

一部以物质本原为主题的未完成交响曲

——从原子论到粒子物理发展漫谈

陆 昌 国

打开近三十年来诺贝尔物理奖的获奖名单，差不多有近一半是从从事研究粒子物理的。为什么诺贝尔奖如此厚爱粒子物理学家呢？回答很简单，因为粒子物理所研究的对象是一个困扰了我们数千年，并且至今还在困扰着我们的基本问题：物质世界的本原究竟是什么？

人类很早就有这样的信念，认为天地万物尽管形态纷繁，变化莫测，但其基本的结构和变化规律终究是简单和有限的。在古希腊的哲学思想中已经有土、水、气、火组成世间万物的看法，我国古代的阴阳五行学说，也是持这种观点。至于物质具有最小的组成单位——原子，也早就出现在二千四百多年前希腊和中国哲学家的词汇中，然而在此后的二千多年历史中，没能从本质上把人类的认识提高到新的水平，直至近代化学的出现，才使原子论从哲学观点变成了科学学说。

从原子论到粒子物理的最初三部曲

一个多世纪以来，人类对“基本粒子”的探索过程，实际上就是用越来越高的能量去轰开越来越坚固的“屏障”，进入到越来越深的物质结构层次。这里要说的三部曲就是从原子论开始的物质结构的最初三个层次以及与之相关的三个能量区域。

让我们从能量区域 I 说起。

在微观世界里常用电子伏作为能量单位，即 1 个电子在 1 伏特电压下加速运动所得到的能量。将 1 克物质提高 1 厘米所消耗的能量相当于 6 百万亿电子伏，可以想知电子伏是多么小的能量单位。在能量区域 I 中，只有能量低于 1 电子伏的物理现象出现。如此低的能量不足以使“原子”激发，所以在此能量区域内我们完全可以把“原子”看作为“基本粒子”。

与我们日常生活联系最密切的物理、化学现象，绝大多数发生在 1 电子伏到 1 万电子伏这个能量区域，我们称它为能量区域 II，这时原子结构被打开了，围绕原子核运动的电子可以被激发到更高的能级，直至

从原子核周围被“拉开”，原子不再是一个理想的弹性刚球，而成了变化多端的“魔球”，原子不再是基本粒子了，原子核和电子登上了基本粒子的宝座。在这个能量区域，原子核看来像不可分割的刚球，我们只能用它们所带的电荷、质量以及磁矩等物理量来区分它们。但不知为什么有那么多“基本粒子”，也不知在上述的那些物理量背后，为什么存在某些基本的单位。

为了进入物质结构的下一层次，我们必须进一步锋利手中的“解剖刀”，将能量提高到数十万以至数百万电子伏，这就不得不求助于范德格拉夫静电加速器或回旋加速器那样的大型研究工具了。将加速到如此高能量的粒子去轰击原子核，则原子核能被激发，它的结构也在人类面前暴露出来。经过长时期的仔细研究，人们终于明白了原子核尽管种类繁多，但它们无一例外，均由质子和中子组成。在中性的原子中，原子核里的质子数等于核外的电子数。

如果原子核只是由质子和中子组成的话，那末我们自然要问这些粒子怎么能结合在一起呢？当然在原子中，电子和原子核能依靠静电吸引力结合成一个类似于太阳系那样的“行星”系统，但是在原子核中就不存在这种静电吸引力。质子是带正电的，中子不带电，强大的静电斥力，将会使原子核“分崩离析”，为了将它们拉在一起，必须存在某种尚未认识到的强大的引力，这种引力要比电磁力强得多，因为实验告诉我们，为了将原子核中的质子，或 α 粒子（两个质子和两个中子组成的粒子，也即氦的原子核）拉出来，需要数百万电子伏的能量，这就引导我们进入了能量区域 III，即原子核物理的研究领域。

现在我们知道，在核子之间的确有一种吸引力，称之为强相互作用力，这种力虽然极强，但是力程极短，只要超出核子约一万亿分之一厘米距离，它就小到几乎不复存在了，正是由于此，核力不会在我们的日常生活中、在宏观世界中显露出它们的存在。

在描述粒子的电磁相互作用方面，量子电动力学

获得了巨大的成功，它的理论计算与迄今为止的实验结果完全符合。根据这种理论，粒子之间的电磁作用是通过传递光子——电磁场的量子来实现的，作用的强度随距离的平方而减弱，是一种长程场。我们当然也希望为核力发展一种令人满意的理论。与电磁作用作类比，假设在核子周围存在一种核力场，这种场十分强，但作用距离却十分短。日本物理学家汤川在1936年大胆地作了进一步的假设，认为核力场也是通过交换某种量子来传递相互作用。然而，由于这两种力场的作用距离大不相同，理论计算指出，它们的量子也必然大不相同。光子的质量为0，核力场的量子质量则需为电子质量的200~300倍。汤川的理论预言有这种粒子的存在，称之为介子，因为它的质量处于质子和电子之间。不久即在宇宙线中发现了一种质量为电子200倍的粒子，人们立即把它与汤川所预言的粒子联系起来，认为这是汤川理论的重大胜利。然而事情还没有那么顺利，仔细的研究发现，这种认为是传递核力相互作用的粒子理应很容易被核物质吸收，但实际上却极难与物质发生相互作用，是不是汤川理论出了问题？这个秘密在其后很长时间内没有得到解答，1947年英国物理学家鲍威尔在研究核乳胶照片中的宇宙线事例时发现了一种质量为电子300倍的新粒子，而这种粒子又会衰变成上面已经提到的那个误认为是汤川介子的粒子，这才使真相得到大白。鲍威尔发现的粒子正是人们整整等了12年的汤川粒子—— π 介子，而1937年发现的粒子并不具有强作用的特性，只有电磁作用，被人们起名为 μ 子。

在这个时期中发现的基本粒子中值得大书一笔的另一个粒子就是中微子，它至今仍是粒子物理学家议论的中心之一，同时也吸引着许多学科的强烈关注，诸如宇宙进化学、宇宙学、天体物理学、紫外和射电天文学、地质学、原子物理和核物理、化学等。这个粒子是由泡利首先在1930年提出的。当时由于对 β 衰变的深入研究(所谓 β 衰变是指原子核中一个中子(或质子)转变成质子(或中子)，同时放射出一个电子(或正电子)的放射性过程，有时也可能是原子核吸收原子的一个轨道电子)，发现了在 β 衰变中一系列无法解释的疑难，它似乎破坏了过去物理学所确立的许多守恒定律：能量守恒、动量守恒、角动量守恒。物理学家陷入了几乎绝望的困境，泡利是怀着“不入虎穴，焉得虎子”的勇气提出中微子这个假想粒子的存在。这种粒子中性，质量极小，甚至可能为0，很难被常规探测手段发现。费米采用了中微子假设，建立了造成 β 衰变的一种新型作用力弱相互作用的理论。尽管很长一段时间内人们并没有从实验上直接观察到中微子，直到五十年代中才由埃伦等人 and 柯温、莱恩斯在实验中得到证实，但所有的间接证据都与中微子假设相符。

至此我们可以把本世纪五十年代初期关于基本粒

子世界的知识归纳成下表：

表 1

基本相互作用	强作用	电磁作用	弱作用
传递相互作用的粒子	π 介子	光子	?
基本粒子	质子、中子、 π 介子、电子、 μ 子、中微子、光子		

当然在基本相互作用中还应加上一种无处不在的万有引力，但在考虑粒子的相互作用时，它的影响微小到可以完全将它忽略。

粒子王国从繁荣到精简——新的第一乐章

对上表中所归纳的物质世界基本结构的图象，即使在五十年代初也不是令人满意的。如果翻开当时物理学家的一些著作，不难发现一系列的疑问。 π 介子的质量与汤川理论预言符合得非常好。当然人们把它理解为核力作用场的量子，但是核力场与电磁场之间的类似性毕竟十分微弱，因为 π 介子很不稳定，中性 π 介子寿命只有一亿亿分之一秒，带电 π 介子也只有一亿分之一秒，而光子却是非常稳定的。看来汤川当初的建议有正确的成分，但是很难说究竟正确到何种程度。同时，宇宙线实验揭示了基本粒子王国还有新的成员，当时人们已经发现有两组新的粒子，有一组的质量为电子的1000倍左右，并衰变成 π 介子，称为 τ 和 θ 介子(现在称为 K 介子)，另一组的质量更大，为电子的4000倍以上，并会衰变出质子和中子等，人们统称它们为超子。诺贝尔奖金获得者鲍威尔在1950年说过：“我们很可能还只是处在发现的开头。我们目前的理论方法终究受到缺少必须的信息的限制，看来介子世界要比迄今为止最深邃的理论思索所能料及的还要复杂得多”。宇宙线这个天然加速器为我们揭开了进入物质结构更深层次的窗帘的一角，真正要敲开它的大门进去仔细考察一番，还得依靠新一代的加速器，能量必须增加到10亿电子伏以上，我们可以称它为能量区域IV——新的第一乐章。1952年建成的美国布鲁克海汶国立实验室的考斯莫加速器就是人类第一次用人工方法将质子加速到25亿电子伏能量，进入与宇宙线相匹敌的阶段(考斯莫的英文意义就是宇宙线)。此后，新一代的加速器相继出现，平均每隔7~10年，加速器的能量提高10倍，加速器提供的越来越高的能量，给我们带来了物质结构这一新层次的越来越深刻的认识。

新一代加速器的出现大大加快了基本粒子的研究步伐，一批又一批新的粒子被发现了，从而揭示出了新的奇特性质。描述粒子特征的物理量——量子数也名目繁多起来，如奇异数，G宇称，重子数，轻子数，超荷等。1965年，基本粒子表中的粒子数目已经超过100

种,面对如此众多的基本粒子,很难相信它们都是“基本”的。这是实验对理论的挑战,要求理论家从丰富的实验资料中揭示出更深刻的内涵。美国物理学家盖尔曼和尼曼在1961年提出了具有强相互作用的粒子——强子的分类法,类似于化学中的周期表,名目繁多的基本粒子经他们的分类,秩序井然地归入了具有对称性的图表,并根据图表中的空缺,预言了一个当时还没有发现的粒子——奥米伽超子。果然在三年以后被布鲁克海汶实验室塞缪斯领导的实验组发现了。

盖尔曼和尼曼的“周期表”背后,隐藏着什么更深刻的规律呢?是否有更基本的粒子在起作用呢?其实这种想法很早就有人作了尝试。费米和杨振宁在1949年就曾经考虑过 π 介子由核子-反核子对组成的可能,认为在所有的基本粒子中,核子和反核子是更基本的。1956年坂田又提出了将质子、中子拉姆达粒子和它们的反粒子作为粒子世界基本砖块的模型。这些模型都因与实验结果发生分歧而被放弃,必须寻找新的出路。盖尔曼和茨威格在1964年提出了三个性质奇特的假想基本粒子,盖尔曼将之称为“夸克”。

这三个夸克的性质十分离奇,列在下表中:

表 2

	重子数	奇异数	电荷数 (电子电荷作单位)
μ 夸克(上夸克)	1/3	0	+2/3
D 夸克(下夸克)	1/3	0	-1/3
S 夸克(奇异夸克)	1/3	-1	-1/3

“基本”粒子“周期表”可以用这三个夸克的各种组合重现出来。尽管理论的成功是毋庸置疑的,它形式的简捷明了,结构的和谐统一,简直像杰出的弦乐三重奏,但是作为理论出发点的奇特“三鼎足”却使盖尔曼本人也颇感踌躇了。他当时曾经说:“现在的所有强子,都可以用这三种夸克象搭积木一样地拼凑起来,可是夸克的性质太奇特了,它们也许根本不存在,只是一种数学符号而已。”然而粒子物理进一步的发展,却越来越使人相信夸克作为客观实体的存在。也许狄拉克在1931年说过的话不无道理:一个数学上优美的思想必定已被上帝所采纳。

夸克之怪还在于它的隐居癖。直至今日所有的实验都只是感觉到它的存在,却没有人真正捕捉到一个自由夸克,尽管所有的强子都由它们的组合形成!这就是著名的“夸克幽禁”。

现在我们可以把人类对粒子世界的认识图象归纳一下。粒子分为强子、轻子和传递相互作用的中间玻色子。强子有两大类,其中的介子,诸如 π 介子, K 介子,由夸克和反夸克组成;重子,诸如质子、中子、超子,由三个夸克组成。轻子至今还没有发现它们的内部结构,所以依旧可把它们看为点粒子。对于强、电磁、弱

三种相互作用都分别有对应的传递相互作用的粒子,量子色动力学是研究夸克间强相互作用机制的理论,根据这种理论,在夸克间传递强相互作用的粒子是胶子。对弱相互作用的深入研究指出,弱作用是由 W^\pm , Z^0 粒子传递的。今天,夸克数目也由最初的三种增加到六种,除了顶夸克 t 以外,其它五个均已证实。根据这幅图象,我们原先面对的数百个“基本”粒子,可被下表少数一些更基本的粒子所代替。

表 3

夸克		u, d, c, s, t, b
轻子		$\nu_e, e, \nu_\mu, \mu, \nu_\tau, \tau$
传递相互作用的粒子	强作用	胶子 g
	电磁作用	光子 γ
	弱作用	w^\pm, z^0

粒子物理过去约三十几年,一方面是经历了一场基本粒子数从大繁荣到大精简的辩证发展过程,另一方面,则是在向统一各种相互作用力方面迈进了一大步,这两个方面实质上是相辅相成的。长期以来,物理学家最雄心勃勃的抱负,莫过于将所有已知的作用力归纳到一个统一的理论中,为自然界写下一个统一的运动方程,以至原则上可以解释宇宙万物间的一切现象。然而要将已知存在的四种相互作用统一起来谈何容易!爱因斯坦是在这个方向上进行尝试的第一个人,他将后半生贡献于引力和电磁力的统一,但并没有成功。格拉肖、萨拉姆和温伯格成功地迈出了第一步,在六十年代建立了弱作用和电磁作用统一的理论,根据这种理论可预言必定存在传递弱作用的粒子 W^\pm 和 Z^0 ,并给出了它们应具有的质量,指出只要我们能够得到能量足够大的加速器,就可以在实验室中制造出这些粒子,在此能量下,弱作用的强度也将达到电磁作用的大小。七十年代的一系列实验间接地验证了理论预言的正确,八十年代初,人们终于在西欧原子核研究中心巨大的加速器SPS上直接看到了 W^\pm , Z^0 ,实验测量值与理论完全符合。

迎接新的挑战——第二乐章何时开始?

上面提到的弱电统一理论和描写夸克间强相互作用的量子色动力学理论构成了目前粒子物理学中公认的标准模型,它经受住了各种实验检验,无疑,在人类目前能够从实验室中获得的~1000亿电子伏的能量范围内,这是一个在很大程度上正确的理论。我们的能量区域IV已经扩展到了这么高的程度,哪里是下一个能量区域V的起始点?

标准模型成功地回答了一连串的问题,但是留待回答的问题似乎也不少。夸克和轻子(都是费米子)在标准模型中可以将之划分为对应的三“代”。

$$\begin{matrix} \left(\begin{smallmatrix} \mu \\ d \end{smallmatrix} \right) \left(\begin{smallmatrix} \nu_e \\ e \end{smallmatrix} \right); & \left(\begin{smallmatrix} c \\ s \end{smallmatrix} \right) \left(\begin{smallmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{smallmatrix} \right); & \left(\begin{smallmatrix} t \\ b \end{smallmatrix} \right) \left(\begin{smallmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{smallmatrix} \right) \\ \text{第一代} & \text{第二代} & \text{第三代} \end{matrix}$$

我们周围的物质世界是由质子、中子、电子组成的,所以只需要上面的第一“代”基本费米子就够了,质子可由 2 个 μ 夸克、1 个 d 夸克组成,中子可由 1 个 μ 夸克、2 个 d 夸克组成。但在加速器实验室中,我们观察到了另外二“代”费米子,它们与第一“代”相比并没有什么本质的区别,只是质量更重些。为什么粒子王国需要它们的存在?除了这三“代”以外,是否还有第四“代”,甚至更多“代”?为什么这些基本粒子的质量相差如此之大,第一“代”的 μ 夸克和尚未发现的第三“代”的 t 夸克,质量竟可能相差一万倍以上?是什么东西决定了它们的质量大小?对这些更深的问题,标准模型束手无策,因为在标准模型中这些质量被认为是自然界的基本常数,根据实验数据人为地放进理论中去的。类似的基本常数在标准模型中至少有 17 个,也许可以有 24 个,很难使人相信它们都是基本的,必定会有更深刻的理论来解决这个问题。

标准模型实现了弱作用与电磁作用的统一,但自然界还有强作用和引力作用,能不能将它们也统一进去呢?沿着同一条思路发展起来的大统一理论试图将强作用与弱电作用统一起来,其中有一种最简单的理论曾明确预言质子会衰变,其寿命约为一百万亿亿年,但实验结果表明质子的寿命至少在这个理论值的一百倍以上,究竟多长,至今还未测得,所以这种最简单的理论是失败了,有人在继续发展其它的大统一理论,避开与实验不符的困难,结果还很难预料。

除此以外,近年来出现了不少新的理论,如超对称理论,超弦理论以及更深层次的基本粒子的理论等,这些理论开辟了新的研究方向,带来了新的希望,但是要使理论有生命力,唯一的出路是必须作出一些在实验上可以验证的预言,让实验最后决定对理论的取舍。

对于近期的未来,人们的眼光当然集中于对标准模型的实验检验。究竟标准模型精确到什么程度,是否还有更重的 w 粒子和 z 粒子?理论所预言的顶夸克,至今还未得到实验的肯定。理论中起着关键作用的希格斯粒子,也是理论中最不讨人喜欢的部分,人们并没能明确给出它的质量范围,至今实验上没有发现这种粒子。……人类急切地期待着新物理的发现。这几年,美国、西欧、日本和苏联都在加紧建造新一代的高能加速器,日本的特累斯坦正负电子对撞机已如期在 1986 年 11 月出来,率先进入下一轮的竞赛场。今年美国的 SLC 也将投入运行。由于首先发现 w 和 z 粒子而声名大振的欧洲原子核研究中心,正在加紧建造直径达 9 公里的 LEP 正负电子对撞机,并计划于 1988 年完工,届时美国又一个创能量最高纪录的泰伐特龙质子反质子对撞机也将第一次把人类带入上万亿

电子伏的领域。

据分析,在本世纪的最后十年中,标准模型将能在上述的一批加速器上得到详彻的检验。美国的一批科学家感到在基本粒子研究方面来自西欧和日本的有力挑战,为了保持自己在这个领域内的领先地位,竭力推动政府投资建造质心系能量达四十万亿电子伏的质子质子对撞机,称之为 SSC(超导超级对撞机),造价将达 30 亿美元以上。该计划最近已得到里根总统的批准,如果能够在 1988 年开始建造的话,将在 1996 年完工。

二十一世纪人类的眼睛将会深入到物质的哪个层次?有的理论说能量高达 1 亿亿亿电子伏时,强作用将与弱电作用统一,高达 1 万亿亿电子伏时(即所谓的普朗克能量标度),引力作用也被统一进来,这时将重现宇宙创世纪时的条件了。人们能制造出这么高的能量吗?目前物理学家正在研究激光等离子体拍波加速器,它与目前常规加速器相比,加速能力将大一千倍,即使我们采用这种新技术制造一个环地球一周的加速器,仅能得到 1 千亿亿电子伏,制造一个从地球到太阳那么长的加速器,得到 1 千万亿亿电子伏,要达到上述的普朗克能量,则我们的加速器长度必须达到 100 光年!

以探索物质本原为主题的这部未完成交响曲还在演奏着新的第一乐章,究竟何时开始它的宏伟的第二乐章,请读者们和科幻小说作家们去发挥丰富的想像力吧!