

文章编号: 1007-4627(2024)02-0611-05

太阳系中 ^{205}Pb 同位素起源的研究

董超, 李志宏[†], 李云居, 李歌星, 宋娜, 陈晨, 田峻文, 李家英豪

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 短寿命核素可以提供高精度的年代学信息, 对研究太阳系的形成和演化非常重要。 ^{205}Pb 作为独一无二的纯 s-过程短寿命核素, 它的半衰期为 17.0(9) My, 衰变子体为 ^{205}Tl 。 ^{205}Pb - ^{205}Tl 衰变系统可以作为研究太阳系中 ^{205}Pb 起源的时钟。本工作利用 ENDF/B-VIII.0 数据库中最新的核反应截面评价数据, 计算了不同质量和金属性的 AGB 星演化后期 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 的同位素产额比, 通过银河化学演化模型进一步计算得到了早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比。并将理论预测结果与太阳系早期陨石的实验测量结果进行了比较。结果显示, 太阳系中 ^{205}Pb 同位素主要来源于质量为 $1.5\sim 2 M_{\odot}$ 且金属性 $Z=0.004\sim 0.008$ 范围的 AGB 星。

关键词: 银河化学演化; s-过程; 短寿命核素; 同位素丰度比; ^{205}Pb - ^{205}Tl 时钟

中图分类号: P181

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023015

0 引言

自 20 世纪以来, 短寿命核素衰变导致的陨石中同位素丰度异常现象一直是许多实验和理论研究关注的热点问题^[1]。短寿命核素的半衰期大约在 1~100 My, 因为其寿命远小于太阳系年龄 4.56 Gy, 在经历了漫长的演化过程后已完全衰变, 所以这些核素也叫做已灭绝放射性核素^[2]。尽管在自然界中已经很难找到这些核素, 但是科学家们可以通过研究其在太阳系早期陨石中留下的过量子体获取它们存在的信息。迄今为止, 科学家们已经确定了在早期太阳系中存在 10 种短寿命核素: ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{53}Mn , ^{60}Fe , ^{107}Pd , ^{129}I , ^{182}Hf , ^{205}Pb , ^{244}Pu ^[2]。其中, ^{205}Pb 核的半衰期为 17.0(9) My, 衰变子体为 ^{205}Tl ^[3], 它的天体产生过程如图 1 所示。由于 ^{205}Hg 的半衰期为 5 min, 导致中子快速俘获(r-)过程产生的 ^{205}Hg 衰变成 ^{205}Tl 之前就已经被抛洒到星际介质中并冷却了, 而由它衰变产生的 ^{205}Tl 早已脱离高温高密度的 r-过程场所。从图 1 可以看出, 由于稳定核素 ^{204}Hg 和 ^{205}Tl 的遮挡, r-过程对 ^{204}Pb 和 ^{205}Pb 的丰度没有贡献。因此 ^{204}Pb 和 ^{205}Pb 被认为是纯中子慢速俘获(s-)过程核素。在上述十种短寿命核素中, ^{205}Pb 是独一无二的纯 s-过程核素。它不仅可以作为独特的核合成示踪剂, 也可被用作 ^{205}Pb - ^{205}Tl 时钟为元素的演化过程计时^[4]。总之, ^{205}Pb 为研究 s-过程核合成提供了一个独特的机

会, 对研究宇宙演化和太阳系形成具有重要意义。

根据天体物理模型的预测, ^{205}Pb 在早期太阳系中含量比较丰富, 足以产生具有独特 Tl 同位素组成的陨石储层^[5], 并引发了许多有关 ^{205}Pb - ^{205}Tl 衰变系统的研究^[6]。对于已灭绝同位素 ^{205}Pb 来说, 它的衰变会造成陨石中 ^{205}Tl 的丰度增加。因此, 可以在 ^{205}Tl 与 ^{203}Tl 的丰度比和 ^{204}Pb 与 ^{203}Tl 丰度比之间通过 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比作为斜率建立一定的联系。通过测量多个陨石中同位素 ^{205}Tl , ^{203}Tl 以及 ^{204}Pb 的含量就可以得到斜率, 即早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比^[4]。2006 年, Nielsen 等^[7]通过对铁陨石的实验测量首次找到早期太阳系中 ^{205}Pb 存在的证据。之后, Baker 等^[4]

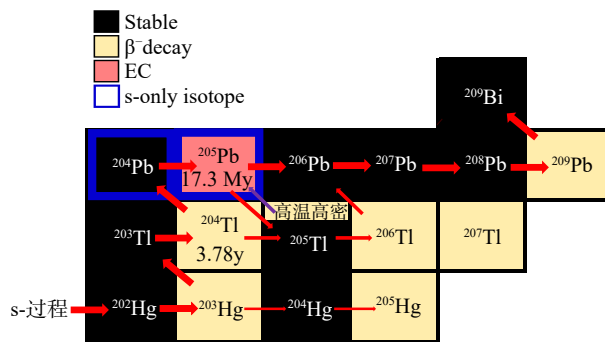


图 1 在 Pb-Tl 附近区域的 s-过程路径 (在线彩图)

粗红色箭头表示主要的 s-过程路径, 细红色箭头表示次要 s-过程路径, 温度大于 $2.3T_8$ 时紫色箭头起主导作用。

收稿日期: 2023-02-20; 修改日期: 2023-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2267205, 12275361, 11490563); 财政部稳定支持项目 (WDJC-2019-13)

作者简介: 董超 (1997-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 从事核天体物理研究; E-mail: 469771103@qq.com

[†] 通信作者: 李志宏, E-mail: zhli@ciae.ac.cn

和 Palk 等 [8] 在球粒陨石中也都得到了 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比, 见表 1。碳质球粒陨石中的球粒状硅酸盐集合体可以很好地包裹住星际物质, 使其中的物质信息免受外界的影响而产生变化。另外, 在碳质球粒陨石中可以观测到水, 蛋白质等有机物。这表明碳质球粒陨石形成至今所经历的温度环境较低, 能够更好地保持其中易挥发物质的成分。而 Pb 与 Tl 元素都属于高挥发元素 [9]。因此 2010 年 Baker 等 [4] 的测量结果对研究陨石中化学元素的起源具有重要的参考价值。

表 1 太阳系早期陨石中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比的测量结果

来源	陨石样本	早期太阳系 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 丰度比
Nielsen (2006) [7]	铁陨石	$(1.55 \pm 0.55) \cdot 10^{-4}$
Baker (2010) [4]	碳质球粒陨石	$(1.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$
Palk (2018) [8]	普通球粒陨石、顽辉石球粒陨石	$(1.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$

然而, Blake 等 [10] 理论计算结果与上述的实验观测结果有很大的不同。他们的研究认为早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比为 0.002 5, 高于表 1 中的所有实验测量结果。进一步的研究发现, 理论计算结果较大是因为忽略了高温高密的天体环境中 ^{205}Pb 衰变速率的变化所致。如图 2 所示, 在天体高温高密的环境下, ^{205}Pb 原子核将有一定概率布居到其 2.3 keV 的第一激发态。而通过第一激发态衰变到 ^{205}Tl 的速率要比从基态的衰变大得多, 从而使恒星中的 ^{205}Pb 因此遭到大量破坏 [11], 导致原初太阳系中的 ^{205}Pb 丰度降低。而 Yokoi 等 [1] 的研究却认为, 高温高密的天体环境也会对 ^{205}Pb - ^{205}Tl 衰变系统产生影响。因为这种环境下 ^{205}Tl 处于高电荷态的, 也有可能通过束缚态 β^- 衰变产生 ^{205}Pb , 从而增加 ^{205}Pb 的丰度。因此, 若要解决模型计算与陨石测量的 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比之间的矛盾, 必须研究环境条件对模型计算的影响。

考虑到 Yokoi 等 [1] 使用的是 Macklin 等 [12] 1976 年的中子俘获截面, 该截面有较大的不确定性。本文将使

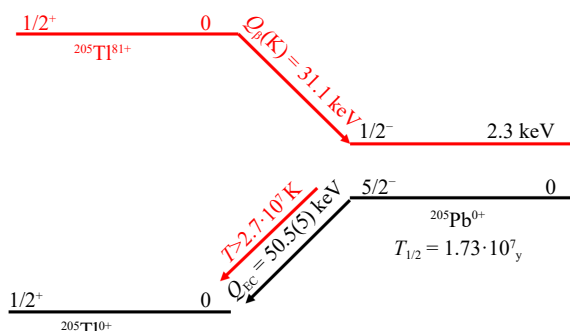


图 2 高电荷态 $^{205}\text{Tl}^{81+}$ 以及中性原子 ^{205}Pb 的衰变纲图

用 ENDF/B-VIII.0 最新的核反应截面评价数据和银河系化学演化模型, 计算不同质量和金属性的 AGB 星演化至后期的 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比, 并将计算结果与陨石的实验测量结果进行比较, 从而推断早期太阳系 ^{205}Pb 同位素的起源。

1 太阳系中 ^{205}Pb 同位素的来源

早期太阳系中短寿命核素主要是从星际介质中继承而来的。从宇宙的早期开始, 恒星中就一直在进行核合成。随着宇宙的演化, 合成的元素被不断地从垂死的恒星喷射到星际介质中去。同时, 储存在星际介质当中的短寿命核素也在不断地衰变。在长达几百万年甚至一亿年的时间内, 来自不同恒星源的喷射物与星际介质中已经存在的气体和尘埃充分混合 [13], 并最终形成太阳系的元素分布。因此, 可以使用银河系化学演化模型来解释太阳系诞生时周围星际介质的元素组分。

在 Huss 等 [13] 的银河系化学演化模型中, 太阳系诞生时星际介质中短寿命核素与稳定核素丰度比的计算公式可以表示为

$$R_{\text{ISM}} = (k+2) \cdot R_p \cdot \frac{\tau}{T_G}, \quad (1)$$

其中: R_{ISM} 为太阳系诞生时星际介质中短寿命核素与稳定核素丰度比; R_p 为天体过程中短寿命核素和稳定核素的产额比; τ 为短寿命核素的平均寿命; $T_G = 8.5 \text{ Gy}$ 是银河系的年龄减去太阳系的年龄, $k = 2.7 \pm 0.4$ 为下落参数 [14]。式 (1) 计算的只是星际介质中的元素丰度比, 而星际介质凝聚成太阳系时会经历一个自由衰减间隔 (free-decay interval) 使短寿命核素的丰度进一步降低 [15]。Clayton 等 [15] 对这一过程的影响进行了详细的分析并建立了三步混合模型 (three-phase mixing model)。根据该模型, Rauscher 等 [16] 给出了早期太阳系中短寿命核素和稳定核素丰度比与星际介质中相应核素丰度比的关系如下:

$$R_{\text{ESS}} = R_{\text{ISM}} \left[1 + 1.5 \frac{t_{\text{mix}}}{\tau} + 0.4 \left(\frac{t_{\text{mix}}}{\tau} \right)^2 \right], \quad (2)$$

其中: R_{ESS} 是早期太阳系中短寿命核素和稳定核素丰度比; τ 为短寿命核素的平均寿命; t_{mix} 为三步混合模型中的混合时间。Rauscher 等 [16] 通过拟合得到 $t_{\text{mix}} = 20 \pm 10 \text{ My}$, 该参数对结果产生的相对误差约为 30%。

^{205}Pb 与 ^{204}Pb 主要由低质量的 AGB 星中的 s-过程产生, 并通过第三次挖掘和星风抛洒到宇宙空间中。Mowlavi 等 [17] 认为: AGB 星的演化过程分为脉冲间隙、脉冲增长、脉冲衰减和后脉冲共四个周期阶段。并且第

三次挖掘发生在后脉冲阶段结束时，其标志当前脉冲阶段的结束以及脉冲间隙阶段的开始。其中，在脉冲衰减阶段和后脉冲阶段时储存 ^{205}Pb 的包层中是无可用辐射中子的，也被称为无辐射中子区域。因此，在无辐射中子区域只需考虑放射性核素的衰变过程对丰度的影响。

^{205}Pb 与 ^{204}Pb 为相邻核素，在最后一轮脉冲增长阶段结束时，s-过程核合成早已达到平衡， ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 的丰度比 R 可以表示为^[18]

$$R = \frac{\sigma_{204}^{\text{MACS}}}{\sigma_{205}^{\text{MACS}}}, \quad (3)$$

其中： $\sigma_{204}^{\text{MACS}}$ 与 $\sigma_{205}^{\text{MACS}}$ 分别为 ^{204}Pb 与 ^{205}Pb 在s-过程中的麦克斯韦平均中子辐射俘获截面，通常取30 keV下的平均截面。其计算公式如下：

$$\sigma^{\text{MACS}}(k_B T) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (k_B T)^{-2} \int_0^\infty \sigma(E) E e^{-\frac{E}{k_B T}} dE, \quad (4)$$

其中： T 为天体环境温度； k_B 是玻尔兹曼常数； $\sigma(E)$ 为不同能量下的中子辐射俘获截面。

对于无辐射中子区域。 ^{205}Pb 的丰度只受到 ^{205}Pb - ^{205}Tl 衰变系统中 ^{205}Pb 电子俘获以及 ^{205}Tl 的束缚态 β^- 衰变过程影响，而不会受到中子俘获反应的影响。因此在无辐射中子区域中 ^{205}Pb 同位素丰度随时间变化公式如下：

$$\frac{dN(^{205}\text{Pb})}{dt} = N(^{205}\text{Tl})\lambda_- - N(^{205}\text{Pb})\lambda_e, \quad (5)$$

其中： $N(^{205}\text{Pb})$ 与 $N(^{205}\text{Tl})$ 分别是在AGB星的无辐射中子区域中的 ^{205}Pb 和 ^{205}Tl 的丰度； λ_- 为 ^{205}Tl 束缚态 β^- 衰变速率； λ_e 为 ^{205}Pb 电子俘获速率。

Yokoi等^[1]对 ^{205}Pb 的电子俘获速率和 ^{205}Tl 的 β^- 衰变速率随环境温度变化进行了详细分析。如图3所示，在温度足够高(通常超过 10^6 K)的情况下， ^{205}Pb 的第一

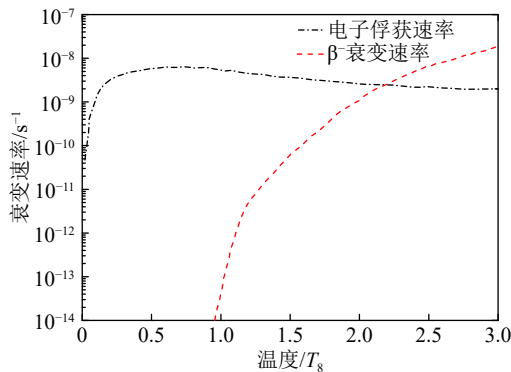


图3 电子数密度为 10^{27} cm^{-3} 时， ^{205}Pb 电子俘获速率和 ^{205}Tl 的 β^- 衰变速率与温度的关系

数据来源于参考文献^[1]。

个激发态(激发能量仅为2.3 keV)可以被显著布居时， ^{205}Pb 将以很快的速率衰变成 ^{205}Tl ；而当温度大于 $1 T_8$ 时($T_8=10^8$ K)，部分 ^{205}Tl 会通过束缚态 β^- 衰变转变为 ^{205}Pb ，该过程将阻止 ^{205}Pb 被大量破坏。在温度高于 $2.3 T_8$ 时， ^{205}Tl 转变成 ^{205}Pb 的速率将大于 ^{205}Pb 的衰变速率，会导致 ^{205}Pb 丰度的增加。

另外，在脉冲增长阶段中对流脉冲的高温状态下， ^{205}Tl 的平均寿命约为几年， ^{205}Pb 的平均寿命比 ^{205}Tl 的高了一个量级约为几十年。其中 ^{205}Tl 的平均寿命对于脉冲增长阶段一百年的持续时间来说非常短，因此，即使在脉冲来临之前已经在AGB星中存在的 ^{205}Tl (初始AGB星生成时从星际空间中吸积的 ^{205}Tl ，和脉冲来临之前的脉冲间隙时 ^{205}Pb 衰变产生的 ^{205}Tl)也会在脉冲增长的早期阶段中由于对流脉冲的高温而迅速完全转化为 ^{205}Pb ，对此Mowlavi等^[17]已经进行了详细的计算分析。因此，在脉冲增长的后半期， ^{205}Tl 的含量可以被忽略，并在脉冲增长阶段结束时，s-过程核素丰度达到如式(3)所描述的平衡。因此，可以忽略前几轮脉冲间隙时 ^{205}Pb 衰变对丰度的影响，以及初始AGB星形成时在星际空间中吸积的r-过程同位素 ^{205}Tl 对 ^{205}Pb 丰度的影响。

2 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素比的计算

为了计算脉冲增长阶段结束时 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素的产额比，需要 ^{204}Pb 和 ^{205}Pb 的麦克斯韦平均中子辐射俘获截面。因而，我们收集了一些 ^{204}Pb 和 ^{205}Pb 的中子辐射俘获反应的麦克斯韦平均截面，分别来自JENDL-5，JEFF-3.3，ENDF/B-VIII.0核反应截面评价数据库，其比较结果如图4所示。其中，JENDL-5数据库汇编结果只有不到500个数据点，数据信息较为匮乏，JEFF-3.3和ENDF/B-VIII.0在共振区域的数据信息差异较大。Kabach等^[19]在2019年对两个数据库JEFF-3.3和ENDF/B-VIII.0进行了测试，表明ENDF/B-VIII.0在大多数情况下都与实验结果非常吻合。

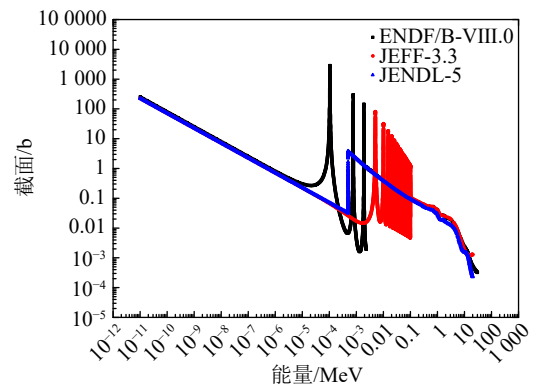


图4 ^{205}Pb 中子辐射俘获截面(在线彩图)

2018 年 Brown^[20] 等通过使用 ENDF/B-VIII.0 核反应截面评价数据计算得到了 ^{204}Pb 与 ^{205}Pb 在 30 keV 下中子辐射俘获反应的麦克斯韦平均截面分别为 (72.4 ± 2.9) mb 和 (211.5 ± 63.1) mb。本工作将使用这些数据进行后续的计算。

为了计算 AGB 星中 ^{205}Pb 同位素在脉冲衰减阶段和后脉冲阶段的丰度, 需要知道这些阶段对应的温度等特征参数值。Karakas^[21] 认为, 质量范围在 $1.5 \sim 3 M_{\odot}$ 且金属性范围在 $0.0001 \sim 0.008$ 的 AGB 星会经历第三次挖掘, 并且计算了不同质量和金属性 AGB 星的最大脉冲数及对应的温度等特征参数值, 见表 2。其中 $T_{\text{bp}}^{\text{max}}$ 是脉冲底部达到的最高温度, T_{be} 是脉冲间隔期间包络底部的温度, t 为后脉冲阶段持续时间。

表 2 不同质量和金属性 AGB 星的特征参数值^[21]

$M/M_{\odot}$	Z	Pulse	$T_{\text{bp}}^{\text{max}}/(10^6 \text{ K})$	$T_{\text{be}}/(10^6 \text{ K})$	t/y
1.50	0.008 0	14	265	2.5	176.0
1.75	0.008 0	15	273	2.9	173.0
1.90	0.008 0	17	278	3.2	188.0
2.10	0.008 0	20	286	3.8	187.0
2.25	0.008 0	25	293	4.2	177.0
2.50	0.008 0	27	302	5.4	167.0
1.50	0.004 0	11	271	2.5	236.0
1.75	0.004 0	15	275	3.0	211.0
1.90	0.004 0	15	282	3.4	184.0
2.25	0.004 0	25	300	5.1	165.0
2.50	0.004 0	28	308	7.2	148.0
3.00	0.004 0	24	316	16.6	113.0
1.75	0.000 1	20	294	4.9	150.0
2.00	0.000 1	26	305	6.7	122.0
2.25	0.000 1	33	319	12.4	96.3
2.50	0.000 1	30	316	21.1	73.2
3.00	0.000 1	40	336	62.0	48.8

在脉冲衰减阶段时储存 ^{205}Pb 的包层温度较高, 对应的 ^{205}Tl 衰变速率远远大于 ^{205}Pb 的衰变速率, 进而会大大抑制 ^{205}Pb 的破坏, 来保证已有的 ^{205}Pb 在该阶段会完好地保存下来^[17]。

在后脉冲阶段时, 储存 ^{205}Pb 包层的温度较低且远小于 $1T_{\text{s}}$, ^{205}Tl 的 β 衰变速率在该环境下非常低足以忽略。因此后脉冲阶段结束时的产额比 R_{p} 为

$$R_{\text{p}} = \frac{\sigma_{204}^{\text{MACS}}}{\sigma_{205}^{\text{MACS}}} \cdot e^{-\lambda_{\text{e}} t} \quad (6)$$

表 3 列出了不同质量金属性 AGB 星演化后期计算得到的 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 产额比 R_{p} 。将表 3 中的产额比 R_{p} 代

入式 (1) 和式 (2) 中可得到早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 的同位素丰度比。

表 3 不同质量和金属性 AGB 星演化后期 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 产额比 R_{p}

$M/M_{\odot}$	Z	Pulse	$T_{\text{bp}}^{\text{max}}/(10^6 \text{ K})$	$T_{\text{be}}/(10^6 \text{ K})$	t/y	R_{p}
1.50	0.008 0	14	265	2.5	176	$2.1 \pm 0.7 \times 10^{-1}$
1.75	0.008 0	15	273	2.9	173	$1.9 \pm 0.6 \times 10^{-1}$
1.90	0.008 0	17	278	3.2	188	$1.7 \pm 0.6 \times 10^{-1}$
2.10	0.008 0	20	286	3.8	187	$1.5 \pm 0.5 \times 10^{-1}$
2.25	0.008 0	25	293	4.2	177	$1.3 \pm 0.4 \times 10^{-1}$
2.50	0.008 0	27	302	5.4	167	$2.7 \pm 0.9 \times 10^{-2}$
1.50	0.004 0	11	271	2.5	236	$1.9 \pm 0.6 \times 10^{-1}$
1.75	0.004 0	15	275	3.0	211	$1.7 \pm 0.6 \times 10^{-1}$
1.90	0.004 0	15	282	3.4	184	$1.6 \pm 0.5 \times 10^{-1}$
2.25	0.004 0	25	300	5.1	165	$3.5 \pm 1.2 \times 10^{-2}$
2.50	0.004 0	28	308	7.2	148	$1.4 \pm 0.5 \times 10^{-2}$
3.00	0.004 0	24	316	16.6	113	$2.5 \pm 0.8 \times 10^{-5}$
1.75	0.000 1	20	294	4.9	150	$5.6 \pm 1.9 \times 10^{-2}$
2.00	0.000 1	26	305	6.7	122	$3.0 \pm 1.0 \times 10^{-2}$
2.25	0.000 1	33	319	12.4	96.3	$1.2 \pm 0.4 \times 10^{-3}$
2.50	0.000 1	30	316	21.1	73.2	$1.3 \pm 0.4 \times 10^{-4}$
3.00	0.000 1	40	336	62.0	48.8	$2.1 \pm 0.7 \times 10^{-5}$

图 5 给出了本计算得到的早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比, 也比较了 Baker 等^[4] 的测量结果。通过分析发现, AGB 星初始质量越大, 温度越高, ^{205}Pb 的破坏就愈加严重, ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 的同位素丰度比也就越低; 随着 AGB 星的金属性 Z 值减小, ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 的同位素丰度比变小。初始质量为 $1.5 \sim 2 M_{\odot}$ 且金属性为 $Z=0.004 \sim 0.008$ 范围的 AGB 星的最终丰度比与太阳系早期陨石的实验测量结果相一致。因此, 太阳系中 ^{205}Pb 同位素主要来源于质量为 $1.5 \sim 2 M_{\odot}$ 且金属性为 $Z=0.004 \sim 0.008$ 范围的 AGB 星。

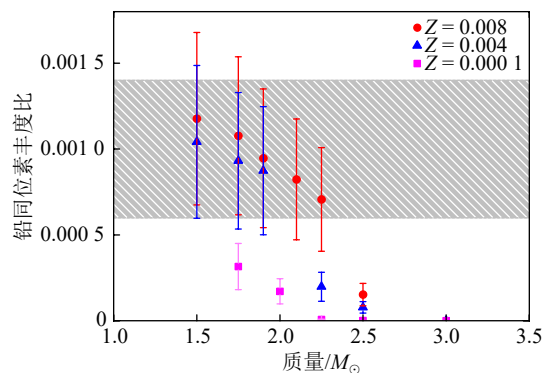


图 5 早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 的同位素丰度比(在线彩图) 阴影部分为 2010 年 Baker 等^[4] 的碳质球粒陨石实验测量结果。

3 总结

为了获得太阳系 ^{205}Pb 同位素的来源，我们使用最新的中子辐射俘获截面的评价数据，计算了不同质量和金属性的AGB星演化末期的 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素产额比，通过银河化学演化模型进一步计算得到了早期太阳系中 ^{205}Pb 与 ^{204}Pb 同位素丰度比。在考虑了温度对同位素丰度的影响后，本计算结果表明：初始质量为 $1.5\sim 2 M_{\odot}$ 且金属性为 $Z=0.004\sim 0.008$ 范围的AGB星的最终丰度比与太阳系早期陨石的实验测量结果相一致。因此，太阳系中 ^{205}Pb 同位素主要来源于质量为 $1.5\sim 2 M_{\odot}$ 且金属性为 $Z=0.004\sim 0.008$ 范围的AGB星。

参考文献：

- [1] YOKOI K, TAKAHASHI K, ARNOULD M. *Astronomy and Astrophysics*, 1985, 145: 339.
- [2] XU Weibiao. *Acta Astronomica Sinica*, 2003, 44(3): 9. (in Chinese)
(徐伟彪. *天文学报*, 2003, 44(3): 9.)
- [3] KONDEV F G. *Nuclear Data Sheets*, 2020, 166: 1.
- [4] BAKER R, SCHNBCHLER M, EHKKMPER M R, et al. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 291(1): 39.
- [5] WASSERBURG G J, GALLINO R, BUSSO M, et al. *Astrophysical Journal*, 1994, 424: 241.
- [6] HUEY J M, KOHMAN T P. *Earth & Planetary Science Letters*, 1972, 16(3): 401.
- [7] NIELSEN S G, REHKÄMPER M, HALLIDAY A N. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(10): 2643.
- [8] PALK C, ANDREASEN R, REHKMPER M, et al. *Meteoritics And Planetary Science*, 2018, 53(2): 167.
- [9] HU Zhongwei, XU Weibiao. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(4): 215. (in Chinese)
(胡中为, 徐伟彪. *自然杂志*, 2006, 28(4): 215.)
- [10] BLAKE J B, LEE T, SCHRAMM D N. *Nature Physical Science*, 1973, 242(120): 98.
- [11] BLAKE J B, SCHRAMM D N. *Astrophysical Journal*, 1975, 197(3): 615.
- [12] MACKLIN R L, WINTERS R R. *The Astrophysical Journal*, 1976, 208(3): 812.
- [13] HUSS G R, MEYER B S, SRINIVASAN G, et al. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(17): 4922.
- [14] DAUPHAS N, RAUSCHER T, MARTY B, et al. *Nuclear Physics A*, 2003, 719: 934.
- [15] CLAYTON D D. *EAstrophysical Journal*, 1983, 268(1): 381.
- [16] RAUSCHER T, DAUPHAS N, DILLMANN I, et al. *Reports on Progress in Physics*, 2013, 76(6): 066.
- [17] MOWLAVI N, GORIELY S, ARNOULD M. *Astronomy & Astrophysics*, 1998, 330(1): 206.
- [18] LI Zhihong. *Nuclear Astrophysics*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2019: 21. (in Chinese)
(李志宏. *核天体物理学*[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2019: 21.)
- [19] KABACH O, CHETAINE A, BENCHRIF A. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 150: 146.
- [20] BROWN D A, CHADWICK M B, CAPOTE R, et al. *Nuclear Data Sheets*, 2018, 148: 1.
- [21] KARAKAS A, LATTANZIO J C. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2007, 24: 103.

The Origin of ^{205}Pb Isotope in the Solar System

DONG Chao, LI Zhihong[†], LI Yunju, LI Gexing, SONG Na, CHEN Chen, TIAN Junwen, LI Jiayinghao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Short-lived radionuclides can provide high-precision chronological information, which is very important in the study of the formation and evolution of the solar system. ^{205}Pb is a short-lived nuclide with a half-life of 17.0(9) My and is classified as a pure s-process nucleus. The ^{205}Pb - ^{205}Tl decay system can be used as a clock to study the origin of ^{205}Pb in the solar system. In this paper, the isotope yield ratios of ^{205}Pb and ^{204}Pb for AGB stars with different masses and metallicities were calculated using the latest evaluation data of nuclear reaction cross sections in ENDF/B-VIII.0 database. The isotopic abundance ratios of ^{205}Pb and ^{204}Pb in the early solar system were further calculated by the Galactic chemical evolution model. The theoretical result is compared with the experimental measurement result from meteorites produced in the early solar system. It is concluded that the ^{205}Pb nuclide in the solar system may be created during the evolution of AGB stars with masses of $1.5\sim 2.0 M_{\odot}$ and metallicities in the range $Z = 0.004\sim 0.008$.

Key words: galactic chemical evolution; s-process; short-lived nuclide; isotope abundance ratio; ^{205}Pb - ^{205}Tl clock

Received date: 20 Feb. 2023; Revised date: 29 Mar. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2267205, 12275361, 11490563); Continuous Basic Scientific Research Project (WDJC-2019-13)

[†] Corresponding author: LI Zhihong, E-mail: zhli@ciae.ac.cn