

五十年来微观粒子和物质微观结构的理论

胡 宁

(北京大学物理系)

由于物质微观结构的不可穷尽性,微观粒子理论将永远是向前发展的.作为发展中的事物,它将不断的和新实验现象矛盾,理论本身也将存在着内部矛盾和困难,正是这些矛盾和困难推进理论不断的发展.在十九世纪人们认为原子是物质结构的最小最原始的单元,本身不应再有内部结构,后来由于放射性元素、电子以及光谱的线性结构的发现,并且发现了原子具有很重的原子核,因而不得不承认原子也有内部结构和运动.对原子内部结构的探讨和研究,发现了微观运动的量子力学规律.量子力学完全阐明了原子是由原子核和电子组成的体系.实践又进一步发现作为原子中心的原子核也同样具有内部结构.量子力学揭示出电子这个微观粒子既有粒子性同时又有波动性,但对所有微观粒子的粒子性和波动性的认识尚未深入,一直到二十世纪三十年代的末期提出了“量子场论”以后,对于微观粒子的波动和粒子的二重性才得到比以前更为全面的阐明.这个认识的进展对于进一步发展物质的微观结构理论是非常重要的.下面举出一个实例来说明这一点.人们已经知道一般说来当一个原子核的电荷是质子的 N 倍时(N 是一个整数),它的质量则接近于质子的 $2N$ 倍.现在看来这个事实显然指出原子核一般是由数目相同的质子和另一种质量和质子相同但不带电荷的中子组成.但从发现原子核直到真正实验上发现中子以前,理论没有能预言在原子核内可能有这种微观粒子存在.相反,人们却认为原子核是由质子和电子组成的,而按照当时的相对论量子力学的电子理论,电子是不可能被禁闭在原子核内部的,在发现中子以前,人们有一个认为满意的 α 衰变理论,按照这个理论, α 粒子本来就是原子核的一个组成部分.人们也有一个满意的 γ 衰变理论,认为 γ 射线是放射性原子核在衰变的瞬间由原子核内的质子或 α 粒子放射出来的,正象一个电子在速度改变时放射出光波一样,但在当时人们却无法给出一个满意的 β 衰变理论:由于上面提到的理论困难,人们无法说电子本来就是组成原子核的一员,但又不能说电子是在 β 衰变过程的瞬间被放射出来的,象 γ 光子在 γ 衰变过程的瞬间产生出来那样.在提出量子场论以前,人们认为质子和电子这种微观粒子都是永恒存在的,不可能象光子那样在一个过程中被放出或被吸收.按照量子场论,电子和质子也可以和光子一样,在过程中产生,湮灭或转化为别种粒子.这个理论可以很自然的对于 β 衰变现象提供出正确的描述.可惜的是,量子场论提出的时候已经很晚,没有能够在发现中子以前预言中子的存在.在量子场论里相应于粒子一般也存在着反粒子.两个电子可以通过交换光子而造成它们之间的吸引力或排斥力,所谓交换光子就是一个电子放出一个光子,随后这个光子又被另一个电子吸收,原子核力也是两个核子(质子或中子)交换一个介子所造成的. β 衰变是原子核中中子和质子互相转化同时放出一个电子和一个中微子的过程.电子和反电子(即正电子)在相互碰撞过程中可以转化为一对光子.最后提到的这个转化过程也在发现中子以后被实验所证实.总之按照量子场论,所有微

观粒子不再是永恒存在的，它们可以在过程中相互转化或被产生和吸收，这与光子并没有两样。这样，为了解释一些物理现象，我们就可以设想或预言一些容易转化为别种粒子的不稳定的新粒子如介子、反质子等的存在。在提出量子场论以后，人们为着解释实验，确实预言了大批新粒子和反粒子，带电的和不带电的，具有不同的自旋的，有静止质量的和没有静止质量的。在当时可能有人象现在对待“层子”一样认为这些粒子不见得是客观存在的。然而这些预言的粒子在十多年以后都被实验陆续证明确实是存在的。上面举出的实例说明微观粒子的波动和粒子二重性具有非常深刻和丰富的内容。恩格斯在《自然辩证法》一书中，恰当地指出十九世纪关于力的概念是非常模糊的。所谓分子的凝聚力，元素间的化学亲和力只不过是现象未作任何实质性解释的空洞概念。超距作用的万有引力和库仑作用力为什么能够存在也未作任何说明。在量子场论里，不承认有不经物质传送的超距作用，所有的相互作用都是吸收和产生粒子的过程，也就是微观粒子相互转化的过程，这使得在经典力学中过去无法解释的关于力的本质问题在量子场论里得到明确的说明。

由于加速器的建成和发展，不仅发现了前面所预言的新粒子，同时还发现了奇异粒子和很多所谓“共振态”。新发现的“基本粒子”的数目，比各种原子的数目还要多，正象元素周期表所显示的原子周期性规律一样，人们也发现了这些微观粒子的所谓 SU_3 对称性。大家都已知道，元素的周期性规律是原子内部结构的规律性的表现。与此相应，对于现已发现的“基本粒子”的很自然的看法是它们也具有内部结构，是由更深一层微观结构层次的粒子所组成的体系，而上述 SU_3 对称性是这种内部结构规律性的反映。

和实验发现所揭示的趋势相反，近三十年来微观粒子理论的一个流派却朝着否认这些粒子有内部结构的方向前进。这是马赫的实证主义哲学思想的后果。实证主义者只承认感觉。在物理学里感觉就是观察或测量。他们认为一切存在的东西都是感觉的复合，物理概念只不过是物理学的作业假说，理论的目的只是给出观测数据之间的联系。马赫作为一个物理学工作者却认为不必去设想化学元素是存在于三维空间中的。这种思潮对微观粒子理论，产生了很大的影响。首先，海森堡在 1942 年提出散射矩阵来代替量子场论。按照实证主义的观点，在微观时空范围内进行的物理过程是不能直接观测的，因此也是不可知的。人们能够直接观测的只是过程的产物，这些产物当它们从过程所在的微观范围内飞出后，可被实验装置观测或记录。人们所能认识的只是散射波函数在很远处的渐近行为，因为这个行为直接代表观测的结果。这种散射波函数的渐近行为可以用散射矩阵来代表。一些人认为在微观过程的理论里只需要散射矩阵这个概念，而理论的目的也就是给出这个散射矩阵。很明显，这是认为测量就是一切的实证主义观点，在这个观点的影响下，自 1950 年以后十多年内，对以散射矩阵为对象的色散关系理论的研究成为理论物理的一个主要课题。在这期间发表有关色散关系的论文在数量上大大超过了当时所有其它关于“基本粒子”的理论文献。在理论中引入的一个最基本的假定是散射矩阵作为观测的物理量的函数必须具有“最大的解析性”，理论完全抛开运动的动力学规律。这样得出的色散关系只能处理散射问题而不能推广应用于产生新粒子的过程，即使在散射问题里也只能给出含有无穷多个未知参数的解，在应用于具体问题时必须对这些参数作出十分任意的取值。用色散关系处理最典型的问题是所谓“3-3”共振。按照这个理论中最近极点起主要作用的假定，“3-3”共振是核子和介子组成不稳定的结合态。但是按照 SU_3 对称性，“3-3”共振是和核子一样的粒子，而根本不是核子和介子的结合态。这表明只凭解析性而不考虑结构和动力学是行不通的。因此，花费了这样大力量在十几年内发展出来的色散关

系理论对微观粒子的知识并无重大的贡献,现在已经不大被提及了。我们并不是一般的反对色散关系,也不否认在处理某些问题时它是一个有用的工具。我们所反对的是前面提到的实证主义和不可知论的观点,按照这个观点,一些人认为理论的目的只是找出观察数据之间的联系而且对微观运动的描述不能超过色散关系,从而全部否定了微观结构认识的不可穷尽这个辩证唯物主义的观点。

必须指出,实证主义和不可知论所以能够打进微观粒子理论,除掉社会的原因外,主要原因是量子场论中存在着所谓“发散困难”。这个发散困难是由于把微观粒子看作是无结构的点粒子所造成的。这个困难不仅量子理论有,经典理论也有。按照经典的电动力学,一个带电物体周围的电磁场能量是与物体的半径成反比的。当物体的半径趋于零时,它周围电磁场能量就趋于无穷大,也就是说如果把电子看作是几何上的点粒子,代表电子周围电磁场能量的积分将是发散的,这就是点电荷在经典电动力学里的“发散困难”。另一方面,在经典力学里,当我们讨论地球绕着太阳运动时,总是把地球看作是一个质点,因为地球和太阳间的距离,远远大于地球半径,把地球看作一个点,是一个很有用的科学抽象。在地球附近的宏观区域内,地球是一个庞然大物,但分子和原子可以看作是几何的点,在分子范围内,分子和原子都不再是点,但组成原子的电子和原子核还可以看作是点。在更微观的区域内原子核不再是点,但组成原子核的质子和中子仍可以看作是点。所以由点过渡到非点,代表着由物质结构的一个层次进入了一个更深更微观的另一个层次,当然物质微观结构的无穷尽性并不简单的意味着每进入一个新的层次都是点到非点的过渡;但是在强子结构问题上,实验已经肯定仍然是由点到非点的过渡,并且组成强子的层子又可近似的看作是点。过去,假定微观粒子是点粒子的量子场论在解释和预言微观现象获得很大的成就,只不过在高级的微扰计算中得到的积分是发散的,发散是由粒子的高能行为造成的。这意味着在考虑微观粒子的高能行为时,粒子的内部结构的影响不能忽视,这是很显然的,因为放出粒子的波长将小于粒子的半径。人们所以把积分发散看作困难是因为他们形而上学地把微观粒子看作是绝对的点。它们把这些粒子称作基本的或原始的粒子,看作是没有内部结构的点,是物质最原始的单元。在这个看法下,发散困难就成为无法克服的困难。按照一般规律,当人们的形而上学和机械论的观点遇到无法克服的困难时,很容易转向实证主义和不可知论。这说明为什么在过去一、二十年内很多人对色散关系理论产生了这么大的兴趣。

按照辩证的观点,现已发现的微观粒子既是点又不是点。“点”是对现有的微观层次而言,“非点”是对下一个微观层次而言。实验上揭示出的 SU_3 对称性表明人们对物质微观结构的认识正在向下一个层次过渡。坂田昌一很早已经提出所有微观粒子都是由三种更“基础”的粒子所组成的假设。格尔曼在 1964 年提出“夸克”模型时,认为三种“夸克”只不过是 SU_3 代数的一个形象化的表示。很多人认为,在基本粒子内部,现有的量子力学规律将被另一种崭新的超量子力学规律所代替。但是按照辩证唯物主义的观点,新的力学规律不可能是孤立存在的,它与旧规律必然有着密切的联系。在本世纪初,卢瑟福已经在实验上证实原子是由原子核和电子组成的体系,但直到玻尔把经典力学应用到原子的内部,通过揭示出经典力学和客观现象间不可克服的矛盾,找到突破点过渡到新的量子理论,才最后解决原子的内部结构和运动问题。从 1964 年到 1966 年,北京基本粒子理论组遵循毛主席《实践论》和《矛盾论》的观点,把旧量子场论应用到基本粒子内部,发现对于电磁作用和弱作用来说,量子场论对于组成基本粒子的层子仍旧是适用的。这是一个重要的进展。但是看来强作用规律很可能将出现重要的质变。

过去几年高能电子和中微子对核子的大角度深度非弹性散射进一步揭示出核子的内部结构是和层子模型一致的。高能的大角度散射本身就说明核子是由点状的粒子组成的，正象卢瑟福的电子对氢原子大角度散射说明了原子含有点状的原子核一样。上述实验还进一步证实了层子模型中三种层子的电荷分别为电子电荷的 $2/3$ 、 $-1/3$ 和 $-1/3$ 倍的假定。近来实验又发现了一类新型的强子。我国的理论工作者根据层子模型利用量子场论作了大量工作来检验旧理论能否说明新的实验。我们获得一些满意的结果，但也发现了理论和实验之间很多新的矛盾。我们介绍这些情况主要是强调前面已经提出的观点：任何新的自然界的规律只能通过实践去发现它，而决不能先验的仅仅从头脑里设计出来。

近年来，“非阿贝尔”规范场引起人们很大的兴趣。电磁场是一种“阿贝尔”规范场，和电磁场一样，非阿贝尔规范场看来也是“可重正化”的。在量子电动力学里，所谓“重正化”并没有使本来是发散的积分变为收敛。它只不过使得对于在低能范围内物理观察量的计算不受发散积分的干扰。通常所说重正化消除了量子电动力学里的发散困难只是指此而言的。可重正化的理论将提供出更多收敛的理论结果供实验检验。这是目前形式的量子场论所能提供的最接近于收敛的例。我们不能排除这种非阿贝尔规范场的存在，对它进行较深入的研究是完全应该的。但是有些人认为客观世界最后都应由这种场构成。很多人热衷于这种场还因为它可能具有渐近自由的特点*，即当能量逐渐增加时，相互作用将逐渐趋于消失，这意味着在高能极限一切都将趋于不相作用的极限，更高能量的物理实验也无须再做，真理的尽头仿佛已经在望了。他们希望这将给出一个无内部矛盾的完整的和封闭的理论体系，计算结果都将给出有限的值，这也就意味着整个物质世界都可用点模型的各种规范场的粒子来描绘，而无需考虑这些点的内部结构了。

问题是迄今为止，实验上尚未发现任何迹象说明这种粒子是可能存在的。在过去，当人们从理论上预言光子、中微子、介子，以至层子的存在时，总是为了解释当时重要的实验现象或解决新现象和旧理论间重要的矛盾。引入光量子是为了解释辐射能谱，中微子是为了解释 β 衰变能谱，介子是为了解释核力，层子是为了解释基本粒子的对称性。解释这些实验现象都是当时理论上重大的课题。但是引入上述非阿贝尔规范场所代表的粒子则没有这样的实验背景。

以点粒子为出发点建立一个没有发散困难的物质微观结构和运动的最终的理论是很多人一直在追求的目标。只是在一度感到这个目标无法实现以后，很多人才转向微观过程不可知论和色散关系理论的。在色散关系这条路走不通以后，他们又返回到原来的目标，希望规范场的统一理论能够完成他们所要建立的体系。

我们认为争论不是存在不存在发散困难问题，而是是否承认物质的结构是无穷尽的和是否承认人类对微观世界的认识是不可穷尽的问题。关于这个争论问题，下面介绍一位有代表性的有名的西方理论物理学家的观点：假定一张白纸代表一个没有结构的世界，在白纸上用黑笔画一些图案算是代表世界的结构，人们不断地发现新的微观结构，白纸上将不断地增加新的图案。如果说物质结构是无穷尽的，图案也将无穷尽的增加；最后这张白纸将变成一张黑纸，黑纸将和白纸一样代表没有结构的世界。因此可以得出结论：具有无穷尽的物质内部结构的世界就是没有结构的世界！一眼就可以看出，这纯粹是一种诡辩，但却赫然出现在一家有名的物理月刊上，这就值得引起注意。姑不论用白纸上的黑线图案代表物质结构是否恰当，即使用

* 几年前提出的“光锥代数”就是以这个特点为出发点的。

这个类比,也不应把物质不同层次的结构并排地画在同一张白纸上。如果某一层次的结构可用白纸上的图案表示出来的话,那么下一层次的结构就不可能在这张纸上直接被看到。想要看到下一层次的图案,必须利用放大倍数非常大的显微镜,这样,一张白纸就永远不会变成一张黑纸。看来,很多物理学家对没完没了的微观、超微观,以及超超微观的物质结构和没完没了的认识再认识感到异常的不安,希望赶快得到物质结构的最终的理论。当前有些人对规范理论产生极大的兴趣正说明这一点。在这里,我们也并不是一般的反对规范场理论研究,规范场是电磁场自然的推广,是量子场论给出具有重要特征的一种理论上可能存在的物质场。但是很多理论工作者对规范场的期望远不止于对规范场本身的研究。他们要求所有相互作用都是通过规范场进行,并要求把所有电磁作用弱作用和强作用统一成单一的机制,从而导致一个没有发散困难的“渐近自由”的最后的的世界图象。为着消除发散困难,仅有一部分物质场是规范场是不够的。例如电磁作用是一种规范场,可以通过重正化处理消除(实际上是避开)量子电动力学中的发散困难。但电磁现象不是孤立存在的,在能量很高时光子可以转化为核子对,如果强作用中的发散困难不能消除,电磁作用中的发散困难最后仍然不能消除。为着消除发散困难,强作用也必须通过规范场进行。同样的考虑也必须要求弱作用和其它所有作用都是通过规范场进行的。这样,所有基本粒子都可看作是点而不再有发散困难。如果渐近自由也能实现,那将意味着在能量很高时,一切活动都将趋于死寂,物质也将不再相互转化,粒子的内部结构问题也不再存在,这是一幅多么可怕的图画!

形而上学总是追求着封闭、完整、孤立的逻辑体系,这就要求粒子必须是绝对的点。例如在电动力学里,如果电子不是点,就必须考虑电子内部的电荷分布和结构,而这些是不能由电磁作用决定的。这样的理论就不是一个封闭的体系,但是把电子看作是绝对的点则导致发散积分。按照严格的数学上的存在定理,运动方程根本没有解,更谈不上什么体系了。前面已经提到,规范场理论并没有使发散的积分变为收敛,重正化只不过是一种计算的程序,应用于规范场可使对很多观察量的计算不受发散积分的干扰,有些人便认为这个计算程序就是理论本身,而把发散积分看作是代表不可观察的量排除出理论体系之外。实际上这个被排除的量正是粒子内部结构的效果。积分的发散表明粒子的内部结构问题是不能逃避的,如果一方面承认发散积分代表着质量和电荷的改变,而在另一方面却只接受可重正化的理论,那将意味着先验的排除了这些物理效应有被观察认识的可能,这将是典型的不可知论。

通常费米型的弱相互作用是一个发散困难很严重的不可重正化的理论,很早就有人提出弱作用是通过某种中间玻色粒子进行的,这样,就降低了发散的等级。如果中间玻色粒子是一个规范场,那将有希望得出可重正化的理论,应该肯定,这些都是很好的科学设想,但也应该指出,最近的实验结果表明,在能量很高时,中间玻色子的效应仍未显示出来。在更高的能量,结构的效应将可能和所设想的中间玻色子的效应一样重要。除非实验上发现了这种中间粒子,弱作用的实验结果对费米型理论的偏离就不一定代表中间粒子的效应。

我们也不一般的反对把一些不同类型的作用统一成一个机制,比如说把电磁作用和弱作用统一起来,但是在一些旧的作用统一起来以后,还会发现新的作用,永远不可能把所有的作用和运动统一在单一的宇宙方程之下,一劳永逸地给出物质微观结构和运动的最终理论。

综上所述,我们并不一般的反对规范场的研究,但在怎样看待它在“基本粒子”理论中的地位和怎样进行研究有很大分歧。一些人认为,消除点粒子的发散困难是重要的目标。我们认为,发散困难是由于把粒子绝对化的看作几何点所造成的。弱相互作用就是不可重正化的。在

实验提供出新的重要迹象以前确实看不出为什么自然界会按照人们的愿望而遵守可重正化这个约定,更看不出为什么在这个研究方向上要集中这样多的力量,对待困难也应当是一分为二的。理论中存在困难正是促进理论更进一步深入发展的动力,量子现象中的波粒二重性和时空概念就已有认识上的矛盾。我们相信,这些矛盾的解决也是和下一层次物质结构问题分不开的。我们反而认为发散困难愈严重,它在下一层次中所提供的观察粒子结构的条件就愈好。按照层子模型,基本粒子的弱作用和电磁作用都是通过组成这些粒子的层子实现的。将来在进一步观察层子的结构时,有严重发散困难的弱作用比起可重正化的电磁作用将提供更好的条件。“渐近自由”将增加观察的困难。如果“自由”到这样程度,以致无法观察到层子内部结构,这将意味着不可知论,那是我们坚决反对的。

以上仅就色散关系和规范场理论研究中的一些方向问题提出一些评论。这些只是个人意见,供大家批评指正。

.....

[上接 107 页]

周总理遵照毛主席一贯教导所做的加强基础科学工作的重要指示,历数“四人帮”破坏基础科学研究,阴谋篡权复辟的累累罪行,使我们深切地认识到:周总理不愧为伟大的马克思主义者,他正是以无产阶级革命家的气概,从建设社会主义现代化强国、巩固无产阶级专政的高度,把科学作为一种革命的力量,来抓基础理论工作的。“四人帮”的诅咒和毁谤,丝毫不损于周总理的光辉形象和崇高威望,丝毫磨灭不了周总理指示的重大意义和深远影响。同时,使我们清楚地看到:“四人帮”是货真价实的党内资产阶级的典型代表,是不肯改悔的正在走的走资派。他们代表腐朽的资本主义生产关系,推行一条极右的反革命的修正主义路线,具有极大的欺骗性、危险性和破坏性。他们破坏的决不只是基础科学研究,而是要败坏整个社会主义大业。对于他们的累累罪行,我们必须继续深揭狠批,彻底清算。

我们坚信:在以华主席为首的党中央领导下,清算了“四人帮”的干扰破坏,毛主席、周总理关于自然科学基础理论工作的一系列指示一定能够迅速落实。只要我们继续坚持教育、科研为无产阶级政治服务,为工农兵服务,与生产劳动相结合的正确方向,树雄心,立壮志,努力攀登科学高峰,一定能够夺回被“四人帮”的干扰、破坏所耽误的时间,整个教育革命、科技战线的革命必将更加突飞猛进,社会主义的四个现代化的宏伟蓝图一定能够实现。

我们有着无量的前程!