

微观物质组成理论的发展 与近现代科学（下）

阎康年



四、经典原子论框架的变革

现代原子论与经典原子论的根本区别在于认为原子有内部组成，并且是可分的，从而在物质观上打破了自德谟克利特以来对于原子的不可分和不可变假设的框架。这个框架的打破要从 19 世纪 80 年代英国化学家克鲁克斯（William Crookes）实验发现阴极射线是由带负电的微粒组成开始。

1. 克鲁克斯与阴极射线

现代科学开始于 19 世纪末的三大发现，这三大发现又起源于阴极射线的研究，关键在于克鲁克斯关于阴极射线性质的组成的一系列重要发现。

（1）克鲁克斯证明了阴极射线是由一种带电的、极其微小的微粒组成的射线，而不是以太组成的，1877 年他否定了以太说，称之为物质的“第四态”——物质组成的底蕴。

（2）克鲁克斯发现阴极射线在磁场中向磁铁方向偏转（图 7），说明它带电并有质量；它能在障碍物背后投下阴影并使障碍物发热而将其上涂的蜡融化（图 8），当把障碍物涂上黑色时比涂白色效果更明显，说明它是一种辐射；它能将叶轮旋转（图 9），说明它具有光压和质量。这些现象表明，阴极射线是一种有质量、带电荷的辐射。当将玻璃管内的气压降到一定程度时，管内会出现黑色空间，这些是用以太说无法解释。

2. 其他发现

1890 年英国的舒斯特（Arthur Schuster）对磁场和电场的强度使阴极射线偏转的角度进行测量，

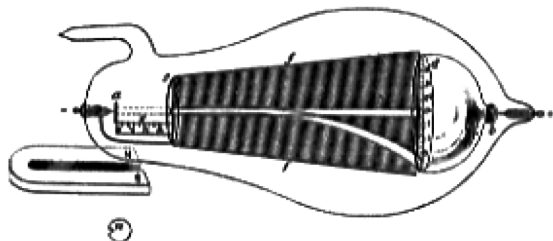


图 7 阴极射线在磁场内偏转

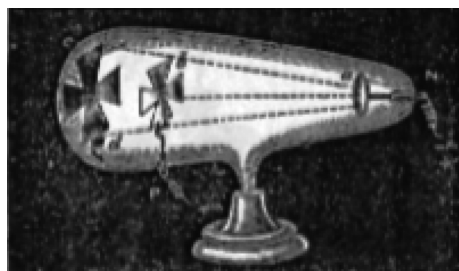


图 8 使障碍物投影在玻璃管上

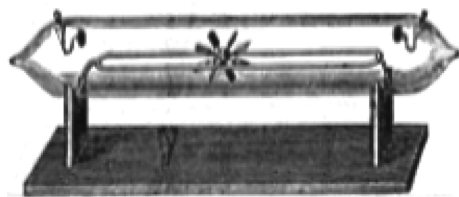


图 9 使叶轮旋转

算出阴极射线粒子带电量与其质量的比值，1890 年初期算出它的质荷比为氢离子的 $1/500$ 倍，当时考虑到实验误差等因素，误认为氢质量的大小接近。

1903 年德国的勒纳德（P. Lenard）发现阴极射线能穿过原子内的空间，认为原子内中心有个硬的中心“dynamide”。

法国的佩兰（J.B.Perrin）在 1895 年将阴极射线引进金叶验电器，可测得它带负电。到这时，证明了阴极射线是带负电的、误认为是由与氢原子质量同数量级的微粒组成的一种高频射线。

这些就是电子发现前对阴极射线了解的简单情况。

1895 年德国维尔茨堡大学的物理学家伦琴（Röntgen）意外地发现，勒纳德阴极射线管内的阴极射线通过管的铝窗口发射到外面空气中的阴极射线，使放在椅子上的感光板感光，并将他的夫人的手骨及金戒指在感光板上感光，这意外的新发现振动了全世界。他将这种尚不了解的射线称为“X”射线，并将情况首先向世界上 6 位著名科学家通报，其中就有剑桥大学卡文迪什实验室主任汤姆孙

(J.J.Thomson)。

1896年法国的贝克勒(Becquerel)受到伦琴的启发,意外发现铀盐发出的辐射使附近的感光板感光,而发现了铀的放射性。

1897年汤姆孙实验阴极射线的组成和性质时,发现了质荷比为氢原子量的 $1/1000$ 的微粒,就是后来说的比氢原子小的电子,从而证明自古以来认为原子为万物基元和哲学上万物始基的观点是错误的,并提出原子的物质电结构理论,还提出原子由电子组成的“布丁面包原子模型”。

1898年居里夫妇发现了镭及其强烈的放射性辐射。

1898年卢瑟福(E.Rutherford)发现了钷放射的辐射由 α 、 β 、 γ 三种射线组成。1900~1904年他进一步发现 α 射线是由氦原子核组成、 β 射线是电子束,他和稍后法国的维拉德(Villard)发现 γ 射线,并证明 γ 射线是电磁波。

1903年卢瑟福和索迪(Soddy)发现了放射性元素家族衰变图谱,从此证明无机物也遵守进化或演化的客观规律,并且历史上第一次发现了一种元素能自发地蜕变为它的同位素和新元素。放射性辐射和元素蜕变的发现为了解原子的结构、放射性元素衰变和揭开原子内的微观物质组成,提供了有利的条件。

3. 汤姆孙原子模型

1897年他在《阴极射线》论文中,宣布从阴极射线组成的实验中发现了电子,其原因在于:

(1)他能够从气体放电研究转到阴极射线的性质和组成研究。

(2)坚决相信阴极射线粒子说。

英国和欧洲大陆关于阴极射线组成的两种研究路线。汤姆孙说:“德国物理学家除去亥姆霍兹(Helmholtz)之外,都把阴极射线看作波,我想英国人毫无例外都把它看作带负电的原子或分子。这两种看法花很大气力进行斗争”。卢瑟福说:“长期以来,两种对立的理论占有对这些效应解释的阵地。德国物理学派采取阴极射线是某种以太波的观点,英国物理学派的观点就像克鲁克斯声明的那样,主张它们实际上是发射出来的、高速运行的粒子……两种对立理论的存在,导致关于真空管放电现象的大量研究”。

由于相信阴极射线是微粒组成的研究思路,使

汤姆孙走向发现电子的道路。

(3)发现方法:批判地接受和改进前人的类似实验。汤姆孙重做并改进舒斯特、勒纳德和赫兹(Hertz)的实验。

赫兹认为阴极射线不因为静电力的作用而使径迹发生偏转,因而反对它是由荷电粒子组成的。当汤姆孙将真空管抽成高度真空时,发现射线在电场中径迹偏转,说明它由带电粒子组成。

汤姆孙用能量法和电场与磁场使阴极射线偏转度相等的方法,算出电子为带负电荷的、质量为氢原子的 $1/1000$ 的微粒。因此他得出:原子是可分的、每种元素的各个原子质量是一样的、质量小于氢原子的千分之一(后来证明为 $1/1800$)。

(4)1904年在《论原子结构》论文中,汤姆孙正式提出布丁面包原子模型和物质电结构理论。他说:“元素的原子由封闭在带均匀正电荷的球体及在其中分布的大量带负电粒子所组成”,电子呈多个电子环分布,并提出外环的电子数分布。

(5)电子名称的来源:电子是都柏林大学斯托尼(George J. Stoney)在1891年提出的,后被著名物理学家拉莫尔(J.Larmor)和洛伦兹(Hendrik A. Lorentz)所采用,并广为传开。汤姆孙从开始就一直采用“微粒(Corpuscle)”名称,直到第一次世界大战后才改称“电子”。

汤姆孙认为:

元素光谱:各环电子具有同样的角速度……每种元素的光谱又由彼此成一定比率的各环电子振动频率决定的,而各环电子的振动频率之比又由各环电子数决定。

元素周期表中每一列元素性质的递次变化,可用元素原子内电子环数和电子数的递次变化予以说明。

原子带正电和负电,可用外部原因的作用使其电子环得到和失去电子予以说明。惰性元素的各环电子数达到稳定的恒定数目,就难以再得到和失去电子,否则外环容易失去或得到一、二个电子而成为一价、二价的正、负原子。

如果把重元素看作由轻元素的集合而成,其原因在于重元素原子的电子是以次级电子所组成的亚原子排列的,各电子组都作为一个单位存在。

关于放射性元素的解释,他认为原子内电子系统的稳定性,是由电子运动速度的临界速度所决定

的。低于此临界速度就会落向内环，而不稳定。

4. 其他原子模型：

(1) 开尔文电原子模型 (1902)：又称电原子模型，认为原子由带玻璃电 (正电) 的球体内分布着树脂电 (负电) 所构成。

(2) 勒纳德动力中心原子模型 (1903)：他用阴极射线穿过原子内的大部分空间，得出原子内的空间大部分是空虚的，中心处存在带正电或负电的中性实体，他称之为“dynamide”。

(3) 长冈半太郎土星原子模型 (1904)：日本物理学家长冈半太郎 (Nagoaka) 从德国回日本前，提出原子由像光环围绕木星那样的图式，由电子环绕中心旋转，系统将保持稳定。但是，土星模型电子轨道是平面的，实际为立体的，而且它是未经过实验证实或验证，因而不能说他发现了原子核。

此外还有多种原子模型，如 Nicholson 模型等。

5. 从预言到发现原子和分子

(1) 原子的发现：1907 年底卢瑟福通过计数器计数了氦核的个数，看到荧光屏上显示的 α 粒子径迹。1908 年 1 月他又与盖格 (H.Geiger) 制成计数器，测得 α 粒子的个数，首次证明原子的存在。正如他的弟子 D.N.da C.Andrade 所说：“单个原子的监测是物理学前进过程的一大路标，该实验将原子理论置于可靠的基础上，而原子理论在卢瑟福迈出的第一步之后……”。

卢瑟福在 1908 年 6 月发表的 Berkerian 讲演中说：“在实验误差范围内，荧光屏上的闪烁数与用电法计数器投在屏幕上的 α 粒子数符合，很清楚，每个 α 粒子在屏幕上产生一次可见的闪烁……对于第一次发现能用原子的光效应和电效应检测物质的单个原子而言，这些结果是极有益的和重要的”。计数器或闪烁屏上每出现一次闪烁，意味着一个 α 原子核通过，因而在人类历史上第一次看到和能计数的单个原子。

这是古希腊以来首次证明原子的存在，他在 1911 年发现原子核一事，使著名天文学家爱丁顿 (Arthur Eddington) 说道：“在 1911 年，卢瑟福提出了自德谟克利特时代以来，我们物质观念的最大变化”。用计数器计数原子是比公认的法国佩兰用实验证实分子存在早约半年，他们是 2000 多年来关于原子论的思辨和道尔顿原子论假说提出后，首次证实原子的存在。历史历程是先发现电子，再发现原

子，然后才发现分子。它们的发现顺序具有很重要的方法论意义：发现子粒子不一定要靠打破母粒子的方法，而可能从另外的渠道将亚粒子提前发现。

(2) 马赫 (E. Mach) 的态度变化：1903 年马赫在闪烁器屏上观察到 α 粒子荧光的径迹，说“现在我相信原子的存在了”。但是他在临去世之前，又在 1913 年在《物理光学原理》的序言中写道，“我必须像我今天抵制原子信仰那样，断然否认我是相对论的先驱”。

爱因斯坦在 1948 年给贝索 (Besso) 的信说马赫：“只要把这种思想贯彻到底，他就必然会不仅否定原子论，而且还会否定物理实在这个概念”。

(3) 分子的发现：1908 年 5 月，法国的佩兰在研究布朗运动时，根据爱因斯坦的博士论文计算分子大小的方法，用乳胶实验和测算分子的大小，得出阿伏伽德罗分子数为 7.05×10^{23} (现标准数为 6.25×10^{23})，其分子大小为 $0.2067 \mu\text{m}$ ，从而被广泛认为证明了分子的存在。他在《布朗运动与分子的实在》论文中说：“照相乳胶的观察，给予分子理论以牢固的实验基础”。佩兰在 1926 年获得诺贝尔奖时说：“20 年前还被人怀疑的分子和原子的客观真实性，现在可以认为是一个总算可以得到证明的原理了”。

(4) 奥斯特瓦尔德 (P.W.Ostwald) 唯能论的转变：他在 1912 年《普通化学基础》第四版的导言中说，“我现在相信，我们已经有了物质分立的或颗粒性的实验证据，这是千百年来原子假设所徒然寻求的……佩兰以今天说的物质原子的实验证据证明大多数谨慎的科学家是有道理的，这样，原子假设就上升为科学上十分有根据的理论……”，他从此放弃了唯能论。

6. 原子有核模型

(1) 1908 年，盖格和马斯登 (Ernest Masden) 发现 α 粒子被金原子核反常地“大角散射” (图 10)。

(2) 1911 年 5 月卢瑟福在《 α 和 β 粒子被物质散射和原子结构》论文中，提出原子由带正电的核与绕原子核旋转的多环电子组成。

(3) 1912~1913 年玻尔用量子论解释原子核外的电子环及电子的分布，提出存在电子定态轨道之间跃迁两个假设： $E = h(\mu_2 - \mu_1)$ ，初步地说明了按照经典理论，电子沿电子轨道旋转却不会陨落到原子核上的原因。1914 年这个理论得到弗朗克

(James Frank) 和赫兹实验的证实。因此，卢瑟福原子有核结构又称为卢瑟福-玻尔原子模型。

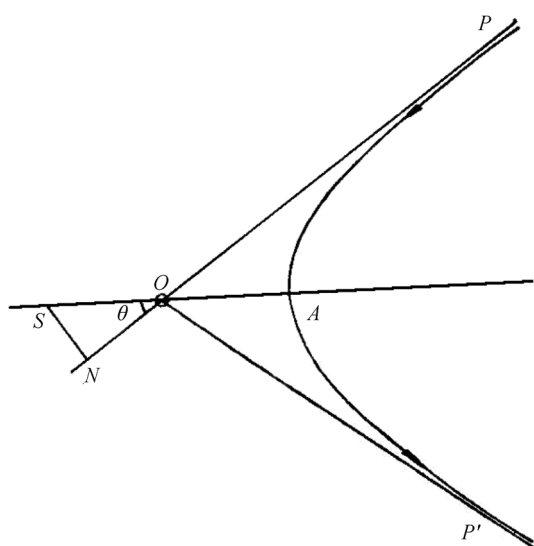


图 10 金原子核对粒子大角散射

7. 人工打破原子核和实现元素人工嬗变

(1) 1917 年卢瑟福用 α 粒子首次打破氢原子和氦核，打出了氢核，即发现了质子。1919~1924 年他与学生们先后打破了所有轻元素的原子核，特别是布莱克特 (Blackett) 在 1924 年用 α 射线轰击氮原子核： $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O}$ ，第一次发现一种元素转变为另一种元素。

(2) 1924 年卢瑟福发现原子核外存在势能很高的势垒，自发发射的 α 粒子无法穿过势垒，这导致玻尔推荐刚发现核势垒隧道效应的加莫夫到剑桥，终于在考克饶夫 (Cockcroft) 和瓦耳顿 (Walton) 的努力下，研制了第一台加速器——高压倍加器，1930 年后几乎用它打破了所有重元素的原子核，实现了元素的人工转变，卢瑟福称之为“新炼金术”。

(3) 1933 年卢瑟福及其弟子奥利芬特 (Oliphant) 等，用加速器将重氢核对撞，实现核聚变，为后来人工核聚变的实现开辟了道路。今天所研究的是激光可控的热核聚变。

(4) 1932 年查德威克根据卢瑟福 1922 年对中子的预言发现了中子，1933 年布莱克特根据卢瑟福 1920 年的预言，美国的安德森 (Anderson) 从另一方向，分别发现了正电子，这是第一个发现的物质的负粒子。

8. 原子核结构模型：两种说法：

(1) 卢瑟福 1927 年定名中子，并提出原子核

由质子和中子组成，如图 11 所示；这是有史以来第一次提出原子核内的结构模型：“中子是原子中心核的卫星”和“电子和质子紧密结合成中子”。

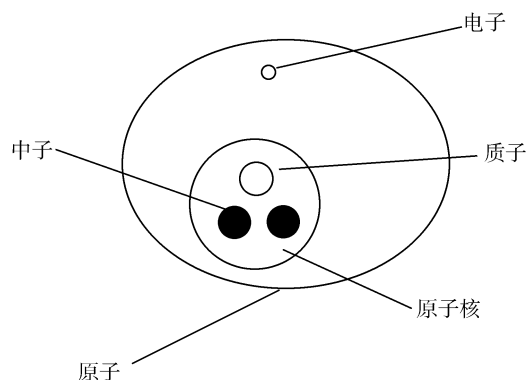


图 11 超重氢 (氘) 原子结构

(2) 一般认为，海森伯 (Heisenberg) 和伊凡宁柯在 1931 年分别提出原子核由质子、中子和电子组成。

9. 从原子结构量子论到量子力学

(1) 玻尔与原子结构量子论：他用这个学说解释卢瑟福刚提出的电子绕原子核旋转的原子模型，对于单电子的原子和分子取得很好效果。

(2) 玻尔的对立原理：1917 年，玻尔为了能将它的原子结构量子论与经典理论协调，提出了对立原理。

(3) 索末菲 (Sommerfeld) 的空间轨道理论：慕尼黑大学理论物理所的索末菲在 1918 年提出，核外电子轨道实际上是复杂的很多空间轨道，所谓的电子轨道不过是其几率最大的。

(4) 德布罗意的物质波理论：1923 年他在博士论文中提出光和电子等微粒子可以粒子或者波的形式存在，并在回答佩兰的提问时说，可以用镍晶体对电子的衍射试验予以证实，两年后，他的看法得到汤姆逊 (G.P.Thomson) 和戴维森 (Davison) 的试验的证实。

(5) 量子力学的两种表述等效：1925 年和 1926 年海森伯和薛定谔 (Schrodinger) 先后提出了矩阵力学和波动力学，后来薛定谔等人证明这两种理论不过是量子力学的两种表现形式，二者是等效的。

(6) 量子电动力学：1928 年英国剑桥大学的理论物理学家狄拉克 (Dirac)，将量子力学与相对论结合，建立了量子场论，又称量子电动力学。美国的费曼 (Richard P. Feynman)、施温格 (Julian

Schwinger) 和日本的朝永振一郎(Sin-Itiro Tomonaga) 用重整化法使量子电动力学获得巨大成功, 为标准模型的提出准备了条件。量子电动力学对于后来高能物理的发展起了重要作用。

(7) 量子色动力学: 量子色动力学简称 QCD, 是一个描述夸克之间强相互作用的标准动力学理论, 它是粒子物理标准模型的一个组成部分。

10. 强子结构模型

(1) 费米-杨 (Fermi-Yang) 模型: 1949 年费米 (Enrico Fermi) 和杨振宁提出当时发现的所有原子核和介子都由质子 (p)、中子 (n) 和它们的反粒子 (\bar{p} 、 \bar{n}) 组成。

(2) “坂田模型”: 坂田昌一系名古屋大学教授, 粒子物理学家。1942 年提出 π 介子和 ν_{μ} 中微子, 得到实验证实而著名。1955 年他根据盖尔曼-西岛法则, 提出实体论解释和强相互作用粒子符合模型 (又称坂田模型)。认为所有强子 (重子与介子) 应由质子、中子、 λ 超子及它们的反粒子组成。这个模型描述介子质量、自旋、宇称比较成功, 但是对解释重子的分类却不令人满意, 因为它预言的重子过多而遇到了困难。

费米-杨和坂田模型只考虑了强子同位旋对称性质, 不能解释超荷量子数。

(3) 层子模型: 1965 年以朱洪元为代表的北京基本粒子物理组提出了层子模型, 用于研究粒子的动态性质。

(4) 1963 年盖尔曼 (M.Gellmann) 和茨威格 (Zweig) 为说明多重态结构, 根据 SU(3) 群理论, 提出了强子由三种夸克组成的“夸克模型” (上夸克 u、下夸克 d、奇夸克 s)。能合理地说明当时的强子结构和相互作用, 揭开了夸克研究的先河。

五、标准模型与这次科学革命

1. 1967 年, 温伯格 (S.Weinberg) 和格拉肖 (S.Glashow) 提出电-弱相互作用统一的想法, 同时预言第四种夸克, 丁肇中和里克特 (R.Richter) 发现了 J/ψ 粒子, 证实第四种夸克 (粲夸克) 存在。

2. 1974 年温伯格和萨拉姆 (A.Salam) 在上述发现基础上, 提出著名的强子组成“标准模型”。此模型预言:

(1) 弱相互作用和电磁相互作用具有统一性;

(2) 据 SU(6) 群预言了六种夸克 (上、下、奇、粲、顶、底夸克, 即 u、d、s、c、b、t 夸克)

存在;

(3) 预言一切物质都由六种轻子和六种夸克组成 (表 2)。

表 2

轻子种类	夸克种类
电子	上夸克 μ
电子中微子	下夸克 d
μ 子	奇夸克 s
μ 子中微子	粲夸克 c
τ 子	底夸克 b
τ 子中微子	顶夸克 t
Higgs 子	

(4) 预言弱作用、电磁作用和引力相互作用的传递子 (表 3)。

表 3

作用种类	强度结构系数	数量级	传递子
强作用	$g^2/4\pi\hbar c$	10^1	胶子
电磁作用	$e^2/4\pi\hbar c$	10^{-2}	光子
弱作用	$g\omega^2/4\pi\hbar c$	10^{-5}	中性玻色子
引力作用	$HM^2V/4\pi\hbar c$	10^{-39}	引力子

(5) 预言存在产生质量的 Higgs 子。

3. 标准模型的验证

1973 年发现中性流;

1974 年发现第四个夸克;

1977 年莱德曼小组在美国费米国家实验室观察质子-质子碰撞产生的 μ 子对时, 1978 年原西德科学家以电子-正电子相碰撞时, 先后在 9.5GeV 处看到至少由两个共振态组成的凸峰, 1978 年也发现质量为 $9.46\text{GeV}/c^2$ 的共振态粒子, 寿命不到 10^{-18}s , 被称为 Y 粒子。一般认为 Y 粒子是由第五种夸克——底夸克 b 及其反夸克组成的束缚态, 又称为底子偶素。Y(9.46) 被认为是底子偶素的基态。实验上还发现 Y'(10.016) 和 Y''(10.38), 它们是底子偶素的激发态。这些发现被认为是发现了第五种夸克。

1979 年唐孝威等多名中国科学家参加合作研究的、丁肇中领导的 MARK J 实验组等, 在汉堡 DESY 的 300 亿电子伏电子正电子对撞机加速器上发现了三喷注现象, 从而发现了胶子。1983 年 1 月和 6 月, 先后发现中性玻色子 W_{\pm} 和 Z_0 , 证实了电-弱相互作用的统一性和发现弱相互作用由中性玻色子传递;

1994年费米国家加速器实验室用 2×9800 亿电子伏 Tevatron 正负质子对撞机, 发现第六种夸克。该室计划建设 4 万亿~17.5 万亿电子伏巨型质子-负质子对撞机, 以彻底验证标准模型, 该计划未得到美国国会的批准而搁置。至此, 标准模型预言的 6 种夸克、电-弱统一相互作用, 以及除去引力作用外其他基本相互作用传递的粒子都被发现了。除去 Higgs 子和三种相互作用的统一性有待证实之外, 其他预言已经得到实验证实。

剩下的 Higgs 子和强相互作用问题有待更高能量的加速器予以证明, 费米国家加速器实验室的巨型质子-反质子对撞机既然搁置下来, 但 CERN 的 LHC 对撞机因事故而推迟试验后, 2009 年 2 月 23 日费米加速器实验室的主任 Peir Oddone 宣布, 他的同事 Dmitri Denisovyou 认为发现 Higgs 子有 95% 的机遇, 说: “在这种情况下, 我应该说今年夏天看到过隐藏的 Higgs”。他们用 Tevatron 质子-负质子对撞机实验发现, 原来用量子力学计算预言 Higgs 子存在于 $114 \sim 185 \text{ GeV}/c^2$ 之间, 但是他们最近的实验却得出, 在此区间找到一个截面, 但是其存在不会在 $160 \sim 170 \text{ GeV}/c^2$ 之间, 因而限定了它的范围, 并声称很可能在 6 月发现 Higgs 子, 而早于 CERN 发现它。但是一年过去了, 仍未见结果发表。

CERN 决定联合多国之力, 在日内瓦和法国边界地下的 27km 长隧道内, 建造 2×70000 亿电子伏 (全发挥作用时要大许多) 的巨型质子-质子对撞机, 该对撞机能量达 14 万亿电子伏, 其目标主要是验证标准模型和宇宙大爆炸理论。

如果预言的 Higgs 子能够予以证实, 就基本上证明了标准模型。但是, 至今的实验尚未给出必要的证明, 它还未囊括宇宙由明、暗物质和暗能量组成问题。如果将 20 世纪末看作 1895 年开始的科学革命的结束时间, 而把天体物理中关于暗物质和暗能量新发现等看作科学发展的新阶段, 比较合理。当然也存在修改标准模型, 或者作出囊括这些发现, 并进而修改有关理论或模型, 也是一种解答方案。

4. 标准模型的特点

与已有的现代各种科学理论相比, 它更能够将现代的微观物质组成理论、量子力学、量子场论(包

括相对论效应)、微观运动理论和方法论予以综合。尽管它能以更高的视角跨越了关于生命物质的分子生物学成就领域, 但却是至 2000 年为止, 最能将 1895 年后的科学成就进行综合的理论体系。关于暗物质和暗能量等问题, 要彻底搞清楚非目前实验和观测能力所能达到, 很可能它属于下次科学革命解决的问题。

至于引力相互作用, 由于它的强度数量级比弱作用要高 34 个数量级, 因而必然需要漫长的时间实现它与其他三种相互作用的统一性, 并且还意味着这期间会有很多深层次的物质组成和相互作用机理等待解决, 这些实验是个大的工程, 进程也已开始, 举世正拭目以待。

5. 反氢的发现和正物质宇宙成因

2010 年 5 月, 费米实验室 Dzero 项目组科学家在 Tevatron 加速器的质子和质子对撞机实验中, 8 年来收集了数以万亿计的质子和反质子的碰撞数据, 结果发现, 在短短的一秒钟内, 碰撞产生的中性 B 介子会在其正常的物质状态和反物质状态之间来回“摇摆”几万亿次, 并且 B 介子似乎能够更快地从其反物质状态转变到物质状态, 而不是相反, 最终使得在 B 介子衰变到 μ 介子时, 正物质比反物质多 1%。结果是宇宙间的物质比反物质多, 在正负物质淹没后, 剩下物质及其组成的宇宙。对撞机 (LHC) 或许可以给我们提供一些答案。幸亏有了这 1% 的不对称, 否则我们的宇宙也许就是另一番虚无的景象。早在 1967 年, 苏联物理学家安德列·萨哈罗夫就提出, 电荷宇称破缺导致宇宙大爆炸后物质多于反物质。费米实验室的最新证据更加表明, 迄今代表主流学术见解的宇宙标准模型即便正确, 却说不上完整, 还有一些非常重要的东西等待我们发现 (例如 B 介子及其行为)。

6. LHC 对撞机实验与宇宙大爆炸式的环境

这项实验在深入地底 100 米、长达 27 千米的环型隧道内进行。科学家预计, 粒子互相撞击时所产生的温度, 比太阳温度还要高 10 万倍, 就好比 137 亿年前宇宙发生大爆炸时那一刹那的情况。对撞能量 2×70000 亿电子伏。

(中国科学院自然科学史研究所 100190)