

粒子物理

——物质微观结构研究的最前沿

杜东生

DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2015.03.013 (中国科学院高能物理研究所 100049)

人类最早发现的“基本粒子”是电子，1897年汤姆森(J. J. Thomson)在阴极射线中首次测得了带负电的粒子(电子)的荷质比 e/m ，1899年他又测量了电子的电荷 e 。光子 γ 作为粒子是爱因斯坦(A. Einstein)首次在1905年为解释光电效应提出的。但是这一观念20多年后才被物理界所公认。1919年卢瑟福(E. Rutherford)用 α 粒子轰击氮靶而发现了质子。1932年查德威克(J. Chadwick)证实了中子的存在。同年，安德森(C. D. Anderson)发现了正电子。

上述“基本粒子”的发现还不足以促使粒子物理(或称高能物理)作为一门学科的诞生。真正起促进作用的是1947年后在宇宙线和加速器实验中发现了系列的新的粒子和共振态。自从1947年在宇宙线实验中鲍威尔(C. F. Powell)发现 π 介子，罗切斯特(G. D. Rochester)发现K介子之后，在加速器上又发现了一系列新粒子 Λ 、 Σ 、 Ξ 、 Δ_{33} 、 \bar{p} 、 \bar{n} 等，几年之内“基本粒子”增至上百种。这时国际上开始投入大量人力物力来研究基本粒子的性质和规律。因此应该是从第二次世界大战后的1947年起，粒子物理开始作为一门独立的学科出现。此后人类对物质微观结构的研究不断深化，取得了无数的重大研究成果。本文将历数这些成果并展望未来可能的发展。

一、原子结构

人类对物质微观结构的研究始于原子。卢瑟福的 α 粒子轰击氮靶的实验证实，原子中心有一个很小的原子核，集中了原子的几乎全部质量。核外有电子围绕。

最简单的原子是氢原子。它的原子核外只有一个电子围绕，其原子核就是质子，原子核(质子)大小是氢原子尺度的万分之一。氢原子核外有两个电子围绕，原子核由两个质子和两个中子组成。原子核的尺

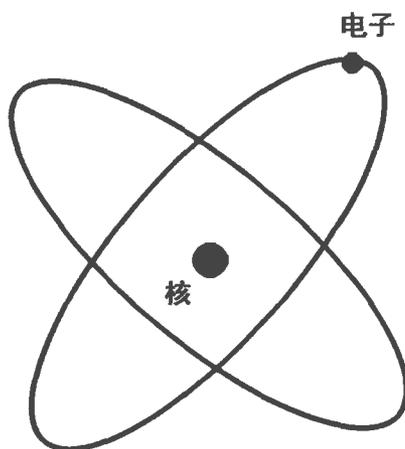


图1 氢原子示意图

度也只占原子大小的万分之一。总而言之，原子是个很松散的束缚态。要想把电子从原子中剥离出来所需的能量极低，大约需10个电子伏特(10 eV)就可以了。平时人们梳头，头发就会带电，那是因为头发中的原子外围电子被剥离的缘故。可见剥离电子很容易。因此研究原子结构所付出的能量极低。原子物理本质上是低能物理。

今天人类对原子结构及其相应的物理规律已经非常清楚了。量子力学可以完美地描写原子的物理规律。原子物理的绝大部分问题非相对论量子力学就可解决。只有少数问题，如氢原子光谱的精细结构等，需要用相对论量子力学解释。唯一技术上还需努力的是解决原子结构中的多体问题(多电子原子、分子化学键等)。但这只是计算技术问题而不是物理原理问题。

二、原子核结构

对于原子核的结构我们也已经很清楚。我们知道，原子核是由质子和中子构成的。但质子和中子是紧紧地挤在一个尺度约 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ cm的狭小空间(原子核)内。与原子松散结构相比，原子核的质子中子结构更像一锅粥(图2)。要想把质子或中子从原子

核中分离出来可不容易，大约需要 10 兆电子伏（10 MeV）的能量。比把电子从原子中分离出来的能量高出一百万倍（1 MeV=10⁶ eV）。所以研究原子核的构造需要花费更高的能量。我们可以说原子核物理是中能物理。

量子力学基本上可以描述原子核的结构和质子、中子的运动规律。所以原子核物理本质上就是量子力学。所不同的是，核子（质子、中子的统称）间的相互作用力太强，量子力学中通常用的微扰计算不再适用。因此原子核理论中出现了很多近似方法，如中心场近似，壳模型，集体模型等唯象方法。

前面看到，我们对物质微观结构的研究，从 10⁻⁸ cm 尺度的原子深入到了 10⁻¹² ~ 10⁻¹³ cm 尺度的原子核。原子和原子核内部结构的形态也有很大差别，计算方法也有很大的不同。

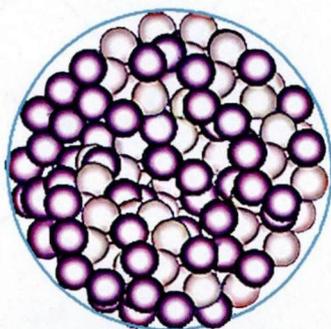


图2 原子核结构示意图

三、基本粒子结构

比原子核更深层次的基本粒子有无内部结构呢？本文一开始就提到，1947年后一大批“基本粒子”被发现，其中包括电子 e，质子 p，中子 n，还有 π 介子，K 介子，超子 Λ、Σ、Ξ、Δ 等共有上百种。这上百种“基本粒子”有没有更深层次的结构？对比化学元素的门捷列夫周期表，上百种化学元素实际上都是由三种更小的粒子——质子、中子、电子构成的。这里上百种基本粒子很有可能是由更少几种更基本的粒子组成。回答是肯定的。

1956 年美国的浩夫斯达特 (R. Hofstadter) 等人作了一个非常重要的实验，用 400 ~ 16000 MeV 的电子去轰击质子（氢气）而观测电子散射的情况（图3）。

16000 MeV 电子的德布罗意波长 $\lambda = \frac{h}{p} \sim 10^{-14}$ cm，这相当于质子的大小的 $\frac{1}{10}$ 。散射实验证实，质子并不是一个点电荷，它的电荷分布在半径为 10⁻¹³ cm 的空间范围内。这说明质子有内部结构。

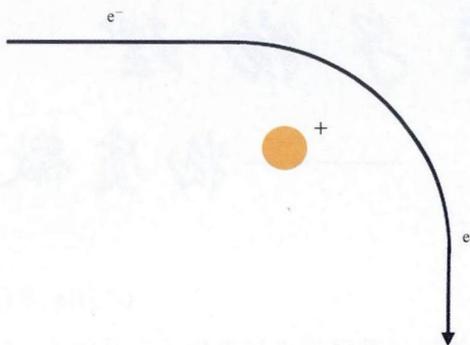


图3 电子在质子上的散射

3.1 夸克模型

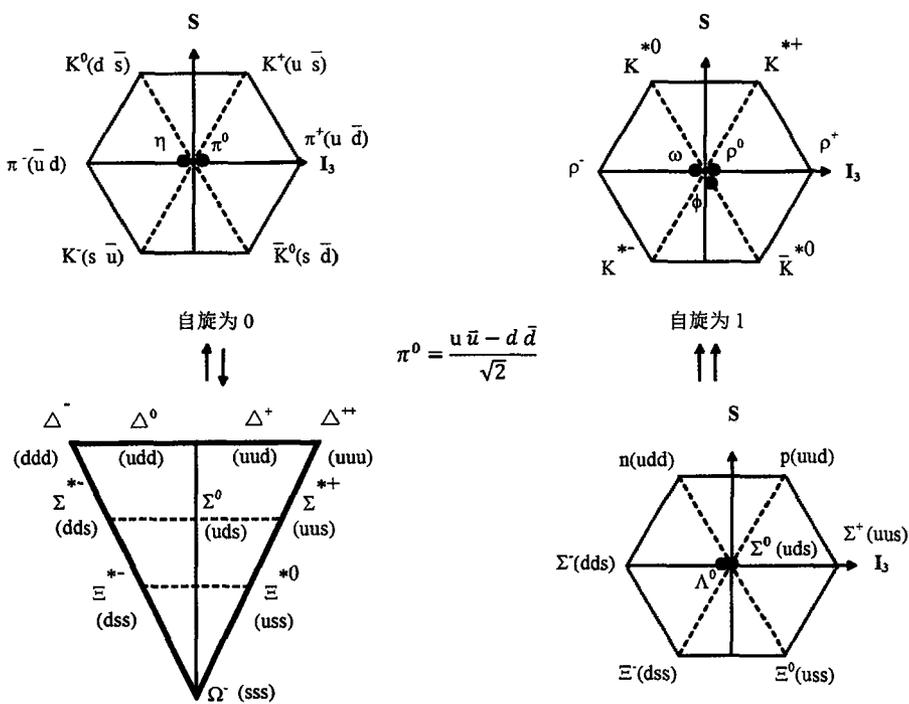
1964 年盖尔曼 (M.Gell-mann) 提出了强子结构的夸克模型。这里“强子”是指有强相互作用的“基本粒子”。已发现的上百种“基本粒子”大部分都属于强子的范畴。盖尔曼认为，所有强子都是由更基本的三种夸克 u、d、s 和相应的反夸克构成的。u、d、s 填充 SU(3) 群的基础表示。介子由正反夸克组成，即 $q\bar{q}$ (q 代表夸克， \bar{q} 代表反夸克)。从 SU(3) 群角度看，介子 $q\bar{q}$ 填充 $3 \times 3^* = 8 + 1$ 维表示，即填充 8 维表示和 1 维表示。

重子 (p、n、Σ、Ξ 等) 由三个夸克构成，简写为 qqq ，填充 $3 \times 3 \times 3 = \underline{8} + \underline{8} + \underline{10} + \underline{1}$ 。即重子填充 SU(3) 群的 8 维和 10 维表示。这可用“权”图表示出来（图4）。

夸克模型取得了巨大成功。模型预言的新重子 Ω 由 3 个奇异夸克 s 构成，即 $\Omega^- = (sss)$ 。理论预言的质量 $m_{\Omega^-} = 1670$ MeV。实验上很快发现了 Ω，且测得的质量与理论预言一致。

特别需要指出的是，SU(3) 夸克模型之所以成功关键是假定了夸克的电荷是分数。以质子电荷为单位，三种夸克 u、d、s 的电荷分别为 2/3、-1/3、-1/3。只有这样选取电荷 SU(3) 群的分类才能给出正确的介子和重子的结构。历史上也有人（如日本物理学家）用 SU(3) 群构造强子的结构，但他们选取的下一个层次组元的电荷为整数，无法同时构造出正确的介子和重子谱。分数电荷是一个非常大胆的创新想法。

u、d、s 三种夸克可以圆满解释通常的强子，但实验上又发现了一批新的强子，三种夸克就解释不了啦。1974 年，丁肇中和里克特 (B.Richter) 领导



质量公式预言 $m_{\Omega^-} \cong 1670 \text{ MeV}$
 实验 $m_{\Omega^-} \cong 1672.45 \pm 0.29 \text{ MeV}$

图4 重子的权图

至此，我们已经有u、d、s、c、b、t六种不同的夸克。这六种不同的夸克我们用“味”量子数来区分，称之为六种不同“味”的夸克。夸克还有另外的自由度，由“色”量子数来标记。同一种“味”的夸克有三种不同的“颜色”。“色”的存在是有实验证据的。如 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 衰变，只有夸克有三种“色”，理论计算才能与实验结果一致，否则差三倍。 $e^+e^- \rightarrow$ 强子的总截面与 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 截面之比 $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ 的实验值也与假定夸克有三种不同的“色”一致。还有夸克有三色才能保证三个夸克组成的重子满足费米统计。即SU(3)重子

的两个小组分别在布鲁克海汶实验室和斯坦福大学直线加速器中心独立发现了一种新的重矢量介子 J/ψ 粒子，这个矢量介子很重，质量为 3.1 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV}$)，寿命却出奇的长。已有的u、d、s夸克不能解释，只好引入新的夸克——粲夸克c (charm) 来解释， J/ψ 粒子是c和 \bar{c} 的束缚态($c\bar{c}$)。c夸克的质量很重约 1.5 GeV ，电荷为 $2/3$ 质子电荷。

1977年，莱德曼(L. Lederman)领导的小组在费米实验室质子同步加速器上发现了更重的矢量介子 Υ (9.5 GeV) 和 Υ' (10 GeV)。对于这两个长寿命的矢量介子只能用一种更重的新夸克b夸克(底夸克——bottom或美夸克——beauty)的束缚态($b\bar{b}$)来解释。b夸克质量约为 5 GeV ，电荷为 $-1/3$ 质子电荷。 Υ' (10 GeV) 是 Υ (9.5 GeV) 的径向激发态。

1994年CDF实验组在费米实验室 $p\bar{p}$ 对撞机(Tevatron)上又发现了顶夸克(t)，t夸克质量约 176 GeV ，电荷为 $2/3$ 质子电荷。由于t夸克太重，产生后来不及形成任何束缚态就衰变了。

波函数在“味”空间是全对称的，但在“色”空间是全反对称的(色单态)。

至此，我们有6种不同“味”的夸克，每种“味”的夸克又有三种不同的“色”。因此夸克总数为 $6 \times 3 = 18$ 种。

3.2 部分子模型(parton model)

3.1节讨论的强子的夸克结构是强子结构的低能图像。在高能下强子的结构有无变化? 1967年斯坦福大学直线加速器中心(SLAC)的一个实验组用 20 GeV 和 40 GeV 的高能电子轰击质子。

因质子半径约 10^{-13} cm ，而高能电子的德布罗意波长 $\lambda \sim 10^{-15} \text{ cm}$ ，因而可探测到质子内部的情况。实验发现：质子内部有无数点电荷，并且几乎是自由运动

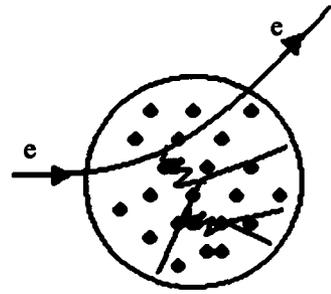


图5 电子-质子深度非弹性散射

的点电荷。图 5 给出了示意图。这如何解释呢？实际上，在低能下电子打入质子内只能“看见”三个价夸克(uud)。随着入射电子能量的提高，电子放出的“虚”光子可转化为正反夸克对儿 $q\bar{q}$ 。而正反夸克对儿 $q\bar{q}$ 通过辐射胶子再产生更多的正反夸克对儿，从而产生了无数的点电荷，称作“海”夸克。海夸克近乎自由运动标志着核力（强作用力）在高能下变“弱”。这引申出了核力“渐近自由”的概念。质子由无数自由运动的点电荷组成的图像就是部分子模型。

“渐近自由”导致了量子色动力学(QCD)的诞生。在第五节我们还要专门讨论。我们会看到，质子内部结构的低能图像(三个价夸克构成)和高能图像(除三个价夸克外还有无数的海夸克和胶子组成)在量子色动力学框架内统一起来了。

四、粒子物理(高能物理)的内涵

从上面发现质子内部结构的实验，电子-质子深度非弹实验，还有 c, b, t 夸克发现的实验可以看出，要研究“基本粒子”内部结构需要至少几百至几千兆电子伏以上的能量，比研究原子核结构所需的能量要高几十到几百倍。所以人们把研究“基本粒子”结构及相互作用规律的学科叫“高能物理”。

1957 年国际纯粹与应用物理学会(IUPAP)给高能物理下的定义为“研究物质基本组分的性质及其相互作用的科学”。“粒子物理”是后来研究高能物理的人逐渐叫起来的，因为“高能物理”研究的都是极小“粒子”的性质，所以把“高能物理”又叫“粒子物理”。

今天看来以上的定义需要增加新的内容。原因是，近年来宇宙学和天体物理有了重大发展，而这些新发展、新发现把粒子物理和宇宙学、天体物理联系起来。近年来的天文观测发现超新星爆发时发出的光线的红移比用已有的距离和红移关系经验公式推算的要大。这表明超新星在加速地远离我们而去，即宇宙在加速膨胀。这需要负压强。现在我们知道，宇宙空间充满了暗能量，占宇宙中总能量密度的 69%。另外 26% 为暗物质，5% 左右为重子物质(其中可见物质如星系、灰尘等不足百分之一)。暗能量可提供宇宙加速膨胀的负压强，那么暗能量到底是什么呢？一种可能就是

爱因斯坦的宇宙常数。还有一种可能是弥漫在整个宇宙空间的某种“标量场”。到底是什么至今并未定论。因此暗能量和暗物质也成了当前粒子物理研究的热门课题。此外，宇宙大爆炸早期的发展演化，后来宇宙中重子和反重子不对称的形成以及后期原子核的形成和星系的形成都需要用粒子物理来解释。所以当今出现了两门新的交叉学科：“粒子宇宙学”和“粒子天体物理”。而中微子物理与天体物理结合又形成了新的交叉学科“中微子天文学”。鉴于上述新的发展，美国国家高能物理 21 世纪长远规划顾问组给粒子物理(高能物理)下的定义为“高能物理是相互作用的科学”。“相互作用又是物质、空间和时间的科学”。考虑到至今我们对暗能量的本质仍不清楚，我们可以给粒子物理下个更新的定义，即“粒子物理是研究物质、能量、空间和时间的科学”。这个新的定义更确切，更包容，更具时代特色。

五、近五十年来粒子物理理论的重大突破

5.1 夸克模型

1964 年夸克模型的建立极大地推动了粒子物理的发展，这一点在 3.1 节已经做了详细的阐述。这里不再重复。

5.2 弱电统一理论

1967 年温伯格(S. Weinberg)等人提出了弱相互作用和电磁相互作用的统一理论。他们用 $SU(3) \times U(1)$ 的非阿贝尔规范场理论来统一描写弱作用和电磁作用，取得了巨大成功。这个理论的预言与所有弱作用的实验都吻合，因而成为粒子物理发展史上最伟大的成就之一。

我们还发现，参与弱电作用的夸克和轻子分为三个家族或三代，即

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

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

会不会还有第四代？至今实验上只发现三代，没有第四代。到底为什么只有三代是一个谜，我们还没有任何解释。

5.3 部分子模型和量子色动力学 (QCD)

前面 3.2 节我们已经讨论了部分子模型。e-p 深度非弹性散射实验表明, 强作用力有“渐近自由”的特点。1974 年波利策 (H. D. Polizer)、格罗斯 (D. J. Gross) 和维尔切克 (F. Wilczek) 提出了 SU(3)_c 规范理论来描写强作用过程。这个理论导出的强作用耦合常数

$$\alpha_s(q^2) = \frac{4\pi}{\left(11 - \frac{2}{3}f\right) \ln(q^2/\Lambda^2)} \xrightarrow{q^2 \rightarrow \infty} 0$$

上式中 q^2 是散射过程的动量转移的平方。可见入射粒子能量越高, q^2 就越大, 强作用耦合常数就越小。QCD 这个特性使我们可以用微扰论计算高能强作用碰撞过程。科学家们发现, 所有高能过程的实验结果与理论预言一致。QCD 作者因此也被授予诺贝尔奖。

QCD 还有一个显著特点是存在三胶子和四胶子的自耦合。注意, 夸克之间是通过交换胶子来相互作用的。胶子与光子不同, 胶子带“色”荷, 共有八种。胶子除与夸克有相互作用外还有自作用。这是非阿贝尔规范作用的特点。正是由于胶子有自作用, QCD 才预言有“胶球”(glueball) 的存在。同时也有混杂态 (hybrid state) 如 $(\bar{q}qg)$ 、 $(\bar{q}qgg)$ ……的存在。这里 \bar{q} 、 q 分别代表反夸克和夸克, g 代表“价胶子”。实验家花大力气寻找胶球和混杂态, 目前已发现一些可能的候选者。J^{PC}=0⁺⁺ 的粒子 $\alpha_0(1370)$ 、 $f_0(1500)$ 、 $f_0(1710)$ 等, 可能是 0⁺⁺ 介子和胶球的混合态, 而 $\pi_1(1400)$ 、 $\pi_1(1600)$ 则可能是 J^{PC}=1⁺⁻ 的混杂态, 但都没有最后的结论。

对 QCD 的低能行为, 由于 q^2 小, 耦合常数 $\alpha_s(q^2) \geq 1$, 微扰计算已不可用。但我们可以把时间和空间分成多个小格子, 把费米子放在格点上, 把规范场放在格子之间的连线上而借助蒙特卡洛方法来计算物理量, 这种方法叫格点规范理论 (Lattice Gauge Theory)。在实际操作中是把时间轴作 Wick 转动, 把 3+1 维时空变为 4 维欧氏空间, 计算完了才回到物理极限。目前时空格子已达到量级 a ($64^3 \times 144$), 其中 $a \sim (0.1 \sim 0.05) \text{ fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$), 三维空间分割为 $n_1=n_2=n_3=64$ 格, 时间分割为 $n_4=144$ 格。格点理论可计算的物理量有: 强子质量谱, 衰变常数

f_K 、 f_K 、 f_D 、 f_B 等, $K \rightarrow \pi l \nu$ 、 $D \rightarrow \pi l \nu$ 、 $B \rightarrow \pi l \nu$ 的跃迁形状因子等, 还可计算强作用耦合常数 $\alpha_s(q^2)$ 和强子矩阵元。

近几年, 格点规范理论进展很快, 已获得许多重要结果, 从而推进对实验的检验。

5.4 大统一理论

前面提到, 弱作用和电磁作用的统一理论取得了巨大成功。那么能否把强作用也统一进来而建立弱、电、强三种力的统一理论呢? 答案是肯定的。

1974 年乔治 (H. Georgi) 和格拉肖 (S. L. Glashow) 提出了强、弱、电三种力的大统一理论——SU(5) 规范理论。这个理论认为, 在低能下三种不同的力强、弱、电相互作用到了极高能量会统一为一种单一的相互作用, 如图 6 所示。

SU(5) 大统一模型预言质子会衰变, 其主要衰变道为 $p \rightarrow e^+ \pi^0$, 且算出质子寿命 $\tau_p \sim 10^{29 \pm 1.7}$ 年。美国 IBM 实验组在俄亥俄州 Morton 盐矿井下用观测 8700 吨水的实验测得 $\tau_p \geq 10^{32}$ 年, 因此排除了 SU(5) 大统一模型。但对于其他大统一模型如 SO(10), SU(N) (其中 $N > 5$) 的模型目前还不能排除。

5.5 超对称理论

超对称是指费米子和玻色子之间的对称。按超对称理论, 任何一个费米子都有其相应的超对称伴子——玻色子, 反之, 任何一个玻色子也有与其相应的超对称伴子——费米子。因此, 如果用 Weyl 旋量描写夸克场 q , 则 q_L 、 q_R 都有相应的超对称伴子标量场 \tilde{q}_L 、 \tilde{q}_R 。后者被称为 squark (scalar quark)。自旋为 1 的光子 γ , 其超对称伴子为自旋 1/2 的费米子 $\tilde{\gamma}$ (photino) 等。

最早引入超对称纯粹是从美学的角度。但是超对称的引入可以解决粒子质量等级 (轻和重) 的稳定性

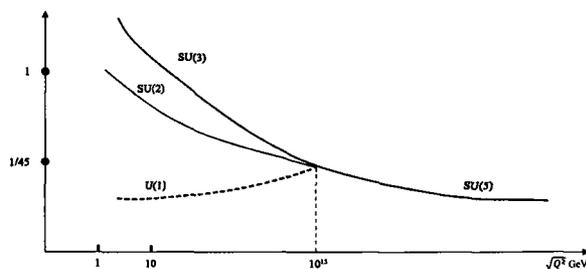


图 6 三种力随动量转移 Q^2 的演化

问题,也可以使强、弱、电三种力耦合常数在高能下真正交于一点(即真正的统一)。

虽然超对称有许多优点,但至今实验上没有找到任何一个超对称伴子粒子。因而超对称理论不能算是被实验检验过的正确理论。其正确性还有待进一步的检验。

5.6 超弦和膜理论

超弦理论把不同的粒子看做是延展体——弦的不同振动模式。粒子不再是几何的点,而是由一维延展体(弦)来描写。超弦理论号称没有任何自由参数,不仅可以把四种力(强、弱、电、引力)统一起来,而且一切物理量都可以被理论计算出来。因此超弦理论又被称作“theory of every thing”。比较有前途的是建立在10维空间的杂化弦,但所有超弦理论都有一个基本困难,即当理论从10维空间紧致化到现实的3+1维(3维空间1维时间)时空时导致无数的真空态,而理论无法选出我们现实世界的真空。

膜理论(brane theory)是在11维膜上构造的理论。一些特殊的膜理论在紧致掉一维空间后可退化到10维空间的超弦理论。膜理论也是可以统一四种力的热门理论。

六、粒子物理的发展前景

物质微观结构研究永远是物理学的前沿。所以粒子物理作为研究物质微观结构的最前沿学科将带动各学科发展。

粒子物理发展前景可分为两大方向:

6.1 依赖加速器的粒子物理

未来发展也有两个方向,一是加速器向高能量发展。当前欧洲核子中心正在运行的质子-质子对撞机LHC质心设计能量为7 TeV+7 TeV的p-p对撞($1\text{ TeV}=10^3\text{ GeV}=10^9\text{ MeV}$)。目前还未达到设计的能量(14 TeV)。14 TeV的p-p对撞转换到一个质子静止的坐标系相当于入射质子的德布罗意波长为 $\lambda_p=1.3\times 10^{-21}\text{ cm}$ 。国际上正在讨论的 e^+e^- 直线对撞机(ILC),初级指标为250 GeV e^+ 对250 GeV e^- 。主要是研究Higgs粒子的性质。中国也在讨论建造质心系能量为240~250 GeV的环形 e^+e^- 对撞机(CEPC),也被称为Higgs工厂,也是研究Higgs性质和粒子质量起源问题。CEPC还可改造为pp对撞机(SppC),质心能量为100 TeV。高能量方向的发展需要大量投资。

另一个方向是向高亮度发展。如正在运行的美国和日本的两个B工厂(PEP II和KEK-B)。日本正在建造亮度比现在B工厂高100倍的超级B工厂(Supper-B)。Higgs工厂也可属这一类。LHC上已经发现了Higgs粒子,接下来要研究Higgs的各种衰变方式。LHC上还可寻找超对称伴子,研究t夸克物理,B物理和粲物理。

中国的北京正负电子对撞机升级版BEPC II亮度已达到 $\geq 5\times 10^{32}\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$,可继续寻找胶球和混杂态。现已发现的 $Z_c^\pm(3900)$ 、 $Z_c^\pm(3885)$ 、 $Z_c^\pm(4200)$ 等新的共振态,很可能是四夸克态。在国际上引起了巨大反响。

下一代加速器除了上面提到的外,国际上还正在研究建造 μ 子储存环(中微子工厂)和 $\mu^+\mu^-$ 对撞机(Higgs工厂)的可能性。主要困难是如何获得有一定强度的 μ 子束(muon cooling),一旦成功将有重大突破。因 μ 子质量约为电子质量的200倍,因此 μ 子储存环和 $\mu^+\mu^-$ 对撞机半径可大大缩小,并且辐射损失与 e^+e^- 对撞机比大大减小。

6.2 不依赖加速器的粒子物理

目前比较热门的是中微子物理。实验上已经发现了中微子振荡,因而证明中微子有小的质量。广东大亚湾合作组已经测定了轻子混合角 $\text{Sin}2\theta_{13}$,广东江门合作组正在准备测量中微子质量平方差 Δm_{31}^2 和 Δm_{32}^2 的大小和符号从而解决中微子质量等级问题。各国还计划利用长基线中微子振荡来寻找轻子部分的CP破坏。此外,寻找和测量无中微子双 β 衰变以及中微子质量的绝对测量都是前沿课题。利用地面和空间探测器寻找暗物质方面各国也在加大投入。值得一提的是宇宙空间超高能中微子的研究。这方面在南极的立方千米尺度的冰块中微子探测器(Ice Cube)已开始取数。立方千米尺度的水下中微子探测器(KM3NeT)也将投入使用。

还值得一提的是利用宇宙线研究粒子物理。当前宇宙线研究出现了新特点。世界上已出现了方圆几平方千米乃至几十平方千米的簇射探测器(例如我国西藏羊八井簇射探测器),可以对宇宙线广延大气簇射做更精确的测量和研究。还可以借助空间探测器对宇

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

目前各国也在这方面加大了投入。

现在我们可以对粒子物理的发展做一个总结了。

迄今为止，人类对电子结构的研究已深达 10^{-17} cm。仍然没有发现电子的内部结构。对质子内部的探测也已达 10^{-18} cm，并没有发现质子内部的夸克还有更深一层次的结构。这就表明比夸克和轻子更深一层次的结构还没有发现。人类从原子→原子核→“基本粒子”→夸克和轻子……一步步探测过程中发现每一个层次都是可分的。但是，微观结构每深入一个层次，微观结构的形态并非重复原子的“太阳系”式的结构，而是有新的特点。例如，由强相互作用——核力结合在一起的质子和中子构成的原子核更像一锅粥，而不像原子中电子和原子核的“松散”的太阳系式结构。“基本粒子”如质子、中子等强子的夸克胶子结构显示了另一种新的形态：夸克由于“禁闭”机制而不能被打出来而成为自由粒子，这使得强子的“碎片”和强子长成一样大小，并且在重离子的高能碰撞

2015年《现代物理知识》每期定价10元，全年6期60元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路19号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992年合订本，18元；1993年合订本，18元；1994年合订本，22元；1994年增刊，8元；1994年附加增刊合订本，36元；1995年合订本，22元；1996年合订本，26元；1996年增刊，15元；1997年合订本，30元；2000年附加增刊合订本，38元；2000年增刊，10元；2001年合订本，48元；2002年合订本，48元；2003年合订本，48元；2004年合订本，48元；2006年仅剩4、5、6期，每期7元；2007～2011年单行本每期8元；合订本每本50元；2012～2014年单行本每期9元，合订本每本60元。

中产生新的物质形态——夸克胶子等离子体。我们还很难想象有朝一日比电子和夸克更深一层次结构的形态是什么样子，这只能由将来的更高能的实验来确定。

在大宇宙宏观探测中人类已观测到了130亿光年（1光年是光线走一年的距离，约为10万亿千米）处的星系，并且这个距离还会再扩大，可见宇宙大到无边无际。由上可见宇宙无论往大的方向（宏观）和往小的方向（微观）延伸都没有尽头。奇妙的是，两个方向的延伸都逐渐统一起来：向微观延伸的物理学——粒子物理却在支配着往宏观延伸的科学——宇宙学和天体物理。宇宙大爆炸后的暴涨，宇宙内物质和星系的形成和发展，宇宙中物质和反物质的不对称等都要靠粒子物理来解释。可见粒子物理把小宇宙和大宇宙联系起来，形成了粒子宇宙学和粒子天体物理等交叉学科。这些新方向的发展前景不可限量。人类对宏观宇宙和微观宇宙的探测永远不会停止。