



郑志鹏 江向东
(中国科学院高能物理研究所)

人类的求知欲和好奇心总是驱使着自身去了解周围的世界。这自然要遇到这样一个基本问题：世间万物是怎样来的？假如不是无中生有，那么必定是从某些原初物质创造出来的，这些原初物质是什么？

对这种原初物质的猜测，或者说物质结构的原子观念，追根究源可以上溯到公元前好几百年以前。然而，这两千多年间关于原子观念的许多哲学思辨和主观臆说，只能当作近代科学研究的一种背景，而不能视为科学真谛，对物理学尤其如此。这些几近于臆想一样的观念，提倡者没有想到或没有条件用实验来检验它们，也没有用这些假说所预言的情况来验证假说本身。因此，科学的原子论的建立应该说来自道尔顿。他第一个将“原子”这一抽象概念变为化学中的实体。

一、化学原子论

用原子的观念来阐明化合物的组成所服从的定量规律，并且通过实验来测量不同元素的原子的质量之比。这种始自化学的原子假说可以叫作“化学原子论”，也可以说成是科学的原子论。这种原子论一经建立，就成为化学乃至所有自然科学的理论基础。化学原子论最初提出于1803年，若以系统阐述这一假说的著作即《化学和哲学的新体系》的出版为标志，则为1808年。化学原子论的创立者是位自学成才的化学家和物理学家，约翰·道尔顿。

道尔顿1766年生于英国坎布兰州的鹰田村，出身寒门，少时务过农，当过乡村小学教师。15岁时，道尔顿被离家40英里的肯塔尔学校聘为教员。4年后即1785年任该校校长。在这所学校，他结识了一位名叫约翰·顾夫的盲人学者，从而对数学和气象学产生了浓厚兴趣。1793年，道尔顿离开肯塔尔，到新兴的工业城市曼彻斯特的“新学院”任数学和哲学教授。次年，道尔顿成为曼彻斯特文学和哲学学会的会员，开始了比较正规的科学研究。

1803年，道尔顿将“原子”从一个抽象的哲学术语变为化学中的实在客体。他在9月6日（恰巧是他37岁生日）的笔记中给原子下了这样的定义：

“物体的终极原子乃气体状态时被热氛围绕着的质点或核心。”

有着深远意义和实际功效的一点，是道尔顿揭示了化学元素以其原子质量为其最基本的特征这一核心问题。从下面所引的道尔顿的一段论述可以看出，他的学说的精华是从多么普通的常识中提炼出来的！

“假如水的原子，有一些比另一些重，又假如某一体积的水，偶然恰由这种较重的水原子所组成，显然，这种水的比重必然较大。然而，这种假定与事实相悖，因为我们从来没见过这种水，无论来自何处的纯净之水，比重都是相同的。这不过拿水做个例子，其它物质也是如

此。因此，我们可以做一判断：所有均匀物质的终极原子，其重量和形状都完全相同。换言之，即水的某个原子，必无异于水的其余原子；氢的某个原子，必无异于氢的其余原子，余下类推。”

需要说明的是，当时人们尚未认识到同位素的概念。事实上，差不多所有元素都有不同的变种，称为同位素。同一种元素的不同同位素原子在化学上几乎是不可区分的，但它们的原子量不相同。克鲁克斯在1886年猜测到它们的存在，1910年索迪将其命名为同位素。

1803年10月18日，道尔顿在曼彻斯特文哲学会报告了关于原子假说的论文。他在文末写道：“尽我所知，考察物质的终极粒子的相对重量是一个全新的课题；近来我做的这种考察很有成效。这篇论文没有阐述其原理，不过，我把我的实验所测定的一些结果，放在附录里。”

这篇论文的附录里有张列有21种元素的原子量表。该文先在《曼彻斯特文集》上发表，后转载于《科学日志》。

1804年，道尔顿发现倍比定律。这一发现，是对他的原子假说的最直接而又有力的支持。尔后三年里，道尔顿将他的原子思想发展成为比较完整并自成体系的学说。

道尔顿认为：元素的最终组分就是简单原子，它们是既不能创造，也不能毁灭，而且是不可再分割的。它们在一切化学变化中保持其本性不变。同种元素的原子，其形状、质量及各种性质都相同，不同元素的原子的性质则不相同。每一种元素以其原子的质量为最基本的特征。不同元素的原子以简单数目的比例相结合，就形成化学中的化合现象。

他将化合物的原子称为复杂原子，还为简单原子和复杂原子组成的各种元素设计出第一套元素符号。

道尔顿著的《化学和哲学的新体系》于1808年出版，正式宣告了化学原子论的诞生。化学原子论，不仅为化学家提供了一个最基本的现实模型，而且为原子量的研究奠定了理论基础，这对化学有着始终如一的重要性。不仅如此，

它还使整个科学变得非常简单而意义又非常明了。

二、原子的结构

道尔顿1807年在爱丁堡演讲时曾这样宣称：

“气体、液体和固体，都是由该物质的不可分割的原子组成的。化学的分解和化合所能做到的，充其量只能让原子彼此分离和重新结合。物质的创生和毁灭，不是化学作用所能达到的。就象我们不可能在太阳系中放进一个新行星或消灭一个老行星一样，我们也不可能创造出或消灭掉一个氢原子。”

化学家用化学手段无法做到的事，物理学家做到了。在探索稀薄气体和真空的放电现象的这条路线上，物理学家们发现了阴极射线。英国物理学家汤姆逊通过对阴极射线的进一步研究，证实了这种阴极射线是所谓终极原子的组分之一——电子，从而打破了原子不可分的观念，使人类对物质结构的认识深入了一个层次。

人们常见的放电现象是闪电。与闪电这种极壮观的放电现象类似，人们在给空气稀薄的玻璃容器通电时也能看到电闪光。对后者这种较易控制的放电现象的科学研究始于18世纪初。19世纪中叶，真空技术有了很大提高，人们发明了高效真空泵，并制做了低压气体放电管。利用高效真空泵，能将玻璃管内的气压降到通常气压的万分之几。从19世纪50年代末期开始，就有一些科学家陆续发现了这样一种异常现象：当玻璃管中的气压极低，即管内空气几乎被抽光时，管内绝大部分部位的辉光反而消失，仅在连接负电极即阴极的管内金属板附近的管壁上有辉光点，光点的位置似乎同正电极即阳极的位置无关。好象有什么东西从阴极跑出来，穿过管内虚空，撞到玻璃管壁上，最后被阳极吸附。有人给这种东西取名为“阴极射线”。

在原子学说和法拉第电解定律确立后，人们便设想，就象物质是由原子组成的一样，电也是由最小的电微粒组成的，每个电微粒带有一

个元电荷。就此设想,1874年英籍爱尔兰人斯通尼提出了电原子说。他用电化当量值除以阿佛伽德罗常数,从而估计出元电荷的值,并将这种元电荷命名为电子。当阴极射线这一神秘现象被发现以后,有人认为这种射线是“物质的第四态”或“超气态物质”。汤姆逊在1881年提出这样的看法:“在真空管中的阴极射线是带负电的微粒子,玻璃发光的原因,是这种微粒子以极大的动能冲击管壁所致”。根据电场和磁场能使带电粒子的飞行方向偏转的道理,汤姆逊于1897年证实了阴极射线果然带负电,并且测定了它的质量与电荷的比值。汤姆逊认为:“在阴极射线里物质处于一种新的状态,在这里物质远比在气体状态分割得更细;所有物质,包括不同来源、例如氢、氧等派生的物质,在此状态下都是同一种;这种物质是一切化学元素的构成材料”。汤姆逊始称阴极射线粒子为“微粒”,并依斯通尼的叫法称这种微粒所带的电荷为“电子”。大约10年后,这种微粒的基本粒子的实在性已被广为接受,物理学家们开始把这种粒子本身叫作电子。

电子,是人类认识的第一个基本粒子。它不仅使道尔顿的化学原子显示出了物理上的实在性,更使人类的智力活动空前地跃进!

电子被发现以后,人们自然想到了原子的结构问题。原子是不带电即电中性的,而电子带负电荷,显然,原子中必定含有带正电荷的物质。这种带正电荷的物质是什么东西,正、负电荷在原子中是怎样分布的呢?

英国曼彻斯特大学的卢瑟福及其合作者通过用阿尔法粒子轰击金属薄膜的实验,回答了原子中的物质和电荷的分布问题,并且为处理这类问题提供了非常有用的实验方法。他们用高能天然放射性粒子对准很薄的金属箔,从这些子弹飞过金属箔时的偏转情况来推断金属原子中电荷的分布。在实验中他们发现了意外的情况:有些子弹射到靶上后被弹开了,有的甚至反弹回来。卢瑟福惊叫道:“这在我的一生中的确是最不可思议的事件。就象你对一张薄薄的纸发射一颗15英寸的炮弹,而这炮弹

可以弹回来打你一样不可思议。”惊诧之余,卢瑟福终于悟出了其中的奥秘,从而知道了原子象个什么以及怎样解释阿尔法粒子的大偏转。他得出了这样的结论:原子中含有又小又重、带正电的原子核,电子象行星一样环绕着原子核。

1911年,卢瑟福在曼彻斯特文学和哲学学会上宣读了关于原子结构的论文。正是在这同一讲坛上,道尔顿曾于1803年报告过原子研究的成果。从原子到原子核,人类的认识历经百余年。

三、原子核的结构

卢瑟福提出的关于原子结构的行星模型,使物理学的传统观念和经典理论暴露出适用范围上的局限性,导致了20世纪20年代量子力学的建立和发展。这门描述微观世界的学科能在短短的几年中崛起,使20年代被誉为近代物理学的辉煌年代。与量子力学的辉煌相比,在这个时期人们对原子核的了解就显得太少。

发现原子核以后的20年中,人们对核的认识只到这一步:所有元素的原子核都是由氢原子核(后来称为质子)和电子组成的。例如,氦原子的原子量为4,原子序数为2,所以它的核(阿尔法粒子)被设想为由4个质子和2个电子所组成,这就得知氦核的电荷为2个电荷单位。

为了准确了解原子核的结构,必须打碎原子核,然后看它变成什么。卢瑟福于1917年首先实现核的分裂。当年他在曼彻斯特对人说:“我正在从事一些实验,它们暗示可以用人工方法分裂原子核。”他最早实现的人工核反应过程是氮核的分裂。这是用阿尔法粒子轰击氮的原子核而敲出质子。这表明质子是构成氮核的一个成分。在此之前,人们早就发现有些原子核能发射贝塔射线(即电子)。基于这两点,人们普遍认为原子核是由质子和电子构成的。卢瑟福1920年在英国皇家学会的演讲中,对许多新型的原子核作了猜测,并想象它们全是由质子和电子组成的。为了解释原子核的质量数与电荷数不等的事实,他猜测在原子核中可能存在

着与质子质量差不多的中性粒子。这种中性粒子仍被想象为一个质子和一个电子的复合物。为什么原子内的电子有的被紧紧束缚在很小的核内，而有的则在核外颇有活动余地的轨道上旋转？上述核结构必然要引发的这个问题，历经多年无人作答。

1929年玻特和贝克用高速阿尔法粒子轰击铍和其它轻元素时，发现有一种穿透力极强的辐射产生，这种辐射比早先卢瑟福研究过的来自核蜕变的质子的穿透力大得多。他们没弄清这种辐射物到底是什么，以为是象光、X射线或(γ)射线一样的东西。约里奥-居里夫妇对铍核释放的能量作了计算，发现这种电磁辐射的能量竟比阿尔法粒子所携带的能量大10倍。这使他们大为惊诧，甚至怀疑起能量守恒定律来了。

1932年，卢瑟福的学生查德威克着手研究铍的射线。他很快就发现，如果铍发出的射线不是象光一类的电磁辐射，而是质量与质子相当的粒子的话，实验中的一些疑难问题便不复存在。查德威克马上就公布了他的发现，用人们早就知道的名字“中子”来称呼这种中性粒子。也象卢瑟福一样，他认为中子是质子加电子的复合粒子，而不是基本粒子。

查德威克虽然发现了中子，却没有推测中子在核结构中充当什么角色。这个问题立即被德国理论物理学家海森堡和苏联物理学家伊凡宁科解决了。他们各自撰文提出原子核由质子和中子组成的假说，两人的论文都于1932年发表。当时，海森堡依旧认为中子是复合粒子，所以，原子核的最终组分仍被认作质子和电子。

认为中子应该是个基本粒子的物理学家，最早的可能要数海特勒和赫兹伯格。1929年，他们都是25岁，在研究双原子分子的光谱时，发现这种光谱与原子核中所含基本粒子数的奇偶性紧密相关。若将中子视为质子和电子的复合物，这种粒子数规则便与一些分子光谱相矛盾；若将中子也看作象质子和电子一样的基本粒子，矛盾就不出现。这两个人的工作，查德威克在发现中子时是知晓的，却未予重视。

简而言之，中子被视为原子核的组分成员之一，是在1932年；而成为普遍认可的基本粒子家族中的一个成员，可能延至1934年抑或1936年。也只是这个时候，物理学家们靠集体的智慧，终于穿越了谬误与真理之间的似乎很短的距离，对原子核的结构有了正确的认识。

四、物质的基元——夸克

物理学家们认识原子核的结构之后，便知道通常物质是由电子、质子和中子构成的，并且知道光子是传递电磁力的媒介粒子。20世纪30年代初期，人们普遍认为这4种粒子是基本的，即它们不是由更小的基元构成的。

人们从事科学研究的最根本的目的，是想找到支配复杂的大自然的最基本的原理，并期望它简单明了。因此，当科学家们发现意料之外的情况时，往往是不情愿的。宁可将中子看作复合粒子，而迟迟不愿增加一个基本粒子数。尽量简明化的企图，可能是导致这一实例的诸多因素之一。然而，科学家们又是最能正视现实的，哪怕是残酷的现实也敢于接受。这正是科学精神的一部分精华。

4种基本粒子的图像尚在构画之中，新的基本粒子的不断出现便破坏了这一简单的画面。人们先后从宇宙线中发现了电子的反粒子即正电子、缪(μ)子、派(π)介子和一些奇异粒子。40年代中期之后，打碎基本粒子的有力工具——粒子加速器一台接一台地建成了。物理学家们从而能在实验室里用人工方法制造基本粒子的反应过程。从1953年发现反中微子起，陆续发现了反质子、中微子、反中子、反西格马负超子、多种介子，以及很多基本粒子的变种（术语称共振态）。到1961年，基本粒子表里就列有一百多种粒子。这些粒子，除了质子和反质子、电子和正电子、中微子和反中微子、光子之外，余下都是不稳定粒子。不稳定的意思，是指这些粒子存在的时间很短。例如自由（指不被束缚在核内）中子的寿命要算长的，也不过887秒，缪介子的寿命为 10^{-6} 秒，中性派介子只有 10^{-16} 秒。这些短命粒子一般是在稳定粒子的碰撞中产生的，产生后转瞬就变成别种粒子。

人们最初以为基本粒子的质量特征与其它性质有密切联系,于是按质量大小给它们分为三类并给每类一个统称,质量大的叫重子,例如质子和中子;质量小的叫轻子,例如电子和无质量的中微子;大小介于二者之间的叫介子,例如派介子。后来发现粒子的一些主要性质并不依赖质量,该划在轻子一类的粒子竟比某些重子的质量还大,人们虽然还沿用原来的称谓,但对老名称的字面意思已不在意。

1949年,费米和杨振宁就提出核子(质子和中子的统称)有结构的费米-杨模型。随着基本粒子数目的增多,物理学家们逐渐意识到,“基本粒子”尤其是重子和介子,并不是理想的基本单元,先后提出了关于基本粒子结构的多种模式。1964年,美国物理学家盖尔曼和茨韦格各自独立地提出了三夸克模型,认为重子和介子都是由夸克组成的。

根据已知粒子的一些固有属性来推测,夸克必须具备一些奇怪的特性。组成一个重子需要3个夸克,组成一个介子需要一个夸克和一个反夸克。为了使重子具有正确的电荷数,夸克必须携带 $1/3$ 或 $2/3$ 个电子电荷单位,简单地说,是带分数电荷。

这种强子(通过强力发生作用的粒子即重子和介子的统称)结构的夸克模型,到底是一种数学工具,还是对客观世界的真实描写?很长时间内人们一直疑惑不解。兹韦格曾在80年代初的一个报告中写道:“理论物理学大家庭对这个模型的反应总的来说是不友善的……作为核民主国公民的强子,是由带分数量子数的基本粒子组成,这个想法似乎有点荒唐可笑,但是,这个想法显然是对的。”

中国北京基本粒子物理理论组从物质结构的角度来看待夸克,认为它们是物质结构的一个层次,于是在1966年提出了层子模型并构造了相对论性协变的层子模型理论。

在夸克模型的发展中人们发现,必须给每种夸克加上“红”、“绿”、“蓝”3种“颜色”标记(或说量子数),否则在构造某些强子时必违反量子力学中的一个基本原理——泡利不相容原

理。值得称道的是,早在1966年,中国科技大学刘耀阳教授就在《原子能》杂志上提出了类似的想法*。

在夸克模型建立之初,只需要3种夸克即上夸克(u)、下夸克(d)和奇异夸克(s),就足以构造当时所发现的所有强子。70年代理论和实验上的深入研究表明,应该存在6种夸克,除了以前的3种外,还应该有粲夸克(c)、底夸克(b)和顶夸克(t)。

寻找单个夸克的实验的失败,使人们了解到夸克的另一新奇之点:夸克只能作为强子的组分存在于强子内部,它们本身却没有单独存在的自由。换言之,夸克总是被两个一起或三个一群地囚禁在强子樊笼中!这是与构成原子和原子核的组分粒子的境遇大不相同的地方。

既然不能直接看到单个夸克,物理学家们就根据高能粒子的相互作用及转化情况,来寻找夸克存在的证据,从而间接地发现夸克。1969年,美国斯坦福直线加速器中心进行了考察质子和中子的内部情况的第一批实验。用接近光速的电子轰击氢靶中的质子,实验数据证实了质子内部的小硬点(部分子)带的电荷正好是夸克的分数电荷。1973年前后,从西欧核子中心嘎嘎麦尔(Gargamelle)气泡室用高能中微子轰击质子的实验所获得的结果,与上述电子实验的结果一致。根据这些证据,再考虑到由上夸克、下夸克和奇异夸克的两夸克态或三夸克态构成的粒子已在普通物质或宇宙线中多有发现,所以这三种夸克的存在至此已毋庸置疑。然而,对于粲夸克、底夸克和顶夸克,它们不会在普通物质里出现,只能在高能物理实验中产生可能包含它们的束缚态粒子。因此,寻找这3种夸克的过程是艰难而又漫长的。尽管是大海捞针,物理学家们还是凭着持之以恒的求索精神,历经21年,终于将它们一一发现。1974年,美国布鲁克海文实验室的丁肇中实验组和斯坦

(下转第9页)

* 见《高能物理》编辑部汇编、经谢治成、黄涛审定、1985年由科学出版社出版的《基本粒子物理发展史年表》第38页。

到迅速发展。巴克拉 (C. G. Barkla) 发现 X 射线被元素散射会产生次级 X 射线辐射。塞格巴恩 (K. M. G. Siegbahn) 确定了各种元素的特征 X 射线谱, 出版了《X 射线光谱学》一书, 开创了 X 射线光谱学和元素的 X 射线分析新领域。为此他们先后荣获 1917 年及 1924 年诺贝尔物理学奖。

X 射线晶体结构分析技术和理论的发展, 还导致了结构化学发生革命性的进展。鲍林 (L. Pauling) 领导的小组测定了一系列氨基酸和肽的晶体结构, 总结出形成多肽链构型的基本原则。为此鲍林荣获 1954 年诺贝尔化学奖。霍季金 (D. Hodgkin) 领导的小组测定了一系列重要的生物化学物质的晶体结构, 其中包括青霉素和维生素 B₁₂。为此她荣获 1964 年诺贝尔化学奖。李普斯康布 (W. N. Lipscomb) 研究硼烷结构化学的工作获得了 1975 年的诺贝尔化学奖。

X 射线的发现对生物学也产生深远的影响。1927 年马勒 (H. J. Muller) 用 X 射线人工诱发果蝇突变, 开辟了遗传学研究和实际应用的新领域, 为此他荣获 1946 年诺贝尔生理学医学奖。脱氧核糖核酸 (DNA) 是重要的生命基础物质, 1953 年克里克 (F. H. Crick) 等人根据 DNA 晶体的 X 射线衍射实验结果, 建立了 DNA 分子螺旋结构, 把遗传学的研究推进到分子的水平。为此他们荣获 1962 年诺贝尔生理学医学奖。随后不久, 霍利 (R. Holley) 等人根据 DNA 的双螺旋结构, 破译了其上的遗传密码, 为此他们荣获 1968 年诺贝尔生理学医学奖, DNA 结构的发现和遗传密码的破译, 标志着分子生物学的诞生, 是人类揭开生命

(上接第 7 页)

福实验室的里克特实验组各自独立地发现了节-筛 (J/ψ) 粒子 (cc̄), 从而证实了粲夸克的存在。1977 年美国费米实验室的莱德曼实验组发现了宇普西隆介子 (bb̄), 从而表明了底夸克的存在。直到 1994 年 4 月, 费米实验室才宣布该实验室的 CDF 组观察到了顶夸克存在的实验证据, 出于审慎, 没有用“发现”一词。到了

之谜的一个里程碑。

蛋白质结构的测定是分子生物学发展史上具有划时代意义的成就。应用 X 射线衍射分析方法测定肌红蛋白和白红蛋白晶体结构的工作始于 30 年代, 前后 20 多年牵涉众多科学家, 终于在 1960 年被测定出来, 在实验技术和分析理论上都有新的突破。作为代表人物, 肯德鲁 (J. C. Kendrew) 和佩鲁茨 (M. F. Perutz) 荣获 1962 年诺贝尔化学奖。在他们两人之后, 由于测定蛋白质晶体结构而获诺贝尔奖的还有美国的德森霍弗 (J. Deisenhofer) 和德国的胡贝尔 (R. Huber) 及米歇尔 (H. Michel), 他们测定了光合作用中心的三维结构而荣获 1988 年诺贝尔化学奖。

X 射线的发现和广泛应用, 推动了科学技术革命性的进展, 开拓了新的技术领域。今天, X 射线光刻技术、X 射线显微技术、X 射线层析成像技术和 X 射线激光等技术在微电子、光电子、材料科学和医学等领域发挥着重要作用, 特别是 X 射线层析成像技术, 实现了三维立体成像, 为此科马 (A. Koma) 和豪恩斯费耳德 (C. Haunsfelder) 共享了 1979 年诺贝尔生理学医学奖。

站在历史的长河上, 回望 X 射线的发现及其应用的发展, 它对科学技术的发展以及人类社会的进步影响是极其深刻的。100 年前人们称它为未被认识的射线, 100 年后的今天, 它已被广泛地应用于自然科学和国民经济的各个领域, 为科学技术和人类社会的发展作出重要贡献。在科学技术高度发达, 各学科相互渗透、相互促进的今天, 面对 21 世纪的挑战, 可以预言, X 射线将有更加辉煌灿烂的未来。

1995 年 3 月, CDF 组找到了更多的证据, 并且另一实验组 D0 组用不同的方法也找到了顶夸克的衰变事例, 于是宣布了顶夸克的发现这一重大成果。

至此, 把轻子和夸克放在同一层次上, 并将它们看作物质结构的基元, 已成为科学界普遍接受的现代观念。