

校准宇宙时钟

马新文

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

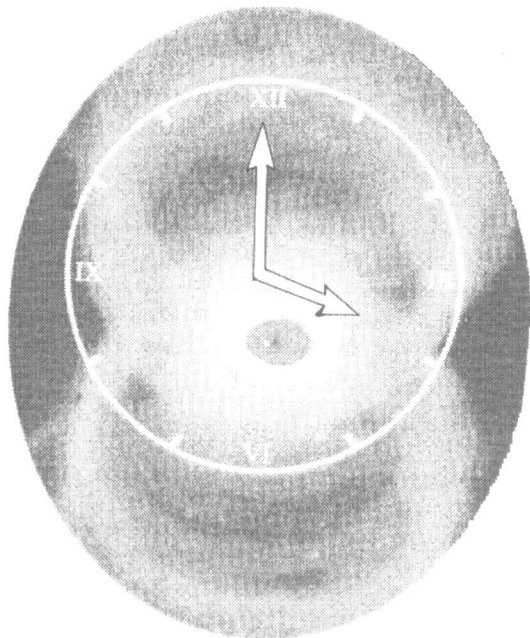
宇宙有开始和结束吗？或者说它是一直存在的，并将永远存在下去吗？自人类历史的初期，当我们的祖先为银河系的美丽壮观所叹服时，就开始思考这些问题了。那些猜想和梦想，就像孩子们的天真惊奇一样，仍以各种方式记录在各时代和各民族的神话、宗教和传说中。天文学家是如何用现代科技手段探索宇宙始末的答案的呢？

哈勃发现了第一台宇宙时钟

直到这个世纪，大多数天文学家都赞成一个静止的宇宙，即从大尺度上观察，是一个不变化的宇宙。爱得温·哈勃于本世纪20年代末，在帕萨迪纳的威尔逊山天文观测站，借助于当时地球上最大的反射式望远镜，作出了划时代的发现：宇宙是非静止的，是膨胀的。他观测到：旋状星云距我们越远，则它们离开我们的速度也越快。然而，如果在宇宙中不存在特殊的位置和方向，则我们必定是正在远离遥远的旋状星云，就像它们彼此也正在远离。这就是说，宇宙整体上正在变大，正在膨胀。

利用一种二维类比，可以把宇宙想象为一个巨大的、正在不断地膨胀着的热气球的表面：此球面上的每个点都在以正比于两点之间的距离和球的膨胀率的速率远离其他的点。

哈勃是第一个定量研究这个宇宙热气球的人，是他发现了神秘的答案：即单位距离的退行速



从哈勃太空望远镜看到的沙漏星云

度，也就是后来以他的姓氏命名的哈勃常数 H_0 。哈勃本人将“他的”常数的值定为500千米每秒每百万秒差 ($\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$)。这样，结果是宇宙只有20亿年的历史。后来，哈勃常数被重新确定为 $50 \sim 100 \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ，与此对应的宇宙年龄为 $100 \sim 200$ 亿年（假设宇宙是恒定膨胀的）。仅仅在过去的几年时间里，哈勃常数的如此宽的范围才被

缩小。但是，不同的测量方法仍然给出不同的 H_0 。

天文钟

除了哈勃常数外还有确定宇宙年龄的时钟吗？也许，最可靠的天文时钟就在 Hertzsprung-Russell 图中，这种图利用恒星的亮度对它们的颜色（即温度）作图。在此图中，从宇宙中最古老的星体——即球状星团离开主星序的那一点，可以估算出这些星团的年龄约为150亿年，其下限为120亿年。

除了球状星团外，还存在着直接可用的宇宙时钟，他们具有宇宙马拉松运动员的耐力和瑞士表的精确性，这就是天文钟。大自然创造了这些天文钟，放射化学家探测到了它们，地质学家和天文学家学会了理解并解释它们带有的信息。这就是放射性原子核（母核）及其衰变产物（子核）。令人难以置信的是，这类钟的工作原理并不比沙子穿过沙漏更复杂：如果穿过沙漏的沙子流速是已知的，则可以给下面的一堆

沙子定出一个时标。与此相似,若放射性核素的半衰期是已知的,则可以通过测量由母核衰变生成的子核的数目而确定已经过去的时间。

这种铀-天文钟的最惊人成就可能就是确定了我们的太阳系的年龄为 (45.6 ± 0.5) 亿年,其精度令人难以置信,好于百分之一。这一结果的确定是根据在陨星中发现的铀-238和其最终衰变产物铅-206的相对丰度而得到的,而陨星是在太阳系刚从银河系中分解出来时形成的。而且从地质化学的研究中已经知道,在陨星形成时,其中的一些部分没有铅,于是,根据现在测量到的 Pb-206和 U-238的比值,以及已知的 U-238的半衰期,就可以确定自陨星形成以来逝去的时间,也就是太阳系的年龄。

但是,确定在此之前的时间,也就是确定后来形成太阳、地球、大海以及生命的物质仍然散布于恒星和银河系星际空间之时的时钟在哪里?早在1964年,天文学家 D. D. Clayton 就指出,铼-187/钷-187母子核对可以提供这样的时钟,来确定宇宙中化学元素通过核过程——核合成而形成的时间。铼(Re)-187通过 β 衰变成为钷(Os)-187,半衰期为420亿年。天体物理学家 D. N. Schramm 和天体化学家 G. J. Wasserburg 指出,核合成的最短时间可以简单地通过在核合成末期——即太阳系初期的 Os/ Re丰度比值乘以 Re-187的平均寿命(~ 610 亿年)而得到。

但这里还有一个问题有待解决:Os-187不但可以通过 Re-187的衰变而产生,还可以在核合成期间通过所谓的慢中子俘获(S-过程)而形成。这种贡献占所观测到的 Os-187量的 $(35 \pm 4)\%$,在计算比值时要扣除掉。因此,在前几十年里,有关铼-天文钟的工作主要集中在尽量可靠地确定源自 S-过程所产生的 Os-187的份额。现在大家公认,这种组份能够以大约 10%的精度给出,而 Re-187的半衰期也同时在百分之几的精度内确定,确定的 Os-187/Re-187比值的精度也在百分之几内。从所有这些数据中,可以得到核合成过程的最短时间约为 90 亿年。如果假设我们的银河系是在大爆炸后不久形成的,则宇宙的最小年龄约为 $90 + 46 \approx 140$ 亿

年。这个值与从球状星团得到的下限 120 亿年符合得很好。考虑到这两种计时方法相去甚远,这种符合可以说是殊途同归。

高电荷态的铼-187会发生变化吗?

Schramm-Wasserburg模型中包含了一些隐含的假设,这些假设很可能与核合成的真实情况不一致。特别是铼天文钟预计宇宙最小年龄的本领依赖于这样的假设:铼只有一个半衰期,就是从有 75 个电子的中性 Re-187确定出的半衰期。1983 年,天文学家 K. Takahashi, K. Yokoi 和 M. Arnould 发表了很有根据的关于修正上述假设的条件。他们提出,在银河系的历史进程中,Re-187与其他原子核一样,有可能被部分或者完全电离,而这也许会非常大地改变铼的寿命。

在核合成期间,与经过由快中子俘获(r-过程)而生成的所有原子核一样,铼-187也是在约几秒钟内形成的,可能就是在超新星爆炸阶段,并立即被喷射到星际空间了。在以后的阶段,这种银河系气体可能再次收缩,(铼只占气体中很小一部分),并且成为一个新恒星的一部分。在核合成期形成的部分原子会经历几次这种“收缩”过程。与原子在恒星中所处的位置和那里的温度有关,原子或多或少会被强烈地电离,就是说它们会失去部分或者全部电子。

在这种状态下,一种特殊类型的 β 衰变,即所谓的束缚态 β 衰变将可能发生,即在原子核中产生的电子没有离开原子,而是留在了未被占据的内电子壳层上(如图 1 所示)。这个过程对中性原子不起作用,但对高电荷态原子却很重要,因为在中性原子中,内壳层轨道都被占满了,束缚态 β 衰变(记为 β_b)与到连续态的衰变相比,几乎可以忽略不计。但当涉及到高电离态的重原子时(如大量存在于恒星等离子体中),原子内壳层 K、L、...是完全或者部分空的,则情况就可能彻底改变:大多数 β 衰变几率由于束缚态 β_b 跃迁到强束缚原子态而大大地增强了,就像电子逃离荷正电的原子核的吸引而不需做功。在粗糙近似下, β 衰变反应能(Q-值)将会增加相当于末态电子束缚能的量值。在特殊情况下,稳定的原子核(如果被全部电子云包围着),一旦变得高

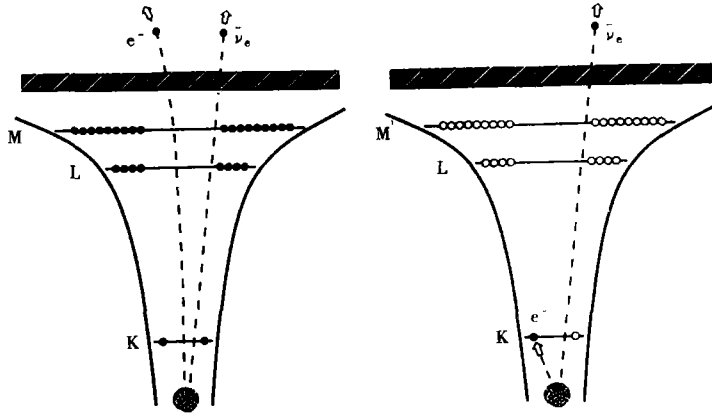


图1 中性原子的正常 β 衰变(左图)和裸核的 β_0 衰变(右图)

度电离,由于 β_0 衰变,甚至会变成不稳定的。

束缚态 β_0 衰变对 Re-187是可能的,但与 Re 的电离度有关,这个过程可能引起铼的半衰期相当大的减小。对高电荷态 Re-187可能存在的加速衰变,早就在理论上认识到了。K. Takahashi 及其同事首先意识到的是: Re-187到其子核 Os-187第一激发态的 β_0 衰变是有可能发生的,因为此激发态仅比基态高出 10 keV(如图 2 所示),它的自旋 $\frac{3}{2}^-$ 与 Re-187 的自旋 $\frac{5}{2}^+$ 仅差一个单位,而 Re-187 与 Os-187 的基态自旋 $\frac{1}{2}^-$ 相差两个单

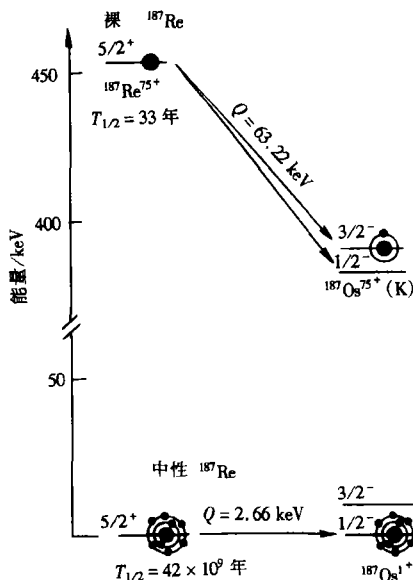


图2 中性 Re-187(下图)和裸 Re-187(上图)衰变能级图

位。通过从相邻核的类似跃迁中外推, Takahashi 等人估计:完全电离的 Re-187到 Os-187第一激发态的 β_0 衰变的半衰期约为 14 年。裸 Re-187核的预计寿命比中性铼的寿命短几个多数量级!在实验上验证这个预言就是绝对必要的。

测量裸核 Re-187的衰变

在重离子储存环出现以前,确定裸核 Re-187的半衰期是不可能的。重离子储存环能够储存高电荷态离子并把它们保持很多小

时。束缚态 β_0 衰变尽管很早以前就预言了,但直到 1992 年才观测到。因为那一年在德国重离子研究中心建成的实验储存环(ESR)投入运行了(见图 3)。在此环上做的首批实验,就有一个是观测到了裸核 Dy-163的 β_0 衰变半衰期为 48 天,而通常的中性原子 Dy-163的核是绝对稳定的!

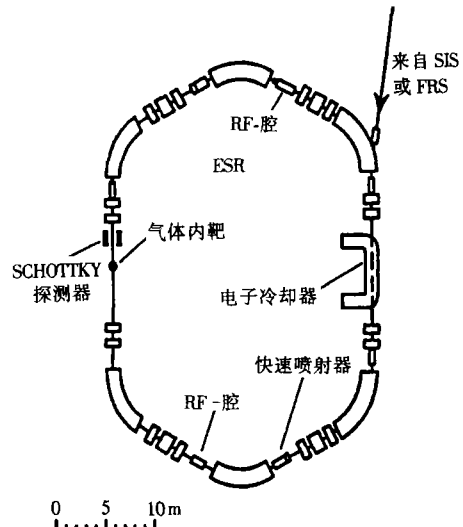


图3 实验储存环 ESR 及其主要部件示意图:电子冷却器,气体内靶, Schottky 探测器。

与做 Dy-163 实验一样,准稳定的 Re-187 在离子源中被电离、引出,在 GSI 的直线加速器 UNILAC 和重离子同步加速器(SIS)中加速到每核子几百兆电子伏的能量。在离开 SIS 后, Re-187 离子中的其他电子在它穿过箔时被全部剥离,全裸的离子再被传送到 ESR,并借助 ESR 的电子冷却器把离子束“冷却”,即使离子束的

能量分散很窄。由于储存环内部是超高真空 ($\sim 10^{-10}$ Pa), 在 ESR 内, 离子束可以被储存很多小时而无显著的损失。

电子冷却器是一个非常精妙的仪器, 是前苏联科学家 G. Budker 在 1960 年发明的。单能的, 即冷的电子束与离子束在储存环中长两类的区间平行运动, 离子每转一圈, 都与电子发生碰撞, 因此不断地与电子交换动量。与离子不同, 电子单次通过相互作用区之后就被引出, 而不断地换成新的。由于这种极聪明的“把戏”, 离子起初具有的大的速度分布和角度分散将被大大地减小变窄, 直到离子的横向和纵向温度与电子的相同。对于重的、高电荷态离子, 冷却既高效又快, 冷却时间一般小于 1 秒。电子冷却不仅产生了单能离子束, 也为储存期间所有旋转的离子提供了一个同样的速度。因此, 被冷却的离子的旋转频率仅仅依赖于它们的质量电荷比。通过对探测到的离子信号的快速傅立叶变换分析, 可以得到离子环行运动的频率谱, 即所谓的 Schottky 频率谱, 根据它, 我们可以鉴别离子。

在储存期间, 部分裸的 Re-187 将通过 β_0 衰变成带有一个电子的 Os-187 离子, Os 核的数目随储存时间成正比地增加。起初, 因为子核与母核具有几乎相同的质量电荷比, 它们沿着相同的轨道运行并具有相同的旋转频率, 因此, 在 Schottky 谱中, 它们没有独自的“指纹”信号。

然而, 在储存阶段过后, 如果能剥掉 Os-187 核外的那个电子, 比如让它穿过气体内靶, 则它们的质量电荷比就不相同了, 裸 Os-187 就作为一个清晰分离的信号出现在频率中, 如图 4 所示。从信号峰的面积能够确定所产生的 Os 核的数目, 由于 Re-187 的 β_0 衰变, 这个数目随储存时间而增加, 而与气体靶发生核反应产生的离子数目, 例如钨和铪原子核, 却保持不变。因此, 利用所产生的 Os 核的数目 (相对于母核 Re 的数目) 对储存时间作图, 可以直接得到衰变速率, 从而可以求出 Re 的半衰期。另外, Os 原子核的数目也可以通过在储存环中放入探测器而得到, 因为裸 Os-187 的运动轨迹与主束的不同, 见图 4。用这两种方法得到的结果在实验误差范围内是符合的。

从这两个独立实验中得到的裸核 Re-187 的半衰期为 33 年。这个值比中性 Re-187 的寿命短 10 亿多倍, 但却在 Takahashi 估计值的 2.4 倍之内。

重新校准铯天文钟

是否说中性 Re 与全裸 Re 寿命的巨大差异使得铯天文钟无用处了? 我们怎么可能知道 Re-187 和 Os-187 历史的全部细节? 也就是说在每次收缩之后 Re 所处的位置和当地的温度 (即原子电荷态的分布), 或者持续时间? 然而, 所有这些所需要的就是要得到新的有效衰变常

数, 与电荷态相关的平均衰变常数。基于从储存环上的裸 Re-187 的实验结果, 所有这些都可以精确地计算出来, 但是, 还得根据核合成期间它们的相对产生率, 加以适当的权重。

只有 Re^{75+} 和 Re^{74+} 离子能够通过 β_0 衰变到 Os-187 的第一激发态, 因为这两种电荷态的离子均在其最内壳层 (k 壳) 有空穴。其他电荷

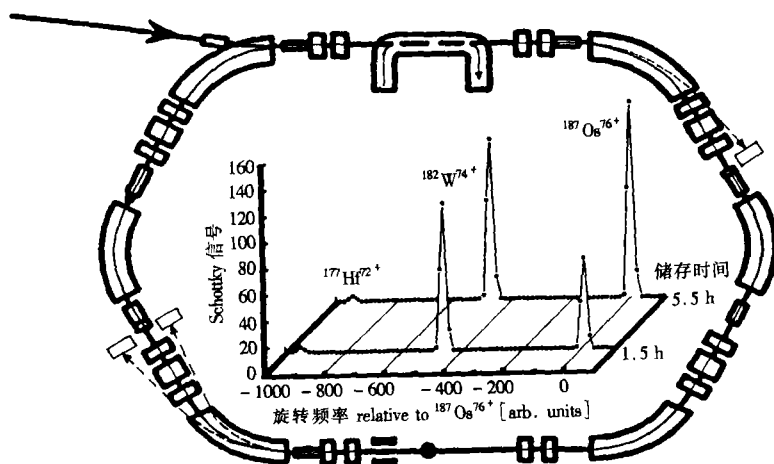


图4 在ESR上测量从Re-187经 β_0 衰变产生的Os-187的数量。图中分别给出了储存时间为1.5小时和5小时得到的Schottky信号谱

态的离子如 Re^{73+} , Re^{72+} 等, 也能发生 β_0 衰变, 但是只能衰变到 Os-187 的基态. 如前面已经指出的, 由于这些衰变中放出的能量比中性 Re-187 的多, 因此它们就具有较短的寿命, 但却比 33 年长好多个数量级. 因此, 铼离子寿命的巨大变化只是对裸的 Re^{75+} 和类氢的 Re^{74+} 离子适用, 而这种电离度与温度 $1 \times 10^9 \text{C}$ 相对应. 而如此高温仅存在很短时间, 并且只在大质量恒星的核心部分存在. 在这种极端热而稠密的等离子体中, 有大量的电子围绕离子运动, 如果电子的能量大于 80keV, 则新生成的 Os-187 也可以通过俘获一个电子而衰变回 Re-187. 从已经测量到的 β_0 衰变几率和自由等离子体电子的密度和能量分布 (这能够从已经成功建立的恒星模型中得到), 上述逆向衰变的几率也可以计算出来.

基于银河系化学演化模型, K. Takahashi 正在致力于计算 Re-187/Os-187 母子对的可能“生活历史”, 计算将包括所有不同的位置、温度和电荷态. 尽管这是一项庞大的任务, 但并不像初看上去那样毫无希望: 因为天体物理学家已经为我们银河系的化学演化过程建立了可靠的模型, 此模型基本上能够解释已经观测到的所有元素的丰度. 根据重新校对的铼天文钟的结果, Takahashi 得出的关于宇宙年龄的初步结果是 150_{-30}^{+20} 亿年. 下降 120 亿年, 比由没有收缩过程的中性 Re-187 得出的 140 亿年的结果要小.

探索标准宇宙模型

使用两种根本不同的方法所得到的宇宙年龄下限几乎完全相同, 这一结果是令人鼓舞的. 对哈勃常数 H_0 和宇宙年龄 T_c 仔细计算的下限, 对当前的宇宙模型提出了严格的限制, 因此对宇宙的未来命运也提出了严格限制. 哈勃常数 H_0 和宇宙年龄 T_c 的乘积是宇宙中能量-物质密度 Ω 的函数. 通常, Ω 以临界密度 $\Omega_c = 3H_0^2 / (8\pi G)$ 为基本单位给出, 其中 G 为万有引力常数. Ω_c 精确划定了无限膨胀宇宙 (若 $\Omega < \Omega_c$) 和封闭宇宙之间的界线. 封闭宇宙 ($\Omega > \Omega_c$) 就是说, 在将来某个时候, 宇宙将会停止膨胀, 并接着发生收缩. 而临界密度则是说, 经过无限长时间后, 宇宙膨胀速率将变慢到零.

当前, 大家喜欢用的宇宙模型是爱因斯坦-德西特宇宙. 在这种宇宙中, 采用欧几里德度规, 密度恰好就是临界密度 (即 $\Omega = \Omega_c$). 这种选择在多数膨胀宇宙模型中都需要, 而且仅仅几年前, 从大爆炸后留下的 3k 微波辐射 COBE 天图研究中, 这一点还得到了新的和有利的支持.

在爱因斯坦-德西特宇宙中, 所谓的宇宙常数 Λ 被设为零. 它由爱因斯坦引入他的广义相对论场方程中, 以一种“真空”排斥能量密度的形式, 来抵消质量的引力, 因为他当时在寻找能提供一静止宇宙的解. 后来, 爱因斯坦称 Λ 假设是“我一生中最大的错误”. 但是, 我们也许不久就会看到常数 Λ 重现活力. 假设宇宙具有临界密度的直接结果是: 90% 以上的物质必定是暗物质, 因为仅约 5% 的临界密度是可以看见的.

如果把宇宙常数 Λ 设为零, 在哈勃常数 H_0 , 宇宙年龄 T_U 和密度 Ω 之间有以下简单关系:

$$\begin{aligned} H_0 \cdot T_c &= 978 \quad (\Omega=0) \\ H_0 \cdot T_U &= 652 \quad (\Omega=\Omega_c) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 H_0 的单位是退行速度 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$), T_c 以 10 亿年为单位. 如果 $H_0 \cdot T_c > 978$, 则宇宙常数 Λ 应该是, 也必然是个正值, 这样, 宇宙将永远膨胀. 从方程 (1) 中我们可以学到怎样灵敏地探索爱因斯坦-德西特宇宙: 通过寻找 H_0 和 T_c 各自的下限值, 再查看他们的乘积是否符合两个基本假设: 即临界密度和趋于零的宇宙常数. 这正是为 H_0 和 T_U 两者确定可靠下限的重要原因.

现在, 对宇宙年龄而言, 几乎所有的“钟”都指向约 120 亿年这个下限值. 这不但对球状星团和重新校正后的铼天文钟是这样, 对其他宇宙钟, 如白矮星的亮度分布或者天文钟 $^{238}\text{U} / ^{232}\text{Th}$ (却具有较大误差), 也是这样. 使用 120 亿年这个值和新近得到的 H_0 的下限 $63 \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 采用方程 (1) 中的单位, 我们可以得到它们两者之积为 756, 这比得自爱因斯坦-德西特模型的值 652 高出约 15%, 参见图 5.

如果这些数值能为将来的观测所证实, 并能使误差范围显著减小, 则标准宇宙模型在下

美发现一种新天体

据《科技日报》报道：美国天文学家最近在对宇宙进行的一次大规模探测中，发现了一种介于行星和恒星之间的天体。这种被称为甲烷褐矮星的天体大小相当于木星，但质量却是木星的10到50倍。它是一种像木星一样的气状星体，内部压力特别高，能产生足够的热使其发出暗红色的光。由于这一星体中的甲烷也被加热，因而能被地球上的天文仪器观测到。

通常的恒星质量至少应是木星质量的75倍，它们因其内部的热核反应而发光。但恒星内部的炽热高温，使甲烷不能以气体状态存在于恒星的大气中。1954年，天文学家沙波里撰文称，在宇宙中一定存在成千上万个介于已知最大行星木星和已知最小恒星红矮星之间的星体，当它们被发现时，其数目肯定超过恒星。但长期以来，这类天体从未被观测到。

去年底，美国天文学家在—项名为“数字太空调查”的计划中开始对宇宙进行全方位扫描。他们通过设在新墨西哥州的直径3.5米的天文望远镜，能观测到距地球10亿光年的天体。几周来，他们利用这一望远镜探测到了距地球30

光年的甲烷褐矮星。截至目前，他们已探测到3颗这类星体。天文学家们认为，在银河系中有1万亿颗以上的这类星体，未来几年会探测到几百颗，其中两颗可能靠近离地球最近的阿尔法半人马座恒星。

美科学家说宇宙年龄大约120亿年

据《科技日报》报道：美国航空航天局的一个天文学家小组最近宣布，他们的研究表明，宇宙的年龄大约为120亿年。不过，一些科学家认为这一结论有待于进一步证实。这个小组历时8年测定了800颗特定星体与地球之间的距离，以便计算出宇宙中所有星系以何种速度彼此分离。科学家把这一观测结果与同其他一些测量结果相结合估计出宇宙年龄大约为120亿年。如果宇宙中的物质质量有变化的话，这个数字可能升高为135亿年。

根据目前解释宇宙诞生最权威的大爆炸理论，宇宙是100至200亿年前从一个非常小的点爆炸形成的，目前宇宙仍在继续膨胀。如果根据目前的膨胀速度向前追溯，就可推算出宇宙大爆炸的时间，从而推算出宇宙的年龄。目前国际学术界对于宇宙年龄问题仍存在广泛争论。

(下吉 秦宝 编)

面的意义上就是不成功的：即宇宙密度必须小于临界密度，及或是宇宙常数 Λ 必须不等于零。

然而，迄今，如果考虑到估计哈勃常数和宇宙年龄使用的复杂和奇特的方法，则不论是 H_0 还是 T_U 的下限值的可靠性，对我们都不是显然的。因此，进一步核对这些钟的可靠性和自恰性，就显得极其重要。当然，如果可能的话，再找到另一种天文钟更好。

每一个独立的新结果，或者是 H_0 或者是 T_U ，就像“七巧板”中的一块。尽管如此，我们揭开藏在这个“七巧板”中的图案的面纱的时间不会太远了。无论这个图案是什么，它都将揭示宇宙的未来命运。

作者与 Prof. Fritz Bosch 进行了许多讨论，这些讨论对完成本文很有帮助，在此表示衷心感谢。

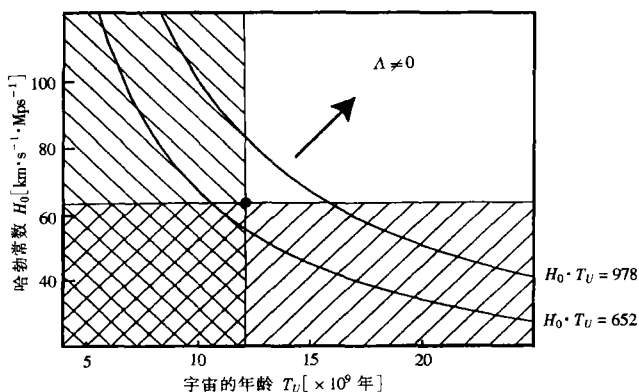


图5 在宇宙常数 $\Lambda=0$ 时，哈勃常数 H_0 和宇宙年龄 T_U 的关系曲线上一支双曲线对应于空宇宙，而下一支双曲线对应于具有临界密度的宇宙。选用最新的 H_0 和 T_U 值，得 $H_0 \times T_U=756$ ，即图中的黑点，预示着宇宙密度小于临界值，及或宇宙常数 Λ 不为零。