



物质微观结构的 现代观念

杜东生

(中国科学院高能物理研究所)

人类对物质微观结构的研究经历了许多世纪的艰苦努力,直到19世纪初才真正弄清了原子的内部构造。此后,经过一代又一代科学家的科学实验,对物质微观结构的认识从一个层次深入另一个层次,却始终没有找到物质微观结构的最小单元。

(一) 从原子到“基本粒子”

中国古代的哲学家早就提出世间万物都是由“金、木、水、火、土”五种物质构成的学说。古希腊的哲学家却也出了“原子”的概念,认为世间万物均由原子构成,原子是物质微观结构的最小单元。“原子”在希腊语中是“不可再分割”的意思。

古希腊哲学家的这一卓越的哲学思想被近代的化学和物理的科学实验证实了。近代的科学实验表明,世间万物都是由分子、原子组成的。分子是保持物质化学性质的最小单元,而分子又由一种或多种原子组成。原子是化学元素的最小单元。现在已知的元素有一百多种。

原子还有没有更深层次的结构呢?换句话说,原子还能不能再分割呢?

19世纪初,英国物理学家卢瑟福用 α 粒子轰击金属箔靶,发现原子中心有一个很小的核,电子在核外绕着核运动。此后许多科学家对各种不同的原子进行了研究。结果表明,各种原子的半径虽有不同,但均为 10^{-8} 厘米的量级。而原子核的半径要比原子半径小一万倍,约为 10^{-12} 厘米。原子的重量几乎完全集中在原子核上。原子实际上是一个很松散的集合体。要想把一个电子从原子中剥离出来,平均只花费约10个电子伏特的能量。我们称这个能量为

电子在原子中的平均结合能。电子的质量为 0.511×10^6 电子伏。所以电子的结合能比其质量要小得多。对于描述电子在原子中的运动和原子的性质,我们已有了完整的理论,即量子力学。支配原子内电子与原子核相互作用的是电磁相互作用。利用微扰论和多体计算技术及大型计算机,原则上可以预言原子的一切物理性质和分子的化学结构。我们统称描述原子动力学规律的理论为原子物理。固体物理、激光、收音机、半导体及电视等等都建筑在原子物理基础之上。原子物理的发展使社会生产力产生了突飞猛进的发展,改变了人类的生活。由于分割原子需要的能量很低,也可把原子物理叫低能物理。

原子分割为电子和原子核。原子核能不能再分割呢?19世纪30年代,中子首先被查德威克发现。中子不带电,但和质子(氢的原子核)有几乎相同的质量。此后不久海森堡和伊凡宁柯分别独立地提出原子核是由质子和中子构成的设想。这一设想很快被实验证实。氢的原子核是最简单的,只有一个质子。氦原子的核由两个质子和两个中子组成。不同元素的原子核是由不同数目的质子和中子组成的。原子核内质子和中子靠强大的核力紧密地束缚在一起。要想把一个质子或中子从核内分割出来平均需要花费10兆电子伏的能量,比分离出一个电子要大一百万倍。可见研究原子核的性质要比研究原子困难得多。量子力学仍然可以用来描述原子核,但微扰论的计算方法已不能用,因核力太强大了。虽然原子核理论已有重要的发展,但至今仍不完善。随着研究原子核性质的理论与实验的发展,原子核物理也日趋成熟。

纵然不完善，也已对国民经济各部门产生了巨大的影响。原子弹、氢弹、原子能发电，核医学等等都是建筑在原子核物理基础上的。

质子、中子能否再分呢？60多年前，我们已发现了质子、中子、电子等粒子。后来又在宇宙线中发现了 μ 子。人们以为这些粒子是构成各种物质的基本单元，统称为“基本粒子”。基本之意即不可分也！随着加速器的建造成功，在实验室内又陆续发现了一系列新的基本粒子，如 π 介子、K介子，各种超子 Λ ， Σ ， Ξ 等等，还发现了许多短寿命的共振态。总数上百种。人们自然联想到元素的门捷列夫周期表。一百多种元素实际上只用质子、中子、电子三种粒子按一定的规则就可构成。那么，这上百种“基本粒子”是基本的吗？会不会出现与门捷列夫周期表类似的情况？

(二) 质子、中子都是可分的

1961年美国斯坦福大学霍夫斯塔特用高能电子(40兆电子伏以上，其相应的康普顿波长约为 10^{-13} 厘米)轰击氢和氦核来观察电子与质子或中子的弹性散射。实验结果表明，质子和中子都不是点粒子，它们的电荷和磁矩是分布在尺度大约为 10^{-13} 厘米的有限的空间范围内。这一结果是令人震惊的。它表明，质子和中子这两种基本粒子都是可以再分的，它们仍有更深层次的内部结构。质子和中子等是由什么更小的粒子构成的呢？已有的上百种基本粒子能否象元素周期表一样排出个次序呢？这一问题在60年代初有了一个正确的解答。

(三) 强子的夸克模型

上百种的“基本粒子”中多数是参与强相互作用的(质子和中子就是靠这种作用结合成原子核)。我们称这些粒子为强子。质子、中子、介子、超子等都是强子。1963年美国物理学家盖尔曼提出一个假设，认为所有强子都是由u, d, s三种夸克构成的。这三种夸克又可称作“上”、“下”、“奇异”夸克。它们构成SU(3)群的基底。它们的电荷有点怪，是分数电荷。三种夸克的电荷分别为质子电荷的 $2/3$ ， $-1/3$ ， $-1/3$ 倍。利用SU(3)的数学性质可用夸克

及其反夸克把已有的上百种的强子结构排成一个表(类似于门捷列夫周期表)并可预言各类强子的质量。例如，质子是由两个u夸克和一个d夸克组成，而中子是由两个d夸克和一个u夸克组成。 π^+ 介子由一个u夸克和一个反d夸克(用 \bar{d} 表示)构成，而 K^+ 介子由u和 \bar{s} (反s夸克)构成(见图1)。

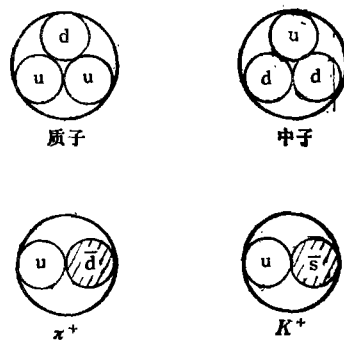


图1 质子、中子， π^+ ， K^+ 的夸克组成

夸克模型预言了 Ω^- 粒子(由三个s夸克构成)的存在，且预言其质量为1670兆电子伏。后来实验上很快找到了这个粒子，并且测得其质量为 1672.45 ± 0.29 兆电子伏，与理论完全一致。此后的许多实验都证明了夸克模型是正确的。上百种基本粒子也按其夸克构成排列得井井有条。人们一时满足于夸克模型的巨大成功。

这种满足很快被打破了。1974年丁肇中和里克特两人分别独立地发现了一种新的长寿命的重介子J(或 ψ)粒子。它的质量约为质子质量的3倍，寿命却比普通矢量介子长得多。用已有的三种夸克及其反粒子来解释它是根本不可能的，唯一的出路是假定有一种新的重夸克存在，我们称之为粲夸克，用字母c表示。J/ ψ 粒子是c夸克及其反粒子的束缚态(cc \bar{c})新的假设可圆满解释J/ ψ 粒子的性质，使已知的夸克种类上升为4种。好景不长，1977年莱德曼在费米实验室又发现了一个更重的长寿命介子Y，其质量约为质子的10倍。类似地，要想解释Y介子的特性，必须承认有第五种夸克的存在。这第五种夸克被命名为“底”夸克，用

字母 b 表示。Y 是 (b \bar{b}) 束缚态。

理论和实验研究表明，第六种夸克是必然存在的，我们称之为“顶”夸克或 t 夸克。1994 年费米实验室不仅证实了 t 夸克的存在并测出了它的质量为质子的 170 倍。至此，我们已有了六种不同的夸克，分别用 u, d, s, c, b, t 表示。我们称有六种不同“味”的夸克。“味”是一种自由度。要想解释实验，夸克只有“味”是不够的。每种“味”的夸克还必须要有三种不同的颜色的夸克与之对应，它们质量相同，但色不同。实际上是三种不同的夸克。例如，只有有三种不同的色，才能正确解释 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 衰变率和 $e^+e^- \rightarrow$ 强子与 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 截面比值。当然还有别的一些理由支持三种色。这样一来，夸克实为 18 种。这样虽然比初期的三种夸克多了不少，但能解释上百种强子，还是十分令人满意的。

(四) 部分子模型

1967 年美国斯坦福加速器中心用 20 GeV (二百亿电子伏) 的高能电子轰击质子和中子 (实验上用氢或氘核作靶) 来观测电子的非弹性散射。这种高能量的电子的康普顿波长约为 10^{-15} 厘米，因而可以探测到质子内部更细微的结构 (注意质子半径在 10^{-13} 厘米的量级)。电子散射过程的费曼图如图 2 所示。

这一过程的双微分散射截面可写成：

$$\frac{d^2\sigma}{dq^2 d\nu} = \frac{4\pi\alpha^2}{q^4} \frac{E'}{E\nu} \left[F_2(\nu, q^2) \cos^2(\theta/2) + \frac{2\nu}{M} F_1(\nu, q^2) \sin^2(\theta/2) \right]$$

其中 q 为动量转移， E 和 E' 分别为入射电子和出射电子的能量， $\nu = E - E'$ ， M 为质子质量， θ 为电子的散射角。 F_1, F_2 为描述质子结构的函数。实验结果出乎人们的意料之外： $F_2(\nu, q^2)$ 并不象在低

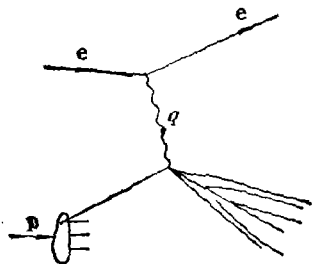


图 2 电子在质子上的非弹性散射

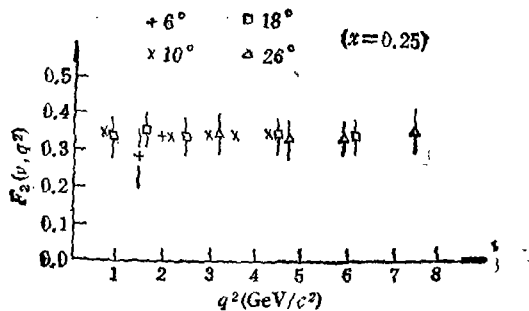


图 3 $F_2(\nu, q^2)$ 的实验值

能电子 (400 兆电子伏) 弹性散射实验中那样随 q^2 上升而迅速下降。相反，它随 q^2 的上升而基本不变，即保持常数。

图 3 是实验的部分结果。

图 3 的实验数据表明， $F_2(\nu, q^2)$ 只依赖于一个参量 $x = q^2/2M\nu$ 。即

$$F_2(\nu, q^2) = F_2(q^2/2M\nu) = F_2(x)$$

图 3 给出的是 $x = 0.25$ 时的实验点。

美国物理学家标肯提出了无标度性假设，即当 $q^2 \rightarrow \infty, \nu \rightarrow \infty$ 但 $x = q^2/2M\nu$ 有限时， $F_2(\nu, q^2)$ 由两个变量的函数退化为一个无标度 (无量纲) 的变量 x 的函数。

上面的实验结果如何解释呢？1969 年诺贝尔奖得主费曼提出了部分子模型。按照这个模型，质子内部有许许多多的部分子 (parton)，它们是带电的，自旋为 $1/2$ ，且基本上在质子内

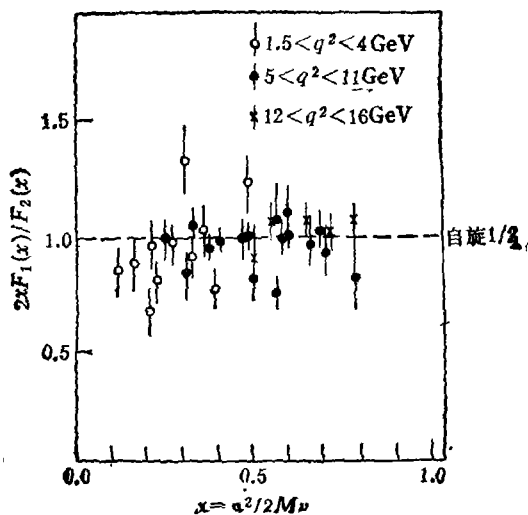


图 4 $2 * F_1(x)$ 与 $F_2(x)$ 之比值测量值

是自由运动即所谓的“渐近自由”。这个模型可圆满地解释上面的实验结果.并且预言:

$$F_2(x) = 2xF_1(x).$$

图 4 所示的实验结果证实了这一预言.

按照部分子模型,质子的内部构造如图 5 所示,图中小点代表自旋 1/2 的点电荷.

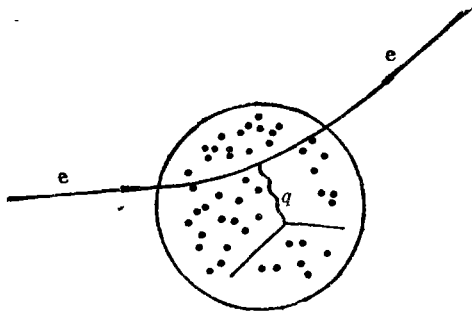


图 5 质子的部分子结构

(五) 量子色动力学,夸克模型和部分子模型的统一

按夸克模型质子是由三个夸克组成的.但按部分子模型质子内又包含无穷多的自旋 1/2 的自由点电荷粒子.这两个模型不是相互矛盾吗?

其实不然.夸克模型的图像是建筑在低能实验的基础之上的.发现质子有大小电子质子弹性散射的实验中电子能量只有 400 兆电子伏.质子中的三个夸克被称为“价夸克”.在电子质子深度非弹性散射实验中,入射电子能量提高了 100 倍,为 200 亿电子伏.这样高的能量下质子内部除了三个价夸克外还会激发出无穷多的正反夸克对.所以这两种图像对应着实验上两种不同的能量,实际上是质子在不同探测能量下的不同表现而已.1974 年美国三位物理学家泡利泽、哥绕斯和韦尔切克提出了量子色动力学理论来描述强相互作用.这个理论认为夸克之间通过交换八种不带电的无质量胶子相互作用.其耦合常数是随动量转移的大小而变化的,即

$$\frac{g^2}{4\pi} = \alpha_s(q^2) = \frac{4\pi}{\left(11 - \frac{2}{3}n_f\right) \ln(q^2/\Lambda^2)} \xrightarrow{q^2 \rightarrow \infty} 0$$

其中 n_f 是费米子“味”的个数.这一理论预言,

能量增高时强相互作用越来越弱,最后趋于零.这就解释了为什么高能电子看到的是质子内部自由运动的夸克.胶子中性,所以电子与它无相互作用,因此看不见.在高能下胶子可转化为正反夸克对,正反夸克对也可湮灭为胶子.这样一来,量子色动力学(简称 QCD)可圆满统一地解释强子的夸克模型和部分子模型.

按量子色动力学也可计算结构函数 $F_2(\nu, q^2)$, 结果发现 $F_2(\nu, q^2)$ 可写成 $F_2(x, q^2)$, 除了 x 之外还对 q^2 有微小的依赖性,即与 $F_2(x)$ 有小的偏离.后来的仔细的实验测量的确证实了这种小的偏离.我们称之为“无标度性的破坏”.

(六) 弱电统一和大统一

实验上早就发现电磁作用和弱作用过程有着某种微妙的联系.但真正发现弱作用和电磁作用可以用非阿贝尔规范场理论统一描述还是本世纪 70 年代初期的事.格拉肖、温伯格和萨拉姆三人首先提出用 $SU(2) \times U(1)$ 的规范理论来统一描述弱作用和电磁作用,取得了巨大成功.理论中预言的传递弱作用的粒子 W^\pm 和 Z^0 都相继被发现.至今一切实验都支持弱电统一理论的正确性.在这一理论中,夸克和轻子分成三代(三个家族),即

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

这三个家族弱电相互作用的性质类似,但质量却相差很远.

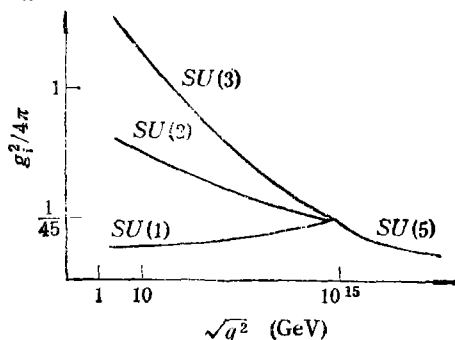


图 6 耦合常数的演化 ($SU(5)$ 大统一)

前面说到,量子色动力学是 $SU(3)$ 规范理论。目前的实验也支持这一理论的适用性。所以,对弱、电、强三种相互作用我们已有了所谓的“标准模型”,即 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的规范理论。

既然弱、电统一取得了巨大成功,人们自然要问,能否把强作用也统一进来组成大统一?美国哈佛大学两位物理学家乔治和格拉肖提出 $SU(5)$ 规范理论统一描述弱、电、强三种相互作用。其耦合常数随能量变化曲线见图 6。在极高能量下 ($>10^{15}$ GeV, $1 \text{ GeV} = 1000$ 兆电子伏)只有一种相互作用,即弱、电、强三种力统一成一种。在低于 10^{15} GeV 时三种作用力分开了,它们的变化可用重整化群方程描写。在这种统一之下,夸克和轻子可以互相转化,因而质子也是不稳定的,其寿命在 10^{32} 年左右。最近的实验排除了 $SU(5)$ 最小大统一模型的可能性。因实验测得,质子衰变到正电子和 π^0 的分寿命已超过 10^{32} 年。但是把 $SU(5)$ 稍加扩充即不再局限在最小 $SU(5)$ 模型,则上述困难可以克服。大统一究竟对不对还有待进一步的研究。当然人们自然会问,为什么不把引力也统一进来而形成四种相互作用力的统一?科学家们确也尝试了,这就是统一宇宙间四种作用力的超弦理论。这种理论还处于发展之中,对错还难以下结论。

(七) 希格斯粒子之谜

粒子质量的起源已成千古之谜。夸克和轻子的质量,规范粒子的质量是哪里来的?在弱电统一和大统一理论中粒子的质量均起源于真空的自发破缺。其核心部分是要引入所谓希格斯粒子。希格斯粒子非零真空期望值把我们现在的真空与其它可能的真空区分开。按照标准的弱电统一理论,至少存在一个中性的希格斯粒子,其质量理论上没有确定的预言。目前世界各国许多实验都在寻找希格斯粒子,并且已经预言希格斯粒子如果存在,其质量应大于 60 GeV 。

希格斯粒子至今没有找到,也许它根本不是一个基本的粒子,而是一个重夸克和其反

粒子的凝聚态,也许是别的什么束缚态。鉴于希格斯的存在与真空的性质有密切关系,而“真空”又是极其复杂的,它的寻找就带上了一些神秘的色彩。究竟希格斯是什么,这个谜还有待揭开。

(八) 夸克和轻子还会有更深的结构

上面看到,要研究质子的内部构造,我们至少要用 400 兆电子伏的电子来轰击质子。发现质子内有部分子的实验用的电子“炮弹”能量高达 200 亿电子伏。可见要探索基本粒子相互作用相互转化及其内部构造需要更高的能量,至少要 100 兆电子伏以上的能量。由于花费的能量如此之高,我们便称研究基本粒子结构及其性质的学科为“高能物理”。现在我们已经阐明,比基本粒子更深的层次是夸克和轻子。夸克和轻子能再分吗?现代的高能加速器已可以把电子或质子加速到极高的能量,其相应的康普顿波长已小到 10^{-19} — 10^{-22} 厘米,因而可以探测到更小的空间尺度。虽然目前还没有在实验上发现任何夸克和轻子内部结构的迹象,但从以往的历史可以肯定,夸克和轻子也绝不可能是物质微观结构的最小单元。夸克和轻子必有更深层次的结构。有些理论家已给夸克轻子下一层次的单元起名为“前子”或“亚夸克”。不管什么名字,其实体应当是存在的。我们相信不久的将来能证实它们的存在。顺便指出,物质往深层次的不断分割并不是简单地重复。原子的类似太阳系的结构到原子核已不复存在。到了夸克层次更有新特点。夸克至今没有被单个地观测到。把质子打碎后看到的不是夸克,而是夸克强子化后的各种介子,核子和共振态。质子的碎片与质子本身一样大。这就是新特点。谁会知道“亚夸克”会是什么样呢?

(九) 结语

人类对物质微观结构的研究走过了漫长的道路,简单地说可用下面的图示:

原子 → 原子核 → 质子、中子、介子等
→ 夸克和轻子 → 前子 → ……

每深一个层次便产生了相应的物理学。

(下转第 28 页)



太阳中微子之谜可能得解

苏中启 译

近来,欧洲核子研究中心(CERN)一位研究人员道格拉斯·莫里森指出,过去25年来一直使物理学家感到困惑的太阳中微子之谜可能得到解决,他认为,实验与理论之间的一致可以归结为实验误差及有关太阳活动理论的不适当。从前,以陆上为基地的实验测得的来自太阳的中微子数量要比由太阳内部活动理论预言的少。但是,正如莫里森指出的,近来理论预言的中微子数量已经下降(理论家仍在争论究竟谁的理论是正确的),与此同时,实验测得的中微子数量却在增加,莫里森说,尽管两组数字并不完全一致,但目前它们仍处于相互的误差范围内。莫里森指出,某些实验,包括由雷蒙德·戴维斯在美国南达科他洲金矿采用以氦为基础的探测器所完成的经典实验,表现为典型的“学习曲线”。最初,由于实验困难导致曲线低计数;近来,由于实验变得比较可靠而使曲线呈现出较高的计数。莫里森说,实验所采用的向上追溯许多年的中微子计数率平均值是错误的,因为它包含了早期不可靠的数据。诚然,氦实验是运转时间最长的中微子探测器,但它仅能探测高能中微子。在太阳内部反应中产生的这些高能中微子,包括硼-8,仅占太阳中微子总量的0.3%。除了实验的不确定性——莫里森眼中的实验不确定性要比某些研究人员所承认的要大——之外,这些实验室新的实验导致的

结果之一是对硼-8反应率的估计变得更小。总的说来,莫里森宣称,较近时期一批氦实验数据与由他所认为的最好太阳模型作出的预言是一致的,它提供了合理水平的统计置信度(在两个标准偏差之内),来自日本Kamiokande实验的数据与理论的符合程度甚至要更好一些(在半个标准偏差内)。目前,在理论与两个最近的实验观测(基地设于高加索山脉的SAGE与基地设于意大利的GALLEX,它们均对低能中微子敏感)之间仍不一致。但是,在这一点上,莫里森发现仍是学习曲线效应在起作用,并认为“偏离(三个标准误差)并不是令人非相信不可的”,尽管他对此“接近于感兴趣。”此外,他不赞成那种把自1970年以来,太阳大约以11年为活动周期中的中微子数目的变化全部归因于1986年以前氦实验中存在的问题的看法。莫里森说:“并不是所有的实验结果都正确,”并且“人们发现,当第二代实验完成后,从以前中微子实验中获得的中微子数量经常需要进行实质性的再调整”。莫里森对中微子实验处境的重新评价,导致出现这样一种可能性,即目前的中微子实验结果好到足以告知天体物理学家:他们有关太阳活动的模型中哪个是正确的。莫里森的结论可能不会使这样一些理论家感到满意,因为他们已经建立了一种为寻找太阳中微子难题的其它解释的家庭工业。然而,莫里森的结论可能使其他研究人员得到安慰,使他们相信,也许,我们终于理解了太阳内部发生的过程。

译自英《新科学家》

无尽的,宇宙往小的方面延伸是无限的,物质是无限可分的。

当前宇宙往大的方面延伸也是无限的。近代天文观测已经证实了这一点。

宇宙不论往大,往小都是不可穷尽的。

(上接第13页)

原子物理 → 原子核物理 →
高能物理 → 超高能物理 →
超超高能物理 → ……

由此我们看出,人类对微观世界的认识是无穷