

宇宙之大

章德海

我们的万物图中，标定了宇宙有大小，为 137 亿光年，于是一切事物都划定在一个有限的区域内了。这个数字是什么意义？怎么来的？很有必要解释一下，这是我们宇宙观的基石。137 亿光年，其实只是我们今天的宇宙的“哈勃半径”，与宇宙的膨胀率有关。宇宙的尺度是随宇宙年龄的增加而膨胀的。人类的科学史观中，没有什么概念比宇宙膨胀更为重要的了，它比“一切由原子构成”的原始观念更为影响深远和更让人始料不及。我们人类居住在地球上，地球只是太阳系的八大行星之一。而像太阳这样或大或小的恒星，在银河系中有千亿个，但是像银河这样或大或小的星系，在我们的可见宇宙中又有千亿个！然而，如此巨大的宇宙居然不是永恒不变的，居然是由比原子还小的初始宇宙膨胀演化而来的。虽然道理说穿了非常简单，但这实在不能不让人惊奇和神往。宇宙膨胀的观念至少让人们不得不相信，既然宇宙在膨胀，那么倒回去宇宙就会有个起源问题。既然宇宙都有个起源，那么宇宙中的万事万物，都有其起源了，都不是永恒不变的了。元素有其起源，银河有其起源，太阳有其起源，地球有其起源，生命有其起源，人类有其起源。既然有起源，就有演化、终结或循环。试问这给我们的世界观带来多大的变化？为我们的科学创造了多少课题？

那么宇宙为什么会膨胀呢？可以先从惯性来理解。惯性早为古人认识并被牛顿总结。设想一个均匀分布质点的一维模型，即在某一瞬间，在一维直线上分布有无穷多个质点，相邻两个质点间的初始距离都是 a 。我们可以选其中任何一个质点为中心，假设它的编号为 0，那么把与该中心距离为 n 倍 a 的质点编号为 n ，假定第 n 质点对该中心的相对速度为 v_n 。如果碰巧， v_n 并非杂乱无章，而是与 n 成正比， $v_n = n \cdot v_1$ ，这样的规律叫“哈勃律”。于是我们可以根据惯性运动算出第 n 质点在任意时刻相对于中心的距离来， $d_n = na + v_n t = na + nv_1 t = n(a + v_1 t)$ 。那么奇

迹就出现了：相邻质点间的距离 d_1 一致地拉长， $d_1 = a + v_1 t$ ，这在某种意义上就是一维“宇宙膨胀”，不过这时只是个等速膨胀。如果这些质点间有相互吸引力，那么宇宙就会减速膨胀。如果这些质点间有相互排斥力，那么宇宙就会加速膨胀。我们宇宙的膨胀正是类似于刚才叙述的一维膨胀的三维各向同性推广。由上面的公式可以看出，质点速度与距离成正比， $d_n/d_1 = v_n/v_1 = n$ ，于是 $v_n = H d_n$ ，这里 $H = v_n/d_n = v_1/d_1$ 叫“哈勃常数”，即宇宙膨胀率。我们宇宙膨胀的哈勃常数是被测定出来的。为此要对许多远近不同的星系，测定出它们到我们地球的确切距离和径向退行速度。这件工作从哈勃开始，今天已大有改进。果然，大量远近不同星系的距离速度比的确近似是个常数，为 $H_0 = 100 \text{ h km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Mpc}$ ，这里 $h \sim 0.7$ 是个测量值，这是我们宇宙最重要的一个“常数”（它其实是个演化常数），它将派生一系列的重要物理量。哈勃常数的意义是星系距离每增加百万秒差距，退行速度就会增加每秒 100 h 公里。星系距离的获取方法是，可用造父变星或 Ia 型超新星作标准光源，测出其观察亮度，从而换算出距离。退行速度可用星系的特定光谱的红移测到。

这里停留一下，我们可能会对刚才的叙述提出一连串的疑问和解答。1) 为什么要求质点等间距？因为这样的宇宙才是均匀的和各向同性。2) 为什么要求质点的速度与距离成正比？因为这样的膨胀宇宙在以后任何时刻都是均匀的和各向同性的。哈勃律只是宇宙的整体运动。真实的质点运动速度与哈勃律会有偏离，偏离速度就是质点的局部运动。3) 如果质点的速度与距离成正比，那么距离大到一定程度，速度就会超过光速，是否与狭义相对论或广义相对论相矛盾？矛盾是没有的，哈勃律膨胀的宇宙不是整体惯性系，因此不能简单套用狭义相对论概念。但是确有一个距离，即退行速度等于光速的距离，叫“哈勃半径”。更有意义的概念叫“视界”，它的定义叙述起来过于专业，但它在一定条件下与

哈勃半径量级相当，初步说来，我们把这两者当一回事。它代表在此视界距离以外的宇宙，原则上不可探测。4) 如果质点的速度与距离成正比，那么时间倒退到一定时刻，且不是所有质点都是从一个点出发的了？是！这就叫“大爆炸奇点”。倒推回去的时间就叫“宇宙年龄”。但是宇宙并不是真的从一个奇点开始其大爆炸，因为这样天真的回推，会使宇宙尺度到达普朗克尺度，引力量子效应会使经典哈勃律失效。不过这种失效对宇宙年龄的粗略值影响不大。5) 前面我们设想的是一条无限长的直线上均匀分布着相同质点。可不可以设想这条直线其实是个半径为有限值 R 的圆圈？可以，这就是所谓“闭宇宙”了，它是正的常曲率（曲率可看作是半径的倒数）。刚才的直线型宇宙称为“平宇宙”，它是零的常曲率。高维推广还有“开宇宙”，它是负的常曲率。经观测和分析可知，我们的宇宙恰好是平宇宙，或曲率极小，即半径 R 极大。6) 前面所述的宇宙膨胀，更准确的说法是，应看作宇宙曲率半径 R 的扩大。于是圈上质点之间的距离等比扩大。7) 当今的宇宙因物质有万有引力吸引而处在减速膨胀状态。可以推想，宇宙的过去必定膨胀速度很大，也就是说宇宙早期的哈勃常数很大。那么奇怪的是，宇宙膨胀的初速度从何而来？答案是宇宙初期必有某种排斥性力和成分起作用，使宇宙处于加速膨胀阶段，从而使宇宙获得极高的均匀性和各向同性（于是宇宙变成平宇宙），同时使宇宙获得以后继续膨胀的最大初始速度。当然这种排斥性力不能一直起作用，否则加速膨胀就停不下来，宇宙就不能转为正常的减速膨胀。宇宙初期的加速膨胀阶段叫“暴涨”。8) 这又引来另一问题，那么引起宇宙暴涨的成分或能量形态是什么？它为什么能一开始就要起加速作用然后又能自动停止其作用？为什么有一个“开始”？…，我们会一个问题接一个问题地穷追到底，似乎一定会遇到不可解答的难题。部分答案会有的，只是这篇短文还来不及马上回答这些问题，只好留待以后解决。

现在我们要集中注意力到哈勃常数上。我们看到，宇宙年龄 $|t| = d_1 / v_1 = H_0^{-1}$ 。让我们先不管 h ，把 H_0 的分子分母同时扩大 3000 倍。分子变为每秒 30 万公里，这正好是光速。分母中一个秒差距 pc 是 3.2 光年，3000 乘以 3.2 再乘以 M 即百万，约为

百亿。分母的“光年”与分子的光速相消正好剩下“年”的单位。于是得到 $H_0^{-1} = 100h^{-1}$ 亿年，带入 $h=0.7$ 得宇宙年龄约为 140 亿年。注意，不同成分的宇宙其年龄与 H_0^{-1} 有系数的差别，我们宇宙的几种成分综合起来赶巧使这个系数正好大约为 1，于是直接利用了 H_0^{-1} 作为宇宙年龄。我们宇宙的视界以光速膨胀，宇宙年龄 140 亿年，那么我们宇宙今天的视界半径就有 140 亿光年大了，换算为普朗克长度，量级为 $10^{61} l_{\text{pl}}$ 。我们宇宙今天的视界半径有 140 亿光年，并不能说我们的“宇宙”就只有这 140 亿光年半径那么大。随着宇宙年龄的增长，更大范围的空间会进入我们宇宙的视界。而等待进入我们宇宙视界的空间可能比我们视界内的空间大太多太多。但是，目前，我们宇宙的视界外的世界与我们无关，它们既不能被我们以任何手段观测到，也不能对我们视界内宇宙产生任何影响。因此，可以用简单的话语来说这件事，那就是今天我们的宇宙半径为 140 亿光年。由此可见，宇宙如此之大是因为宇宙如此之老。非常值得注意的事实是，宇宙年龄正好是太阳寿命的 1.5 倍，地球年龄的 3 倍。为什么它们在同一量级上？这里肯定有深刻的道理。

一个宇宙里面的主要成分是什么呢？成分的划分主要看它的能量密度随宇宙膨胀怎么变化。以低温原子这类物质为例，由于爱因斯坦质能等价，能量的主要成分是静能即质量，动能相对于静能而言太小忽略不计。于是能量密度就是质量除以体积。质量是不变的，宇宙膨胀体积随宇宙相对尺度 a （称为“标度因子”）的三次方变化。于是在宇宙学中被称作“物质”的这类成分，它的能量密度随宇宙膨胀变化为 $\rho_m \sim a^{-3}$ 。但是这个规律不适合光子。对光子来说，光子数密度才是这个规律 $n_\gamma \sim a^{-3}$ 。但每个光子的能量与波长成反比 $\varepsilon_\gamma \sim \lambda^{-1}$ ，在宇宙膨胀中，光子的波长被拉长 $\lambda \sim a$ 。光子气体的能量密度是单光子能量乘以光子数密度 $\rho_\gamma \sim \varepsilon_\gamma n_\gamma$ ，于是得到 $\rho_\gamma \sim a^{-4}$ 。在宇宙学中被称为“辐射”的这类成分，是指其能量主要构成为动能的成分，它的能量密度随宇宙膨胀变化类似光子为 $\rho_\gamma \sim a^{-4}$ 。低质量粒子处在高温状态下，它们也就从“物质”成分转化为“辐射”成分了。第三种成分，如果宇宙有曲率，那么“曲率”的等价能量密度变化规律为 $\rho_c \sim a^{-2}$ 。最后第四

种成分是宇宙学常数，与真空能等价。这种宇宙成分特别奇怪，它绝对均匀分布从不成团，其能量密度不随空间膨胀而变化，于是规律 $\rho_c \sim \Lambda$ 为常数，即 a 的零次方。由于对这种成分的本质提出了千奇百怪的各种其他解释，所以取了个更广泛的名字叫“暗能量”。以上各种成分在我们的宇宙中各有多大比例呢？依据宇宙微波背景数据和超新星的星等红移数据的分析可以得知，在我们宇宙中物质约占 30%，暗能量约占 70%，曲率可能几乎为零，辐射为 0.01%。物质里面，4%是我们的重子型物质（即质子、中子、核等），其余 26%为暗物质。暗物质虽有很多理论方案和模型，但尚未在实验中发现并判明其本质。但是我们知道，它们没有强相互作用，也没有电磁相互作用，只有引力相互作用和可能有弱相互作用。

宇宙的总能量密度与哈勃常数是关联的，这种关联恰恰就是第一讲里我们知道的黑洞质量与黑洞半径间的正比关系。宇宙像个大黑洞，只不过颠倒了一下，我们宇宙视界的外部就像黑洞视界的内部。既然我们宇宙视界为 $10^{61}l_{\text{pl}}$ ，那它的总能量就是 $10^{61}m_{\text{pl}}$ ，于是宇宙总能量密度为 $10^{-122}m_{\text{pl}}/l_{\text{pl}}^3 = 10^{-29}\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。总能量 $10^{61}m_{\text{pl}}$ 中，4%是我们的重子型物质，每个普朗克质量约 10^{19} 个核子，于是宇宙中总核子数为 10^{78} 个，虽然很大，但毕竟有限得很啦！这就是我们万物图中给出的那个重要数字。由它划分出了 14 个等级，每个等级跨越 5.5 个量级，由此构成宇宙万物。如果把这 4%的重子型物质当作 100%，那么氢元素占 76%，氦占 23%，其余元素仅 1%，地球主要由这 1%的元素构成，但有机界的比例很小。我们似乎看到了“上帝”创造世界时的“浪费现象”。有人曾问：“如果整个宇宙只有我们一个地球，那么上帝且不太浪费了吗？”宇宙视界中有多少地球留待以后讨论。有人想象上帝应该无比聪明，但“上帝”创造的世界确实有些“浪费”。总预算的大头花费在暗能量上，然后又大量花费在暗物质上，再后又要造出那么多氢和氦，轮到造有机物真是少之又少，冰山一角。这说明物理这个“上帝”在造物时，确实不够“聪明”。它只能按物理规律办事，“当初一大堆，如今一小块”，需要造出一大堆看似“无用”的东西，才能造出了一小块“有用”之宝物。但这个“上帝”在造物时，确实又足够“聪明”，它居然最后造出了“人”！尽管有“人”的行

星可能少的可怜。

不过对暗能量我们必须多说明几句。物质的能量密度随宇宙标度因子三次方反比减小，那么再过几百亿年宇宙不断膨胀，我们宇宙的物质比例基本就为零了，100%都是暗能量，因为暗能量的能量密度不随宇宙标度因子变化。那么反过来，宇宙膨胀初期标度因子很小，于是物质占有比例非常高，百分之百。暗能量的恒定值似乎一动不动地等待在那里，物质密度由高到低地变化，在其身边擦肩而过。当宇宙以暗能量为主时，宇宙的哈勃常数并不减小，宇宙的视界也并不扩大，但宇宙处于指数性温和加速膨胀的状态，这有点相似于宇宙初期经历的极为短暂而猛烈的“暴涨”。后果是，今天我们看得见的众多星系都将逃离我们的视界，永不复回。视界内的物质将减少或不再增加。尽管我们的银河可能与仙女座大星云合并，但合并后的大银河系却越来越孤立。今天我们能看到的许多绚丽灿烂的星系，以后我们再也见不到了，即使用比哈勃太空望远镜更加强大的望远镜也看不到了，太可悲了！

因此暗能量的值太重要了， $10^{-123}m_{\text{pl}}^4$ 折算为 $(10^{-4}\text{eV})^4$ ，这是个非常小的数字。如果这个值大几个量级，那么我们的宇宙等不及诞生地球，早就开始加速膨胀了，那样，很可能连星系胚胎都被瓦解而制造不出银河来。如果暗能量小几个量级，那么我们今天根本没有手段能测量出来，我们就不知道它的存在。从宇宙年龄的对数尺度来看，巧得很，为什么暗能量的值刚好和宇宙年龄匹配？于是又和太阳寿命重合？要知道，从基本物理的角度来看，暗能量的值小得出奇。为什么这样讲？因为原子的特征能标是 10eV，核的特征能标是 10MeV，弱电统一的特征能标是 100GeV，这些能标对真空能的真实影响，已经在物理实验中观测到，它们远比刚才折算出的“宇宙学常数能标” 10^{-4}eV 大得多。这里我们面临一个两难的抉择，要么“上帝”特聪明，仅仅造就了一个宇宙，这个宇宙的暗能量的值造得恰恰不大不小，它既不能影响我们星系或地球的诞生，又得让我们人类知道有那么个暗能量成分的存在。要么上帝更为“浪费”，造就了许许多多宇宙，每个宇宙的暗能量值有大有小。我们仅仅选择了一个适合我们居住的、或上帝造得比较多的宇宙，于是我们终于观测到了暗能量的存在。问题在于，上帝已经大大地浪费过一次了，为什么它突然在暗能

量问题上变得聪明起来？当然我们不要先入为主，还可以找一些其他问题来研究，看看“上帝”究竟是“吝啬”还是“浪费”。

有几个刚才一带而过的问题我们需要解释一下。人类居然能测算出宇宙成分的比例，这似乎很难理解。宇宙如此之大，地球如此渺小，人类才到过几个星球，怎敢妄称能把全宇宙的成分调查清楚了。尤其是一些成分，它在实验室里根本就观测不到，反而在宇宙中才能显露出来。这让普通人觉得有些不可思议。其实人们要知道全宇宙的某些信息，并不必亲往全宇宙跑一遭，而是只需坐等全宇宙的信息来到我们的身边，以作观测和分析。恒星的光谱可以让我们了解恒星的成分。微波背景是第一个重要的天外传来的宇宙原始信息。原来宇宙初期的正反物质绝大部分在宇宙的膨胀演化中发生湮灭，变为高温光子。光子与自由电子间有强烈的康普顿散射，电子与质子间有强烈库仑作用，因此它们组成联合流体。光子的波长随着宇宙膨胀而拉长，单光子能量递减，到今天已变成 3K 温度的微波。3K 度约 3×10^{-4} eV，恰恰就是我们计算的“宇宙学常数能标”量级，也是中微子质量的量级，你说奇怪不奇怪。当宇宙冷却到核与电子相结合的温度时，光子不再被自由电子散射，开始自由传播。在那一宇宙瞬间，这些光子记录了宇宙诞生刚刚 37 万年时的信息，从 137 亿年的遥远天边向地球传播。宇宙微波背景虽然是高度理想的黑体热辐射，但也存在涨落。这些涨落最初来自宇宙暴涨时期的量子涨落，然后被原子复合时期的联合流体的声波振荡所加工。这种振荡在微波背景的涨落中被辨认出来，可以推算出物质总密度。另一个重要天文观测是 Ia 型超新星的星等和红移关系。Ia 型超新星是双星中的碳氧白矮星吸积巨型伴星的物质，到达钱德拉质量极限后触发的不剩下残留物的粉碎性大爆炸，因此可以作为标准光源。大量的 Ia 型超新星的星等和红移关系，反映了宇宙膨胀是否偏离标准的等速哈勃律，从而得知宇宙膨胀在不同时期的加速或减速状况。这又联系到加速成分——暗能量和减速成分——物质之间的密度差。由总密度和密度差，就可以求解出暗能量和物质的分量密度了。因此人类能测算出宇宙成分的比例是可以理解的。此外，暗物质和暗能量的存在还有大量旁证。

我们的宇宙年龄为 137 亿年。我们来展望一下

宇宙的未来。除了前面所叙述的我们银河越来越孤立外，就是银河中制造新一代恒星的能力将越来越弱。我们的太阳已是第三代恒星。太阳总归要耗尽自己的氢核燃料，转而燃烧氦成为红巨星，其大大膨胀的体积足以接近吞没地球，海洋将完全蒸发。如果人类还存在的话，必须移居他乡。已为红巨星的太阳最后会发生超新星爆炸，留下一颗白矮星。每颗恒星的命运都大体如此，只不过更大的恒星将爆炸，而留下中子星乃至黑洞。银河的灿灿星光将陆续熄灭，人类已无他乡可迁。引力波的发射使双星愈加靠近。银河中的恒星残骸可能聚拢形成越来越大的黑洞。长远来看，质子可能衰变，黑洞可能蒸发。即使人类自备人造太阳也无以求得永恒。久远的宇宙极为荒凉单调，只剩下光子、电子、中微子、暗物质在寂寞空旷的空间中游荡，偶尔闪烁着正反电子偶然相遇而湮灭时发出的耀“眼”闪光。掐指一算，宇宙也只有这一两百亿年才是生命繁盛的最佳时期。过早，生命尚难诞生，过晚生命必将凋谢。我们哀叹自己青春的短暂，但想不到宇宙的青春也竟然有限！红学家常对一部“红楼梦”作广泛联想，比喻其他。我们也可极而言之，一部红楼梦兴衰居然也是宇宙缩影。宇宙虽大，华年有限。古人曾“叹宇宙之浩瀚，哀吾生之须臾”。今日我们可纵观宇宙而曰：“哀宇宙之须臾，叹人生之有幸”。物理这位“上帝”必然要把各种因素都调节得恰到好处，才可能让生命之花一时绽放。我们必须去理解这个至高无上的调节，去理解宇宙与生命之关联，去体会生命之意义。

我们看到，对物质成分比例不太少的宇宙来说，年龄越大，视界越大，于是总物质越多，总质子数也越多。总质子数多的好处在于，在全宇宙可能有更多的有机物参与随机组合，创造生命，于是全宇宙中诞生一个生命星球的概率会增加。从这个角度来看似乎宇宙越老越好。但是，它必须与恒星寿命相匹配。随着宇宙年龄的增加，一代又一代恒星诞生的能力在下降，又必然导致生命诞生概率的降低。因此宇宙年龄与恒星寿命相匹配是很有深刻道理的。宇宙视界中物质的总量被暗能量值限定，因此它们间的匹配绝非偶然。第三讲中我们知道恒星寿命取决微观物理参数，于是，宇观物理参数与微观世界结构及其参数直接挂上了钩。我们将在以后的讲座中继续探讨宇宙与生命之间的关系。

（中国科学院研究生院 100080）