

“宇宙与生命”系列讲座之六——

三代粒子与核子质量

章德海

宇宙万事万物纷繁复杂，千变万化，令人眼花缭乱。但是背后却潜藏着惊人的规律性。人类对这些规律性已有相当深入的认识；但是从根本上来说，人类对这些规律性的认识又是矛盾和凌乱的。深入在于，我们有量子场论和广义相对论的理论基础，这两个基础理论在解释和改造世界的实践中获得了巨大成功。矛盾和凌乱在于，这两个基础理论在基本观念上居然是互相矛盾和不自洽的！统一这一矛盾的理论出路可能是“弦理论”，它最终把“点粒子”代替为一根又细又长的“弦”，形象类似琴弦、弦线。但是首先让我们停留在点粒子的概念水平上。我们要提到的物理世界规律性是“全同粒子”概念，它对理解物理世界规律性起到引导作用。我们都看到，宇宙万事万物各不相同。世界上几十亿人，大体看去个个相似，但其实个个不同。宇宙中的电子数就更多了。那么是不是当我们把每个电子放大后，看上去每个电子都不一样，都可以对每个电子作某种标记把它们互相区分开呢？否！所有的电子都是全同的，不可区分的。当你把分离的两个电子做上不同记号 A 与 B，让它们接近并发生碰撞。等到碰撞后分散开来，你再想区别和确认哪个出射粒子是原来的 A 电子、哪个出射粒子是原来的 B 电子，已经不可能。它们全同，不可区分。这完全是由于粒子的量子性产生的全新性质。量子粒子不能同时拥有准确的位置和动量，它们是被波函数描写。当粒子编号交换时，如果波函数不改变符号，就称为“玻色子”。如果改变符号，就称为“费米子”。可见，同一状态上只能容纳一个费米子，这叫泡利不相容原理。正是有了这一原理才能允许构建原子，从而有了丰富的化学世界。

由于粒子的全同性，于是对于宇宙中无数的电子，只要知道一个电子的性质就够了。一个电子的质量是多少？一个电子的自旋是多少？那么所有的电子都是这个质量和自旋。这给物理学家带来多大方便？我们不必一个一个地去研究电子。研究了一个电子，就知道了所有的电子。当然两个（或更多）

电子的体系和一个电子肯定不同，这是细化研究的内容。因此一个电子代表了一类粒子。我们看到，“粒子全同性”是物理世界的第一个基础的对称性，它是世界统一性的第一个强有力暗示。从此人类迈开更高统一的漫漫之路。有的人过于幻想，作个类比：认为地球绕着太阳转，地球上住着人；那么是不是电子绕着原子核转，电子上住着极小极小的人？不行了。电子上住了“人”？那不就可以用那些“人”把电子区分开了吗？电子就不全同了吗？

下一个问题是，是否物理世界就只有电子这一类粒子？常识告诉我们，当然不是。例如宇宙射线中存在 μ 介子，它除了质量是电子的 207 倍以外，其余一切性质都与电子相同，它肯定是另一类粒子。 μ 子和电子属于“轻子”。那么世界到底有多少种基本粒子？种类有限还是无限？今天的科学告诉我们，在一定质量限制之下，粒子种类是有限的。接近普朗克质量标度，弦的本质将显现，粒子概念将模糊。粒子种类有限的例子是，几乎无质量的中微子就只有三类。今天的科学还告诉我们，质子和中子（通称核子）都不是真正的“基本”粒子，它们是由叫“夸克”（外加“胶子”）的更基本的粒子构成的复合粒子。那么这又带来一个问题：今天我们认为的基本粒子——例如电子、夸克，是不是将来又可能发现它的结构，从而不是真正的“基本”粒子呢？也就是说：原子核由核子组成，核子由夸克组成，夸克由“亚夸克”组成，亚夸克由“亚亚夸克”组成，……无限可分，无穷无尽呢？不会的！每分一层，分解能标就要提高一步。用不了几步，能标就提升到了“普朗克能标” 10^{19} GeV（见本讲一），无法再分解下去了。于是层次肯定有限，不是天真想象的“无限可分”。也许要想分解出电子、夸克的结构，一直要从今天的 1TeV 到接近普朗克能标了，于是它们确是“基本”的。这样的猜测并非毫无根据，下面提到的耦合常数统一将为此提出一定证据。

那么我们的世界到底有多少种基本粒子呢？现在有个基本粒子的“标准模型”，它与所有的物理检

验相吻合，是人类认识世界所取得的最实在的伟大成就。它把粒子分成两类，第一类是半整数自旋（ $\hbar/2$ ）的费米子，有六种轻子（带负电 e, μ, τ 和它们相应的不带电中微子 ν_e, ν_μ, ν_τ ）和六种带电且带 3 样“色”的夸克（上 u 下 d 、粲 c 奇 s 、顶 t 底 b ）。其中 e, ν_e, u, d 称为第一代粒子，相应有第二、第三代，一代比一代重，每个粒子都有丰富的故事，不可能在此叙述。由于量子效应要在一定程度上破坏对称性，称为反常。为恢复对称，场论反常需要抵消。成代的粒子反常正好抵消，于是粒子必须成代出现。现实世界只由第一代带电粒子构成，质子成分为单色 uud ，中子成分为单色 udd 。中微子难于捕捉，游荡于宇宙空间之中。第二、三代带电粒子瞬间衰变，不参与我们的日常生活。上面讲到的那些半整数自旋的费米子各自都有对应的反粒子，例如电子与正电子， u 夸克与反 u 夸克等等，所以标准模型中的轻子一共是 12 种，夸克一共是 36 种。第二类是整数自旋（ $\hbar$ ）的玻色子叫“规范场粒子”，它们有一个光子 γ ，8 个只与“色”相互作用的胶子 g ，两个带电中间玻色子 $W^\pm$ 和一个中性中间玻色子 Z ，分别传递电磁、强和弱相互作用。正是由于三种中间玻色子很重（约 80、90 GeV）才使得太阳缓慢燃烧，乃至有 100 亿年的寿命。这个理论还要求一个自旋为零的玻色子，叫“希格斯” H ，它对各个费米子获得质量起关键作用，但至今尚未发现。最近的欧洲大型强子对撞机 LHC 的重要目的之一就是要寻找它。整数自旋的玻色子（包括至少有一种希格斯粒子和一种引力子）共 14 种。于是这两类粒子，总共数下来应是 62 种。这 62 种基本粒子是不是足够描写我们的宇宙了呢？最近看来不行了，它们说明不了宇宙中的暗物质。因此粒子标准模型虽然成就伟大，但肯定不是最终答案。

不学基本粒子的人会对以上描述感到奇怪，即使学了基本粒子的人最终也会对以上描述感到奇怪。最突出的问题是，为什么有三代粒子？为什么有弱电强三种相互作用？粒子物理只能告诉你，那是因为我们发现如此。发现了的东西并不见得就理解了它。人为什么会有两只胳膊两条腿立着走路？我们可以说天生如此。实际上，这是最优进化的结果。但是人为什么要长眉毛？知道了。那么自然上帝可不可以为世界安排两种或四种相互作用呢？可不可以安排两代或四代粒子呢？可以的呀！量子

场论的规则完全容许这样做，它可以安排的方案很多很多，都满足基本物理原理。自然上帝为什么偏偏要安排三代粒子三种相互作用？即使学到数学物理的顶级理论，例如号称万物理理论的“超弦理论”，它在建立唯像模型时都只能把三代粒子三种相互作用作为前提和输入，而不是推出的结果和产物。它也只能告诉你，那是因为我们发现世界如此。这是人类认识世界的一个重大的谜。对这个谜我们完全可以不必追究。但是如果我们追究的话，我们将向你分析而得出结论：自然上帝安排三代三种相互作用就是为了宇宙中有生命！多了少了恐怕都不行。这样的结论恐怕也比较惊人吧？

我们来分析一下其中道理。量子场论原则上可以任意安排对称性和物质表示（例如电荷就是一种“表示”）。生命肯定离不开化学反应。不用说上帝首先得造出一个带单位负电的电子以备构造原子之用。为了要有化学，我们需要不同的元素，即，带有各种核电荷的不同原子核。那么为上帝方便起见，它必须再造出 100 个不同的基本粒子，它们的电荷从 1 一直安排到 100 个单位正电。这不就什么元素都有了吗？不行啊！电子绕着这 100 个基本粒子旋转只有化学能。等到化学反应结束，能量到达基态，一切过程就终止了。化学燃烧一结束，宇宙就死寂了。必须要另有些个能源，生命化学反应才能源源不断地推进下去。单靠引力收缩发光发热是不行的，它维持不了太久，满足不了生命进化的长期性。上帝必须另想它方。最好，这 100 个不同电荷的“元素”不再是基本的，而是复合的。于是，它们有了结构，产生结构的力提供了新的能源。那么具体怎么复合而成的呢？最简单的方法是，其基本砖块最好就是单位正电荷。需要核电荷为 10 就用 10 个基本正电荷来构造，以此类推。于是这个基本正电荷就是“质子”，可见我们这个世界首先不能缺少质子。注意这时的所谓质子还只有电磁作用。可是只有“电磁质子”不行啊！质子带正电，要让它们结合在一起，库仑排斥力就会拆散它们。必须要有一个更强的力把它们结合在一起才行。此力必须是短程的，不然长程强力将永远压过电磁力，使超重元素太多太多。可见我们必须有第二种力，短程强相互作用。于是我们需要强作用的电磁质子。但是这还是不行啊！如果加上的强相互作用仍然是像我们现实世界那样的自旋相关强作用，那么由基本成分构建复合

粒子的第一步就发生了严重困难，不可能去构成两个电荷的束缚态！因为这需要两个全同质子（自旋取向相同）去构造束缚态，由于泡利不相容原理，绝对合不到一块。怎么办？上帝很聪明，发明一个“中子”来起缓冲作用。这时自旋取向相同的一个质子与一个中子就可以结合到一起了，成为“氘核”。这是第一个核子复合体，核合成的万里长征中最根本重要的第一步。于是更大核电荷的元素就可能陆续制造出来了。

现在我们的方案暂时是由刚才说的稳定质子和中子来构造元素。但是这套方案显然出了大问题。由于中子没有电荷排斥力，又有强相互作用力吸引，所以它形成原子核也就太容易了。于是，必然有各种太多太多的重核同位素存在，将来会大大扰乱化学世界。顺便说一句，用一个带负电的核子来代替中子会使情况更糟。唯一的解救方案是，让中子是个“适度不稳定”的粒子。为什么要适度不稳定呢？首先，中子必须是不稳定的，这样一来那些太多太多的过度富中子重核同位素统统都会衰变掉，不至于影响化学世界的秩序。但是，如果中子绝对不稳定，那发明它干吗？那就连刚才说的核合成第一步——氘，都没有了。它就什么作用也起不了了。上帝必须安排，依赖于中子在核中的结合能，在质量亏损较大时中子是稳定的，在质量亏损较小或自由状态时中子是不稳定的。这就能既发挥中子应有作用，又不致引起危害，这也就是“适度”的意思。中子需要衰变，那么衰变成什么呢？电荷必须守恒，中子只能衰变成质子和反电子。但是，这么一来，角动量又不守恒了，于是需要再安排一个粒子，“中微子”，我们于是解释了中微子的出场。这种衰变，也就是粒子相互之间的转换，显然是一种新的相互作用，我们把它叫做“弱作用”。这种弱作用也可以使原来难以结合的两个质子能发生实质性结合，但是这需要马上把其中一个质子通过弱作用转化为中子，从而成为稳定氘核，以便核聚变得以持续。然而，在质子中子反电子和中微子间的弱作用，是一个“四费米”相互作用，不是一个量子场论上有好性质的相互作用。必须把四个费米子两两隔开，加入中间玻色子作为过渡，这才是真正的基本弱作用。而这也要求质子和中子必须是更基本的粒子——夸克的复合态，真正的强相互作用（称为“QCD”）应该在夸克之间传递。带电弱作用则在轻子或夸克

的左手态之间进行。原来提到的核子间的强相互作用只不过是这里的真正强相互作用的剩余相互作用而已，于是天然地成为短程力。其道理相似于中性原子间可以通过剩余电磁作用吸引而结合为分子。

至此，我们终于看到，弱电强三种相互作用缺一不可了。很明确，没有电磁作用就没有化学世界和生命现象。没有强作用就没有推动生命化学反应的核能源。没有弱作用就不能构造元素，就不能实现太阳核能的缓慢释放。自然上帝安排得何等巧妙，以宇宙能出现生命为最高宗旨，进行精心设计，样样都要照顾周全！那么是不是再多一种相互作用会使情况更好、功能更强、造出的生命更伟大呢？这就太难猜测了。不过，或许再多一种相互作用不但起不了好作用，反而还起捣乱作用，也是说不定的。很可能，自然界还需要新的相互作用以实现更高对称性的破缺，这是后话。当然引力相互作用是第一不可缺少的，于是自然界至少有弱电强引力四种相互作用，不可或缺，不可代替，各司其职。

让我们来认识一下四种相互作用的相同与不同之处。弱电强作用力的传播粒子都是自旋为 1 的粒子，称为“规范粒子”。只有引力的传播粒子是自旋为 2 的粒子，叫“引力子”。电磁相互作用粒子只有一个，叫“光子”，对称性叫 $U(1)$ 。弱相互作用粒子有 (2^2-1) 即三个，即 W^+ 、 W^- 中间玻色子，对称性于是叫 $SU(2)$ ，2 乘 2 矩阵去掉对角和（迹），是个内部对称性。强相互作用粒子有 (3^2-1) 即八个胶子，对称性于是叫 $SU(3)$ ，它的动力学叫“色动力学”，简称 QCD。这八个胶子带有不同的相反双色，它们互相转换，无法谈到哪个胶子比哪个胶子更基本，它们都同样基本，这就是对称性。更有意思的是，粒子之间的颜色标记不必在全空间同步，只需时空各点独立变换，这就是“局域对称性”。我们看到了对称性的提升，从全同粒子对称性，进一步提高到内部局域对称性。光子不带电荷，不能自作用；胶子本身带色荷，有自作用，于是带来胶子的全新相互作用性质。这种相互作用因自作用在低能小尺度时相互抵消，耦合强度大大减小，叫“渐进自由”；在高能大尺度时相互作用的力线被吸引而汇聚，形成弦状，产生了禁闭位势，叫“红外禁闭”。于是三个互补色夸克禁闭形成重子（之一为核子），两个反色夸克禁闭为介子（之一为核力传播子），通称“强子”。弱作用的中间玻色子则大不相同，质量

特别重，其质量量级叫“弱电能标”。这是太阳燃烧缓慢的根本原因。但是当反应能标更高时，中间玻色子质量可以忽略，那么中间玻色子与光子看上去真的没什么两样，就跟八个胶子看上去相同一样。中间玻色子与光子本质相通叫做“弱电统一”，中间玻色子获得大质量叫做“弱电破缺”。每种相互作用都有自己的耦合强度，当然如刚才所说这个强度依赖于能标，于是叫做耦合常数（或耦合强度）的“跑动”，跑动的速度依赖于所有参与量子涨落效应的粒子的种类和数目。在原子能标的低能情况下，电磁耦合强度就是我们第一讲中频频提及的赫赫有名的“精细结构常数” $\alpha_{em}=1/137$ 。顾名思义，强作用耦合强度 α_c 可大了，即使由于渐进自由随能标上升它要减小，但是直到弱电能标 100GeV ，也有 $\alpha_c=0.12$ 。弱耦合强度居中。光子与胶子不同，自身不带电，于是不但不是渐进自由的，反而是“反渐进自由”的，随能标升高电磁耦合强度要增大。于是，随着能标进一步上升， α_{em} 要增加， α_c 要减小，看来三种相互作用的耦合强度有趋同的势头！这刺激了“大统一”的想法，弱电强三种相互作用在更高的能标上展现出更大的规范对称性 $SU(5)$ ，它需要 $5^2-1=24$ 个规范粒子。与已有的 12 个弱电强规范粒子相比，需要扩大另外 12 个成员。但是这些新成员有一个很糟糕的性质，它要引起质子衰变为介子和反电子，所以这些新成员必须更重，以便压低质子衰变。

我们看到，基本粒子的对称性在不断提升。世界就是由对称和破缺这一对基本矛盾构成。世界是统一的，从第一步起所有电子的全同性就已预示了这一前景。进一步，相互作用的局域规范对称性，和广义相对论的局域洛伦兹对称性都是对称性的典型体现。没有对称就没有统一，就没有规则，没有自洽。但是只有对称没有破缺，世界就会千篇一律，没有了千变万化，于是没有了丰富多彩的生命。可能的大统一看来是一个更高的对称性。但是否对称性已提高到了顶头呢？不，我们想起了玻色子和费米子的划分。依据全同粒子在交换时的性质可得出规则，在一个状态上的玻色子数目不受限制（例如玻色爱因斯坦凝聚），但是在一个状态上的费米子数目要么为零要么只有一个，性质差别何其之大。它成为了我们世界的构造法则。玻色子和费米子还有一个突出差别，由于真空的量子效应，玻色子真空

能往往为正且无穷大，而费米子真空能往往为负且无穷大。两者的真空能都有致命弱点。以前在量子场论中，都是直接抛弃这些无穷大真空能（称为“正规序”），因为它们在粒子加速器试验中没有效应。但是宇宙学的发展揭示，真空能具有引力或斥力，对宇宙膨胀起重大作用。所以直接抛弃它们并不合理。这使人产生强烈联想，如果玻色子和费米子之间有对称性——称为“超对称”，那么无穷大的正负真空能且正好抵消，而使理论完美了吗？超对称还能抵消量子效应中的其他大量的无穷大，并对拉氏量的任意性作出重大限制。超对称是个相当理想的一种对称性，在理论上具有显著优越的地位。但是我们的现实世界明显不是超对称的。例如标准模型中的玻色子数和费米子数并不相等，甚至其中没有哪个玻色子真正与哪个费米子是超对称配对。如果我们的世界真的有超对称，那么标准模型的粒子数要增加一倍，让所有的已知玻色子配上其相应的未发现费米子，也让所有的已知费米子配上相应的未发现玻色子。但是必须设置超对称破缺机制，使超对称粒子变重，以解释为什么我们至今没有发现它们。这样的大大扩充是一个大胆的假设，寻求超对称粒子也成了 LHC 的重要目标。那么是不是超对称仅仅是理论需要，自然界连一点超对称的迹象都没有呢？不是。把最小超对称扩充的标准模型作耦合常数跑动演化，发现弱电强三种相互作用的耦合强度在 10^{16}GeV 能标时果然发生重合，真正实现了大统一！注意这个大统一能标，如果它在普朗克能标之上，那么由于没有考虑到量子引力的影响，结果肯定不可靠而无意义。如果这个能标比此数值低哪怕是一两个量级，那么质子就没有足够的寿命以符合实验要求。它的数值如此之巧，以致人们高度猜测其合理性。但是有的人太不看重这一上帝为我们显露出来的统一迹象了，他们认为这些数字的巧合纯出偶然，不能说明任何问题。然而，侦探破案中必须重视任何蛛丝马迹。任何忽略细微但重大线索的行为都会为案件侦破带来灾难性影响。在统一之路上，每当我们放弃一条原则，就洞开了数不尽的荒谬可能，“科学”就形同画鬼。每当我们认识到一条原理时，前进的道路才有明确方向和指南，才能辨别真理和荒谬，跳出纷繁复杂，去伪存真。

标准模型中，三代粒子是最显著和迷惑、最难理解的特征。四种相互作用缺一不可，但三代粒子

似乎多余。一方面，理论要求 QCD 是渐进自由的就能容纳 8 代夸克，但要求超对称 QCD 是渐进自由的就只能容纳 4 代夸克了。另一方面，实际上质子中子只由第一代粒子构成，电子也同属第一代粒子，对现实世界而言，似乎它们已经足够了。第二、三代粒子转瞬即逝，对生命没有建设作用。很是奇怪，为什么自然上帝要安排三代粒子？看上去纯粹是一种累赘和败笔。这个代数既不是最少的 1 也不是最多的 4。难道仅仅是为了人们能在加速器上看到丰富的粒子物理现象，上帝才安排三代粒子？不！一条重大线索在于核子质量与普朗克能标之间的巨大差距上。

在“本讲座一”中，我们画出了万物图。宇宙中一些最重要的事物集中在一个有限中心区的一条线上，这条线叫原子密度线。定出原子密度的根本参数是核子质量 1GeV。万物中心区之所以能在质量上横跨 78 个量级、划分为十四个等级这件事情，与普朗克质量与核子质量的巨大比例 10^{19} 极为相关。没有这么大的量级跨度，没有十四个层次的结构，就不可能有丰富多彩的生命。因此可见核子质量的这一自然参数对宇宙结构起到至关重要的作用。如果我们不深入思考，就会觉得，核子质量一个 GeV，有什么值得大惊小怪，基本常数天生如此，天经地义，无从追究。但是，从基本物理的观点看，事情并不寻常。核子质量并非基本物理参数，它是派生的。基本物理世界是对称的，任何特殊的物理标度都是从不断的对称破缺中所产生的结果，一切都需要解释，只有原理才是天经地义的。如果核子质量朝大处调整，那么整个万物中心区就会向左移动而被压缩，使得整个宇宙不足以划分出足够的等级以构建生命。如果核子质量朝小处调整，那么整个万物中心区就会向右移动，表面看上去似乎有利于复杂生命。但是，这既不一定与宇宙年龄和太阳寿命相匹配，也可能降低创造生命的效率，最终可能使得在宇宙中产生生命的行动失败。所以自然上帝在选择核子质量时做了精心安排，这个值不是可以随意选取的。那么核子质量这个值到底取决于什么因数呢？核子之所以有 1GeV 的质量，是因为 QCD 在这个标度上发展出非微扰强作用，引起手征破缺，细节颇为复杂，我们另找机会解释。不过这里简单地讲就是，QCD 在 1GeV 的低能标上其强耦合强度 α_c 跑动发展到量级为 1 的强作用水平。那么

α_c 是从什么出发点开始跑动的呢？超对称大统一能标 10^{16} GeV。以什么初值开始跑动呢？这里我们区别一下耦合常数 g 和耦合强度 α 。耦合常数 g 是指相互作用场的耦合系数，而耦合强度定义为 $\alpha = g^2/4\pi$ 。还要指出，规范场的起源是膜上的弦，因此规范场耦合常数直接与膜张力相关。膜是弦理论中自然出现的高维延展体。膜张力又直接与弦张力或普朗克标度相关。这一系列推理导致结论，在统一能标或普朗克能标时，规范场耦合常数 g_c 的初值是基本被固定的。 g_c 数字的大体量级为 1，这里我们取为 0.7，换算得到 $\alpha_c(10^{16}\text{GeV})$ 约为 1/25。如果是三代粒子，那么能标降低到 1GeV 时 $\alpha_c(1\text{GeV})$ 就为强作用 1 了。相反，如果是两代粒子，那么能标降低到 500GeV 时就使 $\alpha_c(1\text{GeV})$ 成为强作用 1 了，这意味着核子质量有 500GeV，这太重了。如果是四代粒子，核子质量就只有 2MeV，太轻了。耦合常数的跑动速度正比于能标比值的对数，因此变化极为缓慢，由此造成普朗克能标与核子质量在量级上的巨大差别。粒子代数越少，抵消渐进自由的效应越小，跑动就越快，从大统一能标下降不了多少个量级就能使强作用达到非微水平。粒子代数越多，跑动越慢，要到很低能标才能到达非微扰强作用。只有三代粒子不多不少，才能使强作用在合适的能标上到达非微扰。三代并非多余，其整体配合决定了 1GeV 核子质量的理想值。因此三代粒子是宇宙生命的需要。这是我们本文得出的最重要最新鲜的结论，对我们认识宇宙与生命之间的关系具有指导意义，是破解三代之谜的关键观点。

（中国科学院研究生院 100049）

封面照片说明

这是我国新研制的第三代航天远洋测量船“远望五号”，它采用当今船舶、气象、电子、机械、光学、通信、计算机等领域的最新技术，分为船舶、通信、气象、测控四个系统。在船的甲板安装了 S 波段统一测控系统、C 波段统一测控系统、C 波段脉冲雷达三套大型测控设备。船内采用光纤构建综合信息传输平台，能够使各系统利用该平台扩展功能，实现了测量船与各系统的联网。该船设备的数字化、标准化、系列化与通用化得到大幅提高。“远望五号”测量船的建成为我国载人航天、探月工程及导航定位等项目提供了海上测控的强有力的支持与保障。

（李博文）