生物生存的天体物理条件[1)]

方 励 之
（中国科学技术大学）

最近有一则消息说，有人发现，谋杀案发生的频次与月相相关，在朔及望两个时节，事件偏多，上、下弦时，则偏少．有人据此进一步推论：这是由于月亮在人体中引起的效应所致．对这则消息，这种推论，一定有不少人持保留态度．本文并不打算研究这个问题上的谁是谁非，我们想阐述的是更一般的论断：生物的存在的确是与天体环境的物理条件有极密切的关系．

近代科学发展之前，人类中心论是一种正统的观念，特别是在天主教统治的欧洲．人类中心论的基本内容之一是，人所处的环境是上帝为了使人能生存而创造的，说什么“上帝造太阳，是为了给人以光明”；“上帝造星星，是为了给夜行的人指引方向”；“上帝造月亮，是为了给情人幽会增添诗意”等等．近代科学发展之后，所有这些人类中心论断，或是被遗忘了，或是变成了笑料．

但是，在笑前人的同时，事情又发展到另一个极端，这就是潜藏在近代科学中的某些观念：似乎各类存在之间是独立的，因而我们可以分门别类地研究，生物归生物，物理归物理，天体归天体，谁也不以谁为转移．直到近代宇宙学发展之后，才又重新强调从统一的观点研究各类存在．结果发现：生物之所以能存在，是依赖于许多物理的及天体的精巧配合的．

一、精 巧 配 合

先介绍几个“精巧配合”的定性例子．

比如，物理学中有一个“奇怪”的事实：电子和质子质量相差很大，但二者电荷的绝对值却相同，即 $e_p = -e_e = e$．其实，如果就原子或分子的存在而言，无须 e_p 与 $|e_e|$ 完全相同．早有人指出，即使二者电荷稍有差别，也可以有稳定的原子及分子．但是，从天体角度看，则不同了．已经证明，那怕电子和质子的电荷值相差只有 $2\times10^{-18}e$，则宇宙的非电中性将导致静电排斥力超过引力，从而不能形成行星、恒星和星系．没有星体也就没有生物赖以生存的条件．所以，生物存在的一个必要条件是

$$\frac{e_p - |e_e|}{e} < 2\times10^{-18}.$$

这比原子、分子的存在对 e_p 和 e_e 的要求，精细多了．

再如，为什么电子和质子二者质量相差如此之大？仅从原子存在的角度看，也找不出很强硬的理由，因为即使 $m_e = m_p$，氢原子照样还是可以存在的．但是，这时的原子核不再是不动的力心，而同电子有大体一样的运动速度．电子及核都动的原子，是不能构成晶体的，因为晶体的骨架是由不动的核所构成的周期排列的格子．没有晶态物质，也就没有有序结构，当然也就不可能形成高度有序的生物．所以，生物存在的又一个必要条件是，电子和质子的质量应有足够大的差别．又是来自生物的要求比来自原子的要求更强！

第三个例子是为什么中子质量 m_n 比质子质量 m_p 略大．若反过来，如果 m_n 略小于 m_p，会怎样呢？

我们知道，正因为 m_n 稍大于 m_p，所以才有 β 衰变，即

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

1) 根据在全国首届青年生物医学工程学术讨论会（1985年11月，合肥）上的报告整理．

其中 $\bar{\nu}_e$ 表示电子中微子. 如若 m_p 稍大于 m_n, 则将有下列的逆 β 衰变,即

$$p + e \rightarrow n + \nu_e$$

这种过程将使氢原子变得不稳定，其他原子也将由于同样的原因而不能稳定地存在. 由此可见，只要 m_n 稍稍变小，就没有稳定的化学元素,生物也就不能存在了.

可见，生物的存在几乎依赖于每一个物理常数的取值,极小的常数变化,就会极大地威胁到生物的生存.

二、关于物态平衡

为了进行更定量一些的研究，有必要先介绍一点有关物态平衡的知识. 自然界中的稳定物质，都处在吸引力和排斥力相平衡的状态. 如果不考虑原子核及粒子物理问题，那么所有各种平衡物态都可以纳入表 1 中. 表 1 表示，自然界的吸引力有两种：静电的和万有引力的. 自然界的排斥力，也只有两种：热压的和简并压的. 因此,归纳起来,平衡的类型就有四种：静电-热压;静电-简并压；引力-热压；引力-简并压. 自然界中各类物态（核及粒子除外),都不外乎是这四种平衡之一.

表 1 物态的平衡类型

	静电力	万有引力
热压力	等离子体	恒星、太阳大气
简并压力	原子、分子晶体	行星、白矮星

表 2 给出上述几种吸引和排斥作用的能量量级表达式. 其中 r 表示所讨论的问题中的长度尺度, T 为温度, n 是电子的数密度. 简并能量表达式的推导,在附录中给出.

现在我们用这种平衡观来讨论一些物性. 例如，地球上的固体和液体都是由静电吸引和简并压的平衡所主导的，亦即它们满足下列的平衡条件：

$$\frac{e^2}{r} \sim \frac{\hbar^2}{2m_e} n^{2/3}. \tag{1}$$

表 2 吸引及排斥作用的能量式

作用类型	能量量级表示
静电	e^2/r
引力	GMm/r
热压力	kT
简并压力	$\frac{\hbar^2}{2m} n^{2/3}$

显然，电子数密度 n 与相邻电子和离子之间的距离 r 的关系是

$$r \sim \left(\frac{1}{n}\right)^{1/3}. \tag{2}$$

这样,(1)式成为

$$e^2 n^{1/3} \sim \frac{\hbar^2}{2m_e} n^{2/3}, \tag{3}$$

即

$$n \sim e^6 m_e^3 / \hbar^6. \tag{4}$$

所以,这类物质的密度应为

$$\rho \sim n m_p \sim e^6 m_e^3 m_p / \hbar^6 \sim 1 \mathrm{g/cm^3}. \tag{5}$$

这个结果的确就是液态和固态物质的密度的数量级.

三、生物生存的条件

现在我们开始研究生物生存的条件.

首先,生物的生存环境是三态共存的,即生物生存同时需要有气态、液态及固态,因此环境的温度变化不能太大.地球上冬、夏温度之差仅为几十度,是很小的. 地球温差之所以小,是由于大气的运动有效地减小了各地的温度差别. 地球大气运动之所以有效,是由于地球是圆的. 如果地球上有太多的高山阻挡气流的运动，温差就会变大. 总之，生物只能生存在山不太高的球状星体上.

地球上的山不会太高，是由于地球质量足够大. 因为,山越高,势能越大,山对地面岩石的压力也越大. 如果压力大于岩石分子的结合力,山就会把岩石压动而下沉,就象放在豆腐上的重物要下沉一样.

若山的高度为 h，山的岩石主要由原子数为 A 的原子构成,则一个原子的势能平均为

$$Am_pgh,\tag{6}$$

其中重力加速度 g 为

$$g \sim GM_{地}/R,\tag{7}$$

$M_{地}$ 及 R 分别为地球的质量及半径.

岩石中分子错动所需的能量大体就是分子作用能,其量级为

$$\left(\frac{e^4m_e}{\hbar^2}\right)\left(\frac{m_e}{m_p}\right),\tag{8}$$

这里因子 $(e^4m_e/\hbar^2)$ 是玻尔能量,即原子中的电子能量量级. 分子的振动能大体比电子能量小一个因子 (m_e/m_p).

由(6)式及(8)式, 地球上最高的山 h_{max} 应由下式决定:

$$Am_pgh_{max} = \frac{e^4m_e^2}{\hbar^2m_p},\tag{9}$$

亦即

$$h_{max} \sim \frac{R}{AGm_pM_{地}}\frac{e^4m_e^2}{\hbar^2m_p}.\tag{10}$$

若取 $A \sim 60$, $R \sim 10^4$km, $M_{地} \sim 10^{27}$g, 则得

$$h_{max} \sim 10\text{km}.\tag{11}$$

已知,地球上的最高峰珠穆朗玛峰大约高 9km,接近于上述上限,但是在极限之内.

由 (10) 式可见, $M_{地}$ 越小, 则山越高. 当 $h_{max} \sim R$ 时,山的高度与星体尺度一样,星体也就不再是个圆的了. 由(10)式, 当 $h_{max} \sim R$ 时,求解 M, 得到

$$M_{min} \sim \frac{1}{AGm_p}\left(\frac{e^4m_e^2}{\hbar^2m_p}\right) \sim 10^{23}\text{g}.\tag{12}$$

这个结果表示,质量大于 10^{23}g 的星体才是球状的,小于此值的就不一定呈球形了. 10^{23}g 正在小行星的质量范围中, 许多小行星的确不是球状的.

这样,生物生存的第一个天体物理要求是:能生存生物的行星的质量应大于 10^{23}g.

对于这一质量下限, 还可以作进一步的修正.

活着的生物不断在新陈代谢, 不断有生化反应在机体中进行. 这种反应的速度不能太快,否则寿命极短; 反应速度也不能太慢, 否则生命也将熄灭. 合适的温度是: 热能与分子相互作用能量量级相同. 由 (8) 式应有

$$kT \sim \frac{e^4m_e^2}{\hbar^2m_p},\tag{13}$$

或者有

$$T \sim \frac{e^4m_e^2}{k\hbar^2m_p} \sim 100\text{K}.\tag{14}$$

这个温度恰好是大气温度的量级. 可见,地球大气温度的确是最适于进行新陈代谢的.

要求存在 100K 的大气, 星球的质量必须足够大. 因为,质量小的天体, 逃逸速度小, 气体很容易逃离天体,就不可能有大气. 例如,月球上没有大气,就因为月球质量太小.

一个星球上若存在温度为 T 的大气, 则该星球的质量M应满足下式:

$$\frac{GMm_p}{R} > kT.\tag{15}$$

它的物理意义是, 气体分子的引力能大于其热能,这样,气体分子就没有足够的能量克服引力的束缚,就不能逃出地球.

对于行星,其上物质的密度量级都是(5)式所给出的,所以

$$R \sim \left(\frac{M}{\rho}\right)^{1/3} \sim \left(\frac{M}{m_p}\right)^{1/3}\frac{\hbar^2}{m_ee^2}.\tag{16}$$

将(14)及(16)式代入(15)式,即有

$$M > \frac{e^3m_e^{3/2}}{G^{3/2}m_p^{7/2}} \sim 4 \times 10^{25}\text{g},\tag{17}$$

这就是生物生存对天体质量的又一个要求.

(12) 及 (17) 式都是星体质量的下限条件, 下面再讨论上限条件.

存在 100K 的大气, 表明星体不热. 显然, 发光发热的恒星不满足这个条件, 由此可以得到质量上限.

从平衡类型来说, 恒星是由万有引力同热压力及 (或) 简并压力相平衡的物体. 由表 2, 恒星的一般的平衡方程可以写成

$$kT + \frac{\hbar^2}{2m_e}n^{2/3} \sim \frac{GMm_p}{R}.\tag{18}$$

若整个恒星由N个原子构成,则恒星质量是

$$M \sim Nm_p.\tag{19}$$

又根据定义,有

$$n \sim MR^{-3}.\tag{20}$$

所以,(18)式可以写成

$$kT \sim Gm_p^2 N^{2/3} n^{1/3} - \frac{\hbar^2}{2m_e} n^{2/3}, \qquad (21)$$

这是一个 T 对于 n 的方程．这方程所给出的 T 有极大值：

$$kT_{\max} \sim \frac{G^2 m_p^4 m_e}{\hbar^2} N^{4/3}. \qquad (22)$$

这时相应的 $n^{-1/3} \sim r$ 式为

$$r \sim \frac{\hbar^2}{G m_e m_p^2} N^{-2/3}. \qquad (23)$$

由(22)式可见，星体质量越大(即 N 越大)，则 $T_{\max}$ 越大，当 $T_{\max}$ 高到核聚变的点火温度时，就成为恒星了．点火温度由下式给出：

$$kT_{\max} \sim \frac{e^2}{r}. \qquad (24)$$

它表示热能开始能克服质子质子之间的静电排斥，使氢核发生聚变．将(22)及(23)式代人(24)式，即得到

$$N \sim \frac{e^3}{G^{3/2} m_p^3}. \qquad (25)$$

它所相应的星体质量是

$$M_{\max} \sim N m_p \sim \frac{e^3}{G^{3/2} m_p^2} \sim 2 \times 10^{30}\mathrm{g}, \qquad (26)$$

这个质量正好是木星的质量．所以，一个星体，若其质量大于木星质量，即

$$M > M_{\max}, \qquad (27)$$

它就是一颗发光、发热的恒星．反之，质量小于木星的星体，才是行星．木星本身处在恒星与行星的边界上．的确如此，由观测已发现，木星的辐射是大于它从太阳吸收到的光和热的，这表明木星本身已在发光、发热，它也可以算是一颗恒星了．

(26)式所给出的 $M_{\max}$，就是生物所能生存的星球质量的一个上限．

更强硬的一个质量上限由动物生存条件给出．动物都是要运动的．运动中有加速、有减速，所以动物不断要受到力的作用．显然，若作用力太大，超过了动物所能承受的限度，就会使动物发生如骨折之类的“断裂”(碎裂)．生物生存的一个必要条件是，不易发生这类断裂．否则就不能保证生物是一个完整的生物了．

为了便于进行计算，我们将动物简化为一个直径为 h 的球体．若单位体积内的原子数为 n，则单位面积两侧相互作用的原子约有 $n^{2/3}$ 对，每一对原子之间的相互作用能取玻尔能量(即 $e^4 m_e/\hbar^2$)．

当动物运动受到冲击时，承受作用的面积约为

$$S \sim h^2, \qquad (28)$$

故维持动物不致碎裂的能量量级为

$$E \sim h^2 n^{2/3} (e^4 m_e/\hbar^2). \qquad (29)$$

通常，动物在地面上行走或跑跳所涉及的能量尺度与其本身的重力势能是成正比的，以人为例，一般行走时这个比例约为 1/20，即行走等活动涉及的能量 E_m 约为

$$E_m \sim \frac{1}{20} m_B g h, \qquad (30)$$

其中 m_B 为生物的质量，显然 $m_B \sim h^3\rho$，这里 ρ 是物质密度．

由(29)及(30)式，可将动物运动不易碎裂的条件写成

$$E_m < E \qquad (31)$$

或

$$\frac{M}{R^2} < \frac{20 n^{2/3}}{G\rho h^2} \cdot \frac{e^4 m_e}{\hbar^2}. \qquad (31)'$$

代人(16)式后，上式成为

$$M < \left(\frac{20^3 n^2}{\rho^2 h^6}\right)\left(\frac{\hbar^6}{G^3 m_e^3 m_p^2}\right). \qquad (32)$$

以人为例，$\rho \sim 1\mathrm{g/cm^3}$，原子数密度为 $n \sim \rho/m_p \sim 1/m_p$，以及 $h \sim 1\mathrm{m}$．这样，上式给出

$$M < 10^{28}\mathrm{g}. \qquad (33)$$

由下限条件(12)和(17)式，上限条件(27)和(32)式，得出总的结论是：生物，特别是象人这样的生物，只能生存于质量在下列范围中的行星上：$4 \times 10^{25}\mathrm{g} < M < 10^{28}\mathrm{g}$． (34)

地球的质量的确是在这个范围中，它的质量是

$$M_{地} = 6 \times 10^{27}\mathrm{g}. \qquad (35)$$

应当看到，条件(34)式是相当苛刻的，它的范围相当窄小，上、下限之间只有不到三个量级的差别．也就是说，只有相当特别的天体环境中才有可能演化出象人这样的生物．

(下转第 466 页)