

# 高能物理四十年来的发展

朱 洪 元

(中国科学院高能物理研究所)

本文综述了四十年来高能物理在国际上的进展和所取得的主要成果,介绍了建国以来我国高能物理的发展和所取得的主要成果,展望了未来的发展。

高能物理研究是在原子、原子核和宇宙线研究中诞生的。在1948年,人们利用当时建成的能量最高的同步回旋加速器第一次人工产生了 $\pi$ 介子,这才开始有可能对高能物理现象进行系统的研究。高能物理也就开始成为物理学中一个独立的分支学科。它是当前研究微观世界的最前沿,并开始对宇宙演化的探索产生影响。四十年来,加速器的能量增加了几千倍,探测技术和数据处理技术也在迅速发展,高能物理研究的领域也日益扩大,研究在不断深入,取得了一系列重要的成果。

四十年来人们发现了数以百计的前所未知的粒子,并且发现所有这些粒子,包括早已发现的电子和质子在内,都能产生和消灭,无一例外。人们还发现,这些粒子都是配成对的。配成对的粒子一部分性质完全相同,一部分性质完全相反,这种配成对的粒子称为正、反粒子对。粒子有正、反,都能产生、消灭,看来这些跟空间有左、右,时间有过去、未来是同样地重要和基本。

另一个重要的发现是,绝大多数粒子都具有内部结构,都是由更基本的组元组成。这是比原子核更深一个层次的结构。这种更基本的组元在国外称之为“夸克”,在国内有一部分高能物理学工作者称之为“层子”。因为他们认为,即使层子也不是什么物质的最终单元,也只是物质结构中的一个层次而已。

在所发现的粒子之间都存在相互作用。到目前为止,已经发现的基本相互作用有四种,即万有引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用

和强相互作用。它们各自的强度可以用下列四个无量纲常数来表达。

(1) 万有引力相互作用:

$$\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} = 5.9 \times 10^{-39},$$

(2) 电磁相互作用:

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137},$$

(3) 弱相互作用:

$$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} = 1.0 \times 10^{-3},$$

(4) 强相互作用:

$$\frac{g_s^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{7},$$

其中  $G_N$  为万有引力常数,  $e$  为电子电荷,  $G_F$  为费米弱作用常数,  $g_s$  为强相互作用常数,  $m_p$  为质子质量。

可以按照其参予相互作用的性质,将已经发现的粒子分为三类。一类是传递相互作用的粒子,它们是传递电磁相互作用的光子 $\gamma$ ;传递弱相互作用的三种中间玻色子 $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ;理论上预言的传递强相互作用的八种胶子(实验上已经发现其存在的初步迹象)。至于引力场虽然早已发现,但相应的引力场量子——引力子迄今还没有发现。因为万有引力相互作用非常弱,在实验上难于探测到。

其余的粒子按照其是否参予强相互作用分为两类:强子和轻子。轻子不参予强相互作用。已经发现的轻子有三代,每代有两种,共六种,分别以符号

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

表示,其中  $e$  代表电子,  $\mu$  代表  $\mu$  子,  $\tau$  代表  $\tau$  子. 它们具有相同的自旋和电荷.  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  代表相应的中微子. 与上述六种轻子相应, 存在六种反轻子.

强子均参予强相互作用, 而且均具有内部结构. 构成强子的层子共有三代, 每代三组, 每组二种, 共 18 种. 它们分别以符号

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

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

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

代表, 其中  $t^R, t^G, t^B$  几年前在实验上似乎有存在的迹象, 但还没有被尔后的实验所证实. 根据最近的实验事实, 理论推测其质量在  $50\text{GeV}/c^2$  以上. 与 18 种层子相应, 存在 18 种反层子.

轻子和层子有区别, 但也有共性, 它们的自旋均为  $\hbar/2$ , 它们都有三代, 而且都是两种形成一组, 可以将它们排列成如表 1 所示. 表 1 在

表 1

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

形式上和化学元素的周期表有相似之处. 为了解释已有的实验结果和保证理论的内部的自洽性, 也要求它们的性质都这样相匹配.

空间、时间是物质最普遍的存在形式. 一切物质都存在于空间、时间之中, 一切粒子都具有空间坐标和时间坐标, 无一例外. 空、时自由度称为外部自由度, 形成一个非紧致的四维流形. 以后发现了一系列物质存在的特殊形式, 形成一系列内部自由度. 最早被发现的物质存在的特殊形式是电和磁. 这种内部自由度形成

一个紧致的一维流形. 在原子核研究中发现了另一种内部自由度——同位旋. 它形成一个紧致的二维流形. 在高能物理研究中发现了层子和轻子这两种物质存在的特殊形式, 相应的自由度各自形成一个紧致的一维流形. 还发现每代层子均有三组, 相应的自由度形成一个紧致的三维流形. 由于原色也有三种: 红、绿、蓝, 所以将“色”这个词借用过来, 称这种自由度为色自由度, 并以  $R, G, B$  这三个字母来标志这三维. 已经发现的层子和轻子各有三代, 到底有几代目前还不清楚, 因此“代”这种自由度形成什么流形还不清楚.

深入的研究发现, 基本物理规律对于外部自由度和内部自由度中的许多变换具有不变性. 假使这种不变性是整体性的, 就存在与之相应的守恒定律. 例如, 基本物理规律对于空间坐标的转动具有不变性, 与之相应就存在角动量守恒定律. 由于类似的原因, 存在轻子数守恒定律与层子数守恒定律. 假使基本物理规律的某种不变性是定域性的, 则与之相应, 不仅存在某种守恒定律, 而且导致某种基本相互作用. 例如, 基本物理规律对于时、空坐标平移具有定域不变性, 与之相应, 一方面导致动量、能量守恒定律, 另一方面又导致万有引力相互作用. 由于基本物理规律对于在同位旋空间的定域  $SU(2)$  变换和超荷空间的定域  $U(1)$  变换具有不变性, 这就一方面导致同位旋守恒定律和电荷守恒定律, 另一方面导致弱相互作用和电磁相互作用. 由于基本物理规律对于色空间中的定域  $SU(3)$  变换具有不变性, 这就一方面导致色荷守恒定律, 另一方面又导致强相互作用.

因此, 目前已经发现的四种基本相互作用均来源于基本物理规律对于定域变换的不变性. 传递这些基本相互作用的场统称为规范场. 这是它们的共性. 但是它们也有各自的特殊性. 它们的相互作用强度很不相同, 而且相互作用的范围和相互作用的强度成反比. 所有的粒子都参予万有引力相互作用, 但胶子就不参予弱相互作用. 胶子和所有的中微子和反中微子都不参予电磁相互作用, 只有层子、反层子

和胶子参与强相互作用。万有引力相互作用和电磁相互作用是长程力，而强相互作用和弱相互作用则是短程力。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。但是在其他基本相互作用中，这些力学量都是守恒的。强相互作用也有它自身的特点，它的强度随着强作用过程中动量传递的增加而减小。这种性质称为“渐近自由”。在另一方面，即使用目前能量最高的加速器所加速的粒子也没有能将层子从强子中打出来，使之处于自由的状态。这种性质称为“囚禁”。

从实验结果看，许多对称性是严格的。例如，动量、能量守恒定律，电荷守恒定律，轻子数守恒定律，层子数守恒定律等是严格的。但有些对称性并不严格。例如，同位旋就不严格守恒。这是由于，虽然基本物理规律具有一系列对称性，对于一系列变换具有不变性，但是物理真空作为物理基本方程的基态的解并不是对于这一系列变换都是不变的，对于其中某些变换就要变。这种机制称为对称性的“自发破缺”。这种自发破缺机制就会导致对称性并不严格的物理现象。例如， $c$  层子和  $s$  层子属于同一个同位旋二重态，假使同位旋严格守恒，它们的质量应该严格相等，但实验上这二种层子的质量相差三倍。又例如，假使某一种定域对称性严格成立，那么传递相应的基本相互作用的粒子的质量应为零。但实际上，传递弱相互作用的粒子的质量不为零，而且并不相等。 $W^+$ 、 $W^-$  的质量约为质子质量的 86 倍， $Z^0$  的质量约为质子质量的 98 倍。

正是由于除空间、时间形成的外部自由度以外，还存在一系列不同的内部自由度；基本物理规律具有一系列对称性，其中一部分对称性又自发破缺，所以物理现象才如此千变万化，千差万别。

经过几代实验和理论物理学工作者的努力，现在对于微观世界物质存在的形式和它们之间的相互作用和相互转化的规律有了比较深刻的认识。万有引力的理论——广义相对论，创立于 1915 年。电磁相互作用和弱相互作用的统

物理

一理论建立于 1967 年。当前正在集中力量研究的一种强相互作用理论——量子色动力学创建于 1973 年。电弱统一理论和量子色动力学合称为“标准模型理论”。

到目前为止，仅有四种实验可以足够精确地检验广义相对论。广义相对论成功地经受了这些检验。电弱统一理论也通过了所有已经进行的实验检验。量子色动力学由于强相互作用在数学上难于精确处理，因此对它用实验来进行严格的检验目前还有困难。但是迄今还没有发现量子色动力学和实验之间存在确实的矛盾，它们在误差范围内是符合的。当然理论处理的误差可能相当大。

这些当然是重大的成就，但还需要用实验进一步对标准模型进行检验。这一理论所预言的  $t$  层子以及对对称性自发破缺起关键作用的希格斯粒子至今还没有在实验上被发现。这一理论所含有的许多参数中有相当一部分的数值远没有确定或确定得不够精确，有待实验和理论研究合作来加以确定。相互作用中规范场的三次项和四次项以及所有涉及到希格斯场的项迄今还没有实验能加以检验。在另一方面，基本理论的具体内容，它包括哪些类型的解，还有待进一步探索。在已经求得的解中有许多解的精确度有待提高，使实验能对它进行更严格的检验。

从理论本身的结构看，其中显然还包含着相当大分量的现象性成分。一个具体体现是理论中所包含的无量纲参数多达 18 个。已经发现了那么多的内部自由度，但对这些自由度之间的联系还认识得很少，表现在基本相互作用常数有四个之多。我们还不知道为什么有些对称性是整体性的，而另一些对称性是定域性的？为什么层子和轻子在这些对称群中取这些具体表示？对称群的自发破缺的实质是什么？对此我们一无所知。这具体表现在来源于这方面的 15 个参数中。此外，作为万有引力的基本理论——广义相对论在量子化以后出现的发散，甚至用重正化方法也无法处理。

广义相对论和标准模型理论的建立是物理

学发展中的里程碑,但显然不是终点.它们应该看作是一个新的起点.必须探索是否存在未知的物质及其存在形式和相应的未知的自由度.必须进一步探索各种自由度之间的联系,使相应的各种流形综合成一个有机的整体.必须探索是否存在更多、更大的对称性?是否存在未知的基本相互作用?为什么与各种粒子相应的场形成对称群的那些具体表示?对称性破缺的实质是什么?是否存在更深层次的物质结构?这些探索将使我们对微观世界作为一个有机整体有更全面、更深入的理解.

这些年来,已经开始在理论上进行探索.但归根到底,认识来源于实践,必须进行更全面、更深入的实验研究,为理论探索指明方向.如前所述,“标准模型理论还需要用实验加以进一步检验.美国、欧洲和日本已建成的加速器和碰撞机将继续发挥作用,我国在1988年10月实现对撞的北京正负电子对撞机也即将发挥作用.位于日内瓦附近、周长为27km、质心能量为200GeV的正、负电子对撞机将于今年实现对撞.周长为84km、质心能量为40TeV的质子对撞机已经进行多年预制研究,地址选定在美国得克萨斯州,计划在1995年实现对撞,希望在本世纪九十年代能够得到突破性的实验结果.

四十年前中华人民共和国建国时,我国的高能物理研究是一片空白.建国以后首先利用宇宙线开展高能物理实验研究,同时开展粒子物理理论研究.1956年,当时的社会主义阵营在苏联杜布纳建立联合原子核研究所.我国是该所创建成员国之一,于是开始利用高能加速器进行高能物理实验研究.

建国初期,首先利用我国的地理优势开展宇宙线研究.在云南落雪山海拔约3200m处建立宇宙线实验站,用云室开展高能核作用和奇异粒子的研究,收集到的奇异粒子事例数在当时国际宇宙线研究各实验站中名列前茅,用以研究了奇异粒子的产生过程和奇异粒子的各种性质.研究了入射能量高于当时加速器的最高能量的高能核作用.发现在重核靶的情况

下,次级粒子的横动量主要分布在 $570\text{MeV}/c$ 的区域.此外,还较早地观察到二喷注现象.在六十年代,建造了一组三个大云室,这是当时世界上规模最大的云室组之一.在文化大革命时期的极端困难的条件下,测量了海拔3220m处的 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子和质子的流强以及动量在 $10-25\text{GeV}/c$ 区域的反质子流强.

为了研究当时的加速器能量还达不到的超高能现象,于1977年开始在西藏甘巴拉山海拔5500m处建立高山乳胶室,用以研究 $10^{14}-10^{16}\text{eV}$ 甚至更高能量的超高能现象.现在其规模已与国际上三个著名的高山乳胶室实验站相当.而且在高度上占有优势.累积了一批当时加速器能量所达不到的超高能作用事例,发现了一些罕见的大横动量传递事例,还发现了一些终态包含有许多粒子形成几个团的事例.最近又发现,终态粒子形成环状分布的事例.近年来,在空间数据分析方法和解释工作方面也取得了重要的进展.

在对撞机出现以后,可供研究的现象的质心能量大为提高.现在能量最高的对撞机的质心能量已相当于宇宙线中 $1.7 \times 10^{15}\text{eV}$ 的入射能量.因此,近年来宇宙线研究的重点逐步从高能物理转向高能天体物理,包括宇宙线的起源.为了在高空观测从宇宙空间飞来的、还没有和大气发生作用的原始粒子,我国开始发展自己的高空科学气球系统.从体积为几千立方米的气球开始,现在已经研制成体积为40万立方米的大型气球.气球升空最高已达38km,最长滞空时间已达18h.已经利用气球携带硬X射线望远镜,用以观察蟹状星云中的脉冲星和天鹅座X-1等天体,获得了蟹状星云中脉冲星硬X射线辐射的周期位相结构、天鹅座X-1硬X射线的能谱等结果.

我国利用高能加速器开展高能物理实验研究始于1956年.作为联合原子核研究所的成员国,我国承担该所经费的20%.我国派去该所工作的科技人员前后共百余人.他们利用该所当时世界上能量最高的质子同步加速器进行高能物理实验研究工作.曾经用泡室研究奇异

粒子,用核乳胶研究高能粒子的相互作用。在这能量为  $10\text{GeV}$  的加速器上所取得的最重要的研究成果是王淦昌领导的研究组发现了反西格马负超子。这是世界上第一个被发现的带奇异量子数的荷电重子的反粒子,为粒子配成正、反粒子对的规律提供了重要的实验依据。

1960年苏联撤走全部来华专家。此后在联合原子核研究所工作的中国科学工作者的处境日益困难。到了1965年,我国的科技人员实际上已无法在该所进行工作。于是我国政府决定退出该所,同时计划建设我国自己的高能物理实验研究中心。但由于不久后文化大革命开始而未能实现。

1972年,张文裕等18位科技工作者联名给周恩来总理写信,反映关于发展我国高能物理的意见和希望。周恩来总理亲笔回信批示:“这件事不能再延迟了。科学院必须把基础科学和理论研究抓起来,同时又要将理论研究和科学实验结合起来。高能物理及高能加速器预制研究应该成为科学院要抓的主要项目之一。”经全国有关单位和专家反复论证,最后确定以超高能质子加速器为开展高能物理实验研究的主要方向。但由于文化大革命尚未结束,实际上工作很难进行。

1977年制订了全国自然科学发展规划,决定作为发展高能物理实验研究的第一步是建造一台能量为  $50\text{GeV}$  的质子同步加速器。此加速器计划于1982年建成并开展实验研究工作。于是,高能加速器的研制工作正式开始。从1978年起,我国陆续与国际上最重要的高能物理研究中心建立联系,陆续派出科技人员参加国际上重要的高能物理实验研究工作。

不久后发现,文化大革命给我国国民经济造成的损失远比所估计的要大。于是,整个国民经济发展规划必需进行调整。高能物理发展规划也必须随之进行调整。1980年上级决定  $50\text{GeV}$  质子同步加速器缓建,先在中国科学院高能物理研究所建设一个高能物理实验研究的小基地。经过国内专家反复论证,并征求国外同行的意见,决定建造一台质心能量在  $3-4.4\text{GeV}$

物理

区域,以后可以提高到  $5.6\text{GeV}$  的正、负电子对撞机,亦即北京正、负电子对撞机和相应的探测谱仪与数据处理系统,用以进行粲粒子和  $\tau$  轻子的实验研究。提出这一方案的根据是:

(1) 这一研究领域虽然于1974年开辟,但还有一批物理上有意义的工作有待去做。对撞机有一个特点:每一台对撞机的亮度只能在一段能区达到高水平,在这一能区以外,亮度就迅速下降,很难用以进行有意义的实验研究。尽管当时的  $e^+e^-$  对撞机的质心能量最高已达  $46\text{GeV}$ ,但它们在  $3-5.6\text{GeV}$  能区并没有多大的竞争力。

(2)  $e^+e^-$  对撞机所产生的同步辐射有非常广泛的应用,可用于原子、分子物理,凝聚态物理(包括表面物理和界面物理),化学,材料科学,生物学,医学,计量科学,微电子学的研究。

(3) 所需经费远较建造  $50\text{GeV}$  质子同步加速器所需的经费要少,可以承担得了。

但是作出这一决定在当时是相当困难的,因为有两个担心:

(1) 技术问题:建造  $e^+e^-$  对撞机的技术远比建造质子同步加速器的技术先进和困难。第一台强聚焦质子同步加速器于1959年建成。第一台  $e^+e^-$  对撞机于1969年建成。在同一能区的  $e^+e^-$  对撞机 SPEAR 是在1974年建成的,它对粲粒子物理和  $\tau$  轻子物理研究作出了重要的贡献。但北京正、负电子对撞机的亮度要求比 SPEAR 的亮度高5—10倍,因此在技术上属于八十年代水平。若我国不能解决这些高技术问题,对撞机的性能达不到设计指标,就做不出一批有意义的研究成果,那该怎么办?!

(2) 进度问题:若进度拖了下来,建成时这一能区的物理窗口已基本关了,那该怎么办?!

北京正、负电子对撞机建造的实际进程及其性能已经达到的指标已由方守贤同志在中国物理学会第四届第二次理事会上作了介绍。探测谱仪也已经建成,经过调试,即将推到对撞点,收集实验数据。

在粒子物理理论方面,五十年代国内就开始开展研究工作。人们将 V-A 弱作用理论应用于一系列弱作用过程的研究,对盖尔曼等人提出的部分膺矢流守恒定律进行了较严密的理论上的证明。这一观念直接促进了流代数理论的建立,并对弱相互作用基本理论的建立起了重要的促进作用。人们研究了当时流行的利用分波展开法,从色散关系中推导出散射振幅的动力学方程,指出这种方法所用的近似导致所得结果隐含有不自洽的奇异行为,从而否定了这一当时流行的研究方向。在散射振幅的研究中,首先引进了螺旋振幅的表达方法。

从 1965 年秋到 1966 年春,提出了强子结构的层子模型理论。这一模型引进强子内部波函数的原点值和始末态强子波函数的重叠积分;通过强子波函数,将强子的电磁作用过程和弱作用过程联系起来;通过基本相互作用,将介子过程和重子过程联系起来。这一批研究工作和国际上同时开辟了强子结构理论这一研究领域。研究层子模型的工作对我国粒子物理理论的发展起了很好的作用,可惜由于文化大革命开始,使得这一蓬勃发展的工作遭到中断。

正是在文化大革命期间,粒子物理理论在国际上取得了突破性的进展。1967 年提出了电弱统一理论,1973 年提出了量子色动力学。而在这期间我国的基础科学研究受到极大破坏,几乎无法进行。只是在 1972 年到 1975 年期间,周恩来总理多次指示要加强基础研究,粒子物理理论研究才略有恢复。人们研究了处理波函数解的方法,用以探讨束缚态波函数,推广束缚态场论,探讨规范场和纤维丛之间的关系,并对引力规范理论也进行了研究。

在文化大革命结束以后,由于标准模型理论在理论概念方面的基础是规范场,所以立刻

开始了关于规范场的研究。从规范场的经典解(包括磁单极解和瞬子解)及其性质的研究开始,发展到系统地研究规范场论的大范围性质,包括反常的研究。此外,还开展了陪集规范场的研究。

在强子结构、强作用过程和量子色动力学方面,开展了关于胶子球和四夸克态的模型理论研究。研究了重夸克偶素的强子跃迁过程。研究了在量子色动力学中如何连接小距离和大距离的强作用过程,如何改进微扰论计算,将非微扰效应考虑进去,得到波函数的一般求和规则。在格点规范场理论方面,研究了解析求解方法,解决了平均场方法和定域规范不变性之间的矛盾,从而发展了一套有效的计算方法。

在电弱统一理论和弱作用的现象性理论方面,讨论了如何消除拉氏量中实际上不引起 CP 不守恒的相因子。结合实验对中微子质量问题进行了系统的研究,讨论了假使中微子既有狄喇质量,又有马约喇纳质量的情况下,中微子振荡的新方式。

在散射理论方面,系统地研究 Levinson 定理,并将其推广到相对论的情况。与上述一系列研究进行的同时,也进行探索如何超过标准模型理论的途径。探讨了如何建立将代的自由度也包括进去的大统一理论。此外,在建立复合粒子模型理论方面也进行了一系列研究工作。在超对称和超引力方面也进行了研究。最近几年,在弦理论方面也开展了研究工作。

当前,高能物理这一研究领域实际上主要由美国、西欧、日本、苏联占领。根据建国以来我国高能物理发展的历史看,虽然经过十年动乱,只要政府支持,各方面合作,经过艰苦努力,在本世纪末我国完全有可能在国际高能物理界占有一席之地。

(上接第 539 页)

- [11] B. Abeles and T. Tiedje, *Phys. Rev. Lett.*, 51(1983), 2003.
- [12] J. Kakalios and H. Frützche, *Phys. Rev. Lett.*, 53(1984), 1602.
- [13] T. Tiedje and B. Abeles, *Appl. Phys. Lett.*, 45(1984), 179.
- [14] S. Tsuda et al., Proceedings of the 2nd International PVSEC (1986), Beijing, China, 409.
- [15] M. Tsukude and M. Hirose, *J. Non-Cryst. Solids*, 97 & 98(1987), 317.
- [16] Reported at 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1988, Las Vegas, Nevada.
- [17] Research & Development, April, (1988), 50.
- [18] P. G. Lecomber, *J. Non-Cryst. Solids*, 97 & 98(1987), 325.