

理论问题与实验探究合集（电磁学）

一共 19 个实验，4 个理论问题或推导

1. 对万物起源的思考（归纳总结）【初一】

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。**

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**”，

泰勒斯向埃及人学习观察洪水，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。

从**毕达哥拉斯**开始，**希腊**哲学开始产生了数学的传统。毕达哥拉斯曾用**数学**研究乐律，而由此所产生的“**和谐**”的概念也对以后古希腊的哲学家有重大影响。在宇宙论方面，毕达哥拉斯结合了**米利都学派**以及自己有关数的理论，并坚持**大地是圆形的**，不过抛弃了**米利都学派的地心说**（在地球上看到日月星辰，很容易觉得它们都围绕地球转，从而认为地球是宇宙的中心）。

毕达哥拉斯还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。

阿那克萨戈拉最早提出月光是日光的反射，也最早用月影盖着地球和地影盖着月亮的见解来说明日食和月食。

阿那克萨戈拉深受米利都学派唯物主义思想影响，但他又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，这于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是罢了。

巴门尼德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；亚里士多德说过：“克塞诺芬尼是第一个说出‘一’的人（因为巴门尼德据说是他的学生），不过他并没有说清楚任何事物。看来他没有把握这些的本质，只是凝视整个天空，说‘一’就是神。”许多学者根据亚里士多德的这句话和克塞诺芬尼的残篇，认为克塞诺芬尼说的神就是宇宙。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）。

2. 真空概念的出现：从哲学思想到物理研究对象的发展过程【高一】

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**。神没有具体的样子（form），因为如果神有样子，那么羊的神会是羊的样子，牛的神会是牛的样子，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 void, 那么 void 就是存在 (因为存在, 即神无处不在), 因此 void 就是物质, 那么就没有 void; 既然没有 void, 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 void 让物质在里面运动. 因此物质是连续的、不可分的一 unity. 如果可分, 那么 void 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** (Heraclitus, 约公元前 530 年—前 470 年), 一位富传奇色彩的哲学家, 师承米利都学派、毕达哥拉斯, 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 接受了除变化是幻觉之外的巴门尼德的大部分思想, **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 void 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 void, 或者说真空是否存在的问题有很多讨论和争议.

苏格拉底师承米利都学派, **苏格拉底的学生柏拉图**: 即便是没有任何特性 (featureless) 的抽象的虚空的概念也备受质疑: void 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, Void 本身不能自己提供额外的对自己的解释, **void 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 exist.**

柏拉图的学生亚里士多德, 17 岁时, 他赴雅典, 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 void 存在, 认为虚空 (void) 不会自然而然地产生, 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 void 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; 尽管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) 论证了 (argued) 真空的存在, 他继承古代原子学说, 特别是阐述并发展了伊壁鸠鲁的哲学观点. 认为物质的存在是永恒的, 提出了“无物能由无中生, 无物能归于无”的唯物主义观点. 反对神创论, 认为宇宙是无限的, 有其自然发展的过程, 人们只要懂得了自然现象发生的真正原因, 宗教偏见便可消失.

西罗也在公元 1 世纪不成功地试图人工制造真空, 以及欧洲学者, 像罗杰·培根 (Roger Bacon), 布拉休斯 (Blasius of Parma) 和沃尔特·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可选的原子论, 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、以及他的更加隐喻的形而上学的空间实体元素 (the spacial - corporeal component of his metaphysics) (可能是指以太) 的概念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.** 随着笛卡尔的力学的哲学 (mechanical philosophy) 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，神的代理（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 年的巴黎主教埃蒂安·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，也就是说，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、佛罗伦萨的学者们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”，就借用古希腊学者亚里士多德的名言“**大自然讨厌真空**”来解释。粗略一想也对，大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、佛罗伦萨的学者们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 G. B. 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，在学术上给予他指导。**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，便邀请他前来充当助手。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者，成了伽利略的最后一位学生。

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（1.83 米）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（0.762 米）。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）。与此管对比的还有另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。

1. 实验名称：托里拆利真空实验（水银柱实验）【初一】

1. 实验器材：1 米一端封闭的玻璃管，水银，水槽

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，在学术上给予他指导。**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，便邀请他前来充当助手。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者，成了伽利略的最后一位学生。

当时罗马、佛罗伦萨的学者们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”，就借用古希腊学者亚里士多德的名言“**大自然讨厌真空**”来解释。粗略一想也对，大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、佛罗伦萨的学者们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 G. B. 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。**

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（1.83 米）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（0.762 米）。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）。与此管对比的还有另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。

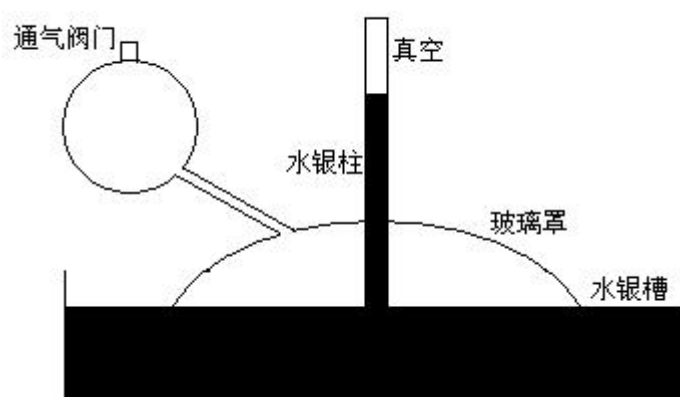
一个革命性的新想法在托里拆利的脑海中闪现。两次实验是在不同的天气状况下进行的，空气也是有重量的。抽水泵奥秘的真相不在于液体重量和它上面的真空，而在于周围大气的重量。（雨水水多，空气少，空气重量小，压力就小。）

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。

2. 实验名称：制作帕斯卡实验装置验证证明液柱高度大小取决于气体的压力【初一】

2. 实验器材：一端封闭的玻璃管，水槽

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。



3. 知道波义耳对化学和元素定义的价值【初一】

在化学实验中，波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》给了波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。

波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体的本性，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。这就是波意耳在《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，波意耳考虑到，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一位著名的唯心主义哲学家柏拉图，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。

3. 实验名称：波义耳设计实验仪器证实空气有弹性（波义耳定律）【初一】

3. 实验器材：气体定律演示器，一端（短的一端）封闭的弯曲玻璃管（长的一端开口）

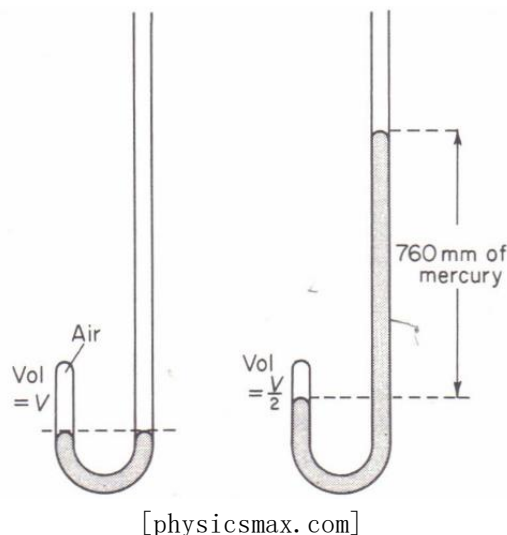
法国科学家制造了一个黄铜气缸，中间装有活塞，安装得很紧。几个人用力按下活塞，压缩缸里的空气。然后，他们松开活塞，活塞弹回来，但是没有全部弹回来。不论他们隔多长时间做一次实验，活塞总是不能全部弹回来。

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.

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**波意耳-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.

4. 实验名称: 水解实验【初一】

4. 实验器材: 水槽, 直流电源

4. 为什么要做水解实验?【初一】

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。

5. 为什么进行真空放电实验？【初一】

在托里拆利水银气压计真空部位会发出闪光，在荷兰格罗宁根（Groningen）教书的瑞士数学家伯努利（Bernoulli）研究了这种现象，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）广泛地研究了这种现象，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义耳，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）。

Hauksbee built a contrivance by which substances could be rubbed together in the receiver of his air pump. With this device he showed that when beads of amber were rubbed against woolen cloth, a light was produced that was brighter in vacuo than in air.

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。

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，就不再有点火花通过真空了。

5. 实验名称：莱顿瓶的改进【初一】

5. 实验器材：锡箔纸，空瓶子，水，粗铜导线

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。

6. 实验名称：演示法拉第黑色空间【初一】

6. 实验器材：低压气体放电管，感应线圈

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）。（真空或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。

6. 盖斯勒空气泵的原理【初一】

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。

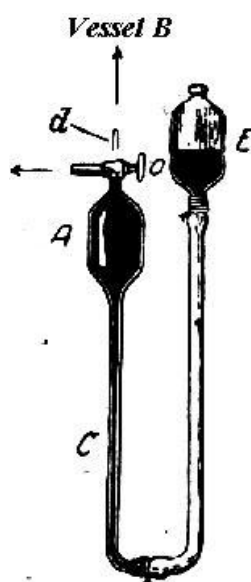


Fig. 209 Principle of Geissler's Mercury air pump

盖斯勒的空气泵

[mahidol.ac.th]

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。

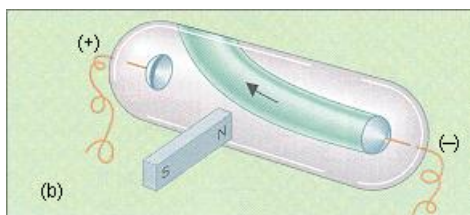
7. 实验名称：真空放电管中的光在磁场中会偏转【初一】

7. 实验仪器：低压放电管，条形磁铁，蹄形磁铁

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**.

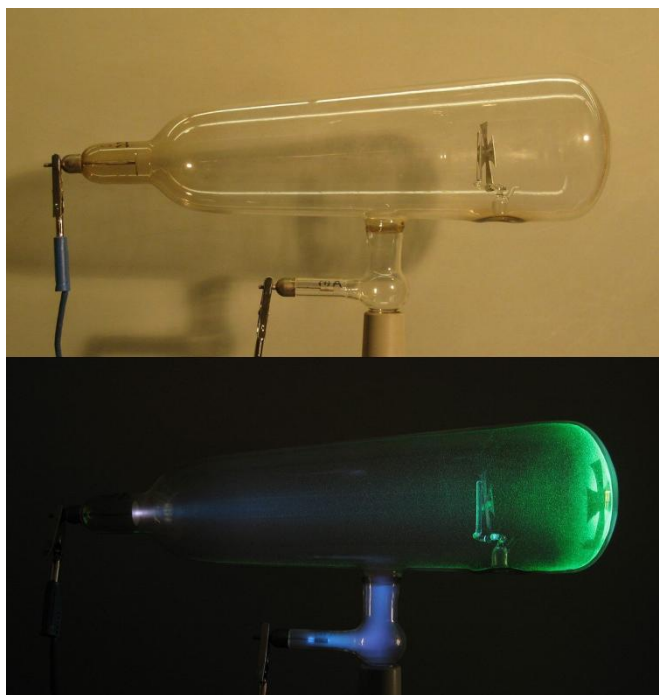
普吕克做了一个在真空中放电的相似实验，观察到了类似的光在磁场中的偏转. 但是他的实验的最有趣的地方是在负极附近检查到了光在磁场中的行为；当负极改成一个单一的点，则整个负极的光都集中在通过该点的磁场的磁力方向的一条线上. 换句话说，负极的光就像是由金属离子丝组成的一端连着负极的可以弯曲的链条.



普吕克真空中放电实验

[purdue.edu]

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离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

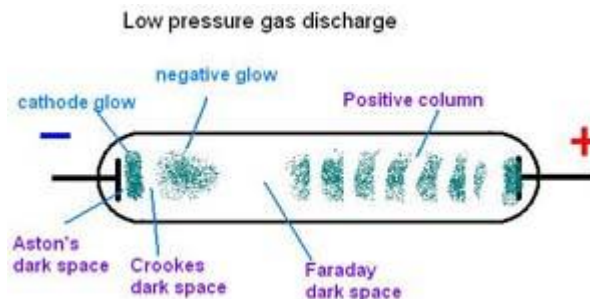
[wiki]

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离子。这些离子是被充了负电 (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) 研究了真空度更高的放电实验。克鲁克斯发现，真空度越高，负极发出的光会变得越来越厚并且远离负极，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 Crookes dark space，



[tuopeek.com]

真空度越高，这段昏暗的空间越来越宽，当它的边界靠近玻璃管时，玻璃管会发出绿色的光。绿光的分布会随着靠近的磁铁而变化。克鲁克斯发现，当使用凹面的负极时，阴极射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离子。

真空度越高，这段昏暗的空间越来越宽，当它的边界靠近玻璃管时，玻璃管会发出绿色的光。绿光的分布会随着靠近的磁铁而变化。克鲁克斯发现，当使用凹面的负极时，阴极射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离子。

7. 勒纳德如何证明光电效应产生的带负电的微粒不是来自阴极金属和周围被电离的带电气体分子的电离原子？【初一】

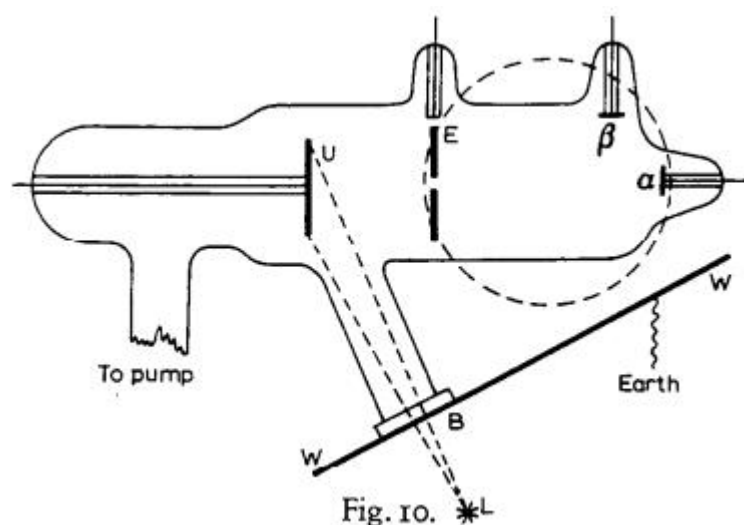
霍尔伐克士，博洛尼亚的奥古斯托，以及莫斯科的斯托列托夫的研究都证实了无论金属板上是否充有负电，紫外光都会从金属板上驱逐出一束带负电的微粒，当时人们普遍相信这些带负电的微粒中还包含有周围被电离的带电气体分子的原子。

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} 次方库伦的电量后中断光电流. 如果携带电的是钠的原子, 那么每一个原子携带的电量不可能超过在水解中所带的量. 那么也就是最少 $0.7 \times 10^{-6} \text{mg}$ 的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.

8. 计算光电效应产生的带电微粒的荷质比【高二】

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蔽 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

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

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 $1.15 \times 10^{-7} \text{ emug}^{-1}$.

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中的电子, 这就是莱纳德著名的“触发假说”(triggering hypothesis).

8. 实验名称: 粗略测量阴极射线管中微粒的速度【高二】

8. 实验器材: 阴极射线演示器, 条形磁铁, 磁感应传感器

方法: 参考问题 8. 计算光电效应产生的带电微粒的荷质比

9. 实验名称: 实验证明阴极射线管是否产生 X 射线【初一】

9. 实验器材: 阴极射线演示器, 荧光板

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一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调皮地亮了起来。

伦琴真是欣喜若狂，他顺手拿起闪闪发亮的荧光板，想吻它一下，突然，一个完整手骨的影子鬼使神差般地出现在荧光板上。

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。他又有意识地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。这是事实，千真万确的事实。伦琴一下子抱住了夫人，在实验室里足足转了五个圈子，他太激动了，激动得不知如何是好，两行热泪止不住地流了下来。

9. 汤姆逊通过电场和磁场对阴极射线的作用计算阴极射线的速度和荷质比【高二】

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，众说纷纭，一时得不出公认的结论。英法的科学家和德国的科学家们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 emission，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。

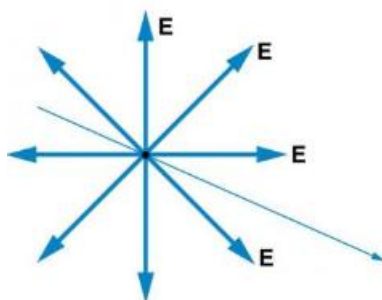
电子这样被大范围地发现，但是无论在何处发现， e/m 的值都是常量。电子似乎是组成各种不同物质的一部分，因此，将其认为是组成原子的一个组成部分是很自然的。

10. 理解汤姆逊通过威尔逊云室测量电子质量的方法【高二】

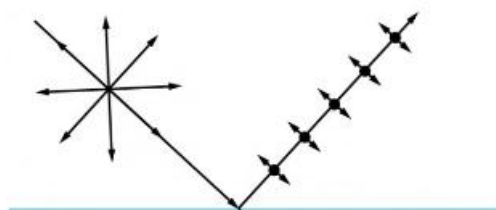
10. 实验名称：尝试将太阳光线性极化【高二】

10. 实验器材：太阳光，平面镜，偏振片

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。



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。

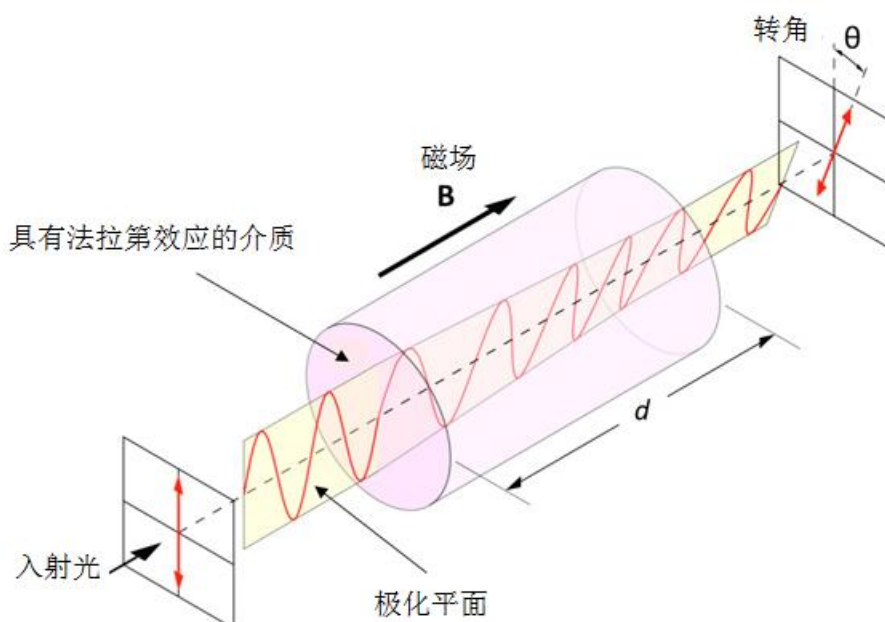


将这种光通过强磁场，磁场力可以旋转由镜子产生的极化光的极化平面。

11. 实验名称：尝试旋转线性极化后的太阳光的极化平面【高二】

11. 实验器材：太阳光，平面镜，偏振片，强磁铁

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。



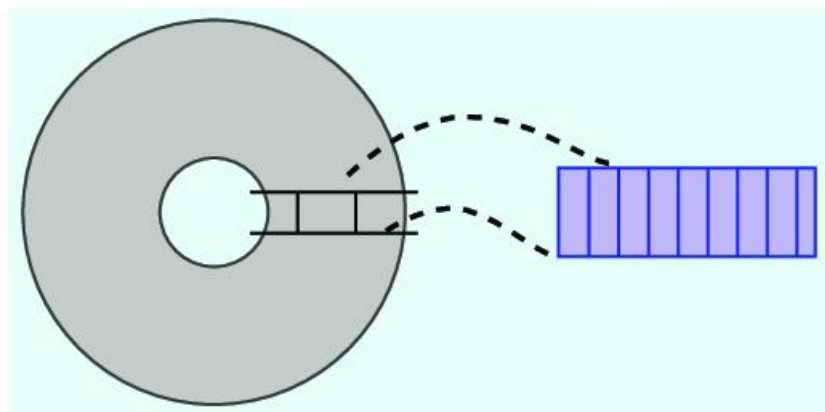
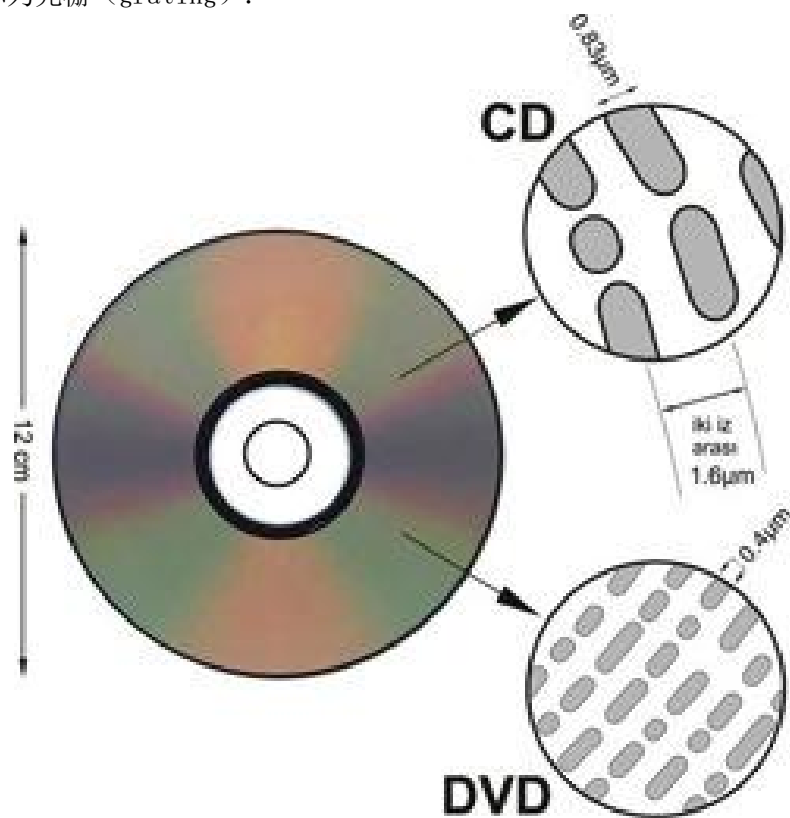
[bbvaopenmind.com]

12. 实验名称(为塞曼效应制作观察仪器)：自制衍射光栅分光镜【初一】

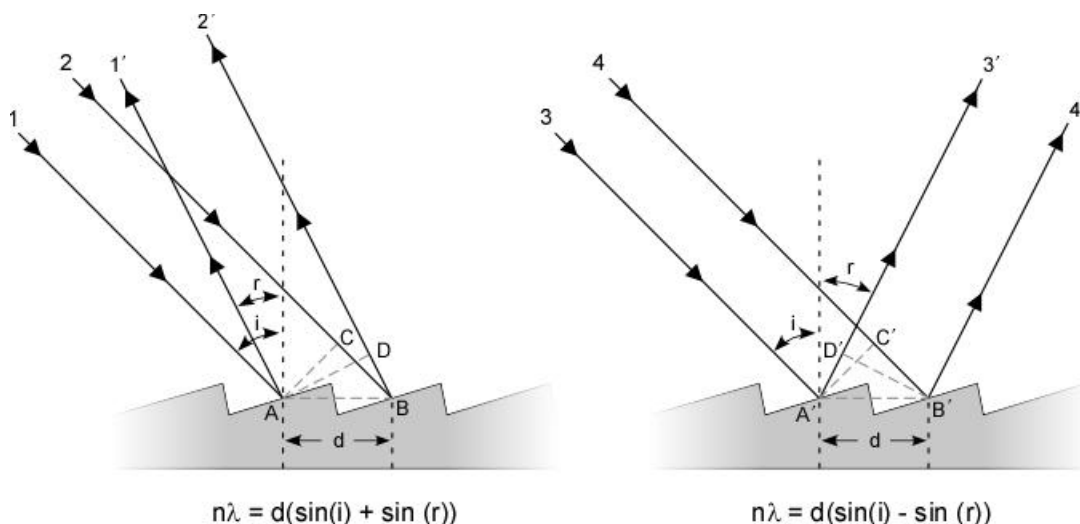
12. 实验器材：纸箱，DVD 光盘，小刀，胶水，硬纸片

我们使用 DVD 光盘来看光谱. DVD 光盘是一个光栅. 由大量等宽等间距的平行狭缝构成的

光学器件称为光栅（grating）。



DVD 光盘上有很多平行刻痕. 单色光照射到上面时, 会在两个方向看到反射光, 如图所示.



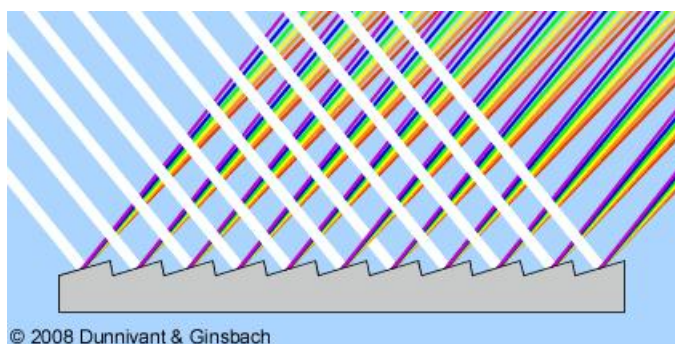
左图两束光反射后的光程差是 $CB+BD$, $CB=dsini$, $BD=dsinr$, 当光程差与波长的关系满足

$$n\lambda = d(\sin i + \sin r)$$

时, 产生干涉条纹. 同理, 对于右边方向的干涉满足的方程是

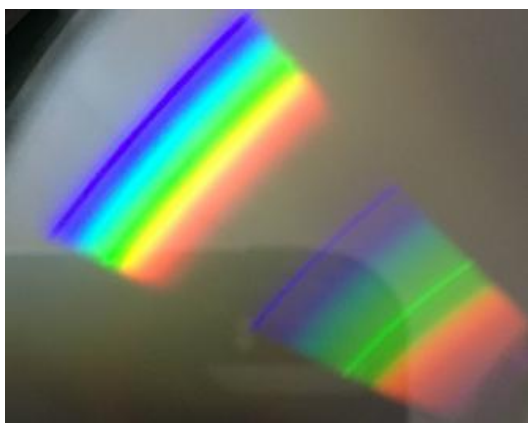
$$n\lambda = d(\sin i - \sin r)$$

当入射光束和衍射光束在光栅法线的同一侧(每个光栅中间的垂直线)时, 将产生一个正号, 反之则为负号. 如下图所示, 当多色光被光栅表面反射时, 表面不同波长的光将发生“彩虹”一样的色散.

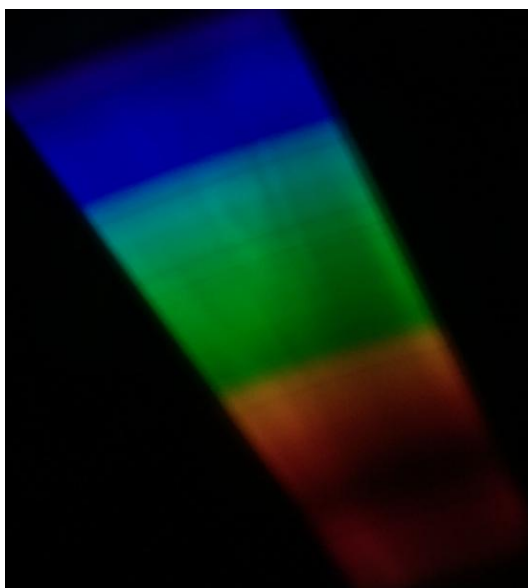


对上面给出的方程的进一步分析表明, 每个衍射角 r 存在多个波长解, 称为衍射级. 第一波长称为一阶衍射 ($n = 1$), 始终是较长的波长(即 400 nm), 第二阶衍射是波长的一半(即 200 nm), 依此类推. 出于我们获得尽可能纯的辐射(相对于波长)的目的, 通常超过 90% 的入射强度是一阶衍射.

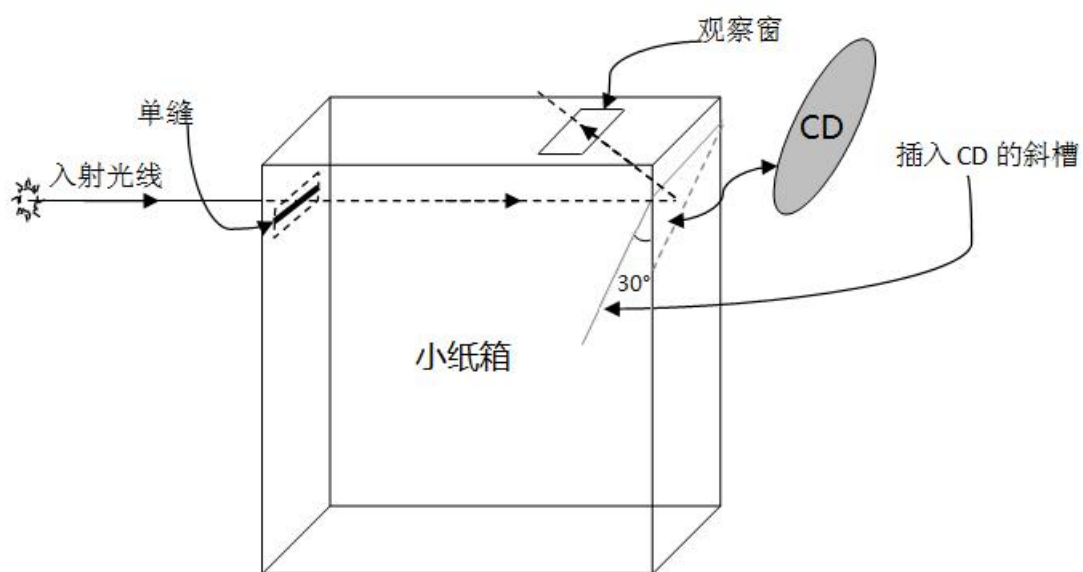
对于 $n\lambda = d(\sin i + \sin r)$ 的第一级衍射 $\lambda = d(\sin i + \sin r)$, 由于 i, d 一定, 不同反射角对应不同波长, 从而形成一带波长相近的光在某个反射角范围内的分布, 就是彩虹状颜色的色散. d 越小, 单位长度内的条纹越多, r 就越大, 所以 DVD(1531 条/mm)的彩虹宽度比 CD(652 条/mm)的宽.



CD 图



DVD 图宽度大，延伸到红色
用 DVD 自制分光镜原理图



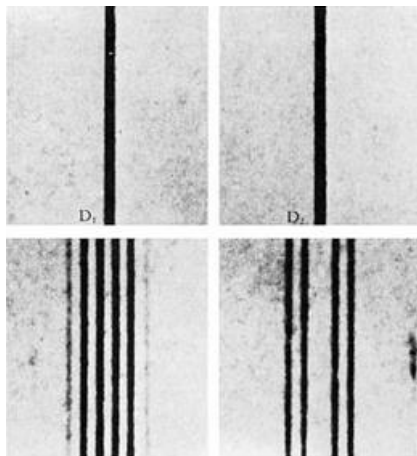
13. 实验名称：用自制衍射光栅分光镜观察塞曼效应【初一】

13. 实验器材：衍射光栅分光镜，钠光灯，感应线圈，强磁铁

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 excellent 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 edges 是极化了的，通过 refining technique，通过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。

11. 洛伦兹电子思想的来源是什么【高二】

洛伦兹的工作导致了电子的概念。在 1897 年汤姆逊 (Thomson) 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。

12. 热是什么？【初一】

与燃烧联系产生燃素，热质说，可以解释很多现象，但是二块冰互相摩擦，最后变成水的现象。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。

由于热与燃烧关系密切容易联系起来，**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 (J. J. Becher and Georg Ernst Stahl) 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，热的守恒就称为一种主要的假设。

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。

不过，热质说的重大成就之一是拉普拉斯修正牛顿的音速公式。拉普拉斯在热质说的基础上，在牛顿的公式中增加一个常数，此常数即为气体的绝热指数。上述的修正大幅的修正了音速的理论预测值。

1798 年时，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。

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。

13. 焦耳为什么认为热是一种能量？热功当量提出的原因是什么？【初一】

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，sadi carnot 和 clapeyron 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。Clausius 有实验事实说明这个定律，并且这个实验不是 Clausius 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 carnot 的理论变得广为人知，卡诺的理论随后与 Clausius 和 Thomson 的热力学理论相结合。

14. 理解绝对零度提出的原因【初一】

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℃ 也能继续降温变冷（从而体积变小），温度每降低 1℃，气体的体积就会减小 1/273。查尔斯的定律显示，在 -273℃ 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 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 (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° .

15. 理解基尔霍夫推导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, 而与物质本身无关的过程. 并由此定义黑体概念【高二】

在牛顿时代, 折射望远镜 (伽利略望远镜) 产生的色差 (chromatic aberration) 是主要问题, 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 (白光通过三棱镜分为七色光) 的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. 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像差 (spherical aberration), 不过依然可以修正色差. 直到 1695 年, 牛津大学的天文学家 David Gregory 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, 英国的律师和光学工匠 Chester moor hall 委托不同的光学仪器商构造两种不同的透镜-一种是凹的, 另一种是凸的 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 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. bass 将透镜交给 Hall, 然后 Hall 将它们安装在一个望远镜里. Bass 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. 由于生意太好, 制造商们太忙不愿意被新的发明打扰. 直到 1750 年, bass 遇到 John dollond, 一个前纺织工, 现在是崛起的光学仪器制造商. dollond 是牛顿的透镜色差理论的坚定拥护者, 然而他对 Bass 的报告产生了兴趣, 决定自己做实验, 结果证实 Bass 说的是正确的, 后续的实验产生了这样的组合: a pair of convex crown-glass lenses enclosing a concave flint-glass lens. dollond 声称是自己发明了这种组合并申请了专利.

Dollond 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 (trial and error) 的事.

设计消色差透镜需要详细的关于玻璃如何弯曲和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标准, 比如说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标准, 会造成差异.

1802 年, 英国数学和物理学家 William Hyde Wollaston (1766—1828) Wollaston 发明了一种仪器, 通过放置在透明物质上的一块玻璃打火石立方体, 测量物质对光的总的反射角, 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, Wollaston 使阳光射入一个黑暗的房间. 然而, Wollaston 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, 使他推断太阳光谱只有 4 种颜色.

与此同时, Wollaston 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. Wollaston 没有给出解释, 用他的话说, 就是 i cannot undertake to explain the dark lines.

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 fraunhofer 发现 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线来测定物质的折射率. 为了克服这个困难, fraunhofer 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, fraunhofer 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 fraunhofer 可以精确地测定不同玻璃的折射率.

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.

他发现在暗黑的背景上, 有着一一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. 于是他用了两面镜子, 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

Fraunhofer 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. Fraunhofer 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.

Fraunhofer 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，Fraunhofer 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一名 extraordinary professor，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。

1849 年，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 foucault 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。

基尔霍夫已经通过发展欧姆定律和指出电信号在导体中以光速传播而奠定了自己的名声，且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、铯，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，也许从此以后他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，本生把他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，于是他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。他们俩越谈越兴奋，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、铯，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，因为他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（钠，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。Foucault 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。

16. 为什么多普勒效应无法解释恒星颜色？【初一】

Stars are suns，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，Prague 大学教授多普勒 doppler 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 Prague 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 ballot 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造成的。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。

17. 汤姆逊提出原子结构的梅子布丁模型的理由是什么？【高一】

物质的电中性

在关于阴极射线的工作中，物理学家约瑟夫·汤姆孙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**。

18. 卢瑟福为什么提出有核原子结构模型？【高一】

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。

19. 简述放射性发现的最初经过以及放射性与 X 射线产生机制。【高一】

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，一个偶然的机机会使他遭遇放射性问题。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。**