

## 高能物理学的发展和展望

朱洪元

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

为了对高能物理的现状和前景有一个比较恰当的估计, 回顾一下物理学的发展历史过程, 也许是有用的。

在19世纪末期, 经典物理学的成就趋近于它的最高峰。当时许多物理学家期望: 物理学的最终目标即将实现, 物理学的所有基本原理即将被认识。后代物理学家需要做的, 只是将细节澄清、只是处理具体问题而已。当时认为, 原子是物质的不可分割的、永恒不变的最终单元。分子的结构和反应则属于化学的领域, 不在物理学研究范围之内。按照开尔文的说法, 物理学已经是万里晴空, 只留下两朵小小的乌云: (1) 迈克耳逊-莫雷实验和以太问题; (2) 能量均分定理和比热问题、黑体辐射问题。

不久, 在19世纪末发现了电子和放射性。在20世纪早年发现了原子核。这才认识到原子并不是什么物质的最终单元。两块小小的乌云也终于消失。代之而起的是物理学的两座丰碑: (1) 狭义相对论和广义相对论; (2) 量子力学和量子电动力学。

物理学深入分子和原子以及宏观物体的微观结构, 并且渗透进化学和生物学, 物理学达到前所未有的深度和广度。更为突出的是, 看来在这辽阔领域中的所有物理结果, 在原则上可以由少数几个物理常数来表达。在本世纪20年代, 中子尚未发现, 当时只有六个基本物理常数, 即  $\hbar$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $G_N$ ,  $m_e$  和  $m_p$ 。在当时看来, 自然界只有二种基本相互作用, 引力相互作用和电磁相互作用, 分别由  $e$  和  $G_N$  象征; 只有二种基本粒子, 电子和质子, 分别由  $m_e$  和  $m_p$  象征。当时许多物理学家期望, 假使能建立引力相互作用和电磁相互作用, 电子和质子的统一理论, 从中将三个无量纲常数:  $e^2/\hbar c = 1/137$ ,  $m_p/m_e = 1836$ ,  $(G_N m_e m_p)/(\hbar c) = 3.2 \times 10^{-42}$  推导出来, 那末我们将得到最终理论 (Theory of Everything)。爱因斯坦和爱丁顿在他们的后半生中致力于这种研究, 但都没有成功。

到现在为止, 在实验上又发现了二种新的基本相互作用, 强相互作用和弱相互作用; 还发现了几百种粒子。而且发现, 没有一种粒子是不生不灭、永恒不变的。即使电子和质子也不例外, 在一定条件下都能产生和消灭, 看来20年代的物理学家将宇宙看得太简单了。实验发现, 所有的粒子都配成正、反粒子对。一对正反粒子的一部分性质完全相同, 另一部分性质完全相反。也有少数正反粒子对所有的性质完全相同。它们就是同一种粒子, 如  $\gamma$ ,  $\pi^0$ ,  $J/\psi$ ,  $Z^0$ ,  $\dots$ 。现在看来, 粒子有正反与空间有左右、时间有过去和未来同样重要和基本。

王淦昌先生发现  $\Sigma^-$  超子, 证明奇异重子也配成正反粒子对。这是他在这方面的重要贡献。

从物质存在的形式和运动的自由度来说, 在20年代早已认识到: 空间、时间是物质存在的普遍形式, 它是外部运动的自由度。电荷是物质存在的一种特殊形式, 与之相应, 存

在一种内部运动自由度，在数学上以  $u(1)$  群变换表示。在 20 年代以后发现，原来还存在其它的物质存在的特殊形式和相应的内部运动自由度，例如“同位旋”，其认识来源是在实验上发现的。

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \dots$$

同位旋二重态，相应的内部运动自由度，在数学上以  $su(2)$  群变换表示。从这个角度看，中微子的发现和中子的发现同样重要。王淦昌先生在这方面也作出了重要的贡献。又如“色”。这是深入研究了重子的分类及其内部结构之后才认识到的。与之相应的内部运动自由度在数学上以  $su(3)$  群变换表示。又如“代”。 $\mu$  子、 $\tau$  子，奇异粒子，粲粒子等的发现表明，还有另一种物质存在的特殊形式，现在称之为“代”。与之相应的内部运动自由度在数学上应如何表达，现在还不知道。

已经发现的粒子可以分为三大类：

(1) 传递相互作用的粒子，如

$\gamma$  传递电磁相互作用，

$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  传递弱相互作用。

理论上预言的传递引力相互作用的引力子和传递强相互作用的胶子在实验上迄今还未发现。

(2) 其余的粒子中不参予强相互作用的称为“轻子”。已发现的轻子共三代，每代二种，各组成一个同位旋二重态，它们是

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}。$$

与之相应，存在三代，六种反轻子。

(3) 其余的粒子均参予强相互作用，统称为“强子”。实验上发现的几百种粒子绝大部分都是强子。强子由三代“层子”和相应的“反层子”组成。每一代层子有六种，属于同位旋二重态\*和色三重态。这三代层子是

$$\begin{pmatrix} u^R & u^G & u^B \\ d^R & d^G & d^B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c^R & c^G & c^B \\ s^R & s^G & s^B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t^R & t^G & t^B \\ b^R & b^G & b^B \end{pmatrix}$$

其中右上标  $R$ ,  $G$  和  $B$  标志色三重态中的三个态。1984 年在实验上发现  $t$  层子存在的初步迹象，但没有得到以后实验的更多支持。其存在及其性质还有待于进一步的研究。

因此除  $\gamma, W^+, W^-, Z^0$  外，目前在实验上已发现的粒子均由下面 24 种层子、轻子和

\* 更确切地说，左手轻子和层子组成同位旋二重态，而右手的轻子和层子均属于同位旋单态。

相应的反层子和反轻子组成。看来轻子和层子的性质很有规律性。在形式上和化学元素周

$\nu_e$	$e$	$u^R$	$d^R$	$u^G$	$d^G$	$u^B$	$d^B$
$\nu_\mu$	$\mu$	$c^R$	$s^R$	$c^G$	$s^G$	$c^B$	$s^B$
$\nu_\tau$	$\tau$	$t^R$	$b^R$	$t^G$	$b^G$	$t^B$	$b^B$

期表有相似之处。轻子和层子有共性，也各有其特殊性。为了解释已有的实验和理论本身的自洽性，也要求它们的性质这样相匹配。这表明，轻子和层子可能有共同的基础，可能存在着更深层次物质结构，但目前的实验技术还不足以测量出它们的大小，只能给出其上限为  $10^{-16}\text{cm}$ ，这比强子半径小了三个数量级。但这说明不了多少问题。原子和强子的半径相差五个数量级，而且普朗克长度

$$r_{pl} = \left( \frac{G_N \hbar}{c^3} \right)^{1/2} = 1.6 \times 10^{-35} \text{cm}$$

比  $10^{-16}\text{cm}$  远小 17 个数量级。

在 20 年代以后发现的强相互作用和弱相互作用各有其特殊性。在弱相互作用中，宇称  $p$  不守恒，电荷共轭  $c$  不守恒， $cp$  也不守恒。关于强相互作用，在高动量转移过程中有“渐近自由”性质；在低动量传递过程和强子结构中有“囚禁”性质。但是在强相互作用和弱相互作用之间，以及在它们和电磁相互作用以及引力相互作用之间也有共性。它们都来源于物理基本规律的“定域对称性”。万有引力相互作用来源于物理规律的定域平移变换的对称性。电磁相互作用来源于定域  $u(1)$  对称性。强相互作用和弱相互作用则来源于杨振宁和密耳斯所开创研究的“定域非阿贝尔对称性”。建立弱相互作用的理论所用的另一个重要的概念是希格斯所提出的“真空对称性的自发破缺”。在 60 年代，格拉肖、萨拉姆和温伯格提出了电弱统一理论，其核心思想是，同位旋空间中的  $su(2)$  定域对称性和超荷空间中的  $u(1)$  定域对称性以及真空对称性的自发破缺。在 70 年代提出了强相互作用的理论：“量子色动力学。其核心思想是色空间中的  $su(3)$  定域对称性。”

电弱统一理论已为一系列实验所证实。特别在 1983 年，实验上发现了理论所预言的传递弱相互作用的中间玻色子  $W^+$ ， $W^-$ ， $Z^0$ ，其性质和理论所预言的在误差范围内相符合。爱因斯坦寻求引力相互作用和电磁相互作用的统一理论，没有成功。现在居然有了一个电磁相互作用和弱相互作用密切联系的理论。这是物理学发展过程中的一个里程碑。

量子色动力学的确具有渐近自由性质，也有可能解释囚禁性质。但由于相互作用强，理论在数学上很难比较准确地处理。为了得到足够准确的理论结果，特别是关于低能强作用现象和强子结构的比较准确的理论结果，用实验结果来检验，还需要作出很大的努力。这以后才能作出量子色动力学是否是关于强相互作用的正确的理论的结论。电弱统一理论和量子色动力学合起来称为“标准模型理论”。前些年在实验中似乎出现一些为标准模型理论所无法解释的现象。但在积累了更多的实验数据以后，这些现象消失了。所谓“新现象”其实不过是统计涨落而已，随着数据量的增加而消失。迄今为止，还未发现在实验和标准模型理论之间的确存在着矛盾。这当然是来之不易的成就。但从另一个角度来看，这也表

明,迄今为止,实验还没有能够冲出标准模型理论所表达的规律起作用的范围的边界。

在 20 年代,理论物理学家曾经认为,一个真正的基本理论只应该包含三个有量纲常数,即  $\hbar$ ,  $c$ ,  $r_{pl}$ 。理论中的无量纲常数应该能够从这个理论本身中推导出来。如前所述,当年的基本理论中只有三个无量纲常数。但是在标准模型理论中,即使所有中微子的质量都等于零,还人为引入了 17 个无量纲常数。这表明,标准模型理论中还包含有相当大份量的唯象性理论的内容。因此标准模型理论必须向前发展,研究清楚这部分唯象性理论的本质,使之上升为基本理论。

此外,作为引力相互作用的理论的广义相对论,又引进了一个常数  $G_N$ ,与标准模型理论相比,更为严重的是在量子化以后出现的发散困难,甚至用重正化方法也不能解决。因此处境比标准模型理论更困难,这一矛盾也迫使理论非向前发展不可。因此在 20 年代提出的问题到今天已经发展为如何统一地理解轻子,层子,  $\nu$ ,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , 胶子, 引力子, 希格斯粒子等一切粒子和它们之间的一切相互作用。如何建立一个基本理论,一方面能解释现有所有的实验结果,另一方面又能将这 18 个无量纲参数从这个理论本身中推导出来。显然,自从 20 年代以来,我们对自然界的理解深入了很多。在另一方面也使我们进一步认识到宇宙的深度和我们的无知。我想,认识到我们的无知是一大进步,这将激励我们更努力地去探索。

标准模型理论中的参数的一小部分来自规范场部分。因此和物理规律的对称性有关,要减少来自这方面的参数,看来得探索物理现象是否隐藏着更大的对称性。目前理论探索中的相当大的一部分就属于这一方面,如大统一理论、超对称理论、超引力理论、超弦理论等。

在这 18 个无量纲参数中,大部分来自希格斯场部分,因此和对称性的破缺有关。一切粒子的质量和希格斯场有关,质量不仅是粒子的重要性质,也是引力场的源。而且不同代的粒子之间的联系也是通过希格斯场实现的。因此弄清楚希格斯场的实质是什么?对称性自发破缺的物理机制是什么?是非常重要的问题。目前进行的如对称性的动力学自发破缺理论、人工色理论等等的研究就是属于这方面的探索。

如上所述,轻子和层子排列成的表在形式上和化学元素周期表有相似之处。这种规律性以及代的自由度问题在标准模型理论中没有解答。因此目前正在探索,轻子和层子是否也是具有内部结构的复合粒子。人工色理论则在探索希格斯粒子是具有内部结构的复合粒子的可能性。也有人在探索  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  是否也是具有内部结构的复合粒子。因此探索物质结构的下一个层次也是当前高能物理基础研究的一个方面。从物理学发展的历史看,这两个研究方向从来就是物理学中二个非常重要的,而且又相互密切联系的研究方向。

认识到空间和时间是一个不可分割的四维统一体,将空间的对称性和时间的对称性扩大为庞加莱对称性,这导致了狭义相对论。引进空间和时间的定域平移对称性导致引力相互作用的基本理论,广义相对论。而引力相互作用决定太阳系的结构。电磁相互作用来源于内部自由度中的定域  $u(1)$  对称性,它决定原子的结构、分子的结构以及宏观物体的微观结构。内部自由度中的色空间中的  $su(3)$  定域对称性导致反映强相互作用的量子色动力学,而强相互作用则决定强子的结构和原子核的结构。将内部自由度中的同位旋空间中的定域  $su(2)$  对称性和超荷空间中的定域  $u(1)$  对称性结合起来,并引进真空对称性的自发破缺,导致电弱相互作用统一理论,而弱相互作用最后决定轻子、层子、强子以至原

子核的稳定性。看来当前理论探索中的这二个基本方向是对的，但迄今为止，这些探索所取得的成就很有限，而且同时带来新的问题。例如大统一理论有可能解电弱统一理论中的一个参数值：

$$\sin^2\theta_w = \frac{g'^2}{g^2 + g'^2} \approx 0.22$$

其中  $g$  和  $g'$  分别为  $su(2)$  和  $u(1)$  规范场的相互作用常数。但它所预言的质子衰变至今在实验上尚未观察到。而且它的规范场部分虽然变得简单了，但其希格斯场部分却变得更复杂了，从而带来“等级问题”。高次近似的贡献将低次近似的结果修改得面目全非。等级问题可能通过引进“超对称”来解决。但超对称所要求的费米子和玻色子之间的对称性在实验上迄今未发现任何迹象。此外，即使引进超对称，还无法解决量子万有引力理论中的发散困难。

超弦理论是一个大胆地尝试，它将一维弦的概念取代点粒子的概念。为了保证理论的内洽性，必须将表达外部自由度的空、时流形从四维扩大到十维，将表达内部自由度的流形从 12 阶群  $su(3) \times su(2) \times u(1)$  的表示空间扩大为 496 阶群  $E_8 \times E_8$  或  $so(32)$  的表示空间。这类理论有一些吸引人的特点，如有可能解决量子引力理论中的发散问题，甚至有可能理论中根本不出现发散。所有的反常都消去，能保持理论的手征性。但是要将理论发展完备到可以从中得到可以用实验检验的理论结果，前面还有很长很长的路要走。目前已经在担心，在对称性破缺过程中，怎样能得到如  $M_w/M_{pl} \approx 10^{-17}$  这样的质量等级。特别是怎样能得到  $|\Lambda| < 10^{-120} r_{pl}^{-2}$  这样小的宇宙常数。其中  $M_{pl}$  和  $r_{pl}$  分别为普朗克质量和普朗克长度。至于复合模型的研究，目前还处于更原始的阶段。

看来要在这两个方向上的探索取得实质性的进展，还需要在物理概念上的创新和突破。这种创新和突破看来还得由突破性的实验来指引探索的方向。可惜迄今为止，实验还未能冲出标准模型理论所反映的物理规律起作用的范围的边界。但是现在居然又有人在谈论“最终理论”。好象物理学基础研究的最终目的即将达到。这使人想起上世纪末期和本世纪 20 年代的情况，历史似乎又在重演，只不过换了一套新的服装。即使要解决我们目前所看到的问题，还有很长很长的路要走。例如

- (1) 希格斯场和希格斯机制的实质是什么？
- (2) 量子引力理论的发散不能重正化，问题出在哪里？
- (3) “代”的存在表明，除了超荷、同位旋、色这些内部自由度以外，还存在其它内部自由度？是否存在更多的代？在数学上“代”自由度应如何反映？
- (4) 是否存在其它尚未发现的自由度？
- (5) 是否还存在其它尚未发现的相互作用？
- (6) 相互作用的传递者如光子、中间玻色子、胶子、引力子的存在及其所属群表示由定域对称性决定，是什么原理决定轻子和层子的存在及其所属的群表示？
- (7) 为什么轻子和层子的质量谱如此特殊？

(8) 狭义相对论表达了外部自由度空间流形和时间流形之间的联系，定域规范不变性表达了外部自由度流形和内部自由度流形之间的联系。电弱统一理论表达了内部自由度中的同位旋空间和超荷空间之间的联系。是否在一切实流形之间，包括外部自由度流形和一切已知的内部自由度流形之间都存在着有机的联系？如何在理论上统一地反映所有这些联

系?

(9) 能否给予已知的一切粒子和它们之间的一切已知的相互作用 统一的理论 反映?

以上只是我们所面临的、有待解答的一部分问题的罗列,当然远不是全部。即使这些问题的解决取得了突破性的胜利,也不意味着物理学基础研究的终结。自然界还有更多的、我们现在尚未察觉到的奥秘,在新的突破实现之后,将发现大片未知的处女地,有待于我们的后代去探索。

(编辑部收到日期: 1987年7月10日)

## DEVELOPMENTS AND FUTURE DIRECTIONS OF HIGH ENERGY PHYSICS RESEARCH

ZHU Hongyuan

*(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)*

www.cnki.net