

高能物理学的发展

朱 洪 元

一、高能物理学的诞生

物理学是从研究日常生活的现象中开始的，从这些宏观现象中发现了万有引力相互作用和电磁相互作用，把这些研究成果总结为经典物理学，其中包括经典力学、经典电磁学、热力学和统计物理学。经典物理学对社会生产力的发展所起的作用是众所周知的，如蒸气机、气轮机、水轮机、内燃机、发电机、电动机、电极及电话等的发明都基于这些理论。

此后，物理学向两个方向发展，一方面向大范围现象的研究发展，也就是向宇观世界发展，产生了天体物理学和宇宙学，另一方面向微观世界深入，从宏观现象深入到原子，然后深入到原子核，再深入到粒子的研究，从而产生了高能物理学。因此高能物理学是当前研究微观世界的前沿。

在原子物理的基础上发展了分子物理，以及研究宏观物体的微观结构的凝聚态物理，这对技术和生产的发展也产生了重大的作用，如晶体管、量子电子学、大规模集成电路、数字计算机、近代信息技术、激光、超导、材料、X光及电子显微镜等等。它对其它学科也产生了重大影响，导致了化学物理和生物物理等交叉学科的产生。

原子核物理研究的结果所产生的社会后果也是众所周知的，如原子弹、氢弹、中子弹、核电站、同位素的应用，以及核技术在各方面的应用。能源问题的根本解决，可能还得利用轻核融合反应所产生的能量。原子核物理对天体演化的研究也产生了重大的影响。

相对说来，高能物理是一门年轻的科学，但它所发展的技术已经有应用的前景。如星球大战中可能使用自由电子激光，它的产生需要高性能的高能强流加速器。高能物理在宇宙演化的研究中也起重要的作用，因此，高能物理现在不仅是微观世界研究的前沿，也是宇观世界研究的前沿。

高能物理是从原子物理、原子核物理、宇宙线物理研究中诞生。

原子物理研究发现了电子、光子，导致量子力学、量子电动力学的建立。原子核物理研究发现了质子、中子、中微子和强相互作用、弱相互作用。宇宙线物理

研究发现了正电子、 μ 子、 π 介子、奇异粒子（K介子、 Λ 、 Σ 、 Ξ 超子）。回过头来看，这些研究已经开拓了高能物理研究中一大片领域，为高能物理诞生准备了条件。

(1) 从现在的粒子分类来说：

电子是第一个被发现的轻子；光子是第一个被发现的传递相互作用的粒子；质子是第一个被发现的强子中的重子； π 介子是第一个被发现的强子中的介子； e^+e^- 为第一对被发现的正、反粒子对。

(2) 从物质存在的形式和运动的自由度来说：

空间、时间是物质存在的普遍的基本形式，是运动的外部自由度。

电荷是在经典物理学中就已经被发现的物质存在的一种特殊形式。相应的运动自由度为相因子变换，在数学上以“(1)变换群表示。

同位旋是物质存在的另一种特殊形式，从

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

的存在中发现，相应的内部运动自由度称为同位旋自由度。在数学上以 $Su(2)$ 群变换描述。

代： μ 子和奇异粒子的发现表明还存在着另一种物质存在的特殊形式：“代”，相应存在着另一种新的内部运动自由度：代自由度。

(3) 从基本相互作用的角度看：

发现了强相互作用和弱相互作用，它们和在经典物理研究中发现的引力相互作用和电磁相互作用同样基本。

第二次世界大战末，美国研制原子弹成功，用以轰炸日本的广岛和长崎，对国际局势产生重大影响。于是许多国家加强原子核物理研究。变革原子核的研究工具：加速器，探测变革中的产物的工具：探测器，以及探测所得的实验数据的处理技术迅速发展。加速器的能量不断提高。

加速器	能量
高压倍加器	$\sim 10^3 \text{keV}$
静电加速器	$\sim \text{MeV}$
回旋加速器	$\sim 10 \text{MeV}$
同步回旋加速器	$\sim 10^2 \text{MeV}$

弱聚焦同步加速器	~GeV
强聚焦同步加速器	~10 ² —10 ³ GeV
对撞机	~质子能量已高达 ~10 ³ GeV

探测器也不断改进,发明了云室、盖革计数器、核乳胶、闪烁计数器、饱室、契伦可夫探测器、多丝正比室、漂移室等等。计算机和电子学技术的发展,使数据的获取和处理能力迅速提高。这样就有可能开展系统的高能物理实验研究。

1948年用加速器产生了 π 介子;1953年用加速器产生了 Λ 超子和 K 介子,于是高能物理开始成为物理学中一个独立的分支学科。

二、粒子的特性、分类及其相互作用

早年认为电子、质子是永恒不变的基本粒子,但在原子核物理研究中发现如下的过程:

$$N \rightarrow p + e + \nu_e, \quad p \rightarrow N + e^+ + \bar{\nu}_e$$

在宇宙线物理研究中也发现了光子和正、负电子的转化过程:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-, \quad e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \text{ 或 } \equiv \gamma$$

这是表明并不存在不生、不灭,永恒不变的物质存在的具体形式的迹象。

从五十年代以来,已经发现了数以百计的粒子,没有一种是不生不灭、永恒不变的。它们都能产生和消灭,不像是什么基本粒子,于是将“基本”二字取消,统称它们为粒子。系统的研究又发现:所有的粒子都配成对,配成对的粒子称为正、反粒子。正、反粒子的一部分性质完全相同,一部分性质完全相反。如正、负电子,它们的质量、自旋完全相同,电荷、磁矩完全相反。也有少数正、反粒子对,它们的所有性质完全相同,它们就是同一种粒子。如光子、 ρ 介子、 J/ψ 粒子等。

粒子有正反是和空间有左、右;时间有过去和未来同样普遍和基本的规律。

已经发现的粒子分为三类:

(1) 传递相互作用的粒子:如光子 γ 传递电磁相互作用; W^+ 、 W^- 、 Z^0 传递弱相互作用,均为玻色子,自旋均为 \hbar 理论上预言其存在,但实验上尚未发现的有:传递引力相互作用,自旋为 $2\hbar$ 的引力子;传递强相互作用,自旋为 \hbar 的胶子。

(2) 其余的不参与强相互作用的粒子称为轻子,已经发现的轻子共三代,每代二种,共六种

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

它们的自旋均为 $\hbar/2$ 均为费米子。 e 、 μ 、 τ 的电荷均为 $-e$, ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 的电荷均为0。 e 为质子电荷。与之相应存在三代、六种及轻子。此外,

$$m_e : m_\mu : m_\tau = 1 : 207 : 3492$$

这样的质量谱和原子物理及原子核的质量谱很不一

样。

中微子 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 的质量很难测量,实验上只给出上限,它们的质量可能均为0。从1982年起,苏联的科学家宣称,他们测得 ν_e 的质量约为 $35 \text{ eV}/c^2$,但尚未得到其它实验的支持。最近在超新星爆发中探测到中微子,从此估计其质量约为几个 eV/c^2 ,但也是初步估计。

(3) 其余的粒子都参与强相互作用,统称为强子,实验上发现的数以百计的粒子绝大部分是强子。在五十年代发现强子不是点粒子,而有一定大小,如质子、中子,它们的半径约为 $0.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$,六十年代发现强子内部还有带点电荷的东西,在强子内部可以相当自由地运动。国外称这种强子内部带点电荷的东西为夸克、反夸克。在六十年代早期他们提出这一名词时,认为夸克和反夸克各只有三种。当时国内有一部分物理学家称之为层子、反层子,因为他们认为层子也不是物质结构的最终单元,只不过是物质结构的一个层次而已,也未必只有三种。

目前已经发现的强子都是由三代,每代二种,共六种层子及相应的六种反层子组成。如重子为三个层子组成,介子为一对正、反层子组成。这三代、六种层子由

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

表示,与之相应存在六种反层子。

层子的自旋也均为 $\hbar/2$,都是费米子。 u 、 c 、 t 的电荷均为 $2/3e$; d 、 s 、 b 的电荷均为 $-1/3e$,它们的质量谱和轻子类似,谱间隔愈来愈大,和原子、原子核的质量谱很不一样。

t 层子在1984年发现其存在的迹象,但事例很少,证据不强,有待实验进一步研究。

层子是费米子,其波函数应该是反对称的。研究了重子内部的层子波函数以后,发现强子内部还存在着隐藏的,前所未有的自由度,每种层子或反层子都可以处于“三”种不同的状态。由于原色也有三种:红、绿、蓝,所以将“色”这个词借用过来,称这种隐藏在强子内部的新自由度为色自由度。“色”是物质存在的另一种特殊形式。色空间代表一种新的内部运动自由度。

设以字母 R 、 G 、 B 分别标志每一种层子的三种色状态。那么除 γ 、 Z^0 、 W^+ 、 W^- 以外,所有在实验上已经发现的数以百计的粒子都由下表中所示的24种轻子和层子,以及相应的24种反轻子和反层子组成。

ν_e	e	u^R	u^G	u^B	d^R	d^G	d^B
ν_μ	μ	c^R	c^G	c^B	s^R	s^G	s^B
ν_τ	τ	t^R	t^G	t^B	b^R	b^G	b^B

它们的性质很有规律性,在某些方面和化学元素

周期表有类似处。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治性，也要要求他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直接测量出它们的大小，只能给出其上界，其半径一定小于 10^{-16}cm 。但这又说明不了多少问题，原子和强子的半径相差约五个数量级，若强子和轻子、层子的半径也相差五个数量级，那么，层子和轻子的半径将为 10^{-18}cm 数量级。目前的实验技术的确还无法将其测量出来。

目前已经发现的这些粒子之间的四种基本相互作用中，引力相互作用和电磁相互作用是长程力，在宏观物理现象中就显示出来。经典物理学已经对之进行系统的研究。但是，强相互作用和弱相互作用是短程力，其力程远较原子半径为小，因此直到研究深入原子核之后才显示出来。

此外，它们还各自有其特点。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。这是弱相互作用独有的特点。

在另一方面，将层子结合成强子的基本强相互作用，在高动量转移过程中有渐近自由的性质，在低动量转移过程和强子结构中有囚禁的性质。形象地说：层子在强子内部可以相互自由地运动。但是要将层子从强子中打出来，成为自由的层子，即使用现有最大的加速器所产生的能量最高粒子轰击强子，也还没有成功。这是强相互作用所独有的性质。

三、高能物理现象的规律及其理论

在高能物理现象中，有两个普遍存在的现象。一个是波粒二象性。另一个是产生和消灭现象。所以建立高能物理理论，必须要求能反映这两方面的普遍现象。量子力学能反映波、粒二象性，但不能反映粒子产生和消灭过程；经典场论，如经典电磁场论，能反映电磁波的产生和吸收，但不能反映波、粒二象性。为了建立高能物理理论，可以按照将经典力学改造成为量子力学的方法；将经典场论改造成为量子场论，使之既能反映波、粒二象性，又能反映产生和消灭。在这方面第一个成功的理论是量子电动力学。

量子电动力学的一系列最低次近似结果和实验结果符合得相当好，如光子的发射与吸收、光电效应、康普顿散射、韧致辐射、正负电子对的产生和湮灭过程等。但为了使理论得到更精确的实验检验而计算理论的高次近似的贡献时，却得到无穷大的结果，因此毫无意义。对这种发散困难进行了仔细的分析，在 1948 年发现所有这些无穷大的计算结果的全部物理效应归结为改变电子的质量和电荷，使之变为无穷大。

假使将计算结果中出现的无穷大的电子质量和电荷用实验上测得的电子的质量值和电荷值替代，则得

到的结果就变为有限的，而且的确比最低次近似结果更好地和实验结果符合。

举一个例子，电子的磁矩值实验测量值为

$$1.001159652209(31)e\hbar/2m_e c$$

非常精确，而量子电动力学的理论结果在误差范围内与之相符合。实验结果与理论结果都如此精确，而且相互符合，这是非常罕见的。这种处理量子场论中的发散困难的方法称为重正化方法。但是并不是所有量子场论中出现的发散困难都能用重正化方法来解决，例如在三十年代费米提出的弱相互作用理论和由三种矢量介子，包括荷电的和中性的，传递的强相互作用中的核子力的理论中出现的发散困难就无法用重正化方法解决。

非阿贝尔规范场理论是关于弱相互作用和强相互作用的基本理论的基础。它是由杨振宁和米尔斯 (Mius) 于 1954 年提出的。他们的核心思想是：假使物理规律有某种定域对称性，与之相应必定存在某种相互作用。

建立弱相互作用基本理论的另一个关键是希格斯 (Higgs) 在 1964 年提出的真空对称性的自发破缺的机制。

电弱相互作用的统一理论是在六十年代由格拉肖 (Glashow)、萨拉姆 (Salam) 和温伯格 (Weinberg) 在真空对称性的自发破缺的机制基础上提出的统一描述电磁作用和弱作用的理论。七十年代初证明了这种理论是可以重正化的。到七十年代中后期，这一理论的一系列结果和实验结果，如一系列高能中微子和反中微子与核子和电子的碰撞过程，纵向极化电子对氩核的散射过程的实验结果相符合。

1983 年这一理论所预言的中间玻色子 W^+ 、 W^- 、 Z^0 在实验上被发现，其性质在误差范围内，和理论所预言的相一致。

从十九世纪末发现放射性起，经过好几代物理学家的努力，终于建立了关于电磁相互作用和弱相互作用密切联系的理论，它和麦克斯韦建立的将电和磁统一起来的理论一样，是物理学发展的一个里程碑。

量子色动力学是一种关于强相互作用的基本理论，在这种理论中将层子、反层子结合成为强子的基本强相互作用是由相应于 8 种胶子场的 8 种自旋为 \hbar 的胶子传递的。它的确能反映强相互作用的渐近自由性质，因此有可能用微扰论的方法将它用于探讨大动量传递过程，低次近似的结果和实验结果定性上一致。但要进行定量的、精密的检验，不仅需要更精密的理论结果，也需要更精密的实验结果。

用量子色动力学研究低动量传递的强相互作用过程和强子的内部结构还要困难得多，目前还很难得到可以和实验比较的可靠的、准确的结果。量子色动力学是否是正确的强相互作用的基本理论，看来还得进行

艰巨的研究之后才能作出结论。

标准模型理论是电弱统一理论和量子色动力学的统称。迄今为止，还没有发现在标准模型理论和实验之间存在着矛盾。但标准模型理论中无量纲参数几乎多达 20 个，这表明在标准模型理论内部还包含有相当大份量的现象性理论的成分，必须探索这部分现象性理论的本质，使之上升为基本理论。

此外，作为万有引力的基本理论的广义相对论，在量子化以后出现的发散困难，用重正化的方法也不能解决。这一矛盾也迫使理论非向前发展不可。

标准模型的理论参数中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内部是否隐藏着更大的对称性，目前理论探索中相当大一部分，如大统一理论、超对称理论、超引力理论、超弦理论等等就属于这一个方面的探索。参数中的大部分来自希格斯场部分，因此和对称性的自发破缺有关。因此必须弄清楚希格斯场的实质和对称性自发破缺的机制。动力学自发破缺理论、人工色理论等就是关于这些问题的研究。

上面提到的轻子和层子排列成的表和化学元素周期表在形式上相似，因此有人在探讨：轻子和层子是否也是具有内部结构的粒子。人工色理论则探讨希格斯粒子具有内部结构的可能性。也有人在探索， W^+ 、 W^- 、 Z^0 是否也是具有内部结构的粒子。因此探索物质结构的下一个层次也是当前高能物理研究的一个重要方向。

探索物理现象内部是否隐藏着更大的对称性和探索下一个层次的结构，从物理学的发展历史来看，这两个方向从来就是两个相互密切联系的，非常重要的方向，但当前在这两个方向的探索上取得的进展很有限，同时都带来新的困难。例如：

大统一理论有可能解释电、弱统一理论中的混合角，但是所预言的质子衰变至今在实验上尚未发现。在另一方面，它的规范场部分虽然变得简单了，但它的希格斯场部分却变得复杂了，从而带来了等级问题，高次近似的贡献将低次近似的结果变得面目全非。

超对称理论可能解决等级问题的困难，但超对称所预言的费米子和玻色子之间的对称性迄今在实验上一点存在的迹象也没有发现。在实验上已经发现了那么多粒子，其中还没有发现一对超对称粒子。此外，即使引进超对称，还无法解决万有引力理论中的发散困难。

超弦理论迈出了大胆的两步：将一维弦的概念替代点粒子的概念；将已发现的外部、内部自由度大加扩充，将表达外部自由度的四维时空流形扩充为十维的流形。将表达内部自由度的流形从 12 阶群 $Su(3) \times Su(2) \times u(1)$ 的表示空间扩充为 496 阶群 $E_6 \times E_8$ 或 $So(32)$ 的表示空间。

这类理论具有一些吸引人的特点，有可能解决万有引力理论中的发散困难，甚至有可能根本不出现发散。所有的反常都能消去。但从这类理论中求得能够用实验加以检验的结果还有很长很长的路要走。

至于复合粒子模型理论，目前还处于更原始阶段。看来理论在这两个方向上要取得真正的进展还需要在物理概念上有所突破。

四、有待探索的问题

几十年来，高能物理研究取得了一系列重要进展，深化了对微观世界的认识。但也提出了更多的问题有待探索。例如：

(1) 希格斯场的实质，真空对称性自发破缺的物理机制是什么？

(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，内部自由度除超荷、同位旋、色以外，还存在其它的内部自由度，是否还存在更多的代？在数学上，代自由度应该用什么样的流形来反映？

(4) 是否还存在其它尚未发现的内部自由度？

(5) 是否还存在尚未发现的其它种类的粒子？

(6) 是否还存在其它尚未发现的基本相互作用？

(7) 基本相互作用的传递者，如 r 、 Z^0 、 W^+ 、 W^- 、胶子、引力子的存在及其所属的群表示由定域对称性决定，是什么原理决定轻子及层子的存在及其所属的群表示？

(8) 为什么轻子和层子的质量谱如此特殊？为什么质量等级差别如此之大？

(9) 狭义相对论表达了空间和时间之间的不可分割的联系。定域不变性表达外部自由度：空间、时间和内部自由度之间的联系。电、弱相互作用显示了内部自由度：超荷和同位旋的两个流形之间联系。是不是在所有的流形之间包括外部自由度的时空流形和所有一切内部自由度的流形之间都存在着有机的联系？假使存在这种普遍的联系，在理论上如何将这联系系统地反映？

(10) 能否在理论上统一地反映一切已知的粒子和它们之间的一切已知的相互作用？

以上是我们所面临的有待解答的问题的一个简短的罗列，当然远不是全部。为了解答这些问题，正在多方探索，但如前所述，进展很少。

目前所有可靠的实验结果都和标准模型理论的结果不矛盾，这当然是令人感到满意的事。但从另一个角度看，这表明迄今为止，所有的实验中还没有能够有一个冲出标准模型理论能够应用的范围的边界。现在迫切需要实验发现新的、超出标准模型理论成立范围的现象，为理论探索指路。