

什么是基本粒子的结构?

倪光炯

(复旦大学)

一、引言

基本粒子有结构吗?现在对这个问题,似乎很少有争论了。确实,对于基本粒子主要是对强子的结构研究,已有二十多年的历史;尤其是各种夸克(“层子”)模型,包括引进不久的c夸克(粲层子)以及各种袋模型,取得了丰硕的成果。尽管如此,大家对现状还是有怀疑的,自由夸克为什么在实验上始终找不到呢?为了把这种夸克的“禁闭性”纳入理论,人们作了各种各样的努力,方案繁多,但似乎都还不能令人信服地证明这一点。实验最终将对目前各种理论作出判断和抉择。不过我们觉得,夸克的禁闭性以及真空研究的深入是有关联的,这中间似乎存在一种必然的趋势,而对这一点,当我们站得远一些,用非专家的眼光看一下,也许不是没有好处的。

二、历史的启示

上世纪,在自然科学发展的基础上提出来的分子-原子学说,给前此关于物质“不可分性”“不可入性”等观念以一次沉重的打击;但是在新的成就面前,许多人又停下来了,认为原子是“最后质点”,并把原子组成物质看作是简单的数字加法相似的机械集合。为了批判这些错误观点,恩格斯写道:“新的原子论和所有已往的原子论的区别,在于它不主张物质只是非连续的,而主张各个不同阶段的各个非连续的部分……是各种不同的关节点,这些关节点决定一般物质的各种不同的质的存在形式”¹⁾。这里恩格斯特别在“关节点”和“质的”字样下面加上了着重号,这是什么意思呢?

毛泽东同志指出:“事物的性质,主要地是由取得支配地位的矛盾的主要方面所规定的。”²⁾这就是说,事物的质的规定性,决定于它内部的主要矛盾及其主要方面。例如一个氢的分子内部存在着对立斗争着的两个氢原子,这是氢分子内的一对主要矛盾。当把氢分子物质地分开为两个氢原子的时候,它们在分离过程中便发生了变化,最后自由态的氢原子已与原来存在

于氢分子内部的氢原子不同了,相反,两个氢原子组成氢分子时要发生剧烈的斗争,表现为放出结合能4.48电子伏(化学上叫离解能,等于103千卡/克分子)。

一般地说,任何一种分子或原子,处于自由态时和处于束缚态时是不同的,处于不同的束缚态中也是不同的,这样才表现出各种化合物性质以及气、液、固等不同的凝聚态性质,然而无论如何,我们承认原子组成分子,或原子、分子组成各种凝聚态物质时的变化是不大的,因此承认处在束缚态的分子、原子是各凝聚态物质的“结构粒子”,承认原子是分子的“结构粒子”,并不特别强调它们的存在形式与自由态时的区别。换句话说,分子、原子本身的质有其相对的稳定性,而它们各自的质又是由它们各自内部的主要矛盾特别是其主要方面所决定的。因此,分子、原子表现出来的这种稳定性是由于它们结合时的矛盾斗争比起其内部矛盾来说是相对地弱的缘故。

为了叙述的方便我们引进记号(H—H)来表示一个氢分子,它就是化学上的价键结构式。H代表在自由态认识的氢原子,中间线段表示它们的矛盾结合,这样的记号称为氢分子的一个“疏结构”表示。

由以上对物质结构的矛盾分析,立刻得出以下的推理:

(1)“原子决不能被看作简单的东西或已知的最小的实物粒子”³⁾。因为任何物质内部都包含着矛盾,矛盾总是“一分为二”的,从而物质也总是可分的。

(2)原子在分子“复合体”内保持着相对的独立性,它们之间的结合能还不大;但是,在原子这个“复合体”内部,矛盾斗争就更强了,因此从原子中分离出来的粒子的自由态与束缚态的差别就更大,即它们组成原子的结合能将更大了。正因为这样,物质结构才显出层次,分子、原子以及比原子更小的粒子分别表现为这种层次系列中的关节点。

(3)这种情况继续下去,总会到达一个阶段,分离

1) 恩格斯,《自然辩证法》,人民出版社,(1971)269。
2) 《毛泽东选集》(一卷本),人民出版社,(1969)297。
3) 恩格斯,《自然辩证法》,人民出版社,(1971),247。

出来的粒子已经大变特变,谈不上是原来存在于“复合体”内的东西,那时它将失去作为“结构粒子”的意义。也就是说,虽然那时候物质仍然是矛盾地、从而物质地可分的,它们却不再表现为由各种关节点所决定着的相继的层次存在的形式。

那将是一种什么样的存在形式呢?恩格斯紧接前面引文之后,加了一句极为重要的话:“直到失重和排斥的形式”。这里恩格斯预言了两点性质:第一,没有重量;第二,有排斥。第一点的意思我们以后再讨论,第二点就是指矛盾。为此我们再引恩格斯的一段话:“相互作用是事物的真正的终极原因。我们不能追溯到比这个相互作用更远的地方,正是因为它背后没有什么要认识的了”¹⁾。相互作用就是矛盾。所以,恩格斯实际阐明了物质结构就其根本来说乃是一种物质的矛盾结构的思想,并且预见到物质结构系列最后将会出现新的形式,那时层次中止而展现出物质矛盾无限转化的图景。

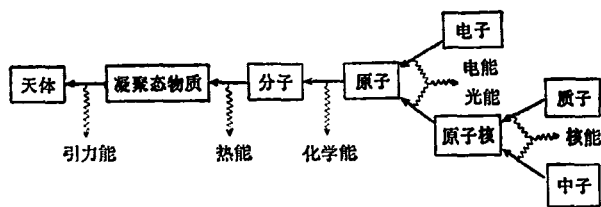


图1 物质结构系列

现在让我们画出图1,看一看一百年来人们在物质结构以及它同各种能量形式的关系方面已经积累了多少知识。

我们看到,电子、原子核、质子和中子继续作为物质结构系列中的关节点出现,层次的存在形式基本上仍然维持着,即把系列中任一环节的右端看成是左端复合体的“结构粒子”,还是相对地有意义的。这是因为:

(1) 结构粒子是复合体内主要矛盾的物质负荷者,即决定着复合体的质;

(2) 它们在复合体内又保持着相对的独立性。

条件(2)可以有一个半定量的判据,就是它们组合复合体时所放出的结合能 B 远小于自身的静能 E_0 : $B \ll E_0$ 。例如水分子 H_2O 凝聚成液态水的结合能可由水的汽化热 540 卡/克来估计,平均每个分子 0.422 eV,较之水的静能简直微不足道;氢原子基态结合能 13.6 eV,仍远小于电子静能 0.51 MeV、中子、质子组成氘核的结合能为 2.225 MeV,中、重核内一个核子的平均结合能级 8 MeV,也都比核子静能 939 MeV 小很多。不过,结合能与静能的相对比值逐步增大了:

水分子组成液态水 (H_2O-H_2O):

$$\frac{0.42 \text{ eV}}{18 \times 939 \text{ MeV}} \sim 2.5 \times 10^{-11};$$

氢原子组成氢分子 ($H-H$):

$$\frac{4.48 \text{ eV}}{939 \text{ MeV}} \sim 4.7 \times 10^{-9};$$

电子和质子组成氢原子 ($p-e$):

$$\frac{13.6 \text{ eV}}{0.51 \text{ MeV}} \sim 2.7 \times 10^{-3}; \quad (2.1)$$

质子和中子组成氘核 ($p-n$):

$$\frac{2.225 \text{ MeV}}{939 \text{ MeV}} \sim 2.4 \times 10^{-3}.$$

然而无论如何,条件(2)还是满足的。因此,我们都分别引进了疏结构表示。一个复合体可以有多种表示,例如氢分子 H_2 ,既可表示成 ($H-H$),也可表示成 (H_2^+-e),或 ($H_2^{++}-2e$),或 (H^-p)。但是,仅当找到一种反映复合体内主要矛盾的疏结构表示时,才算找到了它的结构粒子,因为只有这样,结构粒子内部才在很大程度上(决不是全部)排除了原来存在于复合体内的主要矛盾,而突出了新的主要矛盾。这意味着人们对物质结构的认识进入更深的层次。

三、新的特点

以上分析表明,只要我们承认物质包含着矛盾,那末物质的分割在本质上只能是矛盾的转化过程,由此必然导致物质无限可分的结论;同时也必然导致物质结构有层次但又不可能有无限层次的结论。

目前粒子物理研究中看到的种种迹象,不能不使人认真考虑一下:难道我们已经碰到物质结构层次的底层了吗?

基本粒子世界中最引人注目的特点是:各种粒子间存在着复杂的转化现象;一切粒子都有其对应的反粒子;过程中粒子数一般是不守恒的,但计入正、反粒子区别后的重子数或轻子数则是守恒的。举例说,光子与正、负电子对之间,有如下的相互转化现象:

$$\gamma \xrightarrow{\text{(核旁)}} e^+ + e^-, e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \quad (3.1)$$

能不能说,一个光子是由正、负电子组成的呢?不能。 e^+ 和 e^- 组成的疏结构 (e^+e^-) 是有的,那就是氘(电子偶素),它是类似于氢原子的东西。我们应该把光子“统一体”的分解看成是物质矛盾的转化过程,而正、负电子的对称性又使我们猜想它们是某种“相位相反”的激发态。

事实上,过程(3.1)中的能量转移 ΔE 都达到粒子静能 E_0 本身的大小: $\Delta E/E_0 \sim 1$ 。把这个式子补充到(2.1)式中去,便不难看出,我们刚才提出的问题是毫无根据的。

1) 恩格斯,《自然辩证法》,人民出版社,(1971),209。

$\Delta E/E_0 \gg 1$ 也是可能的。两个粒子相互碰撞的能量倘若足够高,便可能产生出比它们静质量大得多的新粒子来。1974年底,在 e^+ 和 e^- 的对撞中,发现了 J/ψ (3.1)和 $\psi'(3.7)$ 等新粒子,难道能够说, J/ψ 或 ψ' 原来就存在于 e^+ 或 e^- 的内部吗?

由此可见:“在人类社会和自然界,统一体总要分解为不同的部分,只是在不同的具体条件下,内容不同,形式不同罢了”^[1]。在新的条件下,基本粒子的分解表现出崭新的内容和形式。与此相应,关于它的结构问题的研究也应当有不同于过去的新的观点和新的方法。

四、讨 论

当爱因斯坦建立狭义相对论的时候,他勇敢地抛弃了“以太”;但建立广义相对论后不久,他就指出:没有以太的虚空是不可思议的。在他的晚年,爱因斯坦一再阐明“真空不空”的观点,并且强调以太不能被认为由可以追踪的各部分(意指极微细的粒子)所组成。经过五十年关于粒子物理的研究,以太实际上借真空作为代名词以新的姿态复活了。真空极化效应使它的物质性不容置疑,因此大家公认真空的定义是能量的最低态。换句话说当以太处于基态时,不表现出观察效应,也没有质量,而当它激发时,才表现出有质量的粒子。这种激发首先是基本矛盾的激发,因此有两点值得考虑:

(1) 世界的无限性是否在于以太内部基本矛盾的无限性?

(2) 基本矛盾的双方都以对方的存在为自己存在的前提,脱离对方,自己就不存在,因此每一方都不是通常意义下的粒子。和古希腊那种认为“物质只是非连续的”旧原子论不同,我国古代有一种“元气”学说^[1],强调阴阳不可分割,是很有道理的。也许“夸克”就是基本矛盾的一种映象,而它们的“禁闭性”就与矛盾的“同一性”有关。

1911年原子的行星模型建立后,人们长期为一个问题所困惑:电子何以能不被原子核吸引而掉进去?这一问题的解决导致量子力学的诞生。今天,大家又为夸克何以跑不出来而感到奇怪,或许这一困难的克服也会导致新的动力学规律的发现^[2]。在我们看来,很可能当年努力去了解的是矛盾的斗争性,而今天不容忽视的则是矛盾的同一性。

当然,科学不依赖于明显的哲学见解而发展着,而且这种发展产生出比一般哲学语言更丰富的形式和内容,原因是它使用了数学的语言。二十世纪物理学的经验表明,一种抽象的理论形式一旦合理地建立,即使在其物理含义还不大清楚的情况下也能发展。例如在近年来把规范场理论用于强相互作用而建立的量子色动力学(QCD)中,赋予夸克以色量子数和味量子数。色有三种(红、蓝、绿),每一色又有其反色,理论上如能证明一切可观察的强子都只能以颜色的单态(无色的态)存在,那就解释了夸克的禁闭性。这种色单态,对介子来说是 q 和 \bar{q} 的色一正一反抵销了,而对重子则是三个夸克(qqq)三色色按反对称混合而达到无色。第二种情况特别微妙,又同夸克电荷数为非整数而观察电荷都是整数倍 e 的关系交错在一起。我们猜测,关于色的动力学同基本矛盾的运动规律有关,而目前味量子数(u, d, s, c, b, t, \dots)等的增加趋势则反映了矛盾的无限性。

随着对真空认识的深入,为了处理这样一种无限自由度的体系,人们越来越多地把统计物理的观念和方法输入粒子物理。一种逐渐流行的看法是:更努力地研究真空的结构,才能更好地了解粒子的结构;关于各种“相变”的谈论已经引起重视。很多年来,大家的眼光往小的线度看,往粒子的内部看,而实际上粒子的存在离不开环境,现在需要更多地注意真空,注意环境,处理好个体与环境的对立统一关系。在这点上,应当说句公道话,以Chew为代表的Bootstrap学派是早就有过一些精辟见解的,尽管他们有许多观点是我们所不同意的,也因为这些观点,他们并没有对近十多年来粒子物理发展的主流起积极的推动作用。

事情就是这样,主流的发展是健康的,并且应当说是很快的。而各种学派、各种见解都或多或少地作出它们的贡献。现在这个以夸克(层子)模型为代表的主流,又已发展到一个新的阶段,各种模型(如袋模型、弦模型、孤子理论)都在不断地变化,并经历着分化、改组和相互融合的过程。如果不久发现许多人竟殊途而同归的话,惊奇之余,也将是一件愉快的事情。

参 考 文 献

[1] 何祚庥,《中国科学》,1975年,第5期,第445页。

- 1) 《毛泽东选集》第五卷,人民出版社,(1977),416.
- 2) 这一类比是陈时提出的。