



微观世界的研究

谈高能物理的现状

叶 铭 汉

高能物理又名粒子物理，研究物质的最基本的组成部分，也就是微观世界的粒子的性质及其相互作用、运动规律。物质究竟是由什么基本的东西所组成的，这是人类自古以来就探索的一个问题。两千多年前我国春秋、战国时代流行“五行”学说，认为世界万物都是由金、木、水、火、土五样东西所组成的。同时代的希腊哲学家提出了“原子”假说，认为万物都是由非常微小的、不可再分割的微粒所组成的，把这种微粒叫作“原子”，希腊文原意是不可分割的意思。

从十九世纪以来，人们对于物质的最终组成部分的探索有了飞跃的发展，认识已经深入了四个层次。十九世纪末，化学家证实，一切物质都是由各种元素的原子所组成。化学元素的数目，也就是原子种类的数目有九十多种。这是人类对物质结构的认识深入的第一个层次。元素有这么多种，这和长期以来人们的一种信念（也许是偏见）不符，人们总是相信，最基本的组成单元的种类应该是不太多的。十九世纪末、二十世纪初，物理学家发现，原子是由电子和原子核所组成的。原子核的电荷的多少决定了元素的化学特性。人类对于物质结构的认识又深入一个层次。在 30 年代，人们发现了中子，认识又深入一个层次，原子核是由质子和中子所组成的。在 1935 年前后，人们相信，电子、正电子、质子、中子、光子、中微子等六种粒子是基本粒子，是万物的最基本的结构单元。到了 50、60 年代，人们发现了大量粒子，达到两百多种（包括各种粒子的反粒子）。很难想像这些粒子都是最基本的，人们不再称它们为基本粒子，只称它们为粒子。在 60 年代中，人们对于物质的认识又深入一个层次，发现质子、中子等一大批粒子都不是基本的，而是由层子（或者名叫夸克）所组成的。

一、微观世界粒子

60 年代以来，高能物理有一个飞跃的发展，对于微观世界的粒子的种类特性以及相互作用有了比较深入的认识。

微观世界粒子之间的相互作用，也就是最基本的

相互作用，现在已知有四种，它们是引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。其中电磁相互作用和弱相互作用现在已经证明可以统一为电弱相互作用。引力和电磁作用是大家在日常生活中所熟悉的，是长程力。弱相互作用和强相互作用是短程力，只在微观世界的尺度内才显示出来。

微观世界粒子可以按照它们参予的相互作用来分为三类，见表一。

（一）传递相互作用的媒介子。光子 γ 传递电磁相互作用。中间波色子 W^+ 、 W^- 、 Z^0 传递弱相互作用。胶子（共 8 种）传递强相互作用。以上三类媒介子共 12 种。此外，理论认为应存在传递引力相互作用的引力子，但实验上尚未发现。媒介子是基本粒子。

（二）媒介子以外，不参予强相互作用的粒子称为轻子。已经发现的轻子共 6 种，它们是电子 e 、 μ 子、 τ 轻子 τ 和电子型中微子 ν_e 、 μ 子型中微子 ν_μ 、 τ 子型中微子 ν_τ 。电子、 μ 子和 τ 轻子各带有一个电子电荷 e ，三种中微子都不带电荷。电子、 μ 子和 τ 轻子的质量之比为 1:207:3492，差别很大。中微子的质量很难测量，实验上只给出上限，它们的质量可能均为零。

轻子是基本粒子，目前还没有找到它们有内部结构的证据。现在认为可以把它们分为三代，每代两种。第一代是电子和电子型中微子，第二代是 μ 子和 μ 子型中微子，第三代是 τ 轻子或 τ 子型中微子，见表 2。轻子连同反轻子（电荷相反）总共 12 种。

（三）其余的粒子均参予强相互作用，称为强子。实验上发现的数以百计的粒子绝大多数是强子。强子不是基本粒子，它们是由层子（也叫作夸克）所组成的。现在发现的层子也可分为三代，每代也是两种。

第一代是 u 、 d 层子，第二代是 c 、 s 层子，第三代是 t 、 b 层子。其中关于 t 层子存在的实验证据还不够强，有待实验进一步验证。质子、中子是由三个层子所组成的，这种由三个层子所组成的强子统称为重子。介子是由两个层子所组成的。层子带的电荷不是整数， u 、 c 、 t 层子各带有 $2/3e$ (e 是电子电荷)， d 、 s 、 b 层子各带有 $-1/3e$ 。反层子带有极性相反的电荷。

层子带有“色荷”，“色荷”是层子所具有的一种特殊性质。这里的“色”不是我们日常生活中熟悉的颜色，科学家借用这个名词来标志层子的一种特性。带有电荷的物体之间有电磁相互作用，在带有色荷的胶子之间有强相互作用。色荷有三种，也借用“红”、“绿”、“蓝”三种“颜色”来区分。这样层子共有 $6 \times 3 = 18$ 种，加上反层子共36种。

总结一句，现在公认的构成物质的最基本结构的基本粒子为：(一)媒介子共12种(暂不计引力子)，(二)轻子及反轻子共12种，(三)层子及反层子共36种。三大类基本粒子共60种。

二、标准模型

现在人们通常把关于微观世界的认识，包括关于相互作用的理论和已在前面介绍的基本粒子体系系统称为微观世界的标准模型，或简称标准模型。

量子电动力学是关于电磁相互作用的理论，理论与实验符合得非常好。60年代，科学家提出统一描绘电磁相互作用和弱相互作用的理论，称为电弱相互作用统一理论。这一理论预言了中间波色子的存在和它们的质量。1983年实验证实了 W^+ 、 W^- 和 Z^0 的存在，测出了它们的质量，在实验误差范围内跟理论预言符合得相当好。电弱统一理论的建立，是物理学发展的一大里程碑，它的重要性跟当初麦克斯韦建立把电和磁作用统一起来的电磁理论一样。

关于强相互作用，现在公认的理论是量子色动力学。这一理论认为，将层子、反层子结合成强子的强相互作用是由胶子所带的色荷所产生的，由相应于8种胶子场的8种胶子所传递的。量子色动力学成功地反映了强相互作用的重要特性，但对于研究强子的内部结构等问题还有困难，还很难给出可以和实验相比较的、准确的结果。一方面，理论本身在计算一些问题上有很大困难。另一方面，还需要更精密的实验结果来与理论相验证。量子色动力学是否是正确的关于强相互作用的基本理论，还有待于今后长期、艰巨的研究努力。

现在把电弱统一理论和量子色动力学统称为标准模型理论。直到今天，实验上还没有发现与标准模型理论有矛盾之处，可以说，标准模型理论是十分成功的。但在标准模型理论中无量纲参数不少，这表明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，才能使现在的理论上升为基本理论。

三、进一步深入

几十年来，高能物理的发展依靠实验、理论、实验技术三方面的共同发展，今后要进一步深入也必然如此。首先要有实验结果，这是物理学发展的基础。第二是理论，理论建立在实验的基础上，反过来也促进实

验。理论的发展也同样极为重要。第三是实验技术。这三方面缺一不可，好比一辆三驾马车的三匹马，有一匹马跑得慢，车子就慢。由于高能物理的特点，有时候实验技术的发展成为高能物理进一步发展的主要矛盾。要研究某一层次的内部结构或者把这一层次的物质打碎，需要一定能量的粒子作为“炮弹”或“探针”。研究的层次愈深入，所需的能量愈高。把物体分解为原子，相应于单个原子所需的能量的数量级为几个电子伏。要分解原子核，则需要用能量为几百万电子伏的粒子去轰击它。要研究质子的内部结构，则需要用能量为几十亿至几千亿电子伏的粒子作为“探针”。顺便提一下，由于需要高能量，因此大家把研究微观世界的物理学称为高能物理学。

随着对微观世界的认识不断深化，不断地出现了很多新的问题有待探索、有待深入。例如：

(一)是否还存在新的层子和轻子？有没有第四代？

(二)为什么层子和轻子可以分为代？为什么各代之间质量差这么大？

(三)是否还存在新的媒介子？

(四)层子和轻子是否具有内部结构？它们是不是最基本的粒子？也就是研究物质是否存在更深入的层次。

(五)寻找各式各样理论所预言的新粒子，例如标准模型理论所预言的胶子球、希格斯粒子等等。

以上仅罗列了一部分有待于解决的问题。为了解答这些问题，很明显，需要新的加速器，能量更高的或者加速的束流流强更强的。

表1所列的是近年建成、正在建造中和计划中的高能加速器。美国正在计划中的超级超导加速器SSC周长83千米，质子与质子对撞，每束质子的能量为20,000GeV(1GeV为十亿电子伏)。采用超导磁体，总共9456块。预算约40亿美元(包括探测器)。

随着这些新加速器的建成，必然会开辟新的领域，今后五至十年内高能物理必然会有很大的发展。

四、我国的高能物理

我国正在建造一台高能加速器，名叫北京正负电子对撞机(BEPC)，加速电子和正电子，每束能量可以从1.6至2.8GeV，预期1988年底建成。同时还建造一台探测装置。北京谱仪，将与对撞机同时建成。从表1看来，北京正负电子对撞机的能量比其他加速器低得多，在加速器能量愈来愈高的今天，它到底能作什么工作？

首先应该了解一下加速器的种类。一类让加速粒子轰击固定靶；另一类是对撞机，两束粒子在加速器内对撞。当粒子轰击固定靶时，一部分能量转变为靶粒子向前运动的动能，只有一部分能量能用于改变靶粒

表1 近年建成和建造中、计划中的高能加速器

地址	单位	加速器名称	周长(千米)	粒子	能量(GeV)	亮度($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	运行
中国,北京	高能物理所	BEPC	0.24	$e^+ + e^-$	2.8+2.8	1.7×10^{31}	1988
瑞士,日内瓦	西欧核子中心	SPS/ACOL	7	$p + \bar{p}$	315+315	4×10^{30}	1987
		LEP 1	27	$e^+ + e^-$	55+55	1.6×10^{31}	1989
		LEP 2	27	$e^+ + e^-$	95+95	2.8×10^{31}	1993
西德,汉堡	DESY	HERA	6.3	$e + p$	30+820	2×10^{31}	1990
苏联,塞波科夫		UNK 1	20	p	3000		1990
		UNK 2	20	$p + p$	3000+3000	$> 10^{32}$	1993
				或 $p + \bar{p}$	3000+3000	$> 10^{30}$	
日本,筑波	KEK	TRISTAN	3.2	$e^+ + e^-$	30+30	6×10^{30}	1987
美国,巴伐里亚	FNAL	TEVATRON	7	$p + \bar{p}$	900+900	1.2×10^{30}	1987
美国,斯坦福	SLAC	SLC		$e^+ + e^-$	51+51	6×10^{30}	1988
美国,?		SSC	83	$p + p$	20,000+20,000	10^{35}	1995(?)

子的内部结构。当用质子轰击氢靶时,轰击粒子的能量 E 中“真正”有用的只是 $E/2$ 。能量很高时,很不经济。因此往高能发展,最好的办法是“对撞”,这样两束的能量可以全部用于改变粒子的内部结构。这就说明了为什么近期新建的加速器几乎全是对撞机。北京正负电子对撞机建造的主要目的是研究 c 层子(也叫作粲层子)物理,因此设计在 2.8 GeV 能量。康乃尔大学和 DESY 的对撞机研究 b 层子物理,对撞机每束的能量为 5 GeV。像 SSC 那样的对撞机,是着眼于再深入一个层次。关于各种层子的研究,像对于含有 s 层子的 K 介子的研究,已经有了三、四十年,但直到现在还不能说完全搞清楚了。对于 c 层子物理,刚开始十多年,很多重要问题如果用现有的和即将建成的北京正负电子对撞机来作,估计今后一、二十年内还不可能全部弄清楚。所以,北京正负电子对撞机将是大有可为。

乒乓球是小球,我国在体育运动上的突破是从乒乓球开始的。我国在高能物理上的突破也是走这一条路,先从我国经济力量可以支持的能量不是太高的北京正负电子对撞机开始,力争作出在科学上有较重要意义的工作,从而能立足于世界高能物理之林。现在国际高能物理界十分重视北京正负电子对撞机,寄以厚望。例如目前高能物理上的一个重要问题,胶子球

的寻找。在重要的国际会议上,一提到胶子球,人们时常提到北京正负电子对撞机,说要等待用它所作的实验的结果。

我国建造北京正负电子对撞机,目的有二,一是进行高能物理实验,另一个目的是利用同步辐射。同步辐射是作高速圆周运动的电子或正电子放出的辐射。这种辐射是十分理想的光源,具有通量大、亮度高、频谱广(从可见光、紫外一直到几万电子伏的 X 射线)、光束准直性好等优点,已经成为很多学科的非常有用的研究工具,用于凝聚态物理、表面物理、微电子学、化学、生物、医学等方面。所以,北京正负电子对撞机的建成,还必将有助于我国上述学科的发展。

高能加速器属于高技术,它的建造必然能够带动、促进我国有关的工业技术和高技术水平的发展。现在已经初见成效,例如在提高 10 厘米微波功率管(名叫速调管)的输出功率方面,通过对撞机工程引进消化了国外先进技术,得到了很好的结果。以往中国只能生产功率为 16 兆瓦的速调管,现在已提高到 30 兆瓦。

总的说来,我国的高能物理,尤其在实验方面,随着北京正负电子对撞机的建成,必将有较好的发展。同时还能对其他相当多的学科和国民经济的发展也作出一定的贡献。

(上接第 19 页)

源、X 射线和 γ 射线爆以及它们的弥漫背景等的观测就特别重要。 γ 射线全波段的观测与常规射电和光学观测的结合不仅使天体物理的进入一个新时期,而且对我们了解宇宙线起源和加速机制起着重要作用。

3. 10^{10} eV 以上超高能现象的研究

这个领域的研究由于实验数据积累很慢,研究工作仍处在开始时期。宇宙线极高能端 10^{10} eV 左右有否截止? 10^{10} eV 能区谱形变化的确切特征是什么? 这些问题均涉及到宇宙线起源尺度和宇宙模型。

4. 高于高能加速器能区的超高能核作用的研究。

超高能区宇宙线粒子的核作用是探索高于加速器能区作用过程的唯一途径,重核的核作用是当前热门课题。地下实验有其特殊作用,中微子问题、磁单极子的导线和核子衰变等的探索都是地下实验的重要内容。各种核作用模型,特别是夸克-胶子等离子体相变过程也是超高能核作用的主要内容。

宇宙线发现七十六年以来,它的研究为人类了解粒子物理和天体物理作出了重大贡献。随着空间技术和实验技术的飞速发展,宇宙线的研究定会做出更大的贡献。