

视觉

琥珀

像物理学家一样思考和实验

物理基础理论与实验探究课程

www.alphacalculus.com

闪电

真空

前言

亲爱的同学们：

光是什么？是从光源发射出的、带着微光的小火球吗？要是真的是小火球，那它的运动速度就该是有限的——这么说来，光速就是有限的，对吗？可物理学家是怎么发现“光速有限”这个事实的？他们又用了什么方法测量出光速的呢？

如果光真的是小火球，那它理应沿着直线运动才对。可为什么影子的边缘总带着一丝模糊，仿佛阳光悄悄“弯”进了影子里？这背后藏着什么我们没注意到的规律？

当光线从空气钻进水里，会发生折射：入射角变大时，折射角也会跟着变大。那是不是说，入射角和折射角成正比例关系呢？由于阳光会悄悄“弯”进影子里，就像水波会“弯”进水坝后面一样。惠更斯认为光是一种波，并用波的理论一步步推导出光的折射定律了，你想知道他是怎么推导的吗？

还有颜色——它们真的是黑白两种颜色按不同比例混合出来的吗？

透过方解石看物体，会有两个图像，你知道为什么吗？你能不能像物理学家那样，从方解石里发现新的物理规律？不如跟着书里的内容，看看科学家是怎么用方解石做实验的。

用头发摩擦过的梳子会吸起头发，梳子一摩擦就变得像磁铁一样会吸引物体，可梳子能像磁铁一样吸引铁钉吗？梳子需要摩擦才能吸引小物体，磁铁却不需要摩擦，你不妨亲手试试，看看磁铁和摩擦过的梳子有什么区别，结果和你猜想的是不是一样，再来看看科学家是怎么分析和做实验的。

你想知道怎么用开普勒三定律测量地球到火星的距离吗？这个听起来很难的问题，其实藏着巧妙的逻辑。

奥斯特做实验时，一开始让小磁针垂直对着导线，后来又改成平行放置——他为什么要调整小磁针的方向，为什么一开始要垂直对着导线？

既然通电导线周围会产生磁场，能吸引小磁针，那反过来想：磁铁周围会不会产生电场，使小灯泡发光呢？如果你手里有一块磁铁，该怎么证明它周围有没有电场？是不是可以用首尾相接的导线圈把磁铁围起来，再在导线圈中串联一个小灯泡或者电流表——只要小灯泡发光或电流表的指针左右摆动，就能说明磁铁周围产生了电场，这个电场驱动导线里的电荷流动了，对吗？

我们身边真的有空无一物的真空吗？要是突然把两页书分开，中间会不会因为气体分子来不及填充，短暂出现一片真空？如果真的出现了一瞬间的真空，是不是像亚里士多德说的那样“大自然厌恶真空”，所以气体分子迅速占据了真空？

.....

同学们，翻开这本书，你们就将踏上一场伟大的物理学发现的征程。学习公元前 700 年到 19 世纪末的 2600 年里，物理学家是怎么发现物理定律的。看看他们如何思考、如何类比、如何分析、又如何设计实验？如果换做是你，你能不能像他们一样，用科学的眼光探索世界？让我们一起走进书中寻找答案吧！

目录

光学—————7-30 页

光（视觉）的解释

光线的组成

镜面反射

光的折射定律

光速有限的思想来源

光能的平方反比定律

小孔成像

视差

开普勒定律

颜色理论

牛顿三棱镜色散实验

光栅实验，光的衍射实验

光谱

衍射光学的开始，光的微粒说和波动说

云母片的薄膜干涉

方解石的双折射现象

光速的测量

经度的计算

用视差法计算火星到地球的距离，再利用开普勒定律得到日地距离

双折射现象，偏振光

偏振性证明光是横波

色差

太阳光谱中的吸收谱线

夫琅禾费光谱线

光谱表明月亮和金星的光线都是太阳光的反射光

纵波和横波

惠更斯波动理论推导光的折射定律

杨氏双缝实验

半波损失

圆偏振光，偏振光实验证实光是横波

基尔霍夫光谱分析法

电学—————31-38 页

电是一种力

电与磁的区别

静电起电机

电的作用力会传递，导体

莱顿瓶，电容，正负电，雷电是放电现象

带电的三种方式

电荷守恒定律

库仑定律

大量电荷的产生，伏特电池

电磁学

39-89 页

电生磁：雷电使钢针磁化实验，莱顿瓶放电磁化钢针

伏打电池堆与磁铁的类比实验

奥斯特实验

安培力

电流计

螺线管

旋转铜盘产生磁

法拉第制造了一种可以被视为第一台电动机的装置

磁生电：法拉第尝试用通电导线周围产生的磁产生电

电磁铁

欧姆定律

塞贝克效应

楞次定律

法拉第的圆盘发电机

交流发电机

换向器

电场，电场线

高斯定理

位移电流

洛伦兹提出电子论

赫兹实验（电磁波的发射与接收）

赫兹光电效应实验（遮挡物和紫外光对火花长度的影响）

光电效应实验（紫光对锌板带电的影响）

从万物起源到原子，真空概念的出现

真空：从哲学思想到物理研究对象的发展过程

托里拆利真空实验（水银柱实验）

水银气压计

帕斯卡实验
玻意耳定律
元素
研究电的性质（电火花通过固液气）
水解
为什么进行真空放电实验?
莱顿瓶的改进
沃森的真空放电实验
法拉第黑色空间
盖斯勒管
真空放电管中的光在磁场中会偏转
勒纳德窗口
光电效应的研究
计算光电效应产生的带电微粒的荷质比
X射线的发现
汤姆逊计算阴极射线的速度和荷质比
用威尔逊云室测量电子质量
塞曼效应
洛伦兹电子概念的来源
温度和温度计
波意耳定律
热是什么?
焦耳量测热功当量
绝对零度
黑体辐射理论
太阳光谱中的黑线
夫琅禾费光谱线
光谱分析法

原子（核）物理-----90-96页

多普勒效应
多普勒效应无法解释恒星的颜色
放射性的发现
卢瑟福确定铀辐射有两种射线： α 射线 β 射线
 γ 射线， α 粒子的确认实验
卢瑟福为什么做 α 离子轰击金箔实验?

现代物理-----97-115页

瞬时速度的计算（极限的计算）	
电磁波携带动量吗？	
简谐运动微分方程的简单求解	
用数学模型（波动函数）描述波的传播介质中介质粒子的运动	
温度计的工作原理：热力学第零定律	
理想气体状态方程	
推导气体分子的平均动能	
单原子气体分子的平均速度	
计算单原子气体分子之间碰撞前的距离，以及碰撞间隔时间	
道尔顿的分压定律	
热力学熵的定义	
玻尔兹曼常数的推导	
积分形式的麦克斯韦方程组（选学）	116-133 页
附录	134-143 页

注：积分形式的麦克斯韦方程组中的定义涉及二元函数的微积分，但是具体计算和概念都是高中电磁学.

光学的发展概况

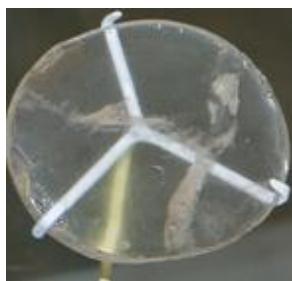
光学始于古埃及和美索不达米亚人对透镜的发展，之后是古希腊和印度哲学家对光和视觉的理论发展，以及希腊-罗马时代对几何光学的发展。光学“optics”一词源自古希腊语，本意为名词“看见”。随着中世纪穆斯林世界对早期物理光学和生理光学（眼睛结构、视觉等）的发展，光学得到了极大的改善，然后在早期欧洲由于衍射光学的出现，光学又得到了更进一步的发展。这些早期的光学被称为“经典光学”。“现代光学”是指20世纪广泛发展的光学领域，比如波动光学和量子光学。

透镜的出现

最早的透镜是通过研磨晶体，通常是石英晶体制得，时间可以追溯到公元前700年的亚述（古代西亚奴隶制国家）透镜，比如宁路德透镜（Nimrud lens）（可能用于放大，点火或者装饰）。古埃及、古希腊和古巴比伦有许多相似的透镜。古罗马人和古希腊人在玻璃球里灌入水来制造透镜。但是，用玻璃做透镜的想法直到中世纪才出现。



石英晶体



大英博物馆展出的宁路德透镜（750–710 BC）

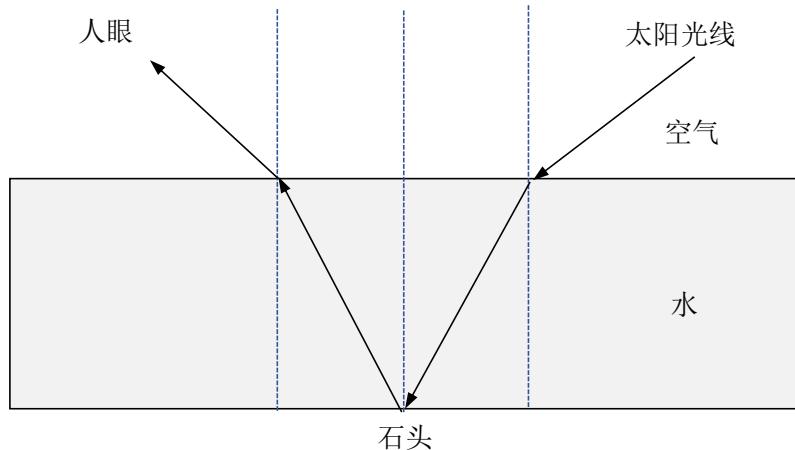
在古埃及雕像上的一些透镜要比上面提到的透镜早得多，但是对于这些透镜是否是用来作为透镜的看法有一些疑虑或疑问，不过它们毫无疑问是玻璃的并且至少是以装饰为目的的（served at least ornamental purposes）。

光（视觉）的解释

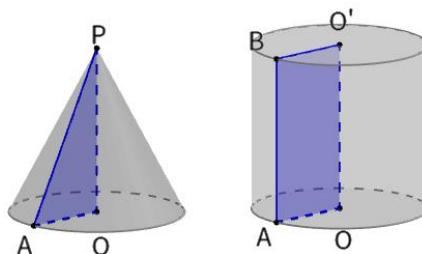
古印度人认为物质世界由水、火、土和气的原子（组成万物的基本粒子）组成，光线是一束高速运动的火原子。

公元前5世纪，古希腊哲学家恩培多克勒（前490年-前430年）认为万物由火、气、土和水组成。女神阿佛洛狄忒用四种元素造了人的眼睛并且点燃了眼睛里的火，使视力成为可能/使人看得到东西（making sight possible）。如果这种说法正确，那么人在晚上也能像白天一样看得到东西，为了解释这个矛盾，恩培多克勒假定从眼睛发出的光线与从其他光源比如太阳发出来的光线相互作用。光源照亮物体，物体表面的反射光、折射光与眼睛发出的光相互作用。

光的折射：光从一种透明介质斜射入另一种透明介质时，传播方向一般会发生变化，这种现象叫光的折射。例如阳光从空气中斜射入水中时，传播方向发生变化，射到水中的石头后，光线发生反射，反射光线从水中射向空气中，在水面发生折射后射向空气中，进入人眼后，我们看到水底的石头。

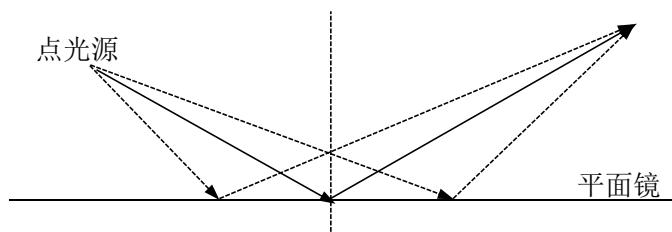


希腊数学家欧几里得在他的著作《光学》中说道“距离物体比较近时，看物体的角度比较大，物体看起来比较大，距离物体比较远时，看物体的角度比较小，物体看起来比较小，在相等的角度看起来一样大”.在 33 条公理中，欧几里得叙述了物体的尺寸与到眼睛的距离之间的关系并且研究了从不同角度看圆柱和圆锥时它们的不同尺寸.



公元前 55 年，罗马共和国末期的诗人和哲学家提图斯·卢克莱修·卡鲁斯 (Titus Lucretius Carus, 约前 99 年-约前 55 年) 坚持了罗马原子论者早期的观点，写到：太阳的光和热是由微小的原子组成的，当这些微小的原子离开太阳后，就朝着离开时的方向瞬间射向空气中. 尽管和之后的光的粒子理论相似，卡鲁斯的观点却没有被普遍接受，光在理论上依然被认为是从眼睛发射出来的.

古希腊数学家亚历山大里亚的希罗 (公元 10 年-70 年) 在他写的《光线反射论》中通过几何方法指出，光源发出的光线通过平面镜反射到眼睛所经过的实际路径比任何其他可以画出来的路径短. (折射定律基于该理论推导出)



生活在埃及用希腊文写作的希腊裔罗马公民，数学家、天文学家、地理学家、占星家克劳狄乌斯·托勒密 (Klaudios Ptolemaios; 拉丁语: Claudius Ptolemaeus, 约 90 年—168 年) 肩负起了研究光的反射和折射的工作，出版的研究结果显示，他校正了他的测量，使其符合他的错误设想：入射角和折射角成正比.

几何光学

欧几里得，亚历山大里亚的希罗和托勒密都研究了几何光学。

伊斯兰世界的光学和视觉

中世纪阿拉伯的著名哲学家、自然科学家**肯迪**（796 年–873 年）是伊斯兰世界最早的重要光学著者。肯迪在一篇著作中发展了一种理论，“**世界上的任何物体都朝各个方向发射光线，这些光线充满了整个世界。**”由于肯迪精通拉丁文和阿拉伯文，因此被指派去将希腊哲学和科学资料翻译为阿拉伯文。

亚里士多德认为，眼睛要察觉物体的话，眼睛和物体都需要通过一种透明的媒介，比如空气相互接触，并且媒介中充满了光线。然后物体的“可感知的形状”会通过这些媒介传送到眼睛。另一方面，**欧几里得**认为视觉是从眼睛发射出的沿着直线的光线接触到一个被照亮（被其他光源照亮的）的物体后反射回眼睛而形成。我们从某一角度看圆圈的时候，看到的是一段线段，这用**亚里士多德**的观点解释不通（“可感知的形状”通过这些媒介传送到眼睛了，不可能看起来不一样）；而欧几里得的光学却能提供一种几何模型加以解释，甚至影子的长度以及平面镜反射也可以解释，因此肯迪认为欧几里得的观点比较可信。

肯迪的观点影响了之后的学者，比如伊本·海赛姆（Ibn al-Haytham）的两个主要成就是，第一，视觉的产生是由于光线进入眼睛；第二，定义了那些被早期的几何光学著者所讨论了的光线的物理本质，认为光线是光和颜色的形状（forms）。他写了一本书并被翻译为拉丁文后，他的观点在西欧传开并极大地影响了之后的光学发展。

光速的思考

之后的学者阿维森纳（Avicenna, 980–1037）赞同海赛姆的观点，认为**如果光线是从发光的物体发射出来的某种粒子的话，那么光线的速度必然是有限的。**

13 世纪晚期到 14 世纪早期，库特布丁·设拉子（Qutb al-Din al-Shirazi, 1236–1311）和他的学生（his student）卡迈勒丁·法里西（Kamāl al-Dīn al-Fārisī, 1260 – 1320）继续了海赛姆的工作，第一次给出了彩虹的正确解释。

中世纪的欧洲光学

英国主教罗伯特**格罗斯泰斯特**将很多希腊和阿拉伯著作翻译为拉丁文，其中就有亚里士多德，海赛姆等的光学著作。他邀请希腊人到英国来，并输入希腊书籍。格罗斯泰斯特看来是从东方邀请希腊人来教希腊古文的第一人，那时这种文字在君士坦丁堡仍然为人阅读。认为光是所有物质的第一形式（first form of all things）。因此，因为光可以简化为线和点，所以可以完全用数学来解释，数学是所有科学的最高等级。“光是自然因果关系（physical causation）的第一角色，向接受者传播它自身能量的一种天生的，本质的角色”“a natural agent propagates its power from itself to the recipient”“每一种自然的作用（natural action）都通过线、角度和形状的变化而改变强度”。

罗吉尔·培根（1214 – 1294）是罗伯特**格罗斯泰斯特**的学生，受到格罗斯泰斯特著作中所说的光的重要性极大的影响，他在自己的著作里引用了亚里士多德、欧几里得、柏拉图等人的光学和哲学文献，并且指出，每一个物体都辐射一种称为素（species）的能量作用于周围附近适于接受素的物体（这个观点可能来源于罗伯特格罗斯泰斯特）。

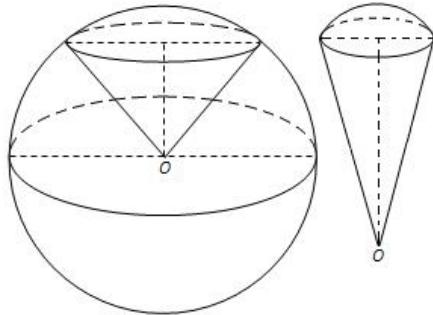
文艺复兴时期和早期现代光学

德国天文学家、数学家**开普勒**（1571 – 1630）在他 1600 年发表的《lunar essay》中有对光学定律的调查研究。月食和日食都呈现了无法解释的现象，比如无法预料的阴影大小，月全食时的红色，日全食时据说周围产生的不正常的光。1603 年，开普勒描述了光强满足的平方反比定律，平面反射，小孔成像原理（倒立像），视差。

参考附录：卡西尼用视差法计算出火星到地球的距离，再利用开普勒定律得到日地距离

公元9世纪时，巴格达学者金迪（Al-Kindi,800?—870）通过观察太阳光和人造点光源的发光形式，认为光线是从圆锥的顶点散射出来的。

以 R 为半径的球的表面积 $S=4\pi R^2$ ，根据金迪的看法，若将光源看做是球心，光以球心为圆心发散出来，则球面每一点获得的光能为 $E_i = \frac{E}{4\pi R^2}$ ，就得到球面上任意一点获得的光能与球面直径的平方成反比的关系。



德国天文学家约翰尼斯·开普勒（Johanns Kepler,1571-1630）发现了行星围绕太阳运行的三大定律之后，人们把注意力放在了为什么行星有这样的运动规律上来。

第一定律：行星的轨道是一个以太阳为焦点之一的椭圆；

第二定律：行星和太阳之间的连线在相等的时间间隔内扫过相等的面积；

第三定律：行星轨道周期的平方与其轨道半长轴的立方成正比。

开普勒三大定律将用于计算日地距离，详细请参考附录。

开普勒认为行星的运动是太阳绕自转轴转动时，有一种力拖拽行星一起运动的结果，并认为这种拖拽作用与金迪认为的从太阳射到行星的光能与行星到太阳的距离的平方成反比的关系一样。在写给老师米希尔·梅司特林（Michael Maestlin,1550-1631）的信中，他写到：

行星运动的快慢和它们到太阳的距离成反比，距离太阳越远，行星运行的越慢，反之则越快。但是从太阳散发出来的功效（virtue，这里指太阳发出的热量）却好像与太阳到行星的距离的2次方或三次方成反比，所以行星运动的快慢将不会是由于太阳的功效引起的。

开普勒的行星运行三大定律在欧洲的积极推广者，法国天文学家伊斯梅尔·博里奥（Ismaël Bullialdus ,1605-1694）不赞同伽利略关于行星绕太阳的运动与行星到太阳的距离成反比的看法，他对将太阳对行星的作用类比于太阳光十分着迷，认为太阳与行星的作用像太阳光一样，与距离的平方成反比。

荷兰天文学家、数学家和物理学家威理博·斯涅尔（Willebrord Snellius, 1580年 - 1626年10月30日）1621年重新发现了折射定律，因而命名为斯涅尔定律。但是，他并没有主动地将定律发表出来。后来，于1703年，克里斯蒂安·惠更斯在著作《Dioptrica》中谈到这个定律，才正式地将定律的发现归功于斯涅尔。但是，根据最新历史研究结果，早在公元984年，正值伊斯兰黄金时期（Islamic Golden Age），穆斯林科学家阿尔·哈增（Ibn Sahl）就已经发现这个定律了。

颜色理论的出现

在光学发展的早期，对颜色的解释显得十分困难。在牛顿以前，欧洲人对颜色的认识流行着亚里士多德的观点。亚里士多德认为，颜色不是物体客观的性质，而是人们主观的感觉，一切颜色的形成都是光明与黑暗、白与黑按比例混合的结果。

伊斯兰世界对光的折射、反射和彩虹现象的正确研究结果以及对光的理论看法，以及亚里士多德的希腊文光学理论，都有理由认为会通过英国主教罗伯特格罗斯泰斯特及其学生罗

吉尔·培根等人的翻译传播到了欧洲。

1663年波意耳也曾研究了物体的颜色问题，他认为物体的颜色并不是属于物体的带实质性的性质，而是由于光线在被照射的物体表面上发生变异所引起的。能完全反射光线的物体呈白色，完全吸收光线的物体呈黑色。

另外还有不少科学家，如笛卡儿、胡克等也都讨论过白光分散或聚集成颜色的问题，但他们都主张红色是大大地浓缩了的光，紫光是大大地稀释了的光这样一个复杂紊乱的理论。所以在牛顿以前，由棱镜产生的折射被假定是实际上产生了色，而不是仅仅把已经存在的色分离开来。

当白光通过无色玻璃和各种宝石的碎片时，就会形成鲜艳的各种颜色的光，这一事实早在牛顿的几个世纪之前就已有了解，可是直到十七世纪中叶以后，才有牛顿通过实验研究了这个问题。

色散的研究

13世纪，德国人西奥多里克(Theodoric)曾在实验中模仿天上的彩虹。他利用阳光照射装满水的大玻璃球壳，观察到了和空中一样的彩虹，以此说明彩虹是由于空气中水珠反射和折射阳光造成的现象。不过，他的进一步解释没有摆脱亚里士多德的教义，继续认为各种颜色的产生是由于光受到不同阻滞所引起。光的四种颜色：红、黄、绿、蓝，处于白与黑之间，红色接近白色，比较明亮，蓝色接近黑色，比较昏暗。阳光进入球形水滴后，从表面区域折射出来的是红色或黄色，从深部折射出来的是绿色或蓝色。雨后天空中充满水珠，阳光进入水珠再折射出来，人们就看到色彩缤纷的彩虹景象。

笛卡尔对彩虹现象也有兴趣，他用实验检验西奥多里克的论述。他在1637年的《方法论》中还有一篇附录，专门讨论彩虹，并且介绍了他自己做过的棱镜实验。他用三棱镜将阳光折射后投在屏上，发现彩色的产生并不是由于进入媒质深浅不同所造成。因为不论光照在棱镜的那一部位，折射后屏上的图象都是一样的。遗憾的是，笛卡儿的屏离棱镜太近，他没有看到色散后的整个光谱，只注意到光带的两侧分别呈现蓝色和红色。

牛顿三棱镜实验

1665-1667年欧洲瘟疫期间，因学校关闭，牛顿回到老家，期间系统地研究了棱镜的光学现象。

牛顿首先做了一个有名的三棱镜实验。从1663年起，牛顿开始磨制透镜和自制望远镜。同时制作了一块三角形的玻璃棱镜，以便重复观察包括意大利物理学家格里马尔迪(Grimaldi, Francesco Maria, 1618—1663)在内的所做的那些著名实验。格里马尔迪是波洛尼亚大学教授和耶稣会会士，他与别人验证过伽利略斜塔实验(证实伽利略的说法不正确，无论什么高度，木球总是比铁球后着地)，在他死后约两年问世的一本书里发表了他的最重要的发现，这些光学发现是他十年研究的结果，他在光学方面的工作非常新颖，以至于其影响远不及人们预期的那么大，他研究光学的目的是继承了前人的问题，即试图确定光是否为一种物质，或者它是否是另一种物质的性质。格里马尔迪明确表示，他自己的观点是光不是一种物质，他认为第二本书中的论证使光可能是一种性质。然而，这两本书有一个共同的特点；它们都反对光的微粒理论。他让一束光通过两个(前后排列的)狭缝后投射到一个空白屏幕上。他发现，投射到该表面上的光带比进入第一道缝时的光束略微宽些。所以他认为，这束光在狭缝边缘向外有所弯曲，他把这个现象称为衍射。这显然是光线绕过障碍的一种情况，对于波而言，这种情况是存在的，而粒子则不然；因此格里马尔迪认为光是一种波现象。更为异乎寻常的是，他观察到光带在其终端显示出一至三道彩色条纹。

牛顿在著作中记载道：“1666年初，我制作了一个三角形的玻璃棱柱镜，利用它来研究光的颜色。为此，我把房间里弄成漆墨的，在窗户上开一个小孔，让适量的日光射进来。我

又把棱镜放在光的入口处，使折射的光能够射到对面的墙上去，当我第一次看到由此而产生的鲜明强烈的光色时，使我感到极大的愉快。”牛顿细致地注意到阳光不是像过去人们所说的五色而是在红、黄、绿、蓝、紫色之间还有橙、靛青等中间色共七色（牛顿说七色，是因为数字 7 是古希腊人的吉祥数，肉眼能看到夜空中的 7 颗行星，一周 7 天，7 是两次满月间隔的四分之一时间）。

奇怪的还有棱镜分光后形成的不是圆形而是长条椭圆形，接着他又试验“玻璃的不同厚度部分”、“不同大小的窗孔”、“将棱镜放在外边”再通过孔、“玻璃的不平或偶然不规则”等的影响；用两个棱镜正倒放置以“消除第一棱镜的效应”；取“来自太阳不同部分的光线，看其不同的入射方向会产生什么样的影响”；并“计算各色光线的折射率”，“观察光线经棱镜后会不会沿曲线运动”；最后才做了“判决性试验”：在棱镜所形成的彩色带中通过屏幕上的小孔取出单色光，再投射到第二棱镜后，得出该色光的折射率（当时叫“折射程度”）发现这些单色光不会继续被分解，这样就得出“白光本身是由折射程度不同的各种彩色光所组成的非均匀的混合体”。白光既然能分解为单色光，那么单色光是否也可复合为白光呢？为此牛顿进行实验，调节各平面镜与入射光的夹角，使各反射光都落在光屏的同一位置上，这样就得到一个白色光斑。这个惊人的结论推翻了前人的学说，是牛顿细致观察和多项反复实验与思考的结果，牛顿把这个颜色光斑叫做光谱。

光谱的出现

光谱学正是开始于牛顿的光学实验。牛顿用单词“spectrum”来描述白光通过三棱镜后形成的像彩虹一样的各种颜色。

牛顿解释说，颜色来源于光的物理性质（color arises from a physical property of light），颜色是大脑中的一种感觉，而不是物体或光的固有特性，比如红紫色可以通过光谱中的红色和紫色混合而成，但是光谱中没有红紫色，因此红紫色不是光的颜色。

衍射光学的开始，光的微粒说和波动说

中文“衍”的本意是：水流入海。一条很直的河中的水流入大海后，向四周扩散开。光的衍射效应最早是由意大利数学家和物理学家弗朗西斯科·格里马迪（Francesco Grimaldi）于 1665 年观察发现并加以描述其特性的，他还根据拉丁文创造了衍射“diffraction”这个词，表示“打碎”，对于光来说，就是使其从直线传播分散为不同的方向。

格里马迪在他的一生中都没有以自己的名字发表过著作，所有他的东西都是在他死后出现在意大利天文学家乔万尼·巴特斯达·里奇奥利（17 April 1598 – 25 June 1671）发表的著作中。里奇奥利是格里马迪的老师。格里马迪在 45 岁的时候突然生病去世，但是在去世前 10 年里对光学的特性做了十分显著的研究。格里马迪在 1665 年出版的著作 *Physico-Mathesis de Lumine* 中尝试着去判断光是一种物质还是另外的物质的特性。他用一种十分不寻常的方法来研究这个问题。他的著作有两部分。第一部分描述了他的最有名的发现，光的衍射。他作了一个小针孔，然后让太阳光通过这个小孔进入一个漆黑的房间，照射到一个屏幕上。屏幕的摆放有一定的角度使得光线在屏幕上产生一个椭圆形的图案。然后把一根很细的棒放在小孔与屏幕之间，来测量细棒在屏幕上的阴影大小。格里马迪发现，细棒阴影的大小比应该有的圆锥形尺寸大。格里马迪分析认为，如果光是由微粒组成的，那么这个效果就不可能出现，所以光应该是一种流体的形式，可以围着物体变弯（this effect was impossible if light consisted of corpuscles so light must have a fluid form which bent round the object）。他还注意到细棒阴影附近有彩色带。每一条带有 3 个成分，最靠近阴影的是紫色带，中间是白色带，最外层是红色带。

格里马迪选择“衍射 diffraction”来描述这种效应，因为这种效应使他想起一个细棒放在流体的路径上时流体分开的样子。之后，他还使光线通过两个针孔后进入黑暗的房间来

观看干涉现象。接下来，他又处理了反射和折射。书的第二部分研究的是颜色和彩虹。

令人吃惊的是，格里马迪的著作很少被人阅读，但是他在衍射上的重要结论却被其他人广泛地熟知。

格里马迪的实验被广泛传播，牛顿自己也亲自确认说，他通过阅读 Honoré Fabri 的 'Dialogi physici' 的第一段对话而学到了格里马迪的衍射效应。

格里马迪反对光的粒子说，认为光是一种类似波（wavelike）的物质。

牛顿重做并改进了格里马迪的实验，做了包括棱镜实验（折射和颜色理论，主要目的和格里马迪一致）和牛顿环（干涉，没有解释理论原因）。牛顿分析认为光由微粒组成，这些微粒进入另一种密度更大的媒介后产生折射。

正如之前所述，欧洲光学研究的再次兴起，主要是因为和伊斯兰世界的接触的增加。尤其是经过英国主教罗伯特·格罗斯泰斯特及其学生罗吉尔·培根等人将阿尔·哈增和亚里士多德的光学著作从希腊文和阿拉伯文翻译为拉丁文后。

从牛顿对光是物质还是其他物质的特性的解释来看，牛顿的光学研究主要承接了格里马迪的问题；而颜色理论的解释是对亚里士多德等历史以来对颜色看法的讨论。由于笛卡尔在 1637 年再次独立发现了反射定律，他认为光本质上是一种压力，在完全弹性的、充满一切空间的媒质（以太）中传递，传递的速度无限大。但他却又用小球的运动来解释光的反射和折射。牛顿的主要论点是通过三棱镜折射解释光的颜色理论、以及对光的微粒理论的叙述，其中并未解释格里马迪的衍射效应，甚至对于牛顿环的成因也未做解释，而只是利用牛顿环来提高自己研磨的透镜的品质，所以牛顿的光学研究的主要目的，是反驳笛卡尔的光的波动说以及反驳亚里士多德等的颜色理论。

意大利物理学家弗朗西斯科·格里马尔迪关于衍射的研究发表一年后，英国物理学家艾萨克·牛顿购买了他的第一个棱镜，试图反驳法国哲学家笛卡尔的光波理论。牛顿声称格里马尔迪衍射只是一种新的折射。他认为，只有当光由粒子组成时，反射和折射定律的几何性质才能得到解释，他称之为微粒，因为波不倾向于直线传播。

早在 1665 年出版的著作 *Micrographia* 中，胡克和他的老师波意耳就已经研究并发现了薄膜（thin films）干涉现象，以及衍射效应，并认为光可以传播传播光线的任何媒介的快速振动。

胡克明确主张光是一种振动，并根据云母片的薄膜干涉现象作出判断，认为光是类似水波的某种快速脉冲。在 1667 年出版的《*Micrographia* 显微术》一书中，他写道“在均匀媒质中，这种运动在各个方向都以同一速度传播，所以发光体的每个脉冲或振动都必然会造成一个球面。这个球面不断扩大，就如同把石块投进水中，在水面一点周围的波或环，膨胀为越来越大的圆环一样（尽管要快得多）。由此可见，在均匀媒质中激起的这些球面的所有部分都与射线以直角相交。”

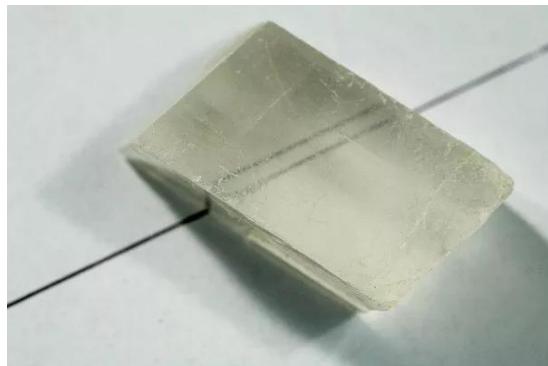
云母是一种很容易分层的薄片，例如用剃须刀分开，每个薄片由很多间隔几微米的薄片组成，薄片之间有空气。

胡克的观点和格里马迪相似，著作的出版时间都是 1665 年。可以预见他们都是彼此独立研究的。牛顿的光学理论在 1666 年才发表，并且认为折射只是一种新类型的反射。胡克认为牛顿抄袭了自己的光学，并且反对“折射只是一种新类型的反射”的说法和光的微粒说。

由于很多人努力重复牛顿的三棱镜实验的失败，其他很多皇家学会成员加入胡克阵营反对牛顿的观点，否定牛顿七色光谱的存在、否定牛顿的第 44 个实验真的证明光不是一种波。在当时，三棱镜还只作为一种玩具出售，而且几乎没有相关的设计技术。当时最好的威尼斯玻璃被认为是玻璃的标准，即便如此依然有很多气泡和瑕疵在里面。牛顿也无法解释实验细节和如何得到颜色光谱。直到 4 年后的 1676 年，牛顿才演示了更多的实验细节，给出足够的信息来使人们能够重复他的实验。并且最终下定论说，最好的三棱镜是伦敦制造的而不是意

大利制造，因为伦敦的最纯净.那些无法重复他的实验的人肯定是使用了不好的三棱镜.但是这些解释常常被认为是借口，因此牛顿最终退出这个主题的争论.

法国数学家笛卡尔是荷兰物理学家惠更斯父亲的朋友，两人经常通信并且笛卡尔偶尔会到访惠更斯家并且对年轻的惠更斯的数学学习进展十分有兴趣. 惠更斯的数学毫无疑问地受到了笛卡尔的影响，1672年，惠更斯学到了牛顿在望远镜和光学上的著作，然后反驳了牛顿的光学理论，尤其是光的颜色部分. 1676年惠更斯生病后返回荷兰，两年里，特别研究了丹麦物理学家、数学家、医师巴托兰 (Bartholin) 在冰岛的方解石发现的双折射现象. 当从特定方向透过冰岛的透明方解石看一个物体时，物体会显示出两个像. 1669年，哥本哈根大学的丹麦数学家巴托兰不但看到了双图像的现象，还做了一些实验并写了60页的论文集. 这就是最早的光的偏振效应的科学描述.



方解石的双折射现象

牛顿的三棱镜实验后大约1年，英国物理学和数学家格雷戈里发现了另外一种将白光分成各种颜色的方法. 格雷戈里在伦敦期间参加了皇家学会的聚会并被选为会员，罗伯特·默里也是皇家学会会员，且与格雷戈里很熟悉，默里是圣安德鲁毕业的并且通过她查理二世在圣安德鲁设立了一个皇家数学职位，原则上允许格雷戈里担任此职位并继续他卓有成效的研究. 在圣安德鲁期间，格雷戈里继续与柯林斯通信，柯林斯又与牛顿等当时的大科学家通信，因此格雷戈里可以从柯林斯获得当时科学的发展情况，他在圣安德鲁期间发现了另外一种像牛顿的三棱镜一样将白光分解为有色光的方法，他给柯林斯的信中写到：

让阳光通过一个小孔照射到一个黑暗的房子里，在孔里放一根羽毛(越精致、越白越好)，它会把一些小圆圈和椭圆形(如果我没有弄错的话)指向对面的白色墙壁或纸张，其中一个有点白(也就是说，在太阳对面的中间)，其余的都是彩色的. 我很乐意听听牛顿先生对此的看法.

Let in the sun's rays by a small hole to a darkened house, and at the hole place a feather (the more delicate and white the better for this purpose), and it shall direct to a white wall or paper opposite to it a number of small circles and ovals (if I mistake them not) whereof one is somewhat white (to wit, the middle which is opposite the sun) and all the rest severally coloured. I would gladly hear Mr Newton's thoughts of it.

我们可以推测，格雷戈里知道牛顿的三棱镜实验及其微粒说以及格里马迪的狭缝实验后，希望找一种缝隙很小的狭缝使由微粒组成的光线通过，因此很容易从身边找到鸟的羽毛. 他还希望将自己的方法告知牛顿，想知道牛顿的观点，这就是最早的光栅.

惠更斯发展了胡克的思想(由于惠更斯研究过巴托兰发现的双折射现象，而巴托兰又是根据笛卡尔的光的波动理论加以研究的双折射). 他进一步提出光是发光体中微小粒子的振动在弥漫于宇宙空间的以太中的传播过程. 光的传播方式与声音类似，而不是微粒说所设想的像子弹或箭那样的运动. 1678年他向巴黎的法国科学院报告了自己的论点(当时惠更斯正留居巴黎)，并于1690年取名《光论》(Traite de la Lumiere)正式发表. 他写道：“假

如注意到光线向各个方向以极高的速度传播，以及光线从不同的地点甚至是完全相反的地方发出时，其射线在传播中一条穿过另一条而互相毫无影响，就完全可以明白：当我们看到发光的物体时，决不会是由于这个物体发出的物质迁移所引起，就象穿过空气的子弹或箭那样。”，并以此反驳牛顿的光学理论。

罗迈 (Olaf Roemer, 1644—1710) 在 1676 年根据木星卫蚀的推迟得到光速有限的结论，使惠更斯大受启发。

经度的判断对导航和绘制地图具有十分重要的实际意义，因此，1598 年，西班牙国王菲利普 3 世设了一个奖项，以寻找一种判断船只在看不到陆地时船的经度的办法。

为了判断经度，只需要观测日落和日出就足够了，而日落和日出可以提前一年预测；如果你所处处的日落比格林尼治天文台早 1 个小时，那么所处之处的经度就是格林尼治以西 15° 。所以我们所需要的就是一个时钟。但是在 1672 年，人们还没有一种在上下颠簸左右摇晃的船上准确计时的时钟。惠更斯的摆钟只能在陆地上工作。因此精确的导航十分困难。伽利略曾经建议使用木星的卫星作为时钟，但是在船上观测木星的卫星的月食似乎很困难。然而，这可能在陆地上有用，并且这个方法已经被意大利天文学家卡西尼 (Cassini) 领先了。卡西尼被法国国王邀请到法国参与建设皇家天文台，这个天文台在 1671 年建成，卡西尼任负责人。他立即送皮卡尔 (Jean Picard) 去乌拉尼堡，那里有第谷所在的天文台。卡西尼的目的是，通过在两个天文台观测木星的卫星 Io 的同一次月食的周期差异，来计算两地的经度之差。如果皮卡尔在乌拉尼堡的正午后记录到 Io 的月食结束时间是 9 时 43 分 54 秒，与此同时卡西尼在巴黎记录同一个月食的结束时间是 9 时 1 分钟 44 秒，这个时间差 42 分 10 秒，就可以用来计算两地的经度之差，即

$$\frac{3600\text{s}}{15^\circ} = \frac{42 \times 60 + 10}{x}$$

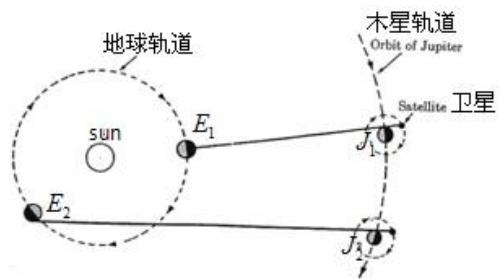
$$x = 10.5417^\circ = 10^\circ 32' 30''$$

这就是为什么人们要精确测定木星的卫星的轨道周期的原因。罗默 (Romer) 是皮卡尔的年轻助手，他必定是一个得力助手，因为皮卡尔安排他到巴黎并在皇家天文台工作。罗默至少在 1668 年就已经观测过 Io 的月食，所以他很可能向皮卡尔展示如何去观测。

望远镜发明后不久，伽利略就在 1610 年用望远镜发现了木星的四颗最大的卫星。紧接着很多天文学家对这些卫星做了详细的观察，到 1660 年时它们的运行周期已经被波雷里 Borelli (1665) 和卡西尼 (1668) 制作出来。他们的观测时间主要是在地球处于太阳和木星之间时，因为此时木星看起来处于夜空中的最高位置。木星的四颗最大的卫星绕木星的周期分别是 1.769 天、3.551 天、7.155 天和 16.689 天，这些数据十分稳定并且可以准确地根据这些时间预测这些卫星的运动，这些数据就像巨大的时钟。基于这些数据可以将月食（这些卫星被木星遮住）的预测时间精确到分钟。



罗迈推测光速有限



到 1670 年的时候，人们开始从地球处于太阳另一侧观察木星，也就是木星、太阳和地球在一条直线行，且地球处于太阳外侧时，此时从地球观测，木星和太阳几乎处于同一位置，使得观测十分困难，不过在黎明和黄昏时，尽管木星和太阳看起来几乎处于同一位置，但还是可以观测。但是却出现了一个奇怪的现象，在连续 6 个月的时间里，木星卫星绕木星的周期都比之前地球在木星与太阳之间观测的有延迟或提前。

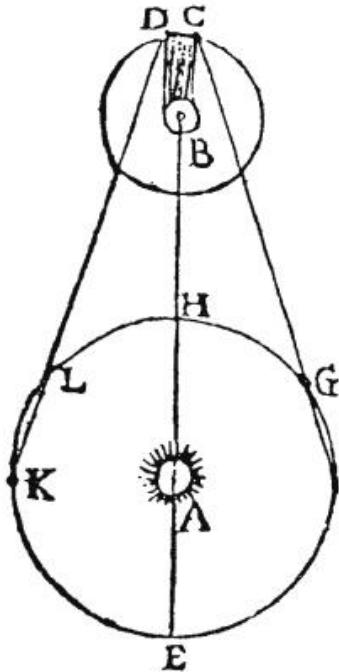


Figure 1. Roemer's original sketch showing the Sun (A), Jupiter (B), and the Earth at different times of the year (G, H, L, K, and E) as Io begins to eclipse at C and emerge from Jupiter's shadow at D. Counterclockwise revolution is illustrated. From Cohen (1944).

以其中一颗卫星 Io 为例，根据罗默的观测，在连续 6 个月里，Io 相连 2 次月食所用时间都增加了 3.5 分钟，因此半年累积下来，就是 22 分钟。在接下来的 6 个月里，Io 相连 2 次月食所用时间都减小 3.5 分钟，6 个月累积下来也是 22 分钟。罗默在 1675 年前往巴黎的访问中深思这个问题，并基于一种假设找到了一个完美的解释：光的传播速度不是瞬时的。光速有限。对于木星卫星来说，当地球处于木星与太阳之间时，木星的卫星反射的光线只需要走过木星轨道到地球轨道之间的距离；当地球处于另一侧时，木星的卫星反射的光线需要走过额外距离，那就是地球公转轨道直径，于是看到的木星卫星“月食”时间变迟了。在 1660 年时已经有地球到太阳距离的粗糙的估计值，根据 $v=s/t$ ，罗默并可得出光速的估计值。

卡西尼和皮卡尔都没有立即确信罗默的想法，因此作为初级职员的罗默没有发表他的工作。

最先测量日地距离的是古希腊天文学家阿里斯塔克斯 (Aristarchus)，其后是惠更斯于 1653 年测量，惠更斯用金星 (Venus) 的位置来估计，即当金星被太阳照亮一半时，日、地、金星三者形成直角三角形，测出 $\angle SEV$ 再计算，此方法需要估计金星到地球的距离。

1672 年，卡西尼用视差法 (parallax method) 计算出火星到地球的距离，再利用开普勒定律得到日地距离（具体方法参考附录）。

1669 年丹麦的巴塞林纳斯 (Erasmus Bartholinus, 1625—1698) 发现了双折射现象。当他用方解石（因为主要在冰岛发现，也叫冰洲石）观察物体时，注意到有双像显示。经过反复试验，他确定是这种晶体对光有两种折射：寻常折射和非寻常折射。

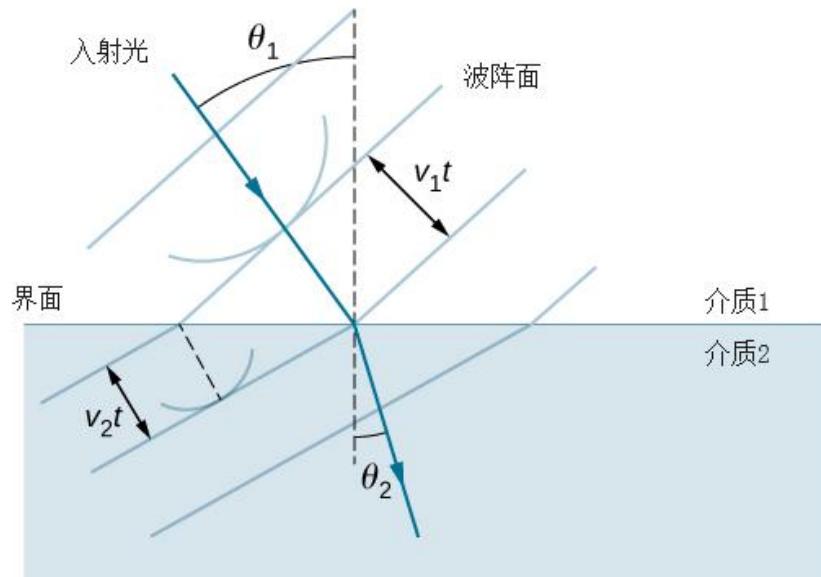


冰洲石

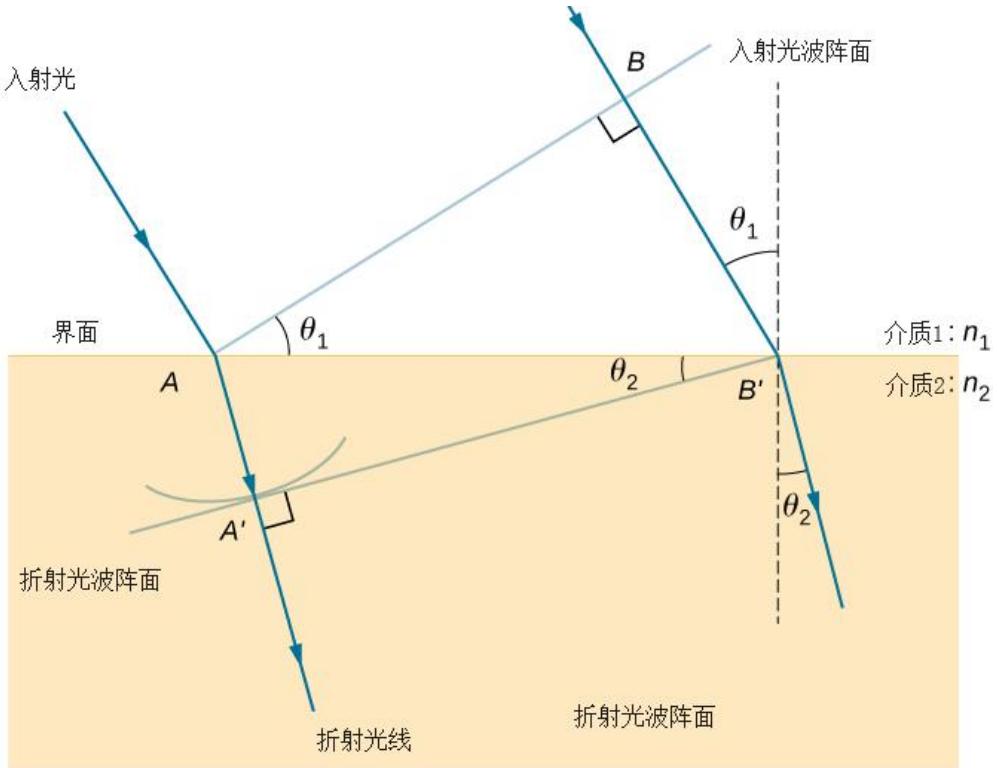
这是继干涉、衍射之后发现的又一光学新现象。是否能对这种新现象作出合理的解释成了微粒理论和波动理论面临的考验。惠更斯在得知巴塞林纳斯的发现后，立即重复进行了实验。他证实了这一现象，并且观察到在其他晶体，例如石英，也有类似效应，只是效果差些。进一步他还确定寻常折射仍然遵守折射定律，非寻常折射则不遵守折射定律。至于双折射现象的解释，惠更斯很巧妙地提出了椭球波的设想，认为方解石等晶体的颗粒可能具有特殊形状，以至光波通过时，在某一方向比在另一方向传播得更快一些，于是就出现了不同的折射。

惠更斯发展了波动理论。但是由于他把光看成象声波一类的纵波，因此不能解释偏振现象。他的波动理论也不能解释干涉和衍射现象，因为那时还没有建立波的周期性和位相等概念。

折射定律可以通过将惠更斯原理应用于从一种介质到另一种介质的波阵面来解释。图中的每个小波都是在波阵面穿过介质之间的界面时发出的。由于光在第二介质中的速度较小，因此波在给定时间内不会传播得那么远，新的波阵面会如图所示改变方向。这就解释了为什么当光变慢时，光线会改变方向，变得更接近垂直线。光的折射定律可以从中的几何关系推导出来。



惠更斯原理适用于从一种介质传播到另一种介质的平面波阵面，在那里它的速度较小。光线向垂直方向弯曲，因为小波在第二种介质中的速度较低。



如图所示，入射波阵面刚刚到达界面的 A 点时，B 点仍在介质 1 内。经过时间 t ，来自 B 的小波以一定速度 $v_1 = c / n_1$ 到达界面上的 B，A 点的小波传播到介质 2 中的 A' 点， $AA' = v_2 t$ ，其中 $v_2 = c / n_2$ 。注意，因为 $n_1 < n_2$ ，所以 $v_2 < v_1$ 。

$$AB' = \frac{BB'}{\sin \theta_1} = \frac{AA'}{\sin \theta_2}$$

代入 v_1, v_2 得

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

英国物理学家托马斯·杨一开始以医生为职业，但是兴趣广泛，不久之后开始研究光的性质。1801–1803 年他在伦敦的皇家学院当自然哲学教授，在此期间他做了一系列实验证实光看起来有类似波的行为，因为光可以被分解为有颜色的边缘（参考格里马第的衍射实验现象）。

历史学家依然不知道他是否真的做过这个实验（杨氏双缝实验）。但是至少他的思维实验（thought experiment）显示了光的波的特性并且证实光不是之前牛顿和其他人认为的是微粒。

双折射现象，偏振光

当从特定方向透过冰岛的透明方解石看一个物体时，物体会显示出两个像。1669 年，哥本哈根大学的丹麦数学家巴托兰（Bartholin）不但看到了双图像的现象，还做了一些实验并写了 60 页的论文集。这就是最早的光的偏振效应的科学描述。（巴托兰因为对方解石的研究，被选为哥本哈根大学教授。）

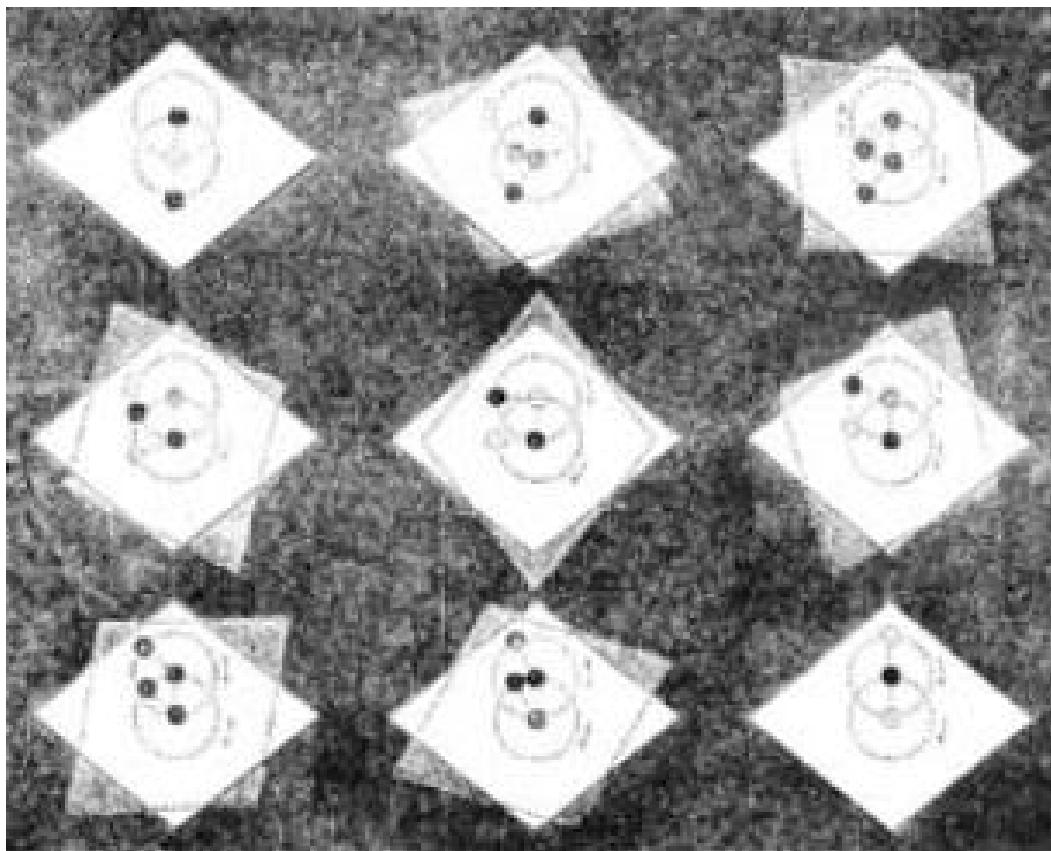
根据巴托兰的研究，经过冰岛方解石（Iceland spar）双折射产生的两束光线不一样。

其中一束光线遵从斯涅尔折射定律(也就是光的折射定律),称之为寻常折射光线(ordinary Ray),它的折射率是1.654.另一条折射的光线却不能满足折射定律.它的折射率不是常数,而是在1.654到1.483之间变化,而且入射光线与折射光线并不总是在一个平面内,因此称之为非寻常折射光线(extraordinary ray).寻常折射光线的强度是最大的(最亮).将一块冰岛方解石放在一点墨水上时,透过方解石会看到两个墨点,其中最明亮(the most refracted ray)的点看起来更浅(折射率最大).旋转方解石时,另外一个墨点将绕着最亮的点转动,而最亮的点保持不动.

巴托兰的发现抵达伦敦的皇家学会,并在欧洲和自然科学家之间广泛讨论,很多人希望得到方解石,当时冰岛是丹麦的一部分,欧洲人只能通过丹麦人,比如巴托兰讨要方解石,其中包括惠更斯、牛顿等人.巴托兰在莱顿期间与惠更斯相识,并送他及其他学者一些方解石.

巴托兰送他方解石后,惠更斯花了一年时间做实验.他发现,把第二块晶体放在第一块上面后,并不能通过双折射将第一块晶体得到的两个图样变成4个.实际上,当旋转第二块晶体时,他可以让通过第一块得到的两个图像之中的任意一个消失.

惠更斯在纸上滴一点黑色墨迹,放上一块方解石,此时因为双折射出现两个点的图像,此时在第一块方解石上再放置一块与第一块平行的方解石,并不会产生4个点的图像,当旋转上面的一块方解石90°时,图像会出明暗变化,如图所示.



惠更斯用圆形波的椭圆形次波解释双折射现象,但是不太完美,因此没有被大众接受;牛顿认为光线由微粒组成,并且微粒像磁体一样有端,认为晶体分开了这些端(晶体微粒与这些端有相互作用力,使端具有方向性,第一个偏振片使某个方向排列的粒子通过,第二个偏振片的角度与第一个偏振片不平行则完全无法通过光粒子,然而实验事实是,光线有通过,只是亮度变暗.这就是微粒说只能部分解释偏振光.),牛顿不能证明这种说法,但是由于他的威望,他的说法在接下来的100年里被普遍接受了.在接下来的100年里,微粒说和惠更

斯的波动说都只能部分地正确解释双折射现象，直到托马斯杨通过一系列实验证实了光的类似波的特性，当然这些实验与方解石无关。

偏振性证明光是横波

1808 年，法国工程师马吕斯（Étienne-Louis Malus）获得一个意外发现。一天他在巴黎的公寓里把玩一个冰岛晶石方解石，这种水晶石具有双折射特性，透过它看任何物体都会呈现两个图像。马吕斯透过这块水晶石凝视街对面的一扇窗户玻璃反射过来的太阳的图像，奇怪的是，这块水晶石只显示出一个太阳的图像，而不是马吕斯所期望看到的两个图像。当光线从一个表面反射出来时，很显然某些光线被过滤掉了，或者说被极化了，将光看做横波可以比其他理论很好地解释这个现象。

当马吕斯旋转方解石时，看到两个图像交替地明暗变化，但是其中任何一个图像都没有完全消失，因为从窗户反射回来的光不是完全极化的。这个变化类似于惠更斯通过重叠两块方解石而旋转上面一块时得到的效果一致。当晚在睡觉前，马吕斯直接透过方解石看烛光，但是烛光依然有两个图像而且旋转方解石并不会出现明暗交替的情形。当他透过方解石看通过水面或玻璃面反射的光线时，只看到一个像（这决定于怎么旋转方解石的方位，其实不完全只有一个图像，因为不是完全极化的。）当马吕斯旋转方解石使其主截面平行于光线的反射面时，只有寻常折射光线被反射。

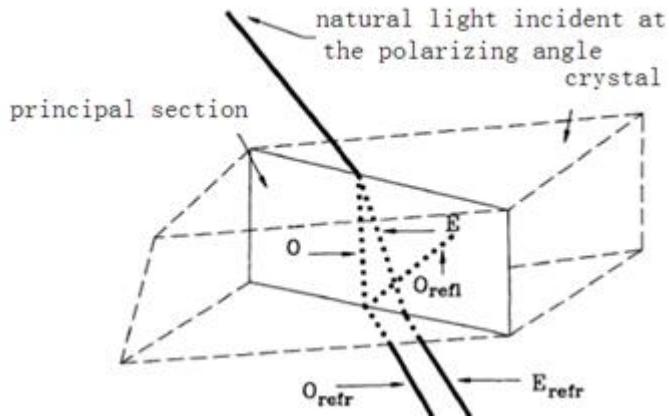
这个发现对马吕斯来说非常重要，尽管法国科学院设立了一个到 1810 年到期的“用数学理论和实验求证双折射现象”的物理竞赛奖，但是马吕斯并没有等到竞赛结束的 1810 年，而是在 1808 年就联系法国科学院，详述自己的发现，并在接下来的几个月里发表了。马吕斯创造了一个词 **polarized** 来描述光的这个特性，但是没有解释成因。

马吕斯还发现，使方解石折射出的光线被水面反射，当反射角小于 $52^\circ 45'$ 且方解石的主截面平行于反射面时，寻常折射光线被完全折射；当主截面垂直于反射面时，非寻常折射光线被完全折射。通过其他与方解石类似的透明物质表面反射的光都具有类似的性质。他把这一现象称为极化。马吕斯在 1811 年赢得了法国科学院设立的奖，但是由于之前参加拿破仑领导的入侵埃及的战争而导致健康恶化，于 1812 年去世。

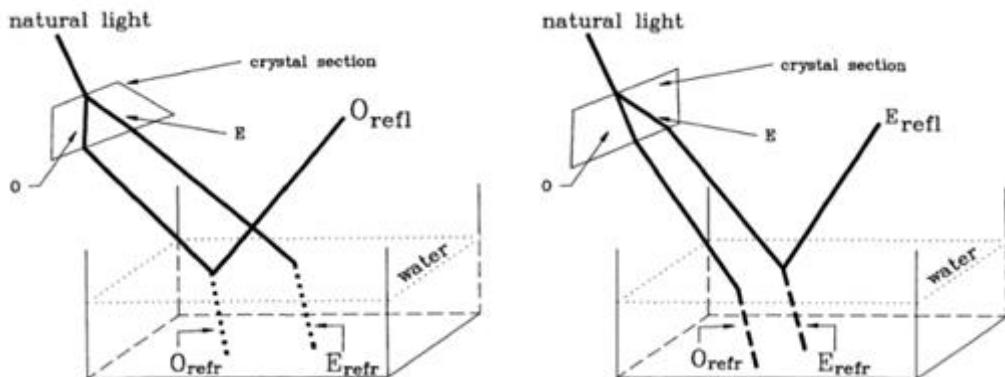
马吕斯认为光微粒有类似磁体的两个极性端，当光透过具有双折射的物质后，这些具有极性的微粒会有序排列，称这种有序排列的微粒为极化（Wehner R,1983）。

从玻璃或其他透明物质反射的光要成为完全极化的光，需要有不同的入射角，入射角对不同的物质不同。马吕斯尝试去找到使反射光完全极化的入射角与折射率的关系，他只找到了水的情况，当从水面反射出来的光线的反射角是 $52^\circ 45'$ 时，反射光线完全被极化了，由于当时玻璃品质不良，使得玻璃表面和内部折射率不一致，所以没有得到玻璃的极化角与折射率的正确关系。1815 年，大卫·布儒斯特使用高品质玻璃得到了玻璃的极化角与玻璃折射率的关系，也就是布儒斯特定律。

马吕斯还指出，反射光的极化（polarization）是不完全的，也就是说，透过方解石的旋转而观察到的反射光的极化现象与惠更斯通过两片方解石看到的不太一致。



当晶体的主截面与反射平面平行时，O 光除了折射，还有部分被反射，就像一束直接光线（即未改变的光线）那样；而 E 光则完全折射穿透晶体。相反，当晶体的主截面垂直于入射平面时，仅有 E 光产生部分反射，而 O 光则完全发生折射。



马吕斯的发现翻开了光学研究的新领域。光的极化实验容易重复，并且可以被改进。

1802年，当研究不同物质的折射率时，英国数学和物理学家威廉·海德·沃拉斯顿(William Hyde Wollaston, 1766-1828)在太阳光谱中发现了几条平行的黑线。

在牛顿时代，折射望远镜（伽利略望远镜）产生的色差（chromatic aberration）是影响望远镜观测的主要问题，并且有很多理论来解释是什么原因造成的。牛顿在 1660 年代中期在三棱镜实验基础上提出了颜色理论，认为折射望远镜的色差是因为望远镜里面的透镜起到了三棱镜的作用，使白光成为彩虹颜色围绕着明亮的天体。



色差

如果这正确的话，色差可以通过不使用棱镜来消除，于是就出现了反射式望远镜。牛顿也许读过格雷戈里在 1663 年的书 *optica promota*，里面描写了使用抛物面镜片设计反射式望远镜。牛顿采用了球面镜简化设计，但是这样也会引入球面色差（spherical aberration），不过依然可以修正。直到 1695 年，牛津大学的天文学家格雷戈里受到人眼多结构组合的启发，建议色差可以通过组合不同透镜来减小 - 两种或多种不同玻璃小心地贴合在一起的透镜。38 年后的 1733 年，英国的律师和光学修补匠切斯特·莫尔·霍尔委托不同的光学仪器商

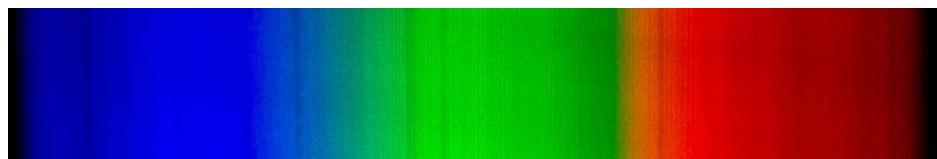
构造两种不同的透镜-一个是凹形的，另一个是凸形的（one a concave flint, the other a convex crown).巧合的是，这两块透镜的制造工作都交给了同一个人乔治 •巴斯(George bass)，他认识到这两种透镜是组合成一块完整透镜的不同部分，然后将其组合成一块后拿来看远处的物体，发现物体周围有颜色的边缘都消失了.乔治 •巴斯将透镜交给霍尔，然后霍尔将它们安装在一个望远镜里.巴斯努力将这种消色差透镜使光学仪器制造商接受，但是发现他们不感兴趣.生意太好，制造商都太忙不愿意被新的发明打扰.直到 1750 年，巴斯遇到约翰 •多伦德(John dollond)，一个前纺织工，现在是崛起的光学仪器制造商.多伦德是牛顿的透镜色差理论的坚定拥护者，然而他对巴斯的报告产生了兴趣，决定自己做实验，结果证实巴斯说的是正确的，后续的实验产生了这样的组合：一对凸冠玻璃透镜内测包含一个凹燧石玻璃透镜（a pair of convex crown-glass lenses enclosing a concave flint-glass lens）.多伦德声称是自己发明了这种组合并申请了专利.

多伦德的透镜在欧洲流行了半个世纪.透镜的设计，对于大多数光学仪器制造商来说，依然是反反复复修改的事.

设计消色差透镜需要详细的关于玻璃如何弯曲、折射一组由单色光线组成的光的知识.这样的知识显然没有.这个阻碍就是颜色的定义.在 19 世纪的时候，人们没有对颜色的同一定义标准，比如一个光学仪器制造商说某块玻璃对黄光的折射率是 n ，另外一个光学仪器制造商也说另一块玻璃对黄光的折射率是 n ，由于没有对黄光的同一定义，会造成差异.（我们在教科书上测量玻璃的折射率时用的是白光）

1802 年，沃拉斯顿(Wollaston)发明了一种仪器，通过测量放置在透明物质上的一块玻璃打火石立方体对光的总的反射角，从而自动地测量该物质的折射率.（in 1802,Wollaston constructed a device that automatically measured the optical index of a substance through the angle of total reflection in a flint cube placed on this substance.），在此过程中，正如牛顿所做的一样，沃拉斯顿使阳光射入一个黑暗的房间.然而，沃拉斯顿用狭缝代替了牛顿的圆形小孔，我们可以推测，之所以用狭缝代替圆孔，是因为细小的圆孔会在圆孔周围出现颜色的重叠而不利于获得单色光用于计算透明物质的折射率.他注意到有时候光谱中缺失了一些光 - 出现一些很细的黑线.他用一种不纯的三棱镜观看光的散射(色散)，使他推断太阳光谱只有 4 种颜色，这影响了托马斯杨，改变了杨自己建立的对视觉颜色的理论.

与此同时，沃拉斯顿发现烛光的光谱不是连续的，其中有可区分的有颜色的线，这样，热气不发出连续的光，而是有一些线.沃拉斯顿没有给出解释，用他的话说，就是 i cannot undertake to explain the dark lines.



太阳光谱中的黑线

在 19 世纪时，对于光学仪器制造商来说，透镜的设计依然是反反复复修改(trial and error)的事物.不同的透镜只有在满意的光学效果出来之后才会组合在一起.即便是像夫琅禾费(fraunhofer)这样努力寻找数学分析方法的人都被这样的问题干扰着，设计消色差透镜需要详细的关于玻璃如何弯曲、折射一组由单色光线组成的光的知识.这样的知识显然没有.这需要一种很纯的有色光源（比如黄光）来测试不同玻璃的折射率.

夫琅禾费光谱线

正是在制造消色差望远镜中需要的透镜的过程中需要精确测定玻璃的折射率，导致了夫琅禾费发现夫琅禾费线（fraunhofer lines）.

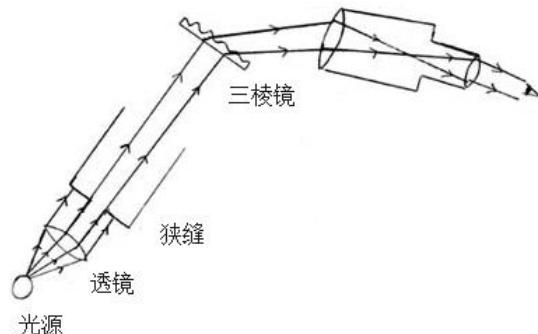
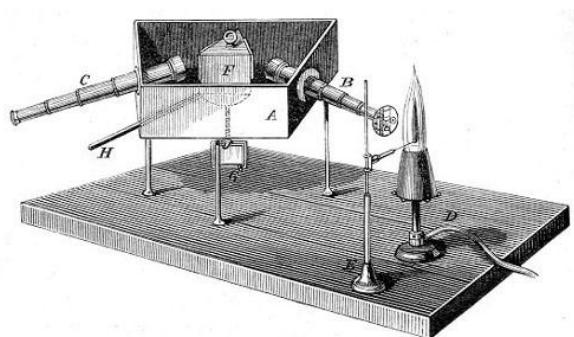
阻碍精确测定一种给定物质对光线的折射率的原因是太阳光谱中不同颜色之间没有精

确的界限，因而很难分开不同颜色用来测定物质对光线的折射率，由于太阳光谱中的不同颜色的光之间没有明显精确的界限，没办法选择其中一种颜色来测定某种物质的折射率，假如没有明确的界限，我们可以选择距离边界某一固定距离处的有色光来测定物质的折射率。为了克服这个困难，夫琅禾费做了很多试验来人工制造均匀的光，他用了灯和三棱镜。1814年，夫琅禾费用火焰（light of fire）的光看到了橙色光谱中有明亮的固定的线出现。这条线使夫琅禾费可以精确地测定不同玻璃的折射率。



钠的吸收谱线和发射谱线

夫琅禾费制成了第一台分光镜，它不仅有一个狭缝，一块棱镜，而且在棱镜前装上了准直透镜，使来自狭缝的光变成平行光，在棱镜后则装上了一架小望远镜以及精确测量光线偏折角度的装置。夫琅禾费点燃了一盏油灯，让灯光通过狭缝，进入分光镜。



夫琅禾费分光镜

他发现在暗黑的背景上，有着一条条像狭缝形状的明亮的谱线，这种光谱就是现在所称的明线光谱。在油灯的光谱中，其中有一对靠得很近的黄色谱线相当明显。夫琅禾费拿掉油灯，换上酒精灯，同样出现了这对黄线，他又把酒精灯拿掉，换上蜡烛，这对黄线依然存在；而且还在老位置上。

夫琅禾费想，灯光和烛光太暗了，太阳光很强，如果把太阳光引进来观测，那是很有意思的。于是他用了一面镜子，把太阳光反射进狭缝。他发现太阳的光谱和灯光的光谱截然不同，那里不是一条条的明线光谱，而是在红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的连续彩带上有无数条暗线，在1814到1817这几年中，夫琅禾费共在太阳光谱中数出了五百多条暗线；其中有的较浓、较黑，有的则较为暗淡。夫琅禾费一一记录了这些谱线的位置，并从红到紫，依次用A、B、C、D……等字母来命名那些最醒目的暗线。夫琅禾费还发现，在灯光和烛光中出现一对黄色明线的位置上，在太阳光谱中则恰恰出现了一对醒目的暗线，夫琅禾费把这对黄线称为D线。

光谱表明月亮和金星的光线都是太阳光的反射光

夫琅禾费发现太阳光谱中固定的黑线不随时间变化，不同季节、年月日，这些黑线始终固定在某个位置，因此这些黑线很可能不是地球大气层引起的，与地球无关。极有可能存在于太阳内部。之后他发现来自月亮和金星的光谱也具有太阳光谱一样的黑线。这是因为月亮和金星的光线都是太阳光的反射光。夫琅禾费因此推断，这些光谱中的线都来自太阳。此外他还观察了恒星（fixed star）的光谱，并且发现恒星的光谱中的黑线与来自太阳的不同，不同恒星的光谱中的黑线也不相同。有些恒星光谱中的线又与太阳光谱中的线一致。

夫琅禾费还有重大发现，那就是来自钠元素的黄色光谱中的明亮的黄色亮线与太阳光谱中两条黑色线（dark lines）D 一致，为什么油灯、油精灯和蜡烛的光是明线光谱，而太阳光谱却是在连续光谱的背景上有无数条暗线？为什么前者的光谱中有一对黄色明线而后者正巧在同一位置有一对暗线？这些问题，夫琅禾费无法作出解答。直到四十多年后，才由基尔霍夫解开了这个谜。

法国物理学者奥古斯丁·菲涅耳 (Augustin Fresnel, 1788–1827) 是法国工程师，是一位建筑师的儿子，1788 年出生于法国厄尔省布罗意 (Broglie)。他年少时在学习方面较迟钝，直到八岁时仍然不会阅读。十三岁时他进入法国卡昂中央理工学院 (École Centrale in Caen)，十六岁多进入巴黎综合理工学院，在那里他以优异的成绩证明了自己的天分。之后他进入国立桥路学校，1809 年毕业并取得土木工程师文凭，其后进入法国政府的一个大型集团。

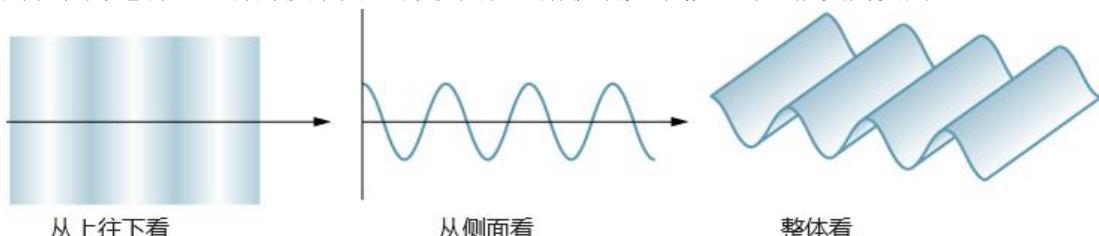
菲涅耳最初被分配到法国尼永修路，正是在尼永，我们找到了他对光学感兴趣的第一个证据。在 1814 年 4 月，拿破仑战败后被放逐到厄尔巴岛，修路工作被迫放缓，菲涅耳写了一封信给他的哥哥，说到：“我想要一些可以告诉我法国物理学家关于光的偏振性的书籍，几个月前我在《moniteur》上看到让-巴蒂斯特·毕奥已经向学术机构提交了光的偏振性的报告，我绞尽脑汁思考，始终不明白那是什么。”

1814 年年末，他依然没有这方面的任何信息。1815 年 3 月，觉得拿破仑从厄尔巴岛放回是对文明的攻击，于是他擅离职守，赶往图卢兹为保皇派战斗，但是很快受了伤，败退回尼永，回来后受到威胁，窗户都被打碎了。在拿破仑返回后的法国百日重建中，菲涅耳失去了工作并被监视，其后最终允许他回到位于马蒂厄的他母亲的家里。在那里他时间充裕地开始了光学实验。由于衍射方面的实验，使他相信光是一种波动，并开始了长达 10 年的研究以使他的观点发展为更易于理解的用数学描述的理论。

惠更斯发展了波动理论。但是由于他把光看成象声波一类的纵波，因此不能解释偏振现象。他的波动理论也不能解释干涉和衍射现象，因为那时还没有建立周期性和位相等概念。

惠更斯光波理论

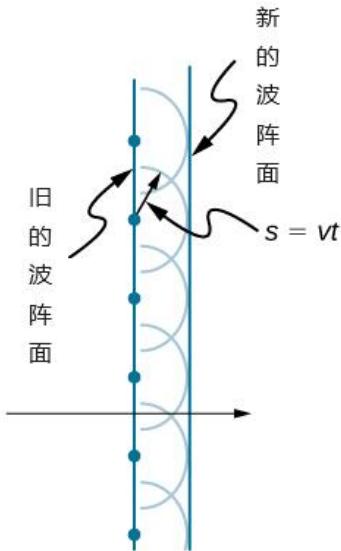
下图展示了从上方和侧面观察时横波的形态。可以想象光波就是这样传播的，尽管我们实际上看不到它在空间中摇摆。从上方看，波前（或波峰）如同俯瞰海浪一般呈现。侧面视图则表现为电场或磁场的波形图。上方视图在理解波动光学概念时可能更为实用。



从上方和侧面观察，横波（如电磁波光波）的传播方向与波前（或波峰）垂直，用光线表示。

惠更斯开发了一种有用的技术，可以详细确定波是如何传播的以及在哪里传播的。从某

从一个已知的位置开始，惠更斯原理指出，波阵面上的每个点都是小波的来源，这些小波以与波本身相同的速度向前传播。新的波阵面与所有小波相切。

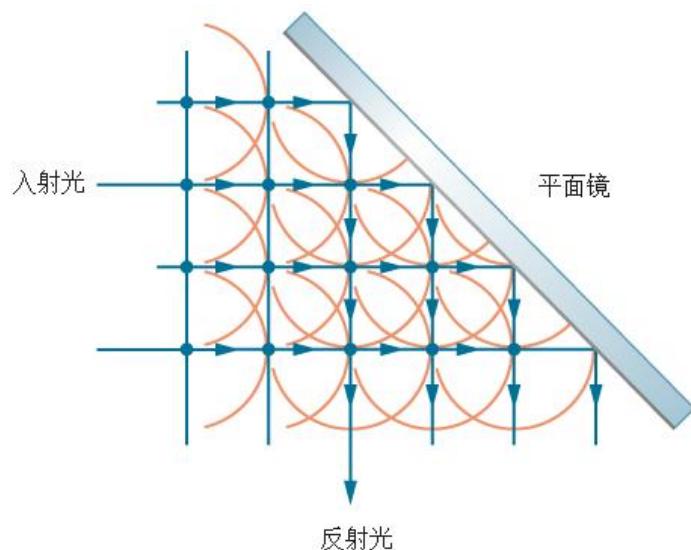


图显示了惠更斯原理是如何应用的。波前是长边，例如，随着波峰或波谷移动，波阵面上的每个点都发射出一个以传播速度 v 移动的半圆形波。我们可以在时间 t 之后绘制这些小波，使它们移动了距离 $s = vt$ 。新的波阵面是一个与小波相切的平面，也是我们预计波在时间 t 后的位置。惠更斯原理适用于所有类型的波，包括水波、声波和光波。它不仅在描述光波如何传播方面很有用，而且在解释反射和折射定律方面也很有用。此外，我们将看到惠更斯原理告诉我们光线如何以及在哪里干涉。

反射

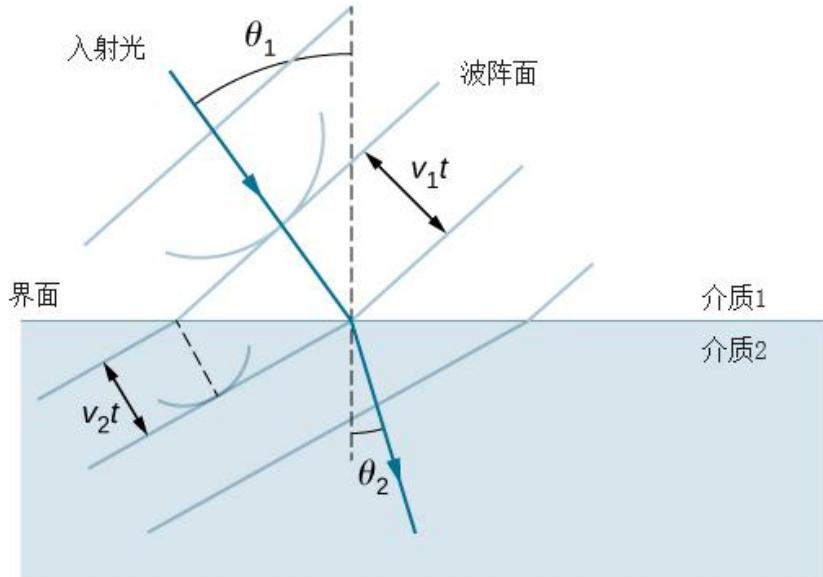
图显示了镜子如何以等于入射角的角度反射入射波，从而验证了反射定律。当波前撞击镜子时，小波首先从镜子的左侧发出，然后从右侧发出。更靠近左侧的小波有时间传播得更远，产生了沿所示方向传播的波前。

惠更斯原理适用于平面波前撞击镜子。所示的小波是在波前上的每个点撞击镜子时发出的。这些小波的切线表明，新的波前以等于入射角的角度反射。传播方向垂直于波前，如向下箭头所示。

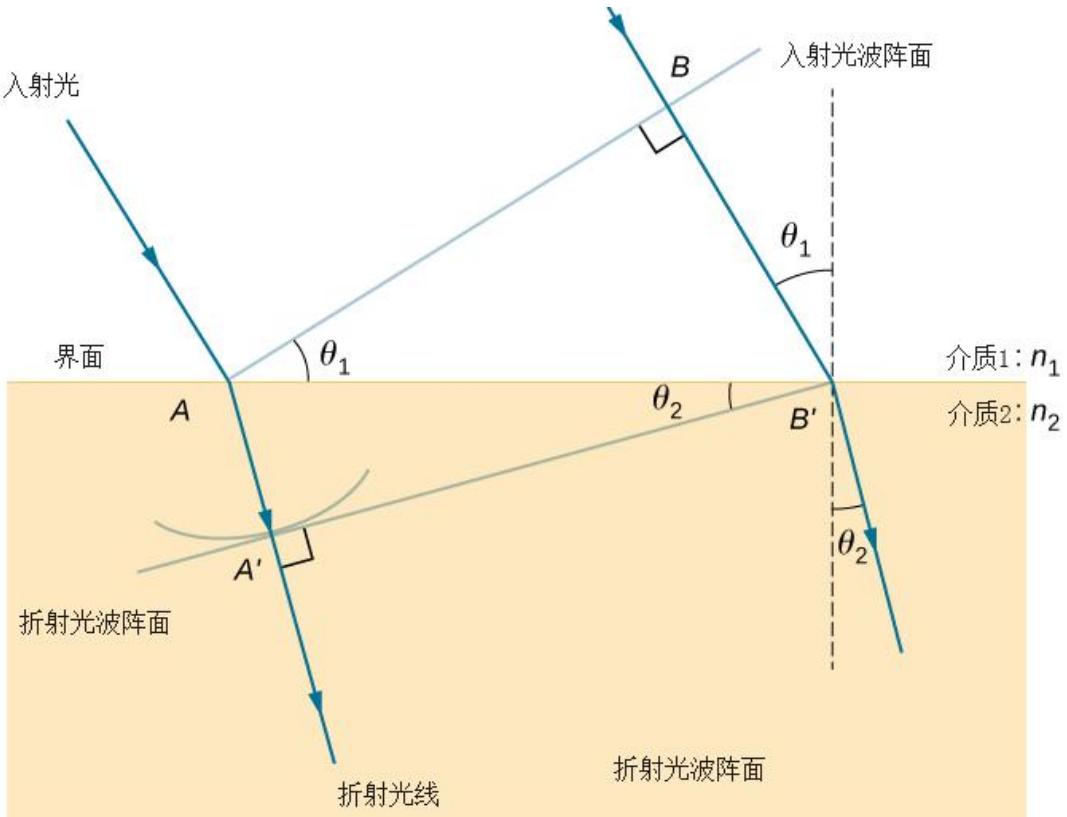


折射

折射定律可以通过将惠更斯原理应用于从一种介质到另一种介质的波阵面来解释。图中的每个小波都是在波阵面穿过介质之间的界面时发出的。由于光在第二介质中的速度较小，因此波在给定时间内不会传播得那么远，新的波阵面会如图所示改变方向。这就解释了为什么当光变慢时，光线会改变方向，变得更接近垂直线。光的折射定律可以从中的几何关系推导出来。



惠更斯原理适用于从一种介质传播到另一种介质的平面波阵面，在那里它的速度较小。光线向垂直方向弯曲，因为小波在第二种介质中的速度较低。



如图所示，入射波阵面刚刚到达界面的 A 点时，B 点仍在介质 1 内。经过时间 t ，来自 B 的小波以一定速度 $v_1 = c / n_1$ 到达界面上的 B，A 点的小波传播到介质 2 中的 A' 点， $AA' = v_2 t$ ，

其中 $v_2 = c / n_2$. 注意, 因为 $n_1 < n_2$, 所以 $v_2 < v_1$.

$$AB' = \frac{BB'}{\sin \theta_1} = \frac{AA'}{\sin \theta_2}$$

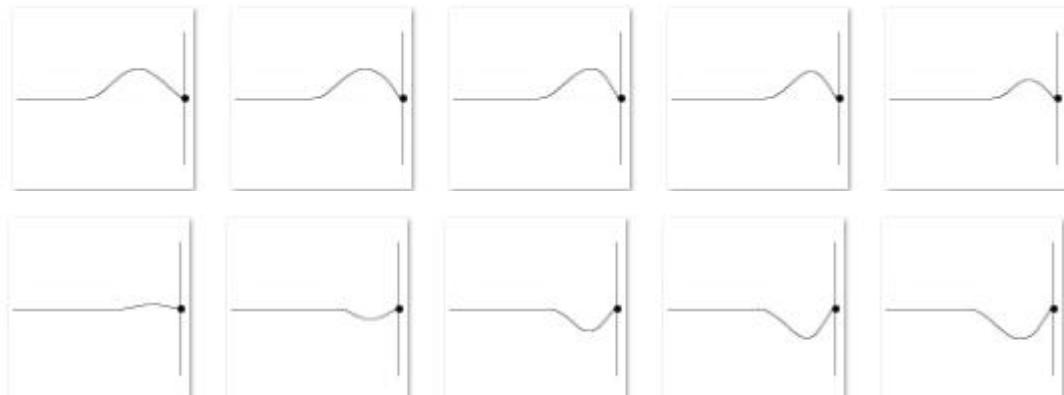
代入 v_1, v_2 得

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

托马斯·杨做了一系列实验证实光看起来有类似波的行为(杨氏双缝实验), 显示了光的波的特性并且证实光不是之前牛顿和其他人认为的是微粒.

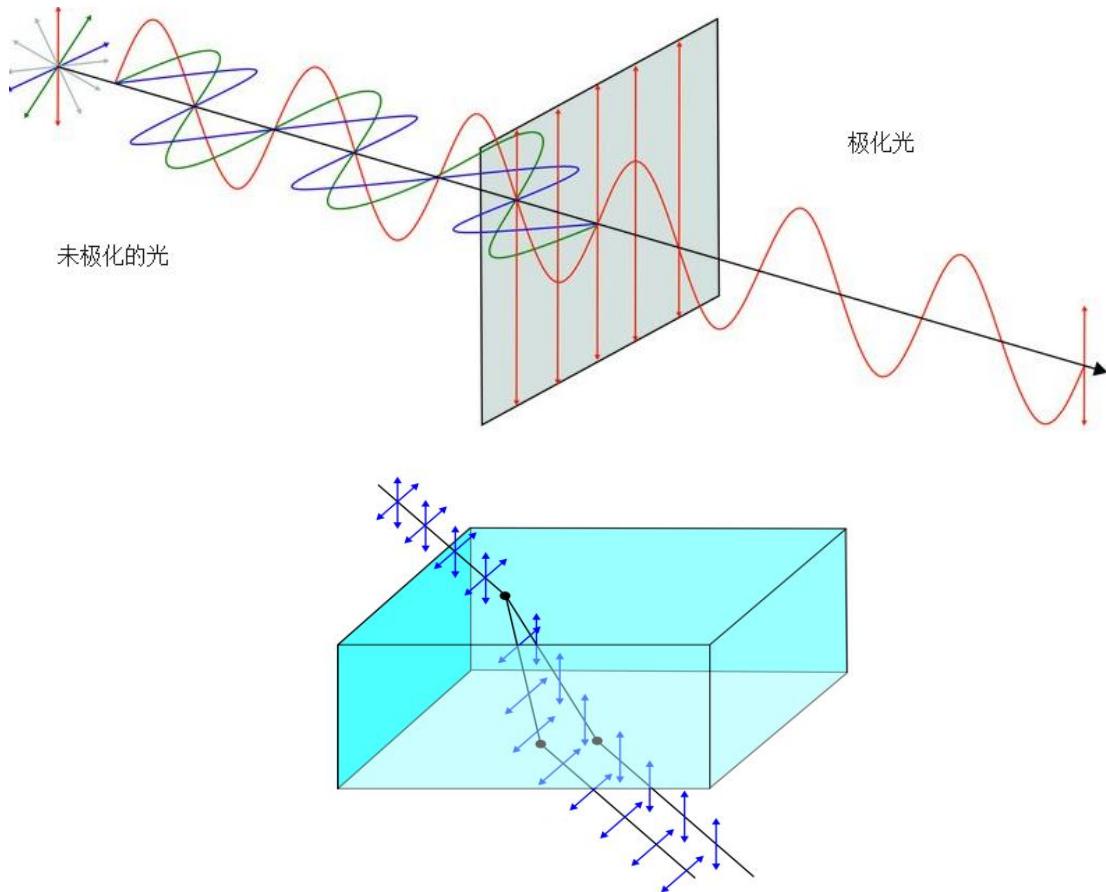
半波损失

菲涅耳在两端合在一起的、夹角几乎是 80° 的两块镜子前放了一个很小的光源, 经过必要的修正后获得正确的条件, 他看到从一块镜子反射的光线与另一块镜子反射的光线相互交错并干涉而产生的有色光带. 用干涉解释这些有色光带显得十分正确, 使用直线传播的光线以及参考到衍射器边缘的距离来预测光带的位置只有假设光线在衍射器边缘处有半个波长的损失才成立. 否则就会有一个无法解释的矛盾, 有光带的位置会出现暗带, 而有暗带的位置会出现光带. 他大胆地将惠更斯的波动理论与干涉原理相结合, 应用于衍射. 他假定每一个波前的弧上的每一点都产生一个新的波, 这些新的波通过衍射器并相互干涉.



右端固定点不会动, 导致反射波有半波损失. 半波损失是解释干涉必须的. 我们看左上角第一个图, 此时从左边传播过来的波刚刚到达界面处, 假如界面处的小黑点可以上下自由移动, 则经过四分之一周期后, 黑点将向上移动到最高点, 再经过四分之一周期, 黑点向下移动到平衡位置, 但是由于黑点不能自由移动, 导致这两个四分之一周期, 即半个周期损失了, 也就是损失了半个波长. 之后从第四分之三周期开始, 绳子上黑点左侧的点向下运动, 形成的波向左传播, 形成反射波.

菲涅耳决定用极化的光代替普通光来做普通的光线产生干涉的实验, 看看是否会有干涉产生. 最初的实验是与阿拉果一起于 1816 年开始的, 但是没有任何新的发现, 极化的光像普通光一样产生干涉现象. 菲涅耳质疑这些草率的测试, 几个月后开始了新的实验, 得到的结果完全不同, 借助阿拉果的帮助, 他确信无疑地展现出, 普通光线能够干涉的情况下, 极化了的, 极化面互相垂直的极化光不发生干涉, 相互之间不会发生作用.



极化面相互垂直的两束极化光不发生干涉的实验暗示，光的振动要么是横向的，要么是横向与纵向的组合。但是这两种假设似乎都不正确。流行的弹性理论持有的横波只在固体介质中才有，而向四周扩散的以太不应该与天文学中解释的自由的，没有束缚的行星的运动一致。那么如果光是横波，则不存在以太，光也不需要传播介质。

圆偏振光，偏振光实验证实光是横波

1817年，菲涅耳与他的同事阿拉果开始做实验来验证极化光在托马斯杨的衍射实验中的干涉影响，最初他们都认为光是纵波，但是实验后他们没办法以纵波为基础解释实验现象，阿拉果写信给杨，杨建议说，如果将极化光看做只有两个相互垂直的横向振动的波，而且没有纵向振动就可以解释。

光谱分析法（基尔霍夫和本生）

1850年基尔霍夫离开柏林前往布雷斯劳大学当助理教授，在布雷斯劳时，他认识了于1851-52年来布雷斯劳度过学术年（academic year）的本生，他们之后成为牢固和永久的朋友。1854年，本生在海德堡工作，他鼓励并支持基尔霍夫过来。基尔霍夫答应了担任物理教授的工作并且在海德堡与本生开始了一段成果丰富的合作。本生设计了一种锌碳（zinc-carbon）电池验证法拉第关于化学与电的发现。1833年，法拉第经过一系列的实验，发现当把电流作用在氯化钠的水溶液时，能够获得氯气。

1849年，米歇尔·福柯（foucault）检查碳弧灯的光谱时，注意到了一条与太阳光谱夫琅禾费线的D线相似的线。他想要比较一下这两种光谱，所以决定让两种光谱重叠在一起看看。他使太阳光线通过碳弧灯，然后使两种重合的光线透过一块三棱镜，发现两条线确实在同一位置，这样做使得太阳光谱中的D线增强了（strengthened）。移开太阳光后，碳弧灯光谱中又显示出一条明亮的D线。基尔霍夫并不知道福柯的实验。

据说基尔霍夫有能力使他的学生睡大觉而不是使他们有兴趣.但是他的学生包括赫兹和普朗克.

基尔霍夫已经开始尝试揭开太阳光谱之谜.

本生埋头在他的实验室里进行着一项有趣的实验，他把含有钠、钾、锂、锶，钡等不同元素的物质放在火焰上燃烧，火焰立即产生了各种不同的颜色.本生心里十分高兴，他想，也许从此以后可以根据火焰的颜色来判别不同的元素了.可是，当他把几种元素按不同比例混合再放在火焰上烧时，含较多元素的颜色十分醒目，含较少元素的颜色却不见了.看来光凭颜色还无法作为判别的依据.

本生与基尔霍夫经常在一起散步，讨论科学问题.有一天，本生把在火焰实验中所遇到的困难讲给基尔霍夫听.这位物理学家对夫琅禾费关于太阳光谱的实验了解得很清楚，甚至在他的实验室里还保存有夫琅禾费亲手磨制的石英三棱镜.基尔霍夫听了本生的问题，想起了夫琅禾费的实验，于是向本生提出了一个很好的建议，不要观察燃烧物的火焰颜色，而应该观察它的光谱.他们越谈越兴奋，最后决定合作来进行一项实验.

基尔霍夫在他的实验室中用狭缝、小望远镜和那个由夫琅禾费磨成的石英三棱镜装配成一台分光镜，并把它带到了本生的实验室.本生把含有钠、钾、锂、锶，钡等不同元素的物质放在本生灯上燃烧，基尔霍夫则用分光镜对准火焰观测其光谱.他们发现，不同物质燃烧时，产生各不相同的明线光谱，比如钠产生两条明亮的黄色谱线.这些谱线称为发射线，因为它们看起来像是元素发出的光线.接着，他们又把几种物质的混合物放在火焰上燃烧，他们发现，这些不同物质的光谱线依然在光谱中同时呈现，彼此并不互相影响.于是，根据不同元素的光谱特征，仍能判别出混合物中有那些物质，这种情况就像许多人合影在同一张照片上，每个人是谁依然可以分得一清二楚一样.就这样，基尔霍夫和本生找到了一种根据光谱来判别化学元素的方法——光谱分析法.

当他们用同样的方法分析太阳光谱时，在不同颜色区看到一些黑线，这些线被称为吸收线，因为颜色好像从这些狭小的线（bands）上去除了一样.他们对太阳光谱中黄色区域中的两条D线感兴趣.它们与钠盐在本生灯上燃烧后发出的光线的光谱中的两条明亮的黄色线一致.基尔霍夫注意到，当阳光通过钠的火焰时，重叠的光谱中，夫琅禾费线会更黑（became darker）.经过一夜的思考后，基尔霍夫认为，黑线是被原子吸收了的.太阳内部发出的光线被太阳大气中的钠吸收了.

除了在实验室中使太阳光通过稍低温度的本生灯火焰上燃烧的不同元素（纳，铜）而使太阳的吸收谱线更黑，来证明太阳谱线是被相应物质吸收的，以及同一种物质在实验室中发出亮线光谱经过低温的相同物质的气体时亮线被吸收，也可以证明太阳的吸收光谱是被低温大气吸收的.

太阳的吸收谱线是被太阳大气吸收还是被地球大气吸收的呢？通过在一天的不同时段，不同的天气条件，不同的年份和季节观察太阳的吸收光谱都没有变化可知，太阳的吸收光谱不是被地球大气吸收的，因为在这些不同时段和天气条件下，地球大地会有不同的变化，而这并没有影响太阳吸收光谱.

电学

电是一种力

在对电的具体认知很多年前，人们就已经知道发电鱼（electric fish）会发出电击。根据公元前 2750 年撰写的古埃及书籍，这些鱼被称为“尼罗河的雷使者”，是所有其它鱼的保护者。大约 2500 年后，希腊人、罗马人，阿拉伯自然学者和医学家又出现关于发电鱼的记载。有几位远古的作者，比如老普林尼和古罗马医生斯克里波尼乌斯·拉尔古斯（Scribonius Largus）在书中证实了从鲶鱼和电鳐电击产生的麻木的效果，并且知道这类电击可以通过传导体传输。古罗马医生拉尔古斯也在他的大作《Compositiones Medicae》中，建议患有像痛风或头疼一类病痛的病人，去触摸电鳐，也许强力的电击会治愈他们的疾病。

阿拉伯人极有可能是最早认识闪电的特性和电的其他来源的人，早于 15 世纪以前，阿拉伯人就创建了“闪电”的阿拉伯字“raad”，并将这个字用来称呼电鳐。

在地中海区域的古老文化里，很早就有文字记载，将琥珀棒与猫毛摩擦后，琥珀棒会吸引羽毛一类的物质。公元前 600 年左右，古希腊的哲学家泰勒斯（Thales, 640-546 BC）做了一系列关于静电的观察。从这些观察中，他认为摩擦使琥珀变得磁性化。这与矿石像磁铁矿的性质迥然不同；磁铁矿天然地具有磁性。泰勒斯的见解并不正确。但后来，科学会证实磁与电之间的密切关系。

公元 551 年，意大利数学家卡当（Jerome Cardan）判定琥珀可以吸引轻小物体，而磁石只能吸铁，这是历史上第一次磁与电的联系。

英国医生、物理学家吉尔伯特在 1600 年出版的著作《论磁》中也叙述了他对电现象的研究内容。他发现，玻璃、硫磺甚至钻石摩擦过后，也像琥珀一样可以吸引轻小物体。他首先指出，这是与磁现象有本质区别的另一类现象。因为磁石无需摩擦即可吸引铁，且只能吸引铁，并能指向南北，而玻璃、硫磺、钻石，琥珀摩擦过后可以吸引很多不同的轻小物体，但是不能指向南北，因此吉尔伯特将这种与磁石的吸引特性相区别的特性命名为电，他新造了一个拉丁字 *elecricus*（拉丁意思是琥珀）来表示经过摩擦后可以吸引轻小物体的特性（性质）。英语中根据 *elecricus* 产生了新的词汇 *electric* 和 *electricity*，这两个新的英语词汇是另一个英国物理学家托马斯·布朗在几年后基于吉尔伯特的研究继续研究电后，写的书里用来描述自己的研究所用的词汇。

吉尔伯特对电的研究内容包括：

玻璃、硫磺甚至钻石摩擦过后，也像琥珀一样可以吸引轻小物体；

磁石无需摩擦即可吸引铁，且只能吸引铁，并能指向南北；

玻璃、硫磺、钻石，琥珀摩擦过后不能指向南北；

给出了磁的吸引特性与电的吸引特性的区别。



吉尔伯特制成了第一台验电器，他的验电器是一根架在支架上的很轻的针，当有电出现在周围时会引起针的转动，并用它证明了离带电体越近，吸引力越大，还指出电引力沿直线；带电体被加热或放在潮湿的空气中，它的吸引能力就消失了。

1646 年，沃尔特·查尔顿（Walter Charlton）创造了单词 *electricity* 来解释玻璃、硫磺、钻石，琥珀摩擦后的吸引性。

盖利克（Ottovon Guericke, 1602-1686）德国物理学家。1672 年左右，他制作了第一台静电起电机，这是一个装在轴上直径十多厘米可以旋转的硫磺球，在球旋转时，用手压住球，

就可以使球起电，比传统的摩擦方法有效得多。他用这台机器进行了电学研究，发现了电排斥、感应起电及电致发光现象（在黑暗中，带电硫磺球发光）；用一小片毛织品接触旋转硫磺球时会产生巨大的火花。他还发现电荷行进到亚麻线的末端，因而成为发现电排斥及电传导现象的前驱。



盖利克的静电起电机



亚麻线

电的作用力会传递，导体

格雷大约出生于 1670 年左右，原来是一个染匠。但是，他特别喜欢科学的研究，几乎把业余时间都用来进行科学实验了。经过多年努力，格雷终于成为英国的一位大物理学家，并且把人类对电的探索引上了进行实验研究的正确道路。早在 1720 年前，格雷就开始研究电现象。当时，人们只知道琥珀、水晶、硫磺、树脂等刚性物体摩擦后可以吸引轻小物体，也就是说，它们能够带电。格雷通过一系列实验又发现了头发、羽毛、丝绸等柔软物体摩擦后也可以带电。他把这些发现写成了一篇论文：《关于一些新电学实验的说明》。论文一发表，就引起了同行的极大关注，为了表彰这一重大发现，伦敦皇家学会还将第一枚科普利奖章授予格雷。格雷的晚年是在养老院里度过的。在养老院期间，他仍然坚持研究电学问题。1729 年的一天，格雷得到一支两端带软木塞的玻璃管，他就拿这支管子做起了电学实验。他首先摩擦玻璃管使其带电，然后用玻璃管吸引羽毛，观察它们的相互作用。这时候，有着敏锐观察力的格雷发现了一个新的现象，软木塞和玻璃管一样，也能够吸引羽毛。可是，软木塞并没有受到摩擦，怎么会带电呢？格雷想，是不是通过玻璃管而传导带电的？想到这里，他就进一步用木杆、金属丝、绳索、细线等其它物体进行实验，结果发现了自然界存在着两类不同性质的物体，一类物体可以传导电力，另一类物体则不能传导电力。1733 年，格雷正式发表了他的这项研究成果。

格雷为了研究电究竟能传多远，用木棍、麻线、钓鱼竿等做过多次试验，最长的达 650 英尺（约 200 米）。实验中为了能把用来传电的麻绳吊起来，他曾用丝线和铜丝悬挂麻绳，结果发现用铜丝时，电就不能沿麻绳传导了。他猜想，可能是电通过铜丝和铁钉跑掉了。进一步的研究发现，电通过金属比通过丝绸更容易传导，因此，把电容易通过的物体叫导电体（如金属），而把电难以通过的物体叫非导电体（如丝线）。格雷还做过一个有趣的实验：把一

小孩用几根粗丝绳水平吊起来，用摩擦过的带电玻璃管接触小孩的胳膊，孩子的手和身体便能吸引羽毛和铜屑。这表明，人也是导体。

接下来的几天里他不断地延长他的螺纹线（他只有一小段线并且不知道金属作为导体的重要性），并拜访了有钱的朋友格兰维尔·惠勒（Granville Wheeler），用带子系紧细线上下穿过他们庄园的大房间，然后从塔顶拉到院子，距离有 800 英尺（243.84 米）。

在这个过程中，格雷和惠勒发现了用丝线（导电性比他们用的大麻包线导体弱）使他们的线与地分来绝缘的重要性，他们发现系导线的线会漏电，并且电会在弯曲的导线里传递且不受重力的影响（原以为电和水流一样从高处流向低处）。

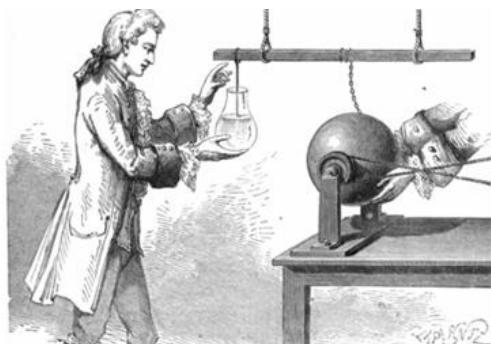
从这些试验明白了导体和绝缘体的区别。格雷的电学研究成果引起了法国科学家迪费的注意，使他对电学研究产生了极大兴趣。迪费 1698 年 9 月 14 日出生于法国巴黎，曾在法兰西陆军中服役，退伍后成为法兰西学院的一名化学家。1732 年，又当上皇家植物园的监督。此时他的闲暇时间较多，于是就利用这些时间做他爱好的物理实验。迪费 1732 年拜访了格雷和惠勒，看了他们的实验，回到法国后形成了他关于电的“2 种流体”的理论，这个理论被他的同事阿贝·诺莱（Abbé Nollet）采纳，但是部分遭到富兰克林在费城的团队比维斯和沃森（Watson）的反对，他们已经提出单流体/2 元状态的理论（也就是之后由沃森给出的正负电荷的名称）。

牛顿死后，斯劳恩（Sloane）继承皇家学会会长一职，格雷获得了因牛顿的内讧而迟来的认可。

莱顿瓶，电容，正负电，雷电是放电现象

1745 年，普鲁士的克莱斯特利用导线将摩擦所起的电引向装有铁钉的玻璃瓶（依然把电看做流体）。当他用手触及铁钉时，受到猛烈的一击。

德国科学家克拉斯特主教（Ewald Georg von Kleist，1700 年–1748 年）和荷兰的慕欣勃罗克（Pieter van Musschenbroek）基于电是一种流体的理论（吉尔伯特也持有这种观点，以及电可以传导的特性也容易产生流体的理论），希望用装有水的广口瓶捕获这些流体。1744 年，克拉斯特（Kleist）用线（当然是导线）连接广口瓶和箔片，并用摩擦起电机给箔片带电。



在穆斯申布鲁克的实验室发现莱顿瓶

由旋转玻璃球静电发生器产生的静电通过悬挂在杆上的链条传递到助手安德烈亚斯·库纳斯手中握着的玻璃杯中的水里。水中积累了大量电荷，而库纳斯握着玻璃杯的手上则带有相反电荷。当他触摸浸在水中的金属线时，感受到了强烈的电击。

英国学者吉尔伯特是电磁学研究的先驱者之一，在 1600 年出版《论磁体》一书中，吉尔伯特就把物体区分为“电物质”和“非电物质”。和吉尔伯特一样，格雷也认为“电物质”能够带电，“非电物质”不能带电。像软木、金属、人体等都属于“非电物质”。可迪费不同意这一看法。为了证明人体也能够带电，迪费勇敢地用自己的身体进行实验。1733 年的一天，他请来了几位助手，让他们把自己绑起来吊到天花板上。然后，让助手给他的身体带电。在实

验中，他突然感到了震动和打击，并听见霹雳啪啦的声响，还看到火花，他意识到，这是他和助手都被电击了。遭受电击虽然很痛苦，但是却用铁的事实证明了人体是可以带电的。通过一系列用其他物体做的实验之后，他终于否定了“非电物质”不能带电的错误说法，证明了所有的物体都可以带电。

迪费在实验中改进了吉尔伯特的验电器，将原来验电器的金属细棒用金箔代替，并用这种仪器检验电荷。他在实验中发现，金箔和带电玻璃棒接触之后，如果让带电玻璃棒再次接近金箔，它们之间就相互排斥；此时，他又把一块经过摩擦后带电的硬树脂（如松香、琥珀）放到刚才的金箔附近，竟然发现金箔受到了树脂吸引。这是他原来根本没有想到的事情，他认为带电体之间都是相互排斥的。现在，金箔的电受到玻璃上电的排斥，又受到树脂上电的吸引。这一发现使他认识到玻璃上的电和树脂上的电是不同的。经过进一步研究和实验之后，迪费终于得出了结论：有两类性质不同的电，一类是玻璃和水晶等透明固体摩擦后所带的电，他把这种电叫做“玻璃电”；另一类是琥珀、硬树脂和封蜡等树脂质物体摩擦后所带的电，他称为“树脂电”。至此，就发现了“玻璃电”和“树脂电”。通过大量实验，迪费又证明了同类的电互相排斥，而不同类的电则互相吸引。

天电被引下来了

“玻璃电”和“树脂电”的发现，首次把不同性质的电区分开来，迪费的这一重大贡献，使人类对电的认识达到一个新的阶段。继迪费之后，另一位物理学大师——富兰克林通过研究进一步提出了正电和负电的概念，又使人类对电的认识更加深化。

富兰克林是美国著名的政治家，科学家。1706年6月17日，他出生于美国的波士顿，其父亲是一位肥皂商。由于家庭贫寒，富兰克林12岁就在印刷厂当学徒工。在印刷厂，他白天工作，晚上如饥似渴地阅读着装订好的每一本新书和报刊。经过五年的岁月，富兰克林依靠勤奋和努力，已学习了许多文学、哲学名著和自然科学读物，从中汲取了丰富的知识营养。有了知识以后，他又到费城创办报纸。通过办报纸，使他成为政界名流。18世纪后半期，他致力于美国的独立斗争，是赢得独立战争胜利的领袖，从而也使他成为美国家喻户晓的民族英雄、立国之父。

莱顿瓶的发明使物理学第一次有办法得到很多电荷，并对其性质进行研究。1746年，英国伦敦一名叫柯林森的物理学家，通过邮寄向美国费城的富兰克林赠送了一只莱顿瓶，并在信中向他介绍了使用方法，这直接导致了1752年富兰克林著名的费城实验。

富兰克林的名字闻名于世，不仅在于他是一位政治家，更因为他是一位科学家，他用风筝捕捉雷电的故事就广为流传，脍炙人口。

1752年7月的一天，费城上空乌云密布，暴风雨将要来临。这时候，富兰克林和他的大儿子带着早已准备好的风筝，匆匆忙忙地奔向费城郊外的一间草棚，紧张地准备着他们将要进行的实验。一会儿，电闪雷鸣，大雨倾盆而下，狂风卷着一团团乌云在天空翻滚。此时，富兰克林冲出草棚，手拉着系风筝的麻绳，将一个大风筝快速地放到高空云层里去。突然，一道闪电掠过，就在这时，富兰克林感到手有些刺痛和麻木，这是他遭到了电击。但是，他并没有想到遭电击的痛苦，却高兴地喊了起来：“天电被引下来了。”接着父子俩又把天电引入莱顿瓶做各种电学实验。通过一系列实验证明了闪电就是电。

富兰克林的实验证明了“天电”与“地电”是同一性质的，破除了人们对雷电的迷信。同时，他的这些实验向人们揭示：表面上不同的电现象都具有同一本质，从而为发现“正电”和“负电”奠定了坚实基础。正电和负电概念的提出与迪费发现了“玻璃电”和“树脂电”的差别之后，创立了电的双流体学说。他在1733年发表了《论电》的重要论文，提出电的二元流体的假设，即存在“玻璃电”和“树脂电”两种电的流体。在电的双流体假设的基础上，迪费总结出物体带电的三种方式：即摩擦带电、传导带电和感应带电。



感应带电

富兰克林虽然同意电是一种流体的观点，但却不同意电的双流体学说，他提出了电的单流体理论。富兰克林指出：电是一种充斥于物体中的真正元素，他把这种元素称为“电火”，其它物质都吸引“电火”。如果一个物体散失了一些“电火”，这个物体就带“负电”；反之，若一个物体收集了一些“电火”，它就带正电。树脂质物体摩擦后会散失一些“电火”带负电，玻璃和水晶等透明固体摩擦后会收集一些“电火”带正电。所以，他就把“玻璃电”称为正电，“树脂电”称为负电。富兰克林又根据电的单流体理论指出，一个或多个物体可以获得另一个物体散失的“电火”，正电和负电必须等量出现。电荷既不能创生，也不能消失，而是在物体之间发生转移，这就是电荷守恒定律的重要思想。

在富兰克林所处的时代，人们对物质的微观结构一点也不知道，因而也就不可能揭示物体起电的真正原因。现在的科学研究表明，物质由分子组成，分子由原子组成，原子由电子和原子核组成，原子核由质子和中子组成，电子带负电荷，质子带正电荷，一般情况下，物体内电子和质子的数目相等，物体不带电。但是当物体失去了一些电子时，它的质子就多于电子，物体就带正电。当物体得到一些电子时，它的电子就多于质子，这时物体就带负电了。

虽然富兰克林关于电的单流体理论是不正确的，也不存在什么“电火”，但是他的研究仍然具有十分重大的意义，促进了电学研究的发展。自从富兰克林的研究工作之后，正电和负电的概念就成为电学的基本概念，在这些概念和电荷守恒定律的指导下，电学逐渐步入了定量研究的新阶段。

他用风筝将“天电”引了下来，把天电收集到莱顿瓶中，从而弄明白了“天电”和“地电”原来是一回事。他肯定了“起储电作用的是瓶子本身”，“全部电荷是由玻璃本身储存着的。”富兰克林正确地指出了莱顿瓶的原理，后来人们发现，只要两个金属板中间隔一层绝缘体就可以做成莱顿瓶（电容器），而并不一定要做成像莱顿瓶那样的装置。

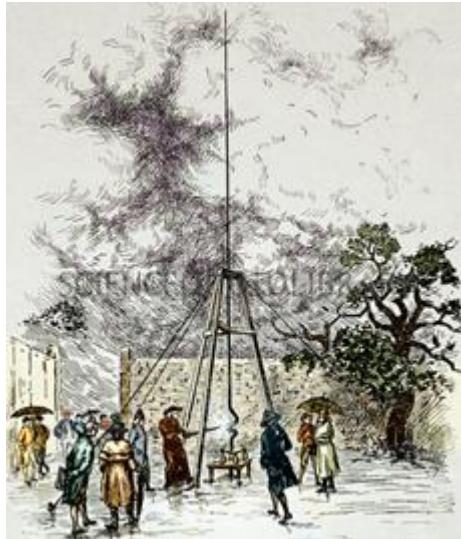
第一个把实验室人工产生的电（可称为地电）与闪电（可称为天电）产生联想的人是曾任伦敦皇家学会馆长的豪克斯比，1706年他使玻璃圆筒摩擦带电，研究它的发光，看到这种闪光与闪电很相似。次年另一英国人华尔使用琥珀摩擦起电获得更多的电，观察到放电不仅产生闪光，且产生类似雷鸣的响声，因此认为雷电很像“地电”的放电。格雷（Stephen Gray）在1735、1736年进一步从实验总结出结论，说：“天电与地电的电火花在本质是相同的”。11年后莱比锡大学语言学教授文克勒于1746年发表长达27页的论文，论证了他用莱顿瓶产生的强大的火花放电与雷电的相似，认定雷电就是一种电荷含量更多的火花放电。

到达这一步还只是一种科学的猜想，真正证实天电与地电的同一性的人是富兰克林，他把天电引到地上来做实验，才使人们信服无疑，这是雷电科学发展史上关键的一步。他到达这一步之前成功地做了一系列实验研究并做出许多重要发现，为这一步奠定了基础。首先他研究了电荷分布与带电体的形状的关系，从而认识了尖端放电，并改进了莱顿瓶，这使他可以获得大量的电荷，用以产生强烈的火花放电，因而在1751年伦敦出版的《电的实验与观察》上总结指出：“到1749年11月7日为止，可以举出人工放电与闪电在12方面是相似的，但是尚未能判明天电是否也可以被尖端所吸引。”于是决定设计实验来考察，这正是他的高明和所以成为雷电科学和防雷技术上有划时代贡献的科学家的成功之处。

实验分为两方面。第一方面是“岗亭实验”，所谓岗亭就是设计的一个可以容纳一个人的小房子，有遮雨的顶盖，在顶盖上方竖起一根铁棒，上端磨尖，铁棒固定在绝缘底座上，

小房子置于高塔或教堂顶上，人可以在小房内观察、做实验。

他的信发表后引起欧洲电学研究者的兴趣，法国皇帝路易斯对这一实验很重视，愿亲自看看，于是促使好多位学者积极进行岗亭实验，第一个成功的实验是 1752 年 5 月达利巴德（M. Dalibard）在巴黎郊区七、八英里外名叫马利的乡村中一座花园里做的，下图是他当年设计的实验装置的图纸，竖立的铁棒高 40 英尺（12.192 米）。5 月 10 日，值班人员看到雷雨云过顶上时，铁棒下端发出电火花，它与地电产生的电火花完全一样。



第二方面则是著名的风筝实验。1752 年 6 月的一天，阴云密布，电闪雷鸣，一场暴风雨就要来临了。富兰克林和他的儿子威廉一道，带着上面装有一个金属杆的风筝来到一个空旷地带。富兰克林高举起风筝，他的儿子则拉着风筝线飞跑。由于风大，风筝很快就被放上高空。刹那，雷电交加，大雨倾盆。富兰克林和他的儿子一道拉着风筝线，父子俩焦急的期待着，此时，刚好一道闪电从风筝上掠过，富兰克林用手靠近风筝上的铁丝，立即掠过一种恐怖的麻木感。他抑制不住内心的激动，大声呼喊：“威廉，我被电击了！”随后，他又将风筝线上的电引入莱顿瓶中。

他设计制作的风筝是用绢制的，骨架上装有金属尖端，用麻绳作风筝线，绳下端挂了一个金属圈，圈上吊了一个铜钥匙，用以把收集到的电荷引到莱顿瓶，金属圈上系一干燥的丝绳，人手拉丝绳站在遮雨的小屋里，以保证丝绳是不导电的。为了谨慎不致闹笑话，实验时只有 21 岁的儿子在场当助手。因此这一实验当时不为人知，也未留下日期和实验记录。1752 年 10 月 19 日他给好友的信中才透露了实验的情况：把风筝放上去后等了很长时间看不出效果。后来头顶上方到来一朵有希望带着电的乌云，可是仍看不到预想的带电现象。就在这一时刻，细心的富兰克林注意到麻绳上几丝松散出来的纤维竖起来互相排斥，他立刻把指关节靠近铜钥匙、就看到电火花从钥匙跳向指关节。于是他把铜钥匙放进莱顿瓶来收集“天电”，用这些“天电”做各种实验，证明它与“地电”完全相同。

库仑定律

1767 年，根据充电圆球的实验，普利斯特里成为历史上第一个猜测带电点电荷间的相互作用力满足平方反比律的人，尽管如此，他没有总结出这个定律，而是由库伦给出。1769 年，约翰·罗比逊宣告说带电小球之间的排斥力与它们的距离平方成反比，早于库伦 1785 年的预测。

1766 年，他做实验证明了带有相同电荷的两个球之间的静电排斥力的大小随着距离的 2 次方成反比，而指数的绝对误差小于 0.06。

1770 年年初，带电球之间的相互作用力与它们的距离和电量的关系已经被卡文迪许发现，但是没有发表。

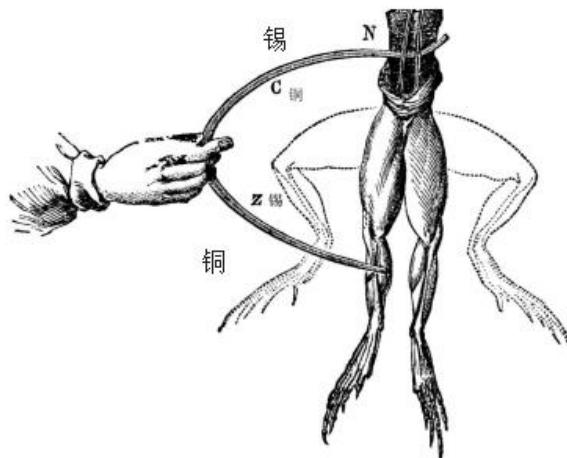
1785 年，库伦通过扭秤实验，得出并发表了带电球之间的相互作用力与它们的距离和电量的关系。

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

大量电荷的产生，电池

1769 年，瓦特发明了蒸汽机，蒸汽机可以带动摩擦起电机产生大量的电。

18 世纪中叶，人们进行电学研究，也发现了电力对人体的影响，医用电学这一领域因而诞生。1780 年 11 月的一天，意大利医生、物理学家与哲学家，现代产科学的先驱者伽伐尼在铁制平台上放了一只已经剥去皮的青蛙，准备做实验，当他把锡制的刀放在桌面上且搭在青蛙腿上时，青蛙腿抖动了一下。伽伐尼百思而不得其解。6 年后，一艘英国船从南美把几条电鳗带到伦敦。电鳗是生长在南美的一种特殊的热带河鱼。当地土著人都知道在捕捉电鳗时会遭到它狠狠的一击，捕鱼人因此会身体灼痛、发热、发胀、发麻。于是土著人就利用电鳗的这种攻击来治疗风湿痛。这次由轮船带来的电鳗被放养在伦敦的水族馆里，引起了市民的极大兴趣。有人去摸鱼的头部，尝到了攻击的滋味，这种滋味与莱顿瓶放电时给人的电击是一样的。后来，有位科学家让电鳗给莱顿瓶充了电，从此大家都相信了电鳗的攻击是一种动物放电现象。消息传到意大利，伽伐尼顿觉眼前闪过一道亮光。6 年前的往事又历历在目。青蛙颤动的原因并不是起电机放电，也不是大气放电，而是在于青蛙体内本身就储藏着电。是啊！世界上有着各种各样的电：有摩擦产生的玻璃电和树脂电；有富兰克林发现的空中的电；还有我发现的动物身上的电，也就是动物电。想到这里，伽伐尼兴奋地高声背诵起德国哲学大师谢林的名言：“啊，电是宇宙的活动，宇宙的灵魂！”为了证实自己的想法，1786 年 9 月 20 日伽伐尼在一间密闭的房间里做了这样的实验：他用铜钩勾住蛙腿，平放在玻璃板上，再用一根细长的弯铁杆，一端去接触铜钩，另一端去碰蛙腿。果然看到了蛙腿会颤动。但是换一根玻璃弯杆去试验，青蛙却一点也不会动。这样就更证实了伽伐尼的设想，动物体内存在着“动物电”，金属弯杆只是起着一种传导作用。于是伽伐尼在 1792 年发表了《论肌肉中的电力》一文，向科学界宣布他对“动物电”的论述：“在紧缩现象发生时，有一种很细的神经流体从神经流到了肌肉里去了，这就像莱顿瓶中的电流一样……”伽伐尼的研究成果立即受到了欧洲学术界的普遍赞扬，大家推崇说这是科技史上一件有意义的大发现。



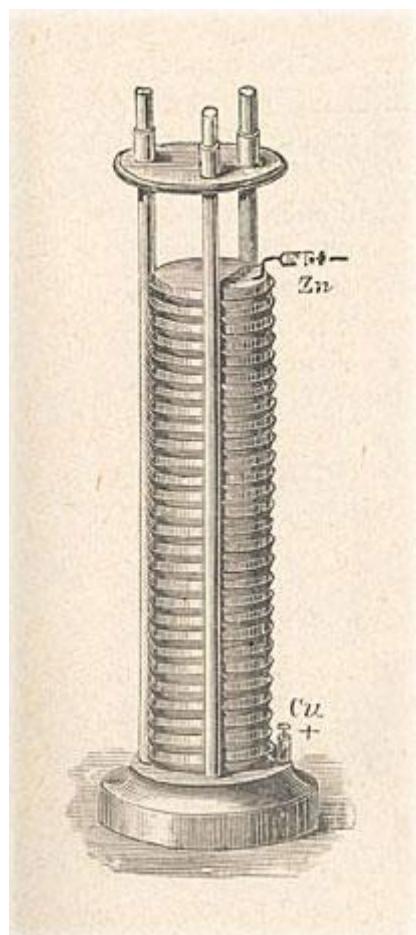
帕维亚大学的实验物理学教授亚历山德罗·伏特重复并检验了伽伐尼的实验，他是最早这样做的科学家之一。起初他接受动物电理论，然而后来他开始产生怀疑。伽伐尼的理论认为，电流传导是由动物的腿（或身体其它部分）内含有的特殊电力产生的；而伏特提出，电流传导是通过伽伐尼在试验中用来连接神经和肌肉的金属产生的。伽伐尼相信动物电来自骨盆中的肌肉；反对这一理论的伏特则提出，动物电是摩擦青蛙皮导致的一种物理现象，而不是“金

属电”——也就是现在所说的电流（这种认识不正确）。

伏特在1792-1796年重复伽伐尼的实验时发现，只要有两种不同金属互相接触，中间隔以湿的硬纸、皮革或其他海绵状的东西，不管有没有蛙腿，都有电流产生，从而否定了动物电的观点。伏特认识到蛙腿收缩只是放电过程的一种表现，两种不同金属的接触才是电流现象的真正原因。

根据各种金属接触的实验结果，伏特列出了锌-铅-锡-铁-铜-银-金的次序，这就是著名的伏特序列。其中两种金属相接触时，位于序列前面的都带正电、后面的带负电。

1800年伏特用锌片与铜片夹以盐水浸湿的纸片叠成电堆产生了电流，这个装置后来称为伏特电堆，他还把锌片和铜片放在盛有盐水或稀酸的杯中，放多个这样的小杯子串联起来，组成电池。他指出这种电池“具有取之不尽，用之不完的电”，“不预先充电也能给出电击”。伏特电堆（电池）的发明，提供了产生恒定电流的电源——化学电源，使人们有可能从各个方面研究电流的各种效应。从此，电学进入了一个飞速发展的时期——电流和电磁效应的新时期。



伏特电堆

电磁学

电与磁，奥斯特实验

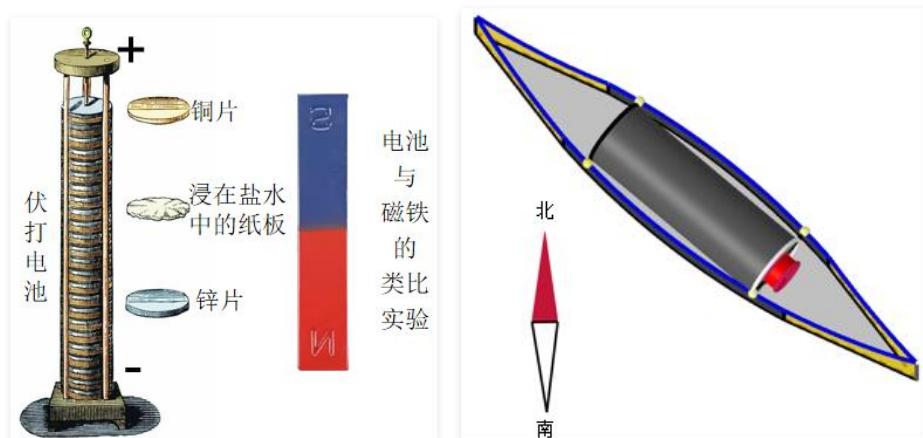
长期以来，磁现象和电现象一直是被分别进行研究的，特别是吉尔伯特对电和磁的现象进行分析对比后断言，**电和磁是两种截然不同的现象**后，很多科学家都认为电和磁之间不可能有什么关系。法国物理学家库仑曾证明：“**电与磁是完全不同的实体**”；另一位法国物理学家，安培定律的创立者安培也说过：“电和磁是相互独立的两种不同的流体”；英国物理学家、光的波动说的奠基人托马斯·杨在他的《自然哲学讲义》中说：“没有任何理由去设想电与磁之间存在任何直接的联系。”

伏特电池堆的发明为电和磁之间增加了一个新的类比。一个电池堆有两个相反的极，因此与磁铁非常相似。寻找电池堆和磁铁之间的相互作用，以及尝试用磁铁产生电效应（反之亦然）是很自然的。

因此，在19世纪初，人们普遍认为电和磁之间应该存在深刻的对应关系，在某些情况下，磁铁和电池堆可以产生相似的效果。除了电和磁之间的特殊类比外，还有另一个刺激因素来寻找不同自然“力”之间的相互关系。奥斯特（Ørsted）深受康德和自然哲学运动的影响，该运动声称整个宇宙是一个有机体，具有产生所有自然力量的重要灵魂。因此，电、引力、磁力、光、热、化学亲和力和其他自然力量都是同一宇宙力量的表现，应该被视为密切相关的。

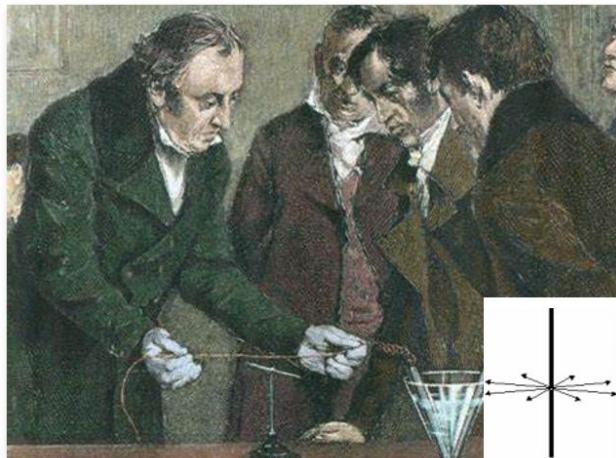
也有一些人猜测电和磁之间可能存在着某种联系。一位名叫威克菲尔德的小商人，就曾描述过雷电使他箱子中的刀、钢针磁化的现象；1751年，富兰克林发现莱顿瓶放电可以使焊条、钢针磁化或退磁。1774年，德国巴伐利亚电学研究院为了激励科学家们深入研究电和磁之间的关系问题，提出了一个有奖征文题目《电力和磁力是否存在实际的和物理的相似性？》不少人去努力探索，但都没有取得什么成果。

在19世纪，最早发现电的磁效应的尝试是以伏特电池堆和磁铁之间的类比为指导的。这两个装置在相对的两侧都有两极。使用伏特电池堆在磁针上产生吸引力或排斥力是很自然的。



伏打电池堆与磁铁的类比实验

现在，当人们注意到开路中伏特电池堆的电极不会产生磁效应吸引铁时，下一个尝试可能是在伏特电池堆处于活动状态时，即在闭路中寻找效应。同样，最自然的类比会导致这样的假设，即连接线变成了磁铁，一端有一个磁极，另一端有另一个磁极——就像一根长的磁化铁丝。电池活跃时，导线类似一根磁化铁丝，磁力应该沿着导线方向，磁针指向导线（垂直于导线）的话，长导线一端应该会吸引或排斥磁针。



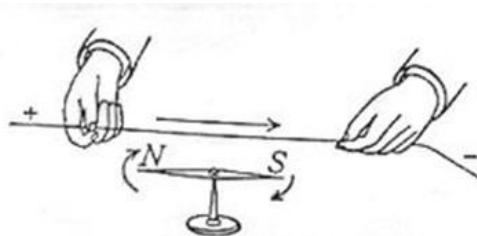
磁针垂直于导线时，导线与磁针两端没有相互作用

毕业后，奥斯特得到了一笔奖学金使他有机会去国外旅行，在拜访德国时认识了德国物理学家、化学家里特（Johann Wilhelm Ritter, 1776–1810），里特在电和磁方面的观点据说使奥斯卡觉得电和磁之间似乎有某些联系，在当时，没有任何实验支持，只是纯粹的猜测。当富兰克林发现莱顿瓶放电能使钢针磁化以后，奥斯特更坚定了自己的观点，他认为：电可以转化为磁是不成问题的，关键问题在于要寻找转化的条件。1811年，奥斯特在《对新发现的化学自然定律的看法》一文中，提出用电流实验来弄清楚潜在状态下的电是否对磁具有什么作用。第二年，在这本书的修订本《对化学力和电力的同一性》一文中，奥斯特进一步论述了电流与磁的关系，并进行了实验，但仍未能发现电对磁的作用。

困难和挫折并未使奥斯特畏缩，他毫不气馁，继续不断思考，反复进行实验，探究电和磁的关系。化学家 J.G. 佛克哈默曾担任过奥斯特的抄写员，他非常钦佩奥斯特坚韧不拔的精神。在奥斯特逝世一周年纪念会上，他深情地怀念道：“奥斯特一直在探索这两种巨大自然力之间的关系。他过去的著作都证明了这一点，我在 1818 年到 1819 年每天跟随在他左右，可以用自己的经历说明，发现至今仍然很神秘的（电和磁）联系的想法一直萦绕在他的心中。” 1819 年冬至 1820 年春，奥斯特在哥本哈根开办了一个讲座，专门讲授电、电流及磁方面的知识，讲座吸引了许多物理知识的爱好者。

1820 年 4 月的一天，在哥本哈根的一个讲演厅里，座无虚席。大家聚精会神地倾听着奥斯特的演讲。奥斯特深入浅出地讲解着电学知识，为了让听众较容易地理解那些深奥的电学原理，奥斯特边讲边做演示实验。

在讲课过程中，奥斯特突然想到一个问题：过去许多科学家在电流方向上寻找电流对磁体的效应都没有获得成功，很可能电流对磁体的作用不是“纵”向的，而是“横”向的。于是，奥斯特把导线和磁针平行放置进行实验。当时，他用的电源是伏特电池，导线是一根细铂丝。当他把与伏特电池两端连接的导线平放，并与一枚支在支架上的小磁针平行时，他惊奇地发现：靠近铂丝的小磁针突然摆动起来，小磁针向垂直于导线的方向偏转了。小磁针发生偏转的现象，对听众来说，几乎是无动于衷，并没有引起任何一位听众的注意，然而，这一不显眼的现象却使奥斯特兴奋异常，多年盼望出现的现象，终于看到了，这重要的发现，使奥斯特欣喜若狂：这是电磁之间关系的一个确定的实验证据。



奥斯特实验磁针平行于导线

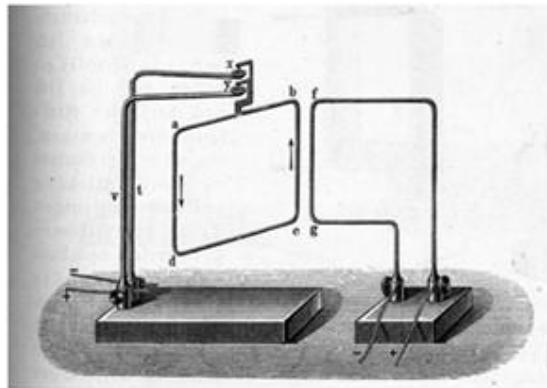
其实，这一现象早在 1802 年就曾被意大利法学家罗曼诺西发现，但未引起人们的注意。演讲一结束，奥斯特立即回到自己的实验室，开始对这种现象进行深入细致的研究。从 1820 年 4 月起，一直到 7 月，奥斯特整整耗费了 3 个月的时间，做了 60 多个实验。奥斯特分别将磁针放在导线的上方和下方，考察电流对磁针作用的方向。他先将导线的一端和伏特电池连接，然后把导线沿南北方向平行地放在小磁针的上方，当导线的另一端接通伏特电池的负极时，小磁针立即指向东西方向；如果将导线放在磁针的下方，小磁针就向相反的方向偏转。奥斯特还把磁针放在距导线远近不同的距离处，检验电流对磁针作用的强弱；他把玻璃板、木板或石块等非磁性物体放在导线和磁针之间，考察电流对磁针的影响，甚至把小磁针浸在盛水的铜盆中，小磁针都照样偏转。如果导线沿东西方向放置，无论将导线放在磁针的上方，还是下方，磁针始终保持静止，丝毫没有偏转现象。

在反复实验的基础上，1820 年 7 月 21 日，奥斯特正式宣布他发现了电流的磁效应，并在《关于磁针上电流碰撞的实验》一文中，详细论证和解释了他的发现。这篇论文发表在法国《化学与物理学年鉴》杂志上。这份杂志在当时很有影响，在刊登奥斯特的论文时，特别作了如下的说明：“《年鉴》的读者都知道，本刊从不轻易地支持宣称有惊人发现的报告……但是，至于说到奥斯特先生的文章，则其所得的结果无论显得多么奇特，都有极详细的记录为证，以至无任何怀疑其谬误的余地。”可见奥斯特的实验是多么具有说服力。

当时，奥斯特把电流对磁体的作用称为“电流碰撞”，或“电流冲击”，从实验中总结出了这种作用的基本特点。他认为：这种“电流冲击”只能作用在磁性粒子上，对非磁性物体是可以穿过的，磁性物质或磁性粒子受到“电流冲击”时，就发生了偏转现象。奥斯特成功地解释了通电铂丝附近磁针发生偏转的现象，证明了电可以转化为磁。

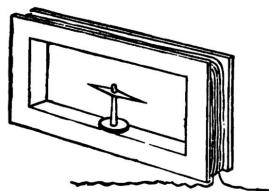
奥斯特的重大发现，揭示了电与磁之间的联系，为以后磁转化为电，法拉第发现电磁感应定律，麦克斯韦建立统一的电磁场理论奠定了基础。法拉第后来在评价奥斯特的发现时说：它猛然打开了一个科学领域的的大门，那里过去是一片漆黑，如今充满了光明。

安德烈·玛丽·安培 (André-Marie Ampère, 1775 年—1836 年)，法国物理学家、化学家、数学家，在电磁作用方面的研究成就卓著。电流的国际单位安培即以其姓氏命名。创造了“电流，current”这个名词，又将正电流流动的方向定为电流的方向。1820 年他根据奥斯特的发现的“**电流的磁力效应**”，进行了很多有关电流和磁铁相互作用的实验，安培证明，两条平行放置且彼此靠近的载流导线会产生磁感线，导致导线相互吸引或排斥，这取决于电流是沿相同方向流动还是沿相反方向流动。并得出几个重要的结果：（一）两个距离相近、强度相等、方向相反的电流对另一电流产生的作用力可以相互抵消；（二）在弯曲导线上的电流可被看成由许多小段的电流组成，它的作用就等于这些小段电流的矢量和；（三）当载流导线的长度和作用距离同时增加相同的倍数时，作用力将保持不变。经过一番定量的分析之后，他终于在 1822 年发现了安培定律 $F=IBL$ ，并在 1826 年推出两电流之间的作用力的公式。安培在电磁学上杰出的成就是有目共睹的，当时许多物理学家都对他万分敬佩。



发明了电流计

安培还发现，电流在线圈中流动的时候表现出来的磁性和磁铁相似，设计出第一个螺线管，在这个基础上发明了探测和量度电流的电流计。



磁针指示的电流计

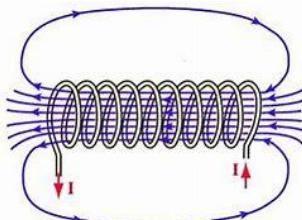
在磁学上，1820年一位同样著名的（当时，尽管今天不那么著名）法国物理学家弗朗索瓦·阿拉戈（François Arago）发现通电的铜螺线管能像磁铁一样吸引铁屑。



螺线管



螺线管



通电螺线管

阿拉戈 (François Arago) 随后进行了一项实验, 这项实验完全让当时的大多数科学家感到困惑, 也是法拉第伟大工作的主要动机之一. 1824 年, 阿拉戈证明了一个旋转的铜盘会导致悬挂在其上方的磁针旋转. 这一结果之所以引人注目, 有两个原因. 首先, 铜盘上没有施加外部电流, 其次, 虽然铜是导体, 但它不是磁性的. 然而, 这里似乎只是由影响指南针的圆盘旋转产生的磁场.



一个圆形铜盘上有一个小磁针，快速旋转铜盘会使小磁针旋转

1821年9月，法拉第制造了一种可以被视为第一台电动机的装置。他证明，一根悬挂在中心有永磁体的水银容器中的悬索，一旦电流通过，就会绕着磁体旋转（导电水银完成电路）。

通过这个非常简单的装置，法拉第展示了他所谓的“电磁旋转”——他利用电和磁来产生运动，这是奥斯特原理的推广——并发现了电动机背后的原理。这个想法是，通过电线的电流在其周围产生了一个磁场，该磁场与磁铁的磁场相互作用，在电流流动的同时以圆周运动的方式推动电线。



第一台电动机装置

电磁铁

1825年W.斯特金发明电磁铁，为电的广泛应用创造了条件。

早在1820年春天，丹麦的奥斯特在一次偶然之中就发现了这一原理。1822年，法国物理学家阿拉戈和吕萨克才发现，当电流通过其中有铁块的绕线时，它能使绕线中的铁块磁化。这实际上是电磁铁原理的最初发现。1823年，斯特金也做了一次类似的实验：他在一根并非是磁铁棒的U型铁棒上绕了18圈铜裸线，当铜线与伏特电池接通时，绕在U型铁棒上的铜线圈即产生了密集的磁场，这样就使U型铁棒变成了一块“电磁铁”。这种电磁铁上的磁能要比永磁能放大多倍，它能吸起比它重20倍的铁块，而当电源切断后，U型铁棒就什么铁块也吸不住，重新成为一根普通的铁棒。

斯特金的电磁铁发明，使人们看到了把电能转化为磁能的光明前景，这一发明很快在英国、美国以及西欧一些沿海国家传播开来。



斯特金 1824 年制作的电磁铁

1829 年，美国电学家亨利对斯特金电磁铁装置进行了一些革新，用绝缘导线代替裸铜导线，因此不必担心铜导线过分靠近而短路。由于导线有了绝缘层，就可以将它们一圈圈地紧紧地绕在一起，由于线圈越密集，产生的磁场就越强，这样就大大提高了把电能转化为磁能的能力。到了 1831 年，亨利试制出了一块更新的电磁铁，虽然它的体积并不大，但它能吸起 1 吨重的铁块。

欧姆定律

电流磁效应发现不久，几种不同类型的检流计设计制成，为欧姆发现电路定律 ($I=U/R$) 提供了条件。1826 年，受到傅里叶关于固体中热传导理论的启发，认为电的传导和热的传导很相似，电流好像热流，电源的作用好像热传导中的温差一样。

傅里叶的热传导定律

一个立方形固体的一面温度为 T_1 ，与此正对的另一面有较低温度 T_2 ，其它面是不传热的隔离面，使得热只沿一个方向传递，对于某种给定的物质，从温度较高的一面传递到温度较低的一面的热量 q 与横截面积 A 和温差 $T_1 - T_2$ 成正比，与厚度 B 成反比，即

$$q \propto \frac{A(T_1 - T_2)}{B}$$

$$q = k \frac{A(T_1 - T_2)}{B}$$

为了确定电路定律，开始欧姆用伏特电堆作为电源进行实验，由于当时的伏特电堆性能很不稳定，实验没有成功；后来他改用两个接触点温度恒定因而高度稳定的热电动势做实验，得到电路中的电流强度与他所谓的电源的“验电力”(electroscopic force)成正比，比例系数为电路的电阻。由于当时的能量守恒定律尚未确立，验电力的概念是含混的，直到 1848 年基尔霍夫从能量的角度考查，才澄清了电位差、电动势、电场强度等概念，使得欧姆理论与静电学概念协调起来。

“两个接触点温度恒定因而高度稳定的热电动势”是塞贝克效应 (seebeck effect)，托马斯·约翰·塞贝克 1770 年生于塔林（当时隶属于东普鲁士，现为爱沙尼亚首都）。塞贝克的父亲是一个具有瑞典血统的德国人，也许正因为如此，他鼓励儿子在他曾经学习过的柏林大学和哥廷根大学学习医学。1802 年，塞贝克获得医学学位。由于他所选择的方向是实验医学中的物理学，而且一生中多半时间从事物理学方面的教育和研究工作，所以人们通常认为他是一个物理学家。

毕业后，塞贝克进入耶拿大学，在那里结识了歌德. 德国浪漫主义运动以及歌德反对牛顿关于光与色的理论的思想，使塞贝克深受影响，此后长期与歌德一起从事光色效应方面的理论研究. 1812 年，正当塞贝克从事应力玻璃中的光偏振现象时，他却不晓得另外两个科学家布鲁斯特和比奥已经抢先在这一领域里有了发现.

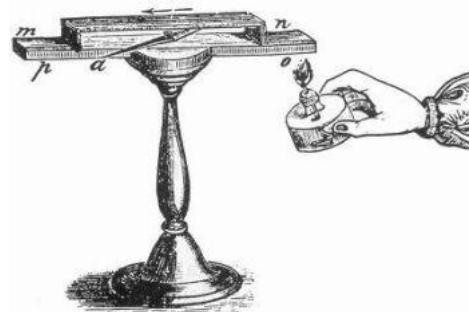
1818 年前后，塞贝克返回柏林大学，独立开展研究活动，主要内容是电流通过导体时对钢铁的磁化. 当时，阿拉果 (Arago) 和大卫 (Davy) 才发现电流对钢铁的磁化效应，赛贝克对不同金属进行了大量的实验，发现了磁化的炽热的铁的不规则反应，也就是我们所说的磁滞现象 (假如将未带磁性的铁磁性物质(例如：铁、钴、镍及其合金)放入通电的螺线管内，那么所产生的磁场可以将此材料磁化，使之带有磁性，但磁场去除后，铁磁性物质的磁性不会马上消除，仍保有磁性，此即为磁滞现象). 在此期间，塞贝克还曾研究过光致发光、太阳光谱不同波段的热效应、化学效应、偏振，以及电流的磁特性等等.

在 1820 年代，科学界有一种理论，认为大自然有极性，科学家们努力寻找这些不同极性，比如电力，磁力，热，光和化学作用之间的联系，持有这种理论的人包括奥斯特，塞贝克，里特和一些德国物理学和化学家；塞贝克学了奥斯特的发现后，很快使自己投入到电磁的研究中，希望找到磁与热的关系. 奥斯特使用伏特电堆，因此塞贝克显然知道伽伐尼的青蛙实验和伏特电堆这两种在当时有一定争议的起电方法，伏特认为电传导是通过伽伐尼在试验中用来连接神经和肌肉的金属产生的. 伽伐尼相信动物电来自骨盆中的肌肉. 参考伏特的理论，塞贝克研究了热对不同金属产生电的影响. 这种目的导致了“热产生电”的热电理论，然而塞贝克却将其解释为“热产生磁”的热磁理论，如果以热能否生磁的目的为出发点，那为什么塞贝克要用两种不同的金属呢？没有找到明确记载塞贝克的实验目的的史料.

在 1820 年 12 月，他向学会宣读了一篇处理电流产生的磁的影响的论文. 几个月后的 1821 年 8 月，他向学会宣告他的发现，那就是两种不同金属形成一个回路，在干燥的情况下，当 2 种金属的接触点温度不同时，会在导线周围产生磁. 他用很多金属组合做了大量实验，发现锑-铋组合是最有效的，并且强调了两个节点要有温差. 塞贝克效应在当时的重要性仅次于奥斯特实验，很快就在欧洲物理学家中广为传播，每一个研究中心都在重复他的实验.

发现电子和电子的基本电荷量后，人们迅速认识到塞贝克效应是温差引起的电流产生的磁性，根据安培定律，这种磁性影响了小磁针.

塞贝克效应在不同材质的导线衔接处直接将热转换为电. 这种效应最初是意大利科学家伏特于 1794 年发现的，塞贝克 1821 年独立发现了这种效应. 塞贝克没有认识到有电流产生，因此他称这种现象为“热磁效应(thermomagnetic)”，奥斯特重新改正了塞贝克的错误解释，并创造了新词“热电 (thermoelectricity) ”.



塞贝克的实验

法拉第电磁感应现象，发电机

迈克尔·法拉第 (Michael Faraday, 1791–1867)，英国物理学家、化学家，发明家，即发电机和电动机的发明者. 1791 年 9 月 22 日出生萨里郡纽因顿一个贫苦铁匠家庭. 他的父亲是个铁匠，体弱多病，收入微薄，仅能勉强维持温饱.

由于贫困，法拉第家里无法供他上学，因而法拉第幼年时没有受过正规教育，只读了两年小学。1803年，为生计所迫，他上街头当了报童。第二年又到一个书商兼订书匠的家里当学徒。订书店里书籍堆积如山，法拉第带着强烈的求知欲望，如饥似渴地阅读各类书籍，汲取了许多自然科学方面的知识，尤其是《大英百科全书》中关于电学的文章，强烈地吸引着他。他努力地将书本知识付诸实践，利用废旧物品制作静电起电机，进行简单的化学和物理实验。他还与青年朋友们建立了一个学习小组，常常在一起讨论问题，交换思想。

法拉第的好学精神感动了一位书店的老主顾，在他的帮助下，法拉第有幸聆听了著名化学家汉弗莱·戴维的演讲。他把演讲内容全部记录下来并整理清楚，回去和朋友们认真讨论研究。他还把整理好的演讲记录送给戴维，并且附信，表明自己愿意献身科学事业。但是戴维当时没有能力做出这个决定，后来戴维在试验中一只眼睛失明，且恰好科学院一名助手因为某种原因而被开除后，才很快把法拉第招入当自己的笔记员，20岁当上了戴维的实验助手。从此，法拉第开始了他的科学生涯。法拉第勤奋好学，工作努力，很受戴维器重。1813年10月，他随戴维到欧洲大陆国家考察，他的公开身份是仆人，但他不计较地位，也毫不自卑，而把这次考察当做学习的好机会。他见到了许多著名的科学家，参加了各种学术交流活动，还学会了法语和意大利语。大大开阔了眼界，增长了见识。

1820年，奥斯特发现电流的磁效应，受到科学界的关注，1821年，英国《哲学年鉴》的主编约请戴维撰写一篇文章，评述自奥斯特的发现以来电磁学实验的理论发展概况。戴维把这一工作交给了法拉第。法拉第在收集资料的过程中，对电磁现象产生了极大的热情，并开始转向电磁学的研究。

法拉第研究电学的另一个主要原因，在于戴维当时制造了世界上最大的电池，利用这个电池，他发现了很多元素，并且引起了他的学生法拉第在电学上的兴趣。安培和奥斯特已经证明，不知何故，电可以转化为磁，但他们和其他人未能做到相反的事情：从磁中产生电。于是，法拉第企图从静止的磁力对导线或线圈的作用中产生电流，但是努力失败了。法拉第尝试用通电导线周围产生的磁产生电（磁生电），经过近10年的不断实验，到1831年法拉第终于发现，一个通电线圈的磁力虽然不能在另一个线圈中引起电流，但是当通电线圈的电流刚接通或中断的时候，另一个线圈中的电流计指针有微小偏转。法拉第经过反复实验，都证实了当磁作用力发生变化时，另一个线圈中就有电流产生。他又设计了各种各样的实验，比如两个线圈发生相对运动，磁作用力的变化同样也能产生电流。

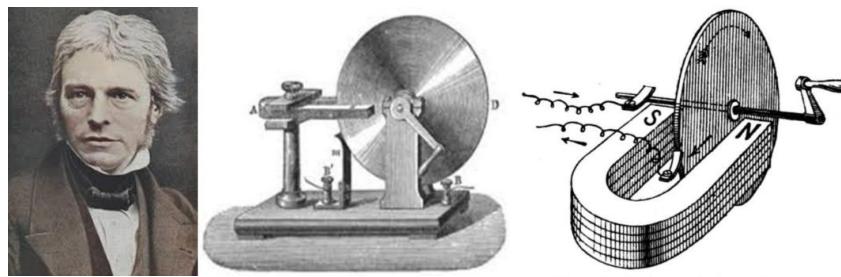
这样，法拉第终于用实验揭开了电磁感应定律。法拉第的这个发现扫清了探索电磁本质道路上的拦路虎，开通了在电池之外大量产生电流的新道路。接着他做了许多实验确定电磁感应的规律，他发现当闭合线圈中的磁通量发生变化时，线圈中就产生感应电动势，感应电动势的大小取决于磁通量随时间的变化率。后来，楞次于1834年给出感应电流方向的描述，而诺埃曼概括了他们的结果给出感应电动势的数学公式 $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。

法拉第意识到他需要找到一种产生变化磁场的方法，并继续改进阿拉戈圆盘实验。他在黄铜轴上安装了一个铜盘，这样它就可以在永磁体的两极之间自由旋转。然后，他通过将一根导线接到圆盘的中心，另一根接触圆盘的边缘，将圆盘连接到演示电表上。当圆盘旋转时，演示电表记录到一个连续的电流，该电流显然沿圆盘的直径穿过圆盘。反转圆盘的旋转方向会导致演示电表的指针沿相反方向偏转，这意味着电流方向的反转。根据这个实验，1831年10月28日法拉第发明了圆盘发电机，这是法拉第第二项重大的电发明。这个圆盘发电机，结构虽然简单，但它却是人类创造出的第一个发电机。现代世界上产生电力的发电机就是从它开始的。

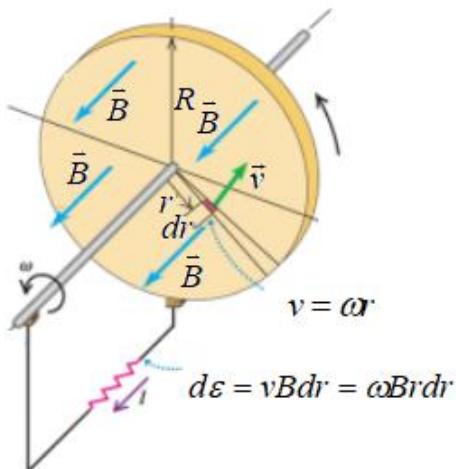
法拉第有一句著名的话：“因此，这里证明了普通磁铁产生的永久电流”。法拉第解释得非常清楚：“如果端接的导线被移动以切割磁曲线，就会产生一种力量，这种力量会促使

电流通过它”

通过这个实验，法拉第展示了磁场和连续的机械运动如何产生连续的电流.



法拉第的圆盘发电机



直径 r 方向的一小段 dr 的速度为 $v = \omega r$ ，这一小段在磁场中切割磁感线运动产生的电动势为 $d\varepsilon = vBdr = \omega Brdr$.

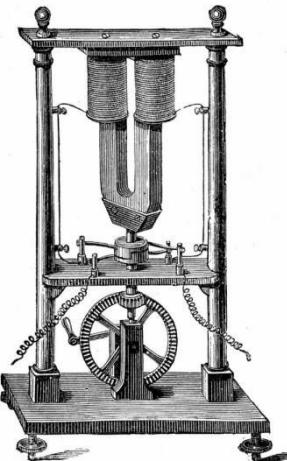
圆盘发电机的圆心处固定一个摇柄，圆盘的边缘和圆心处各与一个黄铜电刷紧贴，用导线把电刷与电流表连接起来；紫铜圆盘放置在蹄形磁铁的磁场中. 当法拉第转动摇柄，使紫铜圆盘旋转起来时，电流表的指针偏向一边，这说明电路中产生了持续的电流.

法拉第圆盘发电机是怎样产生电流的呢？我们可以把圆盘看作是由无数根长度等于半径的紫铜辐条组成的，在转动圆盘时，每根辐条都做切割磁感线的运动. 辐条和外电路中的电流表恰好构成闭合电路，电路中便有电流产生了. 随着圆盘的不断旋转，总有某根辐条到达切割磁感线的位置，因此外电路中便有了持续不断的电流.

法拉第圆盘发电机虽然简单，产生的电流甚至不能让一只小灯泡发光. 但这是世界上第一台发电机，是它首先向人类揭开了机械能转化为电能的序幕. 后来，人们在此基础上，将蹄形永久磁铁改为能产生强大磁场的电磁铁，用多股导线绕制的线框代替紫铜圆盘，电刷也进行了改进，就制成了功率较大的可供实用的发电机.

杰出的英国物理学家**法拉第**从事电磁现象的实验研究，对电磁学的发展作出极其重要的贡献，其中最重要的贡献是 1831 年发现**电磁感应现象**（美国物理学家 J. 亨利几乎在同时也发现了电磁感应现象，但发表稍晚些）. 电磁感应的发现为能源的开发和广泛利用开创了崭新的前景.

随着其他科学家、工程师和发明家开始致力于建造可以投入实际使用的更复杂的发电机，法拉第发现的应用很快变得明显. 法国仪器制造商希波吕特（1808-1835）在 1832 年基于法拉第的感应思想建造了一台简陋的发电机. 该装置由一个位于线圈上方的手动旋转磁铁组成. 每次磁铁的两极之一经过线圈时，线圈中都会产生电流脉冲. 随着磁铁每转半圈，感应电流的方向都会发生变化，因此产生的是交流电.



交流发电机

由于当时交流电流没有实际用途，因此必须找到一种方法将其转换为直流（DC）电流.

安培和其他人的建议导致了换向器（一种旋转开关）的引入，当电流反向时，它会反向连接到外部电路，从而产生脉冲直流电流而不是交流电流.



交直流换向器

换向器由两个相互绝缘的金属固定在支撑线圈的中心轴上，每根导线连接一片金属，两个电刷在中间时接出来的是脉冲直流电，在两侧时是交流电.

1866年西门子发明了可供实用的自激发电机；19世纪末实现了电能的远距离输送；电动机在生产和交通运输中得到广泛使用，从而极大地改变了工业生产的面貌.

电场，电场线

对于电磁现象的广泛研究使法拉第逐渐形成了他特有的“场”的观念. 1837年他引入了电场和磁场的概念，指出电和磁的周围都有场的存在，这打破了牛顿力学“超距作用”的传统观念. 1838年，他提出了电场线的新概念来解释电、磁现象，这是物理学理论上的一次重大突破. 他深信在带电体和磁体的周围存在着某种特殊的“紧张”状态，他用电场线和磁感线来描述这种状态. 他认为：线是物质的，它弥漫在全部空间，并把异号电荷和相异磁极分别连结起来；电场力和磁场力不是通过空虚空间的超距作用，而是通过电场线和磁感线来传递的，它们是认识电磁现象必不可少的组成部分，甚至它们比产生或“汇集”电场线和磁感线的“源”更富有研究的价值. 1852年，他又引进了磁感线的概念，从而为经典电磁学理论的建立奠定了基础. 后来，英国物理学家麦克斯韦用数学工具研究法拉第的磁感线理论，最后完成了经典电磁学理论.

高斯定理（电通量 Electric flux）

大约在 1837 年，英国皇家学会的法拉第对静电场以及静电场与各种绝缘物质的相互作用非常感兴趣，于是设计了如下的实验：

法拉第设计了如图所示的一大一小 2 个同轴球体，外面一个可以分成两个半球。将外层球体分开，给内部小球带上正电荷 Q ，然后用大约 2 cm 厚的“理想”绝缘物质填充在两球之间的空隙中，用外层球体盖住。接下来，外层球体迅速接地使其不带电（放电），再小心地将外层大球分为 2 个半球，然后再测量两个半球上感应出的负电荷。



法拉第发现，外层球体感应出的电荷量等于内部小球体的电荷量 Q ，且与中间的绝缘物质的种类无关。他总结认为，有某种量（displacement）从内部球体流到外部球体上了，量的大小与绝缘层的种类无关。

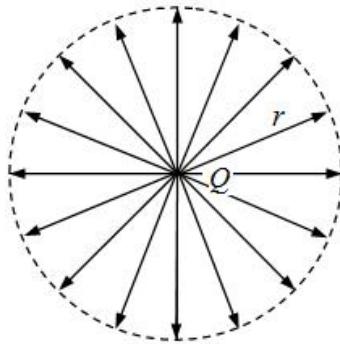
今天，这种虽然被绝缘物质隔离但是依然从内部球体流到外部球体上的量被称为电通量（electric flux 或 displacement flux）。

电通量用 Φ 表示，则

$$\Phi = Q$$

法拉第的实验可以概括为高斯定律：

通过任何闭合曲面的电通量等于闭合曲面内的电荷量。



电荷量为 $+Q$ 的点电荷周围的电场如图所示，虚线表示以 $+Q$ 为圆心，半径为 r 的球面。

球面上任意一点的电场强度大小 $E = \frac{F}{q} = \frac{kqQ}{qr^2} = k \frac{Q}{r^2}$ ，我们知道，电场强度的大小还可以

用电场线的疏密程度表示，即电场强度与穿过该点的，垂直于电场方向单位面积的电场线条

数成正比， $\frac{\Delta N}{\Delta A} \propto E$. 定义 $\frac{\Delta N}{\Delta A} = \epsilon_0 E$, $\Delta N = \epsilon_0 E \Delta A$ ，把球面上所有面积上的电场线相加，有

$$N = \epsilon_0 E A$$

对上面的球体，

$$N = \epsilon_0 E A = \epsilon_0 \frac{kQ}{r^2} \times 4\pi r^2 = 4\pi k \epsilon_0 Q$$

令 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ，则有 $N = Q$ ，从而穿过球面的电场线总数量等于封闭在球内的电荷量.

这就是高斯定理：

垂直穿出或穿入任何闭曲面的净电场线条数在数量上等于曲面内的净电荷量.

$$N = \sum \epsilon_0 E A = \sum q$$

这是麦克斯韦方程组（一共 4 个方程）中的第一个方程，叫作**电场的高斯定律**，注意这里是通过电场线密度的概念来推导，是求和形式，经常使用的是根据电通量密度与电场强度的点积求得的**电场的高斯定律**的积分形式，求解很简单，需要二元函数的微积分知识.

麦克斯韦方程组

法拉第的丰硕实验研究成果以及他的新颖的场的观念为电磁现象的统一理论准备了条件. 诺埃曼、韦伯等物理学家对电磁现象的认识曾有过不少重要贡献，但他们从超距作用观点出发，概括库仑以来已有的全部电学知识，在建立统一理论方面并未取得成功. 这一工作在 19 世纪 60 年代由卓越的英国物理学家麦克斯韦完成. 早在 1842–1854 年，汤姆逊通过热传导、弹性现象和电磁感线的对比研究，建立了它们共同的数学描述. 汤姆孙的类比方法鼓舞了麦克斯韦致力于将法拉第的电场线思想写成便于数学处理的形式. 开始(1856)他仅仅是通过力学现象与电磁现象的类比试图建立电磁学的理论体系；后来(1862)他觉得需要建立一种媒质理论来体现法拉第的力线思想. 他认为变化的磁场在其周围的空间激发涡旋电场；此外麦克斯韦又引入了“位移电流”的概念，变化的电场引起媒质位移电流的变化，位移电流的变化与电流一样在周围的空间激发涡旋磁场.

位移电流

对平行板电容器，有 $C = \frac{q}{U} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ ，设板间电场强度为 E ，距离为 d ，一电荷量为 q 的带电粒子在两板间沿电场方向运动，有

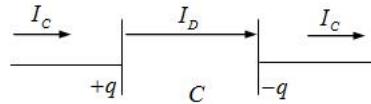
$$W = Fd = Eqd = qU$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{q}{\epsilon_0 A}$$

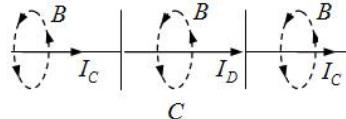
电容器在充、放电的过程中，电荷量随时间发生变化， $\Delta E = \frac{\Delta q}{\epsilon_0 A}$ ，对于微小的变化

量， $dE = \frac{dq}{\epsilon_0 A}$ ，由于 $I = \frac{dq}{dt}$, $dq = Idt$ ，得 $dE = \frac{Idt}{\epsilon_0 A}$ ，则 $I_D = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$ ，麦克斯韦认为，

电容器内电场的变化等价于通过电容器的电流，称其为位移电流 I_D . 我们将导线中普通的电流称为传导电流 I_C 如图所示，传导电流 I_C 进入电容，位移电流通过电容，传导电流离开电容.



正如通电直导线周围存在磁场一样，由于位移电流的存在，电容器周围也存在磁场，如图所示：



麦克斯韦明确地用数学公式把它们表示出来，从而得到了今天以他的姓氏命名的电磁场的普遍方程组——**麦克斯韦方程组**. 法拉第的力线思想以及电磁作用传递的思想在其中得到了充分的体现.

麦克斯韦进而根据他的方程组推论电磁作用以波的形式传播，具体推导和计算在后面麦克斯韦方程组部分.

麦克斯韦理论的推论和预言被德国物理学家赫兹的实验光辉地证实. 1888 年赫兹根据电容器放电的振荡性质设计制作了电磁波源和电磁波检测器，通过实验检测到电磁波，测定了电磁波的波速，并观察到电磁波与光波一样，具有偏振性质，并能够反射、折射和聚焦. 从此麦克斯韦的理论逐渐为人们所接受.

麦克斯韦电磁理论通过赫兹电磁波实验的证实，开辟了一个全新的领域——**电磁波**的应用和研究. 1895 年俄国的波波夫和意大利的马可尼分别实现了无线电信号的传送. 后来马可尼将赫兹的振子改进为竖直的天线；德国的布劳恩进一步将发射器分为两个振荡线路，为扩大信号传递范围创造了条件. 1901 年马可尼第一次建立了横跨大西洋的无线电联系.

电子管的发明（1904 年 J. A. 夫累铭；1906 年 L. 德福雷斯特）及其在线路中的应用使得电磁波的发射和接收都成为易事，推动了无线电技术的发展，极大地改变了人类的生活.

虽然麦克斯韦的电磁理论对光在真空中的传播作了完备的描述，但它不能很好地揭示出物质的光学特性，特别是**不能解释色散现象**；此外，把电磁理论用于运动介质的情形也未获得成功. 1896 年**洛伦兹提出的电子论**，将麦克斯韦方程组应用到微观领域，并把物质的电磁性质归结为原子中电子的效应. 这样不仅可以解释物质的极化、磁化、导电等现象以及物质对光的吸收、散射和色散现象；而且还成功地说明了关于光谱在磁场中分裂的正常塞曼效应；此外，洛伦兹还根据电子论导出了关于运动介质中的光速公式，把麦克斯韦理论向前推进了一步.

洛伦兹于 1892 年就形成了他和之后其他人称之为电子的理论. 他建议说，物质由带有正电或负电的微小微粒组成. 尽管他认为有正的和负的电子，但是后来科学家证实所有电子都是带负电的. 洛伦兹推导说这些带电微粒的振动产生电磁波，包括麦克斯韦预言的和 1888 年赫兹发现的光和其他辐射波. 由于洛伦兹的兴趣在电磁波，主要是赫兹的放电实验通过电流的振动，电流在电路中来回振动，相当于电荷来回振动，导致了洛伦兹产生了物质包含带电微粒的理论的产生. 洛伦兹的理论如下：

组成固体物质的离子和电子，没有外力作用时，在内部作用力下在固体中处于固定的平衡位置. 一束光的电场在通过固体传播时施加外力于这些带电微粒上，使这些微粒偏离平衡位置. 与周围原子的相互作用产生的力又导致这些偏离平衡位置的带电微粒回到原来的平

衡位置，假设把带电粒子拉回平衡位置的其他原子施加的力的大小正比于带电微粒的位移。这些微粒于是开始围绕它们的平衡位置以频率 ω 做简谐振动，这些简谐运动的微粒被认为是各向同性的，也就是说，简谐运动不依赖于运动方向和位移大小，各向同性的假设并没有什么问题，因为大部分晶体都是非各向同性的。这些简谐振动的带电微粒会传一部分能量给周围的简谐振动的带电微粒，这导致这些振动处于一种阻尼运动中。

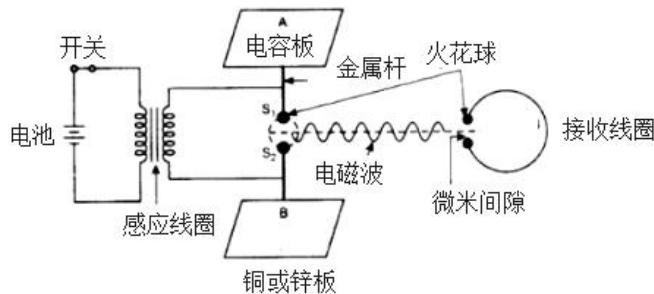
洛伦兹的这种假设模型，当光通过媒介时，就会激起这种物质的带阻尼的简谐振动。带电微粒偏离平衡位置的位移导致这种物质的电介质极化（dielectric polarization），这种作用又作用于外部的光的电场，进而作用于光在物质中的传播。洛伦兹的看法可能来源于法拉第，因为法拉第也有这样类似的看法。

在法拉第、麦克斯韦和洛伦兹的理论体系中，假定了有一种特殊媒质“以太”存在，它是电磁波的荷载者，只有在以太参照系中，真空中光速才严格与方向无关并等于 c ，麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式也只在以太参照系中才严格成立。这意味着电磁规律不符合相对性原理。关于这方面问题的进一步研究，导致了爱因斯坦在 1905 年建立了狭义相对论，它改变了原来的观点，认定狭义相对论是物理学的一个基本原理，它否定了以太参照系的存在并修改了惯性参照系之间的时空变换关系，使得麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式有可能在所有惯性参照系中都成立。狭义相对论的建立不仅发展了电磁理论，并且对以后理论物理的发展具有巨大的作用。

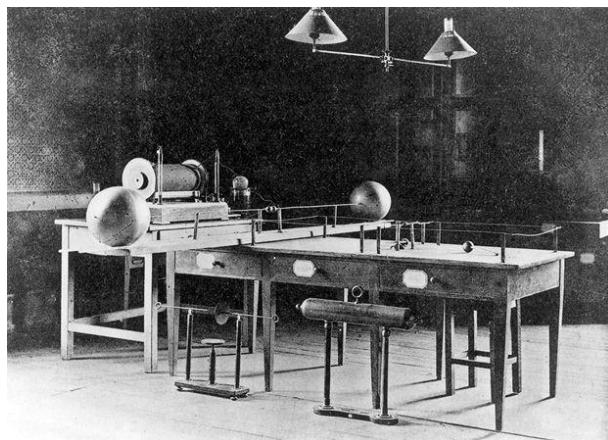
赫兹在柏林学习期间，曾经在赫姆霍兹和基尔霍夫的指导下学习。

赫兹实验证麦克斯韦电磁理论

赫兹在柏林大学跟随赫尔姆霍兹学物理时，受赫尔姆霍兹的鼓励研究麦克斯韦电磁理论，当时德国物理界深信韦伯的电力与磁力可瞬时传送的理论。因此赫兹就决定以实验来证实韦伯与麦克斯韦理论谁的正确。依照麦克斯韦理论，电动能辐射电磁波。赫兹根据电容器经由电火花隙会产生振荡原理，设计了一套电磁波发生器，赫兹将一感应线圈的两端接于产生器二铜棒上。当感应线圈的电流突然中断时，其感应高电压使电火花隙之间产生火花。瞬间后，电荷便经由电火花隙在锌板间振荡（锌作为导电金属，其表面可形成自由电子层，当电磁波入射时，自由电子会快速响应并产生反向电磁波，从而实现反射。理想导体的反射率理论上为 100%，但实际中因材料特性存在差异。），频率高达数百万赫兹。由麦克斯韦理论，此火花应产生电磁波，于是赫兹设计了一简单的检波器来探测此电磁波。他将一小段导线弯成圆形，线的两端点间留有小电火花隙。因电磁波应在此小线圈上产生感应电压，而使电火花隙产生火花。所以他坐在一暗室内，检波器距振荡器 10 米，结果他发现检波器的电火花隙间确有小火花产生。赫兹在暗室远端的墙壁上覆有可反射电磁波的锌板，入射波与反射波重叠应产生驻波，他也以检波器在距振荡器不同距离处侦测加以证实。赫兹先求出振荡器的频率，又以检波器量得驻波的波长，二者乘积即电磁波的传播速度 $v = \lambda f$ 。正如麦克斯韦预测的一样。电磁波传播的速度等于光速。1888 年，赫兹的实验成功了，而麦克斯韦理论也因此获得了无上的光彩。赫兹在实验时曾指出，电磁波可以被反射、折射和如同可见光、热波一样的被偏振。由他的振荡器所发出的电磁波是平面偏振波，其电场平行于振荡器的导线，而磁场垂直于电场，且两者均垂直传播方向。1889 年在一次著名的演说中，赫兹明确的指出，光是一种电磁现象。



1887年，海因里希·赫兹（德国）偶然发现了光电效应



海因里希·赫兹使用线圈（左）和天线（右）产生和探测可见光范围外的电磁辐射

光电效应的发现

在验证电磁波的实验中，为了使接收到的电火花更容易看到，赫兹说，我偶然地把接收火花的线圈放在黑盒子里以便于更容易地观察到火花，但是这样一来火花的最大长度就比之前的小很多。于是我一片一片地拆除黑盒子，发现唯一影响火花长度的部分是处于接收端与发射端之间的部分，而且不仅仅是当这部分紧挨着接收端会有影响，距离接收端更远也会有影响。赫兹做了更深入的研究，发现接收端的小火花如果暴露在紫外光中，火花会更亮，当然这是花了很长时间才弄清楚的。起初他发现把玻璃放在接收端和发射端之间有遮挡作用，但是比较厚的石英石却没有，于是他用石英三棱镜使发射端的火花分成各种频率，然后不同频率的光照射接收端火花，发现使接收端火花更亮的光在不可见光区，是紫外光部分。赫兹将这些实验结果发表于《物理年鉴》，赫兹写到，当我确信地知道我所处理是紫外光的效应时，我就把这个研究放在一旁而把注意力再一次放到了主要问题上（电磁波）。

第二年，1888年，另一位德国物理学家霍尔伐克士（Hallwachs）写到，赫兹在最近出版的论文中描写了感应火花的长度对原火花的依赖性，他证明了这种现象是紫外光的作用。由于这个现象出现的研究情况的复杂性，所以没有获得更多的能产生这种现象的其他光。我曾经努力地在更简单的条件下获得相关现象，使得这个现象的解释更加容易一些。

霍尔伐克士描述了他的简单实验：将一个干净的圆盘锌（zinc）板安装在一个绝缘的架子上并用一根导线与金质叶片的验电计相连，然后使锌板带负电。此时验电计失去电荷的速度是很慢的。然而，如果锌板暴露在弧光灯或燃烧的镁产生的紫外光中时，验电计上的电荷失去速度会非常快；如果使锌板带正电，则验电计没有那么快的失去电荷，假若电中性的锌金属被紫外线照射，则会很快地变为带有正电荷，负电（negative electrification）会逃逸到金属周围的气体中，假若吹拂强风于金属，则可以大幅度增加带有的正电荷数量，据说霍尔伐克士是赫兹做电磁波验证实验的助手。

德国物理学家艾斯特和盖特尔是同学，毕业后在同一所学校教书。1889年他们共同发表了一系列关于光电方面的论文。论文中说到，有些金属[钾、钠、锌、铝(potassium, sodium, zinc, aluminum)]与水银形成合金后会变得对可见光和紫外光十分敏感，具有光电效应。而其他金属，比如锡、铜和铁却始终没有类似的效果。他们将各种金属依光电效应放电能力从大到小顺序排列：铷、钾、钠钾合金、钠、锂、镁、铊、锌。对于铜、铂、铅、铁、镉、碳、汞，普通光波造成的光电效应很小，无法测量到任何效应。上述金属排列顺序与亚历山德罗·伏特的电化学排列相同，越具正电性的金属给出的光电效应越大。在空气中、大气压环境下，被绝缘的锌板在光照时会获得2.5v电压。1890年，他们描述了一种现代光电池的先驱。一个玻璃球内含有碱金属或碱金属的合金或水银合金，并且用抽气泵将里面抽空并封口，其中还有一个金属电极用来收集从碱金属飞出的带负电的载体，当这个电极从外部附加的电池提供正电压时，如果用可见光照射，则会有电流。1892年，他们在第一个光电的光度计中使用一个光电设备作为敏感元件，用来测量来自太阳的紫外线辐射。同一年，他们制作了第一个气体填充的光电池，里面有一个碱性金属、充有0.33mm压力的氢气，这个压力正好可以给出最大的导电率。他们还证实了这样的光电池中的光电流强度与光强度成正比。1894年，他们观察到，特定的金属表面，特别是钠-钾合金的表面在极化光从某倾斜的入射角照射时，光电流会随着极化光的极化平面的旋转而变化。这两位科学家在基础自然科学上做出的这些成就直到很多年后才被理解。

1888年，俄国物理学家亚历山大·斯托列托夫(Aleksandr Stoletov)将注意力转向赫兹发现的光电效应，在1888年2月到1891年之间，他对光电效应做了详细的分析。首先，他设计了一种非常适合于对光电效应做定量分析的仪器。使用这个仪器，他发现了光强度(intensity of light)与光电流之间有直接的正比关系，得出光电效应的第一个定律：斯托列托夫定律(stoletov's law)。另外，史托勒托夫和里吉还共同研究了光电流与气压之间的关系，他们发现气压越低，光电流越大，直到最优气压为止；低于这最优气压，则气压越低，光电流越小。这个特性被用来制造太阳能电池。

1899年汤姆生研究了克里斯特管中的紫外光。

电磁学

阴极射线管

从万物起源到原子，真空

人类生活的环境多姿多彩，气象万千。但是仔细观察会发现，一棵树结出很多果实后会长出一片树林、一只母羊会生出一群羊，那么，最初的那棵树，那只羊从何而来的？

过去流传一些关于**天地起源的神话创世说**，例如可能生活在公元前8世纪的古希腊诗人俄德所著的《神谱》中写到：最初的宇宙一片混沌（chaos），从混沌中最先生出了大地。

公元前6世纪，伊奥尼亚的一些哲学家开始提出世界的本原问题，他们反对过去流传的种种神话创世说，认为世界的本原是一些**物质性的元素**，如水、气、火等；与此同时，在意大利南部出现了具有另一种思想倾向的哲学学派，他们认为万物的本质不是**物质性的元素**，而是一些抽象的原则，**毕达哥拉斯学派**认为是“数”，以巴门尼德为代表的爱利亚学派认为是“存在”，并认为“存在”是不变的，不生不灭的，运动变化的只是事物的现象。

希腊最早的哲学学派，**米利都学派**的创始人**泰勒斯**，家庭属于奴隶主贵族阶级，据说他有希伯来人（Hebrews）或犹太人（Jew）、腓尼基人血统，所以他从小就受到了良好的教育。泰勒斯早年也是一个商人，曾到过不少东方国家。泰勒斯向埃及人学习观察洪水。他仔细阅读了尼罗河每年涨退的记录，还亲自察看水退后的现象。他发现每次洪水退后，不但留下肥沃的淤泥，还在淤泥里留下无数微小的胚芽和幼虫。他把这一现象与埃及人原有的关于神造宇宙的神话结合起来，便得出**万物由水生成**的结论。

泰勒斯的学生有**阿那克西曼德、阿那克西美尼**等。

古希腊数学家、哲学家**毕达哥拉斯**师承泰勒斯、阿纳克西曼德。从他开始，**希腊哲学**开始产生了数学的传统。毕达哥拉斯还是在西方长期被认为是毕达哥拉斯定理的（中国称**勾股定理**）首先发现者。他坚持数学论证必须从“假设”出发，开创演绎逻辑思想，对数学发展影响很大。

阿那克萨戈拉是阿那克西美尼的学生，他不满足于用某一种具体物质或元素作为万物本原的主张，因为这不能解决一和多的关系问题。他提出了自己的**种子说**，认为“种子”有各种不同的性质，数目无限多，体积无限小，是构成世界万物的最初元素；种子具有各种形式、颜色和气味，它们的结合构成了世界上千差万别的事物，头发是由头发的种子、血是由血的种子、金子是由金子的种子构成的，在世界伊始这些所有的种子都是混合在一起的一个巨大的**混沌物**，而世界万物的构成是通过分离运动来形成的，他提出一个漩涡的理论模型，就是指这个巨大的混沌物通过旋转，然后产生的离心力将万物甩了出去，从此万物也就开始分开了，从而构成了我们今天看到的万事万物，这与现代的星系诞生理论十分相似。但他还提出了一点即认为万事万物都是不可能被完全分离开来的，总是会带有一些微量的其他种子，比如雪，虽然可称为白色但其中也必然包含少量黑色种子而只是因为白色种子占绝大多数罢了。

巴门尼德师承毕达哥拉斯，他受**克塞诺芬尼**关于神是不动的“一”的理论影响，依靠抽象形象，从感性世界概括出最一般的范畴“存在（exist）”。认为存在是永恒的，是一，连续不可分；存在是不动的，是真实的，可以被思想。克塞诺芬尼是西方哲学史上第一个泛神论者（泛神论认为宇宙就是神，到处都有神性）。

真空

克塞诺芬尼认为神是永恒的、不变的存在，只有一个神，那就是**存在**。神没有具体的形式（form），因为如果神有具体的形式，那么羊的神会是羊的样子，猪的神会是猪的样子，这样就会有很多神。神无处不在，因此不存在**虚空**（void, nothing），如果存在**虚空**，那么**虚空**就是**存在**（因为存在，即神无处不在），因此**虚空**就是**物质**，那么就没有**虚空**；既然没有**虚空**，那么就没有运动变化，也就是说，**神是永恒的、不变的，处处存在的**。那么运动就

不可能，因为没有虚空让物质在里面运动。因此物质是连续的、不可分的一。如果可分，那么虚空就会占据其中。（神是永恒的、不变的存在，不可能不存在神，处处都有不变的、永恒的神，因此处处都有存在）。

另一种观点是，**赫拉克利特**，他认为自然界中的一切存在都是变化的。“你永远不可能跳入同一条河”（基于感觉（sense）的观点，比较实际。）

德谟克利特认为运动是真实的，因此支持虚空（void）的概念（the concept of void）。认为宇宙是由许多巴门尼德的实体组成并且绕着虚空运动。**原子论创始人留基波**（大约在公元前 440 年）和德谟克利特，受**阿那克萨戈拉种子说**的影响，提出世界万物由原子构成，原子是不可再分的物质微粒，以虚空为运动的场所。

古希腊的哲学家对于原子论中提到的虚空，或者说真空是否存在有很多讨论和争议。

苏格拉底的学生柏拉图认为，即便是没有任何特性（featureless）的抽象的虚空的概念也备受质疑：虚空无法通过感知（senses）来理解。除了根据定义给出的物理上的体积以外，虚空本身不能自己提供额外的对自己的解释，虚空完全就是字面上来讲的“什么也没有”，“什么也没有”肯定不能说是存在。

柏拉图的学生亚里士多德 17 岁时赴雅典，在柏拉图学园就读达 20 年，直到柏拉图去世后方才离开。**亚里士多德不承认虚空存在**，认为虚空不会自热而然地产生，因为包围着物质的连续的密集的东西会迅速地填充可能产生虚空的任何地方。**亚里士多德**在 physic IV 中反驳道，假如有虚空，那么在没有阻碍的虚空中运动速度将趋于无穷大，因此没有理由认为会在任何地方有什么东西停下来。

西罗在公元 1 世纪不成功地试图人工制造真空，以及欧洲学者，像培根（Roger Bacon），布拉斯（Blasius of Parma）和伯利（Walter Burley）在 13 和 14 世纪都对真空付出了值得肯定的关注。最终，随着斯多葛派（stoic physics），从 14 世纪开始，直到 17 世纪，人们才不停地远离亚里士多德的倾向于超自然的真空观点，而趋于宇宙本身的范围（the confines of the cosmos itself），这使得人们将自然与神理论分离开来。

柏拉图之后 2000 年，笛卡尔提出了一种基于几何意义的原子论，他的原子论避免了“有 - 没有（nothing - everything）”的真空和原子之间的二分问题（without the problematic nothing–everything dichotomy of void and atom）。尽管笛卡尔同意同时代的立场，即**真空不会在自然界中产生**。但是以他的名字命名的笛卡尔坐标系依然定义了现代的空间的概念，即空间是体积在数量上的延伸。随着笛卡尔对超距作用这个残忍事实的默许，最终，通过力场对空间概念的具体化的成功，以及更加哲学化的几何构架这个与时代错误的空间被扩展了，直到 20 世纪的量子论，真空才被一种虚拟的灵气（pleroma）填充。

中世纪有一些思想实验涉及到**真空**，当两块平板迅速分开后，中间是否会出现真空，哪怕是瞬间出现。当平板被分开时，空气是否移动的足够快了填充，或者，天上的代理

（celestial agent）是否会阻止真空的产生。普遍的观点认为自然界痛恨真空。即便是上帝想要制造真空但是不能制造的推论也被 1277 年的巴黎主教唐皮耶（Etienne Tempier）谴责否定了，这个谴责说上帝的能力是没有制约的，只要上帝愿意，他就能够制造真空。法国哲学家布里丹报告说，即便 10 匹马都无法把封闭的封箱拉开。17 世纪出现了对部分真空的定量测量。1643 年托里拆利的水银气压计和帕斯卡的实验都演示了部分**真空**。

当时罗马、佛罗伦萨的学者热烈讨论着自然的本性是否是“厌恶真空”的。人们早就知道只要把水管里的空气抽掉，造成一个真空，那么水就会沿着水管往上流。他们无法解释水为什么会往上流，而不是通常那样“水往低处流”，就借用亚里士多德的名言“**大自然讨厌真空**”来解释。粗略一想也对，自然是不让真空存在的，一旦真空出现就让水来填补，于是水就被抽上来了。真空出现到哪里，水就跟到哪里。

当时罗马、佛罗伦萨的学者还热烈讨论着如何解释矿井中的水泵只能把水提到 10.5 米高的问题。伽利略虽做过称量空气的实验，证明空气有重量，但仍认为可能有一种“真空力”“force created by a vacuum”。意大利学者巴利安尼 1630 年写信给伽利略，提出可能存在大气压力的假设。

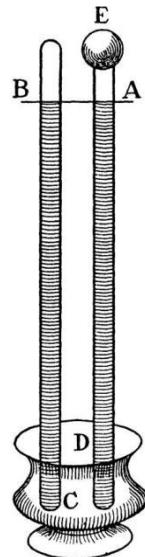
托里拆利 (Torricelli, Evangelista, 1608–1647) 在二十岁时，伯父将他带到罗马，受教于伽利略的学生卡斯德利，卡斯德利见托里拆利年轻聪慧，便指派他为自己的私人秘书，在学术上给予指导。托里拆利深刻研究了伽利略的《两种新科学的对话》一书，从中获得了有关力学原理的发展的很多启发。1641 年，托里拆利出版了《论重物的运动》一书，企图对伽利略的动力学定律作出新的自己的结论。卡斯德利在一次拜访伽利略时，将托里拆利的论著给伽利略看了，还热情推荐了托里拆利。伽利略看完托里拆利论著之后，表示非常欣赏他的卓越见解，便邀请他前来当助手。1614 年，托里拆利来到佛罗伦萨，会见了伽利略，此时伽利略已双目失明，终日卧在病床上。在他生命的最后三个月中，托里拆利和他的学生维维安尼担任了伽利略口述的笔记本记者，成了伽利略的最后的学生。

1640 年 10 月的一天，在离佛罗伦萨集市广场不远的一口井旁，伽利略进行了抽水泵实验。他把软管的一端放到井水中，然后把软管挂在离井壁三米高的木头横梁上，另一端则连接到手动的抽水泵上。抽水泵由伽利略的两个助手拿着，一个是富商的儿子——32 岁，志向远大的科学家托里拆利，另一个是意大利物理学家巴利安尼 (Giovanni Baliani)。托里拆利和巴利安尼摇动抽水泵的木质把手，软管内的空气慢慢被抽出，水在软管内慢慢上升。抽水泵把软管吸得像扁平的饮料吸管，这时不论他们怎样用力摇动把手，水离井中水面的高度都不会超过 9.7 米。每次实验都是这样。

可是，为什么水到了 10 米左右高的地方就再也上不去了呢？伽利略提出：水柱的重量以某种方式使水回到那个高度。

大约在 1641 年，一位著名的数学家、天文学家贝尔提曾用一根 10 米多长的铅管做成了一个真空实验。托里拆利受到了这个实验的启发。1643 年，托里拆利又开始研究抽水机的奥妙。根据伽利略的理论，重的液体也能达到同样的临界重量，高度要低得多。水银的密度是水的 13.5 倍，因此，水银柱的高度不会超过水柱高度的 $1/13.5$ ，即大约 30 英寸 (0.762 米)。

他将一根长度为 6 英尺的玻璃管灌满水银，然后用手指顶住管口，将其倒插进装有水银的水银槽里，放开手指后，可见管内部顶上的水银已下落，留出空间来了，而下面的部分则仍充满水银。与他料想的一样，水银柱的高度是 30 英寸。为了进一步证明管中水银面上部确实是真空，托里拆利又改进了实验。他在水银槽中将其水银面以上直到缸口注满清水，然后把玻璃管缓缓地向上提起，当玻璃管的管口提高到水银和水的界面以上时，管中的水银便很快地泻出来了，同时水猛然向上窜入管中，直至管顶。由此可见，原先管内水银柱以上部分确实是空无所有的空间（什么都没有也没有空气所以水可以进去）。与此管对比的还有一个上面带圆玻璃泡的玻璃管，托里拆利原来猜想容积大的真空应有较大的“真空阻力”，但两管的水银柱却等高。（说明真空的大小不是阻碍或吸引水银上升的原因，如果玻璃管更长，则真空也会更多，但是水银柱始终是相同的高度。）



第二天，风雨交加，雨点敲打着窗子，为了研究水银上面的真空，托里拆利一遍遍地做实验。可是，这一天水银柱只上升到 29 英寸（0.7366 米）的高度。

托里拆利困惑不解，他希望水银柱上升到昨天实验时的高度。两个实验有什么不同之处呢？雨点不停地敲打着玻璃，他陷入沉思之中。

一个革命性的新想法在托里拆利的脑海中闪现。两次实验是在不同的天气状况下进行的，空气也是有重量的。抽水泵奥秘的真相不在于液体重量和它上面的真空，而在于周围大气的重量。（雨天水多，空气少，空气重量小，压力就小。）

原先的水银柱和现在的水柱都不是被什么真空力所吸引或阻碍住的，而是被管外水银面上的空气重量所产生的压力托住的。

水银气压计

在 1644 年他给罗马的里奇的信中说：“我们是生活在大气组成的海底之下的。实验证明它的确有重量……”托里拆利在实验中还发现不管玻璃管长度如何，也不管玻璃管倾斜程度如何，管内水银柱的垂直高度总是 76 厘米，于是他提出了可以利用水银柱高度来测量大气压，并于 1644 年同维维安尼合作，制成了世界上第一具水银气压计。

这一实验之所以能率先在意大利做成功，还因为罗马和佛罗伦萨在当时的吹制玻璃器皿的技术最先进。

对于托里拆利实验过程中玻璃管内为什么可以形成一个 760 毫米高的汞柱悬浮现象的原因，理论界形成并产生了两种完全对立的观点，其中以伽利略为代表的“真空力”论者和以托里拆利为代表的“大气重力”论者展开了激烈的讨论和争论，结果双方各持一词谁也说服不了谁、争论局面一度出现僵持状态。

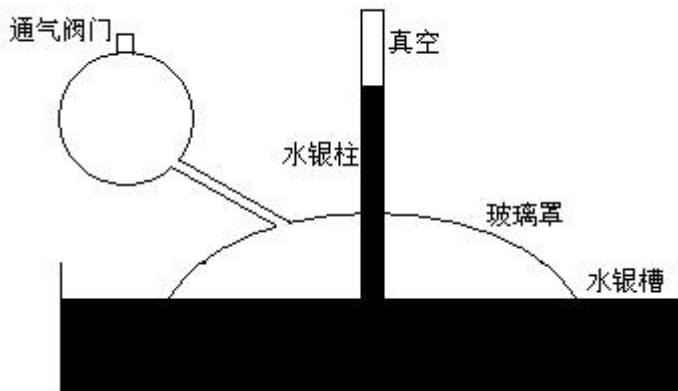
这个实验传到西欧后随即引起了帕斯卡、盖利克等人对大气压的研究热潮。

1646 年法国科学家帕斯卡经过仔细研究后认为，大气的重力来源于大气层的厚度，其厚度越高则重力越大、厚度越低则重力越小，如果托里拆利实验中玻璃管内的汞柱高度现象真是大气重力压迫导致的，那么托里拆利实验中玻璃管内的汞柱高度就应该伴随着大气层的厚度的增加而升高、变薄而降低。

为了验证这一推测，帕斯卡在托里拆利实验的基础之上设计了那个著名的“多姆山实验”，他预想通过爬高山来降低大气层的厚度，来观测托里拆利实验中汞柱高度的变化情况，1648 年帕斯卡的姐夫比里埃在多姆山按照帕斯卡的设计思路进行了该实验，实验的结果显示，在多姆山山顶上比山脚下水银柱的高度的的确确降低了约 3.15 英寸（8.0001 cm）。于是帕斯卡根据多姆山实验结果就此认为，托里拆利实验过程中玻璃管内的 760 毫米汞柱就是

大气压强导致的并且还认为，大气压强随着海拔高度的升高而降低，在3000米范围内海拔高度大约每升高12米大气压就降低1个毫米汞柱。

1648年左右，帕斯卡为了证明液柱高度大小取决于气体的压力，设计了两个巧妙连接在一起的玻璃管。依靠其中一个可以减少另一个管子里水银表面上的空气。利用这一装置，他有效地演示了空气压力的存在，以及空气压力决定着管中水银柱高度的变化。



几乎与意大利和法国同时，关于真空问题的研究也在德国独立地进行，它产生了著名的马德堡半球实验。实验是由葛利克（1602—1686年）设计的。

玻意耳定律

1650年，德国的叫奥托·冯·葛利克的人听到托里拆利的事，又听说还有许多人不相信大气压；还听到有少数人在嘲笑托里拆利；因此，葛利克虽在远离意大利的德国，但很抱不平，义愤填膺。他匆匆忙忙找来玻璃管子和水银，重新做托里拆利这个实验，断定实验是准确无误的；**他造出了第一台抽气泵，**



葛利克制造的第一个抽气泵，需要人力抽气

这种泵有点象水泵，但其零件装配精良，气密性较好。它用人力开动，工作缓慢，但行之有效，他将一个密封完好的木桶中的空气抽走，木桶就“砰！”的一声被大气“压”碎了！他抽空一个容器并指出，放在该容器里的响铃的声音，就是听不到的；这就证实了亚里士多德的论点—声音不但可以在空气中传播，而且可在液体和固体中传播，但不能在真空中传播。葛利克还指出：蜡烛在真空中不能燃烧，动物在真空中不能存活。但是，这些观察的真正意义在120多年以后才由拉瓦锡阐述明白。葛利克接着做了一个更富有戏剧性的实验。他在活塞上拴了一根绳子，让五十个人拉住那根绳子，这时他就缓慢地对缸筒内活塞的另一边抽气，尽管那五十个人拼命地拽住活塞上的绳子，空气压力仍不可抗拒地将活塞推下缸筒。

1657 年，当玻意耳(1627-1691) (Robert Boyle)听到葛利克所做的实验后，便着手设计他自己的抽气泵。在精明强干的助手胡克的帮助下，他成功地制造了抽气泵，得以进行了许多开拓性实验。



胡克制造的抽气泵

由这种空气泵获得的真空一度被叫做玻意耳真空。1668 年后他移居伦敦，埋头从事化学实验和研究，取得了一系列成就。他是第一位收集气体的化学家。此外，他在 1662 年发现：空气不但可以压缩，而且这种可压缩性按一简单的反比关系随压强而变化。如果将一定量的气体置于两倍压强之下，则气体的体积减少一半；如果压强增大到 3 倍，气体的体积就减少到三分之一。反之，如压力减小，气体则膨胀。这个反比关系被称为**玻意耳定律**。

此后 15 年，法国物理学家马略特也根据实验独立地提出这一发现。所以后人把关于气体体积随压强而改变的这一规律称作**玻意耳-马略特定律**。这一定律用当今较精确的科学语言应表达为：一定质量的气体在温度不变时，它的压强和体积成反比。

化学的定义

在化学实验中，玻意耳读了不少前人的有关著作，也了解到当时的一些科研成果。这不仅开阔了他的眼界，丰富了他的思想，同时也为他整个实验的安排提供了指导。当时德国有一位工业化学家格劳伯，大半生从事化学实验，对金属冶炼、酸碱盐的制取有较多的研究，对于振兴德国的工业做出了重大贡献，格劳伯的事迹以及他的关于化学实验的著作《新的哲学熔炉》给了玻意耳一个重要的启示，使他认识到化学在工业生产中所具有的广泛意义，化学不应只限于制造医药，而是对于整个工业和科学都有着重要作用的科学。为此，他认为有必要重新来认识化学，首先要讨论的是什么是化学。

玻意耳根据自己的实践和对众多资料的研究，主张化学研究的目的在于认识物质的本性，因而需要进行专门的实验收集观察到的事实。这样就必须使化学摆脱从属于炼金术或医药学的地位，发展成为一门专为探索自然界本质的独立科学。这就是玻意耳在《怀疑派化学家》中所阐述的第一个观点。为了引起人们的重视，他在书中进一步强调指出：“化学到目前为止，还是认为只在制造医药和工业品方面具有价值。但是，我们所学的化学，绝不是医学或药学的婢女，也不应甘当工艺和冶金的奴仆，化学本身作为自然科学中的一个独立部分，是探索宇宙奥秘的一个方面。化学，必须是为真理而追求真理的化学”。

元素的定义

为了确定科学的化学，玻意耳考虑到，首先要解决化学中一个最基本的概念：元素。最

早提出元素这一概念的是古希腊哲学家柏拉图，他用元素来表示当时认为是万物之源的四种基本要素：火、水、气、土。这一学说曾在两千年里被许多人视为真理。后来医药化学家们提出的硫、汞、盐的三要素理论也风靡一时。波意耳通过一系列实验，对这些传统的元素观产生了怀疑。他指出：这些传统的元素，实际未必就是真正的元素。因为许多物质，比如黄金就不含这些“元素”，也不能从黄金中分解出硫、汞、盐等任何一种元素。恰恰相反，这些元素中的盐却可以被分解。那么，什么是元素？波意耳认为：**只有那些不能用化学方法再分解的简单物质才是元素**。例如黄金，虽然可以同其它金属一起制成合金，或溶解于王水之中而隐蔽起来，但是仍可设法恢复其原形，重新得到黄金。水银也是如此。

至于自然界元素的数目，波意耳认为：作为万物之源的元素，将不会是亚里士多德的“四种”，也不会是医药化学家所说的三种，而一定会有许多种。现在看来，波意耳的元素概念实质上与单质的概念差不多，**元素的定义应是具有相同核电荷数的同一类原子的总称**。如今这种科学认识是波意耳之后，又经三百多年的发展，直到20世纪初才清楚的。波意耳当时能批判四元素说和三要素说而提出科学的元素概念已很不简单，是认识上一个了不起的突破，使化学第一次明确了自己的研究对象。在《怀疑派化学家》一书中，在明确地阐述上述两个观点的同时，波意耳还强调了实验方法和对自然界的观察是科学思维的基础，提出了化学发展的科学途径。波意耳深刻地领会了培根重视科学实验的思想，他反复强调：“化学，为了完成其光荣而又庄严的使命，必须抛弃古代传统的思辨方法，而要象物理学那样，立足于严密的实验基础之上。”波意耳正是这样身体力行的。他把这些新观点新思想带进化学，解决了当时化学在理论上所面临的一系列问题，为化学的健康发展扫平了道路。如果把伽利略的《对话》作为经典物理学的开始，那么波意耳的《怀疑派化学家》可以作为近代化学的开始。

在波意耳众多的科研成果中，还有几项不能磨灭的化学成就。波意耳常说，“要想做好实验，就要敏于观察。”这几项成就都是实验中敏锐观察的结果。

波意耳女友去世后，他一直把女友最爱的紫罗兰花带在身边。在一次紧张的实验中，放在实验室内的紫罗兰被溅上了浓盐酸，爱花的波意耳急忙把冒烟的紫罗兰用水冲洗了一下，然后插在花瓶中。过了一会波意耳发现深紫色的紫罗兰变成了红色的。这一奇怪的现象促使他进行了许多花木与酸碱相互作用的实验。由此他发现了大部分花草受酸或碱作用都能改变颜色，**其中以石蕊地衣中提取的紫色浸液最明显，它遇酸变成红色，遇碱变成蓝色**。利用这一特点，波意耳用石蕊浸液把纸浸透，然后烤干，这就制成了实验中常用的酸碱试纸——石蕊试纸。

也是在这一类实验中，波意耳发现五倍子水浸液和铁盐在一起，会生成一种不生沉淀的黑色溶液。这种黑色溶液久不变色，于是他发明了一种**制取黑墨水**的方法，这种墨水几乎用了一个世纪。

在实验中，波意耳发现，从硝酸银中沉淀出来的白色物质，“如果暴露在空气中，就会变成黑色。这一发现，为后来人们把硝酸银、氯化银、溴化银用于照相术上，做了先导性工作。

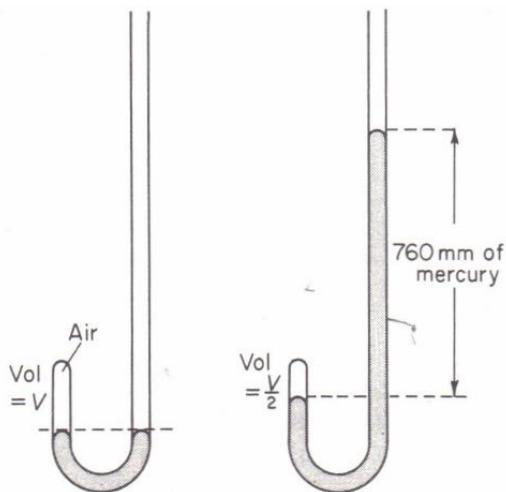
晚年的波意耳在制取磷元素和研究磷、磷化物方面也取得了成果，他根据“磷的重要成分，乃是人身上的某种东西”的观点，顽强努力地钻研，终于从动物尿中提取了磷。经进一步研究后，他指出：**磷只在空气存在时才发光**；磷在空气中燃烧形成白烟，这种白烟很快和水发生作用，形成的溶液呈酸性，这就是磷酸，把磷与强碱一起加热，会得到某种气体（磷化氢），这种气体与空气接触就燃烧起来，并形成缕缕白烟。这是当时关于磷元素性质的最早介绍。

法国科学家制造了一个黄铜气缸，中间装有活塞，安装得很紧。几个人用力按下活塞，压缩缸里的空气。然后，他们松开活塞，活塞弹回来，但是没有全部弹回来。不论他们隔多长时间做一次实验，活塞总是不能全部弹回来。

通过这项实验，法国科学家声称空气根本不存在弹性，经过压缩，空气会保持轻微的压缩状态。

波意耳宣称法国科学家的实验不能说明任何问题。他指出，活塞之所以不能全部弹回来，是因为他们使用的活塞太紧。有人反驳道，如果活塞稍松，四周就会漏气，影响实验。波意耳许诺要制造一个松紧适中的绝好活塞，证明上述实验是错误的。两周后，波意耳手持“U”形大玻璃管站在众科学院会员面前。这个“U”形玻璃管是不匀称的，一支又细又长，高出3英尺（0.914米）多，另一支又短又粗，短的这支顶端密封，长的那只顶端开口。

波意耳把水银倒进玻璃管中，水银盖住了“U”形玻璃管的底部，两边稍有上升。在封闭的短管中，水银堵住一小股空气。波意耳解释，活塞就是任何压缩空气的装置，水银也可以看作“活塞”。像法国实验所期望的那样，波意耳的做法不会因为摩擦而影响实验结果。



波意耳记录下水银重量，在水银和空气交界处刻了一条线。他向长玻璃管中滴水银，一直把它滴满。这时，水银在短玻璃管中上升到一半的高度。在水银的挤压下，堵住空气的体积变成不到原来的一半。

在短玻璃管上，波意耳刻下了第二条线，标示出里面水银的新高度和堵住空气的压缩体积。然后，通过“U”形玻璃管底部的阀门，他把水银排出，直到玻璃活塞和水银的重量与实验开始时的重量完全相等。水银柱又回到它实验开始的高度，堵住的空气又回到它当初的位置。空气果真有弹性，法国科学家的实验是错误的，波意耳是正确的。

波意耳用玻璃活塞继续实验，发现了很多值得注意的事情。当他向堵住的空气施加双倍的压力时，空气的体积就会减半；施加3倍的压力时，体积就会变成原来的1/3。当受到挤压时，空气体积的变化与压强的变化总是成比例。他创建了一个简单的数学等式来表示这一比例关系，如今我们称之为“波意耳定律”。就认识大气、利用大气为人类服务而言，这一定律是极为重要的。

研究电的性质（电火花通过固液气）

1855年，**盖斯勒**(Heinrich Geissler)发明了水银替换泵，可以实现大约10pa的部分真空。盖斯勒是德国玻璃仪器制造商和自学成才的物理学家，他的父亲也是玻璃仪器制造商，制作过气压计和温度计，盖斯勒年轻时有几年是行走各地制造仪器，之后在波恩开店专门制造医疗仪器。当他出名后被波恩大学雇用，在波恩大学的玻璃仪器制造的附属机构里工作。电火花发现后，由于和闪电比较像，因此富兰克林想通过风筝实验将闪电引入莱顿瓶中，再通过实验证实闪电与电一样。人们通过实验测试电火花通过水，金属，空气等媒介的能力、通过实验测试电的性质，如果电能煅烧钻石，那么电和普通的火类似；如果电使石灰水或碱性水变中性，那么电就具有和酸一样的性质；如果电能使硫酸盐析出硫磺，那么电就和燃素相似；这大概就是人们将电极插入水中的原因，于是有了尼柯尔森和卡莱尔1800年发

表的论文《利用电池电流分解水的方法》. 文中讲的是他们借助于电弧进行了分解水的研究，他们确认在这种情况下，水会分解出氢气和氧气. 这就是说，可以用电流分解其它物质.

水解的出现，驳斥了亚里士多德的四元素说

有一天，一位助手送来一篇文章，并且说是贝多斯博士请戴维看的. 他看到是尼柯尔森和卡莱尔 1800 年发表的论文《利用电池电流分解水的方法》，助手汤姆和戴维商量也试试这类实验. 他们把贝多斯博士准备的电池组拿来，准备试试电流对各种不同物质的作用. 他们取得了一定成绩.

1807 年英国的戴维首次用电解熔盐的方法取得了金属钾和钠.

1810 年戴维确定氯是种元素.

1811 年意大利的阿伏加德罗提出分子假说.

为什么进行真空放电实验？

为什么要在真空或半真空中进行放电实验并最终发现了电子？

1675 年，法国天文学家皮卡德 (Jean Picard) 在晚上将水银气压计从天文台移到圣米歇尔山时，注意到了当气压计中水银振荡时，在托里拆利水银气压计真空部位会发出闪光，即“水银荧光”现象. 这一现象使他非常惊奇，并立即向名为《学者杂志》(Journal des savans) 的学术期刊报告了这一发现. 人们可能在想，为什么一个天文学家要携带气压计呢. 实际上，作为一个天文学家，皮卡德要测量恒星、行星等的位置. 他知道这些位置在太空中的出现受到大气折射的影响. 而大气折射又受到大气温度和大气压的影响，他通过气压计测量气压.

在荷兰格罗宁根 (Groningen) 教书的瑞士数学家伯努利 (Bernoulli) 研究了这个现象，并于 1700 年向法国科学院演示了这个现象. 从伯努利那里学到这个现象后，英国人豪克斯比 (Francis Hauksbee) 广泛地研究了这个现象，证明完全的真空环境不是产生这个现象的必要条件.

豪克斯比在进入皇家学会之前就被认为是一个仪器制造者 (instrument maker) 和很有技巧的实验者 (experimenter of great skill). 在科学院前两年里主要用他自己的新空气泵重复波意耳，胡克和丹尼斯·帕潘 (Denis Papin) 的实验. 1705 年豪克斯比开始做皮卡德的气压计发光实验. 当空气压力变化，他发现光在像空气这样的密度的媒介中不会产生，而且要产生光的话也不需要把所有空气都抽出，很明显产生光的原因是水银与玻璃的相互摩擦. 但这只是水银才具有的特性吗，还是其他物质在真空中摩擦也会产生光呢？豪克斯比做实验后发现，在抽空的容器中，球形琥珀和纺织品的衣料相互摩擦也会发光，光在真空中比在空气中亮（静电放电）.

相反地，打火石与钢铁相互摩擦时，放入空气才会产生火花（这是燃烧，需要氧气）.

1705 年 12 月 9 日，豪克斯比向学会展示的一个实验证实，当一个有杠杠的玻璃球快速旋转且与绑在铜弹簧上的纺织品的衣料相互摩擦时，在抽空的容器中时会迅速产生紫色光，并且随着抽空程度，也就是气压的变化而变化. 但是当空气进入后，光就失去了颜色和强度. 在黑暗的房间里旋转一个抽空的玻璃球，把手放在旋转的玻璃球表面与之摩擦时，玻璃球内产生了紫色光且足以照亮大写字母. 当玻璃球内充入空气后，光消失了，而靠近玻璃球的物体上会产生明亮的斑点，甚至他的衣领上都发光了.

威廉·沃森 (William Watson, 1715–1787) 是英格兰科学家、医生，在伦敦出生、逝世. 他在 1741 年加入皇家学会；在 1772 年晋升为副会长. 在 1745 年荣获科普利奖章.

从 1744 年开始，沃森首先基于莱比锡大学教授约翰温克勒 (Johann Winkler) 的一份“勺子中热 (warm) 的酒精会被电火花点燃”的报告开始了最初的电学实验. 此后，1746 年莱顿瓶发明. 沃森让很多人手拉手通过莱顿瓶放电，使人们建立了电路的概念. 从沃森在真空或半真空中的放电实验可以推知，沃森在真空中进行放电实验的目的，是为了验证真空是否导电，这一点通过他将铜导线的两端从靠近到分开一段距离的实验可以得知.

莱顿瓶的改进

约翰·贝维斯(John Bevis)最先建议沃森用锡箔(tinfoil)或铅皮(sheet-lead)来包装莱顿瓶的外层，也很可能是第一个注意到莱顿瓶的电量(charge)随着莱顿瓶的增大而增大，而不是与莱顿瓶中水的含量成正比，水只是起着导体的作用。他正确地认识到金属也可以像水一样起到同样的作用，于是就制作了3个用铅皮外层包围的莱顿瓶，当莱顿瓶连在一起后，发现3个莱顿瓶放电效果比两个大，两个比1个的大。这显示了莱顿瓶的电力是由金属和玻璃决定的。并且证明了电力与金属外层的量(quantity)成正比。

沃森的真空放电实验

沃森是第一个示范了电在真空中传播的人，他在1752年将这一系列实验发表在了皇家学会的《Philosophical Transactions》上，这些实验随后被斯密顿(smeaton)，坎藤(canton)，威尔逊(Wilson)重复。沃森是在约翰·史密顿(John Smeaton)和查尔斯·卡文迪什勋爵(Lord Charles Cavendish)的帮助下做这些实验的。

玻璃管差不多有1英尺(0.98米)长，直径几乎有3英寸(7.5cm)，一个与玻璃管很合适的铜环粘牢在玻璃管两端，铜环中各有一个可以像螺丝一样扭稳的中空铜杯，几乎是圆的形状。其中一个铜杯的顶上是蘸有油的皮革材料，皮革材料中插有一根苗条的、与玻璃管另一端的距离小于8英寸(20cm)的铜棒。玻璃管另一端的铜杯上固定一根只有8英寸(20cm)的同样的铜棒。这样一来，两根铜棒就能容易地相互接触在一起，并且为了更好地观察由于表面的增加而引起的不同效果，在玻璃管两端扭上一小片圆形铜片。这样做的目的是方便将铜棒之间的距离分开或靠近某一距离。电流在真空中产生的距离要比同样条件下在空气中的远。

将玻璃管内外擦干，然后放在一个大概2英尺(1.96米)长，半径正好可以放之前提到的铜环的铜柱内。为了防止空气进入，在铜柱两端固定一小片湿的皮革。将这些放在空气泵上，底端放上一块蜡，铜棒两端连接上导体，然后使发电机(摩擦产生直流电)转动起来。如此一来铜棒就被充电了，当铜棒靠近底端的铜片，或者与铜片距离2英尺(5.08cm)时，电火花就会从顶端的铜片吹向底端的铜片。并且任何一个站在地面上的人与空气泵任何部位接触时都会被猛然吸住，给其他人一种被充电的信息。但是，当铜片彼此后退时，效果就会越来越小，当他们相距5-6英尺(12.7-15.24cm)时，与空气泵接触就不会被吸住。

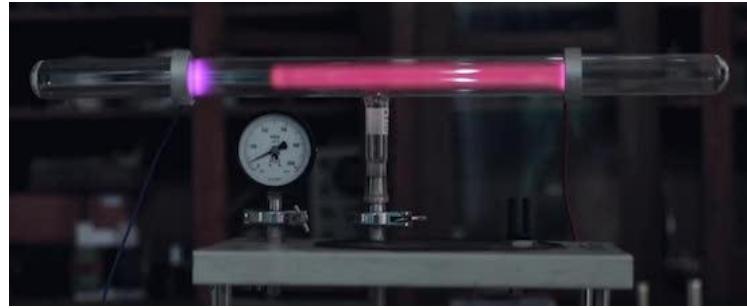
当抽出玻璃管中空气时，电火花不仅通过5英尺(12.7cm)，而是通过整个玻璃管。

当玻璃管被完全(perfect)抽空时，电火花会成为一束连续的流，朝同一方向通过整个玻璃管。当放入一小点空气进入的时候，上面的现象就消失了。

这些实验显示，无论真空中能做的多么好，电火花都可以扩散在整个玻璃管的长度里(真空越好，电火花通过的距离越长)。

沃森非常想知道，他做的多人手拉手通过莱顿瓶放电实验形成电路，以及长距离测量莱顿瓶放电的传播速度(结论是即时性)的实验是否能在真空中做。通过上面的真空管实验，他发现在真空中的放电应该是即时性的，但是当铜棒相距超过10英尺(3.048米)时，就不再有电火花通过真空了。

沃森之后几乎一个世纪里，人们在真空放电方面都没有任何新的发现。1838年，法拉第将电流通入两端有铜棒(rod)的封闭的空气稀薄的容器时，注意到了一束紫色雾气或光束从正极流出，停在距离负极一小段距离的位置上，而负的铜棒上被连续的光(glow)罩住，如此这样地在正极与负极之间出现了一小段狭小的黑色空间，为了纪念它的发现者，这段空间被后续的研究者命名为法拉第黑色空间(faraday dark space)。(稀薄气体管中的颜色取决于充入的气体。)尽管法拉第观察到了一系列有趣的现象，但是他受到当时空气泵的影响，人们不能将玻璃管中的气压减小很多来有效地研究阴极的光。



左边是负极，右边是正极

1854年，德国一个具有超常吹制玻璃容器的人**盖斯勒**不仅发展改善了真空泵，还成功地将金属电极封装在玻璃管内，他制作的这个玻璃管尤其适合于电流通过低压气体。盖斯勒是德国吹玻璃的人和物理学家，他设有一家制造兼出售科学仪器的店铺。他在德国很多大学找到过工作，包括在波恩大学。在波恩大学，他被物理学家**普吕克**叫去设计一种抽空玻璃管的仪器。

发现阴极射线

普吕克(Plücker, Julius)1801年生于德国埃尔伯菲(Elberfeld)；1868年卒于波恩(Bonn)，数学、物理学家。

普吕克出身于亚琛(Aachen)的一个商人家庭。青年时代毕业于杜塞尔多夫(Düsseldorf)地方的大学预科，以后曾到波恩、海德堡、柏林和巴黎等地的大学学习。1824年从马堡(Marburg)大学获得博士学位。1825年在波恩大学担任讲师。1828年被提升为特别教授。1833年在柏林任特别教授，同时担任弗里德里希·威廉(Friedrich Wilhelm)高级文科中学的教师。1834年在哈雷(Halle)大学任数学教授，以后又继K.明休(von Münn-chow)之任，在波恩任教数学(1836—1847)。

普吕克在物理学方面的引路人是法拉第，他和后者通信。两个世纪以前，葛利克发明了第一台空气泵。葛利克用空气泵抽出容器中的空气，从而形成真空，而科学家用这样的真空器能心满意足地做实验。托里拆利比当时的空气泵所能做到的要强，他在一个水银柱上造成了真空。然而，这种真空仅仅作为一件珍贵物品而被保留下来，因为它是密封容器内的真空，因此，不适用于做实验。1855年，**盖斯勒**吸取了托里拆利发现的优点，制造了一台没有机械运动部分的空气泵。

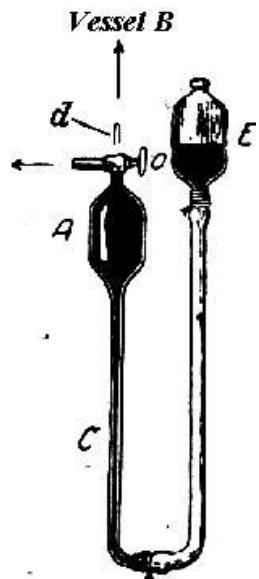


Fig. 209 Principle
of Geissler's
Mercury air pump

盖斯勒的空气泵

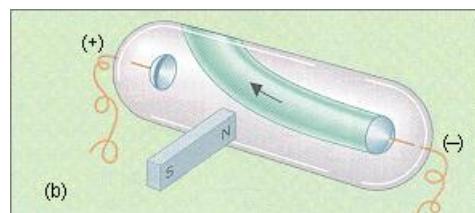
他使一柱水银上下运动. 水银柱上面的真空可以用来一点一点地吸出密封容器内的空气, 直到密封容器内的真空度接近水银柱上方的真空度为止. 他用这种方法形成的真空比以前任何人形成的都要纯. 如上图所示, A, C 加起来有 80–90cm, 为了抽出容器 B 中的空气, 首先打开阀门 O 让 A 与大气相通, 然后提高 E 使 A 和 C 中的水银上升到阀门 O, 然后关闭阀门 O 并降低 E, 此时 C 中的水银将降低, 就像托里拆利实验一样, 在 A 的上端将出现真空, 此时缓慢打开阀门 O, 容器 B 中就被抽真空了. 反复多次可使容器 B 中达到很高的真空度.

盖斯勒的朋友普吕克把用这种方法形成的真空管子称为盖斯勒管. 有了盖斯勒管, 就有了使电和原子的研究迈出重要一步的可能. 在此以前, 物理学家曾经想通过真空器来进行放电, 法拉第也曾经指出, 若是如此, 结果应是荧光的形成. 遗憾的是, 法拉第所使用的真空器不够理想, 以致不能作出很多成就. 有了盖斯勒管, 情况发生了变化, 研究工作得以开始.

1847 年, 普吕克对法拉第的真空放电实验 (法拉第黑色空间 Faraday dark space) 的工作变得感兴趣起来. 普吕克认为, 如果将气体放入玻璃中密封, 那么可以长时间观察到放电效应. 1858 年, 普吕克用盖斯勒管产生放电现象, 发现一种神秘的、漂亮的绿光. 这种光可以持续很长时间.

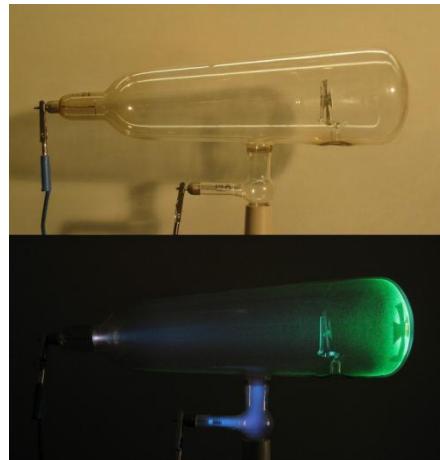
戴维在 1821 年曾经研究过另外一种形式的放电现象, 两个碳极之间有弧光, 当用磁铁靠近时, 弧光会偏转.

普吕克做了一个在真空中放电的相似实验, 观察到了类似的光在磁场中的偏转. 但是他的实验的最有趣的地方是在负极附近检查到了光在磁场中的行为; 当负极改成一个单一的点, 则整个负极的光都集中在通过该点的磁场的磁力方向的一条线上. 换句话说, 负极的光就像是由金属粒子丝组成的一端连着负极的可以弯曲的链条.



普吕克真空中放电实验

普吕克注意到，当负极是铂金的时候，小微粒就跑离负极并堆积在玻璃管上了。这很正常，普吕克写到，想象一下这些磁场的光是由不发光的铂金粒子组成并且当他们跑离负极的话。他好像看到了在放电期间靠近负极的玻璃管上发出了磷光，并且标记了这些光因磁场的变化而变化的位置。这导致了另外一个发现，在1869年，普吕克的学生希托夫(Hittorf)曾经放置一个固体在点状负极和磷光之间，并很惊讶地看到了一个阴影投下。他因此正确地推断说，负极的光是由射线形成的，这些射线在直线上向前运动，并且他们与玻璃壁发生碰撞时产生磷光。



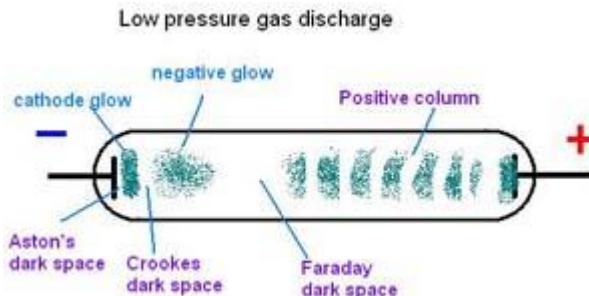
希托夫

希托夫发现阴极射线可以穿透很薄的金属薄片，这一现象在1894年被莱纳德(Lenard)深入地研究并得到重要的结果。

希托夫的观察结果在1876年被戈尔德施泰因(Eugen Goldstein)放大了，他发现，不仅负极是一个点，就算是一个表面，当固体放得靠近负极时，也会发现不同的阴影被投射下来。这清晰地显示出，阴极射线(cathode rays)(此时第一次被使用的名词)不是毫无差别地向各个方向发射，而是负极上的每一表面部分发射的射线都指向同一个方向。并且戈尔德施泰因发现这个方向是负极表面的法线方向。他的发现建立了一个重要的区别，阴极射线是从负极发射出的，光是从不发光的负极表面发射出的。

接下来的20年里，阴极射线的本质问题吸引了很多注意力。希托夫的发现之后的第二年，克伦威尔·瓦利(Cromwell Varley)抛出了一个假设，认为阴极射线是被电从负极射出的微弱的物质的粒子。这些粒子是被充了负电(带负电)的，因为它们会被磁场影响。

几年后，英国物理学家威廉·克鲁克斯(William crookes)研究了真空中放电实验。克鲁克斯发现，真空中放电时，负极发出的光会变得越厚并且远离负极，在负极和光之间留下一段昏暗的空间(dark space)，这段空间被称为克鲁克斯暗空间。



真空中放电时，负极发出的光会变得越厚并且远离负极，在负极和光之间留下一段昏暗的空间(dark space)，这段空间被称为克鲁克斯暗空间。

线会聚集在一个很小的区域上，当物体放在凹面负极的曲率中心时，会被强烈地加热，把这些射线通过狭小缝隙时，会得到很狭窄的射线束，这条射线束会被横向的磁场弯曲，就好像一条弯曲的导体带着电流流向负极。克鲁克斯采纳了瓦利的观点，认为阴极射线是快速运动的带负电的粒子。

克鲁克斯在阴极射线上的实验引起了物理学家关于电通过气体的极大兴趣，并且不久就开始尝试形成关于气体传导电的普遍理论。

1894 年，当时任赫兹助手的勒那德 (LENARD, Philipp 1862–1947) 研制出了带有“勒纳德窗口”的阴极射线管。

关于阴极射线

勒纳德的父亲是富裕的酿酒商，并且希望勒纳德继续这门生意，在长期的争论之后，他父亲才同意他继续学业，但是要求他要以与酿酒相关的化学学习为主。1883 年，他用一年工作攒下的钱到德国拜访了私下经常通信的本生，本生的演说使他坚信了作为科学家的想法，并于 1883 年通过海德堡大学入学考试，在海德堡和柏林学习物理 4 个学期。指导教师赫姆赫兹。其后勒纳德研究过磷光，在伦敦，在德国不同大学之间当物理教授的助手，之后在已经因为电磁波的发现而出名的赫兹的指导下工作，其后他的敏感性发展为病态，这导致他认为自己被赫兹忽略并抛在一旁，赫兹突然的去世使其担负了可能是赫兹的余下的工作，1892 年他因为水电方面的工作成为一名讲师，但还是继续了由赫兹开始的光电效应的研究，实际上光电效应从 1880 年开始就是勒纳德最喜欢的主题。

这一工作的开始可追溯到 26 年前的克鲁克斯。我读过他的文章《辐射物质》，这是他对阴极射线的称呼。在求学期间，我没有直接表现出对这些问题的兴趣。气体放电对于初学者来说并不是一个合适的研究对象，事实的确是这样。甚至是成熟的研究者在克鲁克斯以后的年月中也没有取得真正有意义的成就。只是在后来，当我在海德堡大学当昆克 (Quincke) 的助手时，我才有机会和便利制造了一个水银真空泵（它能产生非常高的真空），用来进行我自己的阴极射线实验，我完成了关于阴极射线的第一项研究成果，研究了当时赫兹的关于阴极射线有与紫外线相似特性的观点，并设计了一个实验，以探究阴极射线是否像紫外线一样，能够通过放电管壁上的石英窗（石英玻璃），我获得的结果是阴极射线没有这样的特性。当时这不算是物理研究所的标准实验项目。我希望尽可能直接地取得进展，我想，如果能将这些射线从管中引到空气中该有多好：那时就有可能用它们进行直接实验了。为此，需要在管壁装一个可以让射线穿过的密封层。

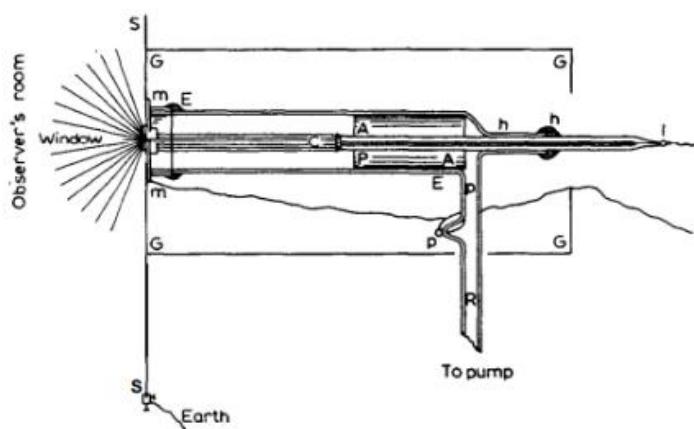
4 年后，即 1892 年，我有了另一个机遇，当海因里希·鲁道夫·赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz 1857 年–1894 年) 的助手。一天他叫我去，这种机会不经常有，他给我看刚发现的新现象：在放电管中放着一块用铝箔覆盖的含铀玻璃片，当用阴极射线轰击铝箔时，铝箔下面发出了亮光。赫兹因此建议可以用铝薄板将放电管内的空间一分为二，在空间的一部分内，阴极射线由常规的方法产生，而在空间的另一部分，可以在真空的条件下观察阴极射线。赫兹由于过于忙碌，便授权我做这个实验。

他对我说，“我们应该用铝箔把放电管分成两个室、在一个室中像通常那样产生阴极射线，在另一个室中可观察空前纯净的这种射线。即使因为铝箔很软，两个室的气压差很小，也可以把观察室完全抽真空，看一下这样做是否妨碍阴极射线传播，换句话说，看一下阴极射线是物质中的现象还是以太中的现象。”（这一点我做到了。）他显然认为最后这个问题是最重要的问题。我后来进行了实验，但我主要对我早年的问题，即在敞开的空气中的阴极射线感兴趣。我没有因为赫兹所用的铝箔太软而不用它，我在合适的放电管中把越来越多的这种铝箔一层层叠起来，发现 10 层到 15 层还能让阴极射线很好地通过。

于是，我又找了几片较厚的薄铝片，看它们是否能经受得住空气压力。情况果然如此，条件是铝箔的面积应该足够小。

然后，我重新用旧的管子，用薄铝片代替石英片，薄铝片上有一小孔，小孔用铝箔密封，将几颗碱土磷化物颗粒放在铝窗上，然后激发放电管，礁！颗粒发亮了。我又轻轻地拿起颗粒放在铝窗前，它们在这里同样也发亮。这证明阴极射线能从放电管中出来，而过去它们一直被限制在管内。此外，它们还通过了通常密度的空气，这是谁也没有预料到的。于是很清楚，在我面前展现了一个新的广阔的研究领域，不仅包括迄今尚未看到的现象，而且有希望向未知的领域突破。到目前为止一直难以解释的阴极射线的秘密终于被揭开了。更重要的是现在首次能以最大的纯度进行实验。让我们用另一种类型的辐射——光——来作类比。如同到现在为止，除了在产生光线的炉子内部和火焰中外（就象阴极射线在放电管中），不可能研究光线。那么伟大而详尽的光学就此止步了吗？现在可以在炉子上装一个密封窗，纯的光线能通过密封窗出来，离开形成它的复杂而难以解释的过程，这个过程仍限制在放电管里面。

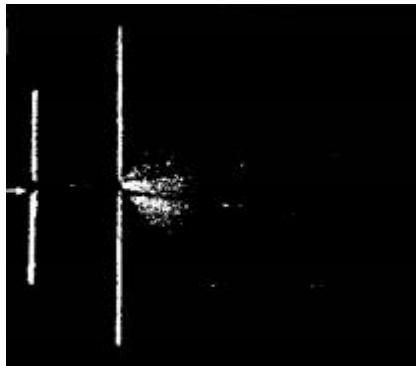
自从发现阴极射线以来，这个过程一直不能理解，除非对阴极射线本身进行充分的研究。



现在首先需要扩大新的知识领域的这个突破口，重要的是增大从窗口出来的射线的强度，并改进产生射线的条件（与第一个放电管相比）。因此我制造了如图所示的放电管，它曾在许多实验中使用过。这里可以看到射线产生室，其中有阳极（A），阴极（C），有小窗的密封层（mm），窗后是观察室，射线就进入该室。尽管在这里最明显的或不太明显的现象都能观察到，但到目前为止，所有现象的结果都尚未充分地研究过。

必须指出，射线不能直接看见，用眼睛直接对着窗口是无用的，因为眼睛这个器官不能接收阴极射线。另一方面，不加热就能发光的荧光物质可以使射线变成可见的。最好是用几张涂有这种物质的纸对着射线作屏幕，例如某种酮、氰化铂或碱土磷化物。如果屏幕发光，就表明有阴极射线撞击它。还可以对射线直接摄影。这些方法和使紫外线成为可见的方法相同。紫外线是当时知道的不可见辐射的唯一例子。

当我们使用荧光屏时，发现靠近窗口处最亮，随着离窗口距离的增加，射线的强度逐渐减弱，到离窗口8厘米时屏幕就相当暗了。常压下敞开的空气对阴极射线的穿透性不十分好，比光的穿透性要差得多。我们有趣地发现，空气对这些射线来说是一种混浊媒质，就像牛奶对于光一样。如果我们在离窗口合适的距离处置一块带孔的不透光的板，然后把屏的边缘对着孔，就会得到所示的图像。



图中虚线指示出细的射线束，这是直线传播时应有的情况。但是我们在空气中的屏幕上实际上看到了宽的弯曲球状光束，就像我们让光通过一个盛有稀牛奶的罐子的相同小孔时所看到的现象。是什么东西使空气变混浊呢？在牛奶中是无数悬浮的脂肪小颗粒造成混浊，使透光性变差。但纯净空除了悬浮于以太中的气体分子外别无他物。这些分子异常微小，比脂肪分子小一万倍，它不能阻挡光的传播而使透光性变差。可见，阴极射线一定是非常精细，与之相比，物质的分子结构就显得粗糙了，尽管物质的分子结构和很精细的光波相比又显得极小。因此有可能用这些射线去获得有关分子和原子本质的信息。

勒纳德继续实验，证实物质对阴极射线的吸收只与物质的重量有关，重量越大，吸收就越多。

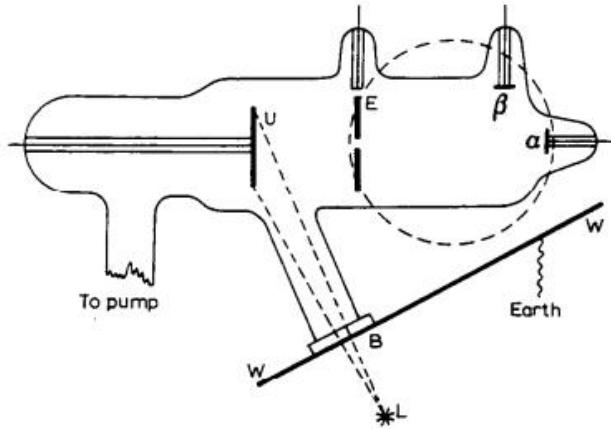
光电效应的研究

霍尔伐克士，博洛尼亞的奧古斯托，以及莫斯科的斯托列托夫的研究都证实了无论金属板上是否充有负电，紫外光都会从金属板上驱逐出一束带负电的微粒，当时人们普遍相信这些带负电的微粒中还包含有周围被电离的带电气体分子的原子。

勒纳德获得博士学位3年后，在海德堡当乔治·昆克(George quincke)的助手时开始研究这个问题。他对于电离的解释持有怀疑态度。1887年，一名叫罗伯特纳·霍尔德(Robert nahrwold)的体育老师通过自己的实验断定说，气体绝对不可能静态地被充电(电离)(**highly probable that a gas cannot be statically electrified.**)还有人认为是带电的灰尘(dust)从金属表面被驱逐出来，还有人认为紫外线使金属表面粗糙或磨成粉。为了驳斥这些观点，勒纳德设计了一些实验。勒纳德于1899–1900年之间的论文包含了1890–1891年就开始的实验。他的实验有几个结果，首先，据他原创性的推断，因光照而带电的大质量的微粒从负极驱逐出来是不正确的。证明包含了一条干净的铂线作为正极，磨光滑的钠汞合金金属作为负极。

正负极都放在氢气中。在通过了 3×10^{-6} 库伦的电量后中断光电流。如果携带电的是钠的原子，那么钠会沉积在铂电极上，但是从电极上去除电线后通过光谱分析，没有任何的钠被发现。其次，与里吉(righi)的一致，所有在空气中已知的紫外光的效应在最高真空环境下都存在，这就去除了光电放电作用于玻璃管中剩余气体上的情况。

既不是气体分子，也不是阴极金属的分子，那么光电流中带电的微粒是什么呢？这一答案要通过仔细的测量带电微粒的荷质比来确定。勒纳德的实验设备如图所示。



在锌电极两端产生的紫外光通过石英玻璃窗口 B 抽空的玻璃管中，然后从铝的负极 U 上释放带负电的微粒。负极 U 与直流电压供应器相连使其电压会变化。与地球相连的金属屏幕 E 中央有一个洞，这个 E 作为正极。E 还具有使右边部分不被静电干扰。小电极 α 和 β 与静电计相连。如果 U 被紫外光照射并充几伏的电，则带负电的微粒将被驱逐出来加速冲向 E，它们中的一小部分将通过小洞然后以恒定的速度抵达静电计 α 而被记录，利用一对赫姆赫兹线圈，在 E 和 α 之间就产生了指向读者的磁场，带负电的微粒就会向上转向，于是抵达 β 的负电就会被与 β 相连的静电计探测到。

e/m 的计算如下，首先假设左边没有任何磁场，右边没有任何电场。让 U 上接有 V 伏的负电压，正极 E 始终处于 0 V，那么到达正极 E 的微粒所具有的动能的近似值可以表达为

$$eU = \frac{1}{2}mv^2$$

速度 v 在离开 E 后保持不变，则后面作用在微粒上的力只有磁场力 H，由于这个力 evH 始终与带电微粒的运动方向垂直，带电微粒的路径将变成一个半径为 r 的圆，

$$evH = \frac{mv^2}{r}$$

其中 H 的大小只需使微粒到达 β 即可。通过上述两个方程，我们有

$$\begin{aligned} eU &= \frac{1}{2}mv^2, mv^2 = 2eU, \\ evH &= \frac{mv^2}{r}, eH = \frac{mv}{r}, \\ e^2H^2 &= \frac{m^2v^2}{r^2}, v^2 = \frac{e^2H^2r^2}{m^2} \\ m \frac{e^2H^2r^2}{m^2} &= 2eU, \frac{eH^2r^2}{m} = 2U, \\ \frac{e}{m} &= \frac{2U}{H^2r^2}, \end{aligned}$$

勒纳德得到的 e/m 的值是 1.15×10^{-7} emu/g.

这个值和汤姆逊(Thomson)的有差异，据说实验的目的不是像汤姆逊一样主要是测量 e/m 。我们暂时不考虑这点，汤姆逊已经证实阴极射线是电子，勒纳德的光电效应的深入研究有如下发现，他使用碳弧灯来研究光电子的能量如何随着光强度的变化而变化。利用三棱镜

分开不同颜色的光，通过从光谱的最蓝的部分开始慢慢增加光的频率，使平均放出的电子更加具有能量。通过将碳弧灯向金属板靠近来增加光的强度来使更多的电子放出。通过在阳极上接上负电来阻碍金属板上电子的移动，使电流计的电流为零来测量电子的速度。使光强度增加2倍时电子数量增加了2倍，但是阻止电子形成电流的电压却不变。改变光的颜色会对阻止电子形成电流的电压产生影响。波长越短则电压越高。通过这些实验，勒纳德总结到：

借着变化紫外光源与阴极之间的距离，他发现，从阴极发射的光电子数量每单位时间与入射的辐照度（亮度）成正比。

第二，使用不同的物质为阴极材料，可以显示出，每一种物质所发射出的光电子都有其特定的最大动能（最大速度），换句话说，光电子的最大动能与光波的光谱组成有关。

第三，借着调整阴极与阳极之间的电压差，他观察到，光电子的最大动能与截止电压成正比，与辐照度无关。

由于光电子的最大速度与辐照度无关，莱纳德认为，光波并没有给予这些电子任何能量，这些电子本来就已拥有这能量，光波扮演的角色好似触发器，一触即发地选择与释出束缚于原子里的电子，这就是莱纳德著名的“触发假说”（triggering hypothesis）。

X射线的发现

威廉·康拉德·伦琴（德语：Wilhelm Conrad Röntgen 1845年-1923年）不止一次地重复了勒那德的实验。1895年11月8日晚，他再次重复了勒那德的实验。伦琴欣喜地发现，这种阴极射线能够使1米以外的荧光屏上出现闪光。为了防止荧光板受偶尔出现的管内闪光的影响，伦琴用一张包裹相纸的黑纸，把整个管子里三层外三层地裹得严严实实。在子夜时分，伦琴打开阴极射线管的电源，当他把荧光板靠近阴极射线管上的铝片洞口的时候，顿时荧光板亮了，而距离稍微远一点，荧光板又不亮了。

伦琴还发现，前一段时间紧密封存的一张底片，尽管丝毫都没有暴露在光线下，但是因为他当时随手就把它放在放电管的附近，现在打开一看，底片已经变得灰黑，快要坏了。这说明管内发出某种能穿透底片封套的光线。伦琴发现，一个涂有磷光质的屏幕放在这种电管附近时，即发亮光；金属的厚片放在管与磷光屏中间时，即投射阴影；而比较轻的物质，如铝片或木片，平时不透光，在这种射线内投射的阴影却几乎看不见。而它们所吸收的射线的数量大致和吸收体的厚度与密度成正比。同时，真空管内的气体越少，线的穿透性就越高。为了获得更加完美的实验结果，伦琴又把一个完整的梨形阴极射线管包裹好，然后打开开关，然后他便看到了非常奇特的现象：尽管阴极射线管一点亮光也不露，但是放在远处的荧光板竟然亮了起来。

伦琴欣喜若狂，他顺手拿起闪闪发亮的荧光板，突然，一个完整手骨的影子出现在荧光板上。

伦琴顿时吓得不知所措，他不知这到底是在做梦，还是在做实验，他狠狠地在手上咬了一口，手被咬得生疼，他意识到自己不是在做梦，这一切都是真的。伦琴立即开亮电灯，认真检查了一遍有关的仪器，又做起了这个实验。这时，天已经微微发亮，在重重云层下，一轮美丽的红日，即将喷薄而出，给整个人类带来无穷无尽的光和热。

伦琴没有时间去想别的东西。他看到，那道奇妙的光线又被荧光板捕捉到了。他又意识到把手放到阴极射线管和荧光板之间，一副完整的手骨影子又出现在荧光板上。伦琴终于明白，这种射线原来具有极强的穿透力和相当的硬度，可以使肌肉内的骨骼在磷光片或照片上投下阴影。这时，伦琴的夫人走了过来，给伦琴披上了一件大衣，然后轻声地劝伦琴该去休息了。伦琴却一把抓住了夫人的手，放在荧光板和阴极射线管之间，荧光板上又出现了夫人那完整的手骨影子。

次日，伦琴便开始思考这一新发现的事实，他想，这很显然不是阴极射线，阴极射线无法穿透玻璃，这种射线却具有巨大的能量，它能穿透玻璃，遮光的黑纸和人的手掌。为了

验证它还能穿透什么样的物质，伦琴几乎把手边能够拿到的东西，如木片、橡胶皮、金属片等，都拿来做了实验。他把这些东西一一放在射线管与荧光板之间，这种神奇的具有相当硬度的射线把它们全穿透了。伦琴又拿了一块铅板来，这种光线才停止了它前进的脚步。然而，限于当时的条件，伦琴对这种射线所产生的原因及性质却知之甚少。但他在潜意识中意识到，这种射线对于人类来说，虽然是个未知的领域，但是有可能具有非常大的利用价值。为了鼓舞更多的人们去继续关注它，研究它，了解它并利用它，伦琴就把他所发现的这种具有无穷魅力的射线，叫做“X 射线”。

1895 年 12 月 28 日，伦琴把发现 X 射线的论文，和用 X 射线照出的手骨照片一同送交维尔茨堡物理医学学会出版。这件事，成了轰动一时的科学新闻。伦琴的论文和照片，在三个月内被连续翻印 5 次。大家共同分享着伦琴发现 X 射线的巨大欢乐。X 射线的发现，给医学和物质结构的研究带来了新的希望，此后，产生了一系列的新发现和与之相联系的新技术。就在伦琴宣布发现 X 射线的第四天，一位美国医生就用 X 射线照相发现了伤员脚上的子弹。从此，对于医学来说，X 射线就成了神奇的医疗手段。

阴极射线是由什么组成的？

十九世纪末时，有的科学家说它是电磁波；有的科学家说它是由带电的原子所组成；有的则说是由带负电的微粒组成。英法的科学家和德国的科学家对于阴极射线本质的争论，竟延续了二十多年。

阴极射线是带电粒子。首先，将其射在金属板上时，金属板带了负电，其次，射线束会与磁场相互作用，再次，射线束会与电场相互作用，早期的玻璃管真空间度不高，导致阴极射线束被玻璃管内离子化的带电气体离子包裹，屏蔽了外加电场的作用，后来汤姆逊使用了真空间度很高的，只有非常少空气进入的玻璃管，才使得阴极射线与电场的作用表现出来。其次，通过测量，阴极射线的粒子质量比已知的任何元素的原子的质量都要小，无论什么物质作为负极，射出的阴极射线都是相同的。

德国科学家普遍认为阴极射线具有以太或波的特性。赫兹发现阴极射线可以穿透非常薄的金属片，比如金叶，并在后面的玻璃上产生看得见的亮光。像气体分子一样大的微粒能穿过固体层看起来是令人惊奇的。这导致我（汤姆逊）去更深入地研究组成阴极射线的粒子的本质。

1897 年，我们在阴极射线运动方向的垂直方向外加磁场，使射线束改变运动方向，再外加电场，使其再次改变方向，如果磁场和电场的分别对阴极射线的力相互平衡，那么就有 $evH = eX$ （ H 是磁场强度， X 是电场强度），则 $v = X/H$ 。

在真空间度很高的玻璃管内，这个速度是光速的三分之一，或 60,000 英里每秒，真空间度不太高的情况下，这个速度是 50,000 英里每秒，但是无论真空间度如何，阴极射线的微粒的速度都要比我们可以获得的其他移动的物体的速度要快得多，比如说，阴极射线的平均速度是常温下氢原子的速度的几千倍，或者目前已知任何温度下的速度。

计算电子的 e/m

知道组成阴极射线的粒子的速度，让我们只用电场作用于阴极射线，组成阴极射线的粒子将受到一个恒定的力的作用，就像以速度 V 水平运动的子弹受到重力作用一样。

我们知道在 t 时间内，子弹下降的距离是

$$\frac{1}{2}gt^2$$

其中 g 是重力引起的加速度，在我们的计算中，加速度是由于电场引起的，是

$$\frac{Xe}{m}$$

m 是粒子的质量,

$$t = l/v$$

l 是粒子运动距离.

射线撞击玻璃产生的荧光斑点的位移为

$$\frac{1}{2} \frac{Xe}{m} \frac{l^2}{v^2}$$

我们可以很容易地测量这个位移 d , 则

$$\frac{e}{m} = \frac{2d}{X} \frac{v^2}{l^2}$$

e/m 的结果显示, 无论阴极射线如何产生, 在阴极射线中的粒子的 e/m 都是一样的. 比如改变玻璃管的形状或管内气压, 或者使粒子的速度产生很大的变化. 除非使粒子的速度接近光速, 否则其他任何时候的其他情况发生变化, 这个比值都几乎恒定不变. 这个值不但与速度无关, 还与电极的种类以及管内气体无关.

将 e/m 的值换算成厘米克秒单位制, 大约等于 1.7×10^7 , 如果我们把这个比值与其他已知的任何系统作比较, 我们就发现他们的数量级的差异非常大. 在阴极射线被研究之前, 在液体的电解中带电的氢粒子的 e/m 是十分熟知的, 只有 10^4 的数量级, 因此, 阴极射线中的粒子的这个比值是氢粒子的 1700 倍, 这种差异只可能由两种情况引起, 要么是阴极射线中的粒子的质量比氢粒子的质量小的多, 而氢粒子的质量是我们在物理学中最近已知的最小的质量, 或者阴极射线中的粒子的带电量比氢原子带的电量要大得多. 我接下来会简短地说一下, 通过一个方法我已经知道这两种微粒的带电量是相同的. 因此我们可以得出结论, 那就是组成阴极射线的粒子的质量只有氢原子质量的 $1/1700$, 因此, 原子不是组成物质的最小微粒, 我们应该更深入地研究阴极射线的粒子, 并且这种粒子无论从任何物质得到的都是一样的. (可以通过莱纳德实验中氢气浓度变化来看接收端电子数量的减少来判断阴极射线比氢原子小)

我们可以在很大的范围内找到阴极射线中的粒子. 当金属加热至红热状态时会放出; 实际上, 任何物质在加热时都会一定程度地放出微粒, 我们能从铷以及钠和钾的化合物中探测出这种粒子, 即便他们处于冷却状态也可以探测到, 这也许允许我们这样推测, 就是所有物质都有这种粒子的放出, 尽管我们的仪器还不够精确地探测到它们, 直到量很大才行. 电子 (此处使用电子代替阴极射线的粒子) 也可以从其他物体和金属放出, 尤其是当碱性金属暴露到光照之下时.

放射性物质铀和镭可以持续大量地放出这种粒子. 当食盐放在火焰上时, 也会大量放出, 我们有理由推断, 从太阳来的电子也会达到地球接触到我们.

电子这样被大范围地发现, 但是无论在何处发现, e/m 的值都是常量. 电子似乎是组成各种不同物质的一部分, 因此, 将其认为是组成原子的一个组成部分是很自然的.

汤姆逊测量电子的质量

我们通过威尔逊云室来测量电子所带电量 e , (这里的电子是通过紫外线照射碱性金属表面产生的) 带电的微粒将作为一个核心而被水蒸气包围并形成水滴. 如果我们有饱和的水蒸气的气体 (if we have air with saturated with water vapour) 并冷却它, 如果没有湿气沉积, 那么将形成超饱和状态, 我们知道, 如果此时有任何尘埃出现的话, 将以这些尘埃为中心形成我们熟悉的雾气或雨滴, 如果气体中没有尘埃, 我们也可以在不出现任何潮气沉积的情况下

下冷却它。如果没有尘埃，威尔逊(Wilson)已经指出，云不会出现直到温度降低至超饱和状态的 8 倍，此时即便在无尘空气中也能形成很厚的云。当带电微粒出现时，威尔逊指出，非常小的冷却措施就能产生雾。处于导电状态的带电粒子出现在这样的气体中时只需要 4 倍超饱和状态的低温就能产生雾气。每一个带电微粒都成为水滴的核心，水滴形成云，因此无论微粒如何小，都能成为可见的并且可以观察。

室温下，一个与水接触的导管中的水蒸气是饱和的，这根导管与一个里面有很大的上下运动的活塞的圆柱相通。活塞首先处于最大的可活动量，当活塞下面突然抽空空气时，导管中的空气会很快地膨胀，当空气膨胀时就会变冷。此时，之前处于饱和状态的导管中的空气就会成为超饱和状态，如果没有灰尘，就不会有湿气的沉积。

现在，冷却程度以及超饱和状态取决于活塞的运动。活塞运动的越大就越冷，如果活塞做可调节的运动，使得超饱和状态处于 4–8 倍之间，此时我们放入有灰尘的空气，使其一次又一次地形成云，当云降落时它们携带灰尘一起降落，就好像大自然中的空气被雨水清洗干净一样。我们发现最终当我们使导管中的空气膨胀时就没有看到云出现，用这种方法将导管中的灰尘去除。快速的膨胀来冷却潮湿的空气，如果灰尘还有的话，微小的水滴（雾气，云层）将在灰尘上形成，并在重力作用下将这些尘埃带到容器的底部。反复地膨胀使得所有尘埃都被小水滴带至容器底部如此来形成无尘空气(dust-free air)。通过在导管旁放一小点镭，导管中的气体就处于导电状态了。此时导管中的气体中有大量带有正负电荷的微粒。此时气体膨胀则云将形成。

镭的放射性元素将使空气电离，此时在无尘空气的导管中将观察到很厚的云，这个云是由于无尘气体中的带电粒子作为形成水滴的核心而产生的，我们可以使用方法将这些无尘空气中的带电粒子去除。（这里引入镭的一个作用，是为了显示无尘空气中如果有带电微粒的话，也会产生云，我们需要把这些带电微粒也事先清除，从而形成无尘和无带电微粒的空气）。

在导管内壁设置两块相互垂直（不是平行的？）的相互隔离的可以被充电的平板，如果它们被充电（应该是分别接在电源正负极），则无尘空气中产生的带电微粒将会迅速地被从其中拽出，用这种方法，我们可以完全地，或很大限度地减少气体中的带电微粒。如果我们再将镭靠近这个导管前使两块平板充电并使气体膨胀，那么就只有很少的云会形成。（也就是很大程度上减小了带电粒子的数量）。

利用活塞的运动，我们可以减小超饱和的量，从而减小形成云雾时沉积的水的量，从而使用水滴数量来找出带电粒子上的电量。水会以相同大小的水滴的形式沉积，水滴数量就等于**沉积的水的体积**除以一滴水滴的体积。因此，如果我们找出一滴水滴的体积，就能找出包围带电粒子的水滴的数量。如果带电粒子不太多，那么每一个都会被一颗水滴包围，我们就能找出带电粒子的数量。

我们可以从水滴缓慢下降的速度来计算水滴的大小。由于受到空气粘性或与空气的摩擦的影响，很小的水滴不会一直以同一加速度下降，很快会达到一个恒定的速度下降，物体越小，下降速度就越小。乔治·斯托克斯爵士已经给出了雨滴下落速度的公式

$$v = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\mu}$$

a 是水滴的半径， g 是重力加速度， μ 是空气的粘性参数。如果我们带入 g 和 μ 的值，就得到 $v = 1.28 \times 10^6 a^2$ ，只要测量出 v 就能找出 a 。

通过简单的方法，我们可以找出带电粒子上的总电量，又知道带电粒子数，就能算出每个粒子上的带电量 e 。

威尔逊曾经使用一个基于以下原理的更简单的方法来计算每个带电粒子上的带电量. 威尔逊曾经指出水滴更易于在带负电的微粒上凝结而不是在带正电的微粒上. 因此, 通过修正膨胀, 使水滴凝结在带负电的微粒上而不是带正电的微粒上是可能的, 通过修正膨胀, 所有的水滴都是带了负电的. 通过上面的方法, 通过测量在重力下运动的微粒的速度, 就可以知道水滴的体积和质量. 现在, 假设我们在水滴上方放一个带正电的物体, 则水滴将向带正电的物体移动, 于是在重力下运动的水滴的速度将减小. 如果我们调整正电的吸引力, 使其与水滴受到的重力大小相等, 则水滴将不再下降而像大自然中的水滴一样悬浮在空中. 如果 X 是电场强度, e 为水滴的电量, w 为水滴的重力, 则有

$$Xe = w$$

X 容易测量, w 已知, 则能求出 e , 这种方法求出来的 e 是 3.0×10^{-10} 静电单位或 10^{-20} 电磁单位 (electromagnetic units), 这个值与水解中氢原子携带的电量相同, 而这个氢原子携带的电量的近似值很早以前就知道了.

也许有人反对, 说上述方法测量的电量是气体分子或气体分子的集合体上的电量, 而不是电子上的电量.

这个否定不存在, 因为电子上的电量是我通过紫外光照射金属表面产生的而不是通过镭的放射线使气体电离或使气体分子带上电. 在上面的方法中, 实验是在非常高的真空中进行的. 产生的电是完全的负的, 也就是通过从金属表面放出的形式产生. 当有气体时, 电子将与气体撞击并附着在它们上面. 像这样, 即便是分子带电, 其电量也与电子相同, 我们用上述方法计算出来的分子上的电量也与电子上带的电量相同. 通过紫外线而得到的电量与通过镭辐射得到的电量是相同的.

我们之前已经知道 e/m , 于是就可以算出 $m = 6 \times 10^{-28}$ 克.

如果我们与氢原子的质量来对比这个质量的话, 就会知道电子质量的含义.

我们已经知道电子的荷质比 $e/m = 1.7 \times 10^7$, 如果 E 是氢原子在水解实验中的带电量, M 是氢原子的质量, 那么 $E/M = 10^4$; 因此 $e/m = 1700E/M$.

我们已经知道 e 和 E 相同, 因此 $M=1700m$, 电子质量只有氢原子质量的 $1/1700$.

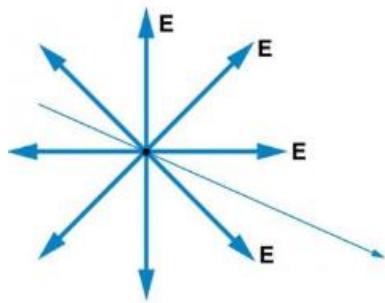
塞曼效应

1896 年, 塞曼观察到, 当原子源置于磁场中时, 其发射的谱线会变宽.

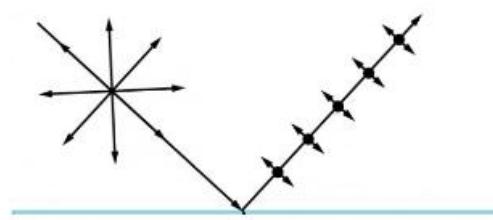
彼得·塞曼 (Pieter Zeeman, 1865–1943), 荷兰物理学家. 1885 年进入莱顿大学在亨德里克·洛伦兹和海克·卡末林·昂内斯的指导下学习物理, 1893 年取得博士学位. 塞曼依然阅读法拉第的前沿科学并将其作为一种灵感的来源. 塞曼注意到, 法拉第在长期坚持不懈地寻找各种不同自然力的相互关系的努力中, 已经在努力地用磁力影响光. 这些努力已经带来了一个非常重要的发现, 那就是磁场力可以旋转由镜子产生的极化光的极化平面.

光是电磁波, 它的电场和磁场相互垂直, 且垂直于传播方向, 对于太阳光和其他许多光源发出的光, 电场在各个方向都有, 我们称其为未极化的光.

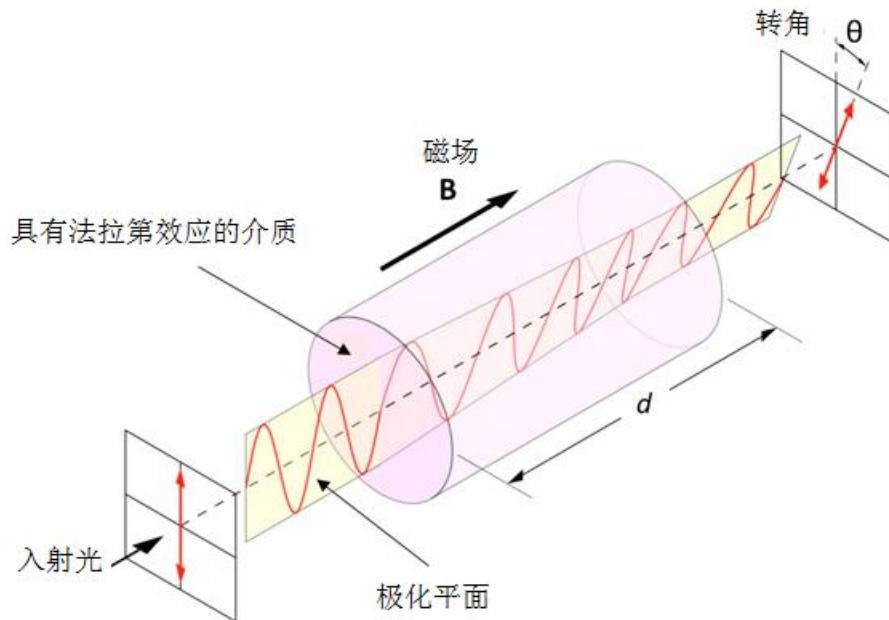
我们知道, 变化的磁场会在其周围产生电场, 如果周围有闭合回路, 则电场会产生感应电动势, 磁通量的变化率越大, 感应电动势越大, 且电场的方向与磁场垂直, 电、磁场的变化率相等, 在高斯定律时说过, 电容器两端变化的电场会产生位移电流, 而电流周围也会产生磁场, 磁场和电场的方向垂直, 变化率相等. 如果最初是变化的电场, 则变化的电场会产生磁场, 磁场又产生电场, 这种交替变化的电、磁场会传播, 传播方向与电磁场方向垂直, 形成横波, 电磁波的产生与传播以及波速, 参考麦克斯韦方程组部分.



未极化的光经过平面镜反射后，在特定角度时反射光是极化光，是线偏振的，电场的振动方向只有一个。



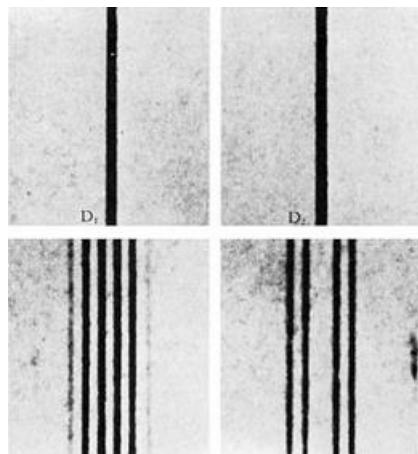
将这种光通过强磁场，磁场力可以旋转由镜子产生的极化光的极化平面。



1862 年，在法拉第的最后一个实验中，法拉第努力地用磁场来影响从钠蒸汽发出的光，但是没有成功。麦克斯韦在 1870 年也否认了这种现象的可能性。

塞曼认识到自己的实验设备比法拉第的好。有一个很小的效应可能法拉第没有发现，因为他使用的三棱镜的分光镜的分辨能力比较低，而塞曼可以使用一个衍射光栅。在宣布发现塞曼效应时，塞曼说，如果法拉第考虑过上面提到的关系的可能性，那么也许使用我们现在的非常好的分光镜可以值得去再试试那个实验。因为，就我所知，其他人还没这样做过。

将光源置于足够强的磁场中，磁场作用于发光体，塞曼努力实验并很快发现光谱线在磁场的作用下会有轻微的变宽。



钠的黄色光谱线的塞曼效应，D1 和 D2 谱线是没有磁场的情况，下图是将光源放在磁场中时对应上图分裂成的多重谱线，多重谱线是极化的，观察方向与磁场方向垂直。

他注意到变宽的线的边缘是极化了的，通过精炼技术，改变磁场方向与观察方向的关系，他可以看到 3 条或 2 条线。他把发现告诉洛伦兹，于是洛伦兹很快地给出了一个解释。

最基本的看法是，光由在原子中运动的带电微粒发出，它们的运动通过经典的电磁规律被磁场影响。通过发射出的光的频率的变化，塞曼和洛伦兹可以测量出导致发出光的微粒的 e/m ，以及它们的带电符号。

塞曼最显著的发现是 e/m 的值和电荷符号，基于当时科学家对原子质量的粗糙的概念，这个比值比人们所能预测的大 1000 倍。塞曼效应后来被证明是解开原子结构的有力工具，对于发现泡利原理有决定性的作用。对于电子自旋等都有应用。对量子力学也吻合得很好，并且作为量子力学的一个非常重要的实验证明。

1865 年 5 月 25 日，彼得·塞曼出生于荷兰的宗内迈雷（英语：Zonnemaire）小镇，父亲是荷兰归正会（英语：Dutch Reformed Church）的牧师，母亲叫沃尔斯特（Willemina Worst）。

塞曼从小就对物理感兴趣。1883 年，塞曼在荷兰济里克泽读高中时恰巧见到了北极光。他画了一幅北极光现象的图并描述了现象，寄给《自然》并成功发表。杂志的编辑称赞作品是“塞曼教授在宗内迈雷天文台细致观察的结果”。

1883 年，塞曼高中毕业后前往代尔夫特进修经典语言（英语：Classical language）。那时想被大学录取，必须具备经典语言的知识。他住在文科中学校长莱利博士（Dr J. W. Lely）的家里。莱利的兄弟就是负责须德海工程（英语：Zuiderzee Works）设计与实现的工程师科尔内利斯·莱利（英语：Cornelis Lely）。在代尔夫特期间，塞曼第一次见到了昂内斯。塞曼广泛的阅读与对实验的热爱，给昂内斯留下了深刻的印象。昂内斯后来成为塞曼的博士导师。

1885 年，塞曼通过入学考试，进入莱顿大学学习物理，师从昂尼斯和洛伦兹。1890 年，他成为了洛伦兹的助手，这时他的毕业论文还没有完成。成为洛伦兹的助手，使得他可以参与磁光克尔效应的研究。

将线偏振光（由左旋圆偏振光和右旋圆偏振光所组成）入射于磁性材料反射后，由于左旋圆偏振光与右旋圆偏振光在样品中传播速率不同而产生相位差，再加上左旋圆偏振光与右旋圆偏振光的吸收程度不同而造成振幅不相同，经过样品反射后，转为椭圆偏振光的现象，称为磁光克尔效应，1877 年被约翰·克尔（英语：John Kerr (physicist)）首先发现。1893 年，塞曼提交了他关于磁光克尔效应的博士论文。获得博士学位之后，塞曼前往斯特拉斯堡，在科尔劳施（英语：Friedrich Kohlrausch）的研究所里度过了半年时间。1895 年，塞曼回

到莱顿，成为莱顿大学的一位私讲师（英语：Privatdozent）。同年他与勒布莱特（Johanna Elisabeth Lebret）结婚，两人育有三女一子。

1896年，即塞曼提交磁光克尔效应的博士论文两年之后，塞曼不顾实验室管理员主管的命令，使用实验室的设备观测强磁场下光谱线的分裂。他因此被实验室开除。但是，后来的结果证明塞曼是对的：他发现了塞曼效应，为此获得了1902年的诺贝尔物理学奖。塞曼的打算是深入研究磁光克尔效应，以作为他博士论文的拓展。他发现谱线在磁场的作用下会发生分裂。1896年10月31日（星期六），阿姆斯特丹的荷兰皇家艺术与科学院（英语：Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences）会议上，洛伦兹从昂尼斯处第一次听说了塞曼的发现。紧接着的星期一，洛伦兹把塞曼请到了他的办公室里来，对塞曼的实验结果给出了一种解释。这一解释基于洛伦兹的电磁波理论。

很快，物理界意识到塞曼的发现有多么重要。塞曼的实验证实了洛伦兹的“磁场中发出的光会发生偏振”的理论。洛伦兹曾提出发光是某种粒子振动的结果。塞曼的实验使得人们清晰地认识到，这种粒子带有负电，比氢原子轻一千倍。得到这一结果时，汤姆孙还没有发现电子。因而，塞曼效应成了人们研究原子结构的重要工具。

洛伦兹在莱顿大学期间主要的兴趣在电磁理论——和光。洛伦兹已经在他的论文中建立了这方面的理论，分子包含了带电的微粒并且建议说这些带电微粒的振动是光的来源。1897年汤姆逊的实验发现了电子后，这些带电微粒被证实是电子。当洛伦兹的同事和前学生塞曼在1896年发现塞曼效应后，洛伦兹提供了他的理论解释，洛伦兹和塞曼因为实验和理论解释在1902年共同荣获诺贝尔奖。

洛伦兹与电子的概念

洛伦兹的工作导致了电子的概念。在1897年汤姆逊发现电子的实验和1896年塞曼效应前，洛伦兹于1892年就形成了他和之后其他人称之为电子的理论。他建议说，物质由带有正电或负电的微小微粒组成。尽管他认为有正的和负的电子，但是后来科学家证实所有电子都是带负电的。洛伦兹推导说这些带电微粒的振动产生电磁波，包括麦克斯韦预言的和1888年赫兹发现的光和其他辐射波。由于洛伦兹的兴趣在电磁波，主要是赫兹的放电实验通过电流的振动，电流在电路中来回振动，相当于电荷来回振动，导致了洛伦兹产生了物质包含带电微粒的理论的产生。洛伦兹的理论如下：

组成固体物质的离子和电子，没有外力作用时，在内部作用力下在固体中处于固定的平衡位置。一束光的电场在通过固体传播时施加外力于这些带电微粒上，使这些微粒偏离平衡位置。与周围原子的相互作用产生的力又导致这些偏离平衡位置的带电微粒回到原来的平衡位置，假设把带电粒子拉回平衡位置的其他原子施加的力的大小正比于带电微粒的位移。这些微粒于是开始围绕它们的平衡位置以频率 ω 做简谐振动，这些简谐运动的微粒被认为是各向同性的，也就是说，简谐运动不依赖于运动方向和位移大小，各向同性的假设并没有什么问题，因为大部分晶体都是非各向同性的。这些简谐振动的带电微粒会传一部分能量给周围的简谐振动的带电微粒，这导致这些振动处于一种阻尼运动中。

洛伦兹的这种假设模型，当光通过媒介时，就会激起这种物质的带阻尼的简谐振动。带电微粒偏离平衡位置的位移导致这种物质的电介质极化（dielectric polarization），这种作用又作用于外部的光的电场，进而作用于光在物质中的传播。洛伦兹的看法可能来源于法拉第，因为法拉第也有这样类似的看法。

接下来是爱因斯坦的光子理论，这需要普朗克常数，普朗克常数需要黑体辐射，黑体辐射需要基尔霍夫的热力学，需要温度和热的概念。

温度和温度计

温度表示物体的冷热程度，通常使用温度计来测量。

温度计的发明归功于很多人，实际上温度计不是一个单一的发明，而是一个发展过程，从最初简单的温度计到今天的温度计，期间是一个发展过程。

拜占庭的费隆和亚历山大里亚的希罗知道某些物质，尤其是空气的体积会膨胀或缩小，如果将充有部分空气的管子两端插入有水的容器时。气体的膨胀和收缩导致水与空气的接触面位置沿着管子移动。这样的机制后来被用于显示气体的冷热。这种仪器在 16, 17 世纪被欧洲的几个科学家发明，特别是伽利略。结果是，很多仪器被发明出来用以可靠地产生这种效果，热变器（thermoscope）这个词被用来反应可感知的热变化（*it reflected the changes in sensible heat*）。（此时温度的概念还没有出现）thermoscope 和温度计（thermometer）的区别是后者有刻度。尽管伽利略被认为是温度计的发明人，但他制造的其实是 thermoscope。

第一个有清晰图表的 thermoscope 是朱塞佩·比安卡尼（Giuseppe Biancani）于 1617 年出版的，第一个带有刻度的温度计是罗伯特·弗拉德（Robert Fludd）在 1638 年制造的。这是一个垂直的管子，顶部有一个装有空气的小球，底部插在水槽中并与水相通。管子中水的高度由球中空气的膨胀或缩小决定，这就是我们现在所说的空气温度计。

Thermometer（法语形式）第一次出现在 1624 年 J. Leurechon（勒雷雄）（J. Leurechon）写的 *La Récréation Mathématique* 里，他描述了一个有 8 个刻度的温度计。上面的仪器有缺点，因为它们还会受到海拔的影响，因此也是压强计。大约 1654 年，斐迪南二世·德·美第奇（Ferdinando II de' Medici），即托斯卡纳的大公制作了一个封有部分酒精的管子，有一个球和茎，是第一个现代的温度计，取决于酒精的膨胀，杜绝了海拔导致的气体压强的影响。其他很多科学家制作了使用各种液体的不同温度计。

尽管如此，每个发明者和每个温度计都是独一无二的，他们之间没有统一的刻度。1665 年，惠更斯建议使用水的融点和沸点作为刻度标准，1724 年，丹尼尔·加布里埃尔·华伦海特（Daniel Gabriel Fahrenheit）制造了第一个水银温度计，因为水银有很高的膨胀系数。1742 年，安德斯·摄尔修斯（Anders Celsius）使用了一个 0 刻度在冰点而 100 刻度在水沸点的温度计。

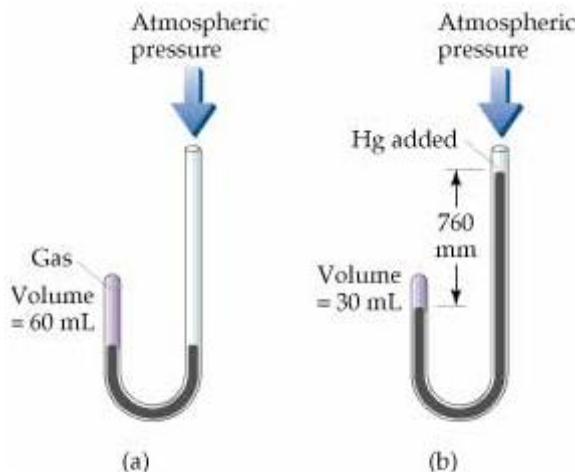
压强

压强和体积的关系最早是由理查德·汤利与亨利·鲍尔（Richard Towneley and Henry Power）提出的，波意耳通过实验确认了他们的发现并发表了结果，根据罗伯特·冈瑟（Robert Gunther）和其他权威的说法，波意耳的实验设备是由他的助手胡克建造的，波意耳的定律是：

在定量定温下，理想气体的体积与压强成反比。

压强是波意耳首先引入物理学的名词和定义。

当时人们依然认为空气是四种基本元素之一，但是波意耳不这么认为，他的兴趣大概是认为空气是生命必须的一种不可少的元素，例如，他发表了在没有空气的条件下植物生长的论文，



波意耳使用一端封闭的 J 形导管，从另一端灌入水银后，通过增加水银并重复多次试验后，他确认了气体的体积与压强成反比。

在热力学的历史中，对热的最初的解释完全与对燃烧的解释相互搞乱。

17 世纪化学家贝歇尔及施塔尔引入燃烧的燃素理论后，**燃素**被认为是热的实体物质。

拉瓦锡引入了热质说的一种版本，他在 1770 年代用氧来解释燃烧，在他的论文 “Réflexions sur le phlogistique”(1783)” 中，拉瓦锡讨论到，燃素理论与他的实验结果不一致，并且提出了一种称为热 (caloric) 的微妙的流体作为热的实体物质。根据他的理论，宇宙中热质的总量为一定值，热质会由温度高的物体流到温度低的物体。

1770 年代时，有些科学家认为冷也是一种物质，不过皮埃尔 · 普瑞弗斯特 (英语: Pierre Prévost) 认为冷只是一个缺乏热的现象而已。

既然热在热质理论中是一种物质，因此热既不能被创造也不会消失，热的守恒就成为一种主要的假设。

热质说受到了约瑟夫 · 布莱克 (Joseph black) 的与物质的热的特性的实验的影响。除了热质说以外，18 世纪还存在另外一种可以解释热现象的理论：动力学理论，这两种理论在当时被认为是等价的，但是动力学理论比较现代，因为它使用了一些原子理论并且能够同时解释燃烧和热量测定。

热质说可以成功的解释许多物理现象。例如热茶在室温下冷却就可以用热质说解释：热茶的温度高，表示热质浓度较高，因此热质会自动流到热质浓度较低的区域，也就是周围较冷的空气中。热质说也可以解释空气受热的膨胀，因空气的分子吸收热质，使得其体积变大。若再进一步分析在空气分子吸收热质过程中的细节，还可以解释热辐射、物体不同温度下的相变化，甚至到大部份的气体定律。

道尔顿的气体分子模型中就包括了热质。尼古拉 · 卡诺提出了卡诺循环及相关的定律，形成了热机理论的基础，而卡诺的分析就是架构在热质的基础上。

1798 年，英国科学家伦福德伯爵提出《由摩擦产生热的来源探讨》(An Experimental Enquiry Concerning the Source of the Heat which is Excited by Friction) 的论文，其中描述他观察加农炮制作时所产生的热。他发现在加农炮镗孔 (加工已有的孔) 时，只要持续加工，加农炮就会持续的热，其产生的热甚至可以使水沸腾，而且单位时间的发热量不会下降。若依热质说的理论，若热质从加农炮中释出，加农炮的热质就会减少，因此发热量就会下降，依他观察到的情形，加农炮中的热质没有减少，因此提出热质不是一种满足守恒定律的物质，不过他实验的不确定性也广被质疑。

由于当时将热质说视为和分子运动论等效的理论，因此伦福德的论文并未视为对热质论的威胁。事实上当时的科学家利用伦福德的论文来增加他们对热质说的了解。

焦耳量测热功等效的设备

伦福德的研究引起了詹姆斯·焦耳及其他科学家的兴趣，进而进行相关的研究。在1799年时汉弗里·戴维在《论热、光和光的复合》论文中，描述了一个实验：在一个和周围环境隔绝的真空容器中，使二块冰互相摩擦，最后变成水，以当时的理论来看，只可能是冰的热容（任何物质当温度升高1K时所吸收的热量）降低，释放出热质。但水的热容比冰大，冰变为水不可能会释放热质。戴维因此导出热质不存在的结论，并认为热是物体微粒的振动。不过他的实验并未得到当时的重视。

焦耳在1840年进行多次导体发热的实验，发现其发热量和电流的平方成正比。并在1843年提出理论，认为热只是一种能量的形式。后来为确认热和能量之间的关系，焦耳用以下实验来量测热和能量单位间的转换系数—热功当量：在一量热器中加水，量热器中有叶片，经过转轴连到量热器外，量热器外利用下降的重物带动叶片旋转，使叶片及水的温度上升。量测重物重量、落下距离、水（及叶片）的温度、质量及比热即可计算热功当量，后来将液体由水改为鲸油及水银，进行并改进实验达40年之久。此实验也确认热及能量之间的关系。拉普拉斯，泊松，卡诺和克拉佩龙都基于热质说发展他们的理论。

热功当量（mechanical equivalent of heat）是热量与功之间的转换比例，表示1卡路里（简称卡）的热量相当于多少焦耳的功。

热量以卡为单位时与功的单位之间的数量关系，相当于单位热量的功的数量，叫做热功当量。英国物理学家焦耳首先用实验确定了这种关系，将这种关系表示为1卡（热化学卡）=4.1840焦耳，即1千卡热量同427千克力·米的功相当，即热功当量 $J = 427 \text{ 千克力} \cdot \text{米} / \text{千卡} = 4.1840 \text{ 焦耳} / \text{卡}$ 。在国际单位制中规定热量、功统一用焦耳作单位。

1850年，克劳修斯（clausius）在一篇论文中清晰地说明，热质说不正确并给出了两个热力学定律来替代不正确的热质说。

热力学第一定律：热和功是等效的。无论何时热做了功，那么与功成正比的热就被消耗了。克劳修斯有实验事实说明这个定律，并且这个实验不是克劳修斯本人的，而是来源于焦耳。1850年的论文中包含了热力学第二定律的一种版本：热倾向于从高温物体流向低温物体。

卡诺（Carnot）提出了基于数学形式的卡诺循环，但是影响很小，克拉佩龙（clapeyron）用图形将其表示出来，使得卡诺的理论变得广为人知，卡诺的理论随后与克劳修斯和汤姆逊的热力学理论相结合。

绝对温度或绝对零度

绝对温度或绝对零度是英国物理学家威廉·汤姆森（William Thomson）在1848年发明的。汤姆森以法国物理学家查尔斯（Charles）的理论为基础给出一个绝对的刻度（absolute scale）。查尔斯的观察显示，气体在0°C也能继续降温变冷（从而体积变小），温度每降低1°C，气体的体积就会减小1/273。查尔斯的定律显示，在-273°C时，气体的体积将变为0。这种现象令那些不能理解气体的体积会变为零的科学家们困惑不解，或者说，当体积变为零时，气体到底发生了什么情况？

与焦耳在冷却气体方面一起工作之后，汤姆森给出了如下建议：气体的温度是气体微粒（atoms）（我们现在知道气体是以分子形式存在的，这里使用atom，主要是想表达气体的最小微粒，而不是原子的概念）的动能的反应。温度降低时气体原子的活性减小，运动量减小，占有的空间减小，因此体积就减小。在-273°C时，每一个原子的能量为0，此时他们停止运动但实际上不占有体积，汤姆森认为这个理论适合于所有物质。

汤姆森提出绝对温度的原因在于，他研究了卡诺克拉佩龙（carnot-clapeyron）理论时发现气体温度计只是提供了一种可操作的温度的定义，（可操作相当于可以实际使用），但是正如查尔斯的理论所述，当温度低于0°后，气体温度计的示数还会继续缩小，这和惠

更斯提出的以冰点 0° 为0点的理论时相互矛盾的，因为 0° 时气体体积并不为0，理论的0点，按照查尔斯的理论，应该是 -273° ，这就需要提出一种新的温度的刻度，这种刻度的0点是摄氏度的 -273° 。

基尔霍夫基于钠可以发射和吸收光线，提出黑体辐射理论

在牛顿时代，折射望远镜（伽利略望远镜）产生的色差（chromatic aberration）是影响望远镜观测的主要问题，并且有很多理论来解释是什么原因造成的。牛顿在1660年代中期在三棱镜实验基础上提出了颜色理论，认为折射望远镜的色差是因为望远镜里面的透镜起到了三棱镜的作用，使白光成为彩虹颜色围绕着明亮的天体。



色差

如果这正确的话，色差可以通过不使用棱镜来消除，于是就出现了反射式望远镜。牛顿也许读过格雷戈里在1663年的书 *optica promota*，里面描写了使用抛物面镜片设计反射式望远镜。牛顿采用了球面镜简化设计，但是这样也会引入球面色差（spherical aberration），不过依然可以修正。直到1695年，牛津大学的天文学家格雷戈里受到人眼多结构组合的启发，建议色差可以通过组合不同透镜来减小 - 两种或多种不同玻璃小心地贴合在一起的透镜。38年后的1733年，英国的律师和光学修补匠切斯特·莫尔·霍尔委托不同的光学仪器商构造两种不同的透镜-一个是凹形的，另一个是凸形的（one a concave flint, the other a convex crown）。巧合的是，这两块透镜的制造工作都交给了同一个人乔治·巴斯（George bass），他认识到这两种透镜是组合成一块完整透镜的不同部分，然后将其组合成一块后拿来看远处的物体，发现物体周围有颜色的边缘都消失了。乔治·巴斯将透镜交给霍尔，然后霍尔将它们安装在一个望远镜里。巴斯努力将这种消色差透镜使光学仪器制造商接受，但是发现他们不感兴趣。生意太好，制造商都太忙不愿意被新的发明打扰。直到1750年，巴斯遇到约翰·多伦德（John dollond），一个前纺织工，现在是崛起的光学仪器制造商。多伦德是牛顿的透镜色差理论的坚定拥护者，然而他对巴斯的报告产生了兴趣，决定自己做实验，结果证实巴斯说的是正确的，后续的实验产生了这样的组合：一对凸冠玻璃透镜内侧包含一个凹燧石玻璃透镜（a pair of convex crown-glass lenses enclosing a concave flint-glass lens）。多伦德声称是自己发明了这种组合并申请了专利。

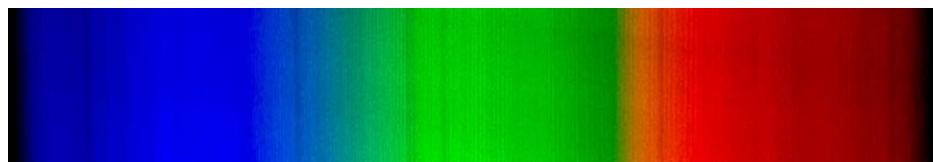
多伦德的透镜在欧洲流行了半个世纪。透镜的设计，对于大多数光学仪器制造商来说，依然是反反复复修改的事。

设计消色差透镜需要详细的关于玻璃如何弯曲、折射一组由单色光线组成的光的知识。这样的知识显然没有。这个阻碍就是颜色的定义。在19世纪的时候，人们没有对颜色的同一定义标准，比如一个光学仪器制造商说某块玻璃对黄光的折射率是n，另外一个光学仪器制造商也说另一块玻璃对黄光的折射率是n，由于没有对黄光的同一定义，会造成差异。（我们在教科书上测量玻璃的折射率时用的是白光）

1802年，沃拉斯顿（Wollaston）发明了一种仪器，通过测量放置在透明物质上的一块玻璃打火石立方体对光的总的反射角，从而自动地测量该物质的折射率。（in 1802, Wollaston constructed a device that automatically measured the optical index of a substance through the angle of total reflection in a flint cube placed on this substance.），在此过程中，正如牛顿所做的一样，沃拉斯顿使阳光射入一个黑暗的房间。然而，沃拉斯顿用狭缝代替了牛顿的圆形小

孔，我们可以推测，之所以用狭缝代替圆孔，是因为细小的圆孔会在圆孔周围出现颜色的重叠而不利于获得单色光用于计算透明物质的折射率。他注意到有时候光谱中缺失了一些光——出现一些很细的黑线。他用一种不纯的三棱镜观看光的散射(色散)，使他推断太阳光谱只有4种颜色，这影响了托马斯杨，改变了杨自己建立的对视觉颜色的理论。

与此同时，沃拉斯顿发现烛光的光谱不是连续的，其中有可区分的有颜色的线，这样，热气不发出连续的光，而是有一些线。沃拉斯顿没有给出解释，用他的话说，就是 *i cannot undertake to explain the dark lines.*



太阳光谱中的黑线

在19世纪时，对于光学仪器制造商来说，透镜的设计依然是反反复复修改(*trial and error*)的事物。不同的透镜只有在满意的光学效果出来之后才会组合在一起。即便是像夫琅禾费(fraunhofer)这样努力寻找数学分析方法的人都被这样的问题干扰着，设计消色差透镜需要详细的关于玻璃如何弯曲、折射一组由单色光线组成的光的知识。这样的知识显然没有。这需要一种很纯的有色光源(比如黄光)来测试不同玻璃的折射率。

夫琅禾费光谱线

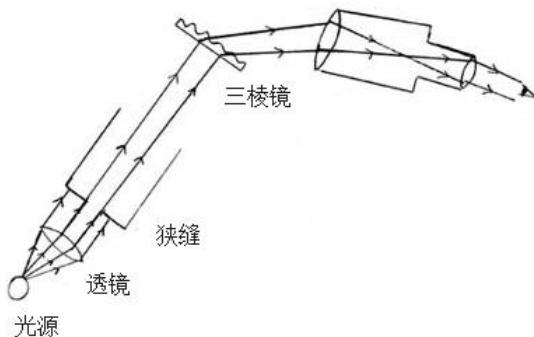
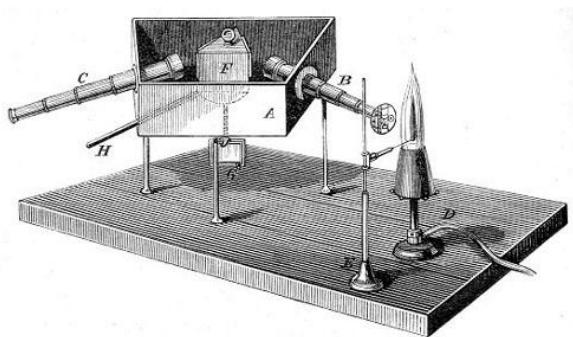
正是在制造消色差望远镜中需要的透镜的过程中需要精确测定玻璃的折射率，导致了夫琅禾费发现夫琅禾费线(fraunhofer lines)。

阻碍精确测定一种给定物质对光线的折射率的原因是太阳光谱中不同颜色之间没有精确的界限，因而很难分开不同颜色用来测定物质对光线的折射率，由于太阳光谱中的不同颜色的光之间没有明显精确的界限，没办法选择其中一种颜色来测定某种物质的折射率，假如有了明确的界限，我们可以选择距离边界某一固定距离处的有色光来测定物质的折射率。为了克服这个困难，夫琅禾费做了很多试验来人工制造均匀的光，他用了灯和三棱镜。1814年，夫琅禾费用火焰(light of fire)的光看到了橙色光谱中有明亮的固定的线出现。这条线使夫琅禾费可以精确地测定不同玻璃的折射率。



钠的吸收谱线和发射谱线

夫琅禾费制成了第一台分光镜，它不仅有一个狭缝，一块棱镜，而且在棱镜前装上了准直透镜，使来自狭缝的光变成平行光，在棱镜后则装上了一架小望远镜以及精确测量光线偏折角度的装置。夫琅禾费点燃了一盏油灯，让灯光通过狭缝，进入分光镜。



夫琅禾费分光镜

他发现在暗黑的背景上，有着一条条像狭缝形状的明亮的谱线，这种光谱就是现在所称的明线光谱。在油灯的光谱中，其中有一对靠得很近的黄色谱线相当明显。夫琅禾费拿掉油灯，换上酒精灯，同样出现了这对黄线，他又把酒精灯拿掉，换上蜡烛，这对黄线依然存在；而且还在老位置上。

夫琅禾费想，灯光和烛光太暗了，太阳光很强，如果把太阳光引进来观测，那是很有意思的。于是他用了一面镜子，把太阳光反射进狭缝。他发现太阳的光谱和灯光的光谱截然不同，那里不是一条条的明线光谱，而是在红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的连续彩带上有无数条暗线，在 1814 到 1817 这几年中，夫琅禾费共在太阳光谱中数出了五百多条暗线；其中有的较浓、较黑，有的则较为暗淡。夫琅禾费一一记录了这些谱线的位置，并从红到紫，依次用 A、B、C、D……等字母来命名那些最醒目的暗线。夫琅禾费还发现，在灯光和烛光中出现一对黄色明线的位置上，在太阳光谱中则恰恰出现了一对醒目的暗线，夫琅禾费把这对黄线称为 D 线。

光谱表明月亮和金星的光线都是太阳光的反射光

夫琅禾费发现太阳光谱中固定的黑线不随时间变化，不同季节、年月日，这些黑线始终固定在某个位置，因此这些黑线很可能不是地球大气层引起的，与地球无关。极有可能存在于太阳内部。之后他发现来自月亮和金星的光谱也具有太阳光谱一样的黑线。这是因为月亮和金星的光线都是太阳光的反射光。夫琅禾费因此推断，这些光谱中的线都来自太阳。此外他还观察了恒星（fixed star）的光谱，并且发现恒星的光谱中的黑线与来自太阳的不同，不同恒星的光谱中的黑线也不相同。有些恒星光谱中的线又与太阳光谱中的线一致。

夫琅禾费还有重大发现，那就是来自钠元素的黄色光谱中的明亮的黄色亮线与太阳光谱中两条黑色线（dark lines）D 一致，为什么油灯、酒精灯和蜡烛的光是明线光谱，而太阳光谱却是在连续光谱的背景上有无数条暗线？为什么前者的光谱中有一对黄色明线而后者正巧在同一位置有一对暗线？这些问题，夫琅禾费无法作出解答。直到四十多年后，才由基尔霍夫解开了这个谜。

光谱分析法（基尔霍夫和本生）

1850年基尔霍夫离开柏林前往布雷斯劳大学当助理教授，在布雷斯劳时，他认识了于1851-52年来布雷斯劳度过学术年（academic year）的本生，他们之后成为牢固和永久的朋友。1854年，本生在海德堡工作，他鼓励并支持基尔霍夫过来。基尔霍夫答应了担任物理教授的工作并且在海德堡与本生开始了一段成果丰富的合作。本生设计了一种锌碳（zinc-carbon）电池验证法拉第关于化学与电的发现。1833年，法拉第经过一系列的实验，发现当把电流作用在氯化钠的水溶液时，能够获得氯气。

1849年，米歇尔·福柯（foucault）检查碳弧灯的光谱时，注意到了一条与太阳光谱夫琅禾费线的D线相似的线。他想要比较一下这两种光谱，所以决定让两种光谱重叠在一起看看。他使太阳光线通过碳弧灯，然后使两种重合的光线透过一块三棱镜，发现两条线确实在同一位置，这样做使得太阳光谱中的D线增强了（strengthened）。移开太阳光后，碳弧灯光谱中又显示出一条明亮的D线。基尔霍夫并不知道福柯的实验。

据说基尔霍夫有能力使他的学生睡大觉而不是使他们有兴趣。但是他的学生包括赫兹和普朗克。

基尔霍夫已经开始尝试揭开太阳光谱之谜。

本生埋头在他的实验室里进行着一项有趣的实验，他把含有钠、钾、锂、锶、钡等不同元素的物质放在火焰上燃烧，火焰立即产生了各种不同的颜色。本生心里十分高兴，他想，也许从此以后可以根据火焰的颜色来判别不同的元素了。可是，当他把几种元素按不同比例混合再放在火焰上烧时，含较多元素的颜色十分醒目，含较少元素的颜色却不见了。看来光凭颜色还无法作为判别的依据。

本生与基尔霍夫经常在一起散步，讨论科学问题。有一天，本生把在火焰实验中所遇到的困难讲给基尔霍夫听。这位物理学家对夫琅禾费关于太阳光谱的实验了解得很清楚，甚至在他的实验室里还保存有夫琅禾费亲手磨制的石英三棱镜。基尔霍夫听了本生的问题，想起了夫琅禾费的实验，于是向本生提出了一个很好的建议，不要观察燃烧物的火焰颜色，而应该观察它的光谱。他们越谈越兴奋，最后决定合作来进行一项实验。

基尔霍夫在他的实验室中用狭缝、小望远镜和那个由夫琅禾费磨成的石英三棱镜装配成一台分光镜，并把它带到了本生的实验室。本生把含有钠、钾、锂、锶、钡等不同元素的物质放在本生灯上燃烧，基尔霍夫则用分光镜对准火焰观测其光谱。他们发现，不同物质燃烧时，产生各不相同的明线光谱，比如钠产生两条明亮的黄色谱线。这些谱线称为发射线，因为它们看起来像是元素发出的光线。接着，他们又把几种物质的混合物放在火焰上燃烧，他们发现，这些不同物质的光谱线依然在光谱中同时呈现，彼此并不互相影响。于是，根据不同元素的光谱特征，仍能判别出混合物中有那些物质，这种情况就像许多人合影在同一张照片上，每个人是谁依然可以分得一清二楚一样。就这样，基尔霍夫和本生找到了一种根据光谱来判别化学元素的方法——光谱分析法。

当他们用同样的方法分析太阳光谱时，在不同颜色区看到一些黑线，这些线被称为吸收线，因为颜色好像从这些狭小的线（bands）上去除了一样。他们对太阳光谱中黄色区域中的两条D线感兴趣。它们与钠盐在本生灯上燃烧后发出的光线的光谱中的两条明亮的黄色线一致。基尔霍夫注意到，当阳光通过钠的火焰时，重叠的光谱中，夫琅禾费线会更黑（became darker）。经过一夜的思考后，基尔霍夫认为，黑线是被原子吸收了的。太阳内部发出的光线被太阳大气中的钠吸收了。

除了在实验室中使太阳光通过稍低温度的本生灯火焰上燃烧的不同元素（纳，铜）而使太阳的吸收谱线更黑，来证明太阳谱线是被相应物质吸收的，以及同一种物质在实验室中发出亮线光谱经过低温的相同物质的气体时亮线被吸收，也可以证明太阳的吸收光谱是被低温大气吸收的。

太阳的吸收谱线是被太阳大气吸收还是被地球大气吸收的呢？通过在一天的不同时段，

不同的天气条件，不同的年份和季节观察太阳的吸收光谱都没有变化可知，太阳的吸收光谱不是被地球大气吸收的，因为在这些不同时段和天气条件下，地球大地会有不同的变化，而这并没有影响太阳吸收光谱。

1859 年夏天的一个下午，基尔霍夫观看白炽灯（incandescent light）与食盐在本生灯上燃烧的火焰的相互作用。福柯曾经使用的是太阳光，这里基尔霍夫使用的是不同的光源。观察结果令人困惑不已。大家知道白炽灯的光谱是连续的，但是当通过钠的火焰后再通过分光镜观察，在 D 线位置出现了一条黑色线。

基尔霍夫基于钠可以发射和吸收光线，提出黑体辐射理论

基尔霍夫和本生共同合作，通过一系列实验后得出 3 个定律，这三个定律显示有 3 种光谱

1. 发光的或热的固体和液体、以及发光的或热的密度够大的气体发出所有波长的光，因此产生连续的光谱。（连续光谱）
2. 低密度的热气体产生不同的颜色，这些颜色中存在一些亮线。（发射光谱）
3. 连续光谱通过较低温度的气体时，会被该气体吸收相应频率的光线而产生暗线成为吸收光谱。

在试验中有这样的现象，用金箔细棒将食盐（含有钠）放在本生灯上燃烧，会产生黄光且有亮的黄色谱线。此时用太阳光射向本生灯，则在重叠的光谱中，黄色谱线的位置产生较暗（darker）的谱线。

于是，在相同或近似相同（由于太阳光的照射使本生灯温度略微增加）的温度条件下，钠既可以发光（发射谱线），也可以吸收光线，那么，吸收和发射光线之间有什么关系呢？

为了安全起见，由于原子模型，或者细节的原子模型的解释还不能提供足够的可靠性，而热力学却相对可靠安全得多，因此基尔霍夫努力应用热力学来解释这种现象，并达到了一个十分重要的结论。

定义：

发射率 emissive power（或 emittance e）：任何物体在单位表面积、单位频率范围内的发射频率（辐射频率）。

吸收率 a：入射到物体上的单位频率范围内的辐射中被吸收的部分。

基尔霍夫证明了发射和吸收率之比只是频率和温度两个变量的函数，与物体的大小，材质和尺寸没有关系。

基尔霍夫创建了一个思想实验（thought experiment）来研究辐射的发射率与吸收率之间的关系，这个实验包含了两块不同材质且相互平行的无限大平面之间的发射与吸收的平衡态。（Kirchhoff created a thought experiment involving a radiative equilibrium between two emitting and absorbing infinite parallel plates of different materials facing each other.）



对于特定波长 λ ，左边平面的发射率用 E 表示，这表示在单位面积单位时间内波长为 λ 的辐射发射出去的总能量。波长为 λ 的辐射的吸收率是被吸收的那部分辐射的比例（百分比），用 A 来表示左边平面的吸收率。反射率是指被反射的比例，用 R 表示左边平面的反射率，则

$R=1-A$, 右边平面的相应量用 e , a , r 表示.

现在来考虑右边平面单位面积上波长为 λ 的辐射的流入和流出. 流出部分是发射率 e , 流入的有两个来源, 一部分来源于直接吸收左边平面的辐射或间接地将来自左边的辐射反射到左边又有被部分被反射回来后被吸收的辐射, 另一部分是右边平面发射后被左边平面反射回来而被吸收的部分.

从左边平面发射出的辐射 E , 第一次被右边平面吸收的比例是 Ea , 然后被反射到左侧的比例是 Er , 又有 ErR 被反射到右边平面后, 第二次有 $ErRa$ 被右边吸收, 以此类推, 第三次被右边吸收的有 $ErRrRa$, 从左边发射, 被右边吸收的总量为

$$\begin{aligned} & Ea + Ea(rR) + Ea(rR)^2 + Ea(rR)^3 + \dots \\ & = Ea \left[1 + rR + (rR)^2 + (rR)^3 + \dots \right] \\ & = Ea \frac{1 - (rR)^n}{1 - rR} \\ & = \frac{Ea}{1 - rR} \end{aligned}$$

右边平面发射出去 e 而被左边反射回来 ER , 然后有 ERa 被右侧吸收, 又有 Err 被反射到左侧, 再有 $ErrR$ 被反射回右侧, 第二次被吸收的为 $ErrRa$, 以此类推, 右侧发出去 e 又被反射回来被吸收的总量为

$$\begin{aligned} & eRa + eRa(rR) + eRa(rR)^2 + eRa(rR)^3 + \dots \\ & = eRa \left[1 + rR + (rR)^2 + (rR)^3 + \dots \right] \\ & = \frac{eRa}{1 - rR} \end{aligned}$$

由于温度不变, 因此右边平面流入和流出的辐射量相同, 有

$$e = \frac{Ea}{1 - rR} + \frac{eRa}{1 - rR}$$

同理, 左边也有

$$E = \frac{eA}{1 - rR} + \frac{ErA}{1 - rR}$$

作变换

$$\begin{aligned} \frac{E}{A} &= \frac{e}{1 - rR} + \frac{Er}{1 - rR} \\ \frac{e}{a} &= \frac{E + Er}{1 - rR} \\ [(1 - rR) - Ra](e/a) - A(E/A) &= 0 \\ -a(e/a) + [(1 - rR) - rR](E/A) &= 0 \end{aligned}$$

这是含有两个变量 e/a 和 E/A 的齐次方程组, 我们可以验证 $e/a = E/A \neq 0$ 是这个方程组的解, 等于 0 的话就是只吸收而不发射的平面, 在此不考虑, 因为我们求的是平衡态, 即温度不变的情况.

于是就有

$$\frac{e}{a} = \frac{E}{A} = f(\lambda, T)$$

这就说明物体对辐射的发射率和吸收率之比只与物体的温度和辐射的频率有关，而与物质本身无关。如果这个方程能被找到，那么任何物体对辐射的发射率就可以由吸收率或反射率决定，

$$e(\lambda, T) = a(\lambda, T) f(\lambda, T) = (1 - r)(\lambda, T) f(\lambda, T)$$

对于黑体来说，辐射的发射率就只与温度和波长有关。

基尔霍夫在 1861 年给出了更为严格的上述结论的证明。

基尔霍夫确认，一个空心且通有一个小孔的物体在恒定温度下有黑体辐射器（black body radiator）的功能，从小孔射入的辐射会被有效吸收。

原子（核）物理

多普勒效应

星星就是太阳，距离地球遥远的星星是一些类似太阳的发光发热的恒星，它们在宇宙中高速运动。但为什么有些星星是橘黄色的，其它一些又是红色或蓝色的？这种颜色的不同在特定联星中尤其突出。联星是指两颗星，它们绕由其组成的系统的质心运动。1842年，澳大利亚天文学和数学家，布拉格大学教授多普勒觉得他找到了一种解释。

根据多普勒的解释，光是一种波动现象，我们看到的光的颜色是由光的频率决定的。这个频率依赖于光源和观察者之间的相对运动速度。如果光源和观察者相互靠近，每秒钟达到观察者的光波就更多，观察到的频率就会更高，所以光的颜色将会变得更绿。如果观察者和光源之间的距离不停地增加，观察到的频率就会减小，观察者就会看到更红的颜色。

1842年5月25日，多普勒在布拉格大学进行了一场演讲，在演讲中解释了他的如上理论，一年后，这个理论被发表。多普勒还提到，同样的效应在声波中也应该可以被观察到。多普勒效应在声波上于1845年被巴洛特验证，但是不能用来解释恒星颜色的不同，因为颜色的不同是由于不同表面温度。联星的颜色不同主要是由于相互之间的对比、差异造成的。然而多普勒效应在现代天文学中依然十分重要。天体的旋转和运动可以通过它们发出的光的微小变化计算出来。

在关于阴极射线的工作中，物理学家约瑟夫·汤姆逊发现了电子以及它的亚原子特性，粉碎了一直以来认为原子不可再分的设想。汤姆逊认为电子是平均的分布在整个原子上的，就如同散布在一个均匀的正电荷的海洋之中，它们的负电荷与那些正电荷相互抵消。这也叫做梅子布丁模型。

然而，在1909年，在物理学家卢瑟福（汤姆逊的学生）的指导下，研究者们用氦离子轰击金箔。他们意外的发现有很小一部分离子的偏转角度远远大于使用汤姆逊假设所预测的值。卢瑟福根据这个金箔实验的结果提出原子中大部分质量和正电荷都集中在位于原子中心的原子核当中，电子则像行星围绕太阳一样围绕着原子核。带正电的氦离子在穿越原子核附近时，就会被大角度的反射。

放射性的发现

放射性是由法国科学家安东尼·亨利·贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel）在1896年研究磷光材料时发现。他是研究荧光和磷光的专家。贝克勒尔于1852年12月15日生于法国巴黎，出身于一个有名望的学者和科学家的家庭。他的父亲亚历山大·爱德蒙·贝克勒尔是位应用物理学教授，对于太阳辐射和磷光有过研究。1896年初，伦琴发现X射线的消息传到巴黎，一个偶然的机会使他遭遇上放射性问题。当时法国有一位著名数学物理学家叫彭加勒，收到伦琴的通信后，在法国科学院1896年1月20日的例会上向与会者报告了这件事，展示了伦琴的通信和X光照片。贝克勒尔正好在场，他问彭加勒，这种射线是怎样产生的？彭加勒回答说，似乎是从真空管阴极对面发荧光的地方产生的，可能跟荧光属于同一机理。彭加勒还建议贝克勒尔试试荧光会不会伴随有X射线。于是第二天贝克勒尔就在自己的实验室里开始试验荧光物质会不会辐射出一种看不见却能穿透厚纸使底片感光的射线。他试来试去，终于找到了一种物质具有预期效果。这种物质就是铀盐。贝克勒尔拿两张厚黑纸，把感光底片包起来，包得那样严实，即使放在太阳底下晒一天，也不会使底片感光。然后，他把铀盐放在黑纸包好的底片上，又让太阳晒几小时，就大不一样，底片显示了黑影。为了证实是射线在起作用，他特意在黑纸包和铀盐间夹一层玻璃，再放到太阳下晒。如果是由于某种化学作用或热效应，隔一层玻璃就应该排除，可是仍然出现了黑影。于是贝克勒尔肯定了彭加勒的假定，在法国科学院的例会上报告了实验结果。又过了几天，贝克勒尔正准备进一步探讨这种新现象，巴黎却连日天阴，无法晒太阳，他只好把所有器材包括包好的底片和铀盐都

搁在同一抽屉里。也许是出于职业上的某种灵感，贝克勒尔突然产生了一个念头，想看看即使不经太阳照晒，底片会不会也有变黑的现象（**荧光需要其他光照才能发生，所以用太阳光照射**）。于是他把底片洗了出来。哪里想到，底片上的黑影真的十分明显。他仔细检查了现场，肯定这些黑影是铀盐作用的结果。贝克勒尔面对这一突如其来的现象，很快就领悟到，必须放弃原来的假设，这种射线跟荧光没有直接关系，**它和荧光不一样，不需要外来光激发**。他继续试验，终于确证这是铀元素自身发出的一种射线。他把这种射线称为铀辐射。铀辐射不同于X射线，两者虽然都有很强的穿透力，但产生的机理不同。同年5月18日，他在法国科学院报告说：铀辐射乃是原子自身的一种作用，只要有铀这种元素存在，就不断有这种辐射产生。**这就是发现放射性的最初经过**。这一发现虽然没有伦琴发现X射那样轰动一时，但其意义还是很深远的。因为这一事件为核物理学的诞生准备了第一块基石。贝克勒尔的发现实在是太偶然了。如果不是彭加勒在法国科学院例会上介绍X射线的发现；如果贝克勒尔没有跟彭加勒谈话；如果贝克勒尔没有把铀盐当作试验对象；如果2月26—27日这几天巴黎不是阴雨天；如果贝克勒尔没有把未曝光的底片置于铀盐下搁在抽屉里；如果他不是下意识地或者好奇地把没有曝光的底片也拿来冲洗，也许贝克勒尔就不会发现放射性了。如果那样的话，放射性就不知什么时候、由谁来发现，而放射学和核物理学的历史必将改写。很多人说，巧合使贝克勒尔交了好运。贝克勒尔发现放射性当然也有一定的偶然性，但贝克勒尔自己却常对人说：在他的实验室里发现放射性是“完全合乎逻辑的。”这个逻辑指的就是必然性。

贝可勒尔从他父亲那里继承了一些铀盐，选择铀盐，是因为他知道铀盐（比如硫酸铀酰钾）暴露在太阳的紫外线照射下会发光（磷光），他还发现尽管纯净的铀暴露在太阳下不会发荧光，但是可以获得更好的图案。

一开始大家认为这种辐射类似刚发现的X光。但是像贝可勒尔、欧内斯特·卢瑟福、保罗·维拉尔、皮埃尔·居里、玛丽·居礼等人的研究发现这种辐射比X光复杂。

α 射线 β 射线

1899年，3个不同的实验小组（法国贝克勒尔、斯特凡和瑞典、德国吉塞尔）发现放射线会被磁场弯曲，将放射源样品放在铅容器中，容器只留下一个狭小的孔，因此放射线只能射向一个方向，容器放在很强磁场的电磁铁两极之间，发现射线像阴极射线一样弯曲，因此认为辐射出来的物质很可能是电子。

1900年，居里做了更仔细的实验，指出只有一部分射线被磁场弯曲，而没有被磁场弯曲的部分具有较弱的穿透能力，因此具有电子行为的部分射线很有可能是卢瑟福所说的 β 射线，另一种是 α 射线，好几年后这些才被确认。在强磁场作用下，质量更大的少量 α 射线可以在 β 射线的反方向探测到，显示出它们带正电且质量更大。

居里观察到了一种荒谬的现象，把其它物体放在镭附近时，这些物质都会暂时性地带放射性，移开镭后它们的放射性慢慢衰弱，他们称之为感应放射性。很多人将这种感应放射性归咎于新的气体元素，但是居里通过对镭附近的气体的光谱分析，并没有证据证明有新的元素存在。

1900年，克鲁克斯当时正在研究铀的放射性，在进行任何实验之前，他想要一份很纯的铀盐样品，他将碳酸铵加入到硝酸铀的水溶液中，产生一种沉淀物，再次溶解后留下一些像一丛羊毛的残余。克鲁克斯将这些残余作用于感光板时，发现这些残余的放射性非常强，而留下来的溶液没有了放射性。克鲁克斯将这种新物质（残余）命名为uranium X，并推断uranium X才是uranium的产生辐射的成分。从而贝克勒尔和居里假设放射性是uranium的固有特性是错误的。

卢瑟福在 mcgill

1895 年，卢瑟福离开家乡，带着他的电磁波探测器，向他的未婚妻说 good-bye，前往剑桥大学，希望在卡文迪许实验室工作。卢瑟福找到一种使用磁化钢针探测无线电波的方法，在剑桥，他向四分之三英里 (1.21km) 远的房间发送了一个信息，因为对卢瑟福的才能的深刻印象，卡文迪许实验室主任汤姆逊邀请他参与电子荷质比实验，伦琴发现 X 射线后又进行了 X 射线电离气体的效应，在听说贝克勒尔的铀放射性后，卢瑟福希望看看这种射线是否像 X 射线一样能够电离气体，由于贝克勒尔也发现了他自己的铀射线也能使气体导电，因此卢瑟福的实验是很自然的。

1898 年秋天，卢瑟福被任命为加拿大 mcgill 大学实验物理学教授。当时 mcgill 大学物理实验室由 2 名教授，一小部分初级讲师和做研究的学生组成，有很繁重的教学任务，主要是对工程学，医学和化学等非物理专业的学生，凯楞达 (Hugh calendar) 教授退休后要返回英国，于是实验室主任约翰·考克斯 (John cox) 就前往剑桥寻找一个替换，卡文迪许实验室主任汤姆逊就写了推荐信推荐 1898 年获得博士学位的卢瑟福。

最初卢瑟福勉强接受这个邀请，因为当时加拿大的蒙特利尔处于科学世界的边缘，而他自己已经在科学世界的中心被认可。然而他很快认识到去加拿大的潜在优势：首先他才 26 岁就被任命为全职教授，这在英国需要好几年才能提升。其次一年 2500 美元的工作非常好，他正需要钱和未婚妻，他在苏格兰时的房东的女儿结婚，第三，由烟草业百万富翁麦克唐纳资助的 mcgill 物理学大楼是全新的且被认为是全世界最好的物理学大楼且实验设备也是最好的，最后，这个职位是一个研究职位，这正是卢瑟福想要的（大部分教学任务由考克斯负责，考克斯教学非常优秀，研究方面有所欠缺。），卢瑟福当时年轻自信，确信自己可以战胜在大西洋彼岸工作的不利因素，尽管他从来没打算在加拿大呆 9 年。

本来计划一到加拿大就结婚，但是他发现新教授不可能立即获得很长时间的假期，一年半后他才结婚。

在这一年半里，卢瑟福遇到了一种新的难题。电子工程师 R. B. 欧文斯 (R. B. Owens) 努力地去测量钍的放射性，但是每次测量，都会得到不同的结果，他知道空气流是造成这个的原因，但是他不知道为什么会这样，于是请求卢瑟福提供建议。

卢瑟福认识到**钍会放射出一种气体**，任何接触到这种气体的东西都会变得具有放射性。今天我们称这种气体为氡，在世界上的某些地方，氡气会从地下渗出进入建筑物，很多人非常担忧这种自然产生的放射性对健康的危害。

卢瑟福想知道，他是否能够从钍中析取与铀 X 相似的物质，因此他需要一名化学家，他请求 23 岁的索迪 (soddy) 和他一起研究。

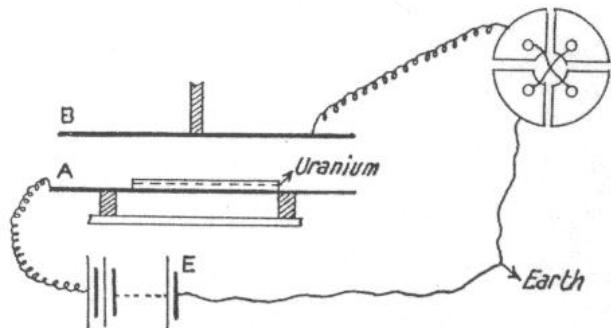
卢瑟福和索迪从**钍中析取**一种放射性的物质，他们称之为**钍 X**，析取出来 4 天后，他们发现钍 X 失去了一半的放射性，而与钍 X 放置距离很远的最初的钍 (溶液中的钍) 又获得了钍 X 失去的放射性相同的放射性。对这两种物质失去和重获放射性的定量研究显示，放射性的衰退和重获率一致，大约 1 个多月，卢瑟福和索迪重复了 uranium X 的观察，发现相同的效果也出现了，间隔更长时间，大约 6 个月。**这些观察和居里发现的反常的感应放射性一起被考虑，卢瑟福自己做了研究，于 1900 年推断说，感应放射性归咎于一种放射性气体，他称之为“散发” emanation**，与钍 X 的相关工作也出现了一种**散发**，今天我们知道那是氡气。卢瑟福和索迪认为，放射性元素的原子处于自发的瓦解之中，通过发出 α 或 β 离子，它们形成新的元素，这个过程是一个系列，每个阶段都有不同的瓦解率。

放射性被显示出是伴随着新物质的持续产生的化学过程的。这些过程的反作用产物首先是放射性，随着新物质的现成，放射性逐渐减小，这个结论显示化学变化一定是次原子 (sub-atomic) 结构的特征 (次原子粒子又称亚原子粒子，指结构比原子更小的粒子。所有原子都是由更小的“次原子”粒子所组成，包括电子、质子与中子)。

卢瑟福和索迪将元素衰变的论文寄到当时在科学界颇有影响的《哲学杂志》时，遭到杂志主编开耳芬勋爵的拒绝。开耳芬勋爵是英国科学界的泰斗，19世纪最杰出的物理学家之一。在学术问题上开耳芬有一种观点，他认为实验仅是验证理论的一种方法。另外，晚年以思想保守而著称的开耳芬实际上是对元素蜕变理论的反对者。卢瑟福和索迪在提出元素蜕变假说时，根据放射性元素在自发地发射射线的同时，还不断地放出能量这一事实，提出了“原子能”的概念。卢瑟福还用这个理论说明太阳能和地热的来源，平息了物理学家和地质学家对此的长期争论。开耳芬则是物理学家的代表，主张这种能源来自引力收缩。开耳芬显然不愿意发表卢瑟福和索迪的论文。在这种情况下，卢瑟福只好赶回剑桥，求助于他的导师汤姆逊。通过实验测定了电子的荷质比，从而证实了电子的存在。汤姆逊对新的科学发现和理论遭受白眼是很有感触的，因此他毫不迟疑地支持卢瑟福。汤姆逊亲自找到开耳芬，向开耳芬保证这篇文章由他负责，开耳芬才不得不同意刊登卢瑟福和索迪的论文。

通过推断天然铀的衰变速率，我们知道45亿年前地球上的铀是现在的2倍。

1903年居里和贝克勒尔获得诺贝尔奖发言时，依然对卢瑟福和索迪的假设很小心，一个原因是，自从拉瓦锡开始，化学就是基于元素稳定性的假设。变化意味着与不科学的炼金术相联系。拉瓦锡的实验都是基于一个假设，也就是在所有化学反应中，元素的重量和产物都不变。



这是卢瑟福在1899年的论文中的复制图，一层均匀的铀被涂在A上面，射线使A、B间的气体电离导电，当A、B间的电压足够大（使得从射线电离的离子重新集合前）被推到B板，来测量电流。（这一步可以验证射线可以电离气体。）

之前贝克勒尔使用他的粗糙的相片技术证实铀辐射由至少两种射线组成，因为这些射线并没有相同地被吸收。由于这个粗糙的相片技术，贝克勒尔没有在此试验中走的更远。之后卢瑟福在AB之间放上厚度不同的薄片，比如铝片或铅片，来测定铀辐射是否真的由两种以上射线组成，卢瑟福使用了一个方程

$$r = e^{-\lambda d}$$

r是射线通过厚度为d的薄片之后的射线强度与移开薄片的射线强度之比。如果射线只有一种，那么当薄片厚度增加而r减小时，比例系数λ将是恒定值。但这并没有发生，卢瑟福发现，当铝薄片的厚度是百分之几毫米（或几厘米空气）时，λ保持不变，然后又突然变成另外的值，而当增加铝片的厚度时，值又保持不变，所以卢瑟福归纳认为，铀的射线至少有两部分组成。之后一定是进行了磁场或电磁实验，发现两种射线带有不同的电荷，带正电的他命名为α射线，带负电的命名为β射线。

由于X射线，铀射线等的发现，放射线在当时成为新的科学前沿，维拉德（Villard）也参与了这方面的研究。

γ射线, α粒子的确认实验

维拉德最初使用克鲁克斯管研究阴极射线的磁效应以及 X 射线的化学效应，发现 X 射线能对物质同时产生化学和物理影响。之后维拉德从居里那里得到一些镭的样品并首先尝试去研究镭的射线被磁场弯曲。他当时还不知道这种会被弯曲的射线是由放射线原子发出的具有阴极射线射线特性的 β 射线。在他尝试研究这种射线的折射时，发现一种不能被磁场弯曲的穿透性很强的尚未发现的射线，他把这个发现报告给了法国科学院。1914 年，卢瑟福和爱德华·安德拉德（Edward Andrade）使用晶体衍射法测量了这种射线的波长，发现这种射线是波长比 X 射线短的电磁波。为了与卢瑟福命名的 α 和 β 射线保持一致，维拉德将这种射线命名为 γ 射线，因为在当时还不知道这三种射线的本质。

随着自己名声的高涨，卢瑟福收到来自美国和加拿大不同的邀请，但是因为 mcgill 的优良的实验条件而拒绝了那些邀请，但是每次邀请卢瑟福都让 mcgill 校方知道，然后每次都会加薪。但是卢瑟福还是希望回到科学的中心去—英国，在那里有优秀的学生，以及和著名科学家接触。他的愿望被人注意到了，来自富有家庭的舒斯特（Schuster）说他可以从曼彻斯特退休来给卢瑟福提供职位。卢瑟福抵达曼彻斯特后列出了一些研究项目，其中一项就是检查他猜测 α 离子是电离的氦原子的想法。舒斯特有一个助手盖革（geiger）在舒斯特退休后留了下来，和另外一个助手罗伊兹（royds）一起，他们使 α 离子与周围物质的电子相结合然后用光谱分析确认了 α 离子就是氦离子。

为什么做 α 离子轰击金箔实验？

α 离子是由铀，镭这样的物质自发地辐射出来的带正电且非常微小的粒子，卢瑟福已经在 1899 年发现了它们，1908 年，他打算精确地测出 α 粒子的荷质比，为了实现这个目的，首先要知道他的铀样品放射出多少 α 粒子，之后测量总电量，再除以粒子数。 α 粒子非常小，用显微镜看不到，但是卢瑟福知道它们能电离空气分子，因此如果将空气隔绝在电场中，离子就会产生电流。根据这个原理，卢瑟福和盖革设计了一个装在玻璃管中，由两个电极组成的简单的计数装置。每一个通过玻璃管的 α 粒子都会产生一个可以数的电脉冲，这就是盖革计数器的早期版本。

盖革和卢瑟福设计的计数器被证明并不可靠，因为 α 粒子与空气分子在探测腔内碰撞时会被强烈地偏转。变化多端的轨迹意味着每一个 α 粒子并不都产生同样数量的电离离子，因此读出的数据不正确。这个问题令卢瑟福十分困惑，因为他曾经以为 α 粒子非常重以至于不可能被撞出那么大的偏转，于是卢瑟福让盖革实验一下，看看有多少物质会散射 α 射线。

α 粒子散射的实验完成于 1909 年。在那时代，原子被认为类比于梅子布丁（物理学家约瑟夫·汤姆孙提出的），负电荷（梅子）分散于正电荷的圆球（布丁）。假若这梅子布丁模型是正确的，由于正电荷完全散开，而不是集中于一个原子核，库仑位势的变化不会很大，通过这位势的 α 粒子，其移动方向应该只会有小角度偏差。

他们设计的实验包括用 α 粒子轰击金属薄片，来观察薄片的厚度和材料与散射 α 粒子的关系，他们用荧光屏测量粒子的轨迹，每一个 α 粒子对荧光屏的冲击都会产生一个非常微小的闪光。盖革在一个暗室工作了好几个小时，用显微镜计数这些火花。卢瑟福缺乏这种忍耐力，这就是为什么要他的年轻同事来做的原因。他们使用了很多金属薄片，但是比较喜欢金箔，因为金箔的延展性使得可以制作得非常薄，而且使用放射性比铀强几百万倍的镭。

在卢瑟福的指导下，盖革和马士登发射 α 粒子束来轰击非常薄、只有几个原子厚度的金箔纸。然而，他们得到的实验结果非常诡异，大约每 8000 个 α 粒子，就有一个粒子的移动方向会有很大角度的偏差（甚至超过 90° ）；而其它粒子都直直地通过金箔纸，偏差几乎在 2° 到 3° 以内，甚至几乎没有偏差。从这结果，卢瑟福断定，大多数的质量和正电荷，都集中于一个很小的区域（这个区域后来被称作“原子核”）；电子则包围在区域的外面。当一个（正价） α 粒子移动到非常接近原子核，它会被很强烈的排斥，以大角度反弹。原子核的小尺寸解释了为什么只有极少数的阿尔法粒子被这样排斥。

汤姆逊于 1919 年被任命为剑桥三一学院院长，这个职位需要他全身投入，因此他辞去了卡文迪许实验室教授和主任，包括舒斯特在内的一个选举委员会选举卢瑟福继任汤姆逊，卢瑟福非常巧妙地协商，确保汤姆逊不会干涉实验室事务，但是允许他给他的助手和学生以及他本人保留一些房间，汤姆逊确认卢瑟福选为三一学院学会特别会员，拥有“我高兴的时候你可以过来吃饭”的权利，这就确保了卡文迪许实验室的两位巨人之间的和平。

人们经常说卢瑟福到卡文迪许实验室后很少有时间来进行自己的研究，这确实是真的，因为他比以前有更多的管理职务在身了。然而，卢瑟福还在继续研究原子核，卢瑟福的 mcgill 时期放射性衰变的自然产生，在曼彻斯特，是原子的理论，作为卡文迪许教授，他分离原子核。

卢瑟福将人工分离原子核的新研究领域从曼彻斯特带到剑桥，他带来了实验设备和放射源材料，更为重要的是，他邀请他之前的学生，查德威克加入他更深入的实验中。

在 1910—1911 的冬天，卢瑟福思考出了一个原子具有带电的中心的原子模型的基本看法，就像盖革和马斯登在他们 1909 年的文章中指出的那样：

如果考虑到 α 粒子的质量和较大的速度，那么在实验中显示出来的某些 α 粒子被 $6 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 厚的金箔偏转 90° 。甚至更大角度就显得非常令人吃惊。用磁场达到相同的效果的话，需要 109 绝对单位（absolute units）的巨大磁场。

在 1911 年 5 月的论文中，卢瑟福总结到，让一个大质量带电粒子的轨迹产生如此大的偏转，只有一种可能，那就是金原子的大部分质量和电荷量都集中在非常小的中心位置。注意：此时卢瑟福并未称其为原子核（nucleus）。

实际上，卢瑟福在得出这个中心带电的结论时非常谨慎：一个很简单的计算显示，原子必须位于一个非常强的电场中，使得在对碰时可以产生如此大的偏转。他非常迅速和粗糙地想出，如果这个中心带电的原子模型正确的话，几个定量关系必须是真的：1. 某个角度散射的 α 粒子数量与金箔的厚度成正比。2. 数量与中心电量的平方成正比。3. 数量与 α 粒子的速度的四次方成反比。这 3 个关系导致了 1 年后盖革与马斯登的实验。

卢瑟福考虑到带电中心带负电的可能性。今天听起来奇怪，那么是什么使得这个看法合理呢？首先，这个与汤姆孙的模型不是非常不同。其次，因为卢瑟福知道 α 粒子带 2 个单位的正电荷，他认为这可能像太阳吸引靠近它的彗星。就像弹弓的皮带将 α 粒子甩出去后又拉回原来的方向。他也考虑到了日本物理学家长冈半太郎（1865 - 1950）提出的一个几乎被忘记的模型——土星模型。长冈和卢瑟福在 1910 到 1911 年之间有联系，卢瑟福提到了“一个具有吸引力的中心质量被旋转的电子包围”的长冈模型。在这篇重要的论文中，卢瑟福最终申明，无论原子是圆盘的还是球型的，无论中心带正电还是负电，都不影响计算结果。卢瑟福一直非常小心地不去声称那些他的计算不支持的结果。

卢瑟福确实看到了中心带电原子模型的特征的可能的测试。一个带正电荷和负电荷的中心对 β 粒子的吸收应该是不同的，他说。一个带正电荷的中心可以解释 α 粒子从放射性物质中以很高的速度放射出来。但是这只是暗示。

盖革和马斯登的确系统性地做过卢瑟福提出的中心模型的假设的各种可以测试的应用。第一次世界大战完全扰乱了卢瑟福在曼切斯特的工作，卢瑟福的团队成员中，波尔返回丹麦，马斯登接受了新西兰的教授职位，莫斯利死于加里波底的战役，战争开始时和盖革在德国技术大学工作的查德威克，因战争俘虏被关押在鲁勒本集中营。其他学生也参战去了，卢瑟福也去研究反潜技术。

由于这些的干扰，卢瑟福和他的实验室管家威廉凯 1917 年才开始用 α 粒子穿过氢气，氮气和其他气体，第一次世界大战结束时，马斯登短暂地帮助观察令人乏味的闪烁，这种闪烁提供了通向原子核的线索。卢瑟福在 1919 年报告了这些试探性的实验。卢瑟福将放射源镭 214 放在一个可封闭的铜容器内，从而可以根据需要改变位置，抽空或引入不同气体， α 粒

子穿过容器内部并通过一个用银板或者他物质盖着的狭缝，轰击一个硫化锌屏幕，在暗室里可以看到屏幕上是有闪光。当放入氢气后，非常小心地使 α 粒子在轰击屏幕前使其完全吸收，但是依然可以看到屏幕上的闪光，卢瑟福认为，当 α 粒子通过氢气时，偶然地与氢原子和发生了碰撞。这使得氢原子飞速地向 α 粒子原来运动的方向运动。

在这些实验中，卢瑟福有几个疑问，主要是关于原子核的特征。他叫他的同事 Darwin 根据原子核间的弹性碰撞的简单原理，利用平方反比的排斥力，分析 α 粒子与电子（或与电子电量相同、电性相反的粒子）以及和氢原子核的碰撞。Darwin 发现所有与氢原子接近到 $2.4 \times 10^{-13}\text{cm}$ 以内时都能让氢原子加速沿着 α 粒子运动的方向前进而在屏幕上产生闪光，然而，这个简单的原理还预测，只有非常少的，比观测到的还少的氢原子会被加速碰撞到屏幕上。

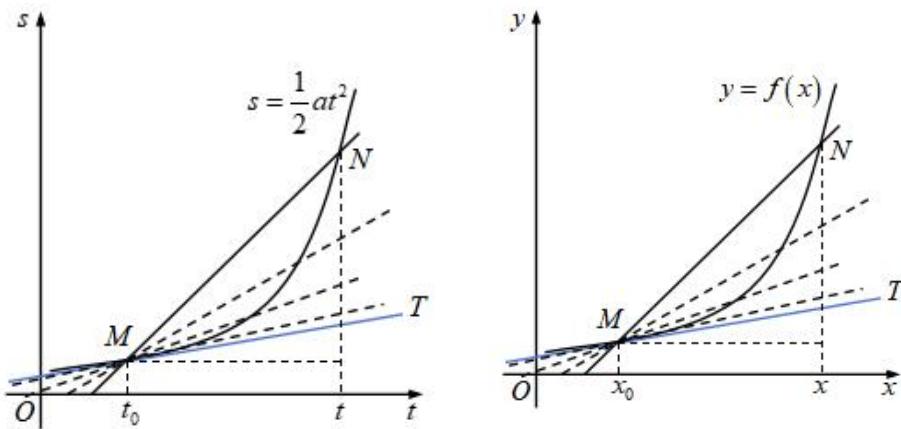
瞬时速度的计算（极限的计算）

做自由落体运动的物体，下落距离 L 与下落时间 t 的平方成正比， $L = \frac{1}{2}gt^2$ ，其中 g 为

重力加速度。物体下落 t_0 时，设有一个很小的时间增量 Δt ，在时间间隔 Δt 内，物体的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}g(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt_0^2}{\Delta t} = \frac{1}{2}g(2t_0 + \Delta t) \frac{\Delta t}{\Delta t}$$

$\Delta t = 0$ 时，平均速度就是 t_0 时刻的瞬时速度，我们来计算这个瞬时速度，



可导函数 $y = f(x)$ 在可导点 $x = x_0$ 处的导数是函数曲线上该点处的切线的斜率

$$k = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \quad (1)$$

如果函数 $y = f(x)$ 是一条直线 $y = f(x) = x$ ，则 (1) 式变为

$$k = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x - x_0}{x - x_0} \quad (2)$$

由于 $y = f(x) = x$ 是一条直线，直线上的点 $x = x_0$ 处的切线是直线本身，切线的斜率就是直线的斜率，而直线的斜率可以根据两点式计算，即可以用直线上任意不同的两点求出

$k = \frac{x_1 - x_0}{x_1 - x_0} = 1$ ，因此 $k = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x - x_0}{x - x_0} = 1$ ，而根据切线的定义， $k = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x - x_0}{x - x_0} = 1$ 就是

$x = x_0$ 时 $\frac{x - x_0}{x - x_0}$ 的值, 由于函数符号 y 和自变量 x 可以用不同字母代替, 因此 $\frac{\Delta t}{\Delta t}$ 在 $\Delta t = 0$

时等于 1.

电磁波携带动量吗?

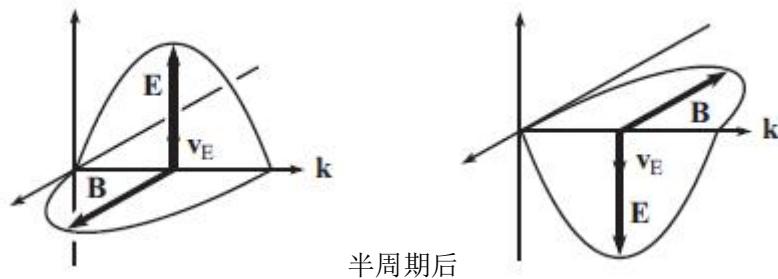
所有其它我们已经学过的波 (声波, 纵向弹簧波, 横向绳波) 都不携带动量, 与这些熟悉的波类比, 很难明显地看出电磁波带有动量, 电磁波很可能只带有能量而不带有动量.

我们根据狭义相对论来快速地讨论一下为什么电磁波带有动量. 根据狭义相对论, $E = mc^2 = pc$, 可知光子的动量是 $p = E/c$, 我们已知电磁波带有能量 E , 因此这个关系式告诉我们电磁波也带有动量. 这样的讨论是完全正确的, 但不是很令人满意. 首先这个讨论包含狭义相对论的内容. 其次还包含了将电磁波 (光) 看作是由称为光子的微观粒子组成的事.

为什么光的粒子性是导出电磁波带有动量的必要条件呢? 我们希望能够只用波的概念和目前已经学过的波的特性来导出 $p = E/c$ 的结果.

现在考虑一个带有电量 q 的粒子在某种物质中运动, 使其受到一束电磁波的影响, 这个微粒将受到组成电磁波的电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{B} 的作用力, 也还会受到周围物质的力的阻尼作用, 且这个粒子还会因为加速度而产生辐射, 因而损失能量, 但是辐射和阻尼作用在我们的讨论中不重要.

假设这个电磁波沿着 z 轴的正向传播, \mathbf{E} 沿着 x 轴正向, 因为 $\mathbf{E} \times \mathbf{B} \propto \mathbf{k}$, 于是 \mathbf{B} 指向 y 轴正向, 带电粒子的运动通常来说是很复杂的, 但是就现在讨论的目的而言, 只需考虑粒子的 x 轴方向的速度分量就足够了, 也就是说, 这个分量平行于电场 \mathbf{E} . 由于电场的振荡, 带电粒子也会沿着 \mathbf{E} 的方向向前向后振荡 (主要沿着这个方向振荡), 不过我们并不知道振荡的相位, 通常来说, 带电粒子的速度将部分与 \mathbf{E} 同相位, 部分与 \mathbf{E} 有 $\pm 90^\circ$ 的差异, 后面这部分与我们的讨论无关, 所以只需要集中考虑与 \mathbf{E} 同相位的速度即可, 我们称之为 \mathbf{v}_E , 如下图所示



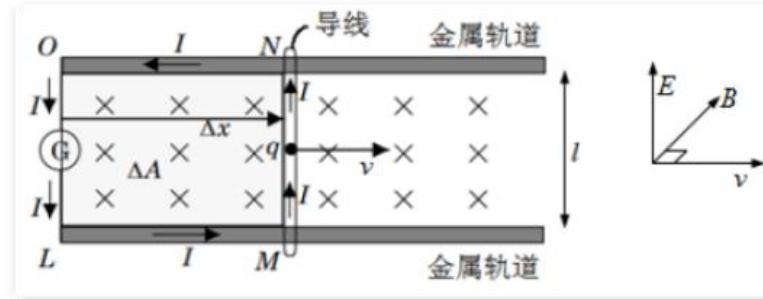
根据右手定则, 磁力 $q\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}$ 在整个周期都指向 \mathbf{k} 的方向, \mathbf{v}_E 和 \mathbf{B} 会周期性地改变符号, 但是两个负号会相互抵消, 因此始终有一个指向 \mathbf{k} 方向的力, 于是带电粒子就在这个力的作用下加速而获得动量, 而这个动量肯定是来源于这个电磁波的, 在 dt 时间内, 这个电磁波给带电粒子的动量大小为

$$|d\mathbf{p}| = \mathbf{F}_B dt = |q\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}| dt = qv_E B dt = \frac{qv_E Edt}{c}$$

这个波带给带电粒子的能量是多少? 或者说, 这个电磁波对带电粒子所做的功是多少? (平衡状态下, 这个功被带电粒子受到的阻尼作用和辐射的能量抵消了), 假设带电粒子的速度远远小于光速, 此时磁场对粒子的力 $q\mathbf{v}\mathbf{E}/c$ [$q\mathbf{v}\mathbf{B}$ ($B = E/c$)] 比电场力 $q\mathbf{E}$ 小得多, 因此电磁波施加在带电粒子上的力主要是电场力.

为什么 $B = E/c$?

如下图所示,



由于导线向右以速度 v 运动，导线内的任何电荷 q 都将受到一个力的作用，可以通过左手定则力确定，

$$F = qv \times B$$

$$\frac{F}{q} = v \times B$$

$$\frac{F}{q} = E = v \times B$$

这个力显然是电场里，是因为导体向右以速度 v 运动形成的，这种电场与静电场是不同的，这种电场只有当电荷以速度 v 移动时才存在。如果以电荷为参考点，那么电荷以速度 v 向右运动就是磁场以速度 v 向左运动，于是电场 $\frac{F}{q} = v \times B$ 就是运动电荷周围产生的电场。又

乘指出电场方向，电场强度的大小为 $E = vB \sin \theta$ ，此处 $\theta = 90^\circ$ ， $E = vB$ 。

如果将导体在磁场中以速度 v 向右运动，看作是导体不动从而导体中的电荷 q 不动，而是磁场 B 以速度 c 向左运动，那么电荷 q 就会受到 $E = cB$ 的电场力的作用，实际上，我们只是假设空间中有导体从而有电荷 q ，如果没有电荷 q ，以速度 c 向左运动的磁场意味着在电荷 q 这点的空旷的空间点，存在一个变化的磁场，这个磁场依然可以导致一个电场 $E = cB$ 的出现，这就是电场和磁场相互产生的过程，这就是电磁波在空间中的传播，这就是电磁波中电场与磁场的关系 $B = E/c$ 。（标准的推导需要麦克斯韦方程）

只考虑电场力所做的功，电场力是 qE ，在 dt 时间间隔内所做的功为

$$dW = \mathbf{F}_E \cdot d\mathbf{x} = qE(v_E dt) = qv_E Edt$$

与上式相比，

$$|d\mathbf{p}| = \frac{dW}{c}$$

这个公式可以扩张到 Δt 的时间间隔，因为任何时间间隔都是由无穷小量的 dt 组成的。因为上式对任何电磁波与带电微粒相遇都成立，我们可以推断，电磁波确实带有这个大小的动量，即便我们在上面的论述中没有设置一个带电微粒，我们可以想象放一个在那里，则这个想象的带电微粒同样会获得上式给出的动量，因此这个动量一定时电磁波固有的特性。
瞬时速度的计算

简谐运动微分方程的简单求解

在瞬时速度的计算(极限的计算)中, 我们看到位移函数 $y = f(t)$ 对时间求导 $\frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}f(t)$, 得到瞬时速度函数. 瞬时速度函数继续对时间求导, 即位移函数对时间的二次导数

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dy}{dt}\right) = \frac{d}{dt}\left[\frac{d}{dt}f(t)\right] \Leftrightarrow \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}f(t), \text{ 将得到物体的加速度函数.}$$

简谐运动将涉及到二次导数.

频率和周期的关系

$$f = \frac{1}{T}$$

一种最普遍的周期运动称为简谐运动, 做简谐振动的物体称为谐振子.

一维情况下, 物体所受回复力为 $F_x = -kx$ 的振动, 称为简谐振动.

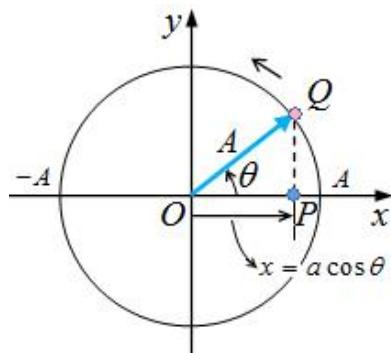
$$F_x = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

$$a = -\frac{k}{m}x$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

利用初始条件求解微分方程可以得到简写运动的位移随时间变化的解 $x = f(t)$, 但是我们这里用一种简单方法来得到相同的解.



上图表示一质量为 m 的质点绕 O 点以角速度 ω 沿逆时针方向做匀速圆周运动, 点 P 是质点运动到 Q 点时在 x 轴上的投影, $x = A \cos \omega t$, 随着 Q 点的运动, 其投影点 P 将在 x 轴的 $-A$ 到 A 之间做周期性运动, 点 P 看起来很像是以 O 点为平衡点的弹簧振子, 我们知道弹簧振子的运动是简谐运动, 这样就求出简写运动的运动方程为 $x = A \cos \omega t$, 现在我们来分析点 P 的运动情况, 看看 $x = A \cos \omega t$ 是否真的是简谐运动微分方程 $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$ 的解.

由 P 点的坐标 $x = A \cos \omega t$, 两端对时间求导得

$$\frac{dx}{dt} = -A\omega \sin \omega t$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos \omega t = -\omega^2 x$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

即得 P 点沿 x 轴方向的加速度

$$a = -\omega^2 x$$

这与简谐振动的定义相同，因此 P 点做简谐振动，运动方程为

$$x = A \cos \omega t$$

将其带入振幅为 A 的弹簧振子的运动学方程 $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0$ ，得

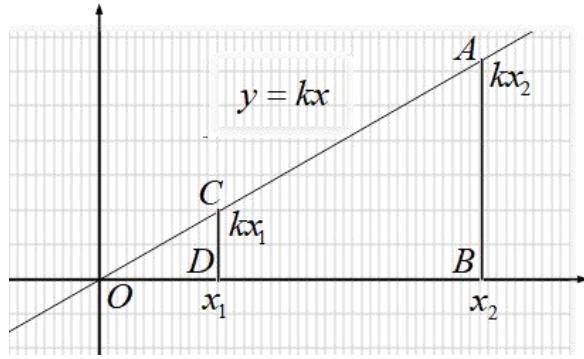
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

将弹簧一端固定并沿光滑水平方向拉伸或压缩一个形变量 x_1 ，另一端固定一个质量为 m 的物体，物体受到的弹力为 $F = -kx$ ，物体在弹力作用下移动至弹簧形变量为 x_2 时，弹力所做的功

$$W_e = \int_{x_1}^{x_2} F dx = \int_{x_1}^{x_2} -kx dx = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2$$

式子 $\int_{x_1}^{x_2} -kx dx = -\int_{x_1}^{x_2} kx dx$ 是求由函数曲线 $y = kx$ 与 x 轴围成的面积，由于围成的是三角形，可以根据三角形面积公式计算，由下图可知，



$$W_e = \int_{x_1}^{x_2} F dx = \int_{x_1}^{x_2} -kx dx = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2$$

$\frac{1}{2} kx^2$ 具有能量单位，我们将其定义为弹簧的弹性势能。弹簧弹性势能的改变量为末势能

$$U_{e2} = \frac{1}{2} kx_2^2 \text{ 减去初势能 } U_{e1} = \frac{1}{2} kx_1^2, \quad \Delta U_e = \frac{1}{2} kx_2^2 - \frac{1}{2} kx_1^2, \text{ 则}$$

$$W_e = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2 = -\Delta U_e$$

无论合外力是什么力，根据功能关系，都有合外力所做的功等于动能的变化量，

$$W = \Delta K = K_2 - K_1$$

这里合外力只有弹力，则有

$$W = K_2 - K_1 = W_e = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2 = U_{e1} - U_{e2}$$

$$K_2 - K_1 = U_{e1} - U_{e2}$$

$$K_2 + U_{e2} = K_1 + U_{e1}$$

$$\frac{1}{2} mv_2^2 + \frac{1}{2} kx_2^2 = \frac{1}{2} mv_1^2 + \frac{1}{2} kx_1^2$$

弹簧的弹性

一端系一质量为 m 的滑块的弹簧振子，弹簧因为形变而具有的势能与弹簧形变量的关系

$$U = \frac{1}{2} kx^2$$

整个系统的能量在弹簧的势能 $\frac{1}{2} kx^2$ 与滑块的动能 $\frac{1}{2} mv^2$ 之间震荡，总能量

$$E = U + K = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2$$

滑块的运动方程是 $x = A \cos \omega t$ ，为了不失一般性，假设滑块有一个初相位，

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

其速度

$$v = -A\omega \sin(\omega t + \varphi)$$

则简谐振动的总能量

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}mA^2\omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \\
 &= \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}mA^2 \frac{k}{m} \sin^2(\omega t + \varphi) \\
 &= \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}kA^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \\
 &= \frac{1}{2}kA^2
 \end{aligned}$$

数学模型（波动函数）描述波的传播介质中介质粒子的运动

上面说到的振动（oscillation）十分重要，振动除了可以为很多现象建模外，还有一个重要作用，就是产生波动。

波是扰动的传播，有三种基本的波：机械波，电磁波和物质波。

机械波的传播需要介质，扰动使介质发生形变而产生弹性回复力。机械波传播能量和动量，但是不传递质量。常见的机械波有水波、声波。

电磁波与电场和磁场的震荡有关且传播不需要介质。常见的电磁波包括X射线，可见光，红外线等。物质波与质子，中子，电子等基本物质粒子有关。

这里主要讲机械波。读者需要知道波峰，波谷，波长，频率，周期，波速等基本概念，这里不一一叙述，波速

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

此式适用于一切波。

介质的振动方向与波的传播方向垂直的称为横波，水波，绳波都是横波。振动方向与传播方向平行的波称为纵波，例如声波。

除了用周期，波速，振幅描述波，我们还可以用数学模型（波动函数）描述波的传播介质中介质粒子的运动，并利用波动函数计算任意时刻介质粒子的位置，速度，加速度。

如果质点在介质中做简谐振动，那么它会带动周围的点做简谐振动，以绳子为例，若使绳子的一端做简谐振动，这种振动将向绳子的另一端传播出去，在传播的过程中，绳子上的其他点都将以相同的频率和振幅跟随振源振动，这就是简谐振动产生波动的原理。

建立直角坐标系，设振源在坐标原点，该点的振动方程为

$$y(x=0, t) = A \cos \omega t$$

如果振源的振动向右传播，波速为v，经过时间t后，振源的波动向右移动了vt距离，根据函数图像“左加右减”的平移规律，在x=vt距离处波动为

$$y(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

也就是说，经过时间t，距离原点vt处的质点的振动情况与坐标原点处在t - $\frac{x}{v}$ 时刻前的振动相同。做变换，有

$$y(x, t) = A \cos \left(\omega t - 2\pi f \frac{x}{v} \right)$$

$$y(x,t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

设 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, 称为波数, $\lambda = \frac{2\pi}{k}$, $\lambda f = \frac{2\pi f}{k}$, $v = \frac{\omega}{k}$ 有

$$y(x,t) = A \cos(kx - \omega t)$$

考虑 $t=0$ 时质点的初始条件不是 $x=+A, v=0$, 有一个初相位, 则简谐波(简谐运动产生的波)的一般方程为

$$y(x,t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

对 t 求导可得 x 处质点沿 y 方向的瞬时速度,

$$\begin{aligned} v_y &= \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [A \cos(kx - \omega t + \varphi)] \\ &= \omega A \sin(kx - \omega t + \varphi) \end{aligned}$$

加速度

$$\begin{aligned} a_y &= \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} [\omega A \sin(kx - \omega t + \varphi)] \\ &= -\omega^2 A \cos(kx - \omega t + \varphi) \\ &= -\omega^2 y(x,t) \end{aligned}$$

t 不变在 x 处对 x 求一阶导数,

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [A \cos(kx - \omega t + \phi)] = -Ak \sin(kx - \omega t + \phi)$$

表示 t 时刻波函数在 x 处的斜率. 继续求二阶偏导数

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} [-Ak \sin(kx - \omega t + \phi)] = -Ak^2 \cos(kx - \omega t + \phi)$$

则

$$\begin{aligned} \frac{\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}}{\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}} &= \frac{-\omega^2 A \cos(kx - \omega t + \varphi)}{-Ak^2 \cos(kx - \omega t + \phi)} \\ &= \frac{\omega^2}{k^2} = v^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$

此式称为线性波动方程, 是物理学和工程领域最重要的方程之一.

两个物体紧密接触时，允许各自从对方吸收能量，并最终达到没有能量传递的状态，此时两个物体达到热平衡.即便没有相互接触，当使其相互接触时，如果彼此没有能量传递，我们也说两个物体处于热平衡.两个物体接触时间足够长的话，通常最终会到达热平衡.因此，处于热平衡的两个物体之间没有能量交换.

如果物体 A 与 B 处于热平衡，而 B 与 C 处于热平衡，那么 A 与 C 就处于热平衡.这就是热力学第零定律.如果 A 是温度计，那么 A 测量了 B 的温度（与 B 达到热平衡）后与 C 接触时，不会与 C 有热交换，温度将保持不变.

一个温度计测量它本身的温度，通过热平衡的概念和热力学第零定律，我们才说温度计测量其他物体的温度，以及两个物体具有相同的温度.

任何随温度的变化而连续变化且可以再次重复的物体性质，都可以用来制作温度计.例如许多物体的体积随温度变化，我们用这个性质制作酒精和水银温度计.电阻，颜色，红外辐射等都可以用来制作温度计.摄氏温度以标准大气压下冰水的温度为 0°C，沸水的温度为 100°C.

绝对温度或绝对零度是英国物理学家汤姆森（William Thomson）在 1848 年发明的.汤姆森以法国物理学家查尔斯（Charles）的理论为基础给出一个绝对的刻度（absolute scale）.查尔斯的观察显示，气体在 0°C 也能继续降温变冷（从而体积变小），温度每降低 1°C，气体的体积就会减小 1/273.查尔斯的定律显示，在-273°C 时，气体的体积将变为 0.这种现象令那些不能理解气体的体积会变为零的科学家困惑不解，或者说，当体积变为零时，气体到底发生了什么情况？

与焦耳在冷却气体方面一起工作之后，汤姆森给出了如下建议：气体的温度是气体原子（atoms）（我们现在知道气体是以分子形式存在的，这里使用 atom，主要是想表达气体的最小微粒，而不是原子的概念）的动能的反应（解析来会有推理）.温度降低时气体原子的活性减小，运动量减小，占有的空间减小，因此体积就减小.在-273°C 时，每一个原子（atom）的能量为 0，此时他们停止运动并实际上不占有体积，汤姆森认为这个理论适合于所有物质.

汤姆森提出绝对温度的原因在于，他研究了卡诺克拉佩龙理论时发现气体温度计只是提供了一种可测量的温度的定义，但是正如查尔斯的理论所述，当温度低于 0° 后，气体温度计的示数还会继续缩小，这和惠更斯提出的以冰点 0° 为 0 点的理论是相互矛盾的，理论的 0 点，按照查尔斯的理论，应该是-273°，这就需要提出一种新的温度的刻度，这种刻度的 0 点是摄氏度的-273°.绝对温度与摄氏温度之间的关系是

$$T_K = T_C + 273.15$$

温度升高时，酒精温度计中的酒精会膨胀，这是热膨胀的许多例子中的一个，最容易看到的热膨胀是气体的膨胀，当气体被加热时，体积增大，密度减小，周围密度大的气体对其施加向上的合外力，使其向上升.固体也有热膨胀，桥梁设计时考虑到热膨胀，在连接处留有一定的间隙.

大部分物质在通常情况下，其膨胀方向没有明确地限制，也就是向各个方向膨胀的可能性是相同的，即固体的各向同性性，因此温度变化导致固体尺寸向各个方向都有改变，所以只是大小发生了变化，各部分的形状比例没有变化.

将物体表面截出一个圆形的孔，温度升高时这个孔是缩小还是扩大了呢？是扩大了，因为我们截下来的圆形是膨胀了的，当将其放到圆孔时，物体上的圆孔要扩大了才放得下.

一般情况下物质随着温度的升高而膨胀，水是例外，水在 4°C 时密度最大，低于该温度时趋向结冰导致密度变小，因此冬季来临时，水面最先降温，达到 4°C 时密度变大，大密度的水下降到底部，因此即便是结冰的湖面，水下依然是 4°C，适合鱼类生存.

气体 “gas” 的本意是混乱，由于气体由大量运动且随机碰撞的分子组成，所以这个词

使用得十分恰当.通常情况下, 气体分子之间的距离比固体和液体原子或分子间距离大, 也比气体分子大很多, 导致气体分子之间除了相互碰撞外, 其他时间彼此间的相互作用力都可以忽略不计.而且温度高于沸腾温度时, 气体会膨胀到占有所有可能的空间.相反, 固体和液体分子或原子间距离较近, 相互间受到彼此作用力的限制.

波意耳的实验表明, 温度和气体分子数不变时, 气体的绝对压强与体积成反比.

$$p \propto \frac{1}{V}$$

查理斯的实验表明, 压强和气体分子数不变时, 体积与绝对温度成正比.

$$V \propto T$$

盖·卢萨克实验表明, 体积和分子数一定时, 压强和绝对温度成正比,

$$p \propto T$$

这三个关系式可以合并为 1 个,

$$pV \propto T$$

$$pV = Nk_B T$$

这个公式在低密度, 高于沸点温度时, 适用于所有气体, 比例系数恒定不变, 我们称这种限制条件下的气体为理想气体. k_B 称为玻尔兹曼常数.如果将气体密封, 使 N 不变, 则 pV / T 为常数.

$$pV = \frac{N}{N_A} N_A k_B T$$

$$pV = nRT$$

我们已经知道压强是压力除以面积, 温度用温度计测量.但是现在, 我们要使用气体动力学理论, 即将气体的宏观物理量(例如压强, 温度)与气体分子的运动联系在一起的理论来对这两个概念做更深入的理解.首先对理想气体的分子做 2 个假设:

1. 气体分子的数量 N 非常大, 且所有分子都相同并具有质量 m .
2. 分子遵守牛顿运动定律, 且随机地、各向同性地连续运动.各向同性就是运动方向没有偏好, 向任意方向运动的可能性都是一致的.

为了推导出理想气体定律以及微观量(例如典型分子的能量)和宏观量(例如温度)之间的联系, 我们分析刚性容器中的理想气体, 对此再做两个进一步的假设:

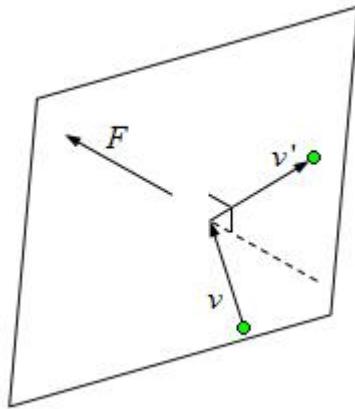
3. 分子比它们之间的平均距离小得多, 因此分子的总体积比容器(体积为 V)的体积小得多.换句话说, 一摩尔气体分子的体积与容器中一摩尔气体的体积相比可以忽略不计.
4. 分子与容器壁以及分子彼此之间发生完全弹性的碰撞.对它们的其他作用力, 包括重力和范德华力都可以忽略不计.

分子之间的碰撞不会出现在理想气体定律的推导中.它们也不会干扰推导, 因为以随机速度运动的分子之间的碰撞会产生新的随机速度.此外, 如果容器中气体分子的速度最初不是随机且各向同性的, 那么分子碰撞会使它们随机且各向同性.

我们再更进一步做一些假设来简化计算, 但不影响结果.首先, 将容器设为矩形容器.其次, 首先考虑单原子气体, 这些气体的分子由单个原子组成, 例如氦.然后, 可以假设原子除了平移动能之外没有其他能量; 例如, 既没有旋转能量, 也没有振动能量.(稍后, 我们讨论此假设对实际单原子气体的正确性, 但是省去考虑双原子和多原子气体的假设.)

下图显示了一个气体分子与容器壁的一次碰撞, 根据牛顿第三定律, 分子对壁施加了力

的作用.这些碰撞是气体中压强的来源.随着分子数量的增加,碰撞次数增加,压强也随之增加.类似地,如果分子的平均速度较高,则气体压强也较高.

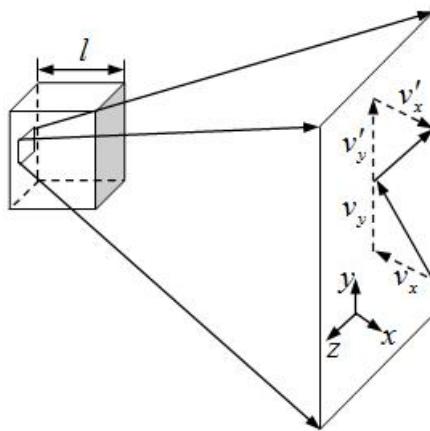


当分子与容器壁碰撞时,其垂直于壁的动量分量将反转.一个力将作用在壁上,产生压强.

在容器中的气体中,分子运动的随机性导致在给定时间内分子与壁的任何部分的碰撞次数发生波动比如某个 10 秒内碰撞次数是 100 次,另一个 10 秒内碰撞次数可能是 90 次.但是,由于大量分子在短时间内与壁碰撞,因此我们在一个时间段内在某个面上测量到的碰撞次数比平均水平波动小,通常是无法观察到的.

计算分子在容器壁上施加的力的平均值让我们得到理想气体的定律,并得出温度与分子动能之间的联系.(实际上,我们将取两个平均值:一个是随着时间的推移以获得给定速度下一个分子所施加的平均力,另一个是获得具有不同速度的分子所施加的平均力.)这种方法由丹尼尔·伯努利 (Daniel Bernoulli) (1700–1782) 给出.

下图显示了一个装满气体的容器,和放大了的气体分子与容器壁的弹性碰撞(分解成多个分量)图.我们假设与气体中的其余部分分子相比,一个分子较小,可以忽略与其他分子的相互作用.在这些条件下,理想气体定律在实验上是有效的.因为我们还假设壁是刚性的,并且粒子是点,所以碰撞是弹性的(根据能量守恒,粒子的动能没有转化为其他能量).因此,分子的动能保持恒定,因此其速度和动量大小也保持恒定.这个假设并不总是正确的,但是这一节其余部分的结果也可以在使分子与壁交换能量和动量的情况下获得.



容器中的气体在其壁上施加向外的压力.与刚性壁碰撞的分子在 x 方向上的速度和动量反转了.该方向垂直于容器壁.它在 y 和 z 方向上的速度和动量分量不变,这意味着没有力平行于这两个方向的容器壁.

如果分子在 x 方向上的速度发生了反转,它的动量将从 $-mv_x$ 变到 mv_x , 动量的改变量

为 $\Delta mv = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$. 根据冲量定理, 第 i 个气体分子受到的力

$$F_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta t} = \frac{2mv_{ix}}{\Delta t}$$

只有当气体分子与容器壁碰撞时, 容器壁与气体分子之间才有相互作用力, 在极短的碰撞时间内, 相互作用力很大, 但是这个力不是我们要寻找的力, 我们寻找的是平均作用力, 因此我们使用一个时间间隔 Δt , 即我们期望找到一个碰撞所需的时间, 作为碰撞的平均时间. 令 l 为容器沿 x 方向的长度, 那么 Δt 就是气体分子通过容器并返回所需的时间, 走过的路程为 $2l$, 速度大小为 v_x , 则

$$F_i = \frac{2mv_{ix}}{\Delta t} = \frac{2mv_{ix}}{2l/v_{ix}} = \frac{mv_{ix}^2}{l}$$

这是一个气体分子对容器壁施加的力, 容器内所有气体分子对容器壁施加的力

$$F = \sum_{i=1}^N F_i = \frac{m}{l} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2$$

采用平均值的定义,

$$F = N \frac{m}{l} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2 \right) = N \frac{m \bar{v}_{ix}^2}{l}$$

总的平均速度

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$$

我们已经假设各向同性, 因此 3 个方向的平均值是相等的,

$$\bar{v}^2 = 3\bar{v}_{ix}^2$$

$$F = N \frac{m \bar{v}^2}{3l}$$

对容器壁的压强

$$p = \frac{F}{A} = N \frac{m \bar{v}^2}{3lA} = \frac{Nm \bar{v}^2}{3V}$$

$$pV = \frac{1}{3} Nm \bar{v}^2$$

代入 $pV = Nk_B T$ 得

$$\frac{1}{3} Nm \bar{v}^2 = Nk_B T$$

每个气体分子的平均动能

$$\bar{K} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k_B T$$

这就是每个气体分子的平均动能. 注意这个方程与气体分子的质量、气体的压强等都没

有关系，只与绝对温度有关。如果具有非常不同的分子质量的氦气和氩气处于相同的温度，则这些分子具有相同的平均动能。

热力学系统的内能是所有分子或原子的机械能之和，对于单原子理想气体，根据前面的假设，这些气体分子的能量都是平移运动的动能，因此内能为 $E_{\text{int}} = N\bar{K}$ ，

$$E_{\text{int}} = \frac{3}{2} N k_B T$$

通常也使用摩尔量

$$E_{\text{int}} = \frac{3}{2} n R T$$

根据 $\bar{K} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k_B T$ ，一个气体分子的均方根速度

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$

根据麦克斯韦-玻尔兹曼理想气体速度分布函数可知，均方根速度不是平均速度或最可能的气体分子速度，但是它提供了一个简单地估计分子速度的方法，使用摩尔质量，有

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$\text{备注: } pV = \frac{N}{N_A} N_A k_B T, \quad pV = nRT$$

我们使用的是原子而不是将其看做质点，这就存在一个问题，假如原子旋转，就具有旋转动能，则是否会改变我们的推导结果？这需要用到量子力学，在量子力学中，旋转动能只具有离散值，且最小值与转动惯量成反比，原子半径通常小于 10^{-14} m ，因此，对于任何可达到的温度，原子的最小旋转能量远大于 $\frac{1}{2} k_B T$ ，可用的能量不足以使原子旋转。

20°C时，氮气分子的均方根速度计算如下： $T = (20.0 + 273) K = 293 K$

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{2(14.0067 \times 10^{-2} \text{ kg/mol})}{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 4.65 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

$$\bar{K} = \frac{3}{2} k_B T = \frac{3}{2} (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K}) = 6.07 \times 10^{-21} \text{ J}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K})}{4.65 \times 10^{-26} \text{ kg}}} = 511 \text{ m/s}$$

如果气体占据了所有可以被它占用的体积，其产生的压强称为该气体的分压。如果两种或多种气体混合，由于分子之间的碰撞，它们将达到热平衡。从上面的动力学理论可知，当气体具有相同的温度时，它们的分子具有相同的平均动能。因此，每种气体分别遵守理想气体的定律，并在容器壁上施加与单独使用时相同的压强。因此，在气体混合物中，假设气体是理想气体且各组成部分之间没有化学反应，总压强是组成气体的分压的总和。在英国科学家约翰·道尔顿（John Dalton, 1766 – 1844）提出该定律之后，该定律被称为道尔顿的分压

定律.

在处于热平衡状态的混合理想气体中，每一种气体分子的数量与各自的分压成正比.这一结论是通过应用下面的理想气体定律的形式得到的

$$\frac{p}{n} = \frac{RT}{V}$$

一个人肺部氧气的分压对生命和健康十分重要，呼吸的气体中如果氧气的分压低于 0.16 个标准大气压，会阻碍协调和判断，特别是在不适应高海拔的人群中.较低的氧气分压会产生更严重的影响.低于 0.06 个标准大气压的局部压力可能会很快致命，即使将人员救出也可能造成永久性伤害.但是，就像屏住呼吸一样，需要呼吸的感觉更多是由血液中高浓度的二氧化碳引起的，而不是由低浓度的氧气引起的.因此，如果在一个小房间或壁橱中充满了低氧气浓度的空气，则可能是因为其中存储了一些压缩气体的泄漏气瓶，使人不会感到“窒息”的感觉，并且可能会抽搐或失去知觉而没有注意到任何异常.

现在来考虑气体分子间的碰撞，首先计算平均自由程 λ ，即与其他分子碰撞前一个分子的平均移动距离，以及平均自由时间 τ ，即碰撞间隔的平均时间.如果假设所有分子都是半径为 r 的球体，则一个分子与另一个分子的中心距离小于 $2r$ 时将发生碰撞，且对于一个气体分子，发生碰撞的横截面积为 $4\pi r^2$ ，随着分子的运动，其轨迹为一条横截面积为 $4\pi r^2$ 的圆柱体，因此平均自由程 λ 就是指在这个长度为 λ ，横截面积为 $4\pi r^2$ 的圆柱中，其他分子的预期数量为 1.如果我们暂时忽略其他分子，则预期的分子数量是分子密度 N/V 乘以圆柱的体积，即

$$(N/V)4\pi r^2 \lambda = 1$$

$$\lambda = \frac{V}{4\pi r^2 N}$$

考虑所有分子的运动会使计算困难得多，但是唯一的变化是一个参数 $\sqrt{2}$ ，

$$\lambda = \frac{V}{4\sqrt{2}\pi r^2 N}$$

带入理想气体方程 $V/N = k_B T/p$ ，

$$\lambda = \frac{k_B T}{4\sqrt{2}\pi r^2 p}$$

平均自由时间 τ 只需要除以均方根速度，

$$\tau = \frac{k_B T}{4\sqrt{2}\pi r^2 p v_{rms}}$$

氩原子 (39.9 g/mol) 在 0°C 和 1 个标准大气压下 (1.70×10^{-10} m)

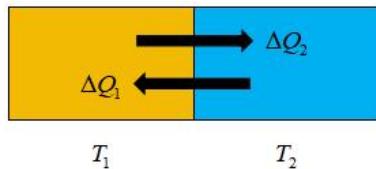
$$\lambda = \frac{k_B T}{4\sqrt{2}\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 273}{4\sqrt{2}\pi (1.70 \times 10^{-10})^2 \times (1.0 \times 10^5)} = 7.34 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{k_B T}{4\sqrt{2}\pi r^2 p v_{rms}} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 273}{4\sqrt{2}\pi (1.70 \times 10^{-10})^2 \times (1.0 \times 10^5) \times 413} = 1.76 \times 10^{-10} \text{ s}$$

可见气体分子碰撞频率非常高.

热力学熵的定义

19世纪初，科学家和工程师试图利用最近研究的气体体积、温度和压力相互关联的理论来了解蒸汽机和热机的特性.最终，这些工程师发现，热量总是从较高的温度流向较低的温度，如果没有外部功的输入，反过来是不可能的.



上图是发生热交换且与外界隔离开的系统， T_1 和 T_2 是左右系统的温度， ΔQ_1 和 ΔQ_2 是加到左右系统的热量，19世纪的科学家观察到，当 $T_1 > T_2$ 时， $\Delta Q_1 < 0$ 和 $\Delta Q_2 > 0$ ，当 $T_1 < T_2$ 时， $\Delta Q_1 > 0$ 和 $\Delta Q_2 < 0$.1865年，鲁道夫·克劳修斯（Rudolf Clausius）试图模拟这些系统中发生的事情，引入了一个新的物理量和一个新定律来解释从一个温度到下一个温度传递或者说转移的东西到底是什么.他首先指出，任何热量 ΔQ 传递到系统或从系统传递出去（用 ΔQ 的正负号定义传递的方向）都与熵的增加有关

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

其中 T 是发生这种转移时的温度.之后，他提出了热力学第二定律：

孤立系统（即不与周围环境交换物质或能量的系统）的熵要么增加，要么保持不变.这样一个孤立系统的熵永远不减少.

热量从高温流向低温的原因解释如下.考虑上图和熵的公式 $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ 所示的热变化，图中系统的总熵变化量为

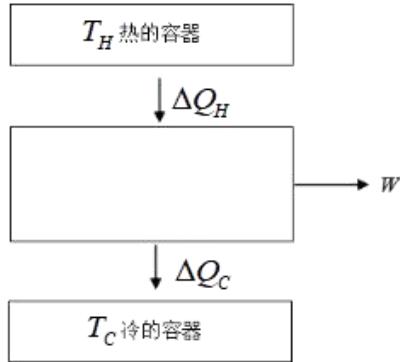
$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2}$$

对于一个孤立的系统，没有热量进入或离开系统.也就是说，系统的总热量变化为零：

$\Delta Q_1 + \Delta Q_2 = 0$.因此，对于某些 ΔQ ，我们可以定义 $\Delta Q_1 = \Delta Q$ 和 $\Delta Q_2 = -\Delta Q$ ，可以得出

$$\Delta S_{\text{tot}} = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \Delta Q$$

克劳修斯研究了卡诺热机操作循环过程，热机是工作在两个不同储热器之间的理想机器，它从温度为 t_1 的储热器获取热量做功，再将余热排到温度为 t_2 的较低温储热器，如下图所示.



卡诺热机的效率

$$\eta = \frac{W}{\Delta Q_H} = \frac{\Delta Q_H - \Delta Q_C}{\Delta Q_H} = 1 - \frac{\Delta Q_C}{\Delta Q_H}$$

对于理想热机的卡诺循环，效率也可根据温度变化写为

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

从而

$$1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{\Delta Q_C}{\Delta Q_H}$$

$$\frac{\Delta Q_H}{T_H} = \frac{\Delta Q_C}{T_C}$$

$$1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H},$$

$$\frac{Q_C}{T_C} = \frac{Q_H}{T_H}, \text{ or } \frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_H}{T_H} = 0$$

注意，上图是从温度为 T_H 的储热器流出温度为 T_H 、热量为 ΔQ_H 的热量，流出这部分热之后，原来的储热器温度依然是 T_H ，只是热量减少了。同理，温度为 T_C 的低温储热器里，流入温度为 T_C 的热量 ΔQ_C ，总热量增加，但是温度不变。

理想的卡诺循环是可逆循环，

$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{-\Delta Q_H}{T_H} + \frac{\Delta Q_C}{T_C} = -\frac{\Delta Q_H}{T_H} + \frac{\Delta Q_C}{T_C} = 0$$

公式中的 ΔQ_H 的符号为负，因为热的容器是高温，是热量流失。

可见可逆循环在热传递过程中熵不变。

理想的卡诺循环是可逆循环，但是对于现实中的不可逆循环，克劳修斯给出了一个例子，

如果 10 J 的热量从 350 K (K 是热力学温度的单位) 的物体流到 300 K 的较冷物体, 注意, 此情况不是热机, 只是自然界中温度从高温物体传递到低温物体, 则有

$$\frac{10}{350} < \frac{10}{300}, \frac{\Delta Q}{T_H} < \frac{\Delta Q}{T_C}$$

(注意上述过程只有绝对温度才成立)

从而随着热量从高温物体传递到低温物体, 系统的总熵

$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{-10}{350} + \frac{10}{300} = \frac{-6}{210} + \frac{7}{210} = \frac{1}{210} > 0$$

合并可逆和不可逆循环, 我们有

$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 \geq 0$$

这就是热力学第二定律.

对于温度不一定恒定的任意可逆转变, 系统的熵变化是通过修改来定义的 $\Delta S = \Delta Q/T$, 想象一下, 一个系统以小而离散的步骤从状态 A 转换到状态 B. 与这两个状态相关的温度分别为 T_A 和 T_B . 在转变的每个步骤中, 系统在一定温度 T_i 下可逆地交换热量 ΔQ_i . 这可以通过实验将系统与大量不同温度的储热器热接触来实现. 每一步的熵变化为 $\Delta S_i = \Delta Q_i/T_i$. 系统熵的净变化为

$$\Delta S = S_B - S_A = \sum_i \Delta S_i = \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i}$$

求 $\Delta S_i \rightarrow 0$ 的极限, 离散的求和变为积分,

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

玻尔兹曼常数的推导 (玻尔兹曼熵)

根据热力学第一定律: 物体内能的增加等于物体吸收的热量和对物体所做的功的总和. 系统内能的变化

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

对于微小的变化,

$$dU = dQ + dW$$

气体对外做功 $dW = -Fds = -pA ds = -pdV$, 因此

$$dU = dQ - pdV$$

根据熵的定义 $dS = dQ/T$,

$$dU = TdS - pdV$$

原体积为 V_i ，在更小的体积 V_f 中找到一个气体分子的概率与体积成正比，

$$\frac{V_f}{V_i}$$

在 V_f 中找到 N 个气体分子的概率是找到每 1 个分子的概率的乘积

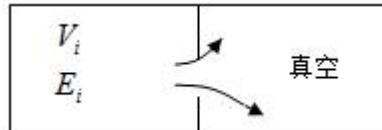
$$\left(\frac{V_f}{V_i}\right)^N$$

$$probability = p = \frac{W_f}{W_i} = \left(\frac{V_f}{V_i}\right)^N$$

W 表示微观状态数，取对数得

$$\ln \frac{W_f}{W_i} = N \ln \frac{V_f}{V_i}$$

想象一个**绝热容器**内密封的理想气体，体积为 V_i ，能量为 E_i ，现在在容器壁开一个孔，让气体自由进入外面的真空腔内，达到平衡状态后，气体均匀分布在两个腔中，如图所示。



设两个空腔的体积为 V_f ，由于在这个过程中总能量不变，末状态的体积更大，但是温度和初态相同，因此这是一个**等温膨胀**过程，由理想气体的热力学第一定律

$$dU = dQ - pdV$$

可得

$$dU = dQ - pdV = 0$$

$$dQ = pdV$$

再由熵 $dS = \frac{dQ}{T}$ ，得

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{pdV}{T}$$

理想气体状态方程 $pV = nRT$ ，得

$$dS = nR \frac{dV}{V}$$

两端积分得

$$\Delta S = S_f - S_i = nR \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{N}{N_A} R \ln \frac{V_f}{V_i} = kN \ln \frac{V_f}{V_i} = k \ln \frac{W_f}{W_i} = k \ln W_f - k \ln W_i$$

则

$$S = k \ln W$$

其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K，为了纪念玻尔兹曼，我们把它称为玻尔兹曼常数。

根据玻尔兹曼熵公式，熵越大，W也就越大，即微观态数越多，也就是说，分子可以在更多的微观状态。从宏观上看，整个系统就越混乱越无序。由此，我们可以看出熵的微观意义：熵是分子运动或排列混乱程度的衡量尺度，或者说，熵是系统内分子热运动无序性的量度。

玻尔兹曼熵公式直接沟通了热力学系统的宏观与微观之间的关联，并对热力学第二定律进行了微观解释。原来，热力学第二定律仅仅表明，如果没有外界的干涉，一个孤立的系统总是会越来越混乱。正像懒人的房间，如果没有人替他收拾打扫，只会越来越杂乱下去，决不会自然变得整齐起来。

积分形式的麦克斯韦方程组

虽然涉及二元函数微积分，但是本质上是高中电磁学内容
高斯定理（电通量 Electric flux）

大约在 1837 年，英国皇家学会的法拉第对静电场以及静电场与各种绝缘物质的相互作用非常感兴趣，于是设计了如下的实验：



法拉第设计了如图所示的一大一小 2 个同轴球体，外面一个可以分成两个半球。将外层球体分开，给内部小球带上正电荷 Q ，然后用大约 2 cm 厚的“理想”绝缘物质填充在两球之间的空隙中，用外层球体盖住。接下来，外层球体迅速接地使其不带电（放电），再小心地将外层大球分为 2 个半球，然后再测量两个半球上感应出的负电荷。

法拉第发现，外层球体感应出的电荷量等于内部小球体的电荷量 Q ，且与中间的绝缘物质的种类无关。他总结认为，有某种量（displacement）从内部球体流到外部球体上了，量的大小与绝缘层的种类无关。

今天，这种虽然被绝缘物质隔离但是依然从内部球体流到外部球体上的量被称为电通量 (displacement flux 或 electric flux)。

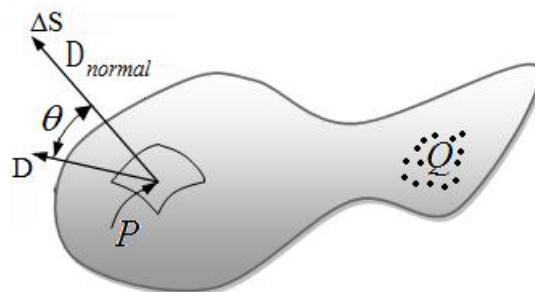
电通量用 Φ 表示，则

$$\Phi = Q$$

法拉第的实验可以概括为高斯定理：

通过任何闭曲面的电通量等于闭曲面内的电荷量。

假如包围电荷 Q 的曲面是任意形状的，定义 D 为电通量密度，即通过单位面积上垂直于曲面向外的电通量。不垂直于曲面的电通量可以分解为垂直和平行于曲面的两个分量，平行的分量当然不能说是“流出”曲面了，所以这里只需要垂直于曲面向外的电通量。



$$\Phi_M = \int d\Phi = \iint_S D \cdot dS$$

积分符号 \int 的本意是求和，是“求和，总和”的英文单词 sum 的第一个字母 s 拉长得到的，

$d\Phi$ 是指电通量的微小变化量，所以 $\int d\Phi$ 的意思是指将曲面划分为很多微小的小曲面，小曲面上的微小的电通量加起来，逐个累积起来，累积起这些微小的电通量 $d\Phi$ ，就叫对 $d\Phi$ 积分。

由于积分是在二维的曲面 S 上，涉及两个自变量 x, y ，因此用两个积分符号，记为

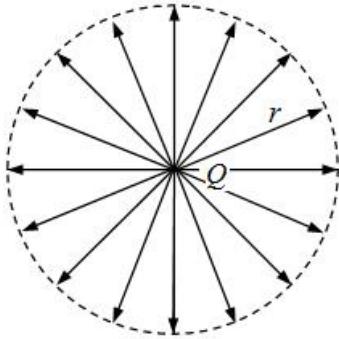
$\Phi_M = \iint_S D \cdot dS$ ，其中点积 $D \cdot dS$ 表示电通量密度沿曲面的垂直分量，这是因为

$D \cdot dS = DdS \cos\theta$ ， θ 是 D 和微小曲面 dS 的法向向量的夹角。

根据高斯定理，有

$$\Phi_M = \iint_S D \cdot dS = Q$$

对自由空间 (free space) 中的一个点电荷 Q ，



电通量密度 $D = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2}$ ，电场强度 $E = \frac{kQ}{r^2}$ ，从而 $D = \frac{1}{4\pi k} E$ ，令

$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$, $k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0}$ ，则 $D = \epsilon_0 E$ 。

高斯定理又可以写为

$$\Phi_M = \iint_S D \cdot dS = Q$$

$$\Phi_E = \iint_S E \cdot dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

由

$$\Phi_M = \iint_S D \cdot dS = Q$$

即 $\Phi = DS = Q$ ，得

$$\epsilon_0 = \frac{D}{E} = \frac{Q}{ES}$$

在学习平行板电容器时，电容

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{Q}{U}, \epsilon = \frac{Qd}{AU} = \frac{Qd}{AEd} = \frac{Q}{AE}$$

A 是平行板电容器正对极板的面积，用 S 代替 A ，有 $\varepsilon = \frac{Q}{ES}$ ，可见我们在上面定义的 ε_0 与

介电常数的单位相同，实际上两者就是同一个量，对于真空，称其为真空介电常数，即 ε_0 。

我们还可以通过电场线密度的概念来推导

电荷量为 $+q$ 的点电荷周围的电场如图所示，虚线表示以 $+q$ 为圆心，半径为 r 的球面。

球面上任意一点的电场强度大小 $E = \frac{kq}{r^2}$ ，我们知道，电场强度的大小还可以用电场线的疏密程度表示，即电场强度与穿过该点的，垂直于电场方向单位面积的电场线条数成正比，

$\frac{\Delta N}{\Delta A} \propto E$ 。定义 $\frac{\Delta N}{\Delta A} = \varepsilon_0 E$ ， $\Delta N = \varepsilon_0 E \Delta A$ ，把球面上所有面积上的电场线相加，有

$$N = \varepsilon_0 EA$$

对上面的球体，

$$N = \varepsilon_0 EA = \varepsilon_0 \frac{kq}{r^2} \times 4\pi r^2 = 4\pi k \varepsilon_0 q$$

令 $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ ，则有 $N = q$ ，从而穿过球面的电场线总数量等于封闭在球内的电荷量。这就

是高斯定理：

垂直穿出或穿入任何闭曲面的净电场线条数在数量上等于曲面内的净电荷量。

$$N = \sum \varepsilon_0 EA = \sum q$$

或

穿过封闭曲面的电通量与封闭曲面所包围的电荷量成正比：

$$\Phi = \iint_{\partial V} E \cdot dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum q$$

从上述可见，电通量有 2 种：

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \iint_A E \cdot dA = \frac{\sum q}{\varepsilon_0} \\ \Phi_D &= \iint_A D \cdot dA = \sum q = Q\end{aligned}$$

这正是高斯定理不同表述的来源。

位移电流和安培定律

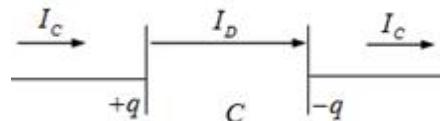
对平行板电容器，有 $C = \frac{q}{U} = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$ ，设板间电场强度为 E ，距离为 d ，一电荷量为 Q 的带电粒子在两板间沿电场方向运动，有

$$W = Fd = EQd = QU,$$

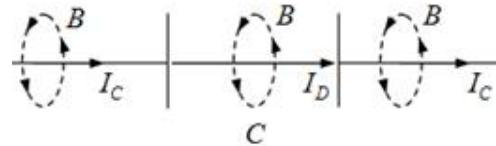
$$E = \frac{U}{d} = \frac{q}{\varepsilon_0 A}$$

两端对 q 求导，得 $dE = \frac{dq}{\epsilon_0 A}$.

由于 $I = \frac{dq}{dt}$, $dq = Idt$, 得 $dE = \frac{Idt}{\epsilon_0 A}$, $I_D = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$. 麦克斯韦认为，电容器内电场的变化等价于通过电容器的电流，称其为位移电流 I_D . 我们将导线中普通的电流称为传导电流 I_C ，如图所示，传导电流 I_C 进入电容，位移电流通过电容，传导电流离开电容.

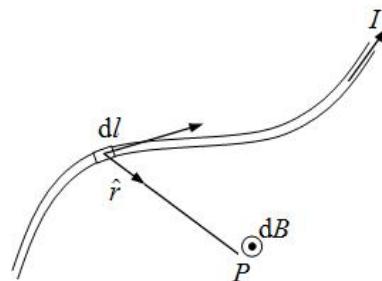


正如通电直导线周围存在磁场一样，由于位移电流的存在，电容器周围也存在磁场，如图所示：



毕奥-萨伐尔定律 (Biot-Savart Law)

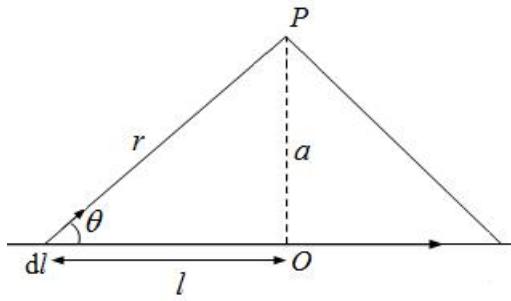
我们知道，通电导线周围存在磁场，类似于库仑定律，毕奥-萨伐尔定律指出，点电流（或电流元）周围产生的磁场的磁感应强度大小与距离的平方成反比. 不过困难在于，库仑定律中的元电荷容易实现，但是元电流却比较困难. 毕奥-萨伐尔定律是处理、研究电流元的，即通电导线上的电流元 Idl . 电流元就像是一个元磁体，但是，电流元不会像点电荷一样以一个点的形式存在.



根据库仑定律，有 $E = k \frac{q}{r^2}$ ，用 Idl 代替 q (I 是恒定的)，用 dB 代替 E ，我们得到最基本的毕奥-萨伐尔定律

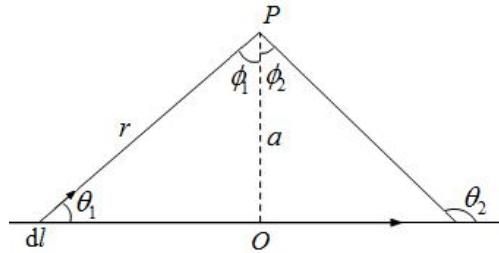
$$dB = k \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2}$$

其中 \hat{r} 是电流元 Idl 指向考察点的单位向量.



根据毕奥-萨伐尔定律，我们来计算通电直导线周围一点 P 的磁场强度大小：

$$r = \frac{a}{\sin \theta}, l = a \cot \theta, dl = -\frac{a}{\sin^2 \theta} d\theta$$



$$\begin{aligned} dB &= k \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} = kI \frac{|dl| \sin \theta}{r^2} \hat{k} \\ &= kI \frac{\sin \theta}{a} d\theta \hat{k} \\ B &= kIk \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin \theta}{a} d\theta \\ &= \frac{kIk}{a} [-\cos \theta]_{\theta_1}^{\theta_2} \\ &= \frac{kIk}{a} (-\cos \theta_2 + \cos \theta_1) \end{aligned}$$

$$\text{当导线无限长时, } \theta_1 = 0, \theta_2 = \pi, B = \frac{2kI}{a} \hat{k}.$$

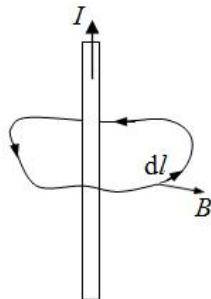
在静电力学中，电场强度和场源（电荷）的关系有高斯定律

$$\Phi = \iint_{\partial V} E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

也就是说，

电场	磁场
库仑定律 $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q\hat{r}}{r^2}$	毕奥-萨伐尔定律 $\vec{B} = k \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2}$
高斯定律 $\oint_A E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0}$	对于磁场 B 应该还有对应的什么定律

安培环路定理

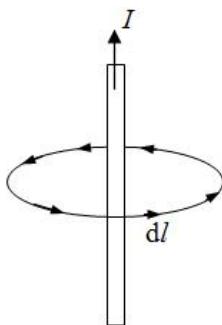


在稳恒磁场中，磁感应强度 B 沿任何闭合路径的线积分，等于这闭合路径所包围的各个电流的代数和乘以磁导率.

$$\oint B \cdot dl = u_0 I$$

在真空中， u_0 为真空磁导率.

电场	磁场
库仑定律 $\vec{E} = k \frac{q\hat{r}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q\hat{r}}{r^2}$	毕奥-萨伐尔定律 $\vec{B} = k \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2}$
高斯定律 $\oint_A E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0}$	安培环路定理 $\oint B \cdot dl = u_0 I$



对于通电直导线周围的电场，利用安培环路定理，有

$$\oint B \cdot dl = u_0 I$$

$$B \oint dl = u_0 I$$

$$B(2\pi a) = u_0 I$$

$$B = \frac{u_0 I}{2\pi a}$$

与用毕奥-萨伐尔定律得出的电场强度 $B = \frac{2k' I}{a} \hat{k}$ 相比，有 $k' = \frac{u_0}{4\pi}$ ，从而毕奥-萨伐尔定律写为 $\vec{B} = \frac{u_0}{4\pi} \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2}$ 。

麦克斯韦重新注释了安培环路定理，对于电容器周围产生电场与电流的关系：总电流是传导电流和位移电流之和。

$$\oint B \cdot dl = u_0 (I_c + I_D)$$

再由位移电流与电场强度的关系

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 A}, dE = \frac{Idt}{\epsilon_0 A}, I_D = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

就有

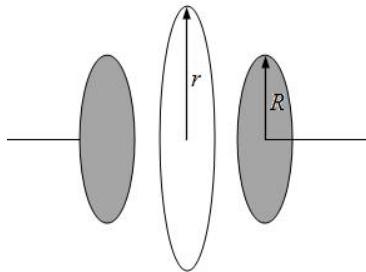
$$\oint B \cdot dl = u_0 I_c + u_0 \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

上式说明，磁场可以由传导电流或随时间变化的电场产生。

由高斯定理 $\Phi_E = EA$ ，得 $\frac{d\Phi_E}{dt} = A \frac{dE}{dt}$ ，于是

$$\oint B \cdot dl = u_0 I_c + u_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

利用安培环路定律，我们来计算由于两板之间电场的变化而产生的存在于平行板电容器周围的磁场，



如图所示，平行板是半径为 R 的圆形，我们要计算距离电容器中心为 r 处的磁场强度 B 。电容内部没有传导电流 ($I_C = 0$)，因此

$$\oint B \cdot dl = u_0 \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

因为沿着电流为 I 的长直导线周围的磁场是圆形的，从对称性的角度来看，位移电流产生的磁场也是圆形的，我们也可以通过在电容周围放小磁针的实验方法验证磁场是圆形的。因此位移电流产生的磁场 B 与 dl 平行，则

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \oint B dl \cos 0^\circ = B \oint dl = B(2\pi r)$$

$$B(2\pi r) = u_0 \epsilon_0 A \frac{dE}{dt} = u_0 \epsilon_0 \pi R^2 \frac{dE}{dt}$$

$$B = \frac{u_0 \epsilon_0 R^2}{2r} \frac{dE}{dt}$$

如果电容器内变化的电场可以产生磁场，那么其它变化的电场是否也能产生磁场呢？答案是肯定的。因此大自然有一个对称性，即变化的磁场能产生电场（法拉第定律），变化的电场也能产生磁场。

对于安培环路定律

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = u_0 I_c + u_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

由于传导电流是带电粒子的流动，我们定义 J 为导体中垂直于电流方向的单位横截面积上的电流大小，即电流密度，有 $I = \int J \cdot dA$ ，上式变为

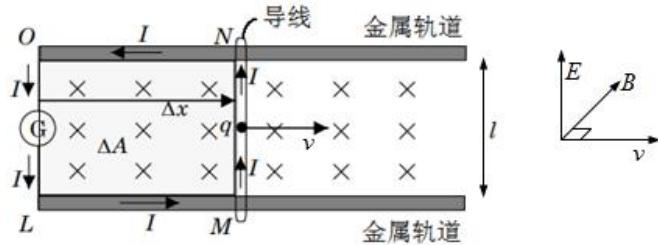
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = u_0 \int J \cdot dA + u_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

联系电通量 $\Phi_E = \int E \cdot dA$ ，有

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = u_0 \int J \cdot dA + u_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int E \cdot dA$$

这就是安培环路定律的一般表达式。

再来看看一下法拉第定律。



由于导线向右以速度 v 运动，导线内的任何电荷 q 都将受到一个力的作用，

$$F = qv \times B$$

$$\frac{F}{q} = v \times B$$

$$E = v \times B$$

这种电场与静电场是不同的，这种电场只有当电荷以速度 v 移动时才存在。如果以电荷为参考点，那么电荷以速度 v 向右运动就是磁场以速度 v 向左运动，于是电场 $E = v \times B$ 就是运动电荷周围产生的电场。叉乘指出电场方向，电场强度的大小为

$$E = vB \sin \theta$$

此处 $\theta = 90^\circ$ ， $E = vB$ 。

对于匀强电场，电场力做的功 $W = Fd = qEd = qU$ ，从而有 $E = \frac{U}{d}$ ，对于我们研究的导线，

感应产生的电场强度可以认为是匀强电场，我们用 ε 来表示导线两端 MN 之间的感应电动势，有

$$E = \frac{\varepsilon}{l}$$

$$\frac{\varepsilon}{l} = vB$$

$$\varepsilon = vBl$$

如果电路中的电阻为 R ， $I = \frac{\varepsilon}{R}$.

设导线向右运动的速度 $v = \frac{dx}{dt}$ ，则

$$\varepsilon = \frac{dx}{dt} Bl = \frac{Bl dx}{dt} = B \frac{dA}{dt}$$

我们假设电场是匀强电场得到上式，从 $v = \frac{dx}{dt}$ 是常量也验证了假设是正确的.

考虑到磁通量 $\Phi_M = B \cdot A$ ，对于匀强磁场，磁通量的变化只可能是面积的变化，因此

$d\Phi_M = B \cdot dA$ ， $\frac{d\Phi_M}{dt} = B \cdot \frac{dA}{dt}$. 在上图中， B 与 dA 的方向夹角为 180° ，因此

$$\frac{d\Phi_M}{dt} = B \frac{dA}{dt} \cos 180^\circ = -B \frac{dA}{dt}$$

$$B \frac{dA}{dt} = -\frac{d\Phi_M}{dt}$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_M}{dt}$$

上式就是法拉第电磁感应定律，即任何时候磁通量随时间的变化，将产生一个感应电动势.

磁通量的变化也可以由磁场的变化而来，即 $d\Phi_M = dB \cdot A$ ，一般情况下，磁通量的变化是由磁场变化和面积变化产生的，

$$d\Phi_M = B \cdot dA + A \cdot dB$$

因而

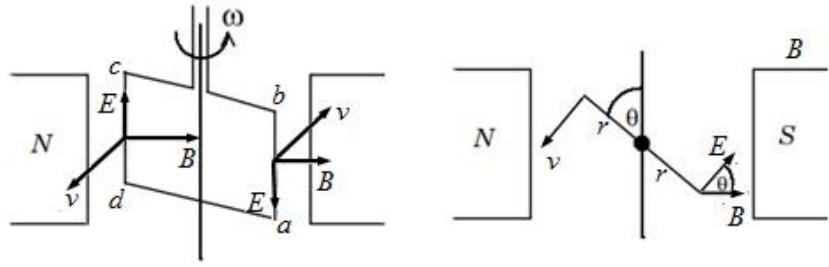
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_M}{dt} = -B \cdot \frac{dA}{dt} - A \cdot \frac{dB}{dt}$$

这个形式的法拉第定律说明感应电动势要么由面积随时间的变化而磁场不变产生，要么由磁场随时间变化而面积不变产生. 由于是点积，因此磁场和电场都不变而只改变两者的夹角也可以改变磁通量从而产生感应电动势.

楞次定律

$\varepsilon = -\frac{d\Phi_M}{dt}$ 中的负号意味着感应电动势的方向始终与该感应电动势引起的电流方向相反.

交流发电机



如图所示，线圈转动角速度为 ω ， ab 边的线速度为 v ， ab 边上产生的感应电场

$$E = v \times B$$

方向如图所示，大小

$$E = vB \sin \theta$$

θ 是速度 v 与磁感应强度 B 之间的夹角，也是线圈的转角， ab 边上产生的感应电场也表示为

$$E = \frac{\varepsilon}{l}$$

l 是 ab 的长度，则

$$\varepsilon_{ab} = vBl \sin \theta$$

同理可得

$$\varepsilon_{cd} = vBl \sin \theta, \varepsilon_{bc} = \varepsilon_{da} = 0$$

线圈中总的感应电动势

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_{ab} + \varepsilon_{cd} \\ \varepsilon &= vBl \sin \theta + vBl \sin \theta \\ \varepsilon &= 2vBl \sin \theta\end{aligned}$$

$$v = \omega r, 2r = bc, A = 2rl, \theta = \omega t,$$

$$\varepsilon = 2vBl \sin \theta = 2\omega rBl \sin \theta$$

$$\varepsilon = \omega AB \sin \omega t$$

如果线圈连入电阻为 R 的电路，从线圈流到电路中的电流

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = 2vBl \sin \theta = 2\omega rBl \sin \theta$$

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_{\max}}{R} \sin \omega t = i_{\max} \sin \omega t$$

交流发电机的结论也可以根据法拉第定律，以纯数学的方式得到，感应电动势

$$\begin{aligned}\varepsilon &= -\frac{d\Phi_M}{dt} \\ \varepsilon &= -\frac{d(BA \cos \theta)}{dt} \\ \varepsilon &= -BA \frac{d(\cos \theta)}{dt} = BA \sin \theta \frac{d\theta}{dt}\end{aligned}$$

考虑到 $\frac{d\theta}{dt} = \omega$, 有

$$\varepsilon = BA\omega \sin \theta$$

现实中我们希望获得非常大的感应电动势，这可以通过增加线圈匝数的方法获得，如果线圈有 2 匝，感应电动势和感应电流会加倍，如果有 10 匝，就会增加 10 倍，对于有 N 匝的线圈，有

$$\varepsilon = NBA\omega \sin \theta$$

电势差

和重力做功与重力势能的变化类比，在匀强电场中将电荷从 A 点移动到 B 点的过程中，电场力所做的功等于 A 点的电势能减去 B 点的电势能， $W_{AB} = E_{PA} - E_{PB} = qEy$ ，A, B 两

$$\text{点间的电势差 } U_A - U_B = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{E_{PA} - E_{PB}}{q}.$$

如果不是匀强电场，电荷在电场中不同点受到的力的大小就不同。假如我们有 2 个点电荷，我们希望将第 2 个电荷移向第 1 个电荷，这个过程做功多少？第 2 个电荷受到来自第一个电荷的库仑力为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

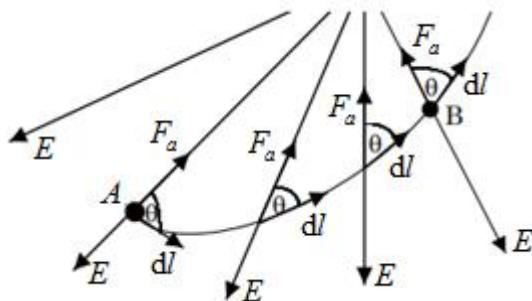
这个力是随着距离的变化而变化的，每一个 r 都对应着一个不同的功，我们的办法是将移动的路径细分为一系列小部分 dl ，假设每一小部分上的力 F 为常量，每一小部分做功

$$dW = F dl$$

总功为

$$W = \int dW = \int F dl$$

上面的功的计算是假设力的方向与位移方向同向，通常情况下方向是不同的，如图所示，电场强度的大小和方向在路径上的不同点不同。



位于 A 点，电荷量为 q 的点电荷正在外力 F_a 的作用下从 A 点移动到 B 点，我们需要计算这

个过程中需要做的功.

由于电场强度的大小和方向不恒定, 用外力 F_a 将电荷 q 从 A 点移到 B 点的过程中, F_a 是变力, 在 A 点附近的路径上的一小段 dl 距离上, 假设 F_a 不变, 则功

$$dW = F_a \cdot dl$$

在下一个小小段上所做的功也是 $dW = F_a \cdot dl$, 不过力的大小会随着力 F_a 与 dl 之间的角度 θ 的变化而变化, 总功

$$W = \int dW = \int F_a \cdot dl$$

路径上不同点处电势变化为

$$dU = \frac{dW}{q}$$

A, B 之间的电势变化量

$$\int_{U_A}^{U_B} dU = \int \frac{dW}{q} = \int \frac{F_a \cdot dl}{q}$$

但是外力 F_a 与电场力大小相等, 方向相反, $F_a = -F_E$, 所以

$$\begin{aligned} \int_{U_A}^{U_B} dU &= U_B - U_A = - \int \frac{F_E \cdot dl}{q} \\ U_B - U_A &= - \int \frac{qE \cdot dl}{q} = - \int E \cdot dl \\ U_B - U_A &= - \oint E \cdot dl \end{aligned}$$

如果我们从 A 点开始, 此处的电势为 U_A , 移动到 B 点, 该处的电势为 U_B , 电势差

$U_A - U_B = \int E \cdot dl$, 但是, 如果我们到达 B 点后又返回 A 点, 电势差又会是多少?

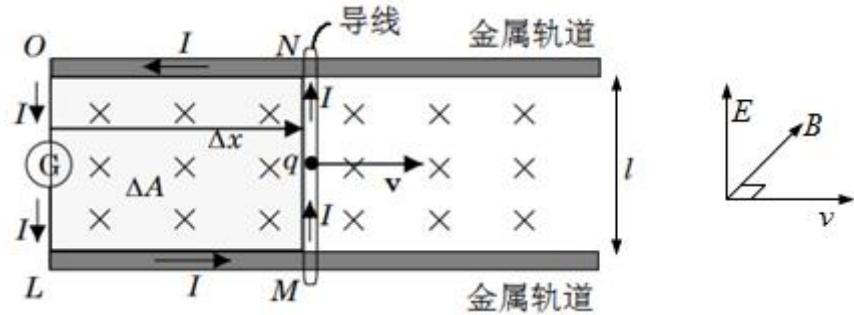
$$\begin{aligned} U_B - U_A &= - \int E \cdot dl \\ U_A - U_B &= \int E \cdot dl \end{aligned}$$

则 $U_A - U_A = \oint E \cdot dl$, 注意这里使用的积分号上多了一个圆圈, 以表示积分是沿着一个闭合路径. 有

$$\oint E \cdot dl = 0$$

上式是所有静电场的特征, 说明静电场是保守场, 意思是指在静电场中移动电荷所做的功与

路径无关. 但是对于感应电场却没有这种性质. 如图所示, 对于运动的电动势 (MN 在运动, 指其中的电动势) ,



我们来计算环路 NMOLM 的积分 $E \cdot dl$. 将其分为 MN 和 NOLM 两部分.

$$\oint E \cdot dl = \int_{MN} E \cdot dl + \int_{NOLM} E \cdot dl$$

没有电场沿着 NOLM 路径, 而 MN 路径中的 E 是感应电场 $E = v \times B$, 是由于导线在电场 B 中的运动而产生的,

$$\begin{aligned}\oint E \cdot dl &= \int_{MN} (v \times B) \cdot dl + 0 \\ \oint E \cdot dl &= \int_{MN} (v \times B) \cdot dl = \int_{MN} vB \sin 90^\circ dl \cos 0^\circ = vBl\end{aligned}$$

前面已经证明 $\varepsilon = vBl$, 所以

$$\varepsilon = \oint E \cdot dl$$

上式说明了闭合线圈中产生的感应电动势等于感应电场沿线圈的积分. 对于静电场, 电场强度沿闭合路径的积分为 0, 对于感应电场, 也就是运动的电场, 电场强度沿闭合路径的积分等于感应电动势, 由于感应电场是运动的, 而闭合路径不变, 我们也可以认为是在变化的电场中, 电场沿闭合路径的积分等于感应电动势.

我们已经证明法拉第定律可以写为

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_M}{dt}$$

磁通量 $\Phi_M = B \cdot A$. 此式是通过平面 A 的总的磁通量, 但是对于一般情况, 表面可以是任何形状, 我们可以将表面细分为一系列微元 dA , 通过这些面积微元的磁通量

$$d\Phi_M = B \cdot dA$$

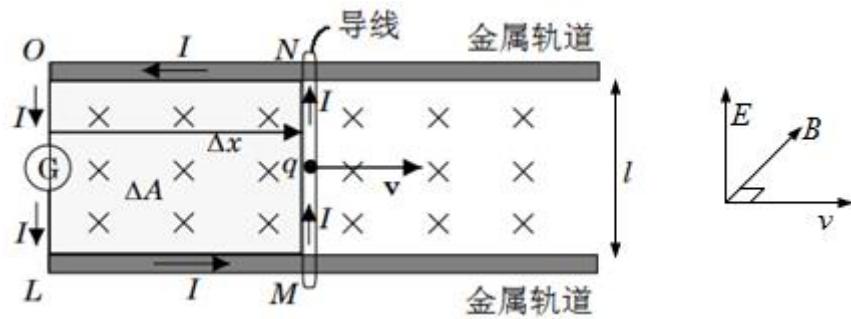
$$\Phi_M = \int d\Phi_M = \int B \cdot dA$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_M}{dt} = -\frac{d}{dt} \int B \cdot dA$$

$$\oint E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int B \cdot dA$$

上式就是法拉第定律的积分形式. 此式也是麦克斯韦方程组的第 4 个式子.

我们来看当磁感应强度随时间变化而产生感应电动势的情况. 如图所示, 固定 MN, 磁感应强度由 0 增加到 0.5 T.

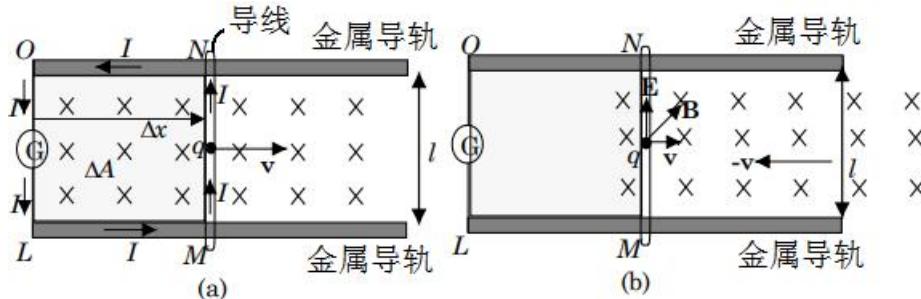


根据法拉第定律，有

$$\begin{aligned}\varepsilon &= -\frac{d\Phi_M}{dt} = -B \cdot \frac{dA}{dt} - A \cdot \frac{dB}{dt} \\ \varepsilon &= -A \cdot \frac{dB}{dt}\end{aligned}$$

$dB = B_f - B_i$, 由于 $B_i = 0$, dB 与 B_f 同向, 垂直于纸面向里, 从而 A 与 dB 的夹角为 180° ,

$$\varepsilon = -A \frac{dB}{dt} \cos 180^\circ = A \frac{dB}{dt}$$



如图所示, 导线 MN 在匀强磁场中以速度 v 向右运动, 导体中产生的感应电场大小

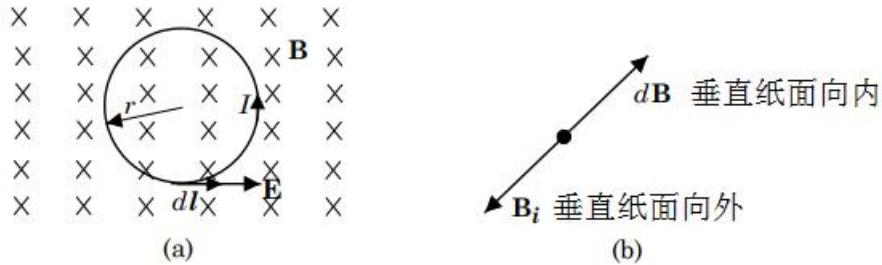
$$E = vB \sin \theta$$

由感应电场引起的感应电动势由 $E = \frac{\varepsilon}{l}$ 计算, 注意, 感应电场和感应电动势都是由于 MN 的运动产生的, 然而, 导体 MN 在匀强磁场中以速度 v 向右运动和导体静止而匀强磁场以速度 v 向左运动之间有什么不同呢? 稍加思考我们就可以明白, 两者的结果是相同的, 过程中最重要的, 是导体与匀强磁场之间发生了相对运动. 假如导体静止而匀强磁场向左运动经过导体, 则静止的导体中就会发现有感应电场, 感应电场在 M, N 之间引起感应电动势, 于是就通过电流计 G 看到了电流.

现在, 如果导线 MN 的电阻增加, 通过它的电流将减小. 如果导线的电阻增加到无穷大, 导线中将没有电流通过, 但是感应电场以及与它联系在一起的感应电动势依然存在. 如果电阻无穷大, 那么 MN 不再是导体, 而是绝缘体. 实际上, 如果 MN 用木头代替, 磁场依然由右向左运动, 木头内依然会有感应电场, 此时当然没有电流流过木头. 假如木头不用木头, 中间完全是空气间隔, 空气依然像绝缘体一样, 如果这个匀强磁场依然通过空气间隔以速度 v 相对向左运动, 那么同样会在空气间隔内产生感应电场.

根据法拉第定律

$$\oint E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int B \cdot dA$$



考虑图中所示线圈，磁场强度的方向垂直纸面向里，大小随着时间增加，从而 dB 的方向也垂直纸面向里，变化的磁场感应产生于线圈中的电流感应产生的磁场会阻碍原来磁场的变化，因此，感应磁场 B_i 的方向垂直于纸面向外，线圈中必定有感应电场 E ，方向与线圈相切，从而 E 与 dl 同向，

$$\oint E \cdot dl = \oint Edl \cos 0^\circ = \oint Edl$$

由于对称性，可知 E 在各点处的大小相等，从而

$$\oint E \cdot dl = E \oint dl$$

$$\oint E \cdot dl = E (2\pi r)$$

$$E (2\pi r) = -\frac{d}{dt} \int B \cdot dA = -\frac{dB}{dt} A \cos \theta = -\frac{dB}{dt} A \cos 180^\circ$$

$$E (2\pi r) = A \frac{dB}{dt}$$

$$E = \frac{A}{2\pi r} \frac{dB}{dt}$$

$$E = \frac{\pi r^2}{2\pi r} \frac{dB}{dt}$$

$$E = \frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

我们说，随时间变化的磁场在线圈中感应出电场 E ， r 是线圈半径，为常量。于是我们有

$$E = \frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

$$B = \frac{\mu_0 \epsilon_0 R^2}{2r} \frac{dE}{dt}$$

两式表明变化的磁场会感应出电场，变化的电场也会感应出磁场，现在，描述电磁波现象的4个麦克斯韦方程组的积分形式已经全部给出，它们是：

$$\text{电场的高斯定律 } \Phi_E = \oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\text{磁场的高斯定律 } \Phi_M = \oint B \cdot dA = 0$$

$$\text{安培定律} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = u_0 I_C + u_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\text{法拉第定律} \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_M}{dt}$$

接下来研究电磁波在空间中的传播，也就是说，空间中有电磁波的传播，而不是说空间中有

电荷 q ，从而根据电场的高斯定律有 $\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0}$ ，对于有波的空间，里面只有波动，

空间中的沿任意曲面，流入和流出的场线（电场线磁场线）相等，从而积分为 0，也就是不存在电荷，电流密度 J 也等于 0，因此，积分形式的麦克斯韦方程组在没有电荷（charge-free）的空间写为

$$1. \text{电场的高斯定律} \Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot dA = 0$$

$$2. \text{磁场的高斯定律} \Phi_M = \oint \mathbf{B} \cdot dA = 0$$

$$3. \text{安培定律} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = u_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$4. \text{法拉第定律} \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_M}{dt}$$

1, 2 两式说明，在没有电荷的空间，所有电场和磁场都是连续的，电场不开始或结束于任何电荷，安培定律告诉我们，变化的电场产生磁场，法拉第定律说明变化的磁场产生电场，随时间变化的电场产生磁场和随时间变化的磁场产生电场这个事实提示我们，在空旷的空间传播电磁波是有可能的。

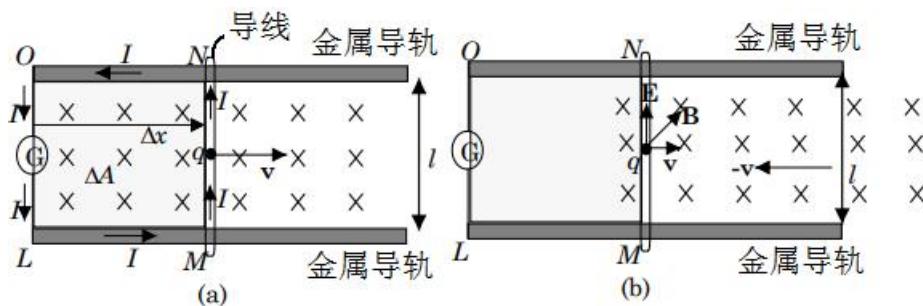
接下来我们通过麦克斯韦方程组中的方程 3 和方程 4 分析理解电磁扰动（变化的电场产生磁场，变化的磁场产生电场）如何形成电磁波并在空间传播。

我们在前面说过，导线 MN 在匀强磁场中以速度 v 向右运动，导体中产生的感应电场大小为

$$E = vB \sin \theta$$

由感应电场引起的感应电动势由 $E = \frac{\epsilon}{l}$ 计算，注意，感应电场和感应电动势都是由于 MN 的

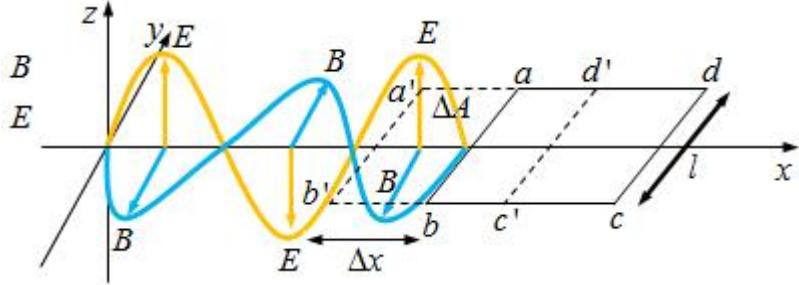
运动产生的，然而，导体 MN 在匀强磁场中以速度 v 向右运动和导体静止而匀强磁场以速度 v 向左运动之间有什么不同呢？稍加思考我们就可以明白，两者的结果是相同的，过程中最重要的，是导体与匀强磁场之间发生了相对运动。假如导体静止而匀强磁场向左运动经过导体，则静止的导体中就会发现有感应电场，感应电场在 M, N 之间引起感应电动势，于是就通过电流计 G 看到了电流。



上面有一个非常重要的思想，就是匀强磁场的运动，也就是场的运动传播。由于很容易实现变化的电场，比如 LC 电路、电偶极子。因此，我们来看电场的变化如何产生磁场。如图所示，

当竖直向上的电场从 0 增大时, 根据安培环路定律, 在其周围的空间将产生从 0 开始增大的磁场, 随着电场的大小和方向的变化, 周围相应地感应出变化的磁场, 我们在池塘中一点使水面振动, 握着绳子一端使其上下振动, 以及使空间中某一位置处的音叉振动, 就会有水波, 绳波和声波向周围传播开去, 那么电容器或电偶极子中电场的变化 (振荡, 振动) 以及因此在电容器或电偶极子周围产生的电场和磁场变化 (振荡, 振动) 会不会也以波动的形式传播出去?

假设电磁场像波一样能够传播, 我们来计算电磁波的波速.



如图所示, 考虑电磁波向右传播, 某一时刻, 波刚刚开始通过线圈 $abcd$, 虽然电磁波向右传播, 我们为了方便分析, 可以认为电磁波静止, 线圈 $abcd$ 以同样的速度 v 向左运动, dt 时间内线圈运动的距离为 dx , 移动到了 $a'b'c'd'$, 随着线圈的移动, 穿过线圈的电通量随时间发生变化, 我们假设线圈的电阻无穷大, 从而传导电流 I_C 为 0, 只有位移电流, 根据安培环路定律, 有

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = EdA \cos \theta = EdA \cos 0^\circ = EdA$$

$$dA = l dx$$

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \epsilon_0 E \frac{dA}{dt} = \mu_0 \epsilon_0 El \frac{dx}{dt} = \mu_0 \epsilon_0 El \frac{vt}{dt} = \mu_0 \epsilon_0 Elv$$

$$\oint B \cdot dl = \int_{ab} B \cdot dl + \int_{bc} B \cdot dl + \int_{cd} B \cdot dl + \int_{da} B \cdot dl = Bl$$

$$Bl = \mu_0 \epsilon_0 Elv$$

$$B = \mu_0 \epsilon_0 Ev$$

$$E = vB$$

$$B = \mu_0 \epsilon_0 v^2 B$$

$$1 = \mu_0 \epsilon_0 v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{1}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A})(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2)}} \approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

这个速度与实际测量的光速十分接近, 这个结果使麦克斯韦认为光是某种波长和频率的电磁波, 我们用 c 表示光速, 则 $E = vB$ 改为 $E = cB$,

$$c=\sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

附录

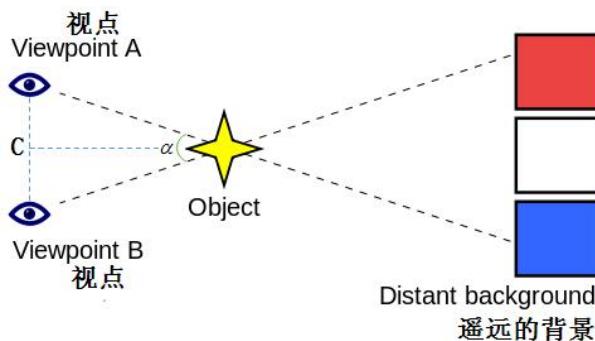
用视差法(parallax)测量地球到星体的距离

我们现在介绍的测量方法，最远可测 30 000 光年的距离.

首先理解视差(parallax)和视差角(parallax angle)的概念.

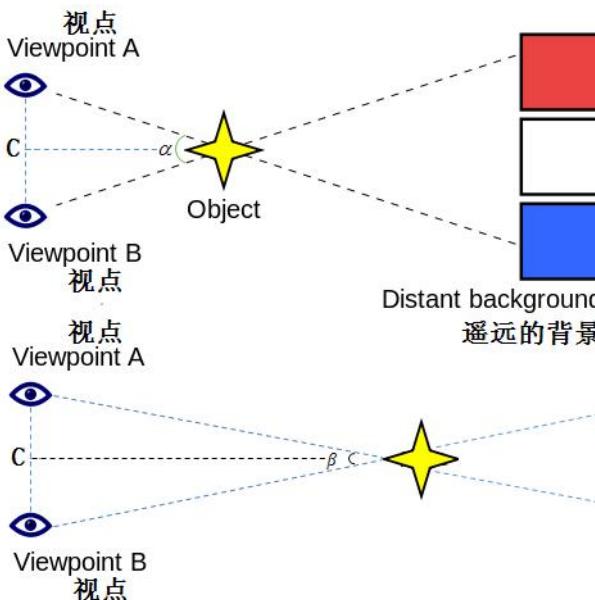
在与被观测物体不在同一直线上的不同点观测被观测物体时，被观测体看起来有明显的位置移动，或方向的明显不同，这种现象称为视差.

例如，我们在 A 点和 B 点分别观测星星，星星的位置将由蓝色移动到红色，眼睛与星星的连线(视线)方向也发生了变化[1].



或者，将右手伸向前面，大拇指竖立.闭上左眼，只用右眼观察大拇指时，大拇指在远处墙面上或相对于远处其他物体的位置，将与闭上右眼，只用左眼观察时的位置有差异，这就是视差， α 称为视差角.

观测点 A,B 的距离不变的情况下，物体越远，视差角越小.



现在，如果知道 A,B 两点的距离，视差角的大小，我们就可以计算出星星的距离.但是对于距离地球非常远的天体来说，视差角非常小以至于我们需要以角秒 (arcseconds) 为单位，甚至细分角秒来计算.一角秒等于一度的 $\frac{1}{3600}$ ，这意味着我们使用视差法测量天体的远近受制于我们能多么精确地测量非常小的视角.

4.36 光年远的半人马座阿尔发星是距离太阳系最近的星星，它的视差角大约为 1 度的

$\frac{1}{5000}$, 截止 2017 年 12 月, 盖亚太空望远镜 (GAIA Space Telescope) 是我们人类利用视差法测量星体的最好的望远镜, 它能测量距离地球 30 000 光年远的星体的微小视差角, 这意味着要测量 1 度的 $\frac{1}{33000000}$.

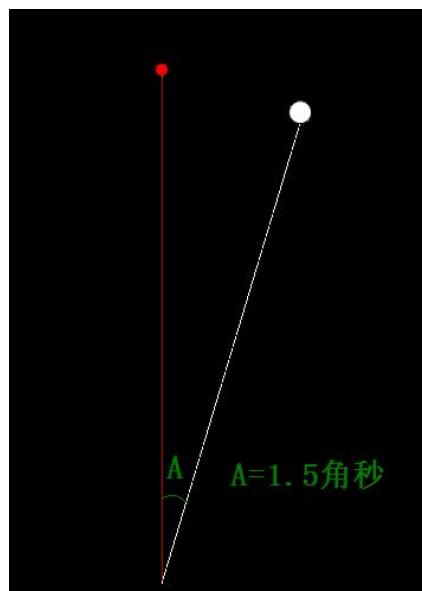
由于两个视点之间的距离容易测量, 因此用视差法测量星体距离的困难在于测量视差角, 方法如下:

1.选择一颗非常遥远的星体作为参考点, 该星体要足够远以至于在地球上看起来它一点都不动.这种点通常指其它星系, 例如最近的, 距离 220 万光年的仙女座.因为星系比我们用视差法要测量距离的星体远上几千甚至几百万倍, 即便用最先进的望远镜, 这些星系看起来也完全不移动, 换句话说, 它们的视差角为 0.

有了这些遥远的星系, 我们就有了不动的参考点来测量那些我们想要测量距离的星体的视差角.

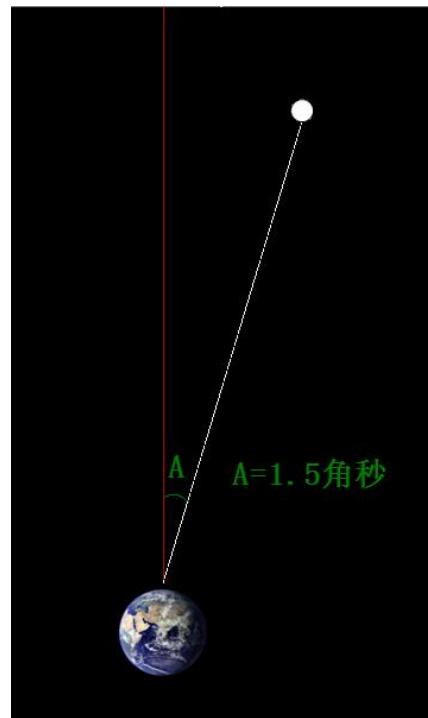
2.想象我们在夜晚抬头观看夜空, 红色的物体是非常遥远的参考点星系, 白色的物体是我们要测量距离的星体.

从观测点分别画两条视线连接参考点星系和被测量星体:



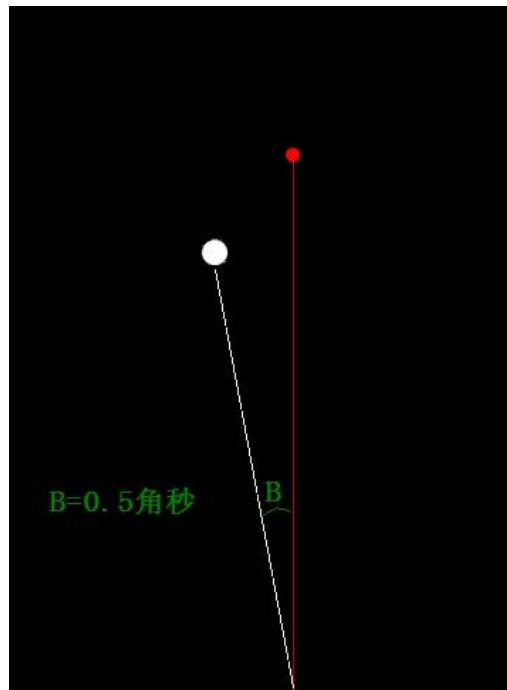
假设我们测出来的角 A 为 1.5 角秒.注意上图不是依据真实刻度作的图, 1 角秒等于 1 度的 $\frac{1}{3600}$, 如果按照真实的刻度去作图的话, 角 A 用肉眼看起来几乎为 0.

俯视图如下:



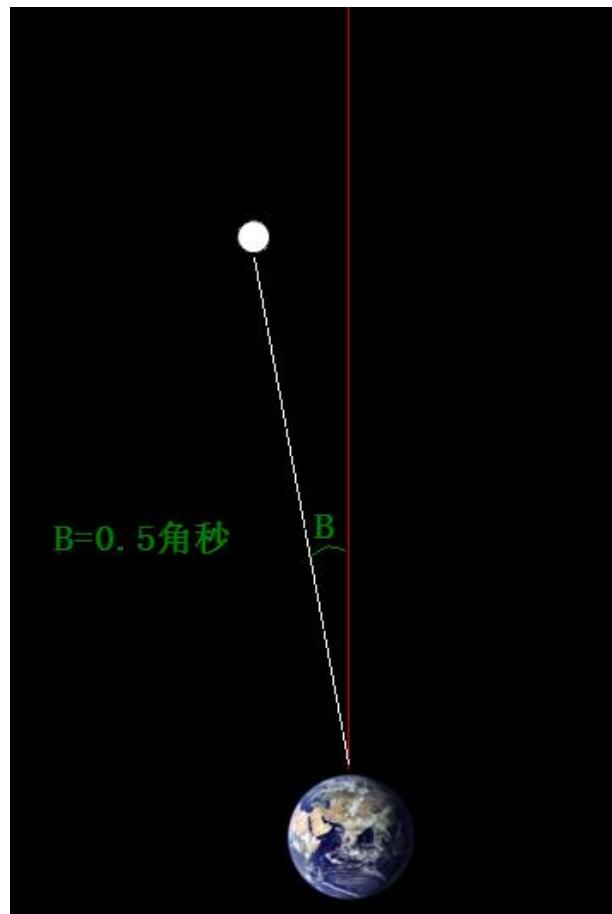
由于参考点星系非常遥远，红线延伸到屏幕之外了。

3. 现在，我们要从另外一个视点观测星体，注意，我们需要从不同的视点观测星体以获得视差角。为了这样做，我们需要等 6 个月，直到地球绕太阳半圈，使得我们处于天空中的一个新位置，在新视点观测星体可能看起来像这样：

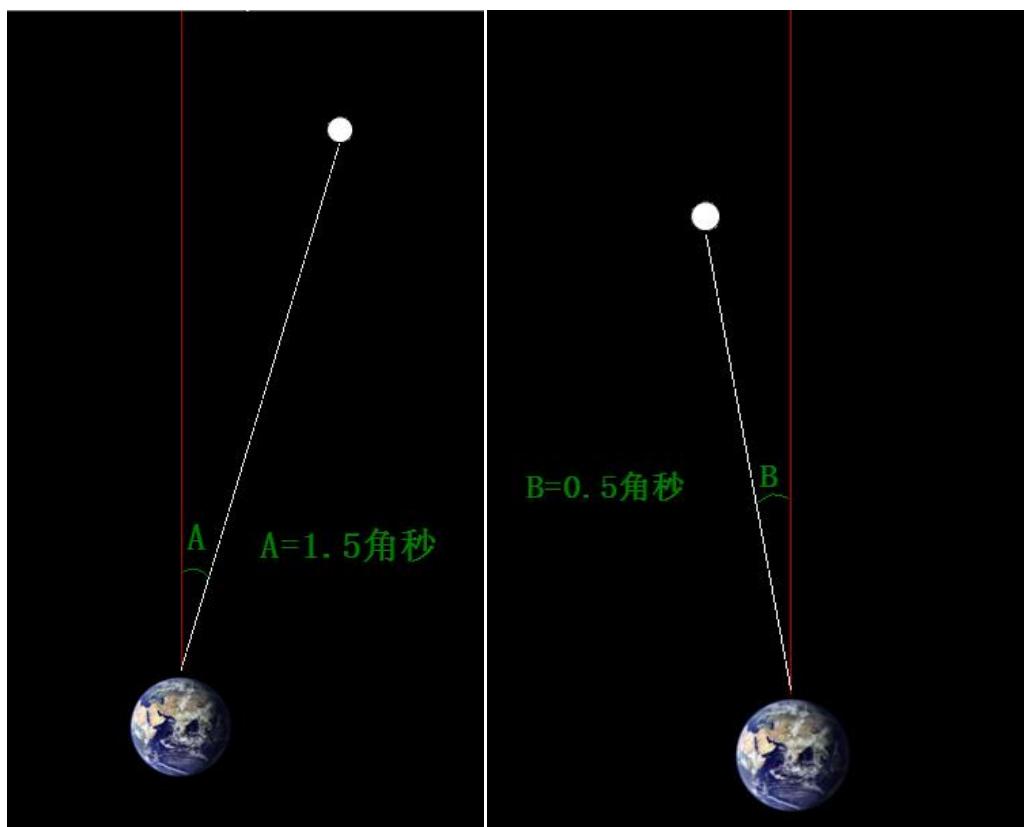


6 个月后，观测的天体相对于参考点星系的位置看起来有了变化，此时测得角 B 为 0.5 角秒。

这是从地球上空俯看的效果：



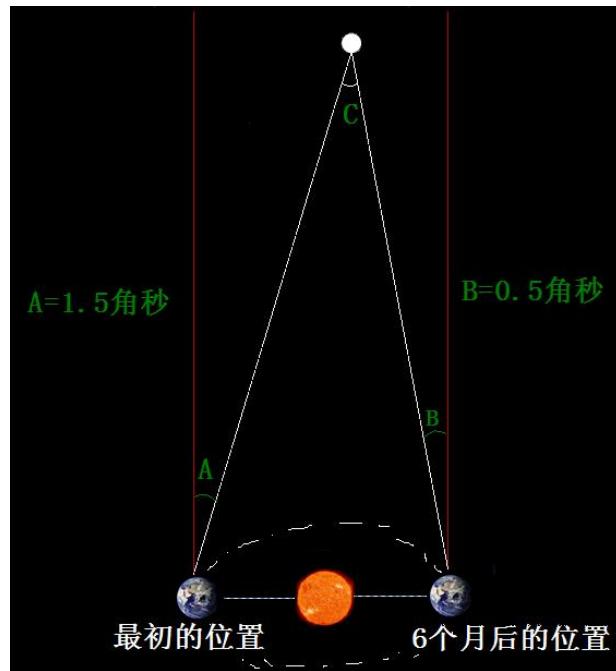
整理在一起加以对比：



最初的位置

6个月后的位置

将 2 张图合并起来,

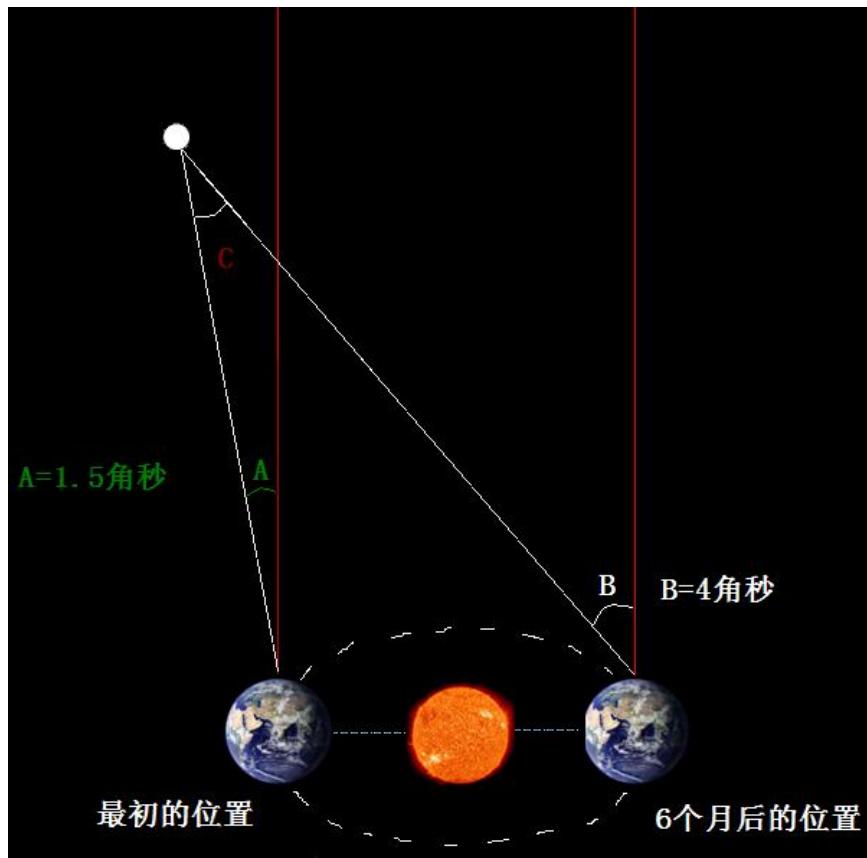


C 就是我们要求的视差角,

$$\begin{aligned}C &= 180^\circ - [(90^\circ - A) + (90^\circ - B)] \\&= A + B = 2 \text{ (角秒)}\end{aligned}$$

在上面的例子中，角 A 在参考点星系与视点连线的右侧，角 B 在左侧，两个角 A,B 在参考线的不同侧，然而，角 A, 角 B 不一定在参考线的两侧，它们也可能在参考线的同侧.例如：

角 A,, 角 B 都在参考线的左侧，

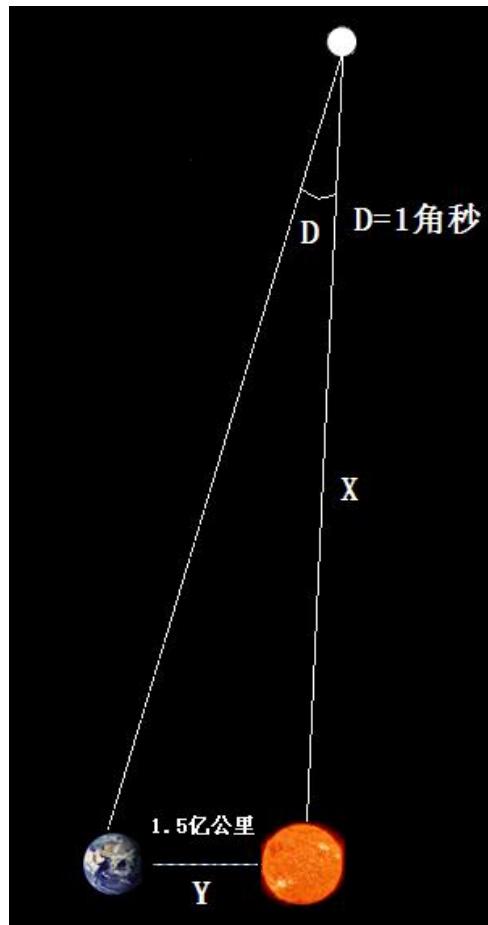


$$\text{视差角 } C = 180^\circ - [(90^\circ + A) + (90^\circ - B)] = B - A = 4 - 1.5 = 2.5 \text{ (角秒)}$$

在上图中，如果角 A 等于角 B ，那么两角相减等于 0，这意味着最初的角度与 6 个月后的角度相等，即这个星星完全不移动，也就是它的视差角 C 为 0.

根据角 A ，角 B 在参考线两侧的情况，我们计算得到视差角 $C=2$ 角秒，并且知道两个视点间的距离约为 3 亿公里（地球公转的直径），现在只需要将这些参数呈现在直角三角形中，通过正切关系来计算星星到我们的距离.

此时，我们将两视点与星星 3 点构成的三角形视为等腰三角形，有人可能会问：“左边不是比右边长吗？”，确实是的，但造成这个现象的原因，是因为我们没有按照严格的刻度来作图. 我们需要注意的是，角 A 和角 B 都非常小，所导致的三角形两边长的差异可以忽略不计.



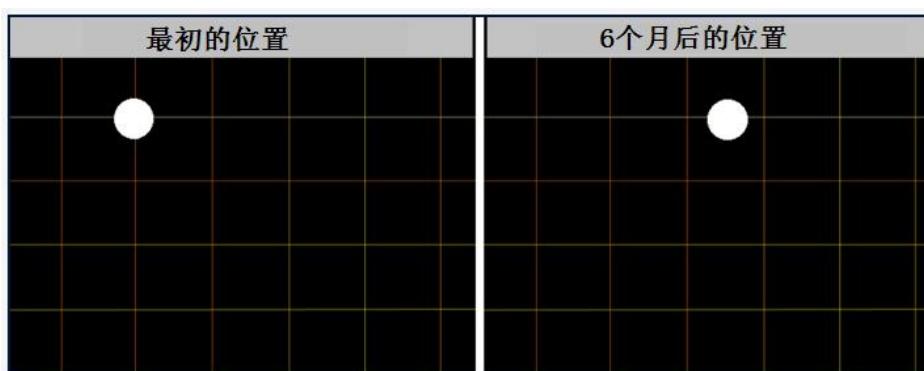
$$\tan D = \tan \frac{1}{3600} = \frac{Y}{X} = \frac{150000000}{X}$$

$$X = \frac{150000000}{\tan \frac{1}{3600}} = 30939720936822 \approx 3.1 \times 10^{13} \text{ km}$$

这相当于 3.26 光年.

今天，天文学家不再使用六分仪测量天体的角度变化，而是使用新进的 CCD 相机.这些相机经过设计，将星体定格在网格中，这些网格根据几个世纪以来观测不同星星相对于遥远星体在一年内的相对运动来定位整个夜空，每一小格对应于一个特定的角度变化.

例如，如果每格对应 1 角秒，我们得到的数据如下：



因为星星移动了 1.5 格，天文学家知道星星在 6 个月里角度变化了 1.5 角秒.

1672 年，Giovanni Cassini 提前 1 年送他的助手 Richer 到 Cayenne，精确地测定了当地的

经纬度，利用金星的卫星的月食同步巴黎和 Cayenne 的时间，在不同地点观测火星，计算出火星的视差角，计算出火星到地球的距离为 7.8×10^7 m，再通过开普勒定律计算出太阳到地球的距离。

<https://en.wikipedia.org/wiki/Parallax>

<http://referenceframe.net/astronomy/how-astronomers-measure-distance-to-stars-using-parallax/>

开普勒定律测定太阳系星体间的相对距离

开普勒学业成绩优异。1588 年 9 月 25 日，他获得文学学士学位。1591 年 8 月 11 日，他又通过了文学硕士学位考试。这时他想当一名路德教的牧师，所以又留校学习神学。

在大学里，开普勒深受秘密传播哥白尼学说的天文教授麦斯特林的影响。后来他回忆说：“当我在杰出的麦斯特林的指导下开始研究天文学时，看到了旧的宇宙理论的许多错误。我非常喜欢教授经常提到的哥白尼，在与同学们辩论时我总是坚持他的观点。”开普勒对天文学和数学有着浓厚的兴趣。

1594 年，奥地利的格拉茨新教高级中学的数学教师死了，要求图宾根大学给选派一名后继者。此时开普勒的神学课程仅有一年就读完了，但校方认为他作教士不够虔诚，就极力推荐他去格拉茨。他的朋友也劝他放弃神学。同年开普勒到了格拉茨中学教数学、天文，后来又教古典文学、修辞学和道德学。

1596 年，开普勒在宇宙论方面发表了第一本重要的著作：《宇宙的神秘》。在其中他明确主张哥白尼体系，同时也因袭了毕达哥拉斯和柏拉图用数来解释宇宙构造的神秘主义理论。他在序言中指出：“我企图去证明上帝在创造宇宙并且调节宇宙的次序时，看到了从毕达哥拉斯和柏拉图时代起就为人们所熟知的五种正多面体，上帝按照这形体安排了天体的数目、它们的比例和它们运动间的关系。”他认为土星、木星、火星、地球、金星和水星的轨道分别在大小不等的六个球的球面上，六球依次套切成正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体和正二十面体，太阳居中心。这种假设尽管荒唐，但却促使开普勒去进一步寻找正确的宇宙构造理论。他把这本书分寄给了一些科学名人。丹麦天文学家第谷·布拉赫虽不同意书中的日心说，却十分佩服开普勒的数学知识和创造天才。伽利略也把他引为探索真理的同仁。

由于反宗教改革运动，格拉茨中学重新回到天主教的怀抱，新教徒的师生全被赶出了校门。开普勒这位新教徒却因名声显赫而被破例复聘。他看到自己的学生尽数散去，不愿再回格拉茨，就接受了第谷的邀请，于 1600 年来到布拉格郊外的天文台，作第谷的助手。第谷是望远镜发明以前的最后一位伟大的天文学家，也是世界上前所未有的最仔细、最准确的观察家。他当时充任神圣罗马帝国的皇室数学家，随皇帝鲁道夫二世住在布拉格。他的宇宙理论是托勒密体系和哥白尼体系的混合，他认为行星绕太阳旋转，太阳又率群星围地球运行。但是第谷对天体方位进行了几十年的观测，积累了大量的精确材料，开普勒在天文学上的伟大发现，就是通过归纳分析这些材料得出的。

占星家

1601 年，第谷去世。开普勒继任为皇帝鲁道夫二世的御用数学家，但是给他的俸禄只有第谷的一半，且常常拖欠。他对第谷的遗著做了整理，1602 年出版了第谷的《新天文学》六卷，1603 年印行了第谷的《释彗星》。

1601 年，开普勒出版了《天文学更可靠的基础》一书，不同意星体决定人的命运的观点，对占星术持怀疑态度：“如果星相家有时讲对了，那应归功于运气。”但他仍没摆脱宇宙的神秘和谐理论。除教数学外，他的一个主要任务就是替皇帝占星算命，这也是他终身从事的职业。在他的遗稿中保存了 800 多张占星图。他虽不相信这一伪科学，但为了谋生只得如此。

立法者

1604年9月30日，开普勒在巨蛇星座附近发现了一颗新星（现知是银河系内的一颗超新星）。他虽视力不佳，仍持续观测了十几个月。他把观测结果发表在1607年出版的《巨蛇座底部的新星》一书中，打破了星座无变化的传统说法。这一年他看到了一颗大彗星，即后来定名的哈雷彗星。

当时不论是地心说还是日心说，都认为行星做匀速圆周运动。但开普勒发现，对火星的轨道来说，按照哥白尼、托勒密和第谷提供的三种不同方法，都不能推算出同第谷的观测相吻合的结果，于是他放弃了火星做匀速圆周运动的观念，并试图用别的几何图形来解释，经过四年的苦思冥想，也就是到了1609年，他发现椭圆形完全适合这里的要求，能做出同样准确的解释，于是得出了“**开普勒第一定律**”：火星沿椭圆轨道绕太阳运行，太阳处于**两焦点之一的位置**。发现第一定律，就是说行星沿椭圆轨道运动，需有摆脱传统观念的智慧和毅力，在此之前所有天文学家，包括哥白尼和伽利略在内都坚持古希腊亚里士多德和毕达哥拉斯的天体是完美的物体，圆是完美的形状，一切天体运动都是圆周运动的成见。哥白尼知道几个圆并起来可以产生椭圆，但他从来没有用椭圆形来描述天体的轨道。当时由于第谷观测的精确和开普勒的努力，终使日心说向前推进了一大步。**接着开普勒又发现火星运行速度是不匀的，当它离太阳较近时运动得较快（近日点），离太阳远时运动得较慢（远日点），但从任何一点开始，向径（太阳中心到行星中心的连线）在相等的时间所扫过的面积相等。**这就是**开普勒第二定律（面积定律）**。这两条定律刊布在1609年出版的《新天文学》（又名《论火星的运动》）中，该书还指出两定律同样适用于其他行星和月球的运动。

1611年，开普勒的保护人鲁道夫被其弟逼迫退位，他仍被新皇帝留任。他不忍与故主分别，继续随侍左右。1612年鲁道夫卒，开普勒接受了奥地利的林茨当局的聘请，去做数学教师和地图编制工作。在这里他继续探索各行星轨道之间的几何关系，经过长期繁杂的计算和无数次失败，最后创立了行星运动的**第三定律（谐和定律）**：**行星绕太阳公转运动的周期的平方与它们椭圆轨道的半长轴的立方成正比。**

$$T^2 = ka^3$$

这一结果表述在1619年出版的《宇宙谐和论》中。

多难人生

开普勒的身世是不幸的。他17岁时父亲去世。1620年，他母亲，一个酒馆老板的女儿，平时爱吵吵闹闹，因被指控犯有巫术罪而入狱，他经一年多的奔波才使其得到无罪释放。开普勒26岁时与一个出身名门的寡妇结婚，举止傲慢的妻子使他很少感到家庭温暖。1613年前妻死后他又选择了一个贫家女为伴，感情虽很融洽，无奈经济上常处于绝望境地。他两个妻子共生有12个小孩，大多在贫困中夭折。他作为新教徒常受到天主教会的迫害，他的一些著作被教皇列为禁书。

经济困苦和操劳跋涉严重损害了开普勒的健康。皇帝即使在较兴隆的时期都是怏怏不乐地支付薪水。在战乱时期，开普勒的薪水被一拖再拖，得不到及时的支付。

1630年，他有几个月未得薪俸，不得不亲自前往正在举行帝国会议的雷根斯堡索取。到达那里后他突然发热，几天以后即11月15日，在贫病交困中寂然死去，终年59岁。他被葬于拉提斯本的圣彼得教堂，三十年战争的狂潮荡平了他的坟墓，但是也已证明他的行星运动定律是一座比任何石碑都更为久伫长存的纪念碑。

开普勒通过计算第谷的观测数据，得到火星绕太阳公转的周期是1.88年（地球年），根据开普勒第三定律，

$$\frac{T^2}{a^3} = k$$

$$T^2 = ka^3$$

$$\frac{T_{planet1}^2}{a_{planet1}^3} = k = \frac{T_{planet2}^2}{a_{planet2}^3}$$

$$\frac{T_{planet1}^2}{T_{planet2}^2} = \frac{a_{planet1}^3}{a_{planet2}^3}$$

若 planet2 为地球，则

$$\frac{T_{planet1}^2}{1} = \frac{a_{planet1}^3}{1\text{AU}}$$

备注：地球公转周期为 1 年，公转轨迹的半长轴，即地球到太阳的距离为 1 宇宙单位 (astronomical Unit) ，

$$\begin{aligned}\therefore T_{planet1}^2 &= a_{planet1}^3 \\ \therefore T_{Mars}^2 &= a_{Mars}^3 \\ a_{Mars} &= \sqrt[3]{T_{Mars}^2} = \sqrt[3]{1.88^2} = 1.524 \text{ AU}\end{aligned}$$

这就是说，火星到太阳的距离是地球到太阳距离的 1.524 倍。

其他行星的相对距离也可以通过第谷的数据和开普勒第三定律推导出来：

星体	周期	与太阳的相对距离
太阳 sun	---	0.000 AU
水星 Mercury	0.241	0.387 AU
金星 Venus	0.615	0.723 AU
地球 Earth	1.000	1.000 AU
火星 Mars	1.880	1.524 AU
木星 Jupiter	11.900	5.204 AU
土星 Saturn	29.500	9.539 AU
天王星 Uranus	84.000	19.191 AU
海王星 Neptune	165.0	30.071 AU
冥王星 Pluto	248.0	39.457 AU

1 年 = 365.25 天

尽管如此，1 AU 的实际值，即地球到太阳的距离还是未知的。

接下来，在《用视差法测地球到火星的距离》中介绍确定 1 AU 的方法。