

量子物理史话

最伟大的人物、最动人的故事、最边缘的空间、最精微的体验
从微观到宏观，从存在到坍缩，从科学到哲学，从严谨到幽默
你的极限、人类的极限、宇宙的极限
量子物理之旅，穷极你的想像力、判断力、认知力、忍耐力

曹天元.(Capo)/著

上帝 掷骰子吗

Does God Play Dice?

具有超级影响力的科普读物，被誉为“中国的《时间简史》”

董光壁、江晓原、刘兵、武夷山、刘华杰鼎力推荐

辽宁教育出版社

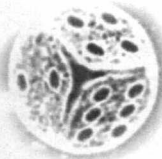
0413

12

量子物理史话

曹天元 (Capo) / 著

上帝 掷骰子吗



Does God Play Dice?

辽宁教育出版社

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. —沈阳：辽宁教育出版社，2005

ISBN 7-5382-7637-8

I.上... II.曹... III.量子论—物量学史

IV.0413-09

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 133429 号

编辑策划 许苏葵
发行人 刘国玉
封面设计 门乃婷装帧设计
责任校对 吴璇
出版发行 辽宁教育出版社(沈阳市十一纬路 25 号)
印刷 北京佳信达艺术印刷有限公司
版次 2006 年 1 月第 1 次出版
印次 2006 年 1 月第 1 次印刷
开本 710×1000 毫米 1/16
印张 24
字数 400 千字
定价 32.00 元

序一

努力言说不可言说之事



编辑寄来了曹天元所著的《上帝掷骰子吗——量子物理史话》一书的打印稿,要我为之写个序言。为此,我当然需要通读一遍此书,读过之后,还是很有些感想,姑且写在这里。

我不知道作者的身份,但从书稿的内容来看,判断应该是学习物理出身,对物理学知识有较好的理解,而且,与通常学习物理专业的人的区别,在于这位曹天元确实读了不少的书,想了不少的事,而这些,恰恰是写出这部颇有特色的量子物理史话的重要前提条件。

我想,这本原是网上创作的作品的正式出版,应该是被当做一部科普作品。但这部科普作品,又是以“史话”的形式写成的。这里面就涉及一些问题。

其一,是量子物理学的普及本来就是一件非常困难的事,从某种程度上讲,甚至于是一件不大可能的事,一种不可言说的事,那些在物理系专门学过量子力学、量子场论的学生,即使在物理考试中的计算上做得很出色,也很难说是真正搞“懂”了量子问题。在这个打了引号的“懂”的意义上,就连那些大物理学家也恐怕是如此,因为对物理学这个分支的理解,从来就存在着某种的不一致,否则,像玻尔和爱因斯坦这样顶级的物理学家,也就不会在几十年的时间里一直就相关的问题“论战”不已,直至去世也没最后争出个所以然来。相反,那些仅仅通过对量子力学的初步学习(哪怕是物理系里专业性的学习)就觉得自己“懂”了量子力学的人,反倒可以说是一种真正的不懂。对此,看看某些超级大科学家(比如费曼)的态度,就很显然了。再者,即使那种初步的“懂”,如果离开了精确的数学的表述,也几乎是

不大可能的。尽管有人说科普书里多一个数学公式，就会吓走一半读者，而此书中还是使用了不少数学，但这与那种严格的对量子力学的表达，总还是有所不同的。更何况说“懂”量子力学，意味着在那些数学表述的背后，要对诸多非常哲学性的问题，包括很多很根本性的哲学性问题的理解。因此，我始终觉得，要面向公众真正地“普及”量子力学，让公众真的搞“懂”量子力学，那几乎是不可能的事，在这种意义上，量子力学是不可普及，不可言说的。

其二，此书是一本“史话”，这又给叙述增加了新的难度，即历史的问题。叙述一门学科的知识，通常有两种方法，一种是历史的方法，即按照该学科的历史发展过程来叙述，另一种则是逻辑的方法，即不是按照历史发展的顺序，而是按照事后的理解进行一种更为合理的逻辑重构。就前一种叙述方式来说，故然有生动、具体的优势，但也因历史的发展并不一定是一种最适于事后在短时间内获得最佳理解的结构，因而给对学科内容的理解增加了难度。而且，如果按照历史学或者说科学史的专业要求来说，相对严格标准的历史叙述又是要求叙述者有一定的历史训练才行。但是，从这本量子史话的内容来看，作者似乎还不是专门从事科学史研究的人士。

那么，在以上两个问题或者说困难存在的前提下，这本量子史话还有什么意义吗？

我以为还是有的，对之，我们可以给出相应的辩护。

其一，是对于科学普及或者说公众理解科学的理解。过去，我们通常把成功的科普的目标设想为是要让公众尽可能准确、全面、系统地了解 and 把握普及者所讲述的科学知识。但是，通过科普的方式，这样的目标似乎从来没有真正地达到过，因为科普毕竟不等于专业化的对科学的教学。反过来讲，如果我们把上述目标修改一下，不是一定要被普及者那么严格系统准确地理解所要普及的学科的科学知识，而是在阅读的过程中，获得一种科学的感觉，或者就像此书作者在后记中所讲的，让读者得到一点感染和启示，这样的话，同样可以增加读者的科学意识，体验科学的感觉，培养科学的思维，学习科学的文化。在这样的目标下，如果读者能够读进去，哪怕理解得并不十分全面、准确、系统，也仍然是非常有意义的学习过程。尤其是对于像量子力学这样特殊的学科领域，就更是如此了。

其二,作者用的标题是“史话”,这也似乎就像我们平常在各种电视剧中经常看到“戏说”一类的标题。这样的标题,并不标榜自己是那种学院式的标准历史,而只是在形式上采用了一种历史的叙述方式。以这本史话为例,虽然作者参考了大量的历史著作,并且在大的框架和线索上基本上是准确的,但在那些具体的“情节”中,显然有诸多出自作者的“历史想像”之处的细节。但如果我们并不将它作为严格的历史,而是作为以大致严格的历史框架进行的一种普及性叙述,而且有助于增加读者直观、形象的理解,有助于吸引读者,那么,在科普读物中,这样的做法当然也还是可以接受的。

做完辩护之后,我们还可以讲讲这本书的其他优点。在不甚完备的总结下,我大致可以想到如下几点,一是语言风格的独特。具体说,就是作者尽量采用了相对时尚的网络语言叙述的方式,而这对于今天的广大青年读者来说,显然是一种比较熟悉、比较有吸引力的叙述方式。此书的内容非常丰富,将与量子力学直接相关及大量间接相关的知识问题尽可能地详细讲述,读者如果不想追求百分之百的把握的话,完全可以在其中选择自己感兴趣的那些内容进行阅读。此书在逻辑结构上也比较合理,问题和线索都比较清楚,而且采用“饭后闲话”的形式,巧妙地将那些与主线距离稍远或相对零散然而又很重要的内容,放在这条副线中叙述。最后,我们可以说,尽管参考了许多的文献资料的说法,书中大部分内容与其他一些介绍量子力学知识和历史的专业性、半普及性和普及性著作中的内容相接近,但其中还是经常可以看到属于作者自己的思考和表述,像一些形象的比喻,一些议论分析,特别是一些带有哲学意味的思考等。而且,从内容上讲,此书在内容上具有一种完整性,从史前阶段一直讲到量子力学的前沿研究的许多问题,这当然也是它的一大特点或者说优点。

其实,说了这许多,也不过是个人的一些感觉和分析。此书是否能够取得成功,还要靠广大读者的最终检验,也就是说,要看它在广大读者的反应如何,看它是否能够吸引读者,是否能让读者在阅读中有所收获,不论是那种即时的,还是更长远的收获。不过,从我阅读此书的感觉来说,我相信它肯定能吸引许多对量子物理有兴趣的读者的。

要想让那些对量子物理不感兴趣的读者阅读此书,恐怕会有一定难度,或者,通过喜欢它的人(可以是因为任何理由,如语言风趣、比喻生动

等)的介绍推荐,或者是由于其他一些偶然的机遇。但是,倘这样的读者在读完此书后真的对量子物理学及其相关问题产生了兴趣,倘那些本来就对量子物理感兴趣的读者在阅读后会引发自己的新思考,那么此书就应该说是成功地达到了可达到的目标了。

要知道,一部关于量子物理学的普及读物要想达到这样的目标可并不是一件容易的事!

刘兵

2005年8月8日

于北京清华大学荷清苑

序二

激动人心的量子史话



曹天元这部很特别的量子物理学史话,网络版 2004 年完成,普通纸质版 2005 年面世,可谓献给国际物理年不可多得的礼物。它比起各地许多纪念性的仪式化(或者叫巫术式)的表演,要实在得多。它能从网络上走下来,以纸质出版,也是件可喜可贺的事件。

量子力学从创立到现在已经一个世纪了,我们至今生活在这个伟大理论的“阴影”中,即全球科学家并没有真正超越它,而且现在也看不出有实质突破的迹象。我们生活在量子时代,量子力学的应用无处不在。但这并不意味着大家都真正理解了量子力学理论,极端的说法是量子力学压根儿是不可理解的。关于量子力学的哲学诠释,早已经五花八门(有严肃的、不严肃的、甚至伪学术、超心理学的诠释);通常人们会用它来做计算,但不知道为什么。“从常识的观点来看,量子电动力学描述自然的理论是荒唐的。但它与实验非常符合。”(费曼,《QED:光和物质的奇异性理论》,商务印书馆 1994 年,第 9 页。)

这部史话是一部来自网络但功夫在网外的高端科普读物。我稍解释一下这句话。

网络写作最近几年开始热闹起来,但涉及自然科学的并不多,而涉及科学写得好又看得懂的就更少了。此作品以网络文本的形式呈现出来,但并不简单地意味着作者可以如普通网民一般即兴写作,作者显然有很好的物理学背景,同时阅读了近几十年出版的大量学术著作,也包括科学题材的剧作。于是,“功夫在网外”。相对于如今网上大量的娱乐性、文艺性写作而言,此作品无疑属于“例外”。我真心盼望这样的“例外”

多起来，“例外”多了，也就成了“常规”。作者把量子力学发展史写得十分形象、生动，“故事”讲得很好，这无疑降低了读者接触此艰深话题的门槛，不过此书的读者仍然需要具有一定文化程度，最好学过大学普通物理。因此，我说它是“高端科普”。科普或者科学传播需要多层次同时运作，写一本让“地球人都读得懂”的科普书，根本就是欺骗或者广告语。多数科普作家也不必照顾全体地球人，只需要考虑一定的“区间”，使此区间的民众（有些是专业学者）受益就行。现代科学某种程度上确实天然“自绝于人民”，不容易传播，本书讨论的主题恰好是一个典型。因此，别指望人人都喜欢量子力学或者其历史并且能够读懂它，但是，即使有意收缩读者范围，潜在的读者仍然是极大量的。我相信，相当多的理工科大学学生读了此书后，会加深对量子力学以及整个自然科学的理解。从这个意义上说，此书功德无量。

我并不认识作者，从其网名“字面上”看，CAPO指“双子座”的两颗星，作者是一人还是两人？也许名字中还隐含着更多的信息。不过，这种从字面上看的思维方式是过时的。本书作者所持有的哲学观念已经超越了素朴实在论，这一点我是赞赏的。某物“本来的颜色”确实是子虚乌有，只是人们在常识意义上习惯于那样称谓。在微观世界，物质呈现波粒二象性，传统上人们说某某既是粒子又是波，其实更好的说法也许是某某既不是粒子也不是波。“波”或“粒子”，都是人们在宏观层次人造的概念工具。多多少少从“工具主义”的角度理解科学术语和科学理论，可以帮助人们克服常识、本质主义、实在论等等长期带给我们的偏见。从工具主义角度，可以很好解释量子力学波动理论与矩阵力学两种同时可行理论的存在性，以及科学史上关于“光”本性的长期争论。面对实在、物理现象、实验数据，科学家的选择原则上是无限的，当考虑了各种各样的约束后，排除了显然的不可能情况，科学家建构出不同理论的可能性仍然是存在的（由此可以更好地理解科学家的创造性）。在科学哲学上，证据对于理论选择的非充分性，被称作亚决定性（underdetermination），这是由著名科学史家迪昂（P.Duhem）首先充分阐述的。科学在任何发展阶段，都存在此种亚决定性。从这种科学哲学观点看，量子力学也只是对现实世界的一种可能的理论罢了，甚至不能说是最好的（因为没有比较），除此之外总还可以设想其他同样有效的理论。科学家在创造的过程中，在方法论意义上确实可以奉行“怎么都行”（参见费耶阿本德的科学哲学），但理

论成果必须面对实验检验,同行专家对于结果的认可,当然不是“怎么都行”。

无论如何,量子史话是激动人心的,其中有无数扣人心弦的智力角逐,也有人性多样性的充分展现。

我注意到此书网络版“后记”中曾有这样一句结尾:“把这篇文章送给那个女孩,以回赠她曾经送给我的那些可爱笑容。”可惜,现在的纸质版为了减少网络写作的痕迹,删掉这一句。我希望纸质版的出版,会引起更多女孩喜欢物理学、喜欢自然科学,给作者以更多的“笑容”,以喜欢鼓励作者或者其他入写出更多更好的作品。

书中有两处提到彭罗斯(R.Penrose)的 The Emperor's New Mind,沿用了湖南科技出版社中译本的名字“皇帝的新脑”,似乎应当重新译作《皇帝的新智》或者《皇帝的新意》(据北京大学力学系朱照宣教授),因为 Mind 与 Brain 所指不同。另外,对物理学任何普及性的描述,照顾了一些方面,另一些方面可能就会受损失,比如为了突出故事性、可读性,书中对科学史上一些著名实验之“判决性”意义,叙述得过于简单化。实际上,科学家对实验有不同的解读,在科学共同体内达成一致需要相当长的时间,所谓干净利落的戏剧性效果多半是事后整理时建构的。

刘华杰

2005年7月20日

于北京大学科学传播中心,北京大学哲学系

自序



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,并最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,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仍然深深地影响和困扰着我们至今,就像两颗青涩的橄榄,嚼得越久,反而更加回味无穷。

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,误入白云深处不知归路……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。但量子论究竟带给了我们什么?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。它的观念是如此的革命,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，以致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，那他就是没有理解量子论。”

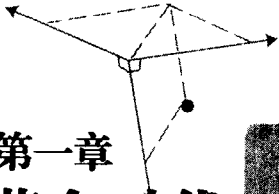
掐指算来，量子概念的诞生已经超过整整 100 年，但不可思议的是，它的一些基本思想却至今不为普通的大众所熟知。那么，就让我们再次回到那个伟大的年代，去回顾一下那场史诗般壮丽的革命吧。我们将沿着量子论当年走过的道路展开这次探险，我们将和 20 世纪最伟大的物理天才们同行，去亲身体验一下他们当年曾经历过的那些困惑、激动、恐惧、狂喜和震惊。这将注定是一次奇妙的旅程，我们将穿越幽深的森林和广袤的沙漠，飞越迷雾重重的峡谷和惊涛骇浪的狂潮。你也许会感到眩晕，可是请千万跟紧我的步伐，不要随意观光而掉队，否则很有可能陷入沼泽中无法自拔，请记住我的警告。

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。



Contents

- 序 一 努力言说不可言说之事 / 1
- 序 二 激动人心的量子史话 / 5
- 自 序 / 8
- 第一章 黄金时代 / 1
- 第二章 乌云 / 27
- 第三章 火流星 / 52
- 第四章 白云深处 / 77
- 第五章 曙光 / 102
- 第六章 殊途同归 / 128
- 第七章 不确定性 / 153
- 第八章 决战 / 181
- 第九章 歧途 / 209
- 第十章 回归经典 / 241
- 第十一章 不等式的判决 / 270
- 第十二章 新探险 / 296
- 尾 声 / 331
- 外一篇 海森堡和德国原子弹计划 / 334
- 后 记 / 350
- 参考文献 / 352
- 人名索引 / 359

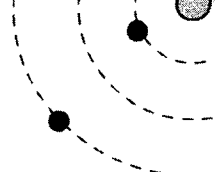


第一章
黄金时代 **1**

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 16 年前, 雄图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中学课本中震撼人心的《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。

现在, 海因里希·鲁道夫·赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz) 就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赫耳姆霍兹 (Hermann von Helmholtz) 一样鼎鼎有名的人物, 不会想到他将和汽车大王卡尔·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的那套装置上。

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,在心里面想像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,因为每一次的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,心里面想像了一幅又一幅的图景。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,很难想像它是错误的。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,在开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，接受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。铜环接受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。

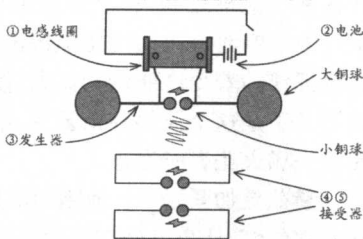
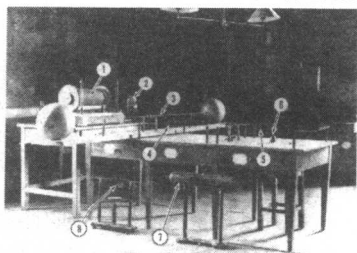


图 1.1 赫兹的装置简图

良久良久，终于赫兹揉了揉眼睛，直起腰来：现在一切都清楚了，电磁波真真实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提出悬赏的问题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。

赫兹小心地把接受器移到不同的位置，电磁波的表现和理论预测的分毫不差。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 万公里 / 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某一个范围内，而能够为我们的眼睛所感觉到罢了。

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

1 不过显然赫兹没有领到奖金。由于无人挑战，这个悬赏于 1882 年就失效了。