

全新修订
精装珍藏

上帝掷骰子吗？

量子物理史话

HISTORY OF QUANTUM PHYSICS

曹天元

(Capo)
著

荣获

“科学时报读书杯”最佳科普创作奖（2005）

第三届“吴大猷科普奖”（2006）

国家图书馆文津图书奖（2007）

中国版《时间简史》，权威性与趣味性兼备，超好看的科普佳作



北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co., Ltd.

上帝掷骰子吗？

量子物理史话

HISTORY OF QUANTUM PHYSICS

曹天元

(Capo)

著



北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co., Ltd.

图书在版编目 (CIP) 数据

上帝掷骰子吗? : 量子物理史话 / 曹天元著;

—北京: 北京联合出版公司, 2013.8

ISBN 978-7-5502-1745-4

I . ①上… II . ①曹… III . ①量子论—物理学史

IV . ①O413-09

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第158322号

上帝掷骰子吗? : 量子物理史话

作 者: 曹天元

责任编辑: 王 巍

封面设计: 吕彦秋

北京联合出版公司出版

(北京市西城区德外大街83号楼9层 100088)

三河市万龙印装有限公司 新华书店经销

字数 349千字 710毫米×1000毫米 1/16 24.5印张

2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5502-1745-4

定价: 45.00元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容

版权所有, 侵权必究

如发现图书质量问题, 可联系调换。质量投诉电话: 010-82069336

爱因斯坦：波尔，亲爱的上帝不掷骰子！

波尔：爱因斯坦，别去指挥上帝应该怎么做！

霍金：上帝不但掷骰子，他还把骰子掷到我们看不见的地方去！

序

Preface



如果要评选物理学发展史上最伟大的那些年代，那么有两个时期是一定会入选的：17世纪末和20世纪初。前者以牛顿《自然哲学之数学原理》的出版为标志，宣告了近代经典物理学的正式创立；而后者则为我们带来了相对论和量子论，并彻底地推翻和重建了整个物理学体系。所不同的是，今天当我们再次谈论起牛顿的时代时，心中更多的已经只是对那段光辉岁月的怀旧和祭奠；而相对论和量子论却至今仍然深深地影响和困扰着我们，就像两颗青涩的橄榄，嚼得越久越有滋味。

我在这里要给大家讲的是量子论的故事。这个故事更像一个传奇：由一个不起眼的线索开始，曲径通幽，渐渐地落英缤纷，乱花迷眼，正在没个头绪处，突然间峰回路转，天地开阔，如河出伏流，一泻汪洋。然而还未来得及一览美景，转眼又大起大落，误入白云生处不知归路……量子力学的发展史是物理学上最激动人心的篇章，我们会看到物理大厦在狂风暴雨下轰然坍塌，却又在熊熊烈焰中得到了洗礼和重生。我们会看到最革命的思潮席卷大地，带来了让人惊骇的电闪雷鸣，同时却又展现出震撼人心的美丽。我们会看到科学如何在荆棘和沼泽中艰难地走来，却更加坚定了对胜利的信念。

量子理论是一个极为复杂而又难解的谜题。她像一个神秘的少女，我们天天与她相见，却始终无法猜透她的内心世界。今天，我们的现代文明，从电脑到激光，从核能到生物技术，几乎没有哪个领域不依赖于量子论。但量子论究竟是什么？这个问题至今却依然难以回答。在自然哲学观上，量子论带给了我们前所未有的冲击和震动，甚至改变了整个物理世界的基本思想。它的观念是如此革命，乃至最不保守的科学家都在潜意识里对它怀有深深的惧意。现代文明的繁盛是理性的胜利，而量子论无疑是理性的最高成就之一，但是它被赋予的力量太过强大，以致连它的创造者本身都难以驾驭——量子论的奠基人之一玻尔（Niels Bohr）都要说：“如果谁不为量子论而感到困惑，那他就没有理解量子论。”

掐指算来，量子概念的诞生已经超过整整100年，但不可思议的是，它的一些基本思想却至今不为大众所熟知。那么，就让我们再次回到那个伟大

的年代，去回顾一下那场史诗般壮丽的革命吧。我们将沿着量子论当年走过的道路展开这次探险，我们将和 20 世纪最伟大的物理天才们同行，去亲身体验一下他们当年曾经历过的那些困惑、激动、恐惧、狂喜和震惊。这注定是一次奇妙的旅程，我们将穿越幽深的森林和广袤的沙漠，飞越迷雾重重的峡谷和惊涛骇浪的狂潮。你也许会感到晕眩，可是请跟紧我的步伐，不要随意观光而掉队，否则很有可能陷入沼泽中无法自拔。请记住我的警告。

不过现在，已经没时间考虑这么多了。请大家坐好，系好安全带，我们的旅程开始了。

序

01

黄金时代

001

02

乌云

029

03

火流星

055

04

白云生处

083

05

曙光

109

06

殊途同归

137

07

不确定性

163

08

决战

191

目录

CONTENTS



上帝掷骰子吗？

量子物理史话

219

09
歧途

251

10
回归经典

281

11
不等式的判决

307

12
新探险

342

尾声

344

外一篇
海森堡和德国
原子弹计划

360

后记

362

主要参考资料

371

人名索引

01



CHAPTER

Golden Age

黄金时代

Part 1

我们的故事要从 1887 年的德国小城——卡尔斯鲁厄 (Karlsruhe) 讲起。美丽的莱茵河从阿尔卑斯山区缓缓流下，在山谷中辗转向北，把南方温暖湿润的风带到这片土地上。它本应是法德两国之间的一段天然边界，但在 1870 年，雄才大略的俾斯麦通过一场漂亮的战争击败了拿破仑三世，攫取了河对岸的阿尔萨斯和洛林，也留下了法国人的眼泪和我们课本中震撼人心的《最后一课》的故事。和阿尔萨斯隔河相望的是巴登邦，神秘的黑森林从这里延展开去，孕育着德国古老的传说和格林兄弟那奇妙的灵感。卡尔斯鲁厄就安静地躺在森林与大河之间，无数辐射状的道路如蛛网般收聚，指向市中心那座著名的 18 世纪的宫殿。这是一座安静祥和的城市，据说它的名字本身就是由城市的建造者卡尔 (Karl) 和“安静” (Ruhe) 一词所组成。对于科学家来说，这里实在是一个远离尘世喧嚣，可以安心做研究的好地方。

海因里希·鲁道夫·赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz) 正站在卡尔斯鲁厄大学的一间实验室里，专心致志地摆弄他的仪器。那时候，赫兹刚刚 30 岁，新婚燕尔，也许不会想到他将在科学史上成为和他的老师亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz) 一样鼎鼎有名的人物，他不会想到将和汽车大王卡尔·本茨 (Carl Benz) 一起成为这个小城的骄傲。现在，他的心思只是完完全全地倾注在他那套装置上。

赫兹给他的装置拍了照片，不过在 19 世纪 80 年代，照相的网目铜版印刷技术还刚刚发明不久，尚未普及，以致连最好的科学杂志如《物理学纪事》 (*Annalen der Physik*) 都没能把它们印在论文里面。但是我们今天已经知道，赫兹的装置是很简单的：它的主要部分是一个电火花发生器，有两个大铜球作为电容，并通过铜棒连接到两个相隔很近的小铜球上。导线从两个小球上伸展出去，缠绕在一个大感应线圈的两端，然后又连接到一个梅丁格电池上，将这套古怪的装置连成了一个整体。

赫兹全神贯注地注视着那两个几乎紧挨在一起的小铜球，然后合上了电路开关。顿时，电的魔力开始在这个简单的系统里展现出来：无形的电流穿过装置里的感应线圈，并开始对铜球电容进行充电。赫兹冷冷地注视着他的装置，在心里面想象着电容两端电压不断上升的情形。在电学的领域攻读了

那么久，赫兹对自己的知识是有充分信心的。他知道，当电压上升到2万伏左右，两个小球之间的空气就会被击穿，电荷就可以从中穿过，往来于两个大铜球之间，从而形成一个高频的振荡回路（LC回路）。但是，他现在想要观察的不是这个。

果然，过了一会儿，随着细微的“啪”的一声，一束美丽的蓝色电花爆开在两个铜球之间，整个系统形成了一个完整的回路，细小的电流束在空气中不停地扭动，绽放出幽幽的荧光来。火花稍纵即逝，因为每一次振荡都伴随着少许能量的损失，使得电容两端的电压很快又降到击穿值以下。于是这个怪物养精蓄锐，继续充电，直到再次恢复饱满的精力，开始另一场火花表演为止。

赫兹更加紧张了。他跑到窗口，将所有的窗帘都拉上，同时又关掉了实验室的灯，让自己处在一片黑暗之中。这样一来，那些火花就显得格外醒目而刺眼。赫兹揉了揉眼睛，让它们更为习惯于黑暗的环境。他盯着那串间歇的电火花，还有电火花旁边的空气，心里面想象了一幅又一幅图景。他不是要看这个装置如何产生火花短路，他这个实验的目的，是为了求证那虚无缥缈的“电磁波”的存在。那是一种什么样的东西啊，它看不见，摸不着，到那时为止谁也没有见过、验证过它的存在。可是，赫兹对此是坚信不疑的，因为它是麦克斯韦（Maxwell）理论的一个预言，而麦克斯韦理论……哦，它在数学上简直完美得像一个奇迹！仿佛是上帝之手写下的一首诗歌。这样的理论，很难想象它是错误的。赫兹吸了一口气，又笑了：不管理论怎样无懈可击，它毕竟还是要通过实验来验证的呀。他站在那里看了一会儿，在心里面又推想了几遍，终于确定自己的实验无误：如果麦克斯韦是对的话，那么每当发生器火花放电的时候，在两个铜球之间就应该产生

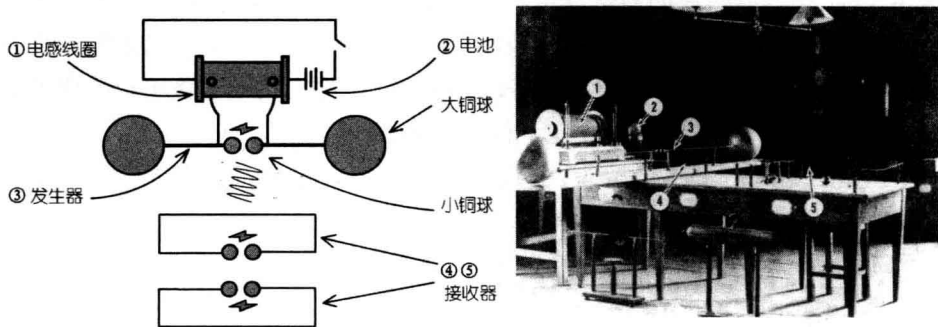


图 1.1 赫兹的装置及简图 (Schleiermacher 1901)

一个振荡的电场，同时引发一个向外传播的电磁波。赫兹转过头去，在不远处，放着两个开口的长方形铜环，在接口处也各镶了一个小铜球，那是电磁波的接收器。如果麦克斯韦预言的电磁波真的存在的话，那么它就会飞越空间，到达接收器，在那里感生一个振荡的电动势，从而在接收器的开口处也同样激发出电火花来。

实验室里面静悄悄的，赫兹一动不动地站在那里，仿佛他的眼睛已经看见那无形的电磁波在空间穿越。当发生器上产生火花放电的时候，接收器是否也同时感生出火花来呢？赫兹睁大了双眼，他的心跳得快极了。铜环接收器突然显得有点异样，赫兹简直忍不住要大叫一声，他把自己的鼻子凑到铜环的前面，明明白白地看见似乎有微弱的火花在两个铜球之间的空气里跃过。是幻觉，还是心理作用？不，都不是。一次，两次，三次，赫兹看清楚了：虽然它一闪即逝，但上帝啊，千真万确，真的有火花正从接收器的两个小球之间穿过，而整个接收器却是一个隔离的系统，既没有连接电池也没有任何的能量来源。赫兹不断地重复着放电过程，每一次，火花都听话地从接收器上被激发出来，在赫兹看来，世上简直没有什么能比它更加美丽了。

良久，赫兹终于揉了揉眼睛，直起腰来：现在一切都清楚了，电磁波真实地存在于空间之中，正是它激发了接收器上的电火花。他胜利了，成功地解决了这个8年前由柏林普鲁士科学院悬赏踢出的问题^①；同时，麦克斯韦的理论也胜利了，物理学的一个新高峰——电磁理论终于被建立起来。伟大的法拉第（Michael Faraday）为它打下了地基，伟大的麦克斯韦建造了它的主体，而今天，他——伟大的赫兹——为这座大厦封了顶。

赫兹小心地把接收器移到不同的位置，电磁波的表现和理论预测分毫不爽。根据实验数据，赫兹得出了电磁波的波长，把它乘以电路的振荡频率，就可以计算出电磁波的前进速度。这个数值在可容许的误差内恰好等于30万千米/秒，也就是光速。麦克斯韦惊人的预言得到了证实：原来电磁波一点都不神秘，我们平时见到的光就是电磁波的一种，只不过普通光的频率正好落在能够为我们的眼睛所感觉到的范围内罢了。

无论从哪一个意义上来说，这都是一个了不起的发现。古老的光学终于



^①不过赫兹显然没有领到奖金。由于问题太难导致无人挑战，这个悬赏于1882年就失效了。

可以被完全包容于新兴的电磁学里面，而“光是电磁波的一种”的论断，也终于为争论已久的光本性的问题下了一个似乎是不可推翻的定论（我们马上就要去看看这场旷日持久的精彩大战）。电磁波的反射、衍射和干涉实验很快就做出来了，这些实验进一步证实了电磁波和光波的一致性，无疑是电磁理论的一个巨大成就。

赫兹的名字终于可以被闪光地镌刻在科学史的名人堂里。虽然他英年早逝，还不到37岁就离开了这个奇妙的世界，然而，就在那一年，一位在伦巴底度假的20岁意大利青年读到了他的关于电磁波的论文。两年后，这个青年已经在公开场合进行无线电的通信表演，不久他的公司成立，并成功地拿到了专利证。到了1901年，赫兹死后的第7年，无线电报已经可以穿越大西洋，实现两地的实时通信了。这个来自意大利的年轻人就是古格列尔莫·马可尼（Guglielmo Marconi）。与此同时，俄国的波波夫（Aleksandr Popov）也在无线通信领域作了同样的贡献。他们掀起了一场革命的风暴，把整个人类带进了一个崭新的“信息时代”。如果赫兹身后有知，他又将会作何感想呢？



图1.2 赫兹

我觉得赫兹只会对此置之一笑。他是那种纯粹的科学家，把对真理的追求当作人生最大的价值。恐怕就算他想到了电磁波的商业前景，也不屑去把它付诸实践的。也许，在美丽的森林和湖泊间散步，思考自然的终极奥秘，在秋天落叶的校园里和学生探讨学术问题，才是他真正的人生吧？今天，他的名字已经成为“频率”这个物理量的单位，被每个人不断地提起，可是，说不定他还会嫌我们打扰他的安宁呢。

无疑，赫兹就是这样一个淡泊名利的人。1887年10月，基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff）在柏林去世，亥姆霍兹强烈推荐赫兹成为那个教授职位的继任者，但赫兹却拒绝了。也许在赫兹看来，柏林的喧嚣并不适合他。亥姆霍兹理解自己学生的想法，写信勉励他说：“一个希望与众多科学问题搏斗的人最好还是远离大都市。”

只是赫兹却没有想到，他的这个决定在无意中改变了许多事情。他并不知道，自己已经在电磁波的实验中亲手种下了一个幽灵的种子，而顶替他去柏林任教的那个人，则会在一个命中注定的时刻把这个幽灵从沉睡中唤醒。在那之后，一切都改变了，在未来的30年间，一些非常奇妙的事情会不断发生，彻底重塑整个物理学的面貌。一场革命的序幕已经在不知不觉中悄悄拉开，而我们的宇宙，也即将经受一场暴风雨般的洗礼，从而变得更加神秘莫测，震撼人心。

但是，我们还是不要着急，一步一步地走，耐心地把这个故事从头听完。

Part 2

前面我们说到，1887年，赫兹的实验证实了电磁波的存在，也证实了光其实是电磁波的一种，两者具有共同的波的特性。这就为光的本性之争画上了一个似乎已经是不可更改的句号。

说到这里，我们的故事要先回一回头，穿越时空去回顾一下这场光的论战。这也许是物理史上持续时间最长，程度最激烈的一场论战。它不仅贯穿于光学发展的全过程，更使整个物理学都发生了翻天覆地的变化，在历史上烧灼下了永不磨灭的烙印。

光，是每个人见得最多的东西（“见得最多”在这里用得真是一点也不错）。自古以来，它就理所当然地被认为是这个宇宙最原始的事物之一。在远古的神话中，往往是“一道亮光”劈开了混沌和黑暗，于是世界开始了运转。光在人们的心目中，永远代表着生命、活力和希望，更由此演绎了数之不尽的故事与传说。从古埃及的阿蒙（也叫拉，Ra），到中国的祝融；从北欧的巴尔德（Balder），到希腊的阿波罗；从凯尔特人的鲁（Lugh），到拜火教徒的阿胡拉·玛兹达（Ahura Mazda）——这些代表光明的神祇总是格外受到崇拜。哪怕在《圣经》里，神要创造世界，首先要创造的也仍然是光，可见它在这个宇宙中所占的独一无二的地位。

可是，光究竟是一种什么东西呢？虽然我们每天都要与它打交道，但普通人似乎很少会去认真地考虑这个问题。如果仔细地想一想，我们会发现光

实在是一样奇妙的事物，它看得见，却摸不着，没有气味也没有重量。我们一按电灯开关，它似乎就凭空地被创生出来，一下子充满整个空间。这一切，都是如何发生的呢？

有一样事情是肯定的：我们之所以能够看见东西，那是因为光在其中作用的结果，但人们对其具体的作用机制则在很长一段时期内都迷惑不解。在古希腊时代，人们猜想光是一种从我们眼睛里发射出去的东西，当它到达某样事物的时候，这样事物就被我们所“看见”了。比如恩培多克勒（Empedocles）就认为世界是由水、火、气、土四大元素组成的，而人的眼睛是女神阿芙洛狄忒（Aphrodite）用火点燃的。当火元素（也就是光，古时候往往光火不分）从人的眼睛里喷出到达物体时，我们就得以看见事物。

但显而易见，单单用这种解释是不够的。如果光只是从我们的眼睛出发，

那么只要我们睁开眼睛，就应该能看见。但每个人都知道，有些时候，我们即使睁着眼睛也仍然看不见东西（比如在黑暗的环境中）。为了解决这个困难，人们引入了复杂得多的假设。比如柏拉图（Plato）认为有三种不同的光，分别

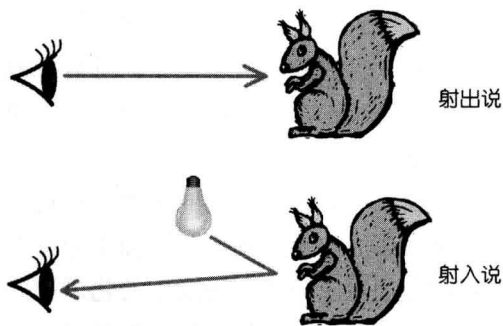


图1.3 视觉成像的两种理论

分别来源于眼睛、被看到的物体以及光源本身，而视觉是三者综合作用的结果。

这种假设无疑是太复杂了。到了罗马时代，伟大的学者卢克莱修（Lucretius）在其不朽著作《物性论》中提出，光是从光源直接到达人的眼睛的，但是他的观点却始终不为人们所接受。对光成像的正确认识直到公元1000年左右才被著名的伊斯兰科学家阿尔·哈桑（Al-Haytham，也拼作Alhazen）归纳成形：原来我们之所以能够看到物体，只是由于光从物体上反射进我们眼睛里的结果^①。哈桑从多方面有力地论证了这一点，包括研究

①在他之前，毕达哥拉斯等人也已经有过类似的想法，不过比较原始粗糙。

上帝掷骰子吗？



了光进入眼球时的折射效果以及著名的小孔成像实验。他那阿拉伯语的著作后来被翻译并介绍到西方，并为罗杰尔·培根（Roger Bacon）所发扬光大，这给现代光学的建立打下了基础。

关于光在运动中的一些性质，人们也很早就开始研究了。基于光总是走直线的假定，欧几里得（Euclid）在《反射光学》（*Catoptrica*）一书里面就研究了光的反射问题。托勒密（Ptolemy）、哈桑和开普勒（Johannes Kepler）都对光的折射作了研究，而荷兰物理学家斯涅耳（Willebrord Snell）则在他们的工作基础上于1621年总结出了光的折射定律。最后，光的种种性质终于被有“业余数学之王”之称的费尔马（Pierre de Fermat）归结为一个简单的法则，那就是“光总是走最短的路线”。光学作为一门物理学科终于被正式确立起来。

但是，当人们已经对光的种种行为了如指掌的时候，我们最基本的问题却依然没有得到解决，那就是：“光在本质上到底是一种什么东西？”这个问题看起来似乎并没有那么难以回答，没有人会想到，对于这个问题的探究居然会那样旷日持久，而这一探索的过程，对物理学的影响竟然会是那么深远和重大，其意义超过当时任何一个人的想象。

古希腊时代的人们总是倾向于把光看成一种非常细小的粒子流，换句话说，光是由一粒粒非常小的“光原子”所组成的。这种观点一方面十分符合当时流行的元素说，另外一方面，古代的人们除了粒子之外对别的物质形式也了解得不是太多。这种理论，我们把它称为光的“微粒说”。微粒说从直观上看来是很有道理的，首先它可以很好地解释为什么光总是沿着直线前进，为什么会严格而经典地反射，甚至折射现象也可以由粒子流在不同介质里的速度变化而得到解释。但是微粒说也有一些显而易见的不足，比如人们当时很难说清为什么两道光束相互碰撞的时候不会互相弹开，人们也无法得知这些细小的光粒子在点上灯火之前是隐藏在何处的，它们的数量是不是可以无限多，等等。

当黑暗的中世纪过去之后，人们对自然世界有了进一步的认识。波动

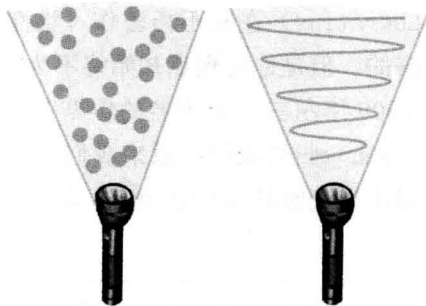


图1.4 光的微粒说和波动说

现象被深入地了解和研究，声音是一种波动的认识也进一步深入人心。人们开始怀疑：既然声音是一种波，为什么光不能够也是波呢？17世纪初，笛卡儿（René Descartes）在其《方法论》的三个附录之一《折光学》中率先提出了这样的可能：光是一种压力，在媒质里传播。不久后，意大利的一位数学教授格里马第（Francesco Maria Grimaldi）做了一个实验，他让一束光穿过两个小孔后照到暗室里的屏幕上，发现在投影的边缘有一种明暗条纹的图像。格里马第马上联想起了水波的衍射（这个大家在中学物理课本的插图上应该都见过），于是提出：光可能是一种类似水波的波动。这就是最早的光波动说。

波动说认为，光不是一种物质粒子，而是因介质振动而产生的一种波。我们想象一下足球场上观众掀起的“人浪”：虽然每个观众只是简单地站起和坐下，并没有四处乱跑，但那个“浪头”却实实在在地环绕全场运动着，这个“浪头”就是一种波。池塘里的水波也是同样的道理，它不是一种实际的传递，而是沿途的水面上下振动的结果。如果光也是波动的话，我们就容易解释投影里的明暗条纹，也容易解释为何光束可以互相穿过而互不干扰。关于直线传播和反射的问题，人们后来认识到光的波长是极短的，在大多数情况下，光的行为就如同经典粒子一样，而衍射实验则更加证明了这一点。但是波动说有一个基本的难题：既然波本身是介质的振动，那它必须在某种介质中才能够传递，比如声音可以沿着空气、水乃至固体前进，但在真空中就无法传播。为了容易理解这一点，大家只要这样想：要是球场里空无一人，那“人浪”自然也就无从谈起。

而光则不然，它似乎不需要任何媒介就可以任意地前进。举一个简单的例子：星光可以从遥远的星系出发，穿过几乎是真空的太空来到地球而为我们所见，这对波动说显然是非常不利的。但是波动说巧妙地摆脱了这个难题：它假设了一种看不见摸不着的介质来实现光的传播，这种介质有一个十分响亮而让人印象深刻的名字——“以太”（Aether）。

就在这样一种奇妙的气氛中，光的波动说登上了历史舞台。我们很快就会看到，这个新生力量似乎是微粒说的前世冤家，它命中注定要与后者展开一场长达数个世纪的战争。它们两个的命运始终互相纠缠在一起，如果没有了对方，谁也不能说自己还是完整的。到了后来，它们简直就是为了对手而存在着。这出精彩的戏剧从一开始的伏笔，经过两个起落，达到令人眼花缭乱的高潮。而最后绝妙的结局则更让我们相信，它们的对话几乎是一种可遇