1 物质的基本组元

五彩缤纷、千变万化的物质世界是由什么组成的？古往今来，对于这个问题的答案在不断演变。古希腊人认为物质世界是由天空、大地、火和水组成的，我们中国的先人则认为世界是由金(属)、木、水、火、土这五种元素组成的。尽管他们的看法不完全一致，但有一个共同点，就是根据所见到的物质，把它们分成几大类，就成了物质世界的基本组分。

古希腊哲学家德谟克利特(Democritus)认为，一切物质都是由不可分的原子组成的。他的阐述只表达了物质观念的一种唯物主义哲学观点。至于原子究竟是什么？这个问题在他当时那个时代是无法回答的。

后来，由于冶炼业的发展，以及化学和化学工业的产生，人们才深入到对构成大块物质的成分的研究，最终导致了 19 世纪门捷列夫元素周期表的产生。尽管现在人们仍然还在寻找可能存在的元素，但不论天空、大地、水和火，还是金属、木和土壤，基

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本都可由具有特定化学性质的 100 多种元素组成，每种元素则由构成该元素的基本单元及化学变化中的最小微粒——原子组成。

19 世纪末，一种叫‘阴极射线’的现象引起了科学家的极大兴趣。在充有稀薄气体的玻璃管两端加上高压电后，玻璃管内就发生放电现象。如果提高真空度，玻璃管内的光线反而逐渐消失，在阴极对面的管壁上却会出现荧光。它表明，这种荧光或辉光是从阴极发出的某种肉眼不能看见的射线打在玻璃管壁上所致。今天我们大多数家庭中电视机的显象管基本上就是利用这个原理制造的，但当时对阴极射线是什么东西，人们却一无所知，还需要搞清楚。

作为阴极射线研究的开始，首先有人证实了那是一种带负电荷的粒子。1897 年，英国剑桥大学的 J·J·汤姆孙(Joseph John Thomson)测定了阴极射线粒子的电荷与质量之比。结果表明，这个比值与阴极射线管中的气体种类无关，也与阴极材料无关。接着，汤姆孙又测量得出，阴极射线粒子电荷与氢离子的电荷大小近似相等，符号相反。再根据已知的电荷质量比，就计算出阴极射线粒子的质量大约是氢离子质量的 1/1800。由此，汤姆孙提出，阴极射线粒子是一种比原子轻得多的粒子，其电荷代表了一个最小单位。汤姆孙称这电荷单位为‘电子’，后来，人们就把阴极射线粒子本身称为电子。

1895 年，德国维尔茨堡大学的伦琴（Wilhelm Conrad Röntgen)惊讶地发现，一个被黑纸包着的阴极

射线管使放在一定距离之外的一个涂有氰化钡箔的纸屏变得明亮起来,发出荧光,而他知道阴极射线是不可能透过黑纸射到纸屏上的。他又把手放到管子和屏之间试探，竟在屏上看见了自己手的骨骼！经过仔细研究，伦琴得出结论：阴极射线打击放电管壁,产生了一种新的射线,伦琴称之为“X射线”。

第二年，法国科学家贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel)想要研究X射线与荧光之间存在什么关系。在准备实验时，他用双层黑纸包住一张照相底片,纸上放了一些铀化合物,把整个东西放在暗抽屉里备用。几天后他打开抽屉,出乎他意料的是,铀化合物已经使其下面纸包中的底片感光。于是，人们称之为“放射性”的现象被发现了。凡是放射性元素(例如铀)或其化合物都能发射有穿透物质本领的射线。1898年,玛丽·居里(Marie Sklodowska Curie)和皮埃尔·居里(Pierre Curie)夫妇又发现了新的放射性元素钋和镭。到1900年,科学家已分析出了放射性物质射线的成分有三类带正电叫α粒子,带负电的叫β粒子(实际上就是电子),中性的叫γ粒子。

电子、X射线、放射性,19世纪末物理学的这三大发现打破了原子不可分的旧观念。从原子论建立之日起,人们普遍认为原子是物质的最小单元,而且每种原子都是电中性的。现在，既然从原子中飞出了带负电荷、质量为原子的千分之一的电子,就表明原子内部还有带正电荷的物质。那么，原子内正电荷是怎样分布的呢？发现电子的汤姆孙首先提出了

一种模型,把原子设想成一个实心球体,其中的正电荷连续均匀地分布着,电子埋在球体内,使原子总电量为零。他还估计出原子的半径约是 10^{-10}米。

1909年,卢瑟福(E. Rutherford)用 α 粒子束去打击金属箔片中的原子。α 粒子带正电荷,质量约是氢离子的四倍。当具有同一初速度的一束 α 粒子射向原子时,它们受到原子内正电荷的排斥力影响,改变原运动路线而朝各方散开。卢瑟福发现 α 粒子束中有相当一部分散射角度很大,与用汤姆孙模型作理论分析的结果有明显矛盾。经过周密思考,卢瑟福提出了另一种原子结构模型:原子内部有一个核心,原子的所有正电部分都集中在这个比原子小得多的范围中,电子受原子核正电荷吸引围绕着它运动。

可是,按照经典的宏观电磁理论,当带电粒子作圆周运动时,会连续放光而不断丢失能量,转的圈子越来越小。如果真是这样,卢瑟福模型中的电子最终就要与原子核相碰,可是,这又与人所共知的原子稳定性冲突了。那么,解决矛盾的出路何在呢?

时代在呼唤新物理学的出现。1900年诞生了由普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck)提出,后经爱因斯坦(Albert Einstein)在1905年最后完成的光量子说。过去,人们从干涉、衍射等现象了解了光的波动性质。光量子说则通过光电效应等现象证明,光还有粒子性质,光的微粒叫光子。后来知道,所有微观粒子都是既有粒子性又有波动性的,这种共性叫'波

粒二象性”。波粒二象性粒子的运动不遵从牛顿力学规律,而是由量子力学来描述。

1913年,丹麦科学家玻尔(Niels Bohr)把量子观点应用到卢瑟福模型上,提出在原子中电子的运动轨道半径、角动量以及能量都不是任意的,即不可以连续改变。电子的一系列不连续能量值构成了“能级”;一般说来,当原子中的电子都处于尽可能低的能级时它是稳定的。如果有的电子能级过高,它就不够稳定,当它跳跃到低能级时,就放出光子。由于能量守恒,该光子的能量等于电子跃迁前后两个能级的能量之差。玻尔理论很好地说明了原子的稳定性,同时也初步解释了原子发光所产生线光谱的规律。

基本掌握了原子结构之后,科学家证实,α粒子就是氦原子核,β、γ射线则分别是从原子核中发出的高速电子流和光子流。显然,下一步应该搞清楚的问题是:α、β、γ射线是怎样从原子核中发射的?为什么有的原子核有放射性,有的却没有?

科学家继续利用α粒子去轰开原子核,想探查个究竟。1919年,卢瑟福首先以α粒子轰击氮原子核,使氮原子核发生了转变,放出了氢原子核(即质子)。接着,他和查德威克(James Chadwick)又发现硼、氟等也可以产生类似的转变,由此推断质子是原子核的构成成分。把原子核的电荷除以质子的电荷所得的倍数,就是该原子核内包含的质子个数。但是,当他们又用原子核的质量除以质子的质量时,得

需要全本请访问 www.ertongbook.com

出的倍数却比电荷相除得出的倍数大得多，例如氧原子核电荷只是质子电荷的 8 倍，其质量却是质子质量的 16 倍。于是他们猜测在原子核中除了质子还有某种中性物质，这种物质具有与质子相当的质量，并与质子一起构成原子核。

1932 年，居里夫人的女儿伊雷娜·约里奥-居里（I. Joliot-Curie）与她丈夫弗雷德里克·约里奥-居里（F. Joloit-Curie）在用 α 粒子轰击铍时发现了一种电中性的、穿透力比通常 γ 射线还强的射线，这种射线又使石蜡产生质子。查德威克读到他们发表的论文后，很快复核了该实验，并从能量守恒条件证明，如果这射线是一种质量与质子相差无几的中性粒子，那么它轰击石蜡后所产生的质子就恰好具有实验所测定的能量。该粒子被取名中子。

中子发现以后，原子核由中子和质子构成的理论瓜熟蒂落。中子和质子质量几乎相等，中子不带电，质子带正电。假设原子核中有 Z 个质子、$(A-Z)$个中子，则其质量大约是质子质量的 A 倍，而其电荷等于质子电荷的 Z 倍。通过实验，人们除验证了这些数量关系外，还确定质子和中子都有自旋（此前人们已经通过原子光谱的实验观测结果得出电子有一种固有的内在角动量，并将其叫做“自旋”），自旋量子数都是 1/2。有时这两种粒子又统称为核子，使它们结合的力则叫核力。核力在其作用范围内，比电磁力强上百倍。

原子核也有能级，位于高能级的原子核不稳定，

要通过放出射线而达到稳定。每种化学元素原子核的质子数都是一定的,中子数却可以不同,这样的原子核叫同位素。中子数过多的同位素也不稳定，将自动发生中子转变为质子的过程，同时放出一个电子,这就是β衰变。另一些不稳定原子核会放出 α、γ 射线。

只是通过观测射线导致的荧光和对底片的感光还不能够定量地研究放射现象，于是探测器应运而生。一种叫计数器的充气管每当有射线穿过时便能产生电信号，另一种以其发明者威耳逊(C. T. R. Wilson) 命名的云室则可以显示出粒子运动的径迹。

1932 年,美国加州理工学院的安德森(Carl David Anderson)从几千张云室照片中发现了一条陌生的径迹,留 下这径迹的粒子与电子质量相等,电荷大小也一样,只是符号相反。安德森提出,这是带正电的电子,或叫正电子。当时他并不知道,在此以前英国物理学家狄拉克(Paul Adrien Maurice Dirac)已从关于电子的相对论理论预见到了正电子的存在。狄拉克的理论还预言，电子和正电子可以由光子从真空中同时成对地产生。反过来，如果一个电子与一个正电子相碰,则将同时湮灭,全部能量转化成光子辐射出去。这些现象也被实验观测到了。

电子和正电子是一对正反粒子。后来又发现，每一种微观粒子都有其反粒子，正反粒子相遇即发生湮灭。反粒子与正粒子的质量、自旋都完全相同。带电粒子的反粒子与正粒子电荷符号相反。有的中

性粒子也有反粒子，如中子和反中子是两种不同的粒子 还有少数几种中性粒子(如光子)没有反粒子，或者说其反粒子就是本身。反质子和反中子可结合成反原子核,反原子核和反电子又可结合成反物质。

用质子、中子、电子以及它们的反粒子就可以组成我们观测到的所有物质，当时这些粒子就是人们心目中构成物质的最小“砖块”,所以它们被称为“基本粒子”。

1932 年，奥地利物理学家泡利(Wolfgang Pauli) 在国际会议上预言,在中子转变为质子的过程中,不仅放出一个电子，还放出尚不知名的一种中性粒子(后来被叫做中微子)。他指出,如果存在这种中性粒子,β 衰变产生粒子的能量和角动量就都能够守恒,并且符合观测到的 β 衰变数据。1953 年至 1956 年,经过艰苦的工作,美国洛斯阿拉莫斯实验室从质子的反应过程中首先证明了反中微子的存在。

中微子只受弱力作用,有中微子参与的 β 衰变是一种弱相互作用过程。1956 年,旅美物理学家杨振宁和李政道在研究当时一个著名的“τ－θ 疑难”问题时,提出了弱相互作用过程宇称不守恒(即左右不对称)的假定,并很快由另一位旅美物理学家吴健雄女士从实验上证实了。

20 世纪 50 年代兴起的大型加速器和探测技术，为产生和发现新粒子提供了有力工具。随着实验技术的发展,又有 K 介子、Λ 粒子等加入“基本粒子”行列，种类数越来越多。后来人们又把它们简称为

“粒子”:粒子之间存在着四种相互作用力:人们比较熟悉的引力和电磁力以及通常不能被直接感受到的弱作用力和强作用力。研究(基本)粒子在自然界存在的基本力的作用下产生之现象的科学叫粒子物理学。

强相互作用就是使核子(质子和中子)结合成原子核的相互作用。它是自然界四种基本相互作用中最强的一种。为了探测强相互作用的性质，人们进行了大量的质子与原子核散射实验。虽然耗费了巨资,投入了无数的人力、物力,建造的粒子加速器能量越来越高,设备越来越大,却很难探测到强相互作用的细节，反而发现了越来越多的参与强相互作用的粒子。此外，只参与弱相互作用的粒子也被不断发现。到 20 世纪 60 年代初，人们知道的粒子种类已经比 1869 年门捷列夫周期表中的元素还多了。这么多种粒子不可能都是最基本的物质组分吧？它们之中是否有几个粒子比其他的更基本一些，而其他粒子都由这几个粒子构成呢？

把粒子分门别类，从中寻找规律性已是势在必行。经过各种尝试，物理学界公认将它们分为以下三大类为宜：

(1) 光子：是电磁相互作用的媒介。

(2)轻子 不参与强相互作用,有弱相互作用，带电轻子有电磁相互作用。

(3) 强子：参与强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用。

电子、μ子和中微子属于轻子，质子、中子、π介子等许多粒子属于强子。强子又因自旋不同分为重子和介子两类。

1961 年，美国理论物理学家盖尔曼（Murray Gell-Mann）把当时所有的介子和重子按其性质编组，同一组的粒子以“同位旋”和“奇异数”两个物理量作图。根据图中规律，他预言了 Ω^- 粒子。两年后，他的预言完全被实验所证实。盖尔曼等又利用群论作数学工具，发现了上述规律来源于三个基元的对称性，遂于 1964 年提出了强子结构的夸克模型。

当时同时在进行的另一项研究，是用逐步升级的高能加速器所产生的电子轰击质子。实验资料渐渐显示出了在质子不足 10^{-15} 米的小范围内电荷分布的细节。类似的实验还反映出中子也有电荷分布，尽管它总体上是电中性的。20 世纪 60 年代末，通过类似于卢瑟福散射的方法，物理学家终于证明了质子和中子内部有若干点状成分。这些点状成分就是夸克。

因此可以确认，强子由更基本的粒子——夸克及其反粒子构成。三个夸克结合成为重子，一个夸克和一个反夸克结合成为介子。每个夸克都有自旋，量子数是 1/2。夸克的电荷比较奇特，是电子电荷的 2/3 或 1/3 倍。借用生活中的词汇，夸克以“味”来区分，每种味的夸克又各有“红”、“黄”、“蓝”三种“色”。

最初，盖尔曼的模型中，夸克共有“上”、“下”、

“奇”三种味。1974年,美国麻省理工学院的丁肇中实验组和斯坦福大学的里克特(Burton Richter)实验组在两地同时发现了一种新强子,后被命名为 J/ψ。此粒子是由第四种味的夸克和反夸克构成的,新的味被赋予名称“粲”。随后,又有由正反第五种味——“底”夸克构成的 ϒ 粒子出现,1995 年,实验上最终肯定了第六种味——“顶”夸克的存在。目前,各方面的实验资料都支持夸克只有六味三色,超出这个范围的理论与事实不符。

下面就是“物质基本组分”概念逐层深入演变至今的过程:

宏观物质
|
分子
|
原子
|
原子核
|
质子、中子、介子等
|
夸克、轻子
……

如果说基本组分粒子是构造物质世界的“砖块”,那么,作用于粒子之间的力就好比是能够把砖块与砖块结合起来的黏合剂“水泥”。现今人们所认识的物质最基本组分是轻子(像电子)和夸克。基本的强作用力使夸克束缚在一起成为质子、中子以及

需要全本请访问 www.ertongbook.com

其他许多粒子，这种力也使质子和中子结合成原子核。强子参与的各种相互作用过程都可以归结为夸克的过程，例如质子与电子的电磁作用实际上是其中的夸克与电子的作用。弱作用力则是原子核和粒子衰变的主要原因。原子核与电子之间的作用则主要是电磁力。在粒子之间万有引力的作用是非常微不足道的,一般不必考虑。

要知道物质世界大厦是如何由基本组分粒子搭建起来的，就需要建立一个关于自然界的基本作用力的理论。量子场论就是统一描述物质基本组分在自然界基本力作用下的运动变化规律的理论。不过,在对量子场论进行简单介绍之前,让我们先来看看场是什么。

2
量子化的场

场也是物质

据说有一个人想用以下的办法考考自己的三个儿子。他把儿子们带到一间空房子里,问道:"如果我给你们每人一元钱去买东西,要求所买的东西能够充满整个屋子,可以办到吗?"大儿子想也没想,就说肯定做不到。二儿子考虑一会后回答说:"我想,用一元钱的稻草大概可以堆满这间屋子吧。"老三却跟父亲要了一元钱,跑出去买了几根蜡烛和一包火柴回来。他用火柴点亮了蜡烛,烛光照到了屋子里的每一个地方。原来,老三用光来充满了整个房间。父亲称赞并奖励了三儿子。

然而,假如有人对老三的做法提出质疑:"固然烛光是能照亮整个房间,但是父亲对儿子们提出的要求是'用'东西'来装满房子。那么,难道亮光也能算是一种'东西'吗?"

对于这个问题,应该怎样回答呢?这里涉及到

一个科学问题。

所谓‘ 东西 ”,在科学上就是指物质。例如 ,房屋、桌椅、稻草等是固态物质 ,水、酒精等是液态物质 ,空气、水蒸气等是气态物质。

固态物质的大小和形状是固定的，所以它能够占据的空间范围也是一定的。好比老二想用稻草来装满房子 ,尽管稻草可以堆得很高 ,但是总有空隙。液态物质的形状会随着装它的容器而改变，但是体积不会变。气体分子可以在任意大小的空间范围内弥散开来，比如房子里每个角落都会有空气。但是在一定量的空气中，每一种气体分子数量也是一定的 ,这些分子彼此相隔距离很远 ,实际上在一间屋子里 ,没有被气体分子占掉的地方比被占的地方还多。而只有光才能够连绵不断地布满房子里的所有空间。只要没有其他东西阻挡，光可以占据任意大小的空间范围。因此老三的主意确实很高明。

问题是究竟光能不能算物质呢 ？

答案当然是肯定的。从科学的观点看，光确实是一种物质。

大家知道 ,太阳光照在人们身上 ,就把温暖给了人们 ,这说明光具有能量。烛光虽然没有太阳光强，但是 ,科学实验已经证明了 ,凡是光都带有能量。另外 ,光还有动量 ,当光照到镜面上被反射时 ,会给镜面一个压力，就像皮球被墙面反弹时给墙面以压力那样。

因为光在传输时 ,像一切运动的物质一样 ,不仅

具有能量,还有动量,所以说光是物质的一种。

当然,光这种物质,与固体、液体和气体等都不同。固体、液体和气体由原子或分子构成,原子和分子是有一定大小和质量的。但是光并不是由原子或分子构成的,它连绵不断地布满所有能够占据的空间。另外,光的质量等于零。所以光属于特殊的一类物质,这类物质叫做场。

人们对场的认识,是从研究自然界存在着的作用力开始的。很久以前,人类就发现了一定质量物体之间的万有引力、带电体之间的库仑力以及磁石吸铁的磁力,因为它们能够作用于受力物体而改变其运动状态。

万有引力是牛顿(Isaac Newton)发现的。他的基本思想是,所有具有质量的物体之间都存在着吸引力,这种作用是超距的,不需要物与物的接触。比如地球对于月球的吸引力,它们相隔约 38 万千米,万有引力的作用似乎是不经任何媒介即时传递的。基于这种思想,牛顿导出了万有引力定律,还建立了在力作用下物体运动规律的理论。这个理论在大量天体现象的解释中得到了检验。当然也有个别例外,比如水星近日点的进动,也就是在地球上观察到的水星绕日的椭圆形轨道随时间而逐渐推进,用牛顿理论计算的结果与天文观测总有一个微小的差别。虽然这个误差很小,但是与牛顿力学对其他现象十分精确的预言比起来,这个偏差是不可忽视的,它意味着牛顿理论需要改进。事实上,这个问题直到爱

因斯坦创立了引力的相对论理论之后才得以解决，是广义相对论最得意的成果之一。

至于电力和磁力，起初人们也认为是一种超距作用。因为从表面上看来，当一个物体带上正电荷以后，在离开它很远地方的另一个带负电的物体就立即能够受到它的吸引力，这个力好像是越过两者的空间在瞬时间直接传过去的。又如，磁铁可以把附近的铁钉吸引过来，两者原来也没有接触。

然而，超距作用的观念与我们从日常生活中见到的大量其他现象中得到的认识并不相符。我们在推拉一个物体时，总是要接触这个物体，才能给它施力。投掷运动员把铅球抛出去是由于他的推力通过手作用于铅球。我们说话能被周围人听到，是由于声带振动压迫空气使之密度改变，从而通过在空气中产生的声波把声音传播开去。假如没有空气，即使我们使尽气力说话，周围的人也是不可能听到的。你往水中投下的石头，打到水面时会迫使那里的水面向下沉，然后水面又反弹起来，产生了振动。这种石头与水的作用通过水的传播而形成波浪，可以影响到很远的水面。在这些现象中，任何一种作用都是通过物体与物体直接接触而依次传递的。那么，难道电磁力和引力就能够不须通过任何媒介即从一个物体作用到相距很远的另一物体吗？

直到 19 世纪 20 年代，英国物理学家法拉第（Michael Faraday）才对超距作用提出了不同的看法，并首先对于电磁相互作用引入了场的概念。他通过

大量实验发现,带电体、磁体或电流之间的电作用或磁作用与它们之间的介质有关。介质不同，显示出的作用力就不同。因而,法拉第设想带电体、磁体或电流周围空间存在一种由电或磁产生的物质，它无所不在,起到传递电、磁力的媒介作用,法拉第把它称之为场。1832 年在他写给英国皇家学会的一封信中指出:"磁作用需要时间,即当一个磁体作用于另一个远处的磁铁或一块铁时,产生作用的原因(我以为可以称之为磁)是逐渐地从磁体传播开的;这种传播需要一定的时间，而这个时间显然是非常之短的。我还认为,电磁感应也是这样传播的。我认为，磁力从磁极出发，类似于波纹的水振动或空气粒子的声振动,也就是说,我打算把振动理论应用于磁现象,就像对声所作的那样,而且这也是光现象最可能的解释。相比之下，我认为也可以把振动理论运用于电磁感应……"

法拉第在一张纸上撒些铁屑,在纸下面用磁棒轻轻颤动，结果这些铁屑在纸面上清楚地排列成一条一条的线形轨迹，形象地显示了无形的磁场中磁力线(现在更规范的名称是磁感应线)的走向(参见图 1),事实上,不管磁体周围是否有铁屑存在,磁体周围总存在作用于铁屑的场。一块磁铁可以把铁钉吸引过来，这是磁场把磁力的作用传递过去的结果。

与磁力产生的原因相似,两个带电体之间的电力是通过电场来传递的。当一个物体带上了电以后，

需要全本请访问 www.ertongbook.com