

physidea的个人博客

<http://blog.sciencenet.cn/u/physidea> [复制]

科学思想

博客首页 动态 微博 博文 相册 主题 分享 好友 留言板

博文

发表新博文

物理学的黄金年代——十九世纪末二十世纪初物理学的发展

已有 1515 次阅读 2019-7-11 08:44 | 系统分类:科普集锦 | 物理学, 物理学史, 旧量子论, 相对论, 爱因斯坦 推荐到群组 屏蔽

写在前边

本文是中国科学技术大学2019年春季学期龚明老师的物理学思想史课程论文。文中的图片，若未加说明，均引用自维基百科相关词条。

之前在知乎看见学长 @尼莫 的物理学史拾遗的文章，深有感触，加之我本身也对这段时期的历史比较感兴趣，正好又趁此机会，于是便有了您现在看见的这篇论文。限于作者水平，文中的错误与纰漏在所难免，如果您能将阅读中发现的错误发至eclipse@mail.ustc.edu.cn，我将无比感激。感谢各位的阅读。

十九世纪末二十世纪初物理学的发展

栗悟飯とカメハメ波

中国科大，物理学院

摘要

1999年，美国著名杂志《Time》整理并发表了20世纪的100位重要人物，爱因斯坦¹作为20世纪最杰出的科学家当选20世纪风云人物。20世纪是以科学为主导的世纪，是物理学的“黄金年代”。作为二十世纪的开端，十九二十世纪的世纪之交是一个神奇的时期。在这段时间，从经典力学到旧量子论再到量子力学，从牛顿体系到麦克斯韦²方程组再到相对论，在遮天蔽日的“乌云”下，无数物理学家用他们的智慧去探索真相，新思想、新事物不断涌现，物理学也在蓬勃发展。现在就让我们回到那个无数思想交织碰撞的年代。

一 两朵乌云

在十九世纪末，分析力学和经典电动力学已经发展地相当完善，能量的概念深入人心，麦克斯韦也已经写出了他那个著名的方程组。此时，物理学的前景看似一片光明。“物理学没有什么新的可以发现的事物了；所有剩下的只是更多和更精确的测量”³。“.....似乎可以说，物理学宏大的基本原则已经牢固确立.....未来物理科学的真理应当从六位小数中寻找”⁴。

然而，正如我们都知道的，二十世纪初，物理学的天空出现了两朵乌云。开尔文⁵在1900年4月27日在英国皇家学会上发表的演讲中说到：“动力学理论断言热和光都是运动的方式，现



龚明

装扮博客 查看留言
编辑头像 更新资料

扫一扫，分享此博文



作者的其他最新博文 全部

- 欧几里得 <原本> 到底讲了什
- 数学危机与数学的发展
- 《自然辩证法》与哲学视角下
- 宇宙，有穷还是无穷
- 牛顿在《光学》中超常的物理

精选博文导读 全部

- 新研究：湿度增加不一定会...
- 公主号邮轮新冠病毒感染与空调...
- 一流英文期刊创办经验和步...
- 科普自媒体联合抗疫倡议书
- 想写好SCI论文——不掌握这...
- 岩石磁学演绎 第16章 MD颖...

在这种理论的优美性和明晰性被两朵乌云遮蔽得黯然失色了。第一朵乌云是随着光的波动论而开始出现的。菲涅耳和托马斯·杨研究过这个理论，它包括这样一个问题：地球如何能够通过本质上是光以太这样的弹性固体运动呢？第二朵乌云是麦克斯韦-玻耳兹曼关于能量均分的学说。”⁶

第一朵乌云是迈克耳孙-莫雷实验。当时人们认为光的传播也需要介质，这种绝对静止的介质被称为以太⁷。迈克耳孙⁸和莫雷⁹利用迈克耳孙干涉仪测量以太风的速度，实验进行了很多年，重复进行了很多次，得到的以太风的速度都是0。

第二朵乌云是紫外灾难。瑞利¹⁰和金斯¹¹用经典热力学推导出的黑体辐射公式在紫外区发散了，也就是说经典热力学得到的结果出了问题。正如开尔文指出的，能均分定理可能有错误。

二 普朗克和黑体辐射公式

乔利教授建议普朗克¹²不要进入物理学领域，“在这个领域，几乎所有东西都已经被发现，剩下的就是填补一些漏洞”。普朗克回答说，他不想发现新事物，只是为了理解该领域的已有的基础知识。

抱着理解基础知识的想法，普朗克1877年去了柏林的弗里德里希威廉大学，与物理学家亥姆霍兹、基尔霍夫以及数学家魏尔斯特拉斯一起学习了一年。他写道，“亥姆霍兹从来没有做好充分的准备，说话缓慢，无休止地计算错误，无聊的听众，而基尔霍夫在精心准备的讲座中讲话，这些讲座干涩而单调”。通过自学克劳修斯的讲义，普朗克发现了自己对热力学的兴趣，并取得了博士学位，其博士论文即为《热力学第二定律》。热力学第二定律就是：能量不可能自发地从低温物体转移到高温物体上，或者说，体系的熵永不减少。



图 1 年轻时的普朗克，1878



图 2 普朗克的博士论文（图片来自论文的电子版）

在那时，对热力学第二定律的解释的讨论成为一大热潮。主流的观点即为第二类永动机，从海水中汲取热量并对外做功。这种机器并不违反能量守恒定律，但是违反热力学第二定律。同时还有两种新颖的声音：其一是玻耳兹曼¹³分子动力学解释，体系的熵是分子运动的共同作用结果，热力学第二定律只在统计上成立；另一个就是奥斯特瓦尔德¹⁴提出的“唯能论”，主张一切都是能量和连续物质。最开始，包括马赫¹⁵在内，几乎所有人都站在奥斯特瓦尔德这边，

普朗克也不例外。普朗克厌恶统计力学的所有观点，“虽然玻尔兹曼的分子派曾经辉煌，但是连续物质的理论才会天长地久的”。



图 3 玻尔兹曼



图 4 奥斯特瓦尔德 (Nicola Perscheid摄)

热力学第二定律说的体系没有时间反演性，但是牛顿第二定律 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 明显时间反演不变。于是普朗克将研究方向转向了麦克斯韦方程组，企图证明其没有反演不变性。可是很快玻尔兹曼就向普朗克头上泼了一大桶冷水。1897年，仿佛命运要捉弄普朗克一般，玻尔兹曼发表论文，证明了麦克斯韦方程组同样是时间反演不变的。这篇论文无疑让普朗克非常郁闷。这时，落魄的普朗克将研究重心放到了黑体辐射上。所谓黑体，就是一个可以吸收所有入射辐射的理想物体，物理学家借此研究热辐射。

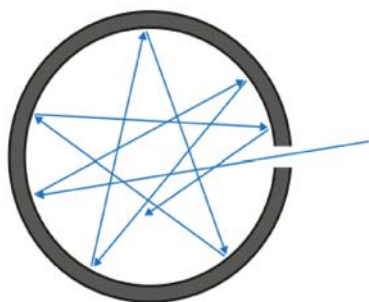


图 5 一个绝热外壳上的小孔是黑体的一个合理近似

瑞利在1900年基于实验事实通过经典物理给出了频率 ν 和辐射功率的依赖关系 $u = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$ ，称为瑞利-金斯公式¹⁶。瑞利-金斯公式在长波段和实验符合的很好，但是这个公式揭示了经典物理学的一个重大错误：波长趋于零时辐射趋于无穷。这显然是错的，因为你每次打开微波炉的时候并没有遭受无限量电磁辐射的轰炸。瑞利-金斯公式在紫外区发散这一现象被称为“紫外灾难”。

在此之前，维恩¹⁷于1896年推导出维恩定律 $u = \frac{a\nu^3}{e^{\frac{b}{\nu T}}}$ ，这是一个两参数半经验公式¹⁸。与瑞利-金斯公式相反的是，维恩定律准确地描述了辐射的高频谱，但是在低频区与实验数据拟合地不好。

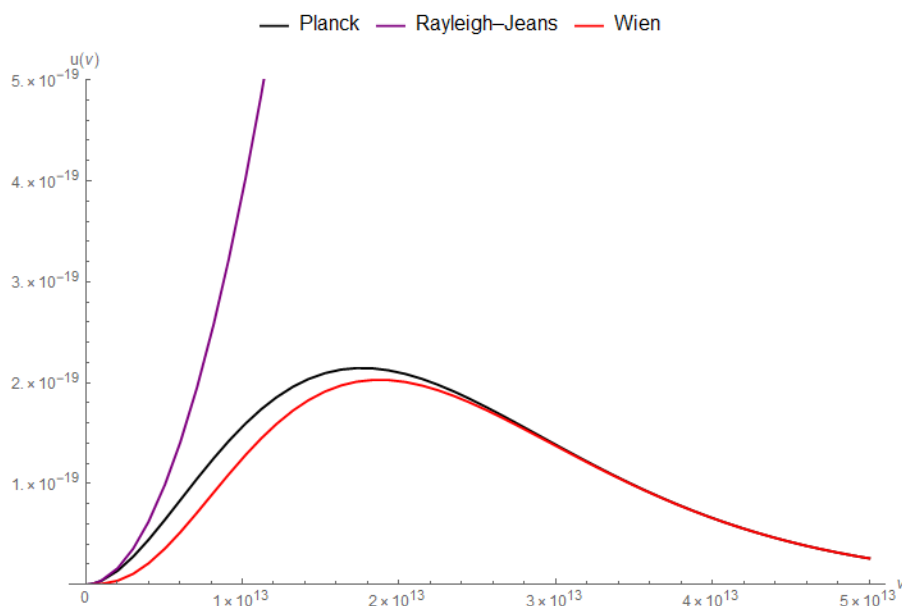


图 6 紫外灾难（使用Mathematica绘制， $T = 300K$ ）

普朗克于1896年开始对热辐射进行系统的研究.当他看到了维恩定律和瑞利-金斯公式时，他便知道自己该怎么做了：新公式应该在低频极限趋于瑞利-金斯公式，在高频极限趋于维恩定律，只需要用插值法把这两个公式“缝合”起来就行了；为此只需要一些数学上的操作。事实上，普朗克从知道自己该怎么做，到得到他的黑体辐射公式，仅仅用了几天的时间。经过一番推导之后，普朗克得到了他的黑体辐射公式：

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

普朗克的黑体辐射公式在全波段都与实验数据符合地如此之好，让人难以相信这只是一个“猜”出来的公式。经典热力学反映了普朗克黑体辐射公式中的一小方面，比如斯特藩-玻尔兹曼定律、维恩位移定律等等均可以由普朗克的黑体辐射公式推出。但是黑体辐射公式中蕴藏着更加重要的物理，那就是能量量子化。普朗克得到黑体辐射公式之后，花了很久才从中悟出能量量子化的原理。

1900年12月14日，普朗克递交给德国物理学会一份对黑体辐射公式崭新的推导。在这部划时代的巨作《论正常光谱中的能量分布》中，普朗克将第一部分献给了玻尔兹曼的理论，这次普朗克把能量量子化作为推导的中心假设，即能量只能是能量子的整数倍： $U = P\epsilon$ ， $\epsilon = h\nu$ ，利用能量和熵完整导出了黑体辐射公式。

三 关于玻尔兹曼

早在1877年，玻尔兹曼就在他的一篇论文里讨论了系统能量取离散值的可能性，并基于此讨论自己所研究的理论问题¹⁹。时至今日，我们依然不得不佩服玻尔兹曼的物理直觉。普朗克最终还是选择了玻尔兹曼的分子派，并且在他的论文中首次给出了玻尔兹曼常数 k 的精确的值²⁰，并建议将其命名为玻尔兹曼常数，以表达对玻尔兹曼最崇高的敬意。

玻尔兹曼与奥斯特瓦尔德之间发生的“分子论”和“唯能论”的争论，在科学史上非常著名。“这两种主张的斗争最后会闹出人命的”，按照普朗克的话来说，“这两个死对头都同样机智，应答如流；彼此都很有才气”。当时，奥斯特瓦尔德的“后台”是不承认有原子存在的马赫。由于马赫在科学界的巨大影响，当时有许多著名的科学家也拒绝承认“原子”的实在性。后来普朗克站在玻尔兹曼一边，但普朗克的观点与玻尔兹曼的观点还是有所区别。普朗克对玻尔兹曼珍爱的原子论并没有多少热情，这让玻尔兹曼尤为恼火。到了晚年，当普朗克向他报告自己以原子论为基础来推导黑体辐射定律时，他才转怒为喜。

在与“唯能论”论战的十年里，玻尔兹曼一直在与自己的对手斗争，同时也是在与自己斗争。正如爱因斯坦评价的，“他明白自己有着那个时代最睿智的头脑，这也是他自负的资本，但是他的自卑也是明显的——一旦有很多人站在他的对立面，他就会惴惴不安，反复的思考自己是否有这样或那样的错误，如此惊人的自负与自卑竟然会集中在同一个人身上，这是令人难以置信的”。爱因斯坦在他的“奇迹年”1905年发表了论文《分子大小的新测定法》，提出通过观察由分子运动的涨落现象所产生的悬浮粒子的不规则运动来测定分子的大小，以解决半个多世纪来科学界和哲学界争论不休的原子实在性的问题。三年后，法国物理学家佩兰以精密的实验证实了爱因斯坦的理论预测²¹，从而无可非议的证明了原子和分子的客观存在，这使奥斯特瓦尔德于1908年主动宣布：“原子假说已经成为一种基础巩固的科学理论。”尽管玻尔兹曼的“原子论”与奥斯特瓦尔德的“唯能论”之间的论战，最终玻尔兹曼获胜，但玻尔兹曼还是由于不断恶化的精神状态于1906年自杀。玻尔兹曼墓碑上刻着他的熵公式 $S = k \log W$ ，值得一提的是，这种简洁的形式也是普朗克提出的。

四 埃伦菲斯特和绝热不变量

玻尔兹曼去世后，他的学生，埃伦菲斯特²²广发讣告叙述玻尔兹曼的造诣，并撰文回顾玻尔兹曼及其学派的工作。同时，埃伦菲斯特也开始思考自己的老师也没解决的问题——热力学定律力学化。他首先考虑了如下简单的模型：



图 7 埃伦菲斯特

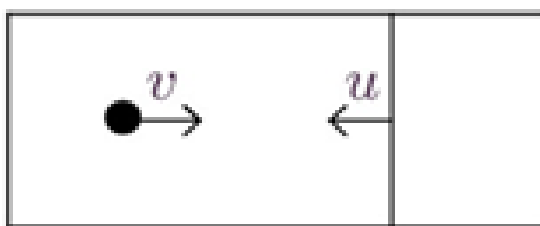


图 8 粒子做一维往返运动（使用TeXmacs绘制）

如图8，一个粒子做一维往返运动，右边的活塞的速度为一常数 u ，任一时刻，粒子的速度 $v \gg u$ 。记活塞到左边容器壁的距离为 L ，则 v 和 L 满足什么关系？

$$\text{粒子碰撞活塞后的速度增量} \Delta v = (v + 2u) - v = 2u$$

$$\text{考虑到} v \gg u, \text{粒子往返一次需要的时间} \Delta t = \frac{2L}{v}$$

在此过程中 $\Delta L = -u\Delta t = -\frac{2Lu}{v}$

于是 $\frac{dv}{dt} = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta L} = -\frac{v}{L}$

所以 $vL = \text{Const.}$

这个结果就很有趣了，因为上边这个不变量乘上粒子质量 m 就成为一角动量量纲的量，但是这明显不是角动量。另一个广为人所知的例子是缓变磁场中粒子的磁矩，若认为粒子的荷质比为一常数，则磁矩除以荷质比依然是一角动量量纲的量，它依然是一个守恒量。经过几年不懈的努力，埃伦菲斯特终于找到了他的绝热不变量：

$$I = \frac{1}{2\pi} \oint pdq$$

1911年，在埃伦菲斯特的文章发表之后仅仅几周，在比利时的布鲁塞尔召开了第一次索尔威会议，会议由洛伦兹²³主持。他在会上提出一个简单而重要的问题：设想一个摆在某个特殊的量子态上振荡，如果将摆线缩短一点，量子化的状态将发生什么事？会议最年青的参加者爱因斯坦毫不犹豫地立即回答：如果摆长改变得无限缓慢，其能量仍保持 $h\nu$ 。爱因斯坦那时已读过埃伦菲斯特的文章，并熟悉瑞利对相应经典问题的处理。事实上，振幅 A 和绳长 L 满足 $\frac{A^4}{L} = \text{Const.}$

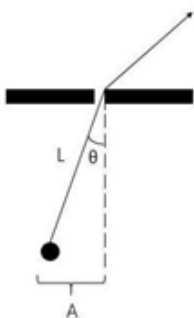


图 9 洛伦兹问爱因斯坦的问题（图片来自网络）

五 绝热不变量和玻尔的氢原子模型

1909-1911年，卢瑟福²⁴做了 α 粒子轰击金箔实验，实验的现象令人惊讶：绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，少数粒子却发生了较大的偏转，并且有极少数粒子偏转角超过了90度，有的甚至被弹回，偏转角几乎达到180度。卢瑟福曾说过，这是他一生中遇到的最令人惊讶的事件，“它几乎就像发射出一发 15 英寸的炮弹，打在一块薄纸上，又被弹回来打中了一样”。为了解释这个实验现象，卢瑟福提出了他的原子核式结构模型，即原子中的正电荷以及几乎全部的质量都集中在原子中心很小的区域($r < 10^{-14}m$)形成原子核，而电子则围绕原子核旋转。该模型取得了巨大成功。但是核式模型明显和电动力学存在矛盾。按照电动力学，绕原子核运动的电子会一直辐射损失能量，经过 $1.3 \times 10^{-11}s$ 后就会和原子核相撞。但是自然界中的原子都是稳定存在的。

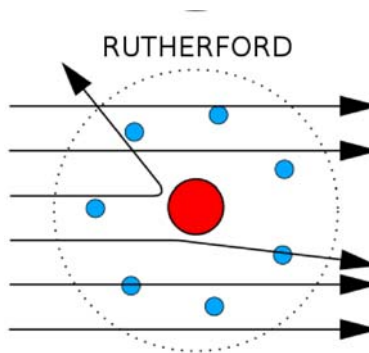


图 10 卢瑟福的原子核式结构模型



图 11 年轻时的玻尔

1911年，玻尔²⁵赴英学习，当时世界上绝大部分关于原子分子结构的理论工作都在英国进行。一开始，玻尔在剑桥的卡文迪许实验室做了一些研究，在此期间，玻尔结识了卢瑟福。几个月后，应卢瑟福邀请，玻尔前往曼彻斯特维多利亚大学进行他的博士后工作。1913年，玻尔任哥本哈根大学物理学讲师，在朋友的建议下，玻尔开始研究原子结构。为了解释实验事实，在取得巨大成功的卢瑟福原子核式模型和经典电动力学之间，玻尔选择了核式模型。

在1913年玻尔最初分三次发表的论文《论原子构造和分子结构》中，第一部题为“正核对电子的束缚”，在其中，玻尔创造性地将核式模型与普朗克的量子理论结合起来，提出了自己的氢原子模型。玻尔的氢原子模型基于以下假设：

1. 定态假设：原子能够且只能存在于一系列由能量 $E(n)$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) 标记的状态中，这些状态称为定态。体系在定态中的动力学平衡可以用经典力学描述，但是在不同定态之间的跃迁不能。
2. 辐射条件：原子能量的任何变化，包括吸收和发射电磁辐射，都只能在两个定态之间以跃迁的方式进行。辐射的电磁波的频率 ν 满足 $h\nu_{mn} = |E(m) - E(n)|$ 。
3. 角动量子化条件：电子的角动量 M 满足量子化条件 $M = n \frac{h}{2\pi}$ ，系统的“持久态”对应 $M_0 = \frac{h}{2\pi}$ ，且 $n \rightarrow \infty$ 时氢原子的状态可以用经典物理描述。

利用玻尔氢原子模型，我们可以立即得到氢原子的能量

$$E(n) = - \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m_e}{2\hbar^2 n^2}$$

这个结果完全可以解释当时的经验公式——巴尔末公式。这是当时世界上最精确的氢原子模型。

但是先等一等，难道角动量子化不是很眼熟么？

我们回过头去看埃伦菲斯特的绝热不变量 $I = \frac{1}{2\pi} \oint p dq$ ，把它对电子轨道积分，直接就能得到角动量子化条件！

当时，埃伦菲斯特已经在莱顿大学就职，距哥本哈根很近，埃伦菲斯特和玻尔特别亲密。玻尔在1919年第一次访问莱顿后，在给埃伦菲斯特的信中，他这样写道：“我坐在这里，想着你告诉我的一切，我感觉无论怎样思考都会想到许多从你那学到的对我很重要的事情；同时，我急切地向表达我对你的友谊的喜悦和对你展现给我的自信和同情心的感激，我找不到适

合的词去形容它。”在量子力学建立之前，绝热不变量几乎是唯一一个可以计算的量子力学量。不可否认，绝热不变量确实推动了旧量子论的发展，它不仅推动了玻尔氢原子模型的建立，之后的索末菲²⁶氢原子模型更是将绝热不变量用到了极致。

至此旧量子论基本建立完善。所谓旧量子论，其实是对经典力学的一套有启发性的修正，而它的基本原则，正是绝热不变量。从普朗克的能量子，到玻尔和索末菲的氢原子模型，再到1924年德布罗意提出的物质波，尽管现在看来旧量子论只是量子力学的半经典近似，但是正是这套理论，直接导致了量子力学的诞生。

让我们回到1900年。此时，普朗克刚刚提出他的能量子假说，并完美地解释了黑体辐射。但是能量不连续这一思想实在是过于超前和震撼，人们一时间无法接受这个事实。

第一个取得成果的是爱因斯坦。1905年，爱因斯坦写成并发表了《关于光的产生和转化的一个试探性观点》，提出光量子假说，认为每一个光子都有的能量 $E = h\nu$ ，以解释光电效应现象并很快为密立根的实验所证实。能量子假说的成功使一大批物理学家将目光转向了量子论，量子革命就此开始。

六 爱因斯坦和相对论

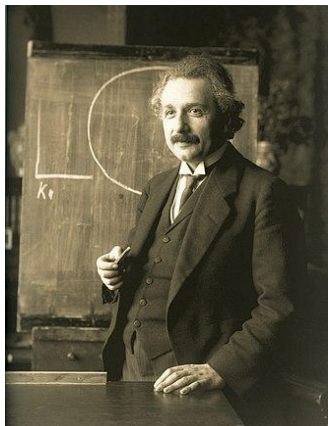


图 12 爱因斯坦，1921

1905年是爱因斯坦的奇迹年，这一年，他不仅发表了他的诺奖论文《关于光的产生和转化的一个试探性观点》，还发表了一篇改变时代的论文：《论动体的电动力学》。这篇论文宣告了狭义相对论的建立，以太那朵乌云自然也便消失不见。“你和一个漂亮姑娘在公园长椅上坐一个小时，你觉得只过了一分钟；你紧挨着一个火炉坐一分钟，却觉得过了一个小时，这就是相对论”，爱因斯坦常常这样向媒体和公众开玩笑。那么，相对论究竟是什么？

和现在大多数人一样，当时人们的时空观被称为绝对时空观。牛顿认为，宇宙存在一个绝对时间和绝对空间，它脱离于宇宙内部的物质和物质的运动，与宇宙内部的物质和物质的运动无关。空间，是均匀的、不动的，与任何外界状况无关；时间，均匀地流逝，与任何外界对象无关。“时间的陈述具有绝对的意义，亦即时间的陈述与参考物体的运动状态无关”，这就是绝对时空观，牛顿在此基础上发展了一套完整的力学体系。

按照绝对时空观，时间的流逝对于每个人都是相同的，于是可以得到经典的伽利略变换。如果一个人开着车，打开车灯，那么地上的人看车灯发出的光的速度是多少呢？如果按照伽利略的速度叠加原理，地面上的人看灯光的速度显然是光速加上汽车的速度，但是事实并非如此。现在我们都知，真空中的光速总是一个常数。

声音的传播需要介质，那光呢？当时人们认为，光在绝对静止介质“以太”中以恒定速度传播。但是，由麦克斯韦方程组推导出的光速并没有指定哪个特定的参考系。而且，地球穿过以太运动时，迈克尔孙和莫雷并没有得到他们预期的干涉条纹。这些证据似乎都表明了以太并不存在。事实上，牛顿在两百年前就已经表达了对以太的否认态度：“既然它（以太）毫无作用，只能妨碍自然界的运动，并使之衰退下来，那么它的存在是没有根据的，因而它该被抛弃。”

相对论虽然变革的是人们的时空观，但是其产生背景却是电动力学。当电动力学运用在物体上时，会出现一些不对称，而这些不对称性并不是现象固有的。例如，一块磁铁和一块导体之间的电磁力作用。可观察的现象应该只与磁铁和导体之间的相对运动有关。如果是导体静止，磁铁运动，变化的磁场就会在磁铁附近激发一个有一定能量的电场，导体的某些地方就会产生电流。反之，如果是磁铁静止，导体运动，那么在磁铁的附近就不会有电场，但是由于切割磁感线导体会有一个电动势，虽然这个电动势不对应任何能量，但是它会引起一个电流，这个电流和前一种情况中由电场力引起的电流一模一样。这两种情况的相对运动是相同的，但是之间有尖锐的矛盾。更重要的是，麦克斯韦方程组不适用于伽利略变换。

1904年，洛伦兹在他的论文《速度小于光速系统中的电磁现象》中，首次提出一种变换，使麦克斯韦方程组在此变换下不变，庞加莱²⁷建议将其命名为洛伦兹变换。有趣的是，洛伦兹主要作为一个理论物理学家，提出了许多数学表达式，而庞加莱主要作为一个数学家，却最先触摸到了相对论。早在1895年，庞加莱的论文就首次提到了相对性原理，“要证明物质的绝对运动，或者更确切地讲，要证明可测量物质相对于以太的运动是不可能的”。而相对性原理这个术语也是庞加莱于1904年9月首次使用。1898年，庞加莱还第一个讨论了光速对所有观察者都是常数的必要性。到1900年，庞加莱手中已经有了构建相对论所需的所有材料，在1904年圣路易斯会议的讲演中，他甚至惊人地预见了新力学的大致轮廓。

想要麦克斯韦方程组和相对性原理协调起来，洛伦兹等人在原有体系下的修补性工作均以失败告终。爱因斯坦说，“只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么任何想要令人满意地澄清这个悖论的尝试，都是注定要失败的。清楚地认识这条公理以及他的任意性，实际上就意味着问题的解决”。在突破了传统的时空观后，爱因斯坦仅用了五六周就一气呵成地写出了相对论的第一篇论文。

洛伦兹推导洛伦兹变换时，使用了多达11个特殊假设。而爱因斯坦的狭义相对论，仅仅基于两条公理：

1. 相对性原理：所有惯性系遵循同样的物理规律。
2. 光速不变原理：光在真空中总以速度传播。

这两条公理看起来似乎是平淡无奇的，但是它们能给出什么崭新的事物么？很快我们发现，同时性不再具有绝对的含义。

“同时”是相对论中一个很重要的概念。我们用钟来定义事件发生的时间：在A点放置的钟可以定义在A点附近发生的事件的“A时间”，同理，可以用放置在B点的完全相同的钟定义在

B 点附近发生的事件的“ B 时间”。但是，判断 A 、 B 两点发生的两个事件是否同时发生，首先应该对齐 A 、 B 两点的钟。若两个事件发生时两个对齐了的钟读数相同，这两个事件就是同时发生的。

庞加莱于1898年就讨论了用交换光信号的方法确定两地同时性的问题，爱因斯坦采用同样的方法对齐钟，即，在 A 时间 t_A 从 A 点发出一束光射向 B 点，光在 B 时间 t_B 到达 B 点并立即反射回 A ，在 A 时间 t'_A 回到点 A ，若 $t'_A - t_B = t_B - t_A$ ，我们称这两个钟是对齐了的。我们总是可以对齐地面上的所有静止的钟的，很符合常识。

利用光速不变和上面“对钟”的讨论，我们就可以开始讨论同时的相对性了。一个人认为对齐了的两个钟。在另一个人眼里，还是对齐的吗？

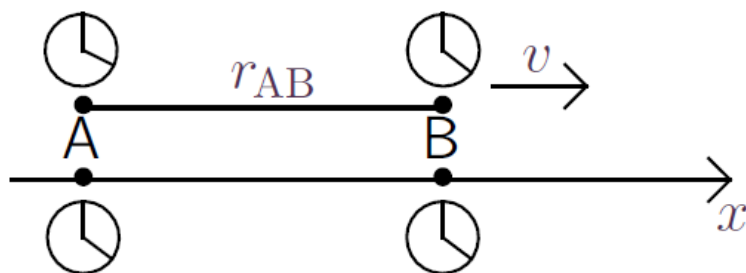


图 13 同时的相对性（使用TeXmacs绘制）

如图11，刚性杆 AB 以恒定速度向右运动， x 轴上摆放着一列在静止系中对齐了的钟。在动杆的两端（ A 和 B ）有两个钟，在任何时刻，让它们的读数都和它们正下方的钟的读数相同，因此这两个运动的钟肯定和静止的钟一样，在静系中是对齐了的。

问题是，如果在和处有两个跟随钟一起运动的观察者，在观察者眼里，和两个钟是否是对齐了呢？我们不妨用上面的方法来判断。

我们让一束光在 t_A 时刻从 A 点发出。 t_A 不仅是 A 点运动的钟的读数，也是 A 点正下方静止的钟的读数。 B 点在 t_B 时刻收到光信号并立即将其反射回 A ， A 点于时刻 t'_A 再次收到光信号。乍一看似乎两个钟的确是“对齐”的，我们不妨仔细算一算。因为光速不变，所以在随钟运动的观察者看来，光依然以速度 c 传播。又由于是点收到光信号时点正下方的钟的读数，而点发出光信号之后一直向前运动，所以 $t_B - t_A$ 并不等于 $\frac{r_{AB}}{c}$ ，而是 $\frac{r_{AB}}{c-v}$ 。同理， $t'_A - t_B$ 也不是 $\frac{r_{AB}}{c}$ ，而是 $\frac{r_{AB}}{c+v}$ 。在随钟运动的观察者的眼里， $t'_A - t_B \neq t_B - t_A$ ，也就是说地面上的钟并没有对齐！因此显而易见，我们不能给同时性以任何绝对的含义。

既然同时性都依赖于参考物的运动状态，你可能会想，距离是不是也是如此呢？如果我们舍弃时间和距离的绝对意义，相对论就呼之欲出了。事实上，通过要求物理规律在惯性系中不变以及光速不变（即相对论的两条公理），我们就可以解出唯一符合要求的时空变换——洛伦兹变换：

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

利用洛伦兹变换，我们可以推导很多东西，比如动尺变短、动钟变慢等等。但是说起相对论，最广为人知的还是质能方程。在发表《论动体的电动力学》同年，爱因斯坦发表了论文《物体的惯性和它所含的能量有关么？》，提出，“物体的质量是它所含能量的量度”，“如果一个物体以辐射形式放出能量 L ，那么它的质量就要减小 $\frac{L}{c^2}$ ”。这就是著名的质能方程 $E = mc^2$ 。

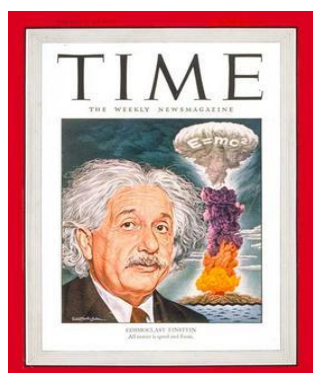


图 14 1946年七月《时代》杂志封面， 图15 世界上第一个核动力特混编队1964年6月18号在地中海列队，

爱因斯坦、质能方程与蘑菇云

其中企业号的船员在飞行甲板上拼出了质能方程 $E = mc^2$

在相对论出现之前，时间和空间是相互独立的。在相对论里，时间和空间交织在一起成为四维时空，所有的物理公式都有了简洁的数学形式。

相对论提出伊始是“阳春白雪”，自然是“曲高和寡”。最先支持和推广相对论的人是普朗克，他极大地推动了相对论的传播。狭义相对论完成后，爱因斯坦一鼓作气，完成了广义相对论（1915年），直到现在，对它的实验验证和以它为基础的研究依旧火热，展现出令人瞩目的前景。

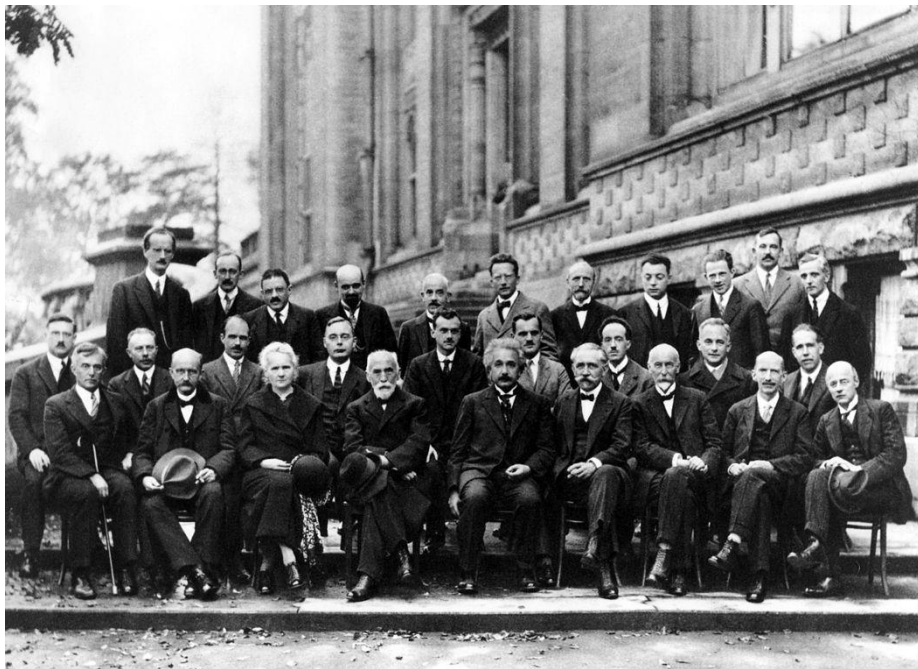


图 16 Fifth conference participants, 1927.

Institut International de Physique Solvay in Leopold Park.

图16是1927年十月第五届索尔维会议的与会者合影。这大概是物理学史上最出名的一场会议，在总共29个与会者中，有17人最终成为诺贝尔奖得主。在这场题为“电子与光子”的会议上，全球最著名的物理学家们会面，讨论新的量子理论。这里面的两个领军人物是爱因斯坦和玻尔，爱因斯坦抱着“上帝不掷骰子”的坚定信念²⁸，而玻尔回之以“我们没有责任规定上帝该如何管理这个世界”²⁹。他们的论战持续了数十年，当然，正如我们现在知道的，玻尔的哥本哈根学派取得了最后的胜利。

二十世纪初，量子力学和相对论一起，开启了物理学的黄金年代。两朵乌云悄然飘散，新思想如雨后天春笋一样涌出，物理学开始蓬勃发展。

脚注

¹ Albert Einstein(1879-1955)，犹太裔理论物理学家，1921年诺贝尔物理学奖得主。

² James Clerk Maxwell(1831-1879)，苏格兰物理学家，数学家。

³ 开尔文，1900. 引自对英国科学促进会的讲话。

⁴ 迈克耳孙，1894.

⁵ William Thomson, 1st Baron Kelvin(1824-1907)，英国数学物理学家和工程师。

⁶ “两朵乌云” 最原始出处来自1901年7月出版的《哲学杂志》和《科学杂志》合刊上，刊登的是开尔文于1900年4月27日在英国皇家学会上发表演讲的修订版，题为“在热和光动力理论上空十九世纪乌云”。

⁷ Aether.

- ⁸ Albert Abraham Michelson(1852-1931), 美国物理学家, 1907年诺贝尔物理学奖得主.
- ⁹ Edward Williams Morley(1838-1923), 美国科学家.
- ¹⁰ John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh(1842-1919), 英国科学家, 1904年诺贝尔物理学奖得主.
- ¹¹ Sir James Hopwood Jeans(1877-1946), 英国物理学家, 天文学家和数学家.
- ¹² Max Planck(1858-1947), 德国理论物理学家, 1918年诺贝尔物理学奖得主.
- ¹³ Ludwig Eduard Boltzmann(1844-1906).
- ¹⁴ Friedrich Wilhelm Ostwald(1853-1932), 1909年诺贝尔化学奖得主.
- ¹⁵ Ernst Mach(1838-1936), 奥地利物理学家, 哲学家.
- ¹⁶ 瑞利和金斯在1905年给出了一个更完整的推导.
- ¹⁷ Wilhelm Wien(1864-1928), 德国物理学家, 1911年诺贝尔物理学奖得主.
- ¹⁸ Wien, On the division of energy in the emission-spectrum of a black body. Philosophical Magazine. Series 5. 43 (262): 214–220 (1897).
- ¹⁹ L. Boltzmann, über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht, Kais. Akad. Wiss. Wien Math. Natumiss. Classe 76, 373 (1877).
- ²⁰ Planck, Max, über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, Ann. Phys., 309 (3): 553–63(1901).
- ²¹ 佩兰因此荣获1926年诺贝尔物理学奖.
- ²² Paul Ehrenfest(1880-1933), 奥地利理论物理学家.
- ²³ Hendrik Lorentz(1853-1928), 荷兰物理学家, 1902年诺贝尔物理学奖得主.
- ²⁴ Ernest Rutherford, 1st Baron Rutherford of Nelson(1871-1937), 新西兰物理学家, 1908年诺贝尔化学奖得主.
- ²⁵ Niels Bohr(1885-1962), 丹麦物理学家, 1922年诺贝尔物理学奖得主.
- ²⁶ Arnold Sommerfeld(1868-1951), 德国理论物理学家.
- ²⁷ Henri Poincaré(1854-1912), 法国数学家, 物理学家, 工程师, 哲学家.
- ²⁸ 1926年, 爱因斯坦在给波恩的信中写到: "I, at any rate, am convinced that He [God] does not throw dice."
- ²⁹ "Nor is it our business to prescribe to God how He should run the world".

参考文献

- [1]. "Lord Kelvin, Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light", reproduced in Notices of the Proceedings at the Meetings of the Members of the Royal Institution of Great Britain with Abstracts of the Discourses, Volume 16, 363–397.
- [2]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 6, volume 2, 1–40, 1901.

- [3]. Michelson, Albert A.; Morley, Edward W. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*. 34 (203): 333–345, 1887.
- [4]. Max Planck. über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Humboldt-Universität zu Berlin, 1879.
- [5]. Wien. On the division of energy in the emission-spectrum of a black body. *Philosophical Magazine*. Series 5. 43 (262): 214–220, 1897.
- [6]. Crepeau, J.. A Brief history of the T⁴ radiation law. 2009 ASME Summer Heat Transfer Conference, San Francisco, California, USA, 2009.
- [7]. Planck, M. über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik*. 309 (3): 553–563. 1901.
- [8]. L. Boltzmann. über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht, Kais. Akad. Wiss. Wien Math. Natumiss. Classe 76, 373, 1877.
- [9]. 李艳平, 申先甲. 物理学史教程. 北京: 科学出版社, 2003: 177.
- [10]. 爱因斯坦. 爱因斯坦文集. 北京: 商务印书馆, 2010: 第二卷, 41-130.
- [11]. Ehrenfest P. *Ann.Phys.*, 1911 36: 91.
- [12]. Rayleigh L. *Phil. Mag.*, 1902, 3: 338.
- [13]. Bohr, Niels. On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I. *Philosophical Magazine*. 26 (151): 1–24, 1913.
- [14]. 爱因斯坦. 狭义与广义相对论浅说. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [15]. 牛顿. 牛顿光学. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [16]. Lorentz, Hendrik. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 6: 809–831, 1904.
- [17]. Poincaré, Henri. The Measure of Time. *Revue de Métaphysique et de Morale*, 6: 1–13, 1898.
- [18]. Poincaré, Henri. *The Principles of Mathematical Physics. The Foundations of Science (The Value of Science)*, New York: Science Press, 297–320, 1913.
- [19]. Bohr N. Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. *The Value of Knowledge: A Miniature Library of Philosophy*. From Albert Einstein: Philosopher-Scientist (1949), publ. Cambridge University Press, 1949. Niels Bohr's report of conversations with Einstein.
- [20]. Werner Heisenberg, *Physics and Beyond* (1969), Ch. 6 : Flesh Fields.
- [21]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/33582726>.
- [22]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/33658858>.

Special thanks to: Wikipedia.

转载本文请联系原作者获取授权，同时请注明本文来自龚明科学网博客。
链接地址：<http://blog.sciencenet.cn/blog-3416262-1189003.html>

上一篇：笛卡尔之梦
下一篇：对古希腊时期的时空观的探究

修改 | 删除 | 分享 | 收藏

当前推荐数：**1** 推荐人：[李泳](#)

推荐到博客首页

评论 (**0** 条评论)

发表评论

1/0 | 总计:0 | 首页 | 上一页 | 跳转

[返回顶部](#)



剩余字数: 1000

评论