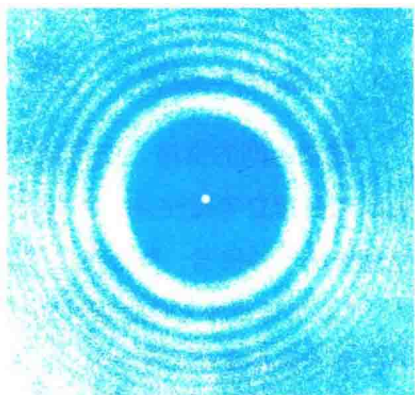


图 1-2 泊松亮斑

竞赛评奖委员会中有著名的科学家泊松，但他当时是坚定的光的粒子论支持者，菲涅耳的波动理论自然遭到了泊松的反对。

泊松希望找到菲涅耳的破绽来驳倒他。他运用菲涅耳的理论推导了圆盘衍射，结果导出了一种非常奇怪的现象：如果在光束的传播路径上放置一块不透明的圆盘，那么在离圆盘一定距离的地方，圆盘阴影的中央应当出现一个亮斑。在当时来说，这简直是不可思议的，所以泊松宣称，他已经驳倒了菲涅耳的波动理论。

但是另一位评委阿拉果却是波动说的支持者，他支持菲涅耳接受这个挑战。他们立即用实验对泊松提出的问题进行了检验，结果发现影子中心真的出现了一个亮斑，这个实验精彩地证实了菲涅耳波动理论的正确性。在事实面前，泊松哑口无言。

这件事轰动了法国科学院，菲涅耳理所当然地荣获了这一届的科学奖。

令人啼笑皆非的是，原本想反对波动说的泊松，竟然无意中帮了波动说一个大忙，虽然属于自摆乌龙，但毕竟为波动论进了一球，波动论者也没有忘记他的功劳，慷慨地把这个现象称为泊松亮斑。不管泊松愿



不愿意，他在后人心目中已经成了波动学说阵营中的一员大将。

## 1.5 光就是电磁波

随着时间的推移，波动说又取得了越来越多的证据。英国科学家麦克斯韦在建立电磁理论的研究过程中，于 1862 年就预见到光是起源于电磁现象的一种横波，他在相关论文中用斜体字写道：

“我们很难避免得出这样的结论，即光是由引起电现象和磁现象的同一介质中的横波组成的。”

麦克斯韦在多年研究的基础上，于 1873 年出版了《电磁通论》一书，指出了光就是电磁波！

麦克斯韦将电磁学里的四个公式结合起来，提出麦克斯韦方程组。他明确指出，变化的电场会产生磁场，变化的磁场又会产生电场，这样电和磁可以像波（称为电磁波）一样在真空中向前传播而不需要介质。电磁波弥漫在整个空间，以光速传播。麦克斯韦同时预测：光就是电磁波。

1879 年，麦克斯韦因病逝世，年仅 48 岁。不少人都喜欢讲这样一个巧合：爱因斯坦正好在 1879 年出生，莫非冥冥之中二人有着一定的联系？遗憾的是，这样的八卦是经不住检验的，因为麦克斯韦在 11 月 5 日去世，而爱因斯坦在 3 月 14 日就出生了。

虽然麦克斯韦提出了电磁波理论，但不少人对此还是半信半疑。1886 年，德国物理学家赫兹发明了一种电波环，他用这种电波环做了一系列实验，终于在 1888 年发现了人们期待已久的电磁波。赫兹的实验公布后，轰动了世界，麦克斯韦的电磁理论至此取得了决定性的胜利。

于是，可见光、紫外线、红外线，以及后来发现的 X 射线、 $\gamma$  射线等这些之前被认为不相干的东西，现在统统被统一成电磁波，光和电磁波也明确地对应起来。至此，波动说终于彻底击败了粒子说，至少当时人们都是这样认为的。

# 2

## 电磁波能量谜团： 能量竟然不连续？

电磁波理论取得了空前的成功。牛顿奠定了力学基础，而麦克斯韦则奠定了电磁学基础，他也成为和牛顿比肩的科学巨匠。从惠更斯到麦克斯韦，在众多科学家的努力下，波动说终于击败了粒子说。但是，不久人们就发现波动说的胜利并非完美，因为有几个涉及光的实验是电磁波理论所无法解释的！这也成为当时物理学界的最大谜团。

### 2.1 黑体辐射谜团

第一个就是黑体辐射规律。

所谓黑体，顾名思义，就是最黑的物体。我们知道，黑色的物体能吸收光，那么最黑的物体就能把射入其内的所有光全部吸收。精确地定义一下，黑体是指能全部吸收外来电磁波的物体，当它被加热时又能最大程度地辐射出电磁波，这种辐射称为黑体辐射。

黑体辐射其实是一种热辐射。任何物体只要处于绝对零度（ $-273.15^{\circ}\text{C}$ ）以上，其原子、分子都在不断地热运动，都会辐射电磁波（称为热辐射）。温度越高，辐射能力越强。

其实通俗点说，热辐射就是指任何物体都会发光发热：辐射出的电磁波就是“光”，发光时要释放能量，电磁波携带的能量就是我们通常所说的“热”。当然这里的“光”并非都是可见光，只有在 $500^{\circ}\text{C}$ 以上才会出现较强的可见光，所以我们人类虽然也在发光，发出的却是肉眼看不到的红外线。军事上常用的红外热像仪就是通过接收物体发出的红外线

能量，经光电转换获得红外热图像，从而让我们“看到”物体。

实际上，人们很早就开始观察并利用热辐射的能量分布指导生产实践。例如，古人在冶炼金属时，炉温的高低可以根据炉火的颜色判断。战国时期成书的《考工记》中就记载，冶炼青铜时炉中的焰气，随着温度的升高，颜色要经过黑、黄白、青白、青四个阶段，到焰气颜色发青（炉火纯青）时温度最高。另外，青白色的灼热金属比暗红色的灼热金属温度更高。

黑体是研究热辐射的主要工具，因为它的热辐射程度是最完全的。黑体其实并不难做，做一个耐热的密闭箱子，在箱子内壁涂上烟煤，还可以在里边再加几块隔板，然后开一个小孔，这样从小孔射入的光就能被它全部吸收（见图 2-1）；反过来，当它被加热时又能从小孔中最大程度地辐射出电磁波。

对黑体加热，它就能发光发热，既然光是一种电磁波，那它就有波长，不同波长的光对应着不同的热——即辐射能量。

19 世纪末，人们已经得到了黑体辐射的光的波长与辐射能量密度之间的实验曲线，可是在理论解释上却出现了大问题，物理学家们按电磁波理论推导出来的公式怎么也无法和全部实验曲线相对应。其中比较好的有维恩公式和瑞利 - 金斯公式，但也只能分别解释短波部分和长波部分（见图 2-2）。

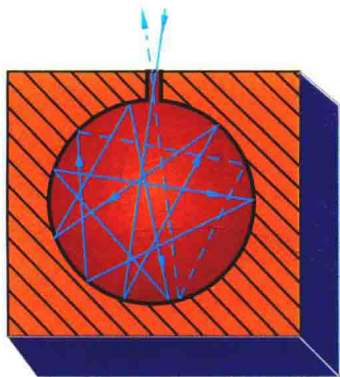


图 2-1 黑体

一个耐热密闭的黑箱子开一个小孔，就是一个简单的黑体，光线射进去就出不来



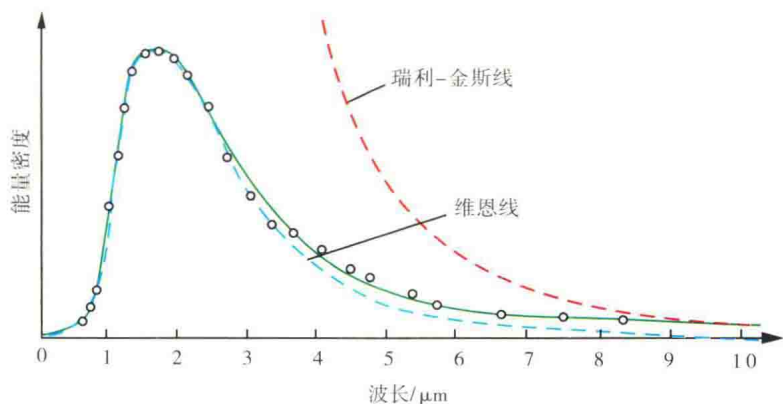


图 2-2 黑体辐射实验值(小圆圈)与两个公式的理论值(虚线)的图示, 维恩公式只适用于短波部分, 瑞利-金斯公式只适用于长波部分

## 2.2 光电效应谜团

第二个是光电效应。

光电效应, 顾名思义, 就是由光产生电的效应。1887年, 赫兹发现紫外线照射到某些金属板上, 可以将金属中的电子打出来, 在两个相对的金属板上加上电压, 被打出来的电子就会形成电流(见图 2-3)。这一

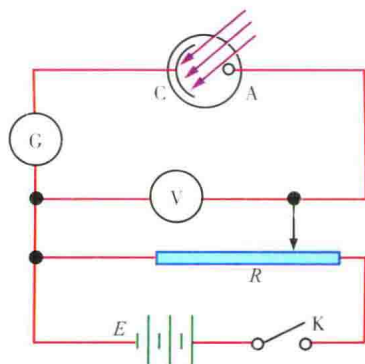


图 2-3 光电效应实验装置示意图

极板 C 被紫外光打出电子, 电子在电压作用下移动到极板 A 上, 形成电流回路, 于是电流表 G 的指针偏转