

原子的结构

1、揭开原子秘密的新起点

现代生活中，人们对“电”这个名称并不陌生。一切现代工业、农业和科学技术都离不开电，它已经成为人们最常用的能源。然而，对电的本质和特性的了解，还是在 1897 年发现“电子”以后才得以实现的。

早在十八世纪时，人们就从电性质的研究中发现，电不仅能在导体中传递，还能促使物质产生重大变化。1832 年，英国物理学家法拉第在研究电流通过导电溶液时，发现液体中的不同原子或原子团能朝相反方向移动，并分别在电极上析出，这一过程被称作电解。

后来，法拉第又定量地分析了许多元素的电解过程，并总结为法拉第电解定律，即一定量的电总是能析出同样多的原子数目，而某些元素析出的原子数恰好是电量数的一半或三分之一。于是科学家们就推测在电解过程中，不同元素的原子，它们从电极上析出时所吸收的电量是不一样的，而电量本身是由许多“电单元”组成的。人们发现以此来解释法拉第的电解定律可得到圆满的结果。

但是电单元毕竟是一种看不见、摸不着的带电微小单元，因此研究起来要比物质的原子单元要困难得多，所以最初人们对它的性质知道得很少。不过到了 1891 年，为了对电解现象能有更深的理解，爱尔兰物理学家斯托尼提出了把电单元命名为“电子”，以它的电量作为电量的最基本单位。从此以后，电子这个名字一直沿用到现在。

后来，人们在有关电性质的研究中，又进一步发现电流不仅能在导电材料所构成的闭合回路中流动。而且即使电路上有一不太宽的缺口，只要电压足够高，电流仍能跳过缺口继续流动。与此同时，由于电流与缺口处的空气分子相互作用，以及空气被迅速加热，能产生光亮的电火花和轰响的爆裂声。光和声都不是电，而在缺口处那些暂时离开导线的电流，在同空气分子作用后，仍能传到另一端的导线中，在闭合回路中流动。如果缺口太大，那么电流就中止（即断路）。

科学家们为了能对电进行单独探测，就设法让电通过一个空无一物的空间，即把导线封入空气被抽掉的玻璃管中。当时，要做到这一点也是很不容易的。直到 1854 年，由于电真空技术的发展，德国的吹玻璃工匠兼发明家盖斯勒制成了第一根这样的玻璃管，并取名为“盖斯勒管”或阴极射线管。

然而，世界上第一个研究阴极射线管的是德国物理学家普吕克尔。他在 1858 年发现，当电流经过真空管时，在阴极对面的玻璃壁上出现了带绿色的辉光。许多科学家曾对这种辉光产生的原因进行了广泛探索，后来由另一位德国物理学家戈德斯坦在 1876 年断定，产生辉光的原因是从阳极上发射出了某种射线（即阴极射线），落在面对阴极的管壁上所致。

由于真空管中基本不存在其它物质，所以阴极射线很可能是电流本身。因为在管中有电流流过，而电流本身是由金属导线运载的，这样阴极射线只能来自金属导线。如果这种预测是正确的话，那末一旦确定了阴极射线的本质后，就能在很大程度上揭示出电流的本质。于是人们就进一步想像，阴极射线会不会是由某种细小的波所组成的类似于光的东西，或是一束具有质量的粒子流。

由于在实验中看到了光，所以上述两种看法都曾得到了某些物理学家的赞同。到了 1885 年，英国物理学家克鲁克斯在真空管内巧妙地安上一个小叶轮，并让阴极射线打在小叶轮的一侧，结果发现小叶轮转动了起来。这就表明阴极射线是有质量的微粒子流，而不是没有质量的光束。

同时，克鲁克斯还发现磁铁能使阴极射线向一旁偏转。这就进一步说明，阴极射线既不同于光，也不同于中性原子，它是带有电荷的粒子流。实际上这已经到达了发现电子的意境。

整个十九世纪后期，关于阴极射线特性的研究已成为科学家们广泛争论的课题。其中有一位英国物理学家汤姆逊，他也支持阴极射线是由带电粒子流构成的观点。汤姆逊在仔细观察阴极射线管玻璃壁上所产生的荧光时，又反复思考阴极射线移动的情况，他想阴极上的“电”是怎样移动到对面管壁上去的。

为了证明管中的电是直线传播的某种射线，汤姆逊在玻璃管中间安上一个小物体。这样一来，小物体能阻挡住部分射线，在管壁上投射出清晰的阴影，这就证明了管内的射线确是直线传播的。

为了进一步弄清管中射线的性质，汤姆逊又在玻璃管旁射线所经过的地方放上一根磁棒，磁棒的一极靠近真空管。由于磁场的作用，本来直线传播的射线发生了弯曲现象，结果再次证明射线决不可能是光线，因为光线的路径在磁场中决不会发生弯曲。

那末它到底是由什么东西组成的呢？汤姆逊不愧是一位杰出的物理学家，他把实验结果总结成两点想法：1、通过真空管的不是什么射线，而是实体的微粒流；2、如果真是微粒流，那末这些微粒一定是带电的。

汤姆逊为了用实验来验证自己的想法，又在真空管中另加一电场。这样当射线从两块带电的金属板间通过时，微粒流发生了同用磁场做试验时相同的弯曲。这就充分证明了，微粒流确是由带电的微粒所组成，因为不带电的微粒流在电场作用下是不会被排斥而产生弯曲的。此外，从微粒流在电场中所产生的偏转方向上，可以看出构成阴极射线的微粒流是带负电荷的。

至此，已有充分理由认为：真空管中的阴极射线是由带负电荷的粒子流所组成的。而且它和阴极材料和放电气体无关，即粒子流的质量和电荷量均不会改变。但它们的发射速率和数量因阴极材料的不同而异。

接着，汤姆逊进一步断定，微粒子所带的电荷，就是法拉第在研究电解液中所提到的电单元，并直接用斯托尼给电单元所起的名字“电子”来称呼这些带负电荷的粒子。1897年，汤姆逊在英国“科学知识普及会”上报告了他在发现电子方面所作的实验工作，但当时都遭到很多极有声望的物理学家们的怀疑，所以电子的发现一时未能引起足够重视。即使这样，汤姆逊仍坚持自己的论点，并在以后的实验工作中，利用其它方法找到了和阴极射线性质完全相同的粒子。

例如，汤姆逊发现当紫外线照射在某些金属上时，它能使金属发射出带负电荷的微粒，这就是“光电效应”。另外，灼热的金属丝或炭丝也能发射出这种粒子，被称为“热离子效应”。上面所发射的这些粒子，都带有等量的负电荷，现今都称为“电子”。

汤姆逊为了对电子的性质能有更深的了解，又对电子的质量和电荷量进行了测量。按照电磁学的一般原理，电子在磁场或电场中运动时，其弯曲程度跟它的电荷数和质量有一定的关系。一般说来，带电粒子愈重愈不易被偏转，磁场愈强带电粒子被弯曲得愈厉害。就这样，汤姆逊根据电子在磁场中被弯曲所需磁力的大小，间接测得了电子的质量，并进一步求得电子所带的电荷，最后获得两者的比值，即荷质比。

在此同时，汤姆逊又利用带电的氢原子和电子进行比较来研究电子的特性。由于氢原子是自然界中质量最小的原子，所以认为氢原子所带电荷和电子相同。但在实验中发现，在电磁场中电子要比带电的氢原子容易偏转得多。由此可知，电子的质量远比氢原子小得多。而今天我们已精确测出氢原子和电子的质量比值为 1837.15。

就这样，汤姆逊经过坚持不懈、百折不挠的努力，最后终于证明了电子是客观存在于自然界的微小实体。他的这段艰辛而又光辉的历程，被记录在发表于 1903 年的著作《电在气体中的传导》一书中。为了表彰他在气体放电现象方面的理论和实验研究中所创建的伟大功勋，汤姆逊荣获了 1906 年的诺贝尔物理学奖。对此他曾写下了这样一段话：“……这对我的研究成果无疑是一项有力的证据，这证据来自那些素昧平生的外国人，而他们没有受到任何个人的因素所影响……”。

至此，人们已知道了两种具有质量的粒子，一种是构成物质的原子；另一种是组成电流的电子。另外，电子的客观存在也就否定了道尔顿所提出的原子是组成物质的最基本单元的学说，否定了原子是坚不可摧的，不能被破碎成更小粒子的假说。人们相信在原子中至少存在一种比它小得多、轻得多的粒子，即电子。这样一来，物理学家们就开始对如何正确理解原子内部的结构产生了浓厚的兴趣。

实际上，在汤姆逊发现电子以前，已有不少科学家对原子内部结构进行过研究，其中包括 1895 年伦琴发现 X 射线；1896 年贝克勒尔从铀盐中发现放射性；居里夫妇和卢瑟福等又从镭、钋等放射性元素的射线中发现了 α 、 β 和 γ 射线等等。他们的发现都证明了原子是在不断变化的。

汤姆逊根据已有的实验事实，加上自己对“光电效应”和“热离子效应”研究的结果，在 1898 年大胆地提出了原子构造的第一个模型。他设想，在原子里一般都包含着正负相反的两种电荷。由于构成物质的原子通常是中性的，故认为原子中的正负电量是相等的。而多数原子不能放出带正电的粒子，所以把原子中带正电的部分看成是原子的主体结构，一般不能移动。相反，原子中很轻的电子是能较容易离开原子的。

为此汤姆逊把原子的主体结构看成是个带正电荷的实体球，在原子中的电子被均匀分布在整个球体中，有人把此种原子结构模型形象地叫做“西瓜模型”。原子好像是西瓜一样的实心球体，瓜瓤是带正电荷的，而瓜子就好比是带负电荷的电子被均布在西瓜瓤中。

汤姆逊的原子模型虽简单，但能用来解释原子的某些特性。例如，它能方便地解释原子是电中性的。另外对阴极发射、光电效应和热离子效应也能解释。即原子中的电子由于受到正电云吸引，所以其运动受到阻滞，需在电、光或热等外界条件作用下，才能发射电子。显然如果外界作用不够大时，就不能冲破正电云的束缚，故也不能发射电子。而电子所得能量只能以热辐射或光辐射的形式释放，通常所见的电加热或电发光就是这种效应。

当然，汤姆逊的原子模型还存在着他自己也意识到的不足之处，如对原子质量的解释。由于单个电子的质量即使同最轻的氢原子相比也要小很多，而其它原子和电子相比就显得更重，这样就难以想象原子的质量全部由电子所组成。

数以千计的电子怎么能容纳在原子内部呢？事实上，从气体发光和 X 射线特性的实验中，已证明原子中的电子数目不可能很多，所以原子的质量势必只能由带正电的部分来决定。另外，在电子辐射发光时，必然要消耗能量，这样电子就要减速，在一瞬间它们将会陷进带正电的云雾中。

由于当时和原子结构模型直接有关的实验依据很少，所以汤姆逊未能对上述这些问题作出回答。至于原子结构模型的正确描述，有待于他的最优秀的学生——卢瑟福来完成。

即使这样，汤姆逊仍然不愧是研究原子结构的启蒙者，他引导人们对原子的质量和电荷进行更广泛的研究，而电子的发现也就成为揭开原子结构秘密的新起点。

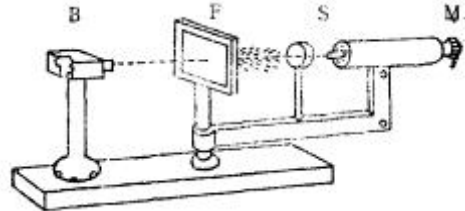
2、学生超越了老师

人们为了进一步弄清原子内部的结构，就必须设法深入到原子内部去，对原子中的各种奇异现象进行探索。当时物理学家们在发现电子和其它放射性粒子的基础上，找到了用 α 粒子去轰击各种物质的试验方法，最后终于知道了原子中的电子和正电荷部分的分布情况，对原子内部的结构有了更深的理解。所有这一切应归功于汤姆逊教授最优秀的学生新西兰人欧内斯特·卢瑟福。正是他通过 α 粒子散射实验，比较满意地解决了原子内部的结构问题。

早在 1895 年，卢瑟福已经是汤姆逊的得力助手。他们一起从事 X 射线通过气体所产生的效应的研究工作。卢瑟福从中得到了很好的锻炼，为他以后攀登科学高峰打下了扎实的基础。1898 年，经他老师的推荐，卢瑟福有机会去加拿大主持一项有意义的物理研究工作。在他受聘任职期间，对铀盐和钍盐所放射的“射气”进行了广泛而又深入的研究。

从实验结果分析中，卢瑟福已经意识到这些“射气”与原物质的原子不同，是一种新的化学元素的原子。它和各种化学试剂不发生任何作用，故是一种惰性气体（即氦气），由此卢瑟福提出了第一篇有意义的实验报告。他指出，从钍盐缓慢衰变中所放射出的“射气”，使钍永远在不断地失去某些东西。而剩下的钍仍具有发射“射气”的特性，并未察觉有丝毫减弱。

在此同时，卢瑟福也对居里夫妇发现的镭所放出的射线进行了大量研究。1906 年，卢瑟福等人从研究中弄清了 α 粒子的性质。他们通过用电磁场偏转 α 粒子，证明它带有两倍于电子电荷的正电荷。如果电子的电荷用符号“ $-$ ”改示，那末 α 粒子所带的电荷就是“ $++$ ”。另外 α 粒子的质量要比电子重得多，事实上， α 粒子的质量约等于氢原子质量，或四倍氢原子质量，是电子质量的七千三百多倍。但是 α 粒子能够穿透物质，而氢原子是办不到的，故 α 粒子的半径要比氢原子小得多。还有， α 粒子所带的能量也很大，约等于 6 百万电子伏特，且约以十二分之一光速的速率行进。



公网

实战、专业、深度、破译

国内唯一深度研究与辅导机构

—最专业的公务员考试研究、辅导、测评、服务机构

卢瑟福在完整地研究了 α 粒子的基本特性后，就着手利用它去揭开原子内部的秘密。他大胆的设想，能否用 α 粒子打入原子内部，像“侦察兵”那样，到原子内部的微观世界里实地侦察一番。由于 α 粒子本身是一种带有正电荷的粒子，那末它在穿过原子时，和原子内部的正电荷部分能产生什么样的相互作用？原子中的正电荷部分到底是怎样分布的？卢瑟福就这样着手进行了一系列的 α 粒子散射实验。

当时，卢瑟福的实验装置是比较简单的。他利用英国曼彻斯特大学所仅有的 20 毫克纯溴化镭，加上从维也纳奥地利科学院借来的 350 毫克镭盐组成 α 粒子发射源。同他一起进行 α 粒子散射研究的还有他的优秀助手德国物理学家汉斯·盖革博士。他们的实验装置如图所示。

从图上可以看出，铅盒 B 中的镭所发射的 α 粒子束经过狭缝准直后，形成一窄束 α 射线，轰击在一片非常薄的金箔靶 F 上。经散射后的 α 粒子束被可以围绕靶子 F 转动的荧光屏 S 记录下来。而每次撞击所发出的闪光可通过显微镜 M 进行观察。

卢瑟福他们就这样进行了许多次 α 粒子散射实验。最后，卢瑟福在他著名的论文《 α 和 β 粒子的放射与原子结构》中，对实验结果作了详细而又明确的解释。

卢瑟福发现，当用一连串 α 粒子轰击金属箔（如金箔）时，那些川流不息的 α 粒子束中的大部分粒子都毫无阻碍地通过了金属箔，仍沿着原来行进的方向向前移动，这和其他物理学实验所得的实验结果没有什么区别。如用他老师汤姆逊的原子模型来解释，说明在金属原子中质量很小的电子是无法阻挡质量比它大七千多倍的 α 粒子通过的。这就好像电子被 α 粒子挤在一旁，腾出通道好让 α 粒子穿过。即使原子中带正电的主体部分，似乎也并不坚硬，挡不住 α 粒子的去路。这只能说明，原子中的绝大部分必然是空隙。假如金属原子是实心的或基本上是实心的，那么即使是最薄的金属箔也会挡住大部分 α 粒子或使它们中的大多数改变方向。

除此以外，卢瑟福的独到之处是他仔细观察了那些局部的特殊现象。他在实验中发现有一小部分 α 粒子穿过金箔时，好象碰到了什么东西似的，稍微偏转了方向，与粒子束原来的行进方向形成一个小角度，且仍能从金箔中挣脱出来。

还有特别奇怪的是有个别 α 粒子，好象直接碰到了什么坚硬的东西而被偏离了一个很大的角度，更为惊奇的是卢瑟福还找到了直接向后反弹回来的 α 粒子，即在进入金属箔的同一端，出现了与行进方向相反的 α 粒子，这种现象是非常少见的。

卢瑟福紧紧抓住这些奇怪的现象，反复思考原子中到底会有什么东西能把 α 粒子反弹回来呢？因为这简直是不可思议的现象。后来他曾经写道：“在我的生命过程中，那是一件发生在我身上的、最难以置信的事。这就象你发射了一颗直径为 15 英寸的炮弹，它打向一张薄薄的卫生纸时，却被那张纸弹了回来，而后打到你一样几乎不可相信。”

但是，科学实验的正确结果总是能反映客观实际的。卢瑟福的 α 粒子散射实验的结果，有力地否定了他老师汤姆逊的原子模型，同时也证明了原子内部一定存在着集中在一起的正电荷部分。根据库仑定律，作用在电荷上的力与电荷的电量大小成正比，与电荷间的距离平方成反比。由此可看出，只有当 α 粒子非常接近对它发生作用的“正电荷”时，才能获得足够大的静电斥力，使其偏转很大的角度或甚至直接被反弹回来。

当然，这种集中的电荷决不可能是电子，因为电子的质量比 α 粒子要小七千多倍。这样，如果电子和 α 粒子相撞，就好象是一辆重约一吨的飞速行驶的汽车与一块摆在马路上的重为一百多克的小石子相撞一样。结果石子被抛得很远，而汽车的运动不会有什么变化。所以， α 粒子大角度偏转的原因决不可能是与电子碰撞引起的。相反，只有原子内部集中的正电荷部分（原子质量的绝大部分也集中于此）与 α 粒子相互作用时，才能使 α 粒子改变运动方向，甚至于把 α 粒子向相反方向弹回去。

另外，根据实验结果可以推知原子中带正电荷部分的质量和大小。显然它的质量至少与 α 粒子一样大或者更大。而它的尺寸一定很小，因为实验中 α 粒子很少碰到它，大多数 α 粒子只是一掠而过。

中公网总站：www.offcn.com邮箱：offcn.com@163.com

电 话：010—62698755，82387776

地 址：北京海淀区学清路 38 号金码大厦 B 座 9 层

直到1911年，卢瑟福才正式把自己的实验结果公诸于世。并提出了自己对原子结构的论述。他认为原有的西瓜原子模型是错误的。因为从 α 粒子散射实验结果可以说明，原子中的正电荷部分决不可能均布在原子球体内。事实上，原子的全部质量差不多都集中在中心一个体积很小的带正荷的“核”上。通过对大角散射(大于 90°)的 α 粒子的测量，可计算出“核”的大概尺寸和环绕核心原子所占的空间大小(即原子直径)。

计算结果表明，原子核直径只占原子直径的万分之一左右，而原子内部的广大空间是由带负电荷的电子所填满。由于电子远比原子小，故原子内绝大部分是空着的。这就是卢瑟福所提出的“有核原子模型”。

我们根据有核原子模型理论，不仅能解释汤姆逊原子模型所能解释的各种物理现象，而且还能说明其它物理现象。例如，对原子核为什么能穿透物质的解释。由于原子核是通过某种方法把原子中的电子全部除去后形成的，这样核的尺寸就比原子小得多。所以原子核就能容易地穿过物质。例如， α 粒子就是失去两个电子的氦原子，即是氦核，故它能很容易地穿过金箔。另外，由于电子所占的质量很小，因此原子核的质量和原子的质量基本上是一样的。

我们还知道，汤姆逊原子模型对放射性的存在也是无法解释的。因为在放射性元素放射的射线中存在 α 射线，它是带有两个单位正电荷的粒子。这显然是和汤姆逊原子模型认为正电荷均布在原子内部的说法相矛盾的。而卢瑟福的有核原子模型就能很容易地解释这一现象。即 α 射线是从放射性元素的原子核中发射出来的，原来的原子就衰变成一种新原子。

虽然，卢瑟福的有核原子模型理论在当时物理学界未能引起什么轰动，但他的核模型至今仍被人们所公认。基于他对原子核物理学的发展所作的卓越贡献，他获得了1908年诺贝尔化学奖。同时，这位天才横溢的物理学家不仅继承了他老师的科学事业，而且还承担了他老师的各种职位，其中包括在1925年担任英国皇家学会会长的职位。

而正当卢瑟福充满活力地继续为人类科学事业作出更大贡献时，却在1937年10月突然因病与世长辞了，享年六十六岁。他的老师汤姆逊却是在1940年8月30日以八十四岁的高龄去世的。汤姆逊火化后和卢瑟福一起被葬在威斯敏斯特公墓的中央部分，如此密切的师生关系在科学史上确实少有，值得人们永远怀念。

3、原子世界的图象

从1808年道尔顿提出“原子论”起，到1911年卢瑟福建立有核原子模型理论止，先后共经历了一百多年时间。看来要揭开原子世界的秘密，的确是不容易的。正是由于象卢瑟福、汤姆逊等出类拔萃的科学家们百折不挠的努力，最后才终于打破了原子不可分割的界线。他们发现了电子、 α 粒子等亚原子粒子；找到了原子中的核心部分，并对它的特性进行了研究；建立了比较完善的原子结构理论；正确地描绘了原子世界的图象。

由上可知，卢瑟福通过 α 粒子散射实验，建立了有核原子模型理论。不足之处是对电子在原子中的分布情况还很不清楚。当然，它们肯定不象西瓜模型中的瓜子那样均匀分布，但具体的分布情况仍不得而知。为了解答这个问题，我们必须提到丹麦物理学家尼尔斯·玻尔教授的工作。他对卢瑟福的伟大发现不但非常重视而且给予了高度的评价，他曾经亲自到卢瑟福的实验室工作了几个月，然后在1912年发表了一篇有关电子围绕原子核运动的论文。他在描述电子围绕原子核转动时，应用量子的概念说明电子运动的轨道是不能任意选择的，只能处在特定的轨道上环绕原子核转动。这就好比宇宙空间中太阳系的行星，它们都是以自身固有的轨道围绕太阳运动。玻尔把自己的论文寄给了卢瑟福，他的卓越见解立刻使卢瑟福欣喜若狂，因为玻尔把核外电子的运动情况解释得如此完美无缺，这是人们意想不到的。

这样一来，卢瑟福原先假定的原子中的核外电子是由于受到核心对它的电磁引力作用，才能迅速运动的说法，可作更进一步的说明。因为电子和核之间的强大引力如果没有其它力来抵消，电子就有可能被原子核吸引过去。现根据玻尔的电子轨道理论，卢瑟福就把电子围绕核高速旋转所产生

的离心力，看成是保证电子不被吸到核心上的抵消力。这就是卢瑟福提出的关于原子结构的行星模型。

卢瑟福的原子构造理论反过来又为他多年来所作的一系列 α 粒子散射实验结果，提供了更满意的解释。卢瑟福又利用数学这个有用的工具，对 α 粒子散射现象从物理和数学上加以分析和推导。最后，获得了一个公式。而验证此公式正确与否的实验任务是由卢瑟福的得力助手盖革和马斯敦完成的。他们曾选用了七种不同的散射物质和不同能量的 α 粒子，进行了极为广泛的测定和验证。结果，完全证实了卢瑟福散射公式的正确性。这样一来，就为卢瑟福的有核原子结构理论提供了有力的实验依据。从此以后，卢瑟福的有核原子模型得到了物理学家的一致公认，而“原子核”这个名称一直沿用至今。

从 α 粒子散射实验开始，直到散射公式被实验证实为止。使得人们有可能对原子世界的图象加以更真实的描绘，于是原子中原子核的客观存在已毋庸置疑了。而物理学家的注意力也从原子转向原子核，人们思考着这个比原子还要小万倍的实体是由什么东西所组成的？它又有哪些重要的特性呢？

当然，人们首先关心的是原子核的核电荷数值的大小。从卢瑟福的散射公式中可以看出，只要除了核电荷数之外的参数都已知，即可通过实验测量，求得靶核的核电荷数。

当时曾对铜、银和铂三种金属分别进行测定，结果铜为 29，银为 46，而铂为 77。这和它们在周期表上所占的位置序号分别为 29，47 和 78 十分接近。银和铂的差值是由于实验测量中的误差所引起的，故所得的核电荷数仅是大致的估计。

除此以外，有人想通过测定原子中的电子数目，间接求得核电荷数。因为原子本身是中性的，所以原子中的电子数和核电荷数在数值上应是相同的。1911 年，英国物理学家巴克拉从 X 射线的散射实验中，曾将一些轻元素原子中的电子数目总结为：“对一些轻元素而言，其拥有的电子数目是该元素原子量的一半左右”。

例如，原子量为 4 的氢元素拥有 2 个电子，核电荷数也为 2。而碳、氮、氧等原子量在 40 以下的元素，它们的电子数都与这一结论相符。这样，在原子量为 A 的原子中，轨道电子数和核电荷数均等于 $0.5A$ 。另外，已知电子的质量约是氢原子质量的二分之一（即 0.0005）。并以氢原子质量用作原子量单位，那末一个电子的质量就约等于 0.0005。那么电子的总质量为 $0.0005 \times 0.5A$ 。而原子核的质量就等于原子量 A 减去电子总质量： $A - 0.0005 \times 0.5A = 0.99975A$

由此可见，原子核占有了原子量的绝大部分（99.975%），且带有全部正电荷。

早在十九世纪六十年代，俄国化学家门捷列夫把已在自然界找到的元素全部收集在一起，并根据它们的化学性质和原子量，按照一定的次序，沿着横向和纵向进行排列。结果发现化学性质不同的元素，按一定的周期排列后，同一栏里元素的化学性质都相似。后人称这种元素表为“门捷列夫元素周期表”。表中各元素依次编号叫做“原子序数”，用 Z 表示。氢被列为第一号元素，接着就是氦、锂、铍等等。

到了 1913 年，荷兰物理学家范丁·布鲁克大胆指出，就每个化学元素而言，它们的用基本电荷单位表示的核电荷数，等于这个元素在周期表上所占的位置序数（即原子序数 Z）。这就是说，某元素原子核所带的正电荷数和该元素在周期表中的原子序数相同，所以元素的化学性质和核电荷数有关。而核电荷数能精确测定，可以纠正元素排列中的混乱现象。起初人们试图严格地按原子量的递增次序来排列元素的位置。结果发现碘和碲、镍和钴、钾和氩的位置发生了颠倒。而从核电荷数角度上看，碘比碲、镍比钴、钾比氩都是大一个单位。因此碘、镍和钾在周期表中的位置理应分别在碲、钴和氩的后面，这就避免了元素排列中的混乱现象。同时，通过核电荷的精确测定，还可预测那些在自然界中应该存在而至今未被人们发现的元素。由此可见，对于某种特定的元素而言，原子序数是比原子量更为基本、更带有特征性的参量。

中公网总站：www.offcn.com 邮箱：offcn.com@163.com

电话：010-62698755，82387776

地址：北京海淀区学清路 38 号金码大厦 B 座 9 层

但是，核电荷数的精确测定还是要归功于前面提到的巴克拉所开创的研究路线。他从研究 X 射线的衍射中，发现各种原子都会反射一种具有特殊穿透能力的 X 射线，而且原子量越高的原子所反射的 X 射线，其穿透能力愈强。人们把此种 X 射线命名为“特征 X 射线”。

紧接着在 1913 年，英国物理学家莫塞莱进一步研究了 X 射线谱与原子序数之间的关系，从而精确地测定了原子核的电荷数。他通过 X 射线在晶体中发生衍射的方法，精确地测定了各种原子的特征 X 射线的波长。结果发现，原子量越大的原子其特征 X 射线的波长就越短，穿透能力也就越强。由于周期表上各元素的原子序数基本上是按原子量的大小排列的，所以说特征 X 射线的波长随着原子序数的增大而愈来愈短。莫塞莱经过多次实验后认为，各种原子的特征 X 射线的波长取决于各种元素的核电荷数。我们知道随着原子序数增加核电荷数也相应增加，因为核外的电子数增加了。这样一来，我们不但能用特征 X 射线来确定原子核的电荷数，而且可把元素的核电荷数和周期表上的原子序数互相等同起来。

另外，莫塞莱借助玻尔的原子里论，分析了电子在核壳层中的静态分布。并进一步研究了电子在壳层之间跃迁时的动态特性，并建立了它们之间的经验关系式，实验测量结果符合得非常好。这就充分说明，原子序数和核电荷数是互相关联的。

除了核电荷数外，核质量数也是原子核的重要特征之一。但要直接测量它还是比较困难的。因为原子核总是附有轻易不能除去的电子，所以通常采用先精确测定原子的质量，而后减去全部电子质量的方法来获得原子核质量。

那么，单个原子质量又是怎样精确测定的呢？当然，最简单的办法是把大量原子集中在一起称量，这就是以往经常采用的方法。同时，从化学中我们知道，单个原子质量的测定和该元素的原子量有关，这样就把核质量的测量问题变成为测定元素原子量的问题。

多少年来，人们都以氧原子量(16.0000)作为标准去衡量其它各种元素的原子量。而到了 1960~1961 年间，物理学家和化学家们在有关的国际学术会议上，决定统一物理和化学的单位。并一致认为把碳元素的主要同位素碳-12 的原子量作为测定其它元素原子量的新标准，并把碳-12 的原子量定为 12.000000。根据这一标准，氧 16 的原子量就为 15.994915，所以采用碳-12 原子量的十二分之一作为一个原子质量单位要比氧 16 的单位大一些。而新老标准间的差值约为万分之三(0.03%)。

虽然原子核在原子世界中只占很小一部分，但它仍应具有一定大小。从卢瑟福的 α 粒子散射实验中，我们已知当散射角最大时，就是 α 粒子与散射物质原子核之间的距离最近。卢瑟福曾用银和金测得这个最近距离为万亿分之 2~3 厘米。此段距离可以看成是原子核半径和 α 粒子半径的和。由此可得，核半径的数量级是万亿分之一厘米。这一结果刚好和以后进一步精确测得的核半径相一致。

后来人们为了便于表示，定义了一个新的长度单位叫做费米(fm)、并用符号 fm 表示，1fm 等于十亿分之一厘米。当然，这样做也是为了纪念对核科学事业作出过重要贡献的美籍意大利物理学家费米。计算表明，所有元素的核半径是在 2~8fm 内变化。

如果我们取原子半径的平均值，那么原子半径就是核半径的四万倍。由此可见，原子核在原子中所占的空间实在是很小很小的，如把原子放大到像地球那样大，那末原子核的半径也只等于 319 米(地球半径为 6378 公里)。

在上面的讨论中，我们是把原子核近似看成为球形，这样它的体积可根据公式球体积的公司算得。由此可知，核体积仅和核质量成正比。也就是说，原子核的密度是一个常量，而其数值却大得十分惊人。我们不妨打个比喻，如把我国的珠穆朗玛峰(世界最高峰海拔 8848.13 米)捏成一团后，硬塞进人们的衣袋里，此时的密度大约和原子核的密度相等。计算表明，一立方厘米的核物质重约一亿两千万吨。如用万吨轮来运输，需要一万二千艘，按每年能建造一百艘万吨轮计，则也得连续生产 120 年。若改用火车运输，那末所需车皮的长度恰等于绕地球赤道一周那样长。也就是说，需用二千四百万辆载重量为 5 吨的解放牌卡车，才能一次拉动。

中公网总站：www.offcn.com 邮箱：offcn.com@163.com

电 话：010-62698755, 82387776

地 址：北京海淀区学清路 38 号金码大厦 B 座 9 层

4. 问题在于精确测量

从核特性的研究中已知该质量的测定取决于对单个原子质量的测量，而单个原子质量的测定又归结为对元素原子量的测定。但是，由于所测原子量的精确度不高，加上每一克原子中的原子数也知道得不够准确。且同种元素中的每个原子是否都有相同的两只练也都不得而知。所有这些都影响到核质量的精确测定。为此必须进一步研究对核质量更精确的测量方法。

早在 1886 年，就有人对同种元素所有原子完全相同的观点提出过怀疑。但由于条件限制，未能进行实验验证。到了 1932 年，卢瑟福和索第在研究铀族元素的放射性衰变产物中，首次发现在一种元素中存在着多种质量不同的同位素。到了 1907 年，随着钍系、铀系、锕系三个放射系的建立，科学家们从中又找到了一连串放射性元素，发现它们的原子并不是各方面都完全相同。但由于在测量方面的限制，未能对这些奇怪现象解释清楚。与此同时，对同位素颇有研究的索第从放射性原子的 α 衰变和 β 衰变所引起的原子量变化中，分析了三个天然放射系最终衰变产物的特性。发现它们应是三种不同原子量的铅原子，即铅 206、铅 207 和铅 208。接着索第等人又在 1914 年，对这三种铅同位素的原子量进行了测定。这样就直接证明了铅确实存在着三种不同原子量的稳定同位素，并对其它各种元素中的原子是否都有相同原子量提出了怀疑。

当然，人们首先联想到的是大自然岩石中的铅，它是没有放射性的稳定核，原子量为 207.2。而且人们不禁要问，为什么会出现带有小数点的原子量呢？从周期表上可看出，不仅铅元素是这样，其它元素也有此现象。这会不会是由于多种铅同位素混在一起造成的呢？但由于当时还无法进行同位素分离，因此得不到原子量单一的元素。这样问题也就无法解决，就需要设法找到一种可以测量单一原子质量的方法。

1912 年，英国物理学家汤姆逊和阿斯顿分别对氖原子进行了测量。汤姆逊用电磁分离法测得了氖的两种不同原子量的同位素，计算表明它们分别为氖 20 和氖 22，并算得前者约 90%，后者约 10%。这样，氖的平均原子量即为 20.183。

与此同时，阿斯顿用气体扩散法，对氖同位素进行了分离和测量。其结果也证明氖是由多种同位素所组成，并精确地测定了氖同位素的成分及其百分数。发现除了氖 20 占 90.51% 和氖 22 占 9.21%，还有氖 21 占 0.28%。

另外，根据很多元素的原子量都带有小数点的特点，说明这些元素都可能有同位素存在。于是科学家们就利用同位素分离装置去寻找各种元素的同位素。而人们通常把汤姆逊的第一台能够分离同位素的装置叫做“质谱仪”。然而，最先使用这个名称的是阿斯顿，他在 1919 年建成了第一台高效率的质谱仪，阿斯顿利用它对各种元素的同位素进行了仔细测量和研究。其它科学家也相继推出了同样的质谱仪，并通过测量发现了许多种同位素。

从 1913~1937 年，经过二十多年努力，初步完成了对各种同位素的测量任务。即使到现在，随着各种越来越精密的测量装置的建成，这种同位素成分的分析测量工作仍在继续进行。

许多元素的原子量是接近于某整数，但并非刚好是整数。如果某种元素有几种稳定的同位素，那末此种元素的原子量一定是几种同位素的平均值。例如，氯元素的原子量为 35.453，就是因为氯原子是由 24.5% 的氯 37 和 75.5% 的氯 35 所组成的混合体。但我们在实际应用中，仍把构成某一元素的各种同位素的平均质量数称为该元素的原子量，而把与某种同位素的质量最接近的整数称作该同位素的“质量数”。

对于原子量刚好接近整数值的元素来说，它们有可能是由单一的原子组成。铍 9、氟 19、钠 23、铝 27、金 197、铋 209 和钋 232 等元素，都是由单一的原子所组成。所以它们在自然界的同位素丰度是百分之百，能容易地提炼成纯元素，如金的纯度就可达 99.9999% (俗称六个九)。

但是，在精确测定各元素原子量的结果中，也发现有某些例外的情况，即有些元素的平均原子量是接近整数，但在质谱仪上测量时，发现它们仍然有着多种同位素。例如氢元素的原子量差不多刚好是 4 (4.0026)。但在精确测量中发现，仍然有着百万分之一的氦 3 原子。同样，氮和碳元素中也有类似的情况。甚至对于最轻的元素—氢来说，它也有万分之一的氘 2 同位素存在于自然界中，

这是美国化学家尤里在 1932 年把水进行同位素分离时发现的。氢 2 的质量数为氢的两倍，它是质量数差别最大的同位素。到了 1934 年，人们在同位素分离中又找到了氢的另一个同位素氢 3。它是带有 β 放射性的，半衰期为 12.33 年，发射出的 β 粒子能量为 18 千电子伏，质量数为氢的三倍。

氧元素的各种同位素的精确测定是在 1939 年由美国化学家吉奥克完成的。许多年来，氧原子量被物理学家任意定为 16.0000，而实际上氧元素中有 99.76% 的氧 16；0.20% 的氧 18 和 0.04% 的氧 17，这样氧 16 的实际原子量必然要小于 16.0000。到 1960 年后，作为原子量的测量标准采用了碳 12 原子质量，这样氧 16 的原子量就成为 15.994915。

由前我们知道，同位素的概念也适用于带放射性的元素，为此人们也对放射性同位素也进行了精确测定。例如，铀元素的原子量最初认为是 238。到了 1935 年，加拿大出生的美国物理学家登普斯特在铀原子中发现了其中有 0.7% 为铀 235，后来又找到了铀 234，它的同位素丰度为 $\sim 0.0054\%$ 。

随着现代科学技术的不断发展，质谱仪早已成为研究原子核特性的一种特别重要的精密仪器。它不仅能精确地测定原子的原子量，甚至还可以测定原子核的质量亏损。例如，对汞同位素质谱分析的结果可得六种质量数不同的同位素。

1、首次人工核反应

从十九世纪末到二十世纪初，科学家们连续不断地对奇妙的原子世界进行了深入而又细致的研究，并取得了很多伟大的成就。他们在发现 X 射线和放射性的基础上，找到了比原子更小的电子；并进一步发现了原子核的存在；通过精确测量，鉴别了同位素；对原子核的特性（包括核电荷、核质量和核体积等等）进行了初步探索……。

正当人们开始向原子核世界进军的时候，却爆发了第一次世界大战，战火燃遍了整个欧洲。本来热气腾腾、欣欣向荣的科学研究工作，此时也都被战争阴云所笼罩。卢瑟福被迫参加了英国海军的研究发展部，致力于潜水艇侦察问题的研究。居里夫人在法国参加了前线医疗服务队……，许多科学家都离开了自己原来的研究部。

到了 1918 年，大战刚一结束，卢瑟福就风尘仆仆地回到原来的研究所，并以更大的热情和充沛的精力投身到他原来所从事的研究工作中去。当时只有一位助手同他一起在十分简陋的实验室里进行 α 粒子散射实验工作，他们每天重复地数着由于 α 粒子打在硫化锌制成的荧光屏上所产生的闪光。

后来，卢瑟福来到剑桥大学，接任了汤姆逊老师的职务。他继续用 α 粒子去轰击一些轻元素的原子核，希望 α 粒子能进入原子核内部进行“侦察”，以求早日揭开核世界的秘密。在 1919 年终于出现了奇迹，这是核科学史上难以忘怀的一年，卢瑟福成功地实现了人类有史以来第一次人工核反应。坚硬而又微小的原子核首次被 α 粒子击中后发生了很大变化，并从核反应的过程中观察到了一种新的粒子——质子。同年 6 月，卢瑟福在英国皇家学院作了关于氮原子核被 α 粒子击中能发射出质子的报告，而且当众做了实验表演。

下面，就让我们回顾一下，卢瑟福的第一次人工核反应到底是怎样实现的？

从三个天然放射系中，我们可以看到很多放射性元素都能发射带有 2 个正电荷和质量数为 4 的 α 粒子。为此人们就联想到原子核是否都是由相同的 α 粒子所组成？因为只有原子核是带正电荷的，并集中了原子的绝大部分质量。但是事实上有许多原子核的电荷数和质量数都不是 2 和 4 的倍数，所以人们又根据氢原子核的电荷数和质量数都是 1 的特点，认为原子核很可能是氢核和 α 粒子的混合体。然而，这仅仅是一种大胆的设想，还需用实验加以验证。为此，科学家们为了早日揭开原子核内部结构的秘密，就利用当时仅有的 α 粒子束作为炮弹，不断轰击各种原子核。其中工作做得最多也是最有经验和成就的当然是卢瑟福教授。他在用镭所发射的 α 粒子对重元素核和轻元素核轰击时，发现了一种奇怪现象，即对重核（例如 82 号元素铅）轰击时，由于 α 粒子与重核间存在着巨大的静电斥力，所以 α 粒子只能在离核相当远的地方发生偏转；而对轻元素（如 7 号元素氮）轰击时，它与 α 粒子间的静电斥力就小得多了，此时 α 粒子有可能在离核较近的距离内发

中公网总站：www.offcn.com 邮箱：offcn.com@163.com

电 话：010—62698755，82387776

地 址：北京海淀区学清路 38 号金码大厦 B 座 9 层

生偏转。然而科学家们感兴趣的是：能否有个别高能量的 α 粒子能够克服与核产生的静电斥力进入核中。这样， α 粒子就能和核内部发生作用，而后通过研究分析，就可以对原子核的内部结构能有所了解。卢瑟福根据这个想法，设计了新的实验装置。

1919 年，卢瑟福用氮气作为 α 粒子的轰击靶核，结果看到了从荧光屏上所产生的明亮闪光。而这种闪光是来之不易的，因为原子核实在太小了，其直径约为十亿分之一厘米，所以 α 粒子束中的绝大多数注定是要打空的。卢瑟福的计算表明，每 30 万个 α 粒子中只有一个能侥幸击中氮原子核。

那末，明亮的闪光究竟是怎样产生的呢？卢瑟福认为这决不可能是容器内的 α 粒子所引起的。因为根据 α 粒子的最大能量 7.7 兆电子伏在氮气中的射程不能大于 28 厘米。这样，只要在实验中把 α 源和荧光屏之间的距离固定在 28 厘米处， α 粒子就不能透过银箔到达荧光屏上了。当然，闪光也不可能是因 α 粒子激发原子后放出的特征 x 射线所造成。而唯一的可能就是由于 α 粒子直接和氮核相互作用产生了某种新粒子的结果。

为了证明这一点，卢瑟福又在抽空的容器中充以氢气。结果在 α 粒子轰击下，也能获得与轰击氮核时一样的闪光。这是因为 α 粒子与氢核相互作用时，把能量传递给它。只要能量足够大，获得能量的氢核就得穿透银箔在荧光屏上产生闪光。而原来 α 粒子轰击氮核时，在碰撞过程中产生了一种类似于氢核的新粒子（后来被称作质子），而且它的能量也很大，在氮气中的射程大于 28 厘米（如在空气中则为 40 厘米），故能容易地穿过银箔在荧光屏上产生和氢核相同的闪光。卢瑟福又把这种新粒子引入电磁场中，经测定发现其电荷和质量同质子完全一样。

接着，卢瑟福为了最后肯定引起闪光的是质子，而且它只能从氮原子核里产生出来的结论，又把氮气经过多次净化后再行测量。结果发现这种闪光确实仍然存在，而且强度也未见减弱。这就充分说明闪光不可能是由于在氮气中偶然含有氢或容器被氢污染所引起，而完全是由于 α 粒子和氮核相互作用的结果。这就是有史以来的第一次人工核反应。

从反应中可以看到，氮核被 α 粒子轰击后，能够生成氧的同位素氧 17 和质子。从此人们不但知道在原子核中的确存在着同氢核一样的粒子——质子，而且通过核反应，人们也能够把一种元素转变成另外一种新元素。自古以来，炼金术家们一直幻想着能把一种元素熔炼成另外一种有用的元素，这个宿愿终于被现代“炼金术”家实现了。

在此同时，1924 年英国物理学家布莱开特利用威尔逊云室，直接测得了 α 粒子同氮核的反应过程。这种测量装置是在 1912 年由英国物理学家威尔逊精心设计制造而成的一种跟踪离子轨迹的仪器。

卢瑟福为了想知道是否会有更多的元素在 α 粒子轰击下也能产生出质子和新的原子核。他曾借助上面的实验装置，继续用 α 粒子去轰击硼、氟、铀、铝和磷等元素，并仔细地观测了它们的核反应过程。到 1924 年为止，卢瑟福发现除了上述提及的元素外，还有氦、镁、硅、硫和氯等元素经过核反应都能发射质子。并总结归纳成以下几点：

(1) 实验证明，原子核结构十分复杂，它们中的某些核具有俘获 α 粒子的本领，通过核反应从核中发射出质子，从而形成另外一种新元素。

(2) 产生核反应要有一定条件，即要求入射粒子具有一定的能量，一般为几兆电子伏才能克服与靶核产生的静电斥力，进入核内产生反应。当然，其命中率不高，需要大量入射粒子，才偶尔可得一、二次核反应。

(3) 核反应过程一般都是吸能反应，但也有例外。

(4) 各种元素的核结合的松紧程度是不同的。如铝核就结合得很松，而氢核就结合得比较紧。