

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中小學生課堂故事博覽

經典絕境逢新生

近代物理的故事



经典绝境逢新生
——近代物理的故事

微型“太阳系”

在汤姆逊发现电子的前一年，物理学上还有一个重大的发现，那就是法国物理学家贝克勒尔和比埃尔·居里、居里夫人发现了元素的天然放射性现象。

首先是伦琴发现了X射线，证明阴极射线照射玻璃管壁的时候，不仅产生了绿色的荧光，而且会产生一种穿透力很强的X射线，X射线使很多科学家发生兴趣，除汤姆逊之外，贝克勒尔也是其中之一。他很想知道，X射线同荧光究竟有什么关系。比如，荧光物质在受到太阳光照射发出荧光的同时，是否也会放出X射线呢？

贝克勒尔弄来了很多荧光物质，他选择了含铀矿石。试验方法也很简单：含铀矿石下面放一张用黑纸严密包着的照相底片，含铀矿石经太阳光照射后发出荧光，如果底片“安然无恙”，那就表明没有X射线放出；如果底片感光了，那就说明经太阳光照射的含铀矿石也能发出X射线。

1896年春天贝克勒尔开始试验。事情不巧，那几天天气不好，总是阴雨，不见阳光，他只好把准备好的含铀矿石和黑纸包着的底片一起放到抽屉里。

几天之后，雨过天晴，贝克勒尔在正式进行试验之前，决定先把几张底片拿出冲洗，看看是否漏光失效。冲洗的结果使他大吃一惊，底片居然感光了，而且感光部分的形状正好同含铀矿石的形状完全一致。黑纸没有漏光，含铀矿石也没有受到阳光照射，那么，是谁使底片感光的呢？

经过多次反复实验，证明使底片感光的是含铀矿石中的铀元素放出来的一种看不见的射线，这种射线的穿透力比X射线还强，而且不管外界条件如何改变，它总是不断地放出这种射线。

就这样，贝克勒尔虽然没有完成他预想的试验，但却意外地取得了一项有助于其他科学家更接近于了解原子究竟是什么的发现。人们把物质的这种自发地放出射线的现象叫做放射性现象，而铀就是人类找到的第一种放射性物质。

这项发现引起了另外两位法国青年物理学家比埃尔·居里和居里夫人的注意。他们深入地研究了铀的放射性现象，发现含钍的化合物也有放射性。

在提炼纯铀的过程中，他们又发现作为原料的沥青铀矿的放射性比铀和钍强得多。这说明，铀矿石中除了含有放射性铀之外，一定还含有其他放射性比铀、钍更强的元素。

经过两年的努力，一种放射性比铀强400倍的新元素找到了，取名叫做钋。以后又经过4年的艰辛劳动，从30多吨铀矿石中，提炼到了0.1克另一种新元素——镭的化合物，镭的放射性比铀强几百万倍！放射性的发现告诉我们原子是可以分割的，且有自己的内部结构。

从放射性元素放射出来的射线究竟是什么呢？它们看不见、摸不着，不断地放射，似乎永不停息。

出生在新西兰的英国物理学家卢瑟福解开了这个谜。他让放射性元素发出的射线通过很强的磁场，结果分成了三部分，原来它是由三种射线组成的。

第一种射线根本不受磁场的影响，笔直向前，说明它不是带电的粒子，而是一种像光一样的能量波，卢瑟福把它叫做 γ 射线， γ 射线的穿透力很强。

第二种射线会在磁场中偏转，偏转得比较厉害，偏转的方向与阴极射线相同，说明它是由带负电的粒子组成的。进一步的研究证明，这种射线就是

同阴极射线一样的速度很高的电子流，卢瑟福把它叫做 β 射线。 β 射线的穿透能力比较强，能穿透大约半毫米厚的铝片。

第三种射线也会在磁场的影响下偏转，但偏转的程度不如 β 射线大，偏转的方向与 β 射线正好相反，这说明它是一种带正电的粒子流，卢瑟福称它为 α 射线。 α 射线的穿透能力最小。一张纸片就可以把它挡住，1/50 毫米的铝片它也穿不过去。

卢瑟福对 α 射线特别感兴趣。通过深入研究，他发现 α 射线是带有两个正电荷的粒子流，粒子的质量几乎等于氢原子的质量，很可能就是氢原子的正离子，即失去了两个电子的氢原子。

原子不像人们原先所想象的那么简单，它不仅是分割的，而且内部结构一定挺复杂。

卢瑟福的老师汤姆逊第一个发现了电子。原子中含有电子，那么原子的其他部分又是什么呢？

汤姆逊根据自己的实践经验，又借鉴了别人的研究成果，认定一个原子不可能仅仅由电子组成，因为不然的话，这些电子会“同性相斥”而全部散射开来，宇宙间也就除了看不见的电子之外什么也不存在了。

我们平时看到的物质原子全都是中性的，不带电。那么，原子的其他部分必然带有正电，以便与电子所带的负电相平衡。原子中每个电子所带的每个负电荷，必然在原子的其他部分中存在着一个与之相对应的正电荷。

那么这些正电荷又在原子的哪个部分呢？它们在原子中是怎样分布的呢？

1904 年，汤姆逊根据元素化学性质的周期性，反复推敲出了一个“葡萄干蛋糕式”的原子模型。他认为，原子中带正电的部分是均匀地分布在原子球体之中的，而带负电的电子则在这个球体之中运动，就像一块蛋糕里夹着一些葡萄干一样。这个设想非常简单，但是设想是不是事实，还需要通过实践来检验。这项使命后来落到了汤姆逊的学生卢瑟福身上。

原子本身已微不可见，它的内部结构当然更加难以把握。卢瑟福和他的助手首先发明了一种“计数管”，可以数出通过 α 粒子的数目； α 粒子打到硫化锌荧光屏上，还会闪现一下亮光。

根据汤姆逊的原子模型， α 粒子通过“葡萄干蛋糕式”的原子时只能产生很小的偏转，因为在 α 粒子进入原子之前，中性的原子不会对它起作用；进入原子后，电子的质量只有 α 粒子的 1/7000， α 粒子同电子相撞，犹如一个大铁球同一个小玻璃球相撞一样，影响甚微。至于正电荷，由于它们均匀分布在原子中，力量分散，对 α 粒子的偏转也不会产生多大的影响。

卢瑟福开始是相信汤姆逊模型的，他想用实验来加以证实。实验装置很简单：用 α 粒子作“炮弹”，一片极薄的金属箔片作靶子，靶子后面是用来记录打靶结果的荧光屏。如果原子的内部结构真像汤姆逊所说的那样，那么， α 粒子就能几乎不受任何阻碍，轻而易举地穿透金属箔片打到荧光屏上。

但是实验结果使卢瑟福大吃一惊：极少数的 α 粒子撞击金属箔片后的运动方向竟然发生了很大的偏转，有的甚至干脆被弹射回来。

经过多次观察，卢瑟福得出结论：平均每发射 8000 个 α 粒子，就有一个发生大角度的偏转或弹回。他把这种现象叫做 α 粒子的散射现象。

事实终于迫使卢瑟福来反对自己的老师了。事实证明，个别 α 粒子的大角度偏转或弹回，用汤姆逊模型是无论如何也解释不了的；原子不仅不是非

常密实的球体，而且它内部的绝大部分空间是空着的。可以估算出来，原子中带正电的物质只有集中在一个极小极小的核心里， α 粒子只有同这个距离它 $1/10000$ 亿厘米、质量比它大许多倍的正电荷核心相遇时，才会发生那么强大的斥力，把 α 粒子弹向一边。

于是，卢瑟福提出了一个原子结构的模型。这个模型就像一个微型的“太阳系”：“太阳”位于原子的中心，被叫做原子核；电子则像“行星”一样，绕着原子核急速旋转。不同的是在这个微型的“太阳系”里，“太阳”和“行星”都是带电的，“行星”都是一样大小，支配着“微型太阳系”一切的是强大的电磁力而不是万有引力。

卢瑟福的原子有核结构模型得到了一系列实验的证实，终于成为原子结构的基本观点。

电子的发现

电子是人们最早发现的带有单位负电荷的一种基本粒子。英国物理学家汤姆逊是第一个用实验证明电子存在的人，时间是 1897 年。

汤姆逊是一位很有成就的物理学家，他 28 岁就成了英国皇家学会会员，并且担任了有名的卡文迪许实验室主任。

X 射线的发现，特别是它可以穿透生物组织而显示其骨骼影像的能力，给予英国卡文迪许实验室的研究人员以极大激励。汤姆逊倾向于克鲁克斯的观点，认为它是一种带电的原子。

导致 X 射线产生的阴极射线究竟是什么？德国和英国物理学家之间出现了激烈的争论。德国物理学家赫兹于 1892 年宣称阴极射线不可能是粒子，而只能是一种以太波。所有德国物理学家也附和这个观点，但以克鲁克斯为代表的英国物理学家却坚持认为阴极射线是一种带电的粒子流，思路极为敏捷的汤姆逊立即投身到这场事关阴极射线性质的争论之中。

1895 年，法国年轻的物理学家佩兰在他的博士论文中，谈到了测定阴极射线电量的实验。他使阴极射线经过一个小孔进入阴极内的空间，并打到收集电荷的法拉第筒上，静电计显示出带负电；当将阴极射线管放到磁极之间时，阴极射线则发生偏转而不能进入小孔，集电器上的电性立即消失，从而证明电荷正是由阴极射线携带的。佩兰通过他的实验结果明确表示支持阴极射线是带负电的粒子流这一观点，但当时他认为这种粒子是气体离子。对此，坚持阴极射线是以太波的德国物理学家立即反驳，认为即使从阴极射线发出了带负电的粒子，但它同阴极射线路径一致的证据并不充分，所以静电计所显示的电荷不一定是阴极射线传入的。

对于佩兰的实验，汤姆逊也认为给以太说留下了空子，为此，他专门设计了一个巧妙的实验装置，重做佩兰实验。他将两个有隙缝的同轴圆筒置于一个与放电管连接的玻璃泡中；从阴极 A 出来的阴极射线通过管颈金属塞的隙缝进入该泡；金属塞与阴极 B 连接。这样，阴极射线除非被磁体偏转，不会落到圆筒上。外圆筒接地，内圆筒连接验电器。当阴极射线不落在隙缝时，送至验电器的电荷就是很小的；当阴极射线被磁场偏转落在隙缝时，则有大量的电荷送至验电器。电荷的数量令人惊奇：有时在一秒钟内通过隙缝的负电荷，足能将 1.5 微法电容的电势改变 20 伏特。如果阴极射线被磁场偏转很多，以至超出圆筒的隙缝，则进入圆筒的电荷又将它的数值降到仅有射中目

标时的很小一部分。所以，这个实验表明，不管怎样用磁场去扭曲和偏转阴极射线，带负电的粒子又是与阴极射线有着密不可分的联系的。这个实验证明了阴极射线和带负电的粒子在磁场作用下遵循同样路径，由此证实了阴极射线是由带负电荷的粒子组成的，从而结束了这场争论，也为电子的发现奠定了基础。

如何成功地使阴极射线在电场作用下发生偏转？早在 1893 年 赫兹曾做过这种尝试，但失败了。汤姆逊认为，赫兹的失败，主要在于真空度不够高，引起残余气体的电离，静电场建立不起来所致。于是汤姆逊采用阴极射线管装置，通过提高放电管的真空度而取得了成功。通过这个实验和提高放电管真空度，汤姆逊不仅使阴极射线在磁场中发生了偏转，而且还使它在电场中发生了偏转，由此进一步证实了阴极射线是带负电的粒子流的结论。

这种带负电的粒子究竟是原子、分子，还是更小的物质微粒呢？这个问题引起了汤姆逊的深思。为了搞清这一点，他运用实验去测出阴极射线粒子的电荷与质量的比值，也就是荷质比，从而找到了问题的答案。

汤姆逊发现，无论改变放电管中气体的成分，还是改变阴极材料，阴极射线粒子的荷质比都不变。这表明来自各种不同物质的阴极射线粒子都是一样的，因此这种粒子必定是“建造一切化学元素的物质”，汤姆逊当时把它叫做“微粒”，后来改称“电子”。

至此可以说汤姆逊已发现了一种比原子小的粒子，但是这种粒子的荷质比 10^7 约是氢离子荷质比 10^4 的 1000 倍。这里有两种可能，可能电荷 e 很大，也可能质量 m 很小。要想确证这个结论，必须寻找更直接的证据。

1898 年，汤姆逊安排他的研究生汤森德和威尔逊进行测量 e 值的实验，随即他自己也亲自参与了这项工作。他们运用云雾法测定阴极射线粒子的电荷同电解中氢离子所带的电荷是同一数量级，从而直接证明了阴极射线粒子的质量只是氢离子的 1%。

质子的发现

19 世纪末、20 世纪初，贝克勒尔和居里夫妇发现了放射性现象。卢瑟福仔细研究了射线，证明那是由 α 、 β 、 γ 三种射线组成的。 β 射线是如同阴极射线的高速电子流， γ 射线是类似 X 射线的电磁辐射，那么 α 射线呢？

通过艰难的探索，卢瑟福证明 α 射线是由带正电的粒子组成的，每个 α 粒子上的电荷是一个电子的两倍，质量是电子的 7300 倍。接着他又设法让 α 粒子吸收电子，抵消正电荷，结果是——他得到了氦。

从放射性元素里居然产生了氦元素，这就证明了他和索迪早在 1902 年就提出的理论：放射性是某些元素的原子自然裂变的表现，裂变的结果是使这种元素变成了另一种元素。

1911 年，卢瑟福通过用 α 粒子轰击金箔的实验，证明原子中有带正电的原子核存在， α 粒子其实就是氦原子的原子核。原子核实在太小了，直径只有 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米，不及原子直径的 0.1%。

后来，卢瑟福又用 α 粒子去轰击氮原子核，结果得到了氧核和氢核。

人们知道最轻的元素是氢元素，最简单的原子是氢原子。氢原子只有一个电子，绕着只带一个正电荷的原子核旋转。有那么多原子核，它们带的正电荷都是氢原子核电荷的整数倍，质量也差不多是氢原子核质量的整数

倍。这样看来，各种各样的原子核不都可以看成是由氢原子核组成的吗？

于是，带一个正电荷的氢原子核就被叫做质子，正因为质子很重要，是构成一切原子核的基本材料，所以科学家们用质子——希腊文中“第一”的意思来命名。

质子带正电的电量与电子所带负电的电量相等，都是一个电荷单位，但它的质量比电子大得多，是电子的 1836 倍。

卢瑟福 1919 年的实验，可以说是人类第一次用人工的方法从原子核中击出了质子。

中子的发现

1932 年，英国物理学家查德威克宣布发现了一个全新的粒子——中子，这个发现标志着探索原子核的实验工作和核结构的理论研究进入一个新的阶段。

在查德威克发现中子之前，虽然已有迹象表明，存在着一种电子性的粒子，可是当时谁都没有能抛弃常规的旧观念而向前迈进一步。如卢瑟福在用 α 粒子轰击氮的研究过程中，就认为存在着一种电中性粒子，这种粒子不能被束缚在任何容器之中，他想象这种粒子大概是由当时已知的质子和电子结合而成，因为质子带正电荷，电子带负电荷，两者结合就变为电中性。

此后，玻特和贝克发现用 α 粒子轰击铍原子时会产生一种穿透力极强的射线。约里奥·居里夫妇对这种射线进行研究，他们用石蜡把铍板和测量仪器隔开，结果发现当有石蜡插在中间时仪器记录到的效应比中间没有石蜡时要显著得多，也就是观察到石蜡中放射出一种强质子流的放射现象难以解释。

这时查德威克也一直在进行铍辐射的研究，他敏锐地觉察到铍辐射决不是 γ 辐射，很可能就是卢瑟福早先预言的，也是他多年寻找的中子辐射。于是对这种射线进行更细致的研究，并使用了各种记录快速粒子的方法，结果在 1932 年取得令人信服的证据。证明这种中性粒子确实存在，而且其质量与质子的质量相等，这种粒子并不是卢瑟福所假设的那种质子和电子的复合粒子，而是一种全新的粒子。除了不带电荷外，其基本性质与卢瑟福提出的质子几乎一样，查德威克便把这种粒子命名为中子。

中子发现后不久，伊凡宁柯和海森伯都提出了原子核是由质子和中子构成的假说，这个假说成功地解释了核的角动量及其统计性质，说明了同位素的存在，并且使人们对原子核的结构有了新的认识。

介子理论

介子是在探索核力性质时提出的。

由于原子核一般很稳定，这表明核子，即质子和中子之间结合得很紧。但中子不带电，而质子又互相排斥，这种结合力究竟从何而来？而且，这种力只存在于核内，在核外部无作用。为了解释核力的这种特殊性质，日本物理学家汤川秀树提出一种大胆设想：如果利用各种已知的粒子都不能解释核力的话，那么这里面很可能就隐居着新的粒子。于是他模仿电磁作用力的传递机制，对核力的来源提出一个理论——介子理论。

汤川幼时没有任何可能成为物理学家的迹象，他对文学深感兴趣，是什么因素使汤川弃文转向物理学呢？他在晚年回忆说，当他还在中学时，使他走上研究物理学道路的一个重要因素，是人们在日本人中间找到了一位伟大的物理学家——长冈半太郎。汤川把长冈视为楷模。

长冈在决定从事物理学研究之前也犹豫过，他也怀疑过东方人在研究自然科学方面的能力。但当他了解到东方人特别是中国人在过去对科学的贡献曾远远领先于欧洲之后，便毅然决定做一名职业物理学家。长冈曾说：“我如果不能进入先进的研究者行列，并对某一个学术领域做出贡献，那么生而为人就毫无意义。”长冈后来成为磁学、光谱学和原子物理学的一位著名科学家。所有这些，都促使汤川下决心为物理学献身。

汤川是在日本接受全部教育的，而且大部分是在京都读书。在一定程度上，他又是自学成才的。因为当时在日本没有专门研究量子力学的人，以至连懂得这个理论而能够开这门课的人也没有。于是他和他的同学朝永振一郎一起学习量子力学，一部分是从原始论文上学，一部分则是从书本上学。相互帮助，共同切磋。

针对核力的解释，汤川探讨了与核力场有关的量子特征。他认为，作为核力及 β 衰变的媒介存在的新粒子具有有限的静止质量，而他作出这个推理时，所用的理论只不过略超出一点测不准原理和相对论。他估计，该粒子的静止质量大约是电子质量的200倍。把这种粒子称为介子正是表示其质量介于质子与电子之间。

介子理论起初并没有引起很大轰动，因为那时还没有人看到与汤川的假设相类似的粒子。然而1936年，美国的安德森和尼德迈耶尔在研究宇宙线中发现了一种质量为电子207倍的带电粒子，称为 μ 介子，于是汤川的介子理论开始受到人们的重视。

可是，当初在宇宙线中发现的这种介子平均寿命很长，比汤川理论所预言的要大许多倍。为解决这一困难，日本的谷川、坂田和井上及美国的贝特和马沙克，各自独立地提出了一个假设，即观察到的 μ 介子是汤川介子的衰变产物，而尚没有人观察到汤川介子。直至1947年，美国的鲍威尔等人在宇宙线中发现了另一种粒子，认定是汤川所预言的介子，被命名为 π 介子。

从40年代末到50年代末，人们又陆续发现了一些新的基本粒子。这些新粒子都有一种奇特的性质，就是它们都产生得快，衰变得慢。这表明它们在产生过程中起作用的是类似核力的强相互作用，而在衰变过程中却受支配于 β 衰变时出现的那种弱相互作用，两者相差 10^{13} 倍。这种情况颇令人费解，因此人们把这些新粒子统称为奇异粒子。其中有1947年发现的比 π 介子重的 K^{π} 子，比质子、中子重的兰姆达超子和西格马超子；1954年发现的克西超子。

尤为值得一提的是，1959年我国著名物理学家王淦昌在前苏联杜布纳联合原子核研究所，利用10GeV的质子同步稳相加速器和他们自己制造的24L丙烷气泡室，从4万张照片中发现了反西格马负超子，从而引起物理学界新的轰动。

“窃能贼”中微子

β 衰变是指原子核自发地放射出 β 粒子或俘获一个轨道电子而发生的转变。在研究 β 衰变的初期，人们在实验上遇到一个难以理解的事实，那就是

电子所带走的能量，总比原子核放出的能量要少得多，而且这个能量值每次都不相等。换句话说，原子核所释放的能量有一部分“失窃”了。

围绕着这一桩“窃能”案，物理学家们展开了一场激烈的争论和“破案”工作。

有些大胆的物理学家甚至是物理学权威对 β 衰变中能量是否仍然守恒提出了疑问。如著名的丹麦物理学家玻尔认为，能量守恒定律只是在许多次衰变过程中在平均的意义上才有效，而并非在每一次衰变中都能成立。又如量子力学创始人之一的奥地利物理学家薛定谔也对这种能量守恒只是一条统计定律的说法，表示十分赞赏。

在此之前，德国物理学家索末菲在他那本著名的《原子结构和光谱线》一书中，也曾考虑放弃能量守恒定律的严格确实性。他说：“因此，对于必须应用的波动理论的最温和的修正，是不能承认能量定理对于单个辐射现象是适用的，并且承认它仅仅在很多过程取平均时才是适用的。”

物理学权威们对能量守恒定律表示了怀疑。能量守恒定律在 β 衰变中被破坏和不适用了。这种看法引起了物理学界思想的极大混乱，要是这个定律真的被推翻了，整个物理学的宏伟大厦和精巧建筑会毁于一旦。

这种怀疑和看法，后来被验证是错误的。那么，这些物理学权威们为什么要去怀疑能量守恒定律，提出能量守恒定律不适用的看法呢？产生这种情况是有其原因的。

早在爱因斯坦提出光量子概念，即把光看作是由一份份独立的能量子——光子组成的这一崭新概念时，就没有得到有关物理学权威的承认。他们认为光子说很难被接受，因为它与传统的波动说是那样格格不入，且无法解释光的干涉等波动所特有的效应。

在他们看来，光子说虽有某些特定的实验根据，实际上不过是早已被推翻了的微粒说在新形式下的复活；而波动说虽然在个别实验的解释上遇到困难，但支持它的实验事实却比支持光子说的多得多，新观点怎么能与经过千锤百炼、近乎炉火纯青的旧理论相匹敌呢？但是，作为光子说重要实验根据的光电效应又该怎样用传统的波动说来解释呢？为了“拯救”物理学，这些权威们作了一个异乎大胆的然而又是十分错误的选择，那就是不坚持能量和动量守恒的普遍适用性。因为这样就提供了用传统的波动说“解释光电效应唯一的可能性”，可是他们的这个选择最后是失败了。

基于不承认光子说这样一个保守的原因，他们为着保持辐射的经典的波动理论，于是对 β 衰变中能量守恒问题再次提出了疑问。有的权威声称：“在原子理论的现阶段，我们可以说，无论是从经验上还是从理论上都没有理由坚持在 β 衰变中能量一定守恒。原子的稳定性迫使我们放弃的也许正是能量平衡的观念。”其结果是在 β 衰变能量“失窃”案的侦破中，同样导致了失败。

就在这样一个紧要关头，有一位年轻的物理学家泡利却非同凡响，提出了自己的崭新见解。他预言：能量守恒定律是有效的；在 β 衰变过程中放出了一个难以探测到的中性粒子，而这中性粒子在不知不觉中带走了原子核释放的能量。

1930年12月，泡利向在杜宾根参加放射性工作会议的人们写了一封信。就在这封信中，泡利叙述了他所预言的中性粒子，并给此新粒子取名为“中子”。有了这个预言中的新粒子， β 衰变中能量守恒的困难就可迎刃而解，

这个“窃能”案也就可以破了。

泡利的这个预言太新奇了，立即引起了当时在哥本哈根的意大利物理学家费密的注意和欣赏。他运用泡利的观点，成功地解释了原子核的 β 衰变，提出了一种新的自然力——弱相互作用理论。费密还给那个“窃能贼”取了一个十分风趣的名字——中微子，意思是“微小的中性小家伙”。

尽管泡利的这个预言简单明确，但当时大多数物理学家对此却持怀疑的态度。物理学家们真是感到左右为难，放弃基本的能量守恒定律吧，他们忧心忡忡；承认中微子吧，实验物理学家不论怎样努力寻找，却又始终未能找到这种新粒子。

这一时期物理学家把实验中出现的矛盾，归之于基本物理定律在原子核中不适用，如对能量守恒定律表示怀疑，而不是去怀疑原子核的内部组成，产生这种错误的认识也是有一定原因的。

首先，当时人们所认识的“基本粒子”寥寥无几，除去光子，能够组成物质的算来只有质子、电子，不要说 α 粒子，连卢瑟福认为的中子也只是质子、电子的复合体，实际上是特殊的原子核，如何设想在认识非常有限的“基本粒子”的基础上能提出新的原子核的组成理论呢？

其次，时代的局限性，限制了人们提出新粒子的可能性。尽管在理论和实验上都显示出新粒子被发现的曙光，但正如狄拉克所说：“在那些日子里，情况就是这样，人们非常不愿意提出一个新粒子。”也就是说，在那时提出一个新粒子的科学预言需要巨大的勇气和胆识。正是有了这种勇气和胆识，才使泡利在纠正所谓能量守恒定律不适用的错误中作出了不懈努力和杰出贡献。

中微子的科学预言在理论上是令人满意的，它完全说明了在 β 衰变过程中“失踪”的能量去向何方，圆满地解决了一些矛盾。然而，在人们尚未捕获中微子之前，预言仅能作为一种假说。

要证实假说，就得通过实验去捕捉中微子。由于中微子不带电，作用极为微弱，捕捉它就显得很困难。中微子是以光速运动的，但它并不是光子。光子非常容易同物质粒子作用，当它们通过物质时很容易被吸收掉。而通过 β 衰变放射出来的中微子却不会被物质吸收。它要穿过大约1000亿个地球才会与其内的一个原子核碰撞一次。多么神秘的穿透力！即使做成像地球那么大的探测器，当有1000亿个中微子通过时，大约只能探测到1个。中微子的主要奥秘就在于此。

尽管捕捉中微子如此之难，不少物理学家仍然千方百计去寻找它。1941年，我国著名物理学家王淦昌提出通过轻原子核俘获K壳层电子释放中微子时所产生的反冲探测中微子。在这类过程中，所产生的原子核的反冲能量和动量将仅仅同发射的中微子有关。他把自己的设想写成《探测中微子的建议》一文发表于1942年1月出版的美国《物理评论》杂志

王淦昌的论文发表不过几个月，美国物理学家阿伦就据此做了的K电子俘获实验，证明了丢失的能量和动量正好符合中微子的要求，这是显示中微子存在的第一个实验。王淦昌的设想和阿伦的实验，被认为是1942年世界物理学的重要成就之一。

当然更为直接的实验是对已被放射出来而脱离源的中微子进行探测。这个实验直到1956年由美国洛斯阿拉莫斯实验室的柯温和莱因斯完成。他们用了200升水和370加仑液体闪烁体做成探测器，埋在美国一个核反应堆附近

很深的地下，来探测核反应堆放射出来的极强的中微子。经过相当长的时间，才成功地探测到了为数不多的中微子。

柯温和莱因斯的实验是这样设计的：当反中微子 $\bar{\nu}_e$ 射到水中与质子碰撞，便发生下面的反应过程 $\bar{\nu}_e + p_n \rightarrow e^+ + n$ ，由此放出的正电子经过减速后与电子湮没，转化成两个 γ 光子。这些光子同时射入两边的两个液体闪烁体，产生一个符合信号。所谓符合信号是两个闪烁体同时记录到 γ 光子而产生的信号。这个信号的出现就表明在水中发生了 e^+e^- 的湮没过程。

值得注意的是，上述过程还产生了一个中子 (n)，它将经过很多次碰撞，约经过数微秒后，被掺在水中的一个镉 (Cd) 原子核吸收，同时产生若干个 γ 光子 $n + Cd^* \rightarrow Cd + \gamma + \gamma + \dots$ 。这些 γ 光子再进入闪烁体，又产生一个延迟符合信号。这个信号的出现进一步证明在水中确实发生了上述过程。柯温和莱因斯就是用这种实验方法证实 $\bar{\nu}_e$ 存在的。

这样，20 多年的“窃能”案终于被彻底侦破，中微子也就归了案。后来随着人们对弱相互作用的理解加深，对中微子的认识也更清楚了。现在已知道，太阳及遥远的星体内部发生核反应时都会产生中微子，中微子一经产生便向四面八方飞出，到处都有。特别在建造了核反应堆这个强大的中微子源后，虽然中微子只有 $1/10^{20}$ 的捕获率，但依靠现代物理仪器也足以能探测到它的存在，并把它捉拿“归案”。

黑体辐射

1859 年 10 月 20 日，35 岁的中年教授基尔霍夫从海德堡提交了他的第一篇热辐射论文。全篇论文虽然只有两页，却引起了科学思想的又一场革命。

该年 7 月，是一个阳光灿烂，适于做实验的日子。在海德堡大学一间宽敞的实验室里，基尔霍夫正在专心致志地做着物质吸收光的实验。他把一个三棱镜和光屏放置在靠窗口的长桌上。窗口用布遮盖起来后，便走到棱镜一侧，把酒精灯点燃，用它去烧灼准备好的食盐。被烧灼的食盐立即升起黄色的钠光。钠光透过三棱镜，映在了对面的光屏上。光屏立即显现了两条黄色的明线。

然后，他又轻轻地转过身去，掀起布的一角，让窗口的太阳光通过钠光和棱镜照到光屏上，看看会有什么变化。果然出现了变化：当太阳光较弱时，明线仍然存在；当逐渐增强太阳光，达到某一强度时，明线消失，并在同一位置上出现两条暗线。他把烧灼的食盐拿掉一些，暗线又消失了。基尔霍夫观察到此，内心为之一阵激动，因为他发现了一个不同寻常的物理新现象。

作为严谨治学的实验物理学家是绝不会放过偶然出现的新现象的。他一次又一次重复实验：顺手把拿掉的食盐放回原处，只见光屏上的两条暗线又出现了；当再遮住太阳光时，只见光屏上出现的是两条明线，这究竟是什么原因呢？

经过苦苦思索，基尔霍夫对这一现象的研究过程中，突然心领神会，原来是“物体会发什么光，便会吸收什么光”。也就是说，在上述实验中，金属钠原子能发出两条黄色的明线，因而它从太阳光中吸收与之相同波长的光，并在被吸收掉光的部分留下黑色的痕迹，即出现两条暗线。于是，基尔霍夫又换用其他物质，以相同的方法，反复进行实验，结果得到了相同的结果。由此，他发现了热辐射的定律，后被称为基尔霍夫定律：任何物体的发

射本领和吸收本领的比值与物体特性无关，是波长和温度的普适函数。

作为善于思考的理论物理学家从热辐射定律又引出一种崭新的想法：如果自然界能找到一个这样的物体，对它加热后，随着温度的不同能发出各种光时，它也同样会吸收掉与之对应的各种光，那么这个物体就可称为一个完全“黑”的物体了。顺着这个思路，基尔霍夫于 1862 年提出了理想黑体的概念。

理想黑体是从观察自然中抽象出来的一种物理模型。理论分析表明，一种理想黑体能够全部地吸收投射到它上面的一切辐射，而在同样温度下，它所发出的热辐射也比任何其他物体为强。对于理想黑体，不论其组成的材料如何，它们具有在相同温度下发出同样形式的辐射能量。因此，研究这样的黑体辐射，具有很大的理论意义和实际意义。

然而实际上黑体是不存在的，但可以用某种装置近似地代替黑体。它是一个带有小孔的空腔，并且小孔对于空腔足够小，不会妨碍空腔内的平衡。通过小孔射入空腔的所有辐射经腔内壁多次反射后，几乎全部被吸收，再从小孔射出的辐射极少。

基尔霍夫认为黑体辐射也可称为空腔辐射，他给出了空腔辐射的有效定义：“已知一空间被许多温度相同的物体所闭合，没有辐射能穿透出去，于是这空间中的每束辐射其组成在性质和强度方面与来自同温度的一个理想黑体的辐射一样。”

于是，基尔霍夫向理论学家和实验学家提出了相似的挑战。基尔霍夫强调实验上存在着特大的困难是有道理的，因为实验学家必须解决下列三个问题：

- (1) 构造一个具有理想黑体特性而又易于办到的物体；
- (2) 装置具有相当灵敏度的辐射探测器；
- (3) 找到将测量扩展到的频率范围的方法。

为了回答基尔霍夫提出的挑战，人们足足做了 30 多年的实验才得到较为足够的数据。1893 年，一位年仅 29 岁的德国青年学者维恩从热力学第二定律出发，结合新设计的实验，首先推演出黑体辐射的位移定律。

维恩从 1891 年来到柏林国立物理研究所后，就悉心从事黑体辐射的研究。面对当时科学界正在寻找理想黑体终无所得而束手无策时，他却充分地显示了自己的才能。这就是专门设计了一只箱子，箱子内壁全涂成黑色，形成一个空腔，上面开有小孔；为了加强吸收效果，又在空腔壁上装了许多带孔的横壁，从而使得辐射更不容易直接反射出去。

春天来临，经过无数次实验和思考的维恩，终于发现黑体的温度（绝对温度）同所发射能量最大的波长成反比，即维恩位移定律。

1896 年，维恩把热力学考察和多普勒原理结合起来，应用到空腔辐射的压缩。他指出，在一定温度下的辐射密度可以通过反射壁包围辐射区域的绝热收缩或绝热膨胀，转变到另一温度的辐射，从而得出了黑体辐射的能量按波长（或频率）分布的公式，又称维恩公式。这个公式的短波部分同实验数据很好符合，并足以解释为什么光谱的极大强度在黑体的温度升高时愈来愈向短波方向移动。

那么，维恩公式把空腔辐射的问题解决了吗？没有。1897 年，卢默尔和普林斯海姆对空腔的能量分布进行了测量，发现维恩公式只在波长较短、温度较低时才和实验结果相符，在长波部分却偏离很大、完全不能适用，由此

反映出经典物理学在解释黑体辐射规律时遇到了严重困难。

令人关注的黑体辐射，在英国也投入不少研究力量。特别是瑞利，这位出生贵族家庭的物理学家，时至 1900 年，尽管他已年过半百、颇有声望，可是依然积极致力于研究工作。

就在这一年，瑞利应用经典统计力学和电磁理论来计算一个封闭腔的热辐射。他指出，随着封闭腔被加热，那么腔中将建立一个电磁场，这个电磁场可分解成为一个具有不同频率和不同方向的驻波系统，每一个这样的驻波就是电磁场的一个基本状态。于是在一定频率间隔内的场能的计算变为去导出基元驻波的个数，由此得到一个新的热辐射公式。

可是瑞利在推导中错了一个因数 8，这个错误为英国当时只有 27 岁的金斯所发现。他于 1905 年给《自然》杂志的一封信中加以修正，即把原来的瑞利公式用 8 去除，得到了现在称之为瑞利—金斯公式。

这是企图用古典理论来处理黑体辐射的又一重要尝试。这个公式表明，辐射能量密度的频率分布正比于频率的平方。于是在长波部分与实验数据基本相符，但在短波部分却完全不相符合，因此此时按公式计算而得到的辐射能量将变成无穷大，显然这是不可能的。

古典理论与实验事实产生了很大的矛盾，这种情况曾被荷兰物理学家埃伦菲斯特称为“紫外灾难”。事实上，维恩公式与瑞利—金斯公式，各从一个侧面反映出物体辐射中的部分规律，但在解释全部热辐射现象却产生了矛盾和“灾难”，这就充分暴露了经典物理学本身的缺陷。

光电效应

光电效应是光从金属表面击出电子的效应。它是最早发现的量子现象，即最早发现的据说是不能作出经典解释的现象，人们把被实验事实所否定的经典机制描述如下：

“当辐射击中在原子内振动着的电子时，就将能量转移给电子。如果电场的振动频率恰好是原子中电子的共振频率，电子就会从光波中吸收能量直至它被释放出来。”

提出这一机制以后，人们就不厌其烦地向读者们证明它怎样地与实验事实不符，却从来不屑于想一想这一机制从经典物理学的角度来看是否合理？其实，只要稍微细心一点，就能发现这一机制是经典物理学所不允许的。

第一、实验证明：光只有照射金属才发生光电效应，金属的特点是有大量自由电子，可见光电效应是光与自由电子的相互作用。而自由电子不能有“强迫振动”，因为它没有强迫振动所需要的恢复力（阻止电子逸出金属表面的力是单向的，不是恢复力）。

第二、即使金属中有电子在光作用下强迫振动，其共振频率将是光的频率，因此其振幅将小于光的波长（否则电子的速度将超过光速）。如此频率极大而振幅极小的振动又怎能使电子脱离金属呢？

当然，根据力学原理，即使没有恢复力，电子在光波中也会振动，但这不是本来意义下的“强迫振动”，其振幅也小得不能为宏观仪器所察觉。从这一点出发，我们可得到光电效应的经典解释：

当电子在光波中达到电动平衡时，它将在光的电场作用下振动，在光的磁场作用下以交变的角速度运动，我们称这种运动为“光致运动”。这种运

动使电子激发一个附加的驻波场，我们称它“光致波包”。此外，我们把电子的光致运动的平衡点的运动称为“整体运动”。一般地说，电子在光波中的这种整体运动是等速直线运动，于是电子在光波中有三种运动形式：内部运动、光致运动和整体运动。电子在真空中则没有光致运动，只有内部运动与整体运动。

当电子从真空进入光波时，将从真空中的电动平衡过渡到光波中的电动平衡，这是一个整体过程，我们称它为“入光过程”。在入光过程中，电子将产生光致运动，建立光致波包，为此，电子将从光波中吸收能量，即吸收一份光波。此外，电子的整体运动状态也将因此而改变，从一种等速直线运动状态过渡到另一等速直线运动状态。

电子在入光过程中所吸收的那一份光波，乃是原光波的一部分，从而是一份有限的单色光波波列，由于有限，单色只是近似的，这份光波就是一个爱因斯坦的“光量子”或“光子”。

这份光波作为从原光波中分离出来的一部分，可以用能量 ε 和动量 p 来描写它，即把它看作一个以光速运动的物体。另一方面，作为一个波列，又可用

频率 ν 和波数 σ 来描写它，其中 $p = \frac{\varepsilon}{c}$, $\sigma = \frac{\nu}{c}$ 。

根据相对论容易证明，当参照系改变时， ε , p , ν , σ 都将改变，但比值则保持不变。这样，普朗克——爱因斯坦关系 $\varepsilon = h\nu$, $p = h\sigma$ 就不再显得像一个斯芬克司的哑谜了。但是这一关系式中的常量恰好是普朗克常量

$$h = \frac{a \pi m^0 c^2}{w^0}$$

则要求从理论上证明（这要求更细致的电子模型）。爱因斯坦和德布洛依心爱的波与粒子的神秘对称性，已经不再是什么“解释”了。

当光照射金属时，金属中的自由电子经历入光过程，吸入一个光子并从静止转入运动，并因此逸出金属表面，这就是光电效应。

这种经典机制可解释最初发现的实验事实：首先，入光过程极为短促，因此光电效应没有明显的“惯性”；其次，光越强，入光过程越短促，因此就有越多的电子在两次与金属的晶格点阵碰撞的自由程内完成入光过程，成为“光电子”，因此，光电子的数目取决于光的强度；最后，电子进入光波以后的光致运动，决定于光的频率而与光的强度无关。因此电子在入光过程中所吸收的光波的能量及电子所获得的动能也决定于光的频率而与光的强度无关。

诚然，爱因斯坦的“光子”对光电效应的解释似乎更简单而准确，但这一成功却以一系列的挫折为代价。

60 年代，曼戴尔（Mandel）等人考察了两个独立激光之间的干涉。由于观测时间很长，使得“当下一个光子被两个光源中的任一个发射出来之前，上一个光子已被吸收”，却仍然获得干涉条纹影像，假若把其中的一支激光停掉，就什么干涉也没有。这似乎表明一个光束中的光子会同另一光束的“虚无”发生干涉。

早在 1909 年，泰罗（Taylor）就做过“单光子干涉”实验：先用强光拍下细针的衍射象，然后把光源衰减，相应地增加曝光时间。最后一次曝光长达 3 个月，相应的光弱到不可能有多于一个光子同时通过仪器。结果发现衍

射图像与短时间的强光照相同。令人困惑的是：“一个光子怎么可以同时处在两束分光束中呢？”如果是双缝衍射，则问题成为：“一个入射光子怎么可以同时穿过两个狭缝呢？”

在“光子”学说遇到挫折的地方，我们的经典解释却照样通行无阻。

首先，我们应考察光电效应的一个重要的性质：单个原子辐射出来的光子是有限的单色光波波列，在一般情况下，物质所辐射的光波并不是“光子流”，而是大量光子相互迭加而形成的连续波场。在光电效应中，电子所吸收的光子乃是这个连续波场中的一份，它一般不再是某一原子所辐射出来的一个光子。显然，刚好可以从金属表面击出一个电子的光波，必须多于一个光子。

我们可以用一个笨拙的比方来阐明上述结论：将光波比作一桶水，电子比作舀水的杯子，则原子辐射好比用杯子往桶里加水，虽然水是连续的，但在这一加水过程中桶里的水还是一杯一杯地增加。光电效应好比用同一种杯子从桶里舀水出来，一般地说，舀出的这一杯水不再是原来舀进的某一杯水。此外，当桶里刚好还可以舀出一杯水时，桶里一定不止一杯水。

只有光流的强度非常小时，诸光子才成为离散的，不再相互迭加，这样的光波才是名副其实的“光子流”，但这种光子流却已经不可能从金属表面击出光子。

人们常用光电检测器给光子计数，对于强光，这种仪器是足够准确的；但对于弱光，当它告诉说只有一个光子（只击出一个电子）时，那就肯定不止一个光子。

最初曼戴尔的实验是用光电检测器给光子计数的，因此它关于“当下一个光子发射之前上一个光子已被吸收”的报告是不可信的。后来换用底片曝光，也有同样的问题。

至于单光子干涉实验，从我们的角度来看，光子本是一个单色光波波列，可以自己与自己相干涉。因此从实验的干涉机制来看没有困难，但从探测机制来看却存在同一问题：如果光源真是弱到发射“光子流”的程度，则照相底片将不再感光，因此我们估计，泰罗实验中的光源还是比他认为的要强一些。

这一切都还有待实验进一步检验。

普朗克的突破

1900年夏末的一天。在柏林郊外的哥鲁内瓦尔特森林里，德国物理学家普朗克正在和儿子一起散步。就在这长时间的散步过程中，他对儿子热心地谈到了自己在这一年夏天得出的关于热辐射问题的新构想。

据记载，普朗克对儿子说，这个新构想使他作出了第一流的发现，是革命性的发现，恐怕只有牛顿的发现才能与之相比。实际上，普朗克这时对自己工作的认识是正确的，他所作出的量子假说，当之无愧地是第一流的发现，更是革命性的发现。

普朗克早年在慕尼黑和柏林接受大学教育。在柏林大学曾听过亥姆霍兹和基尔霍夫的讲课。他对这两位物理学家人品和科学研究十分崇敬，然而对他们的讲课却感到帮助不大。正像普朗克晚年回忆这段经历时说，亥姆霍兹讲课没有准备，说起话来结结巴巴，经常在黑板上写错字，“我们总是觉

得他自己对讲这门课是厌烦的，弄得我们也厌烦了。基尔霍夫的讲课准备得非常仔细，每句话都挑选得很准，一个字不多，一个字不少，可是既干巴又单调。我们真佩服讲师本身的那股劲儿，可是对他的讲课倒不怎么欣赏。”

正是由于这个缘故，普朗克经常地是自学，研究他们的原著。亥姆霍兹和基尔霍夫的原著立刻就使他感到钦佩，此外是克劳修斯的主要著作《力学的热理论》也对这位年轻的学生产生了强烈的印象，使他立志去寻找像热力学定律那样具有普遍性的规律。

就是在那些年月里，普朗克形成了自己特有的方法论的基本原则。

据说，当时德国实验物理学家约里曾告诉他：物理学基本上是一门已经完成了的科学，因此，要研究物理学不会有多大成果。可是普朗克还是下决心研究物理学，因为物理学可以探索到绝对客体的更多规律。

普朗克早期主要从事热力学研究，他的博士论文就是《论热力学第二定律》。他认为，热力学第二定律不只是涉及热的现象，而且同一切自然过程有关。热力学第二定律的关系式不仅指出了自然过程的方向，而且由于熵的极大值对应于平衡态，深入地研究熵就可使我们掌握关于物理和化学平衡的一切规律。

简单的热力学关系式能解释那么多现象的这一事实使普朗克深信，在自然界中它们就是真理，是基础，是绝对的，能够描述自然界中一切最简单的、不可动摇的、永恒的东西。普朗克十分向往完成他自己的这种心愿，于是他多年的科研计划就是为了揭示如何从热力学第二定律中得到尽可能多的结果。

普朗克在散步中谈起，直接导致他作出第一流发现的，是关于黑体辐射的研究。普朗克于 1894 年起，就把注意力转向黑体辐射问题。于是立即被基尔霍夫函数的普遍适用性迷住了，他说：“这个所谓的正常能量分布代表着某种绝对的东西，既然在我看来，对绝对的东西所作的探求是研究的最高形式，因此我就劲头十足地致力解决这个问题了。”

1896 年，普朗克在热辐射理论研究中，感觉到应用麦克斯韦的电动力学是解决这个问题的一条直接道路。也就是说，他想象物体的空腔内充满了具有各个不同固有周期的、弱阻尼的线性谐振子或者是共振器；由于热辐射而激起的振子能量交换就会逐渐地达到标准能量分布的、与基尔霍夫定律相符合的定态。

1899 年，普朗克表述了如下不成熟的想法：“我认为，这必然会使我得出这样的结论，即辐射熵的定义因而还有维恩的能量分布定律，两者必定都是通过熵增加原理应用于电磁辐射理论而得出的。因而这条定律有效性的限度，如果它存在着这种限度的话，将与热力学第二定律所受到的完全相同。显然，这使我们对这条定律再做一番实验研究显得更加极端重要了。”

该年年底，普朗克得知鲁本斯等人在 9 月发表的实验报告中指出了维恩公式在 $\lambda T \rightarrow \infty$ 时出现明显的偏差，因而表明了维恩理论的缺陷。

第二年，鲁本斯夫妇访问了普朗克，鲁本斯告诉他，在 $\lambda T \rightarrow \infty$ 时，瑞利于当年 6 月发表的公式却与实验结果很好地符合。

这使普朗克受到很大启发，立即尝试用内插法去寻找新的辐射公式，使在长波方面渐近于瑞利公式，在短波方面渐近于维恩公式。普朗克于 10 月 7 日当天就得到了一个他所要求的新的辐射公式，并于 10 月 19 日的柏林物理学会上以题为《维恩辐射定律的改进》的论文作了报告。

第二天早晨，鲁本斯告诉普朗克说，在学会会议结束后的当晚，他将这个新公式跟他自己曾经做过的实验数据作了非常仔细的比较，结果是处处相符，令人满意。鲁本斯深信在这个公式中孕育着极其重要的真理，绝不是一个偶然的巧合。

可是当时也有人认为这个公式只是具有形式上的意义，并把它看做是一条靠侥幸猜中的规律而已。这就推动着普朗克去寻找他的公式的理论基础。事后普朗克曾回忆说：“即使这个新的辐射公式竟然能证明是绝对精确的，但是如果可以把它仅仅看做是一个侥幸揣测出来的内播公式，那么它的价值也只是有限的。正是由于这个缘故，从它于10月19日被提出之日起，我即致力于找出这个等式的真正物理意义。这个问题使我直接去考虑熵和几率之间的关系，也就是说，把我引到了玻耳兹曼的思想。”

在这以前，普朗克对玻耳兹曼的统计理论并不欣赏，但他曾负责编辑过他的老师和前任基尔霍夫文集的工作，因而对于玻耳兹曼理论的数学方面是很熟悉的。他根据玻耳兹曼的统计解释，即状态的熵等于这种状态的几率的对数同 K （玻耳兹曼常数）的乘积，来计算同一定能量的单色振子相对应的几率，那么也就可以计算这个体系的熵，从而也可以计算它的温度。至于单色振子相对应的几率，他引用一个新的普适常数 h ，由于 h 的因子是能量与时间的乘积，普朗克就称 h 为作用量子。这样，该几率量度既合乎玻耳兹曼的理论，也适用于辐射现象。

值得注意的是，普朗克在这一处理方法中，实际上他已经作了一个革命性的假设，已经与经典物理学有所不同了。因为按照经典理论看来，所有的各个微观态的总和应当组成一个连续体。也就是说，把所有可能的微观态编排起来，应当得到一个连续的组合。而按照普朗克的思想线索，实际上是认为所有可能的微观态的总组合是分立的集合；一个系统的每一个宏观态对应于完全确定数目的微观态，这个数目就是所谓状态的几率。再从配容入手，很自然要引入能量不连续的假定，因为只有把能量分成一份份的，才能够计算确定的配容数目，如果总能量是可以无限连续地划分的话，能量分配的方式就不可能是有限的。

在1900年末，普朗克终于确信这个公式所包含的无法避免的似乎振子只能包含分立能量子的结论，并于1900年12月14日，在德国物理学会上宣读了他的论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，明确提出了有关物质微观结构的量子假说。

普朗克指出，为了得到和实验符合的黑体辐射公式（普朗克公式），必须抛弃经典物理学中关于物体可以连续辐射或吸收能量的概念，而代之以新的概念。他认为可以将构成黑体腔壁的物质看做带电的线性谐振子，它们和腔内的电磁场交换能量（辐射或吸收能量）。而这些微观谐振子只能处于某些特定的状态，在这些状态中它们的能量是最小能量 ε_0 的整数倍。它辐射或吸收能量时只能由一个可能状态跃迁到另一可能状态，即能量只可一份一份地改变，而不能连续地变化。这最小能量 ε_0 称为量子，它与振子的振动频率 ν 成正比，比例系数就是 h （又称普朗克常数）， $\varepsilon_0 = h\nu$ 。根据这些假设可以成功地导出普朗克黑体辐射公式。

普朗克的量子假说，突破了经典物理学的旧框框，首次提出了微观系统的量子特性，从而打开了认识微观世界的大门，是现代物理学史上又一次革

命性的发现。

德布罗意的联想

1924 年秋天，英国皇家学会权威刊物《哲学杂志》登载一篇无名之辈的文章，却震惊了世界科坛。

这篇文章明确提出一个假设，认为爱因斯坦所讲的波粒二象性不是光子才具有的，它同样适用于一般的实体物质，即一切微观粒子。对于这种“二象性”，作者名之为“物质波”。其观点的新颖、独创，推理的严密、准确，都是无懈可击的。这种大胆的假设，立即在科学界激起一个巨大的波澜，而论文的作者是一个当时在物理学家中几乎不为人知道的法国青年学者路易斯·德布罗意。

路易斯·德布罗意出身于贵族世家。到了他的祖父这代，由于承袭了曾祖一辈的爵位，坐享荣华富贵，便无所建树，毕生默默无闻。

早在路易斯少年时期，父母亲就相继去世了。此后，他便在哥哥莫里斯·德布罗意的抚养与教育下成长。莫里斯是一位卓越的实验物理学家，X 射线方面的初期经典研究的创始者之一，他既承担了父亲的责任，又对其弟关怀备至，从而对路易斯走上物理学研究道路产生很大影响。

在中学读书时，路易斯的兴趣是文科。18 岁时就取得了历史学学士学位，直至 20 岁那年，在其兄的启发下他的志趣才转向物理学。在此期间，他广泛涉猎了自然科学名著。其中法国物理学家、数学家庞加莱的著作《科学的价值》、《科学与假设》，对他颇有启迪。从庞加莱的著作中，他了解到人应该怎样为科学事业而奋斗，假设在科学领域中有着多么重要的意义。莫里斯在巴黎拜伦路上宫殿似的家庭里建有一个私人实验室，路易斯便兼任哥哥的物理实验助手。

路易斯的治学原则是：广见闻，多阅览，勤实验。他认为环境和出身不能决定一个人的志向，重要的是在学术上要善于独立思考，不迷信权威名流。就是对那位比他大 17 岁的哥哥，只要在学术上发生了争论，他也不留一点情面，有时竟弄得哥哥面红耳赤。当时他俩讨论得最多的课题之一是有关 X 射线的波动性和粒子性。他在自己的晚年回忆说：“经过长期的孤寂的思索和遐想之后，在 1923 年我蓦然想到：爱因斯坦在 1905 年所作出的发现，应当加以推广，把它扩展到一切物质粒子，特别是电子。”

该年，德布罗意着手解决由于光的波粒二象性所造成的困境。根据所有干涉和衍射实验可知，光是由电磁波组成的；但是，根据光与物质进行的各种能量交换时，它又是粒子性的。两种观点都由大量的实验佐证。所有较早一些的实验结果显示了波动性，而一些最近的实验结果又都表明光具有粒子性。一些最近的数据就来自他哥哥的实验室；而且，有些实验是在他亲自协同下完成的。怎样去统一看来是如此矛盾的两个方面呢？

德布罗意是从爱因斯坦光的波粒二象性思想中受到很大的启示。他想，光辐射具有粒子性，而物质粒子为什么不可以具有波动性呢？长期以来，在光学上，与波动的研究方法相比，过于忽视粒子的研究方法了。而在物质粒子的理论上，人们却反其道而行之，太忽视波动的图像了。他认为在研究物质粒子的理论中，必须“同时引进粒子概念和周期性概念”。他大胆设想，不仅光有粒子和波动两种性质，而且“一般的”物质也具有这两种性质。这

就是说，既然粒子概念在波的领域里成功地解释了令人困惑的康普顿效应，那么，波动概念也应能解释粒子领域里令人困惑的定态概念。

在这些思考的基础上，德布罗意于 1923 年 9 月 10 日，发表了题为《波和粒子》的论文。他指出爱因斯坦的公式 $E=h\nu$ 不仅适用于光子，也该适用于电子。就是说，一向被人看做是粒子的电子，也应该具有波动的性质。他把电子设想为波，用波形轨道代替圆形轨道，让电子从圆周上的某点为起点出发，边振动边绕周。为了绕一周后能返回原来的位置，处于原状，这就得巧妙地调节它的波长，即周长除以它的波长为一整数，也就是玻尔理论中的量子化条件。在此基础上，他把 $E=h\nu$ 与爱因斯坦相对论的推论 $E=mc^2$ 相结合，创造了物质波的新理论。即 $p=h/\lambda$ ，其中 h 为普朗克恒量， p 为物质的动量， λ 为其波长。由此可得物质波的波长，由下式表示：

$$\lambda = h/p = h/mv$$

这就是著名的德布罗意公式。他还提出，应当把玻尔理论中的量子化条件解释为关于物质波的陈述：玻尔给出的电子轨道长度应是伴随着电子的物质波波长的整数倍，存在的轨道表示物质波的驻波形式，而在其它被禁止的轨道上，物质波由于干涉而消失。这样就阐明了能够用物质波的概念来解释玻尔提出的轨道量子化的条件。

9 月 24 日，德布罗意发表了题为《光量子，衍射和干涉》的论文，引进了相位波概念。在谈到粒子波动现象的实验验证可能性时，他预言：“一束电子穿过非常小的孔可能产生衍射现象，这也许是实验上验证我们想法的方法。”

同年 10 月 8 日，德布罗意详细地给出了有关几何光学和经典力学的类比。他认为传统力学只不过是一种近似，它和几何光学的适用范围相同。他感到有必要建立一种新的动力学——波动力学，并指出：“关于自由粒子的新的动力学和旧的动力学之间的关系，完全同波动光学和几何光学之间的关系一样。”

1924 年，德布罗意总结了上述三篇短论文，并加以缜密的论证，形成了他的博士论文《关于量子理论的研究》，于 11 月 25 日在索邦学院的审定委员会上答辩了这篇博士论文。

和历史上多次发生过的事情一样，德布罗意关于物质波的极为大胆的假设发表后，一开始并未引起物理学界的重视。索邦学院也是如此，当收到德布罗意的博士论文后，由于不知道如何进行估价而处境尴尬，以致作出的部分评议是：“我们赞扬他以非凡的能力坚持作出的为克服困扰物理学家的难题所必须作的努力”，最后在场的评委教授只得以“相信”的结论通过这篇博士论文。

在此之前，德布罗意的老师朗之万把论文的副本寄给了好友爱因斯坦。爱因斯坦收到后，立即看出了这位青年学者所提出的物质波假设的极端重要性，真有些喜出望外，立即回信表示赞赏。同时写信给玻恩，建议他也读一读这篇别有风味的，看起来似乎是不合理的，然而却是独具一格的论文。由于爱因斯坦的决定性支持与推荐，德布罗意关于物质波的假设受到了国际物理学界的广泛重视。于是，很快全文刊登在皇家学会的《哲学杂志》上。

为什么物质波的假设提出竟会使不少有名望的科学家感到难以捉摸呢？

这是因为物质波与人们以往所熟悉的水波、声波、光波、电磁波以及其他实实在在的，并能通过感觉器官或者仪器记录下的各种类型的波，是根本不同的。

由于德布罗意的物质波远远超出了科学家们当时的思维空间和认识水平，在这些科学家的眼里就认为德布罗意的假设是离经叛道，太神秘了。可是，德布罗意坚信：任何物体包括大至一个行星，一块石头，小至一粒灰尘或一个电子，这些客观存在的物质，能在真空中传播的现象，决不是机械波，也不是电磁波，而是一种崭新的未被认识的波。因为没有物质，就谈不上什么波，所以德布罗意把这种“不可想象”、“玄而又玄”的“神秘波”称为“物质波”。

物质波的假设提出使不少科学家处境尴尬的另一原因在于：我们为什么看不见德布罗意波。但是，一般说来我们怎样才能觉察出波来呢？不能仅仅凭借我们的感觉器官，因为人的感觉器官毕竟还有较大的局限性，如人耳只能听到频率介于 20 至 16000 周/秒的声音，而人眼仅能反应波长介于 0.4 至 0.8 微米的可见光波。于是科学家们通过发明各种仪器来不断扩大人的感觉范围。

现在已清楚，被假设的德布罗意的波长范围是非常广阔的。既然如此，为什么长期以来人们却没有发现这种波呢？问题在于：如何去发现。机械波，波长有几米，便能被人耳察觉。但一台收音机，即使调谐到这声波的波长也不能接收到它，因为收音机只能接收无线电波。从另一角度来看，无线电波不能被人耳或其他机械装置接收到，尽管它的波长约几米。

这就是说，任何一种接收器只能对某种特定类型的波作出反应。耳反应声波，眼反应电磁波。由此看来，人们又怎样察觉德布罗意波呢？德布罗意波即不属于声波这一类，也不属于电磁波这一类。

然而，人们还是想方设法要去察觉德布罗意波。这里，先让我们根据德布

罗意公式： $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ ，看一看我们周围物体的运动是和怎样的波长相对应的。

(1) 地球的波长

地球的质量是 6.0×10^{24} 千克，环绕太阳的轨道速度约为 3×10^4 米/秒，根据德布罗意公式，普朗克恒量 $h \approx 6.60 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒，可以求出地球的波长。

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{6.0 \times 10^{24} \times 3 \times 10^4} \text{ 米} = 36 \times 10^{-59} \text{ 米}$$

这个数值是目前还没有任何一个可以用来作比较的有确定意义的量，它究竟会小到什么程度，估计任何现有的以及未来几十年可能拥有的最精密的仪器，也无法记录下这样小的数值，真小得令人奇怪，是否隐含着深一层次的奥秘？

(2) 一块石头的波长

一块石头的质量为 1 千克，飞行速度为 1 米/秒。根据德布罗意公式可以求出，石块运动时的波长。

$$\lambda = 6.6 \times 10^{-34} / 1 \times 1 \text{ 米} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ 米}$$

这个波长的数值比一个原子核的线度还小 1 千亿亿倍。可是原子核的本身已经远远超出了显微镜所能观察的范围，因此目前要用仪器观察到这样短的波也是无法做到的。

(3) 电子的波长

电子的质量为 $m = 0.91 \times 10^{-30}$ 千克，带电量为 1.6×10^{-19} 库仑，经过 200 伏特的电势差加速该电子，加速后电子获得动能 $E = Ve = 200 \times 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳 $= 3.2 \times 10^{-17}$ 焦耳。

根据 $\frac{1}{2}mv^2 = E$ ，电子的速度是 $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$ ，代入数字可得出 $v = 8.4 \times 10^6$ 米/秒。

按照德布罗意公式求出，这个运动电子的波长为

$$\lambda = 6.60 \times 10^{-34} / 0.91 \times 10^{-30} \times 8.4 \times 10^6 \text{ 米} = 8.7 \times 10^{-11} \text{ 米}$$

这个数字就大不相同了。 8.7×10^{-11} 米差不多相当于 X 射线的波长，而后者是可以被测出的。因此，在理论上，我们应该能够测出电子的德布罗意波。

这个理论的推测，于 1925 年为美国物理学家戴维孙的电子衍射实验所证实。戴维孙于 1911 年取得了普林斯顿大学的博士学位，次年被卡内基理工学院任命为物理学助理教授。1917 年转入西部电气公司的工程部从事研究工作，成绩卓著。

事实上，电子束在晶体上的衍射早在德布罗意的假设提出之前就已发现。1921 年，戴维孙和助手康斯曼在实验中曾偶然发现，当电子在薄镍片上散射时，可以观察到强度和散射角度有显著的依赖关系，但对于这个奇特的实验结果，他们没有领悟到是一种衍射现象。后来，戴维孙花了两年多的时间继续这项研究，设计和安装了新的仪器设备，并用不同的金属材料作靶子。工作虽然没有多大进展，但却为以后的实验研究作了技术准备。

1925 年，戴维孙和助手革末又开始了电子散射实验。一次偶然的事件使他们的工作获得了戏剧性的进展。正如他们的论文指出：

“在进行这项工作时，由于靶子有很高的温度，使盛有液态空气的容器爆炸了。试管被炸碎，进去的空气使镍靶氧化了。后来，氧化物被还原，靶子上面的一层薄膜也用蒸发的办法去掉了，是在氢气中以及真空中、在不同的高温下长时间的加热后才去掉的。

当实验继续进行的时候，散射电子按角度的分布完全变了。变化的情况可以用曲线示出。……曲线是在事故发生以后得到的，是第一次看到的新曲线。这种散射的显著变化曾被认为是由于长时间的加热过程使靶子发生了再结晶而造成的。在事故发生以前，我们轰击过大量的小晶体，事故发生以后，我们只轰击了几个（实际上约 10 个）大晶体。”

也就是说，看到新曲线中发现了好几处尖锐的峰值，他们即采取措施，将管子切开，发现镍靶在修复的过程中发生了变化，原来磨得极光的镍表面，现在看来构成了一排大约 10 块明显的结晶面。他们断定出现新的散射曲线的原因就在于原子重新排列成晶体阵列。

这一极为重要现象的出现，促使戴维孙和革末立即修改他们的实验计划。专门制作了一块大的单晶镍，并切取一特定方向来做实验。先后花了近一年的时间，制成了新的镍靶和管子。他们为熟悉晶体结构做了很多 X 射线衍射实验，拍摄了很多 X 射线衍射照片，可就是没有将 X 射线衍射和他们正从事的电子衍射联系起来。这样他们于 1926 年继续做电子散射实验的过程中，并没有马上重获偶然出事故之后的那种曲线。

1926 年夏天，戴维孙出席了在牛津大学召开的英国科学促进会。在那里，他同玻恩、弗兰克等人讨论了他的电子散射的研究。通过讨论，使戴维孙意识到他实验中出现的新曲线这一重要结果恰恰是由于晶格的电子衍射造成的，这就证实了德布罗意的假设。

于是，戴维孙回到纽约后，立即和革末一起，更自觉地投入到寻找电子波的实验证据的全面研究中去。从该年 12 月起，经过 2~3 月的紧张工作，便从实验中取得了卓著的成果，即实验所得的数据表明，德布罗意公式：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \text{ 在测量准确度范围内是正确的。}$$

1927 年 3 月，他们提出了一个研究结果的初步摘要，全文报告则于 12 月发表在《物理评论》上。该文系统地叙述了电子衍射的实验方法、实验经过和实验结果，第一次确定了运动电子的波动性，其波长与德布罗意物质波的假设相一致。

电子不仅在晶体上散射时表现出波动性，当电子束穿过一薄金属箔后，再照射到一屏上时，在屏上就显示出有规律的条纹，同样表现出波动性。这些条纹和 X 射线通过晶体粉末时所发生的衍射条纹是很类似的。这说明电子也和 X 射线一样在通过晶体后有衍射现象，并且从晶格常数、加速电位差和条纹的几何图形等，都证明了电子衍射时的波长和按德布罗意所预言的物质波的波长完全符合。

电子衍射实验的成功，再次庄严地宣告：德布罗意的假设完全正确！从此，物质波的观念为所有的物理学家全面接受，并成为量子力学的重要基础。

爱因斯坦的发展

1905 年 6 月，在伯尔尼专利局工作的一位青年科学家发表了一篇题为《论动体的电动力学》的论文。这篇论文由于思想的深邃和逻辑的完美，特别是以全新的观点解决了当时物理学进展中的难题，引起了物理学界的极大重视。这位年仅 26 岁的青年科学家很快就成为科学革命的一位举世闻名的旗手，物理学界的一颗璀璨夺目的新星，他就是爱因斯坦。

爱因斯坦在专利局干得很好。他作为三级技术专家，虽然年薪只有 3500 瑞士法郎，却已能维持生活，而且这个工作迫使他作多方面的思考。一旦有了空闲的时间，他就用于物理学的研究，在笔记纸上演算复杂的数学公式。可是一听见上司的脚步声音，他就把纸匆忙地塞进抽屉里。

整整 5 周的紧张研究，爱因斯坦把经过 10 年酝酿的见解，形成了论文，提出了非同寻常的狭义相对论。正如美国物理学家佩斯指出：“狭义相对论是经过 10 年的酝酿才诞生的。然而作者（指爱因斯坦）在悟出这理论最重要、最关键的运动学见解之后，不到五六周的时间就在讨论的过程中实际完成了论文。这件事是从爱因斯坦 1922 年 12 月在京都的演说中知道的。”

其实，爱因斯坦在阿劳的那一年（即从 1895 年 10 月到 1896 年早秋），他就想到这样一个问题：“如果一个人以光速追随光波运动，他眼睛看到的会是什么情景呢？”不久，爱因斯坦进入联邦工业大学，他又遇到光、以太和地球运动的问题。这些问题一直萦绕在他的脑海之中，他甚至想制造一种仪器，用来精确地测定地球相对以太的运动。

以后，爱因斯坦在论及他第一次萌发相对论想法时，曾说：“谈论我如何开始产生相对论思想是一件很不容易的事。因为激发我思考的事物是如此之多，在相对论思想发展的不同阶段上，每一种思考所产生的影响又很不相同，……这种想法究竟从哪里开始说不太准确，但是肯定它与运动物体的光学特性有关。光在以太中传播，而地球又在以太中运动，换句话说，以太在相对地球运动。”这就是说，对运动相对性的沉思、研究和探索，导致了爱因斯坦的“智力革命”。

美国著名科学史家科恩认为，科学革命不是一个突发的、短暂的事件，而是有它的发展过程的。他根据 4 个世纪以来科学发展的重大事件的历史分析，把这个过程区分为 4 个阶段：智力革命、书面上许诺的革命、纸面上的革命和科学革命。所谓“智力革命”，即“自身革命”。当一位科学家（或一个科学家集团）设计出一种根本解决某个或某一些主要问题的方案，寻找到一种利用信息的新方法，并提出一种能以全新的方式包容现存信息知识框架（由此导致作出没有人曾料到的预言），引入一套改变现有知识特征的概念或提出一种革命的新理论的时候，这种革命就出现了。总之，革命的第一步总是由一个或多个科学家在所有科学革命初期创立的。狭义相对论的创立也是如此。

爱因斯坦于 1921 年在伦敦皇家学院的讲话充分表达了这种思想，他说：“我能够荣幸地在这个曾经产生过理论物理学的许多最重要基本观念的国家首都发表讲话，特别感到高兴。我想到的是牛顿给我们的物体运动和引力理论，以及法拉第和麦克斯韦借以把物理学放到新基础上的电磁场概念。相对论实在可以说是对麦克斯韦和洛伦兹的伟大构思画了最后的一笔，因为它力图把场物理学扩充到包括引力在内的一切现象。”

这就是说，相对论又产生于对麦克斯韦电磁场理论的推广之中。由于麦克斯韦理论和牛顿力学具有明确不同的特点，在物理学的发展进程中，就很自然地提出了这样的问题：运动的相对性对力学规律是适用的，那末对电磁场规律是否也适用呢？

爱因斯坦根据对麦克斯韦理论和牛顿力学作了深刻的分析之后，敏锐地指出：“麦克斯韦电动力学应用到运动的物体上时，就要引起一些不对称，而这种不对称似乎不是现象所固有的。”这里所说的不对称，就是统一性遭到破坏。爱因斯坦认为这种不对称不像是自然界所固有的，因为他相信自然界具有统一性，于是问题可能出在我们以往认识自然界的概念和理论上。

牛顿说：“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，并且由于它的本性而均匀地，同任何一种外界事物无关地流逝着。”“绝对空间由于它的本性，以及它同外界事物无关，它永远是等同的和不动的。”在牛顿看来，时间和空间是独立于人之外的客观存在，这显然是唯物主义的观点；然而牛顿却把时间和空间绝对化，没有看到时间和空间之间的联系，也没有看到它们与物质的联系，则是一种形而上学的看法。

爱因斯坦经过 10 年沉思、研究发现，只要把作为经典力学基础的绝对时

间和绝对空间的概念加以适当修改，上述提到的不对称就可以消除。爱因斯坦正是在一个最平凡、最简单，也似乎是司空见惯、最不成问题的问题上找到了突破口，这也是爱因斯坦“智力革命”的最可宝贵之处。

实际上，人是生活在地球的表面上，因此很自然地是以地球表面为基准来确定物体的空间位置，这是与地球表面联系在一起的空间。物理学家在研究物体运动时，必须依靠参照系的选择，实际上也是用的具体空间，就是相对于某一物体或物体系的参考空间。因此，并不存在绝对的、抽象的空间，只存在具体的、与物体相联系的空间。显然，与具体的物体相联系的空间，是相对的而不是绝对的。

绝对的时间概念，其特点是独立性与统一性。它的独立性，表现为时间不受任何其他东西的影响；它的统一性，表现为在任何参照系有统一的时间。然而绝对时间概念的这种性质是值得怀疑的。从麦克斯韦电磁场理论的观点出发，因为场是以有限的速度传播的，它就不能提供不同参照系之间有同步的时间。如对于同一个电磁波，不同惯性系测量它的频率是不同的，也就是测量它的振荡周期是不同的。这就是说，对于同一个电磁振荡，在不同的惯性系测得了不同的时间间隔。显然，这是对统一的时间标尺的挑战。如果没有统一的时间，承认各个惯性系有各自的时间，那么时间不受外界影响也就无法成立了，所以时间的独立性也不是绝对的了。

爱因斯坦正是在极为周密地考察时间与空间的关系中发现：“两个事件间，没有空间的绝对关系，也没有时间的绝对关系，但是有空间与时间的绝对关系。”这就是他对时间与空间概念的全新理解。他还发现：“同时相对性”，即两个在空间上分隔开的事件的所谓“同时”，取决于它们相隔的空间距离和光信号的传播速度，在静止的观察者看来是同时的两个事件，在运动的观察者看来就不可能是同时的。这就是说，同时性的概念也变成相对的了，它与物体的运动情况有关。

根据上述思路，爱因斯坦着手建立更为完善的理论。他在《论动体的电动力学》一文中写道：“凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的定律也一样适用……我们要把这个猜想提升为公设，并且还要引进另一条在表面上看来同它不相容的公设：光在空虚空间里总是以一确定的速度 c 传播着，这速度同发射体的运动状态无关。”

爱因斯坦在这里提到的两个公设，现在通常称为狭义相对论的两个基本原理。第一个是狭义相对性原理：在所有的惯性系，物理学规律都是相同的；不存在一个优于其他惯性系的绝对惯性系。第二个是光速不变原理：在所有的惯性系，真空中的光速不变，都是常量 c 。

有了这两个原理，其自然的结果是否定了绝对惯性系的存在，从而也就没有“以太”存在的必要了。以太存在的假说，曾经是 19 世纪经典物理学所依赖的基本假说之一。迈克耳逊—莫雷实验的零结果明确宣告了寻找以太的失败。当时许多物理学家都不愿看到这个事实，都不愿推翻以太假说。然而，爱因斯坦却与众不同，他大胆地接受了这个事实，明确宣布所谓绝对静止的“以太”的存在是“多余”的，并且把所有的“以太漂移”实验中所显示的光在真空中总是以一确定速度传播的事实提升为一个原理，即光速不变原理，这又是何等了不起。

爱因斯坦发现，为了保证光速是一个恒量，人们必须接受许许多多出乎意料的事情：如随着物体运动速度的增加，物体在运动方向上会变得越来越

短，直到在达到光速时，长度变为零为止；与此同时，物体的质量会变得越来越来大，在达到光速时，质量会变为无穷大。他还发现，当物体的运动速度越来越大时，在运动物体上时间流逝的速率也会不断减小，而在达到光速时，时间就会完全停止。所有这些，在当时人们的脑海中简直是不可思议的，可是却真正把握了对物理世界崭新的基本认识。

狭义相对论不但引起了时空观的革命，也带来了整个物理学的革命，在 20 世纪的人类生活中产生了深远的影响。后者最为突出的是关于物体的质量和能量相当性的推论。这是 1905 年 9 月在爱因斯坦完成了狭义相对论论文后 3 个月提出来的。

爱因斯坦发现，物体的质量是它所含能量的量度，如果能量 E 改变了，那么质量 m 也就相应地改变 E/c^2 ，这里的 c 是光速，即

$$E=mc^2$$

这就是著名的质能关系式，它代表质量与能量的关系。

质能相当性给了我们非常重要的启示，它说明一定的质量就代表一定的能量，质量与能量是相当的，两者之间的关系只是相差一个常数 c^2 的因子。按照质能关系式，一个处于静止状态的物体，因为它有静止质量 m_0 ，因而也就有能量 $E_0=m_0c^2$ ，这在经典物理学又是难以理解的。

尤其令人惊异的是，这样的能量其数值非常巨大。由于光的传播速度是 3×10^8 米/秒，静止质量为 1 克的物体就含有 2.5×10^7 千瓦·小时（度）的能量。由此推算，若一年的发电量为 5500 亿度的话，不过相当于 22 公斤物质所含的能量。

对此，有人一定觉得很奇怪，这么巨大的能量，为什么长期没有被发现呢？对于这个问题，爱因斯坦有一个非常通俗的回答。他说：“答案是够简单的：只要没有能量向外面放出，就不能观察到它。好比一个非常有钱的人，他从来不花费或者付出一分钱，那就没有谁能够说他究竟有多少钱。”

实际情况正是如此。我们对能量的认识，正是在一种形式的能量通过做功、传热等方式转变为其他形式的能量时。由于能量是客观存在，但是只有由一种形式的能量转变为另一种形式的能量时，这种能量才会被发现，也就是说，只有放出其能量才能被观察到。

质能相当性的发现，预言了物质的质量就是能量的一种储藏，爱因斯坦指出，从当时已知的放射性衰变去探索这种巨大的能量。由此使得当时无法解释的放射性元素，特别是镭为什么能够不断释放出如此强大能量的现象，以及太阳能的来源问题，都得到圆满的解释。随着原子物理学和原子核物理学的进展，人们终于发现了原子核的结合能，即通常所说的原子能。今天，原子能的利用已日趋广泛，特别是核电站的建立，有效地开辟了人类对能源需求的新途径，这不能不归功于狭义相对论的巨大功绩。

科学思想的革命还促使人们的观念进一步解放。这就是任何科学理论都不可能一成不变，随着科学实验的发展，科学发现的出现，科学理论必须不断发展，甚至彻底更新。因此，不墨守成规和勇于创新，便成为现代物理学发展中的一个突出特点。

爱因斯坦在建立狭义相对论后不久，就致力于把这理论推向前进，企图把相对性原理从匀速运动（惯性系）推广到加速运动（非惯性系）。狭义相

对论只考虑惯性系之间的变换问题，而非惯性系之间的变换问题，就涉及到引力场。

在探索过程中，爱因斯坦认为，引力现象也应该同电磁现象一样，要建立在场的观念上。可是物体在引力场中运动与电荷在电磁场中运动有一个显著的不同，即所有物体在地球表面都以同一加速度自由下落，这是什么原因呢？原来在于惯性质量与引力质量是相等的。

这一事实，早在两百多年前，就被伽利略发现了。匈牙利物理学家厄缶和他的合作者通过著名的扭秤实验，以更高的精确度证明了这一点。一个用弦线悬挂着的质点，在地球表面要受到三个力的作用而达到平衡。这三个力是：地球对它的引力 F_g （指向地心）；因地球的自转而产生的惯性离心力 F_c （垂直于地球的自转轴）；沿弦线的张力 F_t 。其中 F_g 正比于质点的引力质量 $m_{引}$ ； F_c 正比于质点的惯性质量 $m_{惯}$ 。

厄缶在实验中比较了各种不同物质如木、铂、石棉、水等悬挂起来后弦线平衡位置所发生的变化。结果发现毫无变化，表明 $m_{引}=m_{惯}$ 。这个实验报告最早发表于 1888 年，以后在 1922 年发表的结果中精确度达到 5×10^{-9} 。

引力质量和惯性质量严格相等这一事实，几百年来一直被物理学家们当做一个当然的基本事实，认为里面不存在什么理论问题。但是爱因斯坦却从这个最平常的、司空见惯的事实中，抓住了“一把可以更加深入地了解引力和惯性的钥匙”。他写道：“在引力场中一切物体都具有同一加速度。这条定律也可以表述为惯性质量同引力质量相等的定律。它当时就使我认识到它的全部重要性。我为它的存在感到极为惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地了解引力和惯性的钥匙。”从而得出了下列重要结果。

首先，爱因斯坦注意到把原来奠基于超距作用观念的牛顿引力理论改造为建立在场的观念之上的引力理论，这就有可能找到引力质量和惯性质量之间联系的线索。他给出了如下的关系式：

$$\text{惯性质量} \times \text{加速度} = \text{引力质量} \times \text{引力场强度}$$

由此可见，惯性质量和引力质量的相等性，是与加速度和引力场强度之间的某种等价性密切联系在一起的。

其次，爱因斯坦把这种等价性加以扩充，使它包括更广泛的物理学领域，并且把它提升为理论的前提，即得出了等效原理：引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价。对于这个等效原理，爱因斯坦还举了一个升降机的理想实验，作了十分生动形象地说明。设想有一个大的升降机在摩天大楼的顶上，而这个理想的摩天大楼比任何真实的摩天大楼还要高得多。突然，升降机的钢缆断了，于是升降机就毫无拘束地向地面降落。在降落过程中，里面的观察者正在做实验。一个观察者从袋里拿出一块手帕和一只表，然后让它们从手上掉下来。这时在升降机外面的观察者看来，这两个物体都是以同样的加速度降落，因此两物体与地板之间的距离不会改变。对于升降机里面的观察者来说，这两个物体就停在他松手让它们掉下的那个地方。里面的观察者可以不管引力场，因为引力场的源在他的坐标系之外。他发现在升降机之内没有任何力作用于这两个物体，因此它们是静止的，正像它们是在一个惯性坐标系中一样。

再次，从惯性质量和引力质量相等的这一事实出发，爱因斯坦把狭义相对论所考察的作匀速运动的参照系之间的相对性，推广到作任意运动的参照

系之间的相对性，提出了时间和空间的性质应当由物质运动决定这一革命性的思想。在这方面的探索过程中，爱因斯坦曾在数学上遇到很大困难，以后在老同学格罗斯曼的帮助下，找到了一套合适的数学工具，这就是采用黎曼的曲面几何来描述具有引力场的时间和空间，写出了正确的引力场方程。

爱因斯坦夫人曾讲述了爱因斯坦的一个故事：

“博士（指爱因斯坦）像平时一样，穿着睡袍下楼用早餐，但他几乎什么也没有碰。我想，出什么事了，所以我问他，什么事使他不安，‘亲爱的’他说，‘我有一种绝妙的想法’。喝完咖啡之后，他走到钢琴那儿开始弹起来，间或停下来，作点笔记。然后，报告说，‘我得到一个奇妙的想法，一个绝妙的想法。’我说：‘那么，看在上帝的份上，告诉我是什么想法吧，别叫我挂虑了。’他说：‘很困难，我得继续把它完成’。

接着，爱因斯坦继续弹着琴和做笔记，约持续了半小时。然后，他就上楼到他的研究室去了，并且告诉我，不要去打扰他。他呆在那里干了两周，每天我都给他送饭。黄昏时分，他会踱着步子作点锻炼，再回去工作。

最后，有一天他从研究室走下楼来，脸色苍白。‘就是它’，他一边对着我说，一边疲倦地将两张手稿纸往桌上一放。这，就是他的相对性理论。”

1915年11月，爱因斯坦在普鲁士科学院的接连三次会议上报告了他的广义相对论。第二年3月，他在《物理年鉴》上发表了长达50页的论文《广义相对论基础》。在这篇极富革命性的论文中，爱因斯坦明确指出，广义相对论所要论述的内容是狭义相对论所作的可能想象得到的最为广泛的推广。而其理论基础是等效原理、广义协变性原理（物理定律必须在任意坐标系中都具有相同的形式，即它们必须在任意坐标变换下是协变的）、马赫原理（时间和空间的几何不能先验地给定，而应当由物质及其运动所决定）。

在广义相对论中，时间和空间跟引力场有关，而引力场又是由物质及其运动所产生的。爱因斯坦为了验证这一理论，曾预言会出现如下三个效应：光线为太阳所偏折；水星近日点的进动；光谱线的引力红移。这些预言是颇为惊人的，然而被预言的效应不久就为实验观测所证实，于是广义相对论也得到了验证。

第一个效应是光线为太阳所偏折。从遥远星体射向地球的光线经过太阳附近，由于受太阳引力场的作用要产生偏折。根据牛顿定律计算的结果为0.87弧秒，而爱因斯坦根据广义相对论计算的结果，预言为1.75弧秒，这一预言于1919年被证实。

该年的5月29日，日全食横贯在赤道非洲和巴西之间的大西洋区域上空，为了观测光线的偏折，英国派出两支观测队前往非洲几内亚湾的普林西普岛和巴西的索勃拉耳湾旁，他们都摄到了恒星的图片。11月6日，两个皇家学会——不列颠学会和伦敦天文学会举行联席会议。会上宣读了两个观测队所得资料的最后整理结果是：在索勃拉耳湾为1.98弧秒，在普林西普岛为1.61弧秒，两数字的平均值为1.79弧秒，与爱因斯坦的预言1.75弧秒是如此接近，立即轰动了全世界。

广义相对论已被广大公众所认同，而爱因斯坦则被当做世界伟人来看待了。

第二个效应是水星近日点的进动。就太阳系来说，所有的行星，连地球在内，根据牛顿定律都是沿着椭圆轨道绕太阳运动的。但是，当时的天文学家已发现水星的运动轨道不是完全椭圆形的，而是这个椭圆形本身在“弯曲

的”空间中有缓慢的转动，这种现象便称为水星近日点的进动，其角位移每百年为 43 弧秒。

水星近日点的进动是牛顿引力理论无法解释的，而根据广义相对论就能很好地解释这一现象。其方法是解在引力场作用下的质点运动方程，在一级近似条件下得到与牛顿引力理论相同的结果，在高一级近似的条件下得到与牛顿引力理论的差异，这个高级小量的差异恰好导致其角位移每百年为 43 弧秒。由于水星距离太阳最近，处在引力场最强的区域，广义相对论的这个效应最大，所以这个差值较大；其他行星距离太阳较远，引力场相对较弱，因此不曾观测到这个效应。

第三个效应是光谱线的引力红移。这个效应所讨论的问题是光在引力场中传播时，频率将会发生怎样的变化。爱因斯坦预言，引力场很强的天体发出的光向红端，即向波长较长的一端移动。其原因在于，质量越大的天体附近，引力场越强；引力场越强的区域，时间的标尺越长，也就是说那里的时钟变慢。因此，从这样的天体发出的光，频率较慢而相应的波长较长。

天文学家在天狼星伴星的观测中，首先验证了引力红移现象。天狼星伴星与白矮星相似，是一颗密度很大的星体，由于它的引力场很强，因而引力红移也较大。实际观测值大凡都与爱因斯坦的预言相接近。

广义相对论虽然在发表几年后就得到上述实验观测的验证，但是在以后的几十年中，能够验证它的实验观测事实却如此之少，再加上它的数学结构过于艰深，于是有人慨叹：广义相对论是理论物理学家的天堂，实验物理学家的地狱，以致一直很少有人问津。

但是，到了 50 年代末以后，由于大口径的光学望远镜和射电望远镜等实验技术的进展，以及天体物理学和宇宙学不断取得重大进展，陆续发现了一些新天体，那里存在着很强的引力场，一度受到冷落的广义相对论重新形成了研究的热潮。这样在 60 年代，广义相对论又增加了第四个效应，就是雷达回波的时间延迟。从地球上向另外行星发出雷达讯号，再反射回来为地球接收，如果雷达波经过太阳附近，其往返时间比不经过太阳附近的往返时间要长。这也是一个很微小的效应，到 70 年代末期，这类测量所得的数据同广义相对论理论值比较，相差约 1%。这类实验观测也可以在地球引力场中，通过测量人造卫星的雷达回波的时间延迟来进行。

广义相对论还预言过有引力波。引力是从牛顿时代就为人们所熟悉的，而引力波就不同了。这跟人们很早就知道带电体之间有作用力，但是不等于已经认识到电波的存在一样。直到 1978 年，由美国科学家泰勒等人对射电脉冲双星 PSR1913 + 16 进行几年观测结果的分析中，发现它的公转周期变短而定量地证实了引力辐射阻尼的存在，被认为是引力波存在的第一次间接验证，这样就再一次令人信服地证明了广义相对论的正确性。

爱因斯坦先后创立的狭义相对论和广义相对论，一方面越来越为科学界和广大公众所重视，另一方面却遭到一小撮人和排犹分子的歧视。他们搞了一个组织，即所谓“反相对论公司”，专门反对相对论；他们还举行公开演讲，印发文集，在报刊上展开全面攻势，对爱因斯坦进行不能令人容忍的谩骂。1920 年 8 月 24 日，这一伙人在柏林音乐厅举行演讲，又肆意攻击相对论。爱因斯坦闻讯专门前去参加，作为听众泰然自若地坐在会场里。

事隔两天，8 月 27 日，爱因斯坦即在《柏林日报》发表了题为《我对反相对论公司的答复》的声明。在声明中，爱因斯坦首先指出，就他所知简直

没有一位在理论物理学中做出一点有价值的成绩的科学家，会不承认整个相对论是合乎逻辑地建立起来的，并且是符合于那些迄今已判明是无可争辩的事实。他举出最杰出的物理学家诸如洛仑兹、普朗克、索末菲、劳厄、玻恩、拉摩尔、爱丁顿、德比杰、朗之万、勒维-契维塔都坚定地支持这理论，而且他们自己也对它作出了有价值的贡献。

在有国际声望的物理学家中间，直言不讳地反对相对论的，爱因斯坦在声明中说，只能举出勒纳德的名字来。作为一位精通实验物理学的大师，爱因斯坦钦佩勒纳德；但是他在理论物理学中从未干过一点事，而且他反对相对论的意见是如此肤浅，以至到目前为止，爱因斯坦认为没有必要给他详细回答。

由于当时从未有科学家要使用报纸上的篇幅就某个问题作出答复，爱因斯坦的一些朋友从报上看到这篇声明都感到震惊，有的人甚至还写信责备他。例如，爱因斯坦的挚友埃伦菲斯特从莱顿写信给他说：“我的妻子和我都绝对无法相信你自己竟会在《我的答复》这篇东西里写下哪怕最少几个字”。“我们一分钟也不能忘怀，你一定是为一种特别无礼的方式所激怒，我们也忘怀不了，你在那边是生活在一种不正常的道德风气里；尽管如此，但是这个答复还是含有某些完全是非爱因斯坦的反应。我们可以用铅笔把它们一一划出来。如果你真是用你自己的手把它们写下来，那就证明了这些该死的猪猡终于已经成功地损害了你的灵魂，这对我们来说是多么可怕呀！”

爱因斯坦于 1920 年 9 月 10 日给埃伦菲斯特的回信中作了这样的解释：“只要我还想留在柏林，我就不得不这样做，因为在这里每个小孩都从照相上认得我。如果一个人是民主主义者，他就得承认有要求公开发表意见的权利。”

魏兰德等人发动的对相对论和爱因斯坦的攻击，引起了德国一些著名物理学家的愤慨。在柏林音乐厅那个会的第二天，即 1920 年 8 月 25 日，劳厄、能斯特和鲁本斯就联名给柏林各大报纸发出一个声明。《柏林日报》刊载了这个声明，其内容如下：“我们不想在这里来谈论我们对于爱因斯坦产生相对论的那种渊博的，可以引为范例的脑力劳动的意见。惊人的成就已经取得，在将来的研究工作中当然还会进一步证明。此外，我们必须强调指出，爱因斯坦除了研究相对论，他的工作已经保证他在科学史中有一个永久性的地位。在这方面，他不仅对于柏林的科学生活，而且对于整个德国的科学生活的影响大概都不是估计过高的。任何有幸亲近爱因斯坦的人都知道，在尊重别人的文化价值上，在为人的谦逊上，以及在对一切哗众取宠的厌恶上，从来没有人能超过他。”

爱因斯坦作为最伟大的物理学家，是因为他在狭义相对论、广义相对论、光量子论、分子运动论、宇宙学和统一场论等六大领域都作出了杰出的科学贡献，这是其他物理学家无法比拟的。

狭义相对论。1905 年 6 月，爱因斯坦创立的狭义相对论，引发了物理学的一场革命，它变革了传统的时空、质量、动量、能量等基本概念，不仅深刻揭示了作为物质存在形式的时间和空间的统一性，而且深刻揭示了各种物理运动形式的统一性：力学运动和电磁运动的统一性，以及两种运动量度（动量和能量）的统一性，从而极大推动了物理学的发展。

广义相对论。在多数物理学家还不理解狭义相对论的时候，爱因斯坦却继续努力把他的理论向前推进。1907 年提出了均匀引力场与均匀加速度的等

效原理。以后经过 8 年艰苦的探索，中间得到了他的老同学格罗斯曼的帮助，应用了黎曼的曲面几何，终于在 1915 年 11 月建立了广义相对论。广义相对论进一步深刻揭示了作为时间和空间统一体的四维时空物质的统一关系，深刻揭示了时间和空间不可能离开物质而独立存在，空间的结构和性质取决于物质的分布，物质之间的引力不过是空间曲率的一种表现。

光量子论。早在 1905 年 3 月，爱因斯坦就写了《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》的论文，提出光量子假说，把普朗克的量子概念扩充到辐射在空间的传播上去。爱因斯坦的光量子论揭示了光的量子本性，光不仅仅被看成是一种波动，它同时也是一种粒子，是粒子和波的综合。对于统计的平均现象，光表现为波动；对于瞬时的涨落现象，光表现为粒子，从而揭示了微观粒子的波粒二象性。

1916 年爱因斯坦发表的论文《关于辐射的量子理论》，是量子论发展第一阶段的理论总结，它从玻尔的原子构造假说出发，用统计力学的方法导出普朗克的辐射公式，提出受激辐射理论。这不仅对 20 年代量子力学的创立有重要作用，也为 60 年代蓬勃发展起来的激光技术准备了理论基础。

1924 年德布罗意的物质波假说提出不久，就得到爱因斯坦的热情支持，而且爱因斯坦立即用来研究单原子理想气体，同印度青年物理学家玻色合作，提出玻色—爱因斯坦统计法。由于受了爱因斯坦这项工作的启发，薛定谔才试图去发展德布罗意理论，并于 1926 年建立了波动力学。

分子运动论。1905 年的 4 月和 5 月，爱因斯坦发表了两篇关于分子运动论的论文，试图通过对悬浮粒子运动（即 1827 年发现的布朗运动）的观测来测定分子的实际大小。4 月写的一篇是他向苏黎世大学申请博士学位的论文。他从事这项研究，是为了解决半个多世纪来科学界和哲学界长期争论不休的原子和分子是否存在的问题。3 年后，法国物理学家佩兰以精密的实验证实了爱因斯坦的理论预测，这就以无可辩驳的事实证明了原子和分子的存在。

现代宇宙学。爱因斯坦在建立广义相对论后，就开始有关宇宙学问题的探索。1917 年发表题为《根据广义相对论对于宇宙学所作的考查》的论文，提出宇宙空间是有限无界的假说，这是现代宇宙学的开创性文献。后来，由于荷兰天文学家德西特和前苏联大气物理学家弗里德曼的工作，发现宇宙空间可能是在不断膨胀着，预见到各个星系之间存在着相互分离（远退）的运动。这一预见为美国天文学家哈勃于 1929 年发现河外星系谱线的红移而得到了有力的支持。

统一场论的研究。从 20 年代开始直至晚年，爱因斯坦把主要的科学创造精力用于统一场论的研究。企图建立一种包括引力场和电磁场的统一理论，用广义相对论的推广形式来概括所有各种物理运动形式，用场的概念来解释物质结构和量子现象。他认为这是相对论发展的第三阶段。

虽然这一研究探索当时未取得具有物理意义的结果，但近年来正以新的形式显示它有着不可估量的生命力。正如爱因斯坦自己在晚年时所说：“我完成不了这项工作了；它将被遗忘，但是将来会被重新发现。”

事实正是如此，1967 年，巴基斯坦物理学家萨拉姆和美国物理学家温伯格各自独立地提出了电弱统一理论。电弱统一理论的成功又进一步促进了强、弱和电磁 4 种相互作用统一的所谓大统一理论的研究，以及包括引力在内的 4 种相互作用统一的所谓超统一理论的研究。

卢瑟福模型

19 世纪末，经典物理学已经建立了比较完善的理论体系，力学、电磁理论、热力学及统计物理已成为 19 世纪末科学技术发展的理论支柱，致使有些物理学家认为，物理学的理论大厦已经基本建成，剩下的问题只是把一些常数测得更精确些，把现有的理论应用到各个具体问题上去。1899 年除夕之夜，著名物理学家开尔文在每年的聚餐会上发表讲演时认为：19 世纪的经典物理学是万里晴空。在人们陶醉于“尽善尽美”的时候，物理学许多领域里出现了一系列新发现。这些新发现与经典物理学理论有着尖锐的矛盾，使经典物理学理论体系面临着一场挑战。19 世纪末，物理学的天边就出现了两朵小小的、令人不安的“乌云”。第一朵是指 1887 年迈克耳逊同莫雷合作所做的“以太”漂移速度实验得到了否定结果。这个实验的目的是寻找绝对参照系，结果失败了，这使经典物理的绝对时空观受到了严重冲击。第二朵是关于热辐射的“紫外灾难”。

其实，19 世纪末不止是两朵“乌云”，像固体比热、光电效应也是经典理论无法解释的现象。还有 1895 年伦琴发现的 X 射线；1896 年，贝克勒尔发现的铀放射性；1897 年，J·J·汤姆逊发现的电子等都是用过去的知识和概念所不能解释的。这说明在 19 世纪末，经典物理学的天空已不是两朵乌云，而是乌云密布，正面临着一场疾风暴雨式的物理学革命。事实上也正是在这场暴风雨过后，才迎来了物理学天空中光彩夺目的彩霞。迈克耳逊—莫雷实验导致了相对论的建立；黑体辐射的“紫外灾难”及“光电效应”导致了量子论的诞生；X 射线、放射性及电子的发现推动人们去研究原子内部结构，导致建立新的原子模型。

原子是不可分割的最终质点，是 20 世纪以前人们坚信的概念，但是，电子的发现，使原子不可分割的观念被冲破。那么，电子是如何被发现的呢？这个问题要从人们研究“阴极射线”谈起。

在 19 世纪后半叶，真空放电产生辉光现象成为各国科学家感兴趣的议题，并都利用真空放电管做了大量实验研究，得到了一些重要研究成果。这里主要介绍一下德国物理学家哥尔施泰因的工作。1876 年，他在前人研究的基础上，做了大量真空放电的实验，发现产生辉光是由于负极上产生的“某种射线”引起的。他把这种射线称为“阴极射线”。那么，阴极射线的实质又是什么呢？关于这一点相继争论了十几年的时间。1897 年，J·J·汤姆逊做了一次实验，这次著名的、判决性的实验发现，阴极射线不仅能被磁场偏转，而且也能被电场偏转。进一步实验证明，阴极射线是由带负电的粒子组成。

汤姆逊根据阴极射线在磁场和电场中的偏转，度量出了这种粒子的荷质比 $\frac{e}{m}$ 约

为氢离子的 20000 倍。当 $eE = H \cdot Ue$ 时，计算出 $U = \frac{E}{H}$ ，只加磁场时射线作圆

周运动，磁力即为向心力：

$$H \cdot U \cdot e = m \cdot \frac{U^2}{R}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{U}{H \cdot R} = \frac{E}{H^2 R}, \text{ 其中, } E、H、R \text{ 均可测得, 计算出}$$

$$U = 2.7 \times 10^9 \text{ 厘米 / 秒。} \quad \frac{e}{m} = 7.7 \times 10^6 \text{ 电磁单位 / 克。}$$

J·J·汤姆逊还通过变换放电管中的气体（空气、氢气、二氧化碳等）和改变电极材料（铝、铁、铂等）测量阴极射线粒子流的荷质比，结果发现荷质比不变。经分析断定，这种粒子应该是电极材料中原子的组成部分。早在 1894 年，爱尔兰科学家斯通尼，研究电磁理论时就提出，有基本的单位电荷存在，斯通尼把它称为电子，J·J·汤姆逊就采用了“电子”作为这种粒子的名称。不过，斯通尼所说的“电子”与 J·J·汤姆逊的电子有区别，斯通尼的电子是作为电荷的基本单位，而 J·J·汤姆逊所说的电子是既包括电荷的基本单位又有质量的粒子。

电子的发现，不仅解决了“阴极射线”的本质问题，同时也动摇了以前原子不可分割的概念。在这一时期，有许多物理学家纷纷开始探讨原子的内部结构。既然原子是中性的，而电子又是原子的组成部分，那么，原子一定有带正电荷的部分，而且原子所带正电荷与负电荷在数量上应该相等。人们根据推测提出了多种不同的假说和原子结构模型。

（1）勒纳德的中性微粒模型

勒纳德在 1894 年研究阴极射线时，在放电管的玻璃壁上开了一个小窗口，用金属箔把窗口盖住。实验时发现，阴极射线很容易穿过金属箔窗口射到空气中去。当电子发现后，原子结构的探讨成了中心议题。1903 年，勒纳德根据阴极射线穿透金属箔的实验，断定金属中的原子不是实心的弹性球，必有部分体积是空无所有的空间。他假设原子内部的电子与相应的正电荷组成“中性微粒”。这个中性微粒取名为“动力子”，无数的动力子在原子内部的空间游荡。这种原子结构模型没有得到实验证实，因此影响不大。

（2）长岗半太郎的土星原子模型

1904 年，长岗半太郎根据土星的卫环理论，提出原子内部，电子组成电子环，围绕一个核心转动的假设。他在《用粒子系统的运动学阐明线光谱、带光谱和放射性》论文中写道：“我要讨论的系统是由很多质量相同的质点，联接成圆，间隔角度相等，相互间以与距离成平方反比的力相互排斥。在圆心有一大质量的质点对其它质点以同样定律的力吸引。如果这些互相排斥的质点以几乎相同的速度绕吸引中心旋转，只要吸引力足够大，即使有小的干扰，这系统一般将保持稳定。”长岗的土星原子模型由于不能满足经典理论提出的稳定性要求，所以，这个模型提出不久，就有人进行驳斥。长岗的原子模型虽然很不完善，但是，他的提法中已孕育了原子有核的概念，为后来卢瑟福提出原子有核模型奠定了基础。

（3）J·J·汤姆逊的原子模型

在 1910 年以前，影响较大、寿命较长的原子模型是 1903 年 J·J·汤姆逊的原子模型。汤姆逊假设正电荷连续分布在原子中，而电子埋置在某些固定位置上。由于电子质量很小，他又假设原子的质量存在于分散分布的正电荷中。另外，考虑到电子一方面受正电荷的吸引，另一方面电子之间又互相

排斥，所以电子在原子中的位置要满足一定的条件，这个条件就是使电子处于平衡状态。汤姆逊还由计算证明，三个电子以上时，电子组成环状，而六个以上的电子不能稳定在一个环上，要组成两个环或两个以上的环。此外，汤姆逊还假设，电子在自己平衡位置附近作自由振动，电子振动要辐射电磁波，电磁波的频率就等于电子振动的频率。利用这种方法，他还准确计算出原子的半径约为 10^{-8} 厘米。汤姆逊设想的原子模型常常在实验中暴露出与实验之间的严重矛盾，虽然汤姆逊千方百计改进自己的理论，但终究未能圆满。尽管如此，也好长时间没有人对汤姆逊的观点提出异议，因为汤姆逊当时在物理学界有较高的声誉。

上述各种原子模型，是根据原子是中性所进行的各种猜测。究竟原子内部是什么样的结构，尚需要不断地在实验中进行研究。

在英国曼彻斯特大学，曾是 J·J·汤姆逊学生的大学教授卢瑟福对他老师提出的原子模型并不感到满意。因为，汤姆逊的原子模型在很大程度上带有人为性。卢瑟福决心用他发现的 α 粒子作“炮弹”探索原子内部的情况。开始，他和他的助手盖革用 α 粒子束轰击各种物质制成的靶子，发现大多数 α 粒子偏折角不大，其中有少数粒子发生了大角度散射，甚至有少数 α 粒子竟完全被弹回。

卢瑟福又让他的另一个助手马斯登再做实验，以验证是否有 α 粒子大角度散射现象发生。两三天后，马斯登兴冲冲地找到了卢瑟福，报告说，他也发现有些 α 粒子被弹回。卢瑟福听到这一消息后，立即再做实验，又证明了这一现象。卢瑟福对别人描述这一现象时说：“这是我一生中遇到的最难以置信的事情，简直就像 15 吋的炮弹去轰击一张薄纸，而炮弹却掉过头来击中你自己一样难以相信。”

是什么把 α 粒子弹了回去呢？若按汤姆逊的原子模型， α 粒子不可能产生大角度散射，更没有被弹回的可能。他认为， α 粒子之所以被弹回，一定在原子内部受到了极强电场的作用。这样，就可设想所有正电荷都集中在一个核心上， α 粒子与这个核心接近时，受到极强的作用力，以至于把 α 粒子抛回去。长岗的土星模型也给卢瑟福很大的启示。1911 年 5 月，卢瑟福提出了“太阳系式”原子模型。他认为，原子中有一个非常小的带正电的中心核，即原子核；电子绕核旋转，就像行星绕太阳旋转一样；原子核集结了原子的大部分质量。这就是卢瑟福的“太阳系式”原子模型。在卢瑟福原子模型中，电子绕核旋转，就必有加速度，按经典理论原子就要向外辐射电磁波（即辐射能量），随着能量的减少，最后电子就会落到原子核上，出现原子坍缩现象。这与事实并不相符合。是不是卢瑟福的原子模型不成立了呢？卢瑟福在“物质对 α 、 β 粒子的散射和原子构造”的论文中指出：“原子的稳定问题先不必考虑，因为这个问题显然取决于原子的微细结构和带电部分的运动。”这就是说，如何解释稳定性问题，是以后要解决的事情，它丝毫不影响原子有核模型的建立。

卢瑟福为进一步检验原子有核模型的正确性，想到必须用力学定律导出一个公式，再由这个公式算出 α 粒子在离排斥中心不同距离 b （称瞄准距离）处通过时偏转角的大小。据说，卢瑟福在福勒的帮助下，才导出 α 粒子的散射公式。

1913 年，在卢瑟福指导下，盖革和马斯登又仔细进行了 α 粒子散射实验，证实了散射公式的正确性，从而证实了卢瑟福提出的原子有核模型。至

此，卢瑟福的原子有核模型得到了公认并取代了 J·J·汤姆逊的原子模型。

玻尔模型

新的原子模型虽然已经建立，但如前所述它同经典理论有尖锐的矛盾。另外，电子绕核运动发出的电磁波谱按经典理论应该是连续谱，但事实上并非如此。如果原子真的会坍缩，那么，整个宇宙和生物将在很短时间内进入“死气”状态，即宇宙将是极不稳定的，而实际宇宙是稳定的。此外，原子发射的光（电磁波）谱也不是连续的，而是分立的线状光谱。

氢原子光谱为线状光谱已早为人知。埃格斯特朗首先从气体放电的光谱中找到了氢的红线，即 $H\alpha$ 线，后来又在可见光区发现另外几根光谱线，并精确

测量了它们的波长，它们分别是 $H\alpha = 6562.10$ ， $H\beta = 4860.74\text{\AA}$ ， $H\gamma = 4340.10\text{\AA}$ ， $H\delta = 4101.20\text{\AA}$ 。氢的线状光谱发现后，有许多光谱学家想

找出一个能表示氢光谱分布规律的公式，但是大多没有成功。瑞士的巴耳末当时是一位中学数学教师，并在巴塞尔大学兼课。巴塞尔大学一位对光谱很有研究的教授曾鼓励巴耳末试一试。巴耳末仔细研究了氢光谱的分布情况，然后，通过巧妙的数学运算，得出了巴耳末公式

$$\lambda = b \frac{m^2}{m^2 - n^2}$$

λ 波长， $b=3645.6 \times 10^{-7}\text{mm}$ ，这个公式是 1884 年 6 月 25 日巴耳末向全国科学协会作研究报告时公布的。这个公式是如何得到的呢？在 1885 年巴耳末写的论文中说：“埃格斯特朗对氢谱线的精确测量使我有可能是为这些谱线的波长确定一个共同因子（指 b ），以最简便的方法表示这些波长的数量关系。于是，我逐渐找到了一个公式，至少可以对这 4 根谱线以惊人的精度算出它们的波长，这一公式是光谱定律的生动表示式。”

“从埃格斯特朗的测定中，推出这个公式的共同因子是 $b = 3645.6 \times 10^{-7}\text{mm} \dots\dots$ ”。

“氢的前四根谱线的波长可以从这一基数相继乘以系数 $\frac{9}{5}, \frac{4}{3}, \frac{25}{21}$ 与 $\frac{9}{8}$ 得到。初看起来这个系数没有构成规则数列，但如果第二项与第四项分子分母分别乘 4，则分子为 $3^2, 4^2, 5^2, 6^2$ ，而分母相应地差 4。”即是说

$$\frac{9}{5} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{25}{21} \quad \frac{9}{8} = \frac{3^2}{3^2 - 4} \quad \frac{4^2}{4^2 - 4} \quad \frac{5^2}{5^2 - 4} \quad \frac{6^2}{6^2 - 4}。$$

巴耳末还说：“由于几种原因，使我相信，这 4 个系数属于 2 个数列，第

二数列包含有第一个数列。最后，我终于提出一个更普遍的形式 $\frac{m^2}{m^2 - n^2}$ ，

其中 m, n 均为整数。”

“如果用这些系数和基数 3645.6 计算波长，以 10^{-7}mm 作单位，公式与埃格斯特朗观测值的偏差最大不超过波长的 $1/40000$ ，这个偏差很可能就在

观测的误差范围之内。这真是一个极好的证据，说明埃格斯特朗是以何等高超的科学技巧和细心从事这项工作的”。至于公式中因子 b 是如何得到的，巴耳末本人并没有提，这只好由后来人根据他的手稿去推测了。1890 年，里德伯将巴

耳末公式用波数表示 $\nu = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, \dots$ 。

氢原子的线状光谱事实，就已经暴露出与经典理论之间的矛盾。但是，由于当时人们还不了解原子内部结构和经典理论根深蒂固的缘故，所以这一矛盾的重要性也就没有被提出来。19 世纪末到 20 世纪初，大量的新发现表示了经典理论具有一定的局限性，要解释新发现的问题，就必须扬弃经典理论去寻求新途径。事实上，人们正是打破了旧的观念，提出了新的理论观点，才使问题得以解决，例如，普朗克在 1900 年提出能量不连续的概念。他认为，能量有一最小单元 $\varepsilon = h\nu$ ，其它都是这个最小单元的整数倍。普朗克把这个最小单元称做能量子。普朗克利用这一观点解决了黑体辐射的“紫外灾难”问题。能量不连续的观点直接与能量连续的经典理论相违背，但它与事实相符合。1905 年，爱因斯坦提出了光量子的观点，光子具有能量 $h\nu$ 。利用这一观点爱因斯坦解决了“光电效应”问题。光具有波、粒二象性的观点也与经典理论相违背。上述事实足以说明经典理论的局限性。卢瑟福的原子有核模型是 1911 年提出来的，但是，他没有突破经典理论的束缚去解决原子有核模型与经典理论之间的矛盾。

1907 年，丹麦物理学家尼尔斯·玻尔在丹麦的哥本哈根大学学习期间，读过普朗克提出的能量子观点书籍。1911 年，他以《金属电子理论的研究》论文取得博士学位后，于秋天到英国剑桥大学学习，为 J·J·汤姆逊的学生。1912 年 4 月初到英国的曼彻斯特大学卢瑟福的身边学习和工作。这时正是卢瑟福的原子有核结构理论进行检验的时候，卢瑟福让玻尔参加了盖革和马斯登主讲的放射性研究的实验方法讲演会，并帮助他们整理数据和撰写论文。玻尔坚信原子的核型结构符合客观事实。不久，他就向卢瑟福提出 α 粒子和 β 粒子可能来自原子核内部的想法。另外，他还认为像行星一样在原子核外旋转的电子，它的排列可能决定了各种元素的物理性质及化学性质。而卢瑟福却持怀疑态度，说：“不要在微不足道的实验事实上建立太多的理论。”为什么卢瑟福提出了原子有核结构而没有提出解决与经典理论之间的矛盾的方法？为什么玻尔提出新设想时，卢瑟福又持怀疑态度？这说明卢瑟福在科学态度上的谨慎。但是过于谨慎往往对人的聪明才干起到束缚作用。时隔不久，英国化学家索迪和鲁塞尔各自指出：一种元素在放出 β 粒子后，元素的化学性质就会变成在周期表中与后一位相同的元素；而放出 α 粒子后就会变成与前两位相同的元素。几个月以后，索迪就宣布自己发现了所谓“位移定律”。这一发现使索迪几年之后获诺贝尔化学奖金，玻尔在这方面却是望尘莫及。他没有抱怨卢瑟福在这一研究问题上曾给他泼过冷水，而是决心探索另一条新的途径：绕原子核旋转的电子可能决定元素的物理性质及化学性质。要解决这个问题，玻尔认识到首先要解决电子绕核旋转与经典理论之间出现的矛盾，要解决这个矛盾就必须对经典理论进行一番彻底改造。玻尔的这一想法并不是偶然的，因为前面已有解决黑体辐射的“紫外灾难”、光电效应作为先例，正是在这种基础上玻尔去建立定态跃迁原子模型的。

1912年7月24日，玻尔离开了曼彻斯特回到了哥本哈根。回国后，他一直在想原子的核型结构与经典理论之间的矛盾。正在日夜苦思之际，与玻尔一起工作的好朋友光谱学家汉森提示玻尔要注意下巴耳末的发现及里德伯加以发展的光谱规律，还把巴耳末的发现详细介绍给玻尔。后来玻尔回忆说：“我一看到巴耳末公式，整个形式一下子就清楚了。”他分析了原子结构与光谱之间的矛盾，意识到卢瑟福的原子核型结构可以和量子化概念结合起来。之后，他着手写《论原子和分子结构》的论文，于1913年8月27日全部完稿。这篇论文共分三部分。第一部分讨论了电子和正电核的结合；第二部分讨论了单原子核系统；第三部分讨论了多原子核系统。这三部分分别发表于1913年7月、9月、11月。由于该论文由三部分组成，所以人们把它称为玻尔的“三部曲”。

在讨论原子结构与光谱线系之间的关系时，玻尔提出了大胆的假设，这个假设包括两点内容：

(1) 稳定状态假设

电子绕原子核做圆周运动，电子只能稳定地处在角动量满足 $2\pi mvr = nh$ (n 为正整数 1, 2, 3, ……) 的轨道上。

(2) 频率条件假设

原子由能量为 W_n 的定态跃迁到能量为 W_m 的定态时，才能辐射能量。所辐射放出的频率满足 $h\nu = W_n - W_m$ 。

玻尔根据以上假设，然后运用经典力学规律求出了电子可能存在的轨道半径 $r = n^2 b^2 / 4\pi^2 m e^2 z$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)。对于氢原子 $z = 1$ ，电子轨道半径为 $r = n^2 h^2 / 4\pi^2 m e$ 。原子具有能量 $W_n = -2\pi^2 m e^4 z^2 / n^2 h^2$ ，即能量是量子化的。如果原子从 W_n 态过渡到 W_m 态，放出的能量为 $h\nu = W_n - W_m = 2\pi^2 m e^4 z^2 / h^2 (1/m^2 - 1/n^2)$ 其频率 $\nu = 2\pi^2 m e^4 z^2 / h^3$ 。 $z = 1$ 时， $\nu = 2\pi^2 m e^4 z^2 / h^3 (1/m^2 - 1/n^2)$ ，计算出 R 的值与里德伯常数实验值符合得非常好。

玻尔在论文中指出，若上式中取 $m = 2$ ，令 n 可变，就得巴耳末系。若取 $m = 3$ ，就得到里兹预言的、由帕邢 1908 年在红外区观测到的谱线系。玻尔还预言，如果取 $m = 1$ 和 $m = 4, m = 5$ ，就会有远紫外区和远红外区的谱线系。后来，分别由赖曼在 1914 年，布喇开在 1922 年和普芳德在 1924 年发现了玻尔预言的谱线系。

玻尔理论不但成功地解释了氢光谱，而且还解释了部分元素的周期性，使化学从定性的科学转为定量的科学成为可能，并把 20 世纪以前认为不相关的两门学科，物理与化学，统一到同一基础上来。

玻尔理论从创立到被人们承认经历了曲折的道路。1913年9月7日（这时玻尔论文的第三部分还没发表）玻尔应卢瑟福的邀请参加了在英国伯明翰召开的大不列颠科学促进会会议。会后谈到玻尔理论时，拉摩尔要求瑞利发表对玻尔理论的看法，71 岁的瑞利说：“我年轻的时候，对许多观点是深信不疑的。其中之一就是：人在 60 岁后就不应在现代观点中插一杠子。尽管我承认自己并不笃信这一观点，但还足以使我超然于这场讨论之外”。这位大名鼎鼎的物理学家是不是“超然于这场讨论之外”呢？不是的。当他儿子问他是否看过玻尔关于氢光谱的论文时，他却回答说：“是的，我看过。不过我看出它对我没有用处。我并不认为不按这种方式就做不出发现来，相反倒是很有可能的。但它不合我的脾胃。”瑞利的话不仅是代表了他自己，而且

是代表了相当一部分人的看法。例如，J·J·汤姆逊、洛伦兹也竭力反对玻尔的理论，就连当时比较年轻的、已享有名气的物理学家劳厄与史特恩也说：“假如玻尔的理论碰巧是对的话，我们将退出物理学界。”这两个人后来不但没有退出物理学界，而且对玻尔的理论发展还作出了很多贡献。玻尔理论为什么会引起一些人的反对，其原因：一、玻尔理论的观点之新颖，以至使那些受旧教育出来的物理学家难以接受。二、玻尔当时在物理学界还是一个无名小辈，这样的“小人物”作出这样重大贡献，使那些“大人物”不可想象。在这时期，玻尔理论不仅受到舆论上的压抑，而更严峻的考验是来自匹克林光谱系的理论。

1896年，美国天文学家匹克林在哈佛天文观测台的第12号通报中宣布：“弗莱明夫人发现船槽座ζ星的光谱非常特殊，和别的光谱都不一样”，“这6根线很像氢光谱线那样，形成有规律的谱线，显然，这是出自其它星体或地球上尚未发现的某种元素”。当时，还在通报上发表了拍得的照片，从照片上可以明显地看到，有4根谱线与氢的巴耳末系 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 、 $H\delta$ 、 $H\epsilon$ 互相间隔，极有规律。

1897年，匹克林把它用巴耳末公式的形式表示出来，
$$\lambda = 3646.1 \frac{n^2}{n^2 - 16}$$

, $n=5, 7, 9, \dots$ ，不过，匹克林把巴耳末公式中的 $b=3645.6$ 改为 3646.1 ，而 n 取奇数。匹克林的经验公式与实际测得的波长符合很好。人们称它为匹克林谱系。

后来，里德伯把匹克林公式改为 $n = 2.5, 3, 3.5, 4, \dots$

($\forall$ 波数)，由于此公式与巴耳末公式完全一样（只是 n 取值不同），里德伯

认为它是一种氢光谱。所以，人们一直相信这是星体上一种特殊氢发出的光谱。1912年，英国物理学家福勒宣布：他在实验中通过氢、氦放电管放电，发现了这种特殊的氢。这说明在地球上也存在着这种特殊的氢。但是，在他的实验中，没有根据说明光谱线是由氢发出而不是由氦发出的。福勒并把这种氢光谱，不过，他特别申明 n_1 、 n_2 都必须包括半整数。福勒的工作有一点可以肯定，他打破了人们一直相信只有天体中存在着这种特殊氢。

1913年，玻尔发表了《论原子和分子结构》论文，按照玻尔对氢光谱的解释， n 只能取整数，而福勒和里德伯的研究 n 可以取半整数，这就使玻尔理论面临着一场挑战。为此，玻尔也花费了很大精力去研究这个问题。玻尔根据卢瑟福的理论，考虑到氦的中性原子由带 2 正电荷的核和两个电子组成，如果考虑氦核只束缚住一个电子，令 $Z=2$ ， $n_1=4$ 时 $k=2.5, 3, 3.5, 4, \dots$ 。这与里德伯的公式完全一样。这种解释开始不被人们所接受，后来，玻尔竟向早已被人们所熟悉的匹克林系提出挑战，声称它不是来源于氢，而是来源于一次电离的氦，这种挑战必然遭到一部分人的反对。玻尔在卢瑟福身边学习和工作时与卢瑟福结下了深情厚谊，这时玻尔给卢瑟福写信强调了匹克林系起源问题的重要性，并恳求卢瑟福在实验室里为他组织专门的光谱实验。卢瑟福对玻尔的工作一方面表示怀疑，一方面又尽力给予支持，他安排了曼彻斯特大学的同事伊万斯进行纯氦光谱实验，以证实匹克林谱系的起源问题。1913年9月伊万斯发表了实验结果，证实了玻尔的解释是正确的，匹克

林系实属来源于一次电离的氢。之后，伊万斯继续进行这项实验，进一步确认玻尔对氢、氦光谱解释的正确性。经过对匹克林系问题的斗争并围绕这场斗争所做的实验，打破了一直认为匹克林系是来自星体上一种特殊氢的概念。同时玻尔理论又进一步扩大了战果——对于类氢离子，也能给予很好的解释。

1914 年，夫兰克和赫兹用不同能量的电子去碰撞汞的稀薄蒸气，发现处于蒸气状态的原子，吸收电子的能量具有选择性，即只有电子能量为某些值时，才被原子所吸收，这说明原子内部的能量是不连续的，这就证实了原子定态跃迁理论的正确性。至此，玻尔理论被人们普遍所接受。夫兰克与赫兹也由于对原子理论的贡献，于 1925 年同获诺贝尔物理学奖。玻尔由于对原子理论的贡献，1916 年被哥本哈根大学聘请为理论物理教授，1922 年获诺贝尔物理学奖。

在玻尔发表氢原子理论的时候，已经有 91 种元素被人们所知。但是，玻尔理论只能对氢原子及类氢离子产生的光谱现象给予很好的说明，对于具有两个以上电子的原子所产生的复杂光谱，用玻尔理论却不能解释。所以，玻尔理论提出不久，许多人就感觉到了它的不足之处。1915 年，索末菲和威尔逊各自在玻尔量子条件的基础上作了改进。他们认为玻尔的量子条件是不完全的，既然电子绕核的运转像行星绕太阳运转一样，而行星绕太阳运行轨道是椭圆，可是，玻尔在讨论电子绕核运转时只考虑了圆形轨道。于是，他们提出了适合于一般情况下的量子化通则，认为作周期运动的系统，若有坐标 $q_1, q_2, \dots$ 及共轭动量 $p_1, p_2, \dots$ ，则其作用积分为 h （普朗克

常数）的整数倍，即 $\oint p_k dq_k = n_k h$ 。这个量子化条件对于电子作圆周运动和 s 椭圆运动都是适用的。对于圆周运动只考虑角变量 φ 则由 $\oint p_\varphi d\varphi = nh$ （ $p_\varphi = \text{常数}$ ）得出 $2\pi mru = nh$ 这就是玻尔的量子条件。对于椭圆运动有：

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint p_r dr = n_r h \quad n_r \text{——称径向量子数} \\ \oint p_\varphi d\varphi = n_\varphi h \quad n_\varphi \text{——称角量子数} \end{array} \right.$$

$$\text{利用电子作椭圆运动计算出原子的能量则有 } W_n = -\frac{2\pi^2 me^4 z^2}{h^2 n^2}$$

这与玻尔计算出的原子能量完全相同。从电子的运行轨道来看，当 n 给定时， n_φ 可取 n 个值。当 $n_\varphi = n$ 时，为玻尔所说的圆形轨道；当 $n_\varphi \neq n$ 时，为不同偏心率的椭圆轨道。由于索末菲的工作，使玻尔理论得到了改进。不仅如此，更重要的是索末菲通过理论计算指出，对同一个量子数 n ，电子在不同偏心率的轨道时，原子所处状态具有相同的能量，即原子所处状态是简并的。这一重要结论在以后建立的量子力学中广为应用。

索末菲在发展玻尔理论上成绩卓越。原子光谱的精细结构早为光谱学家们所熟悉，如 H_α 线为三重线早为迈克尔逊在 1891 年所发现，但是，用玻尔理论却无法解释。然而，索末菲考虑到电子绕核旋转时，电子的质量要产生相对论效应。于是索末菲以相对论力学取代了玻尔理论中的牛顿力学，计算出原子所处状态的能量不仅与 n 有关，而且还与角量子数 n_φ 有关。即 $W_n = -Z^2 R [1 + a^2 z^2 / n^2 (n/n_\varphi - 3/4) + \dots]$ 式中 R 为里德伯常数，称索末菲精细结构

常数, $a_2 \pi e^2 / hc \approx 1/137$ 由于对给定的 n , n_ϕ 可取 n 个不同值, 这样就会产生能级分裂, 索末菲正是利用这种能级分裂解释了 H_α 线的精细结构。在这一期间, 索末菲还提出了电子轨道在空间方位的取向也是量子化的假设, 这个假设直到 1921—1922 年才由史特恩和盖拉赫利用银原子束在非均匀磁场中的偏转得到证实。电子绕核运动需要第三个量子数——磁量子数来确定。按理论计算磁量子数 m 与角量子数 n_ϕ 的关系为 $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, 0 \pm n_\phi$, 而在史特恩-盖拉赫的实验中, 银原子束在非均匀磁场中的偏转不是分为三束, 实际仅观察到两束, 这一原因直到提出电子自旋后才得到圆满解决。空间量子化的证实, 使 1896 年塞曼所发现的原子光谱在磁场中的分裂现象(寻常塞曼效应)得到解释。但是, 对反常塞曼效应却不能给予很好的说明。1923 年, 德国杜宾根大学教授朗德对反常塞曼效应进行了仔细研究, 他根据原子光谱在磁场中的分裂现象指出: 能态为 $2s+1L_J$ 的原子, 在磁场作用下的能级改变可用 $E=E_0+gM_\mu B H$ 表示, 式中 H 为磁场强度, M 为磁量子数, $\mu B = \frac{he}{4\pi mc}$ 为玻尔磁元, $g = 1 + \frac{J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)}{2J(J+1)}$ 称朗德

因数。当时, 包括朗德本人在内, 对 J 、 S 、 L 的物理意义, 并不清楚。但是, 他根据自己提出的公式却很好地解释了反常塞曼效应。

为什么在史特恩-盖拉赫实验中, 银原子束在非均匀磁场中的偏转是两束, 而不是三束? J 、 L 、 S 又代表什么意义? 这两个问题直到 1925 年才清楚。1925 年, 乌伦贝克和古德斯密特为了解释光谱线的精细结构, 提出电子有自己的自旋角动量和自旋磁矩的假设。他们分析了一些实验现

象, 认为电子自旋角动量为 $S \frac{h}{2\pi}$, 其中 S 为自旋量子数, 只能取 $\frac{1}{2}$, 电子自旋磁矩 $\mu_s = \frac{eh}{4\pi mc} = \mu B$ 。这个假设的提出, 既解决了光谱线的精细结构问

题, 又解释了史特恩-盖拉赫实验中银原子束是两束而不是三束的实验现象, 并明确了 J 、 L 、 S 的物理意义。电子自旋概念的提出, 明确了电子运动状态的第四个量子数。自旋概念对发展玻尔理论的作用虽然很小, 但是, 对后来物理学的发展却起了不可估量的作用, 自旋概念成了当今物理学中基本粒子的基本属性之一。

在 1913 - 1925 年间的 12 年中, 在探讨原子内部结构以及利用这种结构解释原子产生的光谱现象可以说是物理学中的中心议题。对于原子内部结构, 玻尔一开始就利用自己提出的理论作过解释, 并论证了部分元素的周期性。但是, 他对高原子序数的元素却不能给出解释。因此, 玻尔认为自己的理论还不够完善, 不能对这类问题给出明确解释。是的, 一种理论的发展和完善往往不是一个人的工作而需要许多人的工作, 甚至是几代人的工作。从原子概念的提出到原子内部结构的提示就说明了这一点。

关于原子内部结构与元素周期表的解释, 泡利作了关键性的工作。1925 年, 他提出了著名的不相容原理, 即原子中, 任何两个电子不能具有完全相同的量子数。有了不相容的原理, 终于揭示了 20 世纪以前由门捷列夫发现、后来由莫塞莱改进的元素周期表的物理意义, 解释了元素周期表的周期性。

应该指出，泡利不相容原理，虽然是在玻尔理论发展的后期提出来的，它与自旋的概念一样，只不过是玻尔理论作了最后补救。但是，泡利不相容原理在现代理论研究中却成为一条最基本的原理。

尽管许多的物理学家在发展玻尔理论上作出了很大贡献，并且能够解释一些问题。但是，人们越来越清楚地看到，玻尔理论必须抛弃。这是因为随着实验及理论的发展，发现玻尔理论本身存在着不可克服的困难。例如，玻尔理论不能说明原子定态跃迁时发出光谱的强度；对于双原子分子的振动——转动光谱的解释，应用玻尔理论可得到一个公式，此公式相当于半奇整数的量子数

$J + \frac{1}{2}$ ，然而，由光谱分析的结果，则应为整数量子数 J ；此外，在简谐振子问题上，玻尔理论所得能量公式为 $E = nh\nu$ ，而实验证明简谐振子具有所谓的“零

点能量” $\frac{1}{2}h\nu$ ，故能量公式应为 $E = (n + \frac{1}{2})h\nu$ 。这一切说明，玻尔理论本身存在着一定缺陷。其原因是多方面的。从玻尔理论本身来讲，开始他就引用了没有任何实验根据的量子条件；另外，玻尔理论是经典理论加量子观点的混合产物。基于上述原因这就不可避免地使该理论具有一定的局限性；从科学发展的过程来看，玻尔理论具有缺陷也是不足为奇的。因为，人们认识事物的本质及客观规律总是逐步深化并日趋完善的。

1918—1923 年间，玻尔在经典概念与量子概念之间提出了著名的对应原理。玻尔认为：原子在很高的量子态时，量子理论必须得出与经典理论相同的结果，即是说经典理论是量子理论的极限情况，这时它们之间存在着——对应的关系。尽管玻尔提出了对应原理，也没有能够使自己的理论摆脱困境。但是，他提出的对应原理却揭示了量子理论与经典理论之间的联系，也揭示了自然界中一个普遍存在的关系。所以，至今玻尔的对应原理在一些问题探讨中起着指导性的重要作用。

玻尔理论虽然带有很大的局限性，但是他对建立原子物理学的功绩，人们永远不会忘怀，因为玻尔是原子物理学的开拓者，他给后来的开垦者提供了一条从经典到量子理论的新途径。1925 年以后，物理学家们放弃了对玻尔理论的补救和发展，从新的观点出发建立了新的理论体系——量子力学，使原子物理学建立在量子力学基础之上，克服了玻尔理论所克服不了的困难，这就是今天的原子物理学。

矩阵力学

量子力学的创立是从两个不同的角度进行的。一是根据原子所表现出来的可观察量（如频率、谱线的强度等）建立起来的理论体系——矩阵力学。二是根据物质波的概念建立起来的理论体系——波动力学。德国年轻的物理学家海森堡就是根据原子表现出来的可观察量于 1925 年首先提出了矩阵力学，而后由玻恩、海森堡、约当等共同完成。

海森堡之所以能够提出矩阵力学与当时物理学的发展背景以及他所处的环境是分不开的。海森堡在大学期间是索末菲的学生，由于索末菲的影响使海森堡对玻尔的原子理论产生了浓厚的兴趣。这是因为海森堡和当时的许多

人一样已经感觉到玻尔理论缺乏统一的理论体系。

1922年6月，玻尔受德国哥廷根大学邀请去作有关原子论方面的讲演。索末菲也被邀前往哥廷根，并把海森堡也带了去。就在哥廷根玻尔认识了海森堡并同海森堡作了一次散步，在散步过程中海森堡同玻尔谈了许多有关原子理论方面的问题。玻尔在谈到自己理论的出发点时说：“这理论的出发点，不是这种想法，以为原子是小型的行星系，人们在这里可以应用天文学中的定律，我从来没有当真地这样认为过。对我来说，出发点是物质的稳定性。而这稳定性从迄今为止的物理学看，是一个奇迹。”当海森堡问到：“那么你在前几天演讲里谈到，而且为之提出理由的原子图像，意味着什么？是什么意思？”玻尔回答说：“这些图像实际上是从经验中推论出来的，或者说猜出来的，不是根据理论计算的结果。我希望，这些图像只是很好地描写了原子的结构，像用经典物理的直观语言所能做到的，再好不过地描写它一样。”当海森堡问到：“如何才能达到科学进步呢？物理毕竟是一门精密科学呀！”玻尔却说：“我们必须等待，等到与物质结构稳定性有关的那些量子论佯谬、不可理解的特征，随着新的经验越来越清楚的时候。如果到了这个时候，那么可以希望，逐步形成一个新的概念，用了这些新概念我们也能解释原子中不可直观的过程。但离那时还远哩。”海森堡认为通过这次散步对他以后在科学上的成长产生了很大影响。

1923年，海森堡在慕尼黑大学获得博士学位后到哥廷根大学当了玻恩的助教。1924年7月28日他以《关于量子论的形式规律在反常塞曼效应问题上的更改》一文升为讲师。当年9月他到哥本哈根玻尔研究所工作一个学期。这次去哥本哈根对他以后提出矩阵力学起了决定性作用。通过研究使他认识到：原子理论应建立在可观察量的基础上，而不能去问人们所看不见的电子在原子中的轨道。如果知道了原子辐射出来的光的频率、强度等这些可观察量，就等于知道了电子在原子中的轨道。海森堡正是以此为根据并借助玻尔提出的对应原理猜测他要建立的新理论的。

海森堡选用了数学上比较简单的线性谐振子作为提出新理论的出发点。按经典力学，任意一个单一的周期性系统，其坐标可用傅里叶级数展开，即

$$q(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{in\omega t}, \text{ 并有 } A_n^* = A_{-n}, \text{ 其强度为 } |A_n|^2 = |A_{-n}|^2 = A_n A_{-n}。 \text{ 但是，}$$

这种用频率、振幅所表示的坐标有一极其重要的性质，即对 $q(t)$ 进行相加、相乘以及微分的运算都不会产生 $n\omega$ 以外的新频率，即总是成 $1\nu, 2\nu, 3\nu, \dots$ 的关系。可是，按照原子光谱理论，原子光谱遵守里兹 (Ritz) 组合原则，即 $\nu_{mn} = \nu_m - \nu_n$ ，并由此得 $\nu_{mn} = \nu_{mk} + \nu_{kn}$ 。这就是说，如果 ν_{mk} 和 ν_{kn} 是两条光谱线的话，那么， ν_{mn} 也是一条可能的光谱线，即经典理论不适合原子光谱。海森堡为了找到满足原子光谱组合原则的新的数学表示，提出用一个数集表示坐标，即假设坐标为下列形式： $q_{mk} = A_{mk} e^{i\omega_{mk}t}$ ，并

假设 $A_{mk}^* = A_{km}$ 、且频率为 ν_{mk} 的光谱线强度为 $|A_{mk}|^2 = A_{mk} A_{km}$ 。这样，坐标

$q_{mk} = A\nu$ 与坐标 $q_{kn} = A$ 相乘可用如下列数集表示： $C_{mn} e^{i\omega_{mn}t} = A_{mk} A_{kn} e^{i(\omega_{mk} + \omega_{kn}) \cdot t}$ 或者 $C_{mn} = A_{mk} A_{kn}$ 。显然，海森堡找到的新的数学表示式满足原子光谱的组合原则。当玻恩看到海森堡的文章时指出，海森堡所用的数学正是代数

中的矩阵（虽然矩阵数学早就由数学家创立，但对当时的海森堡来说并不太熟悉，他只是听玻恩提起过）。玻恩感觉到海森堡的文章很重要，立即推荐给德国《物理学杂志》发表，这就是海森堡创立矩阵力学时的第一篇文章《关于运动学和力学关系的量子论解释》。

在海森堡的思想基础上，不久玻恩与约当合作完成了题为《关于量子力学》的长篇论文。在这篇论文中，玻恩和约当不仅把坐标用矩阵表示，而且把动量也用矩阵表示，从量子条件 $\oint p dq = nh$ 出发，利用玻尔的对应原理，得到坐标 q 和动量 P 之间的对易关系，即 $Pq - qp = -i\hbar E$ （其中 E 为单位矩阵）。

同年 11 月，海森堡与玻恩、约当合作完成了《关于量子力学》的著名文章。在这篇论文中全面叙述了矩阵力学的原理与方法。在此以前，海森堡曾去过英国剑桥，在那里作了关于他工作的报告。由此狄拉克知道了新的量子力学。后来，狄拉克又研究了海森堡的论文，不久就发表了题为《量子力学的基本方程》的论文。在这篇论文中，狄拉克引入了量子力学的泊松括号并得到了量子力学的运动方程，即 $q = [q, H]$ ， $P = [P, H]$ ，其中 H 为量子体系的哈密顿矩阵。狄拉克的工作，严密了矩阵力学的理论体系。1925 年底，矩阵力学的基本理论结构已经创立。它们是：

任何物理量都用一个厄密矩阵表示。物理系统的哈密顿量也用一個厄密矩阵表示，并为坐标和动量矩阵的函数。

坐标矩阵 X 和动量矩阵 P_x 满足下列对易关系。 $(P_x, X) = P_x X - X P_x = -i\hbar E$ （ E 为单位矩阵）。

系统的正则运动方程是 $X = [X, H]$ ， $P_x = [P_x, H]$ 。

物理系统（如原子）的光谱线频率由 $h\nu_{mn} = E_m - E_n$ 决定。 E_m 为 H 的本征值。

波动力学

如果说，矩阵力学的创立是把可观察量以及玻尔的量子条件与对应原理作为出发点的话，那么，波动力学创立的出发点却是德布罗意所提出来的质波。

前面提到，德布罗意提出的物质波假说，经爱因斯坦推荐，才引起物理学界的注意并加以地研究。奥地利物理学家薛定谔正是在爱因斯坦的启迪下，通过对德布罗意的物质波论文进行研究，才于是 1926 年提出波动力学的。

薛定谔在分析了德布罗意的论文之后，认为应找到一个满足物质波的方程，进而创立一种新力学，并使这种新力学在极限情况下趋近于经典力学。1925 年末，他提了一个使时间和空间处于同等地位的满足相对论形式的波动方程。但是，当他用这个方程去处理氢原子问题时，发现与实验不符，使他为之失望。因此，他把这一研究工作暂时停止。不久，在苏黎世联邦工学院任教的德拜邀请薛定谔介绍德布罗意的论文，这使薛定谔又重新开始了他的研究工作。

1926 年，薛定谔发表了总题为《作为本征值问题的量子化》的四篇论文，

完成了波动学基本理论结构的创立工作。在这次研究中，薛定谔一开始就用非相对论处理电子行为，得到了描述氢原子的波动方程，利用这个方程得到的氢原子的行为，得到了描述氢原子的波动方程，利用这个方程得到的氢原子能级公式与玻尔理论中的氢原子能级公式相同，因而氢光谱的巴耳末公式也可以由此导出。这就是薛定谔发表的一篇论文中的内容。在这篇论文中他还强调指出，在他的理论中量子数是自然产生的。在第二篇论文中，薛定谔提出了波动方程的“推导”过程。

按照经典力学中的哈密顿—雅可俾方程，对于保守系统有：

$$\partial S / \partial t + H(q, \partial S / \partial q) = 0, q - \text{广义坐标},$$

$$S = \int_{t_0}^t L \cdot dt - \text{主函数}$$

因为 $H(q, \partial S / \partial t) = E$ 系统总能量=常数，所以设 $S = S_0(q, E) - Et$ 。因此 $H = 1/2m(\text{grad} S_0)^2 + V \partial S / \partial t = -E$ ，再由哈密顿—雅可俾方程得：

$$|\text{grad} S_0| = [2m(E - V)]^{1/2}。另外，由 ds = |\text{grad} S_0| + V \partial S / \partial t \times dt = (|\text{grad} S_0| \cdot u - E) dt \text{ 得波的相速度}$$

$u = E / |\text{grad} S_0| = E / [2m(E - V)]^{1/2}$ ，这一点显然与粒子的速度 $U = P/m = 1/m [2m(E - V)]^{1/2}$ 不同。薛定谔通过分析认识到，在波动光学中，当波长 $\lambda \rightarrow 0$ 时可以用几何光学来描述，那么，要使建立的新力学在极限情况下趋于经典力学，必须从几何光学中的费马原理 $\delta \int_A^B n dl = 0$ 和经典力学中的莫培丢原理 $\delta \int_A^B p dl = 0$ 的相似点着手。于是他假设：主函数 S 可以写成如下形式： $S = \sum_j S_j$ 及 $S = K \ln \Psi$ 。由此得

$$H(q_1, \dots, q_n; K/\Psi \times \partial \Psi / \partial q_1, \dots, K/\Psi \times \partial \Psi / \partial q_n) = E$$

或 $1/2m \times K^2 \sum_j (\partial \Psi / \partial q_j)^2 + V(q_1, \dots, q_n) \Psi^2 = E \Psi^2$ 形式。再令 $\delta \int_A^B \dots \int \{-K^2/2m \times \sum_j (\partial \Psi / \partial q_j)^2 + (E - V) \Psi^2\} dq_1, \dots, dq_n = 0$ ，得 $K^2/m \sum_j \partial^2 \Psi / \partial q_j^2 + (E - V) \Psi = 0$ ，对于三维空间有 $K^2/2m \Psi + (E - V) \Psi = 0$ ，这个方程就是所谓的定态薛定谔方程。

薛定谔为找到含时间的波动方程，设波函数为 $\Psi(r, t) = \Psi(r) e^{-i/h Et}$ ，然后，从一般的波动方程

$(\nabla^2 - 1/u^2 \times \partial^2 / \partial t^2) \Psi(r, t) = 0$ (其中， $u = E / [2m(E - V)]^{1/2}$ 为相速度) 入手，得到 $\hbar^2/2m \nabla^2 \Psi + (E - V) \Psi = 0$ 若令 $\hbar = K^2$ 则上式正是定态薛定谔方程。另外，若止式写成 $(H - E) \Psi = 0$ 其中 $H = -\hbar^2/2m \nabla^2 + V$ ，则 $P \rightarrow \hbar/i$ 。对于含时间的一般波动方程由 $-\hbar/i \partial \Psi / \partial t = E \Psi$ ， $E \rightarrow -\hbar/i \times \partial / \partial t$ 得 $(-\hbar^2/2m \nabla^2 + V) \Psi = i \hbar \times \partial \Psi / \partial t$ 或写成 $H \Psi = i \hbar \times \partial \Psi / \partial t$ 。这个方程描述了波函数 $\Psi(r, t)$ 随时间变化的规律。

以后的工作，薛定谔进一步完善自己的理论体系，建立了波动力学的基本理论结构(波动力学一词是他在5月发表的论文中提出来的)。它们是：

任何物理量都用厄密算符表示，如坐标 $X \rightarrow X$ 动量 $P_x \rightarrow \hbar/i \times \partial / \partial x$ ；

系统的哈密顿量 H 也用厄密算符表示，并为 X 、 P_x 算符的函数。

算符 X 和 P_x 具有对易关系

$$[P_x, X] = \hbar/i \times \partial/\partial x \cdot X - X \cdot \hbar/i \times \partial/\partial x = -\hbar/i。$$

系统的能态，为 H 的本征值，即 $H\Psi = E_n\Psi$ 系统的运动方程为 $i\hbar\partial\Psi/\partial t = (-\hbar^2/2m \nabla^2 + V)\Psi$ 。

测不准原理

实验证明：如果让一束电子射线通过一个小孔到达屏上，则这些电子在屏上的数密度分布显示出某一未知的波的衍射图形。这个实验叫电子衍射实验，其中伴随着电子射线的那个未知的波，现在叫做德布洛依波。

通过对这一实验的分析，可得出两个结论：“若电子射线的诸电子以同一速度作等速直线运动，从而有一致的动量 P ，则其德布洛依波是单色平面波，其波长为：

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (5.1)$$

这里， h 是一常量，叫普朗克常量。

“在电子射线中，电子的数密度分布与德布洛依的能量密度分布一致。”
(5.2)

电子射线是大量电子组成的群体，我们称它“电子群”。动量一致的电子群则称为“单色电子群”。

按照定义，单色平面波是一个在时间上和空间上都无限的波列。根据波动理论，这种波的能量在全空间均匀分布，而且不随时间改变。因此 (5.1) 和 (5.2) 给出：

“单色电子群的诸电子的位置在全空间均匀分布。”
(5.3)

根据傅里叶分析，任一波动过程可分解为一系列的单色平面波。因此 (5.1) 和 (5.2) 还给出：“电子群的诸电子的动量分布完全地决定了它们的位置分布。反过来，它们的位置分布也完全地决定了它们的动量分布。”
(5.4)

既然单色平面波是无限波列，只有无限的电子群的德布洛依波才是单色平面波。但是我们在实验室得到的动量一致的电子射线束只能是有限的。例如，它沿自己运动方向具有有限长度 x ，根据傅里叶分析，这个电子群的动量不可能严格地一致，而必须有一个分布范围 P 。(5.1) 和 (5.2) 还给出：

电子群的位置分布范围 x 与动量分布范围 P 的乘积约为普朗常量 h ：
 $x \cdot p = h$

这一关系是海森堡首先给出的，称为“海森堡关系”。(5.5)

在海森堡关系中， x 大，表示诸电子的位置分散； x 小，则表示诸电子的位置集中。因此有：

“电子群的动量分布越集中，则其位置分布越分散。反之，电子群的位置分布越集中，则其动量分布越分散。”(5.6)

电子群的动量一致对应 $P = 0$ ，这时动量分布绝对地集中。电子群的位置在全空间均匀分布对应 $x = \infty$ ，这时位置分布绝对地分散。因此 (5.3) 可看作 (5.5) 和 (5.6) 的极端情形。

实验室得到的电子射线束在宽度（指横断面）上也是有限的，按照傅里叶分析，我们还可以从（5.1）和（5.2）得出结论：这束电子的运动方向也不严格地一致，其宽度越小，则诸电子的运动方向越分散。可见：

“电子群中诸电子的轨道一定是分散的，决不可能所有的电子都在同一轨道上运行。（5.7）

上述诸命题的中心点是（5.4）。它可更简单地表成：

“给定动量分布的电子群，有特定的位置分布。”（5.8）

如果这种位置分布是诸电子在相互作用中形成的，则从经典物理学的角度来看很容易理解。但是实验事实使人们作出了相反的结论：

“给定动量分布的电子群的位置分布，并不是诸电子在相互作用中形成的。”（5.9）

这一结论的主要实验依据是：

“在宏观电磁场中，电子射线中的每一个电子都像孤立的电子一样运动。”（5.10）

“在电子衍射过程中，即使电子一个一个地通过小孔，也能形成衍射图形。”（5.11）

可以普遍地证明：

“电子群的位置分布由其德布洛依波完全地确定。德布洛依波则由电子所处的宏观条件完全地确定。”（5.12）

根据（5.9）和（5.12），玻恩提出了德布洛依波的“几率解释”：

“若在给定的宏观条件下，德布洛依波的波函数为 φ ，则在该宏观条件下单个电子的位置的几率密度分布函数为 $\varphi\varphi^*$ 。”（5.13）

按照这种解释，德布洛依波不是一种现实的波，它没有能量和动量，仅仅是一种给出几率分布的“幽灵场”。人们干脆用“波函数”这一纯数学的用语来称呼它。因此玻恩对德布洛依波的几率解释就称为“波函数的几率解释”。

将波函数的几率解释用于电子衍射过程，将得出如下结论：

如果有 N 个（ N 足够大）完全相同的电子衍射仪器，每一个仪器都进行一次单个电子的衍射过程，从而在 N 个屏上各自留下一个斑点，再将这 N 个斑点映在同一屏上，则它们将组成衍射图形。

换句话说，若在某一时间间隔里，有 N 个各自经历了一个相同的电子衍射仪器的全程，然后在想象中把这 N 个电子衍射仪器重合起来，则这 N 个电子的位置分布与 N 个电子在同一时间间隔里共同经历同一个电子衍射仪器的位置分布相同。

N 个共同经历同一电子衍射仪器的电子的集合就是电子群。 N 个各自经历相同的电子衍射仪器的电子的集合则称为该条件下的“电子统计系综”，简称“系综”。系综仅决定于电子所处的宏观条件，而电子数 N 则是不重要的，只要它足够大。

这样，我们可以把波函数的几率解释的一般观点表成：

“在给定的宏观条件下，系综中诸电子的位置分布与处于同一宏观条件下的电子群的位置分布相同。”（5.14）

根据这一观点，（5.3）、（5.5）和（5.7）中的“电子群”可换成“电子系综”。若进一步将这样得到的命题从大数语言换成几率语言，则这三个命题分别表成：

“如果单个电子出现某一动量的几率为 1，则它在全空间任一点出现的几率相等。”（5.15）

“单个电子的位置的几率分布范围 x 与动量的几率分布范围 p 的乘积约为 h 。”（5.16）

“单个电子落于任一轨道的几率都不会是 1。”（5.17）

像这样将大数语言换成几率语言，波函数对单个电子仍然是没有意义的。玻恩对这一点很明确，他提出波函数的几率解释时，毫不含糊地说：“关于单个电子我们是说不出什么的。”

按照玻恩的这种理解，除了大量电子的位置分布怎样形成这一问题令人困惑以外，对微观世界的描述仍然是经典的，特别是单个电子的运动仍然是轨道运动。

以玻恩对波函数的几率解释为基础，可以导致量子力学的一种解释：“系综解释”。

电子的系综是由宏观条件决定的，在测量过程中，宏观条件又由测量仪器给出，于是在系综解释的意义下，一个物理量的“几率分布范围”就是其测量误差，于是在（5.16）的意义下，海森堡关系又被称为“测不准关系”。

玻尔和海森堡也接受波函数的几率解释，但由于它们加进了哥本哈根迷误，得到的对量子力学的解释就不再是系综解释，而是他们自己的解释——哥本哈根解释。下面我们就来考察这一解释。

根据薛定谔方程，我们可以得到测不准关系的一般形式：

$$A \cdot B \geq \frac{h}{4\pi}$$

其中 A 和 B 是一对共轭的物理量。在本书中，我们把 A 称为 A 的“变更”，

取 $A = x$ ， $B = p$ ，则有 $x \cdot p \geq \frac{h}{4\pi}$ ，这与本文开头介绍的测不准关系

$x \cdot p = h$ 形式略有不同，关于这一点，我们以后再考察。

在系综解释中，测不准关系只有认识论的意义，它被理解为一种表现宏观仪器对微观粒子的测量的精确度的界限，经过哥本哈根迷误，它又被赋予了本体论的涵义，表现单个波包在相空间的分布范围，当这两种涵义在幻想中彼此混淆之后，这一关系就获得了“原理”的尊称，成为“测不准原理”或“海森堡原理”了。

按照这一原理，测不准关系成了一个分界线。线的一边是经典的宏观世界，另一边则是非经典的微观世界。微观世界之所以是“非经典”的，就是因为它在幻想中混淆了两类经典的物理概念：粒子概念与波动概念。在这里，经典的物理概念由于这一混淆而在幻想中被扬弃了，海森堡很好地表述了这一幻想中的扬弃过程：

“量子理论的这种新解释的要点是，经典概念的应用是有局限的。这个局限性事实上是普遍存在而且完全确切的，它可以应用于粒子图形的概念，例如位置、速度和能量；也可以应用于波的图景的概念，例如振幅、波长和密度。”

“量子力学的数学方案的灵活性说明了玻尔的互补性概念。关于‘互补性’一词，玻尔企图用它来描写下列事实，即同一现象有时可以用完全不同的甚至矛盾的图景来描绘。说这些图景互补的涵义是：如果要使这些现象的‘量子’特性表现出来，则两种图景均属必需。当这些概念的局限性被恰当

地考察后，它们之间的矛盾就消失了。这样，我们可以说波动图景与粒子图景互补……。”

说得好极了：经典的概念体系在幻想中的互补图景中被幻想地扬弃了，而幻想中的互补图景中的矛盾又由于这一幻想中的扬弃而在幻想中消失了。只有一点海森堡说得不对：“说明”互补性概念的不是量子力学的数学方案的“灵活性”，而是“不确定性”这一用语的“双关性”。

那么，用什么概念取代在幻想中被扬弃了的经典概念呢？海森堡的回答是：“没有！”

“也曾有过另外的尝试，想在量子理论的数学方案中采用一种新的语言来代替传统的经典概念来描述现象，但是，……更准确的语言并没有提出来过……”

这样，经典的概念体系已经在幻想中被扬弃，而新的概念体系又并未“提出”，在这种无政府状态下，海森堡就成了战无不胜的拿破仑。

既然没有非经典的、与量子理论的数学方案相适应的新概念体系，谁要是不同意海森堡的意见，就只能使用经典的语言与他争论，而海森堡有言在先，经典的语言中的每一个概念在微观世界都没有意义，因此原则上都被禁止使用。作为这一禁令的颁布者，海森堡可以随心所欲地一会儿用波的概念一会儿用粒子的概念，但他会巧妙地在关键时刻禁止对方使用某一经典概念。例如，禁止对原子中的电子使用轨道的概念。

下面的例子有助于我们体验海森堡这一禁令的威力：

按照哥本哈根解释的用语，在电子衍射过程中，通过小孔的单个电子的轨道是不确定的，它在屏上的落点也是不确定的。既然由于“电子的轨道不确定”就必须禁用“轨道”的概念，那么，由于“电子在屏上的落点不确定”也就必须禁用“落点”这一概念了。这么说，“电子衍射图形”也应被禁用了，因为它是由被禁用的“落点”组成的。更进一步，电子衍射实验也该被禁止，因为它将得出被禁用的电子衍射图形。

可见，一旦进入量子力学的大门，人们就有了偷食禁果的原罪：他们的每一句话都是违背禁令的。如果说他们毕竟还是说了点什么，那也只能是某种特许。例如，在原子中，禁用轨道概念，但对于电子衍射，可以通融，或者，即使对于电子衍射，仍然禁用轨道概念，但“落点”的概念可以通融，等等。至于什么情况下禁用，什么情况下通融，就取决于裁决者海森堡的喜好了。在这种形势下，哥本哈根解释又怎能不战无不胜呢？

然而，哥本哈根解释对测不准关系更根本的误解还在另一方面，这一点我们以后再考察。

爱因斯坦与玻尔之争

在 20 世纪物理学的发展中，爱因斯坦和玻尔是两位最伟大的科学巨匠，他们都创造了现代物理学的辉煌，然而他们对现代物理学的基本问题却有着自己独特而深刻的见解，由此引起了长期的争论，成为两个最伟大的心灵之间的冲突。

两位科学巨匠争论的问题，主要不在于量子理论本身的内容与形式，而在于量子理论的解释方面，即关于作为量子理论基本特征的不连续性与统计性的说明方面。因此，争论主要发生在 1927 年哥本哈根学派系统地提出量子

力学解释以后，但随着量子理论的不断成熟，两位科学巨匠思想上的差别也不断明显。下面我们将按照争论的不同阶段和特点，讲一讲有关的故事。

第一阶段（1927 年以前）。量子力学逐步建立，量子力学的哥本哈根解释还没有提出，但对于量子理论中出现的、引人注目的不连续性与因果性问题，即涉及到是坚持还是放弃经典物理学的信条，爱因斯坦与玻尔的态度却有很大的不同，因而开始个别地、直接或间接地进行了争论。

爱因斯坦虽然提出了光的波粒二象性，但从根本上他不准备放弃连续性和严格因果性，因为这些正是相对论的基本特征。他还坚持相信对于原子过程能够给出连续的机制和直接的原因，而这种原因一旦被得到、被重复，现象即会无一例外地以决定论方式精确地出现。

而玻尔则认为，这一理想并不总被满足，由于观察操作引起的扰动不能任意小，我们只能谈论一种“单元事件体”。例如电子从激发态到基态的某一次跃迁，比这更细微的过程我们便无法认识到。因此，对于经典物理学的连续性和严格因果性必须放弃。

这场争论的开始可以追溯到 1920 年春天，当时玻尔和爱因斯坦这两位科学巨匠在柏林会晤。虽然玻尔十分赞赏爱因斯坦对相对论的贡献以及对普朗克定律的巧妙的推导，但是他难以接受爱因斯坦的光量子概念。因此在 1920 年 4 月他对柏林物理学会所作的关于《光谱理论的现状及其在不久的将来发展的各种可能性》的讲演中，虽然这个题目同光子理论有密切关系，他却仅仅在一个地方提到“辐射量子”的观念，而且这还可能只是出于对也参加了这个报告会的爱因斯坦的尊重；玻尔立即补充道：“我将不在这里讨论‘光量子假设’在干涉现象上所带来的众所周知的困难了，而辐射的经典理论对于说明干涉现象却是这样合适。”

在玻尔看来，经典物理学和量子理论是不可调和的，虽然它们通过对应原理以渐近的方式联系着。而爱因斯坦则是一切物理现象应该有一个统一的因果理论的坚定信仰者。从他在 1919 年 6 月写给玻恩的一封信中，我们可以看出他心目中对玻尔的二分法是颇为反感的：“量子论给我的感觉同你的感觉非常相像。人们实在应当对它的成功感到羞愧，因为它根据教会的信条‘不可让你的左手知道右手所做的手’而获得的。”

在没有会晤玻尔以前写给玻恩的另一封信中，爱因斯坦写道：“关于因果性的问题也使我伤脑筋。光的量子吸收和发射是否有朝一日总可以在完全的因果性的意义下去理解呢，还是一定要留下一个统计性的尾巴？我必须承认，在这里我缺乏判决的勇气。无论如何，要放弃完全的因果性，我将是非常、非常难受的……”

1920 年 3 月，爱因斯坦在给玻恩的信中又写道：“我在空暇时总是从相对论的观点来沉思量子论的问题。我认为理论并不见得非得要放弃连续性不可。但是，迄今我未能把我的宝贝想法具体化，这个想法就是用过分确定条件下的微分方程来理解量子的结构。”鉴于这一段话，我们就不难理解，为什么爱因斯坦后来对薛定谔的波动力学是那样“热情”。

1923 年，康普顿效应被发现后，玻尔同爱因斯坦的争论达到了头一次高潮。看来康普顿效应是绝对支持光的粒子说的，因此就要求玻尔一方相应采取断然的步骤。

为了回答这个挑战，玻尔在 1924 年同克拉默斯和斯莱脱一起写了著名的论文《辐射的量子理论》。这篇文章完全摒弃了爱因斯坦关于辐射的量子结

构的观念，而是假设用抽象的几率波来说明实在的电磁波，从而进一步突出了不连续性与统计性的根本性质。

该年4月，爱因斯坦在致玻恩的信中写道：“玻尔关于辐射的意见使我很感兴趣。但是，在有比迄今为止更为有力得多的反对严格的因果性的证据之前，我不想轻易放弃严格的因果性。我不能容忍这样的想法：受到一束光照射的一个电子，会由它自己的自由意志来选择它想要跳开的时刻和方向。如果是那样，我宁可做个补鞋匠或者甚至赌馆里的一名佣人，都比当个物理学家强。不错，我要给量子以明确形式的尝试，一而再、再而三地失败了，但是，我还是不想长远地放弃希望。”

第二阶段（1927~1930年）。在玻尔提出对应原理和哥本哈根学派提出波函数的几率解释的基础上，1927年海森伯提出“测不准关系”。同年9月，玻尔在意大利科摩市召开的纪念伏打逝世100周年的国际物理会议上发表了题为《量子公设和原子理论的最近发展》的讲演，提出著名的“互补原理”，进一步引起了学术界的巨大震动。

互补原理认为“微粒和波的概念是互相补充的，同时又是互相矛盾的，它们是运动过程中互补图像。”玻尔特别指出，观察微观现象的特殊性，由于微观客体中最小作用量子 h 要起重要作用，因此微观客体和测量仪器之间的相互作用是不能忽略的。这种相互作用在原则上是不可控制的，是量子现象不可分割的组成部分。这种不可控制的相互作用的数学表示就是测不准关系。由此决定了量子力学的规律只能是几率性的；为了描述微观客体，必须抛弃决定性的因果原理；而量子力学精确地描写了单个粒子体系状态，它是完备的。

一个月以后，在布鲁塞尔举行了第五届索尔维物理学会议。10月24日早晨，在一种满怀期望的心情中，全世界的物理学权威们济济一堂，来对新量子论的意义交换意见。科摩会议的大部分参加者出席了这次会议，此外参加者中引人注目地增加了爱因斯坦、埃伦费斯特和薛定谔。

玻尔在会上又一次阐述了他的互补原理，量子力学的哥本哈根解释为当时许多参加者所接受。但是它也受到来自各方面的批评，特别是爱因斯坦公开的批评。他在会上发言说：“我必须请大家原谅，因为我对量子力学并没有深入的研究。虽然如此，我还是愿意谈一些一般性的看法。”

爱因斯坦认为，波函数不是代表单个电子，而是代表分布在空间中的电子云。 $|\psi|^2$ 表示在被观察的那一部分空间有电子云的一个粒子存在的几率，而不是表示在所考虑时刻的那一瞬间一个特定的粒子存在于所给地方的几率。因此，量子力学只能给出相对来说是无限多个基元过程的集合的知识，而不能完备地描述某些单个过程。

会上进行的争论，在会后的交谈继续进行。会议参加者一般是在早餐以后就在旅馆中见面了，爱因斯坦就开始描述一个理想实验，那是他认为可以通过分析坐标和动量的测量来驳倒测不准关系。于是玻尔、海森伯等就分析这个理想实验，并在晚饭桌上由玻尔把分析的结果告诉爱因斯坦。这样，爱因斯坦又提出了另一个理想实验，但是在玻尔、海森伯这两位擅长分析理想实验的专家面前，爱因斯坦非但没有驳倒测不准关系，反而被哥本哈根学派抓到了不少把柄。当然，爱因斯坦的挑战还是促使哥本哈根学派去深入地研究量子力学的测量问题。

1930年，第六届索尔维物理学会议又在布鲁塞尔举行。会议原定的主题

是讨论“物质的磁性”。可是，会上围绕量子力学基础的讨论却成了主要内容。

在这次会议上，爱因斯坦提出了一个“光子箱”的理想实验，试图通过能量和时间可以同时精确测量，由此来驳倒能量与时间的测不准关系。

设有一个用弹簧秤挂在固定底座上的不透明的箱子，箱子的一个壁上开了一个小孔，小孔上装着一个用计时装置来控制其启闭的快门。通过挂在箱子下面的砝码和装在箱子侧面的指针，可以测定整个箱子的总重量。爱因斯坦设想，快门从时刻 t_1 打开到时刻 t_2 关闭，中间经历的时间 $t=t_2-t_1$ 很短，以至只有单独一个光子从箱子中放出。在 t_1 之前和 t_2 之后，都可以要多准确就多准确地测定箱子的重量，并从而根据质量和能量的关系式 $E=mc^2$ 来推出箱子的发射光子以前和以后的能量之差。另一方面，按照计时装置的读数也可以要多准确就多准确地确定光子的发射时刻及其到达远处屏幕上的时刻。这样，按照爱因斯坦的想法，关于能量和时间的测不准关系似乎是不能成立的了。

爱因斯坦的这种争论方式出乎玻尔的意外，以致使他大吃一惊。据目击者回忆，当时玻尔面色苍白，呆若木鸡。但是，在经过一个不眠之夜的紧张思考之后，他终于找出了问题的症结所在。他发现爱因斯坦在上述论证中，竟忘记他自己发明的效应：在引力场中，时钟会延缓。结果使爱因斯坦否定测不准关系的光子箱实验，反倒成了论证测不准关系的理想仪器。从此以后，爱因斯坦承认量子力学的内在体系是自洽的，但他仍坚持认为量子力学不是微观体系的、完备的、最终的描述。

第三阶段（1930 年以后）。量子力学理论体系取得了更加完美的形式，但有关量子理论的完备性的争论仍继续进行着。1935 年 5 月，爱因斯坦同两位年轻的美国物理学家波多耳斯基和罗森在美国《物理评论》47 期发表了题为《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗？》的论文，在物理学界、哲学界引起了巨大的反响，玻尔则以同样的题目撰文回答。

爱因斯坦等在论文中提出了物理理论体系完备性的判据与著名的以三位作者姓的头一个字母简称的 EPR 悖论（这一悖论涉及到如何理解微观世界实在的问题），认真地论证了量子力学对物理实在描述的不完备性。

EPR 在论文中，首先给物理实在与物理理论的完备性下了定义。如果一个物理理论对物理实在的描述是完备的，那么物理实在的每个要素都必须在其中有它的对应量，即完备性判据。当我们不对体系进行任何干扰，却能确定地预言某个物理量的值时，必定存在着一个物理实在的要素对应于这个物理量，即实在性判据。

EPR 在推理过程中还默认了以下两个假设：（1）定域性假设；如果测量时两个体系不再相互作用，那么对第一个体系所能做的无论什么事，都不会使第二个体系发生任何实在的变化；（2）有效性假设：量子力学的统计预示（至少在本论证有关的范围内）已为经验所证实。接着，EPR 介绍了物理实在的量子力学描述的一般特征后，认为量子力学不满足上述这些判据，所以是不完备的。

在论文的第二部分，EPR 设计了一个理想实验来论证：假设有两个子系统 和 构成的复合系统，当 $t < 0$ 时，它们是彼此分离的，状态为已知；在 $0 < t < T$ 时，它们接近而发生相互作用；在 $t > T$ 以后，它们又彼此分离并停止相互作用。一方面由量子力学可知，当子系统 和 分离后，据对子系统

的动量（或位置）所作的测量，人们便可以在不对子系统 进行干扰的情况下确定地预示子系统的动量（或位置）。因此，根据 EPR 的实在性判据和定域性假设，子系统的动量与位置均对应于物理实在的要素。另一方面，由于动量与位置是一对不对易的共轭变量，人们不可能对子系统的动量与位置同时进行测量，从而不可能对子系统的动量与位置同时作出预示。这样，我们就否定了上面二中择一的两个命题中的第二个命题，从而证明了其中第一个命题，即证明了量子力学并不为物理实在提供一个完备的描述。

玻尔认为，EPR 所说“不对体系进行任何干扰”是不确切的。因为在测量过程中虽然没有对子系统 施加力学干扰，但由于作用量子的不可分性，微观体系和测量仪器构成了一个不可分割的整体。测量安排是确定一个物理量的必要条件，而对微观体系未来行为所预示的可能类型正是由这些条件所决定的。

这样，玻尔提出的量子现象的整体性特征，引起了人们对 EPR 所默认的决定实在论的怀疑，意味着把世界看做在空间上分离的、独立存在的各部分组成的看法不一定普遍成立，从而促使量子力学的完备性问题得到了系统的研究。

1949 年，为纪念爱因斯坦 70 大寿，玻尔写了题为《就原子物理学中的认识论问题和爱因斯坦进行的商榷》的论文，爱因斯坦则主要针对论文集《爱因斯坦：哲学家—科学家》中哥本哈根学派各篇论文的意见，写了《对批评的回答》一文作为反批评。这两篇论文，都带有某种总结性质，不过他们各自坚持自己的基本观点不变。

1955 年 4 月 18 日爱因斯坦逝世以后，玻尔心里也没有忘记和爱因斯坦的论战。据记载，玻尔在逝世（1962 年 11 月 18 日）前一天的傍晚，在他的工作室的黑板上所画的最后一个图，便是爱因斯坦的光子箱的草图。

对于这场持续了近 40 年的争论，特别是 EPR 悖论的争论，从基本观点来说，谁也没有说服谁。后来，有人想将上述 EPR 理想实验推进到真实实验，以此来证明孰是孰非。50 年代，英国物理学家玻姆在 EPR 悖论启发下提出了隐参量的量子理论。60 年代，又一位英国物理学家约翰·贝尔根据隐参量的量子理论从数学上推导出了一个关于远隔粒子量子关联的定量不等式——贝尔不等式。由于贝尔的工作，人们才有可能设计真实实验来检验 EPR 悖论的争论的谁是谁非。

从 1972 年至 1982 年间，物理学家共完成了 12 个实验，其中 10 个实验的结果违反贝尔不等式而与量子力学的预言一致。但是，人们如果引入非决定论的随机性，便可导出贝尔不等式。所以，上述实验只是说明了量子理论是超距关联、非定域的，而没有确定量子理论是决定论的还是非决定论的，也就是说微观世界因果律是否成立还没有盖棺论定，EPR 悖论的争论还有待于人们进行更深入的研究。

