



高能物理学 *de* 发展及其展望

朱 洪 元*

高能物理学、亦称粒子物理学，是在原子、原子核和宇宙线的研究中诞生的。在原子的研究中发现了电子和光子，建立了量子力学和量子电动力学。量子电动力学是一种最简单的量子规范场论。以后提出的量子非阿贝尔规范场论是当前粒子物理基本理论的基础。在原子核的研究中发现了质子和中子，并且发现：除了二十世纪以前发现的万有引力相互作用和电磁相互作用以外，自然界还存在着另外两种基本相互作用：强相互作用和弱相互作用。这四种基本相互作用的强度可以用下列四个无量纲常数表达：

(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) 强相互作用

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

(4) 弱相互作用

$$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} = 1.0 \times 10^{-5}$$

其中 G_N 为万有引力常数， e 为质子电荷， G_F 为费米弱相互作用常数， g_s 为强相互作用常数， m_p 为质子质量， c 为光速， \hbar 为普朗克常数 h 除以 2π 。在宇宙线研究中发现了 μ 子、 π 介子和奇异粒子。

在 1948 年，第一次用加速器人工产生了 π 介子。由于高能加速器所提供的高能粒子非常多，因此有可能用对高能物理现象进行比较系统的研究。于是高能物理开始成为物理学中一个独立的分支学科，处于探索微观世界的现象和规律的最前沿。由于加速器技术，粒子探测技术和实验数据处理和分析技术的迅速发展，高能物理研究也迅速发展。

到现在为止，已经发现了数以百计的粒子。系统的研究发现：所有已经发现的粒子都能够产生、消灭和相互转化。没有一种粒子是不生不灭的，包括电子和质子在內，无一例外。进一步的研究发现：所有这些粒子都是配成对的。配成对的粒子称为“正、反粒子”。正、反粒子的一部份性质完全相同，另一部份性质完全相反。例如：电子和正电子就是一对正、反粒子。它们的质量和自旋完全相同，它们的电荷和磁矩的大小完全相同，但符号完全相反。也有少数正、反粒

* 中国科学院学部委员，中国科学院高能物理研究所研究员

因此常用黑子数来作为太阳活动的一个指标。即使如此，我们也要明白，是太阳总的活动影响到地球物理现象与人类的活动。

陈：太阳黑子变化有什么规律性？

王：太阳黑子数每天不一样，在每年取一个平均值时，就发现黑子数的年均值有 11 年左右的周期（图 3）。从黑子磁场极性转换来看，具有 22 年周期（称磁周期）。此外，太阳活动还有 80—90 年的“世纪周期”及更长的周期。如果以 11 年基本周期来说，黑子数最少的年称为谷年，最多的年称为峰年。国际上规定从 1755 年起作为第 1 周，然后顺序排列下来，到现在已是太阳活动的第 22 周了。本周期的起点在 1986 年，峰

年期可能在 1989 年底到 1990 年初。但是各位专家的预报很不一样。从 1989 年三月份太阳上出现大黑子群以来，每天出现的黑子是很的，从发展趋势看，太阳活动高峰期是快到了。

随着太阳活动高峰的到来，太阳活动对地球的影响也增大。世界性的天气反常，各地旱涝频繁；地震频度与强度大为增高；心血管疾病加重；交通事故增加等等，都会出现。因此，各方面都在加强对太阳活动以及“日地关系”的研究。

陈：好！今天已占去您很多时间了。谢谢！

王：不谢。再见！

子的所有性质完全相同,那末它们就是同一种粒子.光子就是这种粒子的一个例子.

看来粒子有正、反,都能产生和消灭这种普遍性质和空间有左、右,时间有过去和未来同样重要和基本.

可以将实验上已经发现的粒子分为三类.第一类是传递相互作用的粒子.已经发现的是传递电磁相互作用的光子和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在实验上已经发现其存在的初步迹象.但理论上预言的传递万有引力相互作用的引力子迄今在实验上还没有被发现.

其它的已经发现的粒子可以按照其是否参与强相互作用分成两类.一类不参与强相互作用,统称为“轻子”.已经发现的轻子共有三代,每代二种,共六种,它们分别以如下的符号

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

表示.它们的自旋均为 $\hbar/2$,因此都是费米子.其中 e 代表电子, μ 代表 μ 子, τ 代表 τ 轻子.它们带的电荷都相等,但它们的质量相差很大.与之相应的 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 均不带电,统称为中微子.中微子的质量很难测量,至今只测量出它们质量的上限,这种上限比相应的荷电轻子的质量小得很多.与轻子相应,存在三代六种反轻子.

其余的都参与强相互作用的粒子统称为“强子”.实验上已经发现的数以百计的粒子绝大多数是强子.在五十年代,发现强子不是没有大小的点粒子.它们都有一定的大小.例如:质子和中子的半径均约为 0.8×10^{-13} 厘米.在六十年代,进一步发现强子内部还有带点电荷的东西.它们在强子内部可以相当自由地运动.在国外,它们被称为“夸克”、“反夸克”或“部分子”.在国内有一部份物理学家将它们称为“层子”、“反层子”.因为他们认为:即使层子也不是物质结构的最终单元,只不过是物质结构中的一个层次而已.

组成强子的层子也有三代,每代又有三组.由于原色也只有红、绿、蓝三种,所以分别用字母如 R、G、B 来标志这三个组.每一组又包含有二种层子.因此层子共有十八种.它们分别以如下的符号代表.其中 t

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

层子、亦称顶层子、在几年前在实验上似乎看到其存在的迹象,但还没有为以后的实验所证实.层子的自旋也都是 $\hbar/2$,因此也都是费米子.设以 e 代表质

子的电荷,则 u 、 c 、 t 层子的电荷均为 $(2/3)e$,而 d 、 s 、 b 层子的电荷均为 $-(1/3)e$. u 、 d 、 b 、 c 、 s 、 t 、 b 层子的质量也相差很大.与十八种层子相应,存在着十八种反层子.

轻子和层子有区别,但也有共性.它们的自旋均为 $\hbar/2$,它们都是费米子.它们都有三代,而且都是二种形成一组.可以将它们排列成下表:

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

它在形式上和化学元素的周期表有相似处.为了解释已有的实验结果和保证理论内在的自洽性,也要求它们的性质这样相匹配.

空间、时间是物质存在的最普遍形式.一切物质都存在于空间、时间之中.一切粒子都具有空间座标和时间座标,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二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,相应的自由度称为色自由度,形成一个紧致的三维流形.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”这种自由度在数学上应由什么样的流形来反映还不清楚.

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座标的转动具有不变性,与之相应就存在角动量守恒定律.由于类似原因,存在轻子数守恒定律和层子数守恒定律.假使基本物理规律的某种不变性是定域性的,则与之相应,不仅存在着某种与之相应的守恒定律,而且导致某种与之相应的基本相互作用.例如:基本物理规律对于时、空座标平移具有定域不变性,则与之相应,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中的定域 $su(2)$ 变换和超荷空间中的定域 $u(1)$ 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,在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 $su(3)$ 变换具有定域不变性,这就一方面导致色荷守恒定律,在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。来自内部自由度的定域不变性又称为“规范不变性”。来源于定域不变性是四种基本相互作用的共性。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，而且相互作用起作用的范围的大小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。但胶子不参予弱相互作用，胶子和所有中微子都不参予电磁相互作用。只有层子、反层子和胶子参予强相互作用。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，正反粒子共轭 C 不守恒， CP 也不守恒。但是在其它基本相互作用中， P 、 C 和 CP 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和胶子打出来，使单个层子和单个胶子处于自由状态。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，轻子数守恒定律，层子数守恒定律、电荷守恒定律等。但有些对称性并不严格。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，对于其中某些部份变换就要变，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不严格的物理现象。例如：质子和中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，但它们的实验值并不相等。又例如：假使某一种定域对称性严格成立，没有自发破缺，那末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，而其中一部份对称性又自发破缺，物理现象才既有如此强的规律性，而又如此千变万化、千差万别。

经过几代实验和理论工作者的努力，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。关于万有引力的理论：广义相对论创立于 1915 年，电磁相互作用和弱相互作用的统一理论：电弱统一理论建立于 1967 年，当前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”。

由于万有引力相互作用太弱。到目前为止仅有四种实验足够精确到可以用来检验广义相对论和牛顿万有引力理论之间的差别。广义相对论成功地经受了这

些检验，而牛顿的万有引力理论没有能够通过这些检验。由于物质普遍具有粒子、波动二重性，理论预言存在引力波和引力子，但这些迄今在实验上还没有观察到。这也不足为奇，因为万有引力相互作用太弱，引力波和引力子在实验上非常难于观察。标准模型理论已经成功地通过了迄今为止所有可靠的实验的检验。这当然是重大的成就，但是这方面的实验检验还远不够全面，许多实验也还不够精确。因此实验研究有待进一步扩充和提高。例如：这一理论所预言的，层子和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。这一理论所含有许多参数有相当一部份的数值还没有被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牵涉到希格斯场的项迄今还没有实验能加以检验：已经求得的，能够用实验加以检验的基本理论的解还远不够系统。基本理论包括有那些类型的解，它们各具有那些特性，还需要进行系统的研究。即使已经求得的解中还有许多解的精确度有待提高，使实验能对之进行更严格的检验。

广义相对论和标准模型理论的建立是物理学发展过程中的里程碑，但显然不是终点。它们应该被看作是一个新的起点，必须探索是否存在未知的物质存在的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为一个有机的整体。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？总的目标是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、更深入的实验研究以进一步检验现有的理论，并为探索更基本的理论指引方向。

高能物理实验的主要过程是：加速粒子，使之获得很高的能量；使高能粒子相互碰撞，并观察其运动、转化和衰变过程；从而发现新的粒子和新的现象；从大量这类实验研究中总结出高能物理运动和转化过程的经验规律，用以进一步检验现有的理论，并为理论的进一步发展指引方向。因此首先需要高能粒子加速器和高能粒子对撞机来提供高能粒子，使之进行碰撞，产生高能物理运动和转化的现象。为了观测这些现象，需要灵敏和准确的观测手段：粒子探测系统。观测所得到的信息量很大，必须及时记录下来，这就需要先进的电子技术，记录下来的信息必须进行周密的处理，使之成为便于分析整理，这就需要的计算技术。

在七十年代中期以前，产生高能粒子主要用高能粒子加速器。在七十年代初，对撞机开始建成应用，其优越性很快显示出来。在七十年代中期以后兴建的几

乎都是对撞机。

加拿大等国正在筹建能量为 30GeV ，流强为 $100\ \mu\text{A}$ 的质子同步加速器，因此流强比以前同样能馈加速器的流强高一万倍，用以对含有 s 层子的 K 介子进行更系统、更精密的研究。目前用于研究含有 c 层子的强子：粲粒子的有美国的正、负电子对撞机 SPEAR 和质子同步加速器 Tevatron，后者是利用它所产生的能量约为 150GeV 的光子束和硅微带顶角探测器进行粲粒子研究的。最近建成的北京正负电子对撞机 BEPC 的亮度已经为 SPEAR 的亮度的四倍，将用于更系统、更深入的粲粒子和 τ 轻子的研究。国际上正在开始讨论建造亮度比 BEPC 还高一百倍的正负电子对撞机，用以研究粲粒子。目前国际上用于研究含有 b 层子的强子： γ 粒子和 B 介子的有二台正负电子对撞机。一台是美国的 CESR，另一台是联邦德国的 DORIS。国际上正在讨论建造亮度比它们高得多的正负电子对撞机，用以更全面、更深入地研究 B 介子。日本建造的质心能量约为 60GeV 的正负电子对撞机 TRISTAN 已经工作了二年，取得了一些有意义的成果。

为了开辟更高能区的研究领域，西欧曾用以发现 W^+ 、 W^- 、 Z^0 的正、反质子对撞机 SP \bar{P} S 的质心能量已经提高到 630GeV ，在脉冲工作状态时质心能量可高达 900GeV 。美国在 Tevatron 的隧道内安装上超导磁体，建成正、反质子对撞机，质心能量已达 1800GeV 。美国已经建成质心能量为 100GeV 的正、负电子直线对撞机 SLC。西欧的环形正、负电子对撞机 LEP 也于最近建成，其隧道的周长为 27 公里，现在的质心能量为 110GeV ；将来改用超导高频加速腔以后，质心能量将提高到 200GeV 。西德建造的电子、质子对撞机 HERA 也将在不久后建成，其质心能量为 290GeV 。

这些新建成的和新改建的高能对撞机将在本世纪九十年代发挥重要的作用。现在美国正在筹建质心能量高达 40000GeV 的质子、质子对撞机。西欧则正在讨论在 LEP 的隧道内安装超导磁体，建造质心能量为 16000GeV 的质子、质子对撞机。希望用这两台对撞机在本世纪末或下世纪初能在高能物理实验研究上取得突破性的进展。

在高速粒子的过程中将产生很多粒子，必须探测产生了多少粒子，辨认各个粒子的种类，测量其行迹、动量和能量。因此当前所用的探测设备是各种探测手段的综合体。而且对其测量粘度的要求愈来愈高。由于粒子的能量愈来愈高，穿透能力愈来愈强，为了准确测量其动量，需要很强的磁场和很长的径迹，或很厚的量能器。为了辨认不同种类的粒子，探测手段必须多样化，而且规模大。目前常用的探测手段包括：漂移室、时间投影室、簇射计数器、飞行时间计数器、轻子量能器、强子量能器、切伦科夫探测技术、 μ 子鉴别探测器、产生强磁场装置、触发判选系统等。由于碰撞中产

生的粒子多，能量高，所需测量的物理量也多，因此一个实验事例所包含的信息量很大，已经需要五十万路左右电子学读出线路系统来加以采集、变换和储存。

现在一个高能物理实验常常需要收集几十万、几百万、几千万、甚至上亿个事例，而每个事例的信息量又很大。处理这样大的信息量，以从中得到具体的物理结果需要很大的计算中心。现在世界上的高能物理研究所的最大的计算中心已经具有每秒钟执行几十亿条指令的能力。预计到本世纪末和下世纪初，一系列已经发现的粒子的性质及其反应过程和衰变过程将会得到更精密的测量；将会发现标准模型理论所预言但迄今尚未发现的一部份新粒子和新现象。希望能够发现超出标准模型理论范围以外的新粒子和新现象。

可能许多人会问：为什么要投入那么大量的人力、物力来进行高能物理这样的基础研究？这到底会带来什么经济效益和社会效益？现在对此还很难提出具体的答案。但认识自然是改造自然的基础。当法拉第、麦克斯韦等研究电磁规律的时候，当时人们大概也没有想到这些研究工作会带来什么经济效益和社会效益。但是现在到处都应用的发电机、电动机、电灯、电话、电极、无线电等都是建筑在他们所发现的规律的基础之上的。假使没有电气化，那末社会将是一个什么样的社会？经济又将是什么样的经济？从上世纪末到本世纪二十年代研究原子结构，建立量子力学的时候，那时这些科学家可能也想不到他们的研究将带来什么样的经济效益和社会效益。但正是这些研究使人对半导体有深刻的认识，从而导致电子技术、计算技术、通讯技术革命性的进展。新的工业部门应运而生，其产品不仅进入各种各样的产业部门，甚至在日常生活中也到处可见。至于关于原子核的研究，卢瑟福本人在 1937 年逝世前不久还认为这种研究不会有什么实际用处。但 1939 年就发现了核裂变，不久以后就出现原子弹、接着又制成利用核聚变的热核武器。对全世界的政治产生重大影响。能源问题的最终解决可能还得依靠核聚变所释放的能量。

为开展高能物理研究所发展的技术已经有一部份得到应用。医用和其它产业用的加速器的产值迄今已达几百亿美元。正、负电子对撞机中的正、负电子束放出非常强的电磁辐射，称为同步辐射，其亮度较二十年前的 X 光机所产生的 X 光高一万亿倍，不仅在物理学、化学、生物学、地学、医学、材料科学等的研究中有广泛的应用，也已经开始用于制造非常精细的集成电路，其元件密度可较前提高一百倍到一千倍。加速器也已作为离子掺杂的工具，用于生产集成电路，进入很大的市场。探测技术在许多方面，特别是在医疗诊断方面，也已经得到重要的应用。当然，这些还都是短期效益。在认识了高能物理的基本规律以后，将带来什么样的经济效益和社会效益，将由历史来作出判断。