

文章编号: 1007-4627(2001)03-0156-04

宇宙核钟

戴光曦

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

孙志虹

(甘肃工业大学基础科学系, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 以很长半衰期(42×10^9 a)的 β^- 衰变的 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 核素对作为大尺度的宇宙核钟来量度宇宙的年纪, 是近代天文学与核物理学相结合的又一典范. 这种宇宙时钟是利用裸核 ^{187}Re 与它的衰变子体 ^{187}Os 同位素在共生矿中天然含量的比值来测定时间的. 利用 ^{187}Re 裸核的半衰期通过核物理计算可对中性 ^{157}Re 的半衰期进行修定.

关键词: 宇宙核钟; 哈勃常数; 退行速度; 中性/裸核 ^{187}Re ; 同位素的天然含量; 大爆炸

中图分类号: P191; O573.32+2 **文献标识码:** A

1 天文上的宇宙年龄

1920年, 哈勃(Edwin Hubble)在美国洛杉矶威尔逊山观象台利用当时最大的反射天文望远镜观察远离我们几兆光年的旋状星云退行速度时, 发现了距离我们愈远的星云, 它们的退行速度 v 愈大. 这样哈勃总结出: 退行速度 v 与距离 D 的关系为 $v = H_0 D$. 在此 H_0 称作哈勃常数, 这就是哈勃定律. 并由此建立起第一个宇宙时钟. 原先得到 $H_0 = 54 \text{ km}/(\text{s} \cdot L)$, 在这里 L 为 10^6 秒差距, 是天文学上距离 D 的单位, 1“秒差距”相当于 3.26 光年. 1994 年在室女星座发现造父变星后, 皮尔斯(Pierce)^[1] 校准了哈勃时钟, 得到一个新的哈勃常数 $H_0 = (87 \pm 7) \text{ km}/(\text{s} \cdot L)$, 或 $94 \text{ km}/(\text{s} \cdot L) < H_0 < 80 \text{ km}/(\text{s} \cdot L)$, 并被普遍接受. 在假定宇宙膨胀的速度是一个常数时, 得到宇宙的年龄为 12×10^9 a. 既然宇宙在膨胀, 若将时间倒回 12×10^9 a, 宇宙将汇集于一点. 这个点被看作大爆炸点, 它不仅有几何意义, 还被看成时间和宇宙的起点.

图1显示了宇宙膨胀下的二维图示. 图中显示的 A 与 B 两点分别表示被观测对象和观测站, 而球心是宇宙大爆炸的起点. 测量出离我们一兆秒差距的星体, 通过计算可得其退行速度为 $80 \text{ km}/\text{s}$. 同

时看到从大爆炸至今已过去 12×10^9 a.

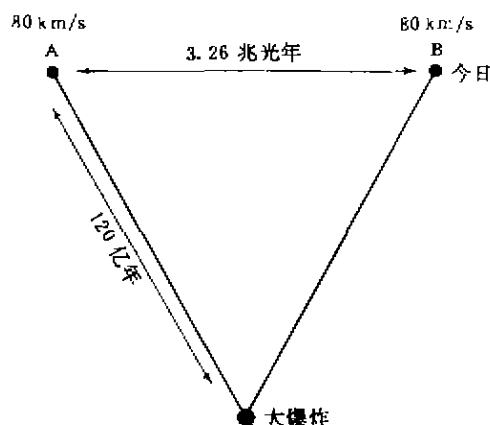


图1 宇宙膨胀的二维图

2 用同位素含量比来断代和修定宇宙时间

大家熟悉的同位素断代法是另一个测时原理. 例如, 常用来测定文物年代的 ^{14}C 测量方法, 因 ^{14}C 的半衰期是 5 730 a, 所以最长可以测量 4 万年 (7 倍的半衰期) 内和短到千年的文物年代. 又如对海底锰结核断代则使用 ^{10}Be (半衰期为 1.6×10^6 a), 所

收稿日期: 2000-09-15; 修改日期: 2001-05-23

作者简介: 戴光曦(1936-), 男(满族), 北京人, 研究员, 从事实验核物理研究.

有这些实际断代都是采用断代核与邻核的同位素含量进行比较而取得的，为了准确还使用了超灵敏加速器质谱计。

用¹⁸⁷Re 与其衰变子核¹⁸⁷Os 的天然同位素在共生矿中的含量比值来定宇宙年龄和地球与太阳系的年龄(见图2)是由 Claton^[2]提出的“永世钟”。¹⁸⁷Re 是半衰期极长的核，半衰期为 42×10^9 a，或平均寿命为 60×10^9 a。它衰变的子核为¹⁸⁷Os 同位素。¹⁸⁷Re 与子核¹⁸⁷Os 在共生矿中的天然同位素比值是随时间增加的，当今这个比值为0.2，倒算至太阳系和地球形成的 4.6×10^9 a 前时，该比值应减少为0.11。如果在宇宙大爆炸后不久就出现宇宙天体进行核合成的快过程，从图2可以看出，至少是合成¹⁸⁷Re 核后 6.6×10^9 a 才可能使¹⁸⁷Re 与子核¹⁸⁷Os 在共生矿中的天然同位素比值从零积累到0.11。这样对应于宇宙最低年龄的下限为两者之和，即大约为 11×10^9 a。

但是¹⁸⁷Re 的半衰期太长，测量是很难的。裸核¹⁸⁷Re 的寿命短、可精确测量。例如，裸核¹⁸⁷Re 的衰变率比中性核¹⁸⁷Re 快10亿倍。裸核¹⁸⁷Re 衰变出一个电子填充到¹⁸⁷Os 的内壳层上，形成类氢离子。这要求在大型重离子加速器加速¹⁸⁷Re 核，用剥离膜将¹⁸⁷Re 的电子全剥去，再用电子冷却束流存储环来保存裸核¹⁸⁷Re 并用肖特基质谱仪来测出子核¹⁸⁷Os 的生长曲线^[3,4]。

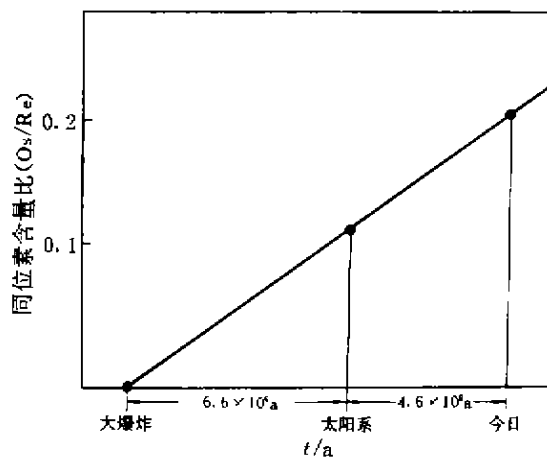


图2 共生矿中¹⁸⁷Os 与¹⁸⁷Re 同位素含量比随时间的增加

图3显示了中性和裸核¹⁸⁷Re 经过 β^- 衰变的纲图。这时中性¹⁸⁷Re(图3下方)经过 β^- 衰变达到¹⁸⁷Os 子核，其Q 值仅为2.66 keV；但是全电离的裸核¹⁸⁷Re(图3上方)经过 β^- 衰变达到¹⁸⁷Os 子核，并将此

衰变电子填在内层K 壳上，成为类氢Os 离子，其Q 值高达63.22 keV，但是该子核处于10 keV 第一激发态。由于两种衰变的Q 值差异很大，导致半衰期从 42×10^9 a 降到33 a。图4显示了裸核¹⁸⁷Re 经 β^- 衰变达到¹⁸⁷Os 子核随时间增长的肖特基谱图^[5]。图中比较了存储时间为1.5 h 和5.5 h 的谱图曲线，可以看到¹⁸⁷Os 峰增长很明显。

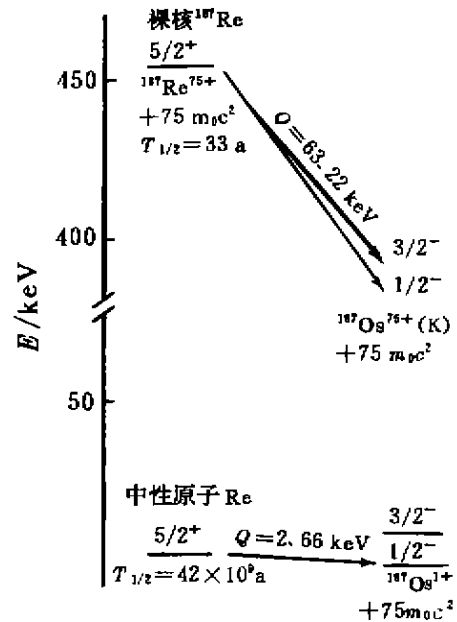


图3 ¹⁸⁷Re 经 β^- 衰变到¹⁸⁷Os 的能级图

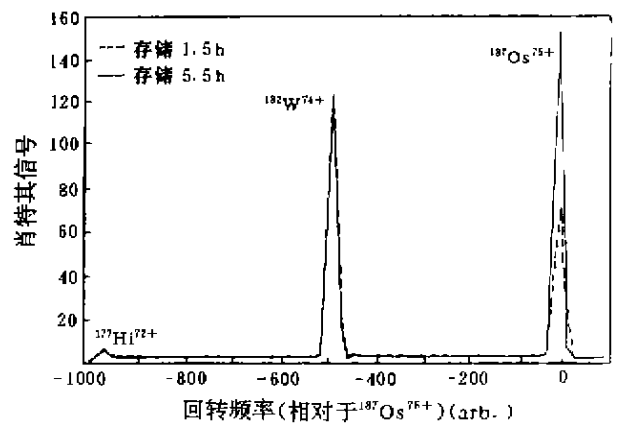


图4 裸核¹⁸⁷Re 衰变到子核¹⁸⁷Os 的肖特基谱

可见裸核因周围环境与中性原子的核是不同的，从而使核衰变性能改变，这是现代高科技设备条件下的新发现。表1列出了有类似现象的4种核素^[4]。其中3个中性核素为 β^- 衰变，而裸核却变成电子俘获衰变，呈相反的衰变方式。现已对¹⁶¹Dy 作了测量，测量结果与预测值相吻合。而在¹⁸⁷Re 到

^{187}Os 的中性核与裸核两种衰变中, 都是相同的 β^- 衰变, 宇称不变, 自旋变化为 2 或 1. 表 1 中 $B(K)$ 是类氢子核为 K 壳的结合能, B 是中性母核与子核电子总结合能之差, Q 值与结合能 B 和 $B(K)$ 的单位均为 keV, 若电子俘获 Q_{ec} 值为负则表示为 β^- 衰变.

$Q(b)$ 是裸核 β^- 衰变到子核 K (或 L) 壳层素的 Q 值. 通过比较图 3 的 ^{187}Re 到 ^{187}Os 的中性核与裸核两种衰变纲图, 就可看出两种衰变的主要区别是 Q 值不同. 所以用裸核测到的半衰期数据, 通过核物理计算, 就能进一步对中性核 ^{187}Re 时钟做出校准.

表 1 裸核经 β^- 衰变到子核 K (或 L) 壳层

母核	I^π	子核	I^π	$B(K)$	B	Q_{ec}	$Q(b)$	半衰期
^{163}Dy	$5/2^-$	^{163}Ho	$7/2^-$	65.137	12.495	2.6	49.814	47 d
^{187}Re	$5/2^-$	^{187}Os	$3/2^-$	80.92	15.60	-2.66	63.22	3.5×10^4 a*
^{151}Er	$3/2^+$	^{151}Pt	$1/2^-$	90.66	16.235	56.27	18.155	
^{205}Tl	$1/2^-$	^{205}Pb	$5/2^-$	101.337	18.468	53.5	29.369	100 d (估计值)

* 衰变到激发能为 10 keV 的第一激发态.

3 宇宙平均密度的讨论

哈勃常数 H_0 与宇宙年龄 T_0 的乘积 ($H_0 T_0$ 值) 和宇宙密度 ρ_0 大体成反比. 从解爱因斯坦引力场方程得到宇宙的动态时空度规, 在此 $H_0 = 80 \text{ km}/(\text{s} \cdot L)$, 在距离单位为 L , 即“兆秒差距”下, 宇宙临界密度 $\rho_c = 4.7 \cdot 10^{-30} \text{ g}/\text{cm}^3$. 图 5 显示了 T_0 和 H_0 的关系. 在临界密度时, $H_0 T_0$ 乘积值为 666, 所以 $H_0 T_0$ 为 1 000 时对应的密度非常小. 经分析, 中性 ^{187}Re 同位素衰变到 ^{187}Os 的计算得到的宇宙年龄 T_0 取下限时为 $11 \cdot 10^9 \text{ a}$, 在 H_0 取下限 $80 \text{ km}/(\text{s} \cdot L)$ 时, 则得到 $H_0 T_0$ 值为 880, 此时的密度 ρ_0 比临界密度值 ρ_c 小得多. 图 5 显示的 $T_0 H_0 = 1 000$ 在允许区 ($T_0 > 11 \cdot 10^9 \text{ a}$, $H_0 > 80 \text{ km}/(\text{s} \cdot L)$) 存在有一段线段, 它对应于密度 $\rho_0 < \rho_c$ 的情形.

所以我们的宇宙将是一直膨胀着的天体. 但是, 一些天体物理学家很相信“膨胀收缩”再“膨胀收缩”的循环观点, 即要求有 $\rho_0 > \rho_c$. 这就要克服这种“质量丢失”的难题, 认为可能漏记了一些不发光的星体与死星等, 而中微子本身若有质量也将漏算许多质量, 更有甚者还假定存在一种暗物质. 甚至将探测器放置到太空船上进行暗物质的搜寻, 似乎没有结果. 事实上引力定律早已告知我们: 从已知天体运动与引力定律的偏离常可以从中发现一些未知天体. 暗物质也应如此, 目前还提不出因暗物质的存在导致已知天体运动的偏离. 暗物质的推测仅从观测到遥远天体有过大的红移而得出的. 由于所观测到的光已穿越极大的时空, 例如有多少亿光年的距离, 在路程上穿过众多星云, 所以这些线移除了原

始的多普勒线移外还应加上其它天体的作用.

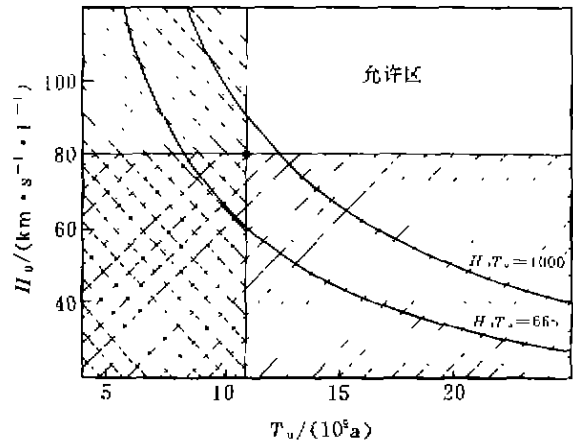


图 5 宇宙年龄 T_0 和哈勃常数 H_0 的关系图

此外, 还可能从生物进化来定年代, 这是由于生物的进化十分缓慢的缘故. 例如, 近来俄罗斯科学家用扫描电子显微镜从陨石中发现粒状或丝状兰菌系列的化石, 它包括丝状菌和放射菌等一系列兰菌群落. 它们产生于 $6 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^6 \text{ a}$ 前. 这样该生命来自比地球生命 $45 \cdot 10^5 - 46 \cdot 10^6 \text{ a}$ 还要早的宇宙. 本来公认的说法是生命起源于 $3 \cdot 10^9 \text{ a}$ 前, 即地球形成后. 这样把生命的起源与进化的时段推前到比地球形成还早的时间, 这就从生物学出发给出了宇宙年龄的下限.

4 结束语

从哈勃望远镜发回的图片甚至看到了 $26 \cdot 10^9 \text{ a}$ 前的星体, 也许要对大爆炸等一套理论作些修改. 宇宙真如大爆炸理论描写的那样简单与完美吗? 最

近, 从美国物理学会在华盛顿的会议(2001年4月28日)发表的报告看到, MAXIMA 组在一个很大的角度范围, 用 mm 微波望远镜测量出早期宇宙微波背景的角度功率涨落谱. 这个高分辨宇宙微波背景辐射的功率谱显示了早期宇宙物质密度在高分辨下存在声波或压力波的图景. 该功率谱中的共振峰由三个峰组成, 这些峰位与峰高度数据很强地支持了膨胀的宇宙大爆炸模型. 同时, 还得出宇宙是平的.

可用欧基里德几何来描绘. 第二峰被压低和第三峰被升高的事实表明宇宙所包含的重子(即普通物质)比起大爆炸中轻元素的合成模型所预示的量要多一些. 所以宇宙大爆炸后, 星际物质的再成团凝聚, 从而进行核合成的快过程与慢过程是必需存在的, 而本文所涉及的用 ^{187}Os 与 ^{187}Re 的含量比值所定的宇宙年龄 11×10^9 a 仅是它的下限值.

参 考 文 献:

- [1] Pierce M J, Welch D L, McClure R D, *et al.* The Hubble Constant and Virgo Cluster Distance from Observations of Cepheid Variables[J]. *Nature*, 1994, 371: 385-390.
- [2] Claron D D. *Astrophys Journ*, 1964, 139: 637-642.
- [3] Jung M, Bosch F, Beckert K, *et al.* GSI-92-45 preprint, 1992.
- [4] Luo Qingzheng, Dai Guangxi, Wu Heyu. Bound-state Decay of Stable Nuclei. IMP Annual Report[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1992, 36.
- [5] Bosch F, Faselermann T, Friese J, *et al.* Observation of Bound-state β Decay of Fully Ionized ^{187}Re : $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$ Cosmochronometry[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77: 5190-5193.
- [6] 戴光曦. 肖特基质谱仪[J]. 原子核物理评论, 1997, 24(1): 239-242.

Cosmic Nuclear Clock

DAI Guang-xi

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

SUN Zhe-hong

(*Basic Sciences Department, the University of Gansu Industry, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: To the great scale of the universe age, $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$ isotopic pair, which have very long half life, was used as a cosmic nuclear clock of cosmochronometr. It is a typical relationship between modern astronomy and nuclear physics. The neutral isotope abundance ratio of ^{187}Re over daughter nucleus ^{187}Os in common-growth mineral can be used as the clock to measure the time. After the 75 electrons in all shells of ^{187}Re were stripped, the bare nucleus, ^{187}Re , 75t from bound-state decays to the first excited state of ^{187}Os by a billion times faster than neutral one, with half life of 33 years which was measured precisely in recent years. By using the half life data of the bare ^{187}Re , the half life of neutral one can be revised by nuclear physics.

Key words: cosmic nuclear clock; Hubble constant; recession velocity; neutral / bare ^{187}Re ; natural isotopic abundance; big bang