

《海纳百川·藏书博览》

简装书库·自然科学总论

（自然科学史）

科学史

06

[英] W·C·丹皮尔

上海市黄浦区教育信息中心

第十章 物理学的新时代

新物理学——阴极射线与电子——阳极射线或原子射线——放射性——
x 射线与原子序数——量子论——原子结构——玻尔学说——量子力学——
相对论——相对论与万有引力——物理学近况——核型原子——化学

新物理学

十九世纪最后十年以前，物理科学一直循着第六章所叙述的发展路线前进。当时以为物理学的主要框架已经一劳永逸地构成了。以后需要做的一点点工作就只是把物理常数的测量弄得再准确一些（小数点后面的数字再推进一位），并把看起来往往很快就能解决的光以太结构的研究工作再推进一步。二十世纪的前三十年，这一牛顿的体系渗入新的物理学学说中。在解释实验的结果时，起初这一体系唯一无二的学说，后来使和其他学说并用。慢慢地才发现还需要一些全新的概念。

新物理学可以说是从 1895 年慕尼黑伦琴（Wilhelm Konrad Röntgen，1845—1923 年）教授发现 x 射线时开始的。在这以前，已经有很多人对气体中的放电进行实验，特别是法拉第、希托夫、盖斯勒（Geissler）、戈尔茨坦（Goldstein）、克鲁克斯等人 and 后来的 J. J. 汤姆生（1856—1940 年），即剑桥大学三一学院的主任教授约瑟夫·汤姆生爵士。但是只有持具远见的人才觉得这些实验重要，而最先引起物理学家注意这些实验的，便是伦琴的工作。

伟大发现之出于偶然，常较一般人所想象的为少。不过伦琴找到 x 射线的踪迹却是偶然的，这件事的确迟早要发生，但仍然是偶然的。伦琴发现紧密封存的底片虽丝毫不暴露在光线下，如果放在高度真空的放电管附近，仍会变灰黑而至毁坏。这说明放电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，如铂氰酸钾的幕屏放在这种放电管附近时，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。所吸收的射线的数量似乎大致和吸收体的厚度与密度成正比。真空管内的气体愈少，则射线的贯穿性愈高。具有相当“硬度”的射线，可使肌肉内的骨骼在磷光片或照片上投下阴影。因此，在有了适当的技术之后，这一事实对于外科医术，就具有无上的价值。

从纯粹科学的观点来看，继 x 射线之后，J. J. 汤姆生等人又有一个更重要的发现：当这些射线通过气体时，它们就使气体变成导体。在这个研究范围内，液体电解质的离子说已经指明液体中的导电现象有类似的机制。液体电解质的离子说是由法拉第创立的，后来主要由科尔劳施、范特·霍夫和阿累利乌斯加以发展。现在这个气体的离子说证明是更加成功。

在 x 射线通过气体以后，再加以切断，气体的导电性仍然可以维持一会儿，然后就渐渐消失了。汤姆生与卢瑟福又发现：当由于 x 射线射入而变成导体的气体，通过玻璃绵或两个电性相反的带电板之间时，其导电性就消失

一般叙述可参看作者所著：The Recent Development of Physical Science 一书前后数版（1904—1924）。

剑桥大学哲学学会，见 University Reporter，1896 年 2 月 4 日。

见第六章，247—251 页。

了。这说明气体之所以能导电是由于含有荷电的质点，这些荷电的质点一与玻璃绵或带电板之一相接触，就放出电荷。卢瑟福又发现：在导电的气体中，电流的强弱起初和电动势成正比；但如果电动势继续增高，则电流的增加渐渐变慢，最后达到一个最大的饱和数值。从这些实验可以明白，虽然离子是液体电解质中平常而永久的构造的一部分，但在气体中，只有 x 射线或其他电离剂起作用时才会产生离子。如果听其自然，离子就会渐渐重新结合而至消失。玻璃绵的表面很大，可以吸收离子或帮助离子重新结合。如果外加的电动势相当高，便可以使离子一产生出来就马上跑到电极上去，因而电动势再增高，电流也不能再加大。

伦琴的发现还开创了另一研究领域——放射现象的领域。x 射线既然能对磷光质发生显著的效应，人们自然要问：这种磷光质或他种天然物体，是否也可以产生类似 x 射线那样的射线呢？在这一研究中首先获得成功的是亨利·柏克勒耳 (Henri Becquerel)。他在 1896 年 2 月发现，钾铀的硫酸复盐发出的射线，可以穿透黑纸或其他不透光的物质，对相底版发生影响，后来他发现铀本身与其所有化合物都有同样的作用。

次年，1897 年，是以超原子微粒（即远比任何元素的原子更轻的质点）伟大发现著称的一年。物理学的新时代从此开始了。

阴极射线与电子

当一只装有铂电极的玻璃管，经抽气机逐渐抽空时，管内的放电在性质上就经历多次变化，最后就在玻璃管壁上或管内其他固体上产生磷光效应。然后，这些物体就成为 x 射线的来源。1869 年，希托夫证明放在阴极与玻璃壁间的障碍物，可以在玻璃壁上投射阴影。1876 年，戈尔茨坦证实希托夫的结果，而创造“阴极射线”一词，他以为这种射线是和普通光线同一性质的以太波。另一方面，伐利 (Varley) 和克鲁克斯提出证据——例如，这些射线在磁场中发生偏转——说明它们是由阴极射出的荷电质点，因撞击而产生磷光。1890 年，舒斯特 (Schuster) 观察了它们在磁场中的偏转度，测量了这些假想质点的电荷与其质量的比率，而估计这一比率为液体中氢离子的比值的 500 倍左右。他假定这些质点的大小与原子一样，推得气体离子的电荷远较液体离子为大。1892 年赫兹发现阴极射线能贯穿薄的金片或铝片。这一发现，似乎与组成射线的质点为普通原子流或分子流的想法颇难调和。1895 年，贝兰证明：这些质点偏转到绝缘的导体上时，就把它们所有的负电荷给与导体。在 1897 年，质点的速度及其电荷 e 与质量 m 的比值，为几个物理学家测定之后，它们的性质的问题就得到了解决。一月间，维歇特 (Wiechert) 证明几种射线的速度约为光速的十分之

一；而其 e/m 则等于电解液中氢离子的比值的 2000 至 4000 倍。他按电

J.J.Thomson, *Conduction of Electricity through Gases*, (Cambridge, 1903 and 1906). J.S.E.Townsend, *Electricity in Gases*, Oxford, 1915.

一个运动的带电质点相当于一股电流，因而可为磁铁所偏转（见 218 页），如果加上强度为 H 的磁场，则质点所受的机械力为 Hev 。这个力的作用方向与磁场和质点运动的方向在每一瞬间都成直角。这正是产生圆运动所需要的条件（见 152 页），因而这 Hev 即表向心力 mv^2/r ，故 $mv^2/r = Hev$ 。在实验中，质点只走圆的一段，其离开直线行径的偏转为 $S = l^2/2r = l^2He/2vm$ 。

要知这些研究的历史，可看 Townsend 所著的书 453 及以后数页。

容器的振荡周期测量速度，而按磁场中的偏转测量 e/m 。七月间考夫曼（Kaufmann）发表他的实验报告：他从电极间的电位差与磁场中的偏转，求得质点的能量。同时 J.J. 汤姆生将这些射线导入绝缘的圆柱，测量其电荷，并观测其给予温差电偶的热量，而求得其动能。最后他于十月间发现在高度真空下，阴极射线不但能为磁场所偏转，也能为电场所偏转，他因而测量了这两种偏转度。

图 11 表明汤姆生用来进行上述有历史意义的实验的仪器。一支高度抽空的玻璃管装着两个金属电极：阴极 C 和开有小缝的阳极 A。从 C 发出的阴极射线的一部分，穿过小缝后，再为第二个小缝 B 所削细。这样得到的小束射线，经过绝缘片 D 与 E 之间，射在玻璃管他端的荧光幕或照相底片上。如将绝缘片连于高电压电他的两极，则其间产生电场。整个仪器放在一强力的电磁体两极中间，使得射线也受到磁场的作用。

假定阴极射线是荷有负电的质点的急流，由简单计算可以看出，射线的电场偏转度，亦如其磁场偏转度，是依质点的速度 v 及其电荷与质量之比 e/m 而改变的。所以通过测量电场与磁场的偏转度，便可求得 v 与 e/m 的数值。

汤姆生求得质点的速度在光速的十分之一左右，而略有变化，但其 e/m 则不管气体的压力与性质及电极的性质如何，均无改变。在液体电解质中，以氢离子的 e/m 为最大，约为 10,000 或 10^4 。汤姆生求得气体离子的 e/m 为 7.7×10^6 ，换言之，即为液体中氢离子的 e/m 的 770 倍，而考夫曼在 1897 年 12 月所求得的更精密的数值为 1.77×10^7 。这些结果也许表明，在气体内的阴极射线的质点中，不是象舒斯特所预料的那样，电荷比在氢原子中大得多，就是质量小得多。汤姆生暂时假定这些质点比原子小，他以牛顿所常用的微粒那个名词去称呼它们，并且说它们是我们寻求多年的各种元素的共同成分。但是当时还没有明确的证据可以证明这些微粒所负的电荷，不比电解质中单价离子所负的更大，因而也无法计算其质量。所以电荷的疑案就成了急待研究的下一个问题了。

1898 和 1899 年，汤姆生测量了 x 射线在气体中所造成的离子的电荷。他利用威尔逊（C.T.R. Wilson）在 1897 年所发现的方法，即离子和尘埃一样，可以成为潮湿空气中蒸汽凝成雾滴的核心。从这些雾滴在空气阻力下降落的速度，可以计算出雾滴的大小。从凝结的水的体积，可以求得雾滴的数目，再从已知电动势所产生的电流，可以求得电荷的总量。不久以后，汤森（Townsend）测量了离子渗入气体的扩散速度，而由此计算出离子的电荷。到了 1899 年，汤姆生用云室法与磁场偏转法，测量了相同一种质点（以紫外光射在锌片上所产生的质点）的电荷 e 和 e/m 。所有测量结果都证明：在实验误差限度以内，气体质点的电荷与液体单价离子的电荷相符合。事实上，在米利根（Millikan）新近的实验结果中，这两个数字相差不及四千分之一。

由此可见，并非微粒的电荷比液体中氢离子的电荷更大，而是其质量更

Phil. Mag. vol. XLIV, 1897, P. 293.

设一强度为 f 的均强电场，垂直地施于质量为 m ，电荷为 e 的质点的运动方向上，则质点所得的加速度 a 为 fe/m ，而在电场方向的位移为 s 。在时间 t 内该质点以其原有的速度 v 进行的距离 $l = vt$ 。因此 $t^2 = l^2/v^2$ ，而在与垂直于原来运动方向上的位移为 $Se = fel^2/2mv^2$

见第六章，217 页。

小。这些微粒是原子的一部分，无论元素的性质如何，均为其原子共有的成分。从汤姆生最初的实验来看，每一微粒的质量似约为氢原子的 $1/770$ 。但从上述考夫曼测量的 e/m ，已可求得较精密的结果。自此以后关于微粒的电荷与其 e/m ，接着又有新的测定，最著名的是米利根的测定。他在 1910 年改进威尔逊的云室法，又在 1911 年测量了小油滴在被电离的空气中降落的速度。当一油滴捉到一离子时，其速度便忽然改变。这样求得离子的电荷为 4.775×10^{-10} 静电单位。这说明这些微粒或电子的质量，为氢原子的 $1/1830$ 。从气体分子运动论可求得一个氢原子的质量约为 1.66×10^{-24} 克，所以一个电子的质量约为 9×10^{-28} 克。

这个伟大的发现终于解决了一个古希腊留下的问题：即不同的物质是否有共同的基础的问题。同时也阐明了“带电”的意义。汤姆生当时发表其个人的观点说：

我认为一个原子含有许多更小的个体；我把这些个体叫做微粒。这些微粒彼此相等；其质量等于低压下气体中阴离子的质量，约为 3×10^{-28} 克。在正常原子中，这些微粒的集团，构成一个中性的电的体系。个别的微粒，行为虽然好象阴性的离子，但聚集于中性的原子中时，其阴电效应便为某种东西所抵消。此种东西使微粒散布的空间，好象有与这些微粒电荷之和相等的阳电似的。气体的带电现象，我认为这是由于气体原子的分裂，致使微粒脱离某些原子。脱离出来的微粒，性质如阴性的离子，每个都荷有一恒量的阴电，为简便计，我们名之为单位电荷。剩余的原子的一部分，性质如一阳性的离子，载有一单位的正电荷，还有比阴电子更大的质量。由此观之，带电现象主要是由于原子的分裂，其中一部分质量被放出，而脱离了原来的原子。

这些新发展与前不久的一种研究，颇有关联之处。按照麦克斯韦的理论，光既然是一种电磁波系，那么光必定是由振荡的电体所发出的。由于光谱是元素所特有的而不是元素的化合物所特有的，所以这些振荡体（或称振子）必为原子或原子的一部分。依照这种推理，洛伦兹（Lorentz）在汤姆生的发现的前几年，创立了一种物质的电学说。这个学说预料，光谱的出现当受磁场的影响，而这一预料已为塞曼（Zeeman）所证实。塞曼在 1896 年发现光源放在强磁场之内时，其所发钠光谱的谱线即行变宽。他后来又以更强的磁场将单一谱线分成了两条或多条。根据测量这些线条之间的距离所得的资料，按照洛伦兹的学说，可以算出振荡质点的电荷与其质量之比 e/m 的新值。如是求得此值的数量级为 10^7 电磁单位 根据更精密的测量算出 此数字为 1.77×10^7 ，与根据观察阴极射线和他法所得的结果甚为符合。

洛伦兹利用斯托尼（J.Stoney）所定的名称“电子”来称呼这些振动的带电质点，而塞曼效应的发现与测量证明，它们就是汤姆生的微粒。我们可以把它们当做是孤立的阴电单位。拉摩（Larmor）以为电子既然有电能，就必定有与质量相当的惯量。这样，洛伦兹的学说就成为物质的电子学说，而且和由汤姆生发现而来的观点完全融合在一起。只不过汤姆生是用物质去解释电，而洛伦兹却是用电来解释物质。

R.A.Millikan, Trans American Electrochemical Society, vol. XX 1912. ""P.185.又 Townsend, 上引书 p.244。)P492

Phil.Mag.Ser.5, vol.LX, 1899, p.565。

见本书第六章 243 页。

应该指出，当时还有一个默认的假设并没有为后来的研究所证实。这一假设认为，原子中的微粒或电子是按照牛顿的动力学运动的，在最初的时候，人们甚至把原子比做一个小型的太阳系，电子在其中的运动有如行星之绕太阳。但在 1930 年以前，我们明白这种行星轨道的概念，并不一定符合事实，因而应该放弃。

接着人们便发现还可以用许多别的方法获得微粒或电子：例如高温下的物质及受到紫外光作用的金属，都能发出电子。这些效应由勒纳德 (Lenard)、埃尔斯特 (Elster) 和盖特尔 (Geitel)、理查森 (O.W. Richardson)、拉登堡 (Ladenburg) 等人加以研究，此后这种热效应在无线电报与电话所用的热离子管中就取得了重要的实用意义。

阳极射线或原子射线

由上所述，阴极射线是在真空管放电时，自阴极射出的。其对应的、自阳极发出的阳射线，是戈尔茨坦在 1886 年发现的。观察阳射线的方法是在阳极对面的阴极上穿些小孔，这样在放电时，便有发光的射线经过这些孔，人可以在阴极以外去观察它。维恩 (Wien) 和汤姆生在 1898 年先后测量了这种“极隧射线”的磁偏转与电偏转。其 e/m 的数值表明这种阳射线是由质量与普通原子或分子相近的阳性质点所组成的。

汤姆生在 1910 年和 1911 年把阳射线的研究推进了一步。他利用一个高度抽空的大仪器，在阴极装上一个长而细的导管，这样便得到一个很细的射线束，其位置可以在仪器内的照相底片上加以记录。妥善安排磁力与电力，使二者所生的偏转互成直角。由于磁偏转与质点的速度成反比，而电偏转与其速度的平方成反比，如果射线中有速度不同的同类质点，则照片上将呈现抛物线形的曲线。但实际出现的曲线则视仪器中残存气体的性质而定。如气体为氢，则基本曲线所给与的 e/m 为 10^4 或 m/e 为 10^{-4} ，与液体电解质中氢离子的数值相等。第二条曲线所给出的值为前者的两倍，即表明有一种氢分子，其质量二倍于负有一个单位的电荷的氢原子的质量。其他元素给出多条抛物线组成的复杂体系。每个元素的 m/e 与氢原子的 m/e 之比，汤姆生称之为“电原子量”。

汤姆生考察氖元素 (原子量为 20.2) 时，发现两条曲线，一条表示原子量为 20，另一条表示原子量为 22。这说明，普通制备的氖气可能是两种化学性相同而原子量不同的元素的混合物。某些放射现象也说明有这种元素，并且可以给予解释，索迪 (Soddy) 把它们叫做“同位素”。

汤姆生的实验由阿斯顿 (Aston, 1877—1945 年) 加以继续和发展。他用改进的仪器，求得各元素的有规律的“质谱”。这样就证实氖有同位素。氯的原子量为什么是 35.46，也是化学家长久所不了解的，至此也证明氯是原子量为 35 与 37 的两种氯原子的混合物了。阿斯顿于他种元素也得到相似的结果。如果将氧的原子量定为 16，则其他所有已经测验过的元素的原子量，都非常接近整数，差别最大的是氢的原子量，它不是 1，而是 1.008。这些原子量所以与整数有微小差别，是由于原子核中阴阳二单位体密积在一起的缘故。这个问题还要在后面详细讨论。

这样，阿斯顿就澄清了另一老问题。纽兰兹与门得列耶夫的工作，证明各元素不同的性质与其原子量的陆续增加有某种关系，因而不可避免他说明原子量自身应当形成一个简单顺增的序列。普劳特关于各元素的原子量都是氢原子量的倍数的假说，至此证明接近真实。至于其中的稀微差异，在现代原子论中，既可予以解释，也饶有趣味。

放射性

在柏克勒耳对于铀的放射性质进行了创始的观察以后，跟着便发现铀的射线亦如 x 射线，能使空气和他种气体产生导电性。钍的化合物也经人发现有类似的性质。1900 年，居里（Curie）夫妇进行了有系统的研究，在各种元素与其化合物以及天然物中寻找这种效应。他们发现沥青铀矿与其他几种含铀的矿物，比铀元素本身更为活跃。他们采用化学方法，即按其放射性分离了沥青铀矿的成分。于是三种很活跃的物质，即镭、钋与锕的盐就由几位学者分离出来。其中最活跃的是镭，是居里夫妇与贝蒙特（Bemont）合作而发现的。沥青铀矿中镭的含量极微，许多吨的矿，经过漫长而繁重的工作，仅能分离出一克的极小分数的镭盐。

1899 年，蒙特利尔（Montreal）的卢瑟福教授，即以后的剑桥大学教授卢瑟福爵士，发现铀的辐射里有两部分，一部分不能贯穿比 1/50 毫米更厚的铝片，另一部分则能贯穿约半毫米的铝片，然后，强度就减少一半。前者，卢瑟福叫做 α 射线，能产生最显著的电效应；而贯穿性较大的一部分叫 β 射线，能通过不漏光的遮幕，而使照相底片变质。以后又发现第三种更富贯穿性的辐射，称为 γ 射线，在贯穿一厘米厚的铅片之后，还能照相，并使验电器放电。镭放射所有这三种射线比铀容易得多，与其一般活动性成比例，所以研究这些辐射，也以用镭最为便利。

贯穿性中等的 β 射线，容易为磁铁所偏转，而柏克勒耳还发现它们也为电场所偏转。柏克勒耳确凿地证明它们是射出的荷电质点。进一步的研究，证明 β 射线在一切方面都象阴极射线，虽然其速度约为光速的 60 至 95%，但比已经试验过的任何阴极射线的速度都大，所以 β 射线就是阴性的微粒或电子。

强度足够使 β 射线产生相当大的偏转的磁场和电场，并不足以影响很容易被吸收的 α 射线。虽然在 1900 年前后，人们已经认为 α 射线很可能是荷阳电的质点，其质量较组成阴性 β 射线的质点的质量大，但在若干时期以后，才由实验证明它也能被磁场和电场所偏转，但其方向与 β 射线偏转的方向相反而已。卢瑟福在 1906 年对于 α 射线进行实验，求得其 e/m 5.1×10^3 。电解液中氢离子的 e/m 为 10^4 。因为已有证据（见后）表明， α 射线是氦的组成物，由此可知 α 质点是荷有二倍于单阶离子的电荷的氦原子（原子量为 4）。它们的速度约为光速的 1/10。

贯穿性最强的 γ 射线，不能为磁力或电力所偏转。它们与其他两种射线不是同类的，而和 x 射线相似，由一种与光同性质的波所组成，其波长经康普顿（A.H. Compton）、埃利斯（C.D. Ellis）与迈特纳（Fraulein Meitner）等测量，远比光波为小。它们似乎也象某些 x 射线一样，含有发射体所特有的各种单色成分。

E. Rutherford, Radio-activity, Cambridge, 1904 and 1905. J. Chadwick, Radio-activity, London, 1921.

1900 年，威廉·克鲁克斯爵士发现，如果以碳酸氨使铀自其溶液中沉淀，而再溶其沉淀物于过量的试剂中，则所余留的为少量不溶的渣滓。这点渣滓克鲁克斯称为铀-x，以照相法试验，异常活动，但再溶解的铀，则无照相效应。柏克勒耳也得到相似的结果：他发现活动的渣滓如果搁置一年，则丧失其活动性，而不活动的铀反恢复其固有的放射性。

1902 年，卢瑟福与索迪发现钍也有相同的效应，即在为氨所沉淀时，钍的活动性，即消失其一部分。滤液蒸干，则产生放射性极强的渣滓。但经过一月，渣滓的活动性丧失，钍则恢复其原有的活动性。这种活性的渣滓，钍-x，证明是另外一种化学物质，因为它只能为氨全部分开，别种试剂虽能使钍沉淀，但不能使它与钍-x 分离。因此当时断定这些 x 化合物（未知的化合物）当是另外的个体，不断地由母体发出，而渐渐丧失其活性。

1899 年，卢瑟福发现从钍发出的辐射变异无常，尤其易为吹过放射物质表面的空气缓流所影响。他认为这种效应是由于有一种物质放射出的缘故，这种物质的性质好象一种有暂时放射性的重气体。这就是当时所谓的“射气”。这种射气必须与上述以高速度依直线进行的辐射明显分开。射气慢慢地弥散到大气里去，好象挥发性液体的蒸气一般。它的作用象是直行辐射的独立源泉，但随时间的进展，其活动性就变得衰弱起来。镭和钋发出相似的射气，但铀和钍则否。镭射气和氦与氡相似，是一种惰性气体，现在叫做氡。

放射物质所发出的射气为量极小。1904 年，拉姆赛与索迪从几分克溴化镭得到一个很小的射气泡。在一般情形下，其量之微，远不足以影响抽空器内的压力；除利用其放射性侦察它之外，也不能用其他方法去侦察它。普通所得到的，是它与大量空气的混合物，只能和空气同时从一器输入他器。

1899 年，居里夫妇发现如将一棒暴露在镭射气里，则棒自身也获得放射性。同年，卢瑟福于钍也得着相同的结果，而且进行了详细的研究。如果将棒自盛有射气的器内取出，而塞入检验筒内，则此棒可使筒内的气体电离。如将暴露于钍射气而得到放射性的铂丝，用硝酸洗涤，铂丝的放射性不受损失。可是如果用硫酸或盐酸洗涤，其放射性就差不多全部丧失。将酸蒸干则得含有放射性的渣滓。这些结果，表明铂丝的放射性是由于积有某种新的放射物的缘故，这种放射物与各种化学试剂有其一定的反应。这种新的放射物当是它由之形成的那种射气分裂的产物。

卢瑟福与索迪在 1902 年研究了钍-x 放射性的衰变率，而获得重要的发现：即在每一段短时间内的变率与这段时间开始时的放射物的强度成比例。铀-x 也有类似的现象。其过程有如图 12 所示。这与化合物按每个分子分解为比较简单的物体时，在量上的减少遵循同一律。但当两个或多个分子互相反应引起化学变化时，两者的定律便不相同了（见 245 页）。

1903 年，居里与拉波尔德（Laborde）注意到一个奇特的事实：镭的化合物不断地发热。他们从实验的结果算出每克纯镭每小时可发热约 100 卡。以后的结果证明一克镭与其产物平衡时，每小时发热 135 卡。这种热能的发出率，不论将镭盐放在高温或液体空气的低温下，都不改变，甚至在液体氢的温度下也不至减小。

卢瑟福认为热能的发射与放射性有关。丧失了射气的镭，如以电的方法测量，其放射性的恢复与其发热本领的恢复保持同一速率，而其分离出来的射气发热量的变化，也与其放射性的变化相应。放射物的电效应主要是由于

α 射线。而其热效应也主要决定 381 于 α 质点的发射。在上述的每小时 135 卡中，只有 5 卡来自 β 射线，6 卡来自 γ 辐射。 α 与 β 射线的热效应显然得自射出质点的动能。

由于发现镭的化合物不断发热，人们进行了许多探索，力求解释这个好像永不枯竭的能量的泉源，人们的注意力也集中于放射问题本身。

需要解释的事实可以总结为以下几点：（1）什么时候有放射性即有化学变化出现，什么时候就有新体出现；（2）这种化学变化是单质点的分离，而不是化合；（3）放射性与放射元素（不论其是独立的或化合的）的质量成比例，因此分离的质点不是分子而是原子；（4）其所放出的能量是已知的最猛烈的化学反应的万千倍。

1903 年，卢瑟福与索迪根据他们对于射气与其遗留的放射物的实验结果，提出一个学说来解释所有已知的事实。这个学说就是：放射性是基本原子的爆炸分裂造成的。在数百万个原子中，这里和那里忽然有一个爆裂时，射出一个 α 质点，或一个 β 质点和一个 γ 射线，所遗留下来的部分就成为另一不同的原子。如果射出的是一个 α 质点，这个新原素的原子量将有所减少，减少的数值是一个氢原子的原子量的四个单位。

现在把最初制订的镭族的系谱列表于下（根据最近的研究，这个系谱已经有所不同）。这个系谱从铀开始，这是一个重元素，原子量为 238，原子序数为 92，这个数字，以后还要说明，是原子外部的电子数。镭族系谱列如下表：

原子序数	原子量	半衰期	放射物
------	-----	-----	-----

	原子序数	原子量	半衰期	放射物
铀 I	92	238	4.5×10^9 年	α
↓				
铀 X ₁	90	234	24.5 日	β , γ
↓				
铀 X ₂	91	234	1.14 分	β , γ
↓				
铀 II	92	234	10^6 年	α
↓				
钍	90	230	7.6×10^4 年	α
↓				
镭	88	226	1600 年	α
↓				
镭射气	86	222	3.82 日	α
↓				
镭 A	84	218	3.05 分	α
↓				
镭 B	82	214	26.8 分	β , γ
↓				
镭 C	83	214	19.7 分	α , β , γ
↓				
镭 C'	84	214	10^{-6} 秒	α
↓				
镭 D	82	210	25 年	β , γ
↓				
镭 E	83	210	5 日	β , γ
↓				
镭 F (钋)	84	210	136 日	α
↓				
铅	82	206	无放射性	

铀原子放射一个 α 质点，即一个质量为 4 而阳电荷为 2 的氦原子后，所遗下的是一个铀 X₁ 原子，其原子量为 $238 - 4 = 234$ ，而原子序数为 $92 - 2 = 90$ 。铀 X₁ 所放射的仅仅是 β 与 γ 射线。 β 射线的质量很小，载有一个阴电荷，所以，由铀 X 变来的所谓铀 X₂，较铀 X₁ 少一阴电荷，换言之即多一阳电荷，因此其原子序数为 91，其原子量实际没有什么变化，仍为 234。铀 X₂ 也只放射 β 与 γ 射线，所以其子体铀 II 的原子序数为 92，而原子量仍为 234。

这样照表中所示类推。在放出 α 射线时，产物的原子量减少 4 单位，其原子序数少 2 单位。如果放出的是 β 射线，则重量几无改变，而其原子序数则增加 1 单位。

镭族的最后已知子体为铅，其原子量经理查兹 (Richards) 与赫尼格斯密特 (Honigschmit) 测定为 206，而普通铅的原子量为 207。钍族的最后产

物也证明为铅，其原子量经索迪测定为 208。阿斯顿还测定铀铅的原子量有正常的数值 207，在铀族里还有一种具有放射性的铅，以镭 D 的身分出现，其原子量为 210。这四种铅具有相同的化学性质，因而可以认为是同位素。

原子学说，虽然由道尔顿的化学工作确立起来，但是百余年来一直不能证明有单个原子存在；我们只能按成万成亿的数目对原子作统计式的处理。而今，利用放射性，我们已经能够探索单个 α 质点的效应了。克鲁克斯将硫化锌的荧光幕暴露在一个溴化镭小点之下，用放大镜观察到幕上的闪烁。这是最初的办法，今天已经有其他的侦察方法了。

如果我们用比激发火花所必需的强度稍弱的电场对几毫米水银柱压力下的气体施加作用，这种气体就进入非常灵敏的状态。一个 α 质点，因为速度极大会因为与气体分子碰撞，而产生成千上万的离子。这些离子，受到强电场的作用，也作急速的运动，通过碰撞而更产生其他离子。这样，一个 α 质点的总效应就成倍地增加可以使灵敏静电计的指针在标尺上有 20 毫米或更大的偏转。卢瑟福用一个极薄的放射物质膜，使指针的转动减少到每分钟三、四次，而数计所发射的 α 质点的数目，由此可以估算出镭的寿命。计算表明，镭的质量在 1600 年中减少一半。

另一方法是威尔逊发明的。当 α 质点射过为水蒸气所饱和的空气时， α 质点所产生的离子就形成水蒸气凝结的核心。因此空气中呈现雾的路径，代表每个 α 质点的行程，而这些雾的路径，是可用照相方法去记录的。

卢瑟福关于放射性的研究，最后指明了物质嬗变的可能性——中世纪点金术士的梦想。不过，一直要到后来，才发现了加速这些变化的人为方法，特别是控制这些变化的人为方法。这些变化的发生完全决定于原子内部的偶然情况，而变化发生的频率也符合熟悉的概率的定律。但在 1919 年，卢瑟福发现用 α 射线进行撞击时可以引起几种元素（如氮）的原子的变化。氮的原子量为 14，384 其原子为三个氮核（共重 12）与两个氢核所组成。在受到 α 质点撞击时，氮核就被击破，氮原子组成成分中的氢核就以高速射出。在这里我们第一次看到用人力随意分裂原子（单向嬗变）的可能性，此后，这种方法又有很大的扩大。可是破坏易而建设难：这不等于说我们能够用轻而简单的原子造出重而复杂的原子。当时，有证据表明，复杂的放射性原子放出能量来，因此，人们起初以为物质的演化历程是单向的：即由复杂原子分裂为简单原子与辐射能。但是以后的研究证明，虽然重原子分裂时发出能量，而轻原子形成时也能发出能量（见后 391，422 页）。

X 射线与原子序数

伦琴所发现的 X 射线，既不象普通光那样折射，也找不到什么有规律的反射与偏振的痕迹；但是，另一方向，X 射线也不象阴极射线或 α 及 β 质点那样可以为磁场或电场所偏转。因此 X 射线的性质一度成为大家讨论的问题。到 1912 年，劳厄（Laue）方提出一项意见，认为如果 X 射线是波长很短的以太波，则晶体中各原子有规则的排列就可以使 X 射线发生衍射，正像刻有许多平行线痕的平面可以当作光栅使用来使普通光衍射一样。劳厄求出其繁复的数学理论，弗里德里希（Friedrich）与基平在实验中成功地证实了这

Sir William and W. L. Bragg, X - Rays and Crystal Structure, London, 1915, 5th ed. 1925. G. W. C. Kaye, X - Rays, London, 1914, 4th ed. 1923.

种理论。于是人们才知道 X 射线是比光波更短的电磁波，而这一发现，也就开辟了一个研究晶体结构的新天地。最先探勘这个新天地的主要是威廉·布拉格 (William Bragg) 和他的儿子劳伦斯 (Lawrence)·布拉格。他们利用岩盐 (简单的正六面形晶体)，用这种衍射现象证明，与岩盐天然晶面平行的原子面间的距离为 2.81×10^{-8} 厘米，而用阴极射线撞击钨靶时所发生的特有的 X 射线的波长为 0.570×10^{-8} 厘米，仅合钠光波长的万分之一。这样，人们所知道的辐射的波长就包括了很大范围，从无线电通信的长波，一直到 X 射线和 γ 射线的短波，中间大约有 60 个倍频程 (每一个倍频程是频率增加一倍的频率范围)。其中可见光大约仅占一个倍频程。

威廉·布拉格爵士、莫斯利、C.G. 达尔文和凯 (Kaye) 的工作证明，把晶体当作光栅所产生的 X 射线的衍射光谱，是由一定限度内一切波长的漫射辐射混合组成的，并且包括作为“谱线”叠于光谱之上的某些更强烈的一定频率的辐射。这些具有特征的线辐射是一种同利用可见光所得的线光谱相似的衍射现象。随着这一现象的发现，牛津大学一位青年学者莫斯利在 1913 和 1914 年又有一个非常重要的发现。他不久就死于欧战。这是物理科学界的一个莫大的损失。

莫斯利将阴极射线所撞击的靶，从一种金属换成另一种金属，并且以亚铁氰化钾晶体作为光栅，对每一金属靶所生的 X 射线的光谱加以考察，发现光谱中具有特征的谱线的振荡频率，由于改换金属，而发生简单的改变。如果以 n 代表 X 射线光谱中最强谱线每秒钟振荡次数，则按照周期表从一个元素到下一个元素， n 的平方根增加的数目都是相等的。如果将 $n^{\frac{1}{2}}$ 乘一常数，使这种有规则的增加成为单位，我们就得到一系列的原子序数。在这个序列中，所有已经测量过的固体元素的原子序数，都排列得很有规律，从铝的 13 到金的 79。如果再把其他已知的元素填入，我们就发现，从氢的 1 到铀的 92，中间只有两三个空位代表尚未发现的元素。这几个元素后来也发现了 (见 426 页)。

60 个倍频程，即 60 翻或 260 个频率倍数的范围。——译注

Phil.Mag. 1913, 1914, Ser.6, vol. XX, pp.210, 1024, and vol. XX, p.703。

表内所列原子量采用 1969 年国际原子量，以碳 12 等于 12 为基准，表中黑体字表示后来发现的元素或后来查明的原子量。——译注

元 素 表

原子序数	元素	符号	原子量	原子序数	元素	符号	原子量
1	氢	H	1.0080	14	硅	Si	28.086
2	氦	He	4.00260	15	磷	P	30.9738
3	锂	Li	6.941	16	硫	S	32.06
4	铍	Be	9.01218	17	氯	Cl	35.453
5	硼	B	10.81	18	氩	A	39.948
6	碳	C	12.011	19	钾	K	39.102
7	氮	N	14.00067	20	钙	Ca	40.08
8	氧	O	15.994	21	钪	Sc	44.9559
9	氟	F	18.9984	22	钛	Ti	47.90
10	氖	Ne	20.179	23	钒	V	50.9414
11	钠	Na	22.9898	24	铬	Cr	51.996
12	镁	Mg	24.305	25	锰	Mn	54.9380
13	铝	Al	26.9815	26	铁	Fe	55.847

续表

原子序数	元素	符号	原子量	原子序数	元素	符号	原子量
27	钴	Co	58.9332	60	钕	Nd	144.24
28	镍	Ni	58.71	61	钷	Pm	145
29	铜	Cu	63.546	62	钐	Sm	150.4
30	锌	Zn	65.37	63	铕	Eu	151.96
31	镓	Gs	69.72	64	钆	Gd	157.25
32	锗	Ge	72.59	65	铽	Tb	158.9254
33	砷	As	74.9216	66	镝	Dy	162.50
34	硒	Se	78.96	67	钬	Ho	164.9303
35	溴	Br	79.904	68	铒	Er	167.26
36	氪	Kr	83.80	69	铥	Tm	168.9342
37	铷	Rb	85.4678	70	镱	Yb	173.04
38	锶	Sr	87.62	71	镱	Lu	174.97
39	钇	Y	88.9059	72	铪	Hf	178.49
40	锆	Zr	91.22	73	钽	Ta	180.9479
41	铌	Nb	92.9064	74	钨	W	183.85
42	钼	Mo	95.94	75	铼	Re	186.2
43	锝	Tc	98.9062	76	锇	Os	190.2
44	钌	Ru	101.07	77	铱	Ir	192.22
45	铑	Rh	102.9055	78	铂	Pt	195.09
46	钯	Pd	106.4	79	金	Au	196.9665
47	银	Ag	107.868	80	汞	Hg	200.59
48	镉	Cd	112.40	81	铊	Tl	204.37
49	铟	In	114.82	82	铅	Pb	207.2
50	锡	Sn	118.69	83	铋	Bi	208.9806
51	锑	Sb	121.75	84	钋	Po	209
52	碲	Te	127.60	85	砹	At	210
53	碘	I	126.9045	86	氡	Rn	222
54	氙	Xe	131.30	87	钫	Fr	223
55	铯	Cs	132.9055	88	镭	Ra	226.0254
56	钡	Ba	137.34	89	锕	Ac	227
57	镧	La	138.9055	90	钍	Th	232.0381
58	铈	Ce	140.12	91	镤	Pa	231.0359
59	镨	Pr	140.9077	92	铀	U	238.029

量子论

1923 年康普顿发现，当 X 射线为物质所散射时，波的频率变小。他用辐射的光子单元理论，来解释这个效应。这种光子单元可以和物质或电荷的电子与质子相比。电子在原子轨道中运动自然不免发放辐射能量。按照牛顿动

要知概要，见 J.H.Jeans, ReportOnRadiationandtheQuantumTheory, 2nded. London, 1924。

力学，这个效应将使其轨道缩小，从而使其转动周期变短，使其发射的频率增高。在这个过程的所有阶段中，都会有原子存在，所以在一切光谱里都应该可以发现一切频率的辐射，而不是我们在许多元素的线状光谱中所看到的少数确定不变的频率的辐射。

就是在白炽固体的连续光谱内，能量也不是均匀分布的，而是在某些频率之间为最强。这个最强辐射的区域随温度增高，在光谱里由红端至紫端移动。这些事实很难用原子或电子辐射的旧理论去解释。事实上，数学的计算表明频率高的振子应该比频率低的振子发出更多的能量；因此，可见光比不可见的红外线应该发出较多的热，而紫外线又应该比可见光所发的更多。但是这一切都是与众所周知的事实相反。

为了解决这些困难，1901 年普兰克提出了“量子论”，主张辐射不是连续的，而象物质一样，只能按个别的单元体或原子来处理。这些单元的吸与发射，服从在物理学与物理化学的其他分支中早已广泛地使用的概率原理。辐射出来的能量，其单元大小并不是一样的，而与其振荡频率成正比。所以只有当拥有大量可用的能量的时候，振子才能拥有和发射出高频率的紫外线；因为振子拥有许多这样的单元的机会很小，所以其发射的机会和发射的总能量也都很小。反之，频率低的辐射是以小单元射出的，振子拥有许多小单元的机会较多，因而其发射的机会也可以较多；但由于其单元甚小，其总能量也甚小。只有在某段适中的频率范围内，单元的大小适中，机会也好，于是发出的单元数目可以相当大、而其总能量便得达到其最高值。

为了解释这些事实，必须假设普兰克的能量子 ϵ 与频率成正比，或者说与振荡周期成反比。因此我们可以写成

$$\epsilon = h\nu = \frac{h}{T},$$

式中 ν 表频率， T 表振荡周期，而 h 是一常数。因此，普兰克常数 h 等于能量与时间的乘积 ϵT ，这个量被称为作用量。这个守恒的作用单位，当然不随频率而改变，事实上是不随任何变化的东西而改变。这是一个真正的自然单位，和从电子中求得的物质和电的自然单位类似。

我们可以把一种专为解释某一系列事实而创立的理论加以调整，使其与那些事实相适合，但不论怎样适合，以及其形式怎样新颖，这个理论可以普遍适用的证据也许并不充分。可是，如果有另一套完全不同的现象，也可以用同一的理论去解释，尤其是在这些现象没有别的合理的解释的时候，这种证据的价值必大为增高，而我们也开始相信，我们可以依赖这个理论去解释更多的关系。

普兰克的理论本来是为了解释辐射的事实而创立的。因为与传统的动力学有抵触，所以一般学者虽非怀疑，也以审慎的态度对待，亦属当然。但当其为爱因斯坦、奈恩斯特与林德曼 (Linde - mann)，特别是德拜 (Debye) 用以解释比热现象之后，它广泛应用的可能性便大为增加了。

普通的分子运动论以为，固体中单原子分子的原子热，应为气体常数的 3 倍，或约为每度 6 卡，而且此数不受温度的影响。金属都含有单原子分子，

AnnalenderPhysik, vol. IV, 1901.p.553.

SolvayCongress, Brusselse,1912.pp. 254, 407.

AnnalenderPhysik, Vol. XXX, 1912, p, 789.

其原子热在普通温度下大致不变，等于 6。但在低温下，则此数值便减小了。

解释这个现象首先获得成功的是爱因斯坦。他指出，如果能量只能以一定的单元或量子而被吸收，则吸收的速率必随单元的大小而改变，因而必随振荡的频率与温度而改变。德拜从量子论推出一个与实验符合的公式，特别显著的例子是碳元素，其原子热即使在普通温度下，也随温度而改变，比较金属的数值小得多。

依照量子论，光在发射与吸收的刹那间，既不是弗雷内尔的稳定以太波，也不是麦克斯韦与赫兹的连续电磁波。它好象是一团一团的微量的能量所组成的流；这些细团的能量几乎可以看做是光的原子，虽与牛顿的微粒不同类，而却与之相当。这个现象与干涉现象的协调是留待将来解决的难题。如果将一线光分为两道，而使其经过长短不同的路程，则这二路程虽相差至数千个波长，但在这两道光的最后会合处，也可见干涉的条纹。又在大望远镜里看见的星像的衍射花样，表明每个原子所发的光都充满着整个物镜。以前，人们认为这些事实足以证明光是以稳定的“波列”前进的，均匀地分布于几千个波长的距离之内，而且在横向上扩展，足以充满望远镜全部空间。

可是，如果使这颗星的光线落在钾的薄膜上，则被星光所发出的电子，每个都有与该星光相当的量子的能量。这里，光的行动不象是波，而象是能量集中的枪弹。距离增大，则一定面积上所受到的枪弹必减少，但是枪弹冲击的动量还是相等。另外一个现象即 X 射线使气体发生电离，也是光的旧理论难于解释的。如果波阵面是均匀的，它对于其行程上所遇到的分子应发生相同的效应，但实际上每百万个分子当中或者只有一个被电离。有许多理由说明。

这大概不是由于不稳固的分子太少。J. J. 汤姆生等人说这现象是由于 X 射线与光并不按宽的波阵面，而只沿局部的以太丝（法拉第的力管）前进的缘故。

接着，量子论又表示光在另一方面也不是连续的。为了解释全部事实和调和互相矛盾的观点，汤姆生设想“光是由质点组成的，每一质点为一闭合的电力圈，并伴有一列的波”。德布罗意引用新近的概念建立一个理论，将波的性质和微粒的性质联系起来，而成立一种新型的“波动力学”。一个运动的质点的性能像一个波群，其速度 v 与波长 λ 和质点的速度 v 及其质量 M 的关系为 $\lambda = h/mv$ ，式内 h 为普兰克常数。波的速度为 c^2/v ，式内 C 为光的速度，而 v 为质点与波群的速度。于是我们不能不注意到这些现代的光的理论 with 牛顿想像的微粒和波的综合体很相似。

原子结构

现代的原子理论开始于 1897 年，当时发现各元素都有阴电微粒，并且查明这些微粒即是电子。这一发现，也说明原子之所以有电的性质是由于其所含电子多于或少于电子的正常数目，而其光学性质则可以解释为电子的振荡。

这里指波的“相速度”。——译注

N. Bohr, The Theory of Spectra and Atomic Constitution, Cambridge, 2nd ed. 1924. A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien 4th ed. 1924. E. N. da C. Andrade, The Structure of the Atoms, London 1923. 3rd ed. 1927. B. Russell, The A. B. C. of Atoms, London, 1923.

勒纳德早期的观察大明，阴极射线能通过真空管内铝窗而至管外。根据这种观察，他在 1903 年以吸收的实验证明高速的阴极射线能通过数千个原子。按照当时盛行的半唯物主义者的看法，原子的大部分体积是空无所有的空间，而刚性物质大约仅为其全 390 部的 10^{-9} （即十万万分之一）。勒纳德设想“刚性物质”是散处于原子内部空间里的若干阳电和阴电的合成体。

这个关于必需的阳电荷的说法不能使人满意，于是 J.J. 汤姆生又进行了更有系统的尝试来描绘原子结构。

汤姆生以为原子含有一个均匀的阳电球，若干阴性电子在这个球体内运行。他按照迈耶尔（Alfred Mayer）关于浮置磁体平衡的研究证明，如果电子的数目不超过某一限度，则这些运行的电子所成的一个环必能稳定。如果电子的数目超过这一限度，则将列成两环，如此类推以至多环。这样，电子的增多就造成了结构上呈周期的相似性，而门得列耶夫周期表中物理性质和化学性质的重复再现，或许也可得着解释了。

但是 1911 年盖格（Geiger）和马斯登（Marsden）关于 α 射线撞击物质时形成散射的实验，使卢瑟福对于原子的性质采取另外一种看法。 α 质点的雾迹通常多是直线的，有时也有突然改变其方向的。阴电子加于 α 质点上的力势必很小，不能造成这种散射。但如果假定原子为空松结构的复杂体，含有一个凝聚为小核的阳电荷，而阴电子在原子内的空处围绕着核转动，则上述的效应便可得着解释。由于正常原子是中性的，所以，核里的阳电荷，必与所有电子的电荷之和量相等而性相反。而且由于电子的质量远远小于原子的质量，所以原子的质量几乎全部凝聚于原子核。

这一理论形成时，人们把原子看做是一个太阳系，把质重的核比拟为处于中心的太阳，而质轻的电子则类似绕核运转的行星。长冈（Nagaoka）于 1904 年研究了类似系统的稳定性，但首先用实验证据去支持这个看法的是卢瑟福。勒纳德关于阴极射线的吸收的研究与后来其他的实验表明，如果将原子比拟为以电子为行星的小太阳系，则原子内的空间，照比例说也必定象太阳系里的空间那么大。在这个行星式的电子理论中，牛顿物理学给予我们的先人之见，或许引导我们走得太远了，以至超过事实所能保证的境界，但是，就阴极射线与放射质点的贯穿性而论，原子确是一个很空松的结构。

一个运动的电荷带着一个电磁力场。由于它有能量，因而也必有惯性。所以一个电荷具有一个类似质量的东西，也许就具有我们所谓物质的基本成分的本质。如果以电荷为中心，画一小球以代表电子，则与这球外的力场相联系的有电磁质量。J.J. 汤姆生据数学分析表明，除非电荷以极大速度运行，其电性质量为 $2e^2/3r$ ，式内 e 为电荷， r 为其半径。因此，如果假定所有的电磁能量都在电子之外，则根据已知的质量与电荷值，便可计算出其半径。这样算得电子的半径为 10^{-13} 厘米。如果假定半径 r 很小，换言之，如果将电荷浓聚，则其有效质量也增大（参看下面所说的新的研究）。与电子相当的阳性单元，即氢的原子核，叫做“质子”。它的质量，基本上等于原子的质量，即阴电子的质量的 1800 倍。因此，如果假定所有质量都是有电性的，而原子核是围绕着一个点状阳电荷的球，则原子核的半径就仅是电子半径的 $1/1800$ ，或约为 5×10^{-17} 厘米。但须在此申明，这些估计是根据一项关于电荷分布的武断假定。现在，这些估计的价值已经很可疑了。

这些概念在当时虽有帮助，而现在已经经过修改。但是我们仍须假定氢原子是由一个单位的阳电核和其外围的一个阴电子所组成的。氢的原子核为