

表 2 参数是重要的。中子衰变反应为 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ，恒星中氢燃烧的第一步反应为 $p+p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$ ，两个反应都对 u、d 夸克质量有重大约束。两个反应能够放出的能量分别为 $m_n - m_p - m_e = 0.782$ ， $2m_p - m_D - m_e = 0.420$ 。但是在讨论 u、d 夸克质量对上述反应的影响时，我们面临一个困难。我们不可能去做个试验，通过改变夸克质量去观察对上述反应进程的影响。而且我们不知道一旦改变夸克质量后，其他物理常数，例如强耦合常数、电磁耦合常数、核力等是否会跟随改变。如果一切都在改变，那真是无从下手分析！于是我们必须简化问题，让变化的因素越少越好。有一条物理原理我们知道，那就是 u、d 夸克质量之和与 π 介子质量相关。 π 介子质量又决定了核力的力程，也可能与核力的强度相关。因此保持 u、d 夸克质量之和是一个必要的简化，于是可让核力的力程和强度保持不变，并可进一步假设电磁耦合常数也保持不变。我们让电子质量也可以变动 δm_e 。在保持 u、d 夸克质量之和的前提下，u、d 夸克质量改变之和为零，于是有 $\delta m_u = -\delta m_d$ ，因此有两个独立变量 δm_u 和 δm_e 。分析上述两个反应的基本成分可得出两个约束 $2\delta m_u + \delta m_e < 0.782$ ， $-2\delta m_u + \delta m_e < 0.420$ 。两式相加得下式的上限 $-0.511 < \delta m_e < 0.601$ ，此式下限由电子质量不能为零得到。利用此式下限于上两不等式可进一步得 $-0.465 < \delta m_u < 0.647$ 。可见，夸克和电子质量的可变范围都相当狭窄，仅约 1.11MeV，这个数值只有电子质量的 2 倍，u 夸克质量的 1/3，核子质量的千分之一。当然如果把电子质量调得太小，原子就太大，化学能太小，对生命世界影响太大。因此上述电子质量下限必须提高，由此夸克质量变化范围也必须收窄，我们不再详细分析。电子质量必然有个下限，这个下限应该与电子当前质量相差不远。

表 2 几个重要参数

粒子	电子 e	中子 n=(udd)	质子 p=(uud)	氘 D=(np)
质量 (MeV)	0.511	939.565	938.272	1875.613

一个更加严格的对第一代夸克质量变动的限制来自恒星内部碳及氧的元素合成。太阳的氢燃烧合成了氦，但是氢燃烧生成碳和氧遇到一个障碍，中间产物铍 8 (^8Be) 不稳定，它只有 $2.6 \times 10^{-16}\text{s}$ 的半衰期。铍 8 之所以不稳定是因为氦核太稳定了，铍 8 可看作是由两个氦 4 构成，其构形可能像哑铃状。由于两个氦 4 各带正电相互排斥，这时的短程核力帮不上大忙，于是铍 8 就不稳定了。铍 8 的不稳要

求碳和氧的核能级必须有精心的安排才能被共振合成。两个氦合成为铍，后者的能级仅仅比前者高 0.092MeV。氦加铍合成碳，后者的共振态能级仅仅比前者高 0.283MeV。氦加碳合成氧，后者的共振态能级仅仅比前者低 0.045MeV。这三个数字比起一般的核能级间距是何等的小！这三个过程的略微吸热、吸热、放热的格式不能稍有改变。这三个能级差值给了我们新的启示。如果第一代粒子的质量被当作“基本”物理常数而不敢改变的话，那么这里的三个能级差值难道也要当作“基本”物理常数而不敢改变吗？它们也是处在综合效应的微扰末端，完全可以设想在某些更基本的物理常数变动的情况下它们也能够变动。如果某些变动造成碳、氧的共振能级的安排稍有不恰当，将导致严重后果。在恒星中氦的燃烧可能合成过多的碳而少有氧，但更可能合成过多的氧而没有碳，很难使碳和氧有一个恰当的比例。例如我们世界中的碳氧核子数之比为 0.55，是一个非常漂亮的比例数，碳与氧真是不多又不少。没有碳就没有有机界，没有氧就没有水，两者对生命皆不可缺。但是研究表明 (arXiv:nucl-th/0009046)，如果第一代夸克的质量之“和”哪怕只有 1% 的变动，它将极大改变核力，从而改变共振结构，极大改变核合成反应率，使产物的碳氧核子数比的变动高达 30 倍以上，那就完全破坏了生命产生的基础。这一质量和的限制显然比刚才谈到的中子衰变和氦核合成所带来的 30% 的质量差限制要严格得多。

从基本理论的角度来看，第一代粒子的质量如此之低，本身就是非常奇特的事情，更不要说 d 夸克质量比 u 夸克质量还要高。在弱电统一中物质费米子起初都是无质量的，它们的左手态和右手态在对称群下有不同的表示。左手态与右手态的相互作用可以通过叫作希格斯的标量粒子作中介。一旦希格斯发生真空自发破缺，希格斯场就可能取得真空平均值，这一效应等于是使左手态可直接转化为右手态，于是等价于使物质费米子获得了质量。所有三代费米子的质量都是靠这种希格斯效应获得的。那么，三代粒子的质量最自然的值就是希格斯场真空平均值的量级，顶夸克的确就符合这一规律，因此它的质量为 171GeV。但是，在所有三代粒子中，仅仅只有顶夸克质量才有 100GeV 以上这样的大值，第二号“人物”底夸克就只有 4GeV 的较小质量了，到了第二、一代的粒子质量就越来越小，以

致 u 、 d 夸克质量分别只有 3MeV 、 6MeV ，电子质量只有 0.5MeV ，居然比应该取的自然量级数值小了 6 个量级。是什么原因造成粒子质量的等级式降低，目前原因并不清楚，猜测太多而少有特别优秀者。但是粒子质量的等级式压低显然是质量分布的重要格局，压低的参数像个微扰参数，显然它不可能是理论的一个不可变动的的基本参数。只要这个微扰参数稍有变化，那么作为超高阶微扰的第一代粒子的质量就可能变动很大，远远超出刚才指定的范围。那么为什么第一代粒子的质量恰好取值在刚才叙述的指定范围内呢？没有别的更好解释，只有人择原理。如果第一代粒子的质量不在刚才叙述的指定范围内取值，那么要么中子过于稳定或过于不稳定，要么氦核合成发生困难，要么碳氧比例严重失调，都会对生命的最终产生造成致命影响，于是没有生命出现，也就没有观测者观测到指定范围以外的质量参数。

夸克质量的这种取值现象被称为精细调节。基本物理参数中夸克质量的精细调节非常典型和重要，是对人择原理的最好支持。从弱电能标算起，夸克质量的精细调节可以说达到了 6 个量级，这是惊人的。但是，物理学中还有另一个基本物理参数经受了更为严峻的精细调节，这就是宇宙学常数。它的精细调节量至少需要高达 64 量级，远远高于刚才的 6 个量级，真是小巫见大巫。让我们来看看这一说法的道理。

首先我们介绍一下真空能。真空能是一种量子效应。一个谐振子在振荡过程中不断地作动能与势能的来回转化。根据经典力学，这个谐振子是可以静止下来的。但是根据量子力学，位置和动量不能同时确定，它就静止不下来。因为在静止状态下位置和动量都为零了，都变得确定了，这显然破坏了量子力学的测不准关系。因此根据量子力学，量子谐振子的基态必然有个非零能量，这个能量叫基态能。量子场论可以看作是无穷多个量子谐振子的集合，它们的基态能的总和叫量子场论的“真空能”。于是量子场论的真空能可能是无穷大。

但是由于在普朗克能标时量子引力对量子模式的截断，所以限制了量子场论的真空能最大值只能到普朗克密度 $(10^{19}\text{GeV})^4$ 。对于玻色子来讲，这个真空能是正号。有趣的是，由于费米子波函数的反对易性，费米子的真空能是负号。这么一来，只要玻

色子和费米子一一精确配对，那么真空能就可以抵消光了。真出现这种情况，就叫做精确超对称。遗憾的是，我们的低能物理世界不是超对称的。我们只能猜想，我们的物理世界在 高能时是超对称的，恢复超对称的能标叫超对称能标，这个能标需要高达 10^4GeV 以上才不致违反观测。由于在超对称能标以下的世界是超对称破缺的，那么玻色子和费米子的真空能就不可能抵消干净了，于是将剩下一个 $(10^4\text{GeV})^4$ 的超对称能标真空能。这是一个巨大的绝对数字。

这立即带来问题：我们的日常生活或物理实验怎么就没有感觉到这么巨大的真空能？原来在粒子物理中，所有的现象都是在能级间发生的跳跃，取两个能级之差就把绝对真空能的大数部分给消去了。我们是感觉不到大数真空能的，就像在大海上航行只知较小的浪高而不知该处海洋的极大深度。因此在粒子物理中人们完全可以把真空能简单地丢弃。当然对真空能也不是没有一点蛛丝马迹。设置两块理想导体平行平板，由于对电磁波的全反射，它们会限制一定的电磁波振荡模式，从而缺少一部分的基态能而引起两平行导体平板吸引。这个效应叫 Casimir 效应，等于是测量到了海浪的高度，已被实验精确测定和证实。Casimir 效应说明相对真空能确实存在，不是虚构。由此相对真空能推算出的 $(10^4\text{GeV})^4$ 绝对真空能也是有实验根据的，也不是虚构。虽然从任何粒子物理实验都无从探知绝对真空能的大小，但是绝对真空能却有引力效应，它会引起宇宙的加速膨胀。通过哈勃常数随宇宙距离的变化关系是可以测量到宇宙的加速膨胀的，从而就可以换算出我们宇宙的绝对真空能数字。然而，不必作任何测量我们就会得出结论，宇宙的绝对真空能数字肯定极小，因为宇宙有非常年迈的年龄，137 亿年。实际对宇宙加速膨胀的测量发现我们的现实宇宙最多只有 $(10^{-3}\text{eV})^4$ 这么大的暗能量，这当然是个极小的数字。但是刚才的分析给出的理论值高达 $(10^4\text{GeV})^4$ 以上，理论与观测两者相差了 64 个量级。这是基本物理对现实世界所作出的最为荒谬的预言，成为了理论的重大危机。

对于如此走投无路的情况其实早已安排了出路。早就发现在广义相对论中，有个“不变体积项”是可以加入到引力的理论中的，它的系数就是“裸宇宙学常数”，它的数值完全不定。而且这个裸宇宙

学常数与量子场论的真空能在物理效应上根本不可区分。我们观测到的暗能量的一种可能性其实是两者的抵消，叫“有效宇宙学常数”。也就是说，如果宇宙中各种量子场要产生 $\pm(10^4\text{GeV})^4$ 这么大的正或负的真空能，那么裸宇宙学常数就恰好要取相反符号的 $(10^4\text{GeV})^4$ 几乎同样大的值，使得两者抵消64个量级，仅仅剩下 $(10^{-3}\text{eV})^4$ 这么极小的一个正的有效宇宙学常数。如果两者抵消得不是那么干净，例如剩 10^{-11}eV^4 这么略大的有效宇宙学常数，那么这样的宇宙就遭殃了。这种宇宙等待不及星系或恒星能够诞生，就开始加速暴涨了。于是这种宇宙就没有了星系和恒星，没有了地球，也没有了生命。宇宙必须对有效宇宙学常数作出64个量级以上的精细调节才能使地球安全诞生。

有人会问，既然有效宇宙学常数如此之小，能不能让它为零？不能。我们找不到任何原理来论证它应该为零。我们也不能指望它会恰好抵消为零。我们的粒子标准模型有62种粒子，若有超对称粒子种数要加倍，大统一粒子类型会更多。每种粒子的量子场都会产生大大小小的真空能，许许多多的量子场或复合态都会发生高高低低的自发破缺，这些自发破缺都改变着各自的真空能。最终形成的真空能值是由太多的因素综合叠加而产生的，它的取值只能相当随机。在宇宙诞生之初宇宙高度对称的状况下，一个裸宇宙学常数怎么能知道宇宙的对称性最终会破缺成什么样子，它就预先设定一个终极值，把最终的有效宇宙学常数抵消得干干净净一点不剩？这在逻辑上是不可能的事。唯有的可能性是，最终的有效宇宙学常数是抵消不干净的，一定是高高低低各种有效宇宙学常数值都可能产生。但是对于拥有高于 $(10^{-3}\text{eV})^4$ 数值的有效宇宙学常数的宇宙，它不能顺利产生银河、太阳、地球，于是没有生命。因此没有观测者能观测到比 $(10^{-3}\text{eV})^4$ 更高倍数的有效宇宙学常数值。又由于在随机的抵消过程中把有效宇宙学常数的值抵消到越低的数值的可能性越小，于是也难于有观测者能观测到比 $(10^{-3}\text{eV})^4$ 更低的有效宇宙学常数值。负的有效宇宙学常数值容易使宇宙收缩寿命变短，更加不利于生命的出现。因此我们宇宙的有效宇宙学常数值是一个人择原理选择的结果。有人设想暗能量是动力学的，但这种模型的前提都假设了终极有效宇宙学常数为零，因此其合理性会受到怀疑。

这两个典型例子充分说明，我们宇宙的参数取

值的目的是为了我们人类的出现。它从一开始就把参数设定在能使高级生命出现的取值范围内。这是何等精妙！这就是宇宙与生命之间的深刻关系。或许我们相信，或者按“定义”，宇宙是唯一。如果这样我们就会遇到了一个尴尬的问题。宇宙参数取得如此巧妙，宇宙如此特殊，宇宙如此有目的性，真太不可思议，除非真有万能“上帝”特创，否则真不好解释。摆脱万能“上帝”特创的唯一出路在于，其实宇宙并非孤独。除了我们自己的宇宙外，还有许许多多宇宙(也许是无穷多)，各个宇宙可以取不同的物理参数。不利于产生生命的宇宙就不会有观测者观测到那些不利参数，只有具有适当参数的宇宙才有观测者观测到那些看似精细调节过的参数。于是，物理不需要万能“上帝”的特创，需要的是参数广泛变化的多宇宙。

我们的宇宙观经历着又一次的重大变化。中世纪的宗教认为人所在的地球是宇宙的中心，人在宇宙中有至高无上的地位。哥白尼打破了地球中心说，地球只不过是太阳的一颗行星。随后人们又认识到，太阳只不过是银河千亿恒星中的一颗“普通”恒星，而银河不过是宇宙中千亿星系中的一个“普通”星系。于是取消了人在宇宙中的中心地位。但是我们今天通过宇宙参数的精细调节意识到，我们的宇宙可能是无数宇宙中的一个特殊的宇宙，这个宇宙要以造人为中心。于是，我们的银河并不普通，我们的太阳也并不普通，我们的地球当然不普通。似乎我们请回了上帝。宗教把上帝描绘得聪明、智慧、万能，明察人间疾苦与秋毫。但是我们请回的“上帝”却是一个笨拙的上帝。它一个又一个地制造着宇宙，但是这些宇宙不是这个参数不对，就是那个参数不对，都不理想，没有哪个宇宙能成功产生人，都是些废品宇宙。好在它可以无限制的试探下去。突然有一次，它把所有的参数都碰对了，于是造就出了我们的这个宇宙，它顺顺当地演化发展了100多亿年，奇迹般地出现了银河、太阳、地球，出现了人。这里没有特创，没有崇高的智慧设计，只有无穷的试探。一旦创造出了人择的宇宙，上帝就撒手不管了，它何尝关心过人间生死，只能让你听天由命、自撞运气。物理的上帝与宗教的上帝差之天远，各有各的使命。物理的上帝解释世界，宗教的上帝安慰灵魂。

(中国科学院研究生院 100049)