

太阳系的元素丰度

胡中为
(南京大学天文系)

提 要

太阳系的元素及其同位素(核素)的丰度是探讨元素起源和天体演化的重要资料。本文评述太阳光球、日冕、太阳风和 C1 型碳质球粒陨石的元素丰度测定的近年进展情况, 给出最新的太阳系元素和核素丰度表, 并作一些比较和讨论。

一、引 言

元素的丰度是指各种化学元素及其同位素(核素)的相对含量。测定各类天体的元素和核素丰度, 研究其分布规律, 具有重大的理论意义和实用意义。元素和核素的丰度资料是建立元素起源理论的依据, 为研究天体演化提供重要线索。尤其是元素和核素的丰度差异用于鉴别来自地球之外的陨石和宇宙尘等的判据。

自 1869 年门捷列夫提出元素周期表以来, 元素的性质、分布规律及其起源问题一直是各门基础学科共同探讨的重要课题。1899 年 Clarke 提出第一个元素丰度分布, 1924 年系统地综合了地壳的元素丰度——克拉克值。1930 年 Noddack 从陨石的资料得出元素的宇宙丰度图。Goldschmidt (1938, 1954) 较系统地提出地球岩石圈、陨石、太阳和恒星光球的元素丰度表。Suess 和 Urey (1956) 综合了天文、地球和陨石资料, 提出核素的宇宙丰度表和图^[1]; 以该表为依据, 1957 年 Burbidge 夫妇、Fowler 和 Hoyle 提出恒星内部核合成假说(B²FH 理论)^[2]。60 年代以来相继研究了宇宙早期的核合成、恒星的爆发核合成、宇宙线与星际介质的散裂核过程^[3]。Cameron (1968, 1973, 1982) 综合了太阳光谱、C1 型碳质球粒陨石等资料, 提出太阳系的元素及核素丰度表^[4]。

近 10 年来, 由于采用新的仪器和技术方法以及改进的核物理、粒子物理有关参数, 对太阳光球、日冕、太阳风、陨石等的元素丰度作了更准确的测定与研究; 从地面观测扩展到空间探测, 从光学波段的光谱分析扩展到射电、红外、紫外、X 射线、 γ 射线以及粒子直接探测; 对地球、陨石、月球、宇宙尘等样品的元素和核素丰度作了大量的实验测定, 还对其其他行星的大气、表土、岩石的成分作了探测, 从而得到更好的丰度资料。本文将依次综述 C1 型(碳质球粒)陨石、太阳光球、日冕、太阳风的元素丰度测定的新结果, 给出综合的太阳系元素和核素最新丰度表, 并作一些比较和讨论。

1990 年 9 月 22 日收到。

1991 年 1 月 6 日收到修改稿。

二、C1陨石的元素丰度

陨石是珍贵的宇宙物质样品,近10多年发展了一些高精度实验分析[如中子活化分析、质谱分析、扫描电镜(SEM)或透射电镜(TEM)加能谱(EDX)、电子探针、离子探针等],更精确地测定陨石的元素丰度。陨石有多种类型,它们的元素丰度有差别,归因于陨石母体的分异过程及陨石来自母体的不同部位或不同母体(顺带指出,地球及其他的行星和大卫星经历了更严重的分异过程);但是,C1型碳质球粒陨石(以下简称C1陨石或C1)没有经历过分异过程,较好地保留了其形成时期的状况,因此代表原始太阳系物质。C1陨石中几乎没有球粒及影响其他类型陨石分馏或热变质过程,其挥发元素的丰度比其他类型陨石高并更接近于太阳光球的丰度,Na/Ca、S/Ca、Si/Ca元素丰度比跟太阳光球一致,而且核素丰度曲线最平滑,所以C1陨石可作为元素丰度的标准。

表 1 C1 陨石的元素丰度^[6]

| 元素 | N ⁺ | C1 | 平均* _i | Orgueil | N ⁺ | 元素 | N | C1 | 平均 | Orgueil | N |
|-------|----------------|----------|------------------|----------|----------------|-------|------|-----------|----|----------|----|
| 1 H | — | | | 2.02 % | 2 | 44 Ru | 9 | 712 ppb | | 714 ppb | 5 |
| 2 He | — | | | 56 nL/g | | 45 Rh | (7) | 134 ppb | | 134 ppb | 0 |
| 3 Li | 4 | 1.50 ppm | | 1.49 ppm | 3 | 46 Pd | 25 | 560 ppb | | 556 ppb | 17 |
| 4 Be | (8) | 24.9 ppb | | 24.9 ppb | 0 | 47 Ag | 6 | 199 ppb | | 197 ppb | 5 |
| 5 B | 1 | 870 ppb | | 870 ppb | 1 | 48 Cd | 30 | 686 ppb | | 680 ppb | 21 |
| 6 C | — | | | 3.45 % | 7 | 49 In | 24 | 80 ppb | | 77.8 ppb | 16 |
| 7 N | — | | | 3180 ppm | 4 | 50 Sn | 11 | 1720 ppb | | 1680 ppb | 9 |
| 8 O | — | | | 46.4 % | 4 | 51 Sb | 22 | 142 ppb | | 133 ppb | 15 |
| 9 F | 7 | 60.7 ppm | | 58.2 ppm | 5 | 52 Te | 17 | 2320 ppb | | 2270 ppb | 12 |
| 10 Ne | — | | | 203 pL/g | | 53 I | (11) | 433 ppb | | 433 ppb | 0 |
| 11 Na | 20 | 5000 ppm | | 4900 ppm | 14 | 54 Xe | — | 8.6 pL/g | | 8.6 pL/g | 6 |
| 12 Mg | 15 | 9.89 % | | 9.53 % | 11 | 55 Cs | 20 | 187 ppb | | 186 ppb | 11 |
| 13 Al | 19 | 8680 ppm | | 8690 ppm | 13 | 56 Ba | 8 | 2340 ppb | | 2340 ppb | 8 |
| 14 Si | 9 | 10.64 % | | 10.67 % | 4 | 57 La | 4 | 234.7 ppb | | 236 ppb | 9 |
| 15 P | 4 | 1220 ppm | | 1180 ppm | 3 | 58 Ce | 4 | 603.2 ppb | | 619 ppb | 8 |
| 16 S | 5 | 6.25 % | | 5.25 % | 2 | 59 Pr | (20) | 89.1 ppb | | 90 ppb | 2 |
| 17 Cl | 10 | 704 ppm | | 698 ppm | 8 | 60 Nd | 4 | 452.4 ppb | | 463 ppb | 11 |
| 18 Ar | — | | | 751 pL/g | 7 | 62 Sm | 4 | 147.1 ppb | | 144 ppb | 10 |
| 19 K | 29 | 558 ppm | | 566 ppm | 20 | 63 Eu | 4 | 56.0 ppb | | 54.7 ppb | 17 |
| 20 Ca | 15 | 9280 ppm | | 9020 ppm | 12 | 64 Gd | 4 | 196.6 ppb | | 199 ppb | 7 |
| 21 Sc | 18 | 6.82 ppm | | 5.83 ppm | 12 | 65 Tb | (21) | 36.3 ppb | | 35.3 ppb | 4 |
| 22 Ti | 7 | 436 ppm | | 436 ppm | 7 | 66 Dy | 4 | 242.7 ppb | | 246 ppb | 6 |
| 23 V | 9 | 56.5 ppm | | 56.2 ppm | 7 | 67 Ho | (23) | 56.6 ppb | | 55.2 ppb | 3 |
| 24 Cr | 13 | 2660 ppm | | 2660 ppm | 9 | 68 Er | 4 | 158.9 ppb | | 162 ppb | 6 |
| 25 Mn | 20 | 1990 ppm | | 1980 ppm | 12 | 69 Tm | (20) | 24.2 ppb | | 22 ppb | 1 |
| 26 Fe | 19 | 19.04 % | | 18.51 % | 14 | 70 Yb | 4 | 162.5 ppb | | 166 ppb | 12 |
| 27 Co | 18 | 502 ppm | | 507 ppm | 12 | 71 Lu | 4 | 24.3 ppb | | 24.5 ppb | 12 |
| 28 Ni | 27 | 1.10 % | | 1.10 % | 21 | 72 Hf | (3) | 104 ppb | | 108 ppb | 3 |
| 29 Cu | 8 | 126 ppm | | 119 ppm | 5 | 73 Ta | 2 | 14.2 ppb | | 14.0 ppb | 1 |
| 30 Zn | 27 | 312 ppm | | 311 ppm | 17 | 74 W | 3 | 92.6 ppb | | 92.3 ppb | 3 |
| 31 Ga | 14 | 10.0 ppm | | 10.1 ppm | 10 | 75 Re | 21 | 36.5 ppb | | 37.1 ppb | 15 |
| 32 Ge | 31 | 32.7 ppm | | 32.6 ppm | 23 | 76 Os | 16 | 486 ppb | | 483 ppb | 12 |
| 33 As | 18 | 1.86 ppm | | 1.85 ppm | 13 | 77 Ir | 36 | 481 ppb | | 474 ppb | 27 |
| 34 Se | 18 | 18.6 ppm | | 18.2 ppm | 11 | 78 Pt | 10 | 990 ppb | | 973 ppb | 9 |
| 35 Br | (18) | 3.57 ppm | | 3.56 ppm | 10 | 79 Au | 41 | 140 ppb | | 145 ppb | 27 |
| 36 Kr | — | | | 8.7 pL/g | 7 | 80 Hg | — | 258 ppb | | 258 ppb | 0 |
| 37 Rb | 19 | 2.30 ppm | | 2.30 ppm | 13 | 81 Tl | 18 | 142 ppb | | 143 ppb | 12 |
| 38 Sr | 18 | 7.80 ppm | | 7.80 ppm | 15 | 82 Pb | 3 | 2470 ppb | | 2430 ppb | 1 |
| 39 Y | 5 | 1.56 ppm | | 1.53 ppm | 4 | 83 Bi | 13 | 114 ppb | | 111 ppb | 7 |
| 40 Zr | 5 | 3.94 ppm | | 3.95 ppm | 5 | 90 Th | 9 | 29.4 ppb | | 28.6 ppb | 1 |
| 41 Nb | 2 | 246 ppb | | 246 ppb | 2 | 92 U | 16 | 8.1 ppb | | 8.1 ppb | 7 |
| 42 Mo | 2 | 928 ppb | | 928 ppb | 2 | | | | | | |

*N 为样品数,带括号的部分取自其他陨石资料。

*Mg、S、Fe 为个别陨石丰度均值的平均结果,其余元素的丰度是全部分析平均结果。

陨石的元素丰度测定结果(重量丰度)常以相对重量,即每克样品中各元素所含克数(% , ppm— 10^{-6} , ppb— 10^{-9} g/g)表示,但惰性气体的丰度则以标准温度压力(STP)下的体积(cm^3 , nL— 10^{-9} L, pL— 10^{-12} L)表示。Cameron (1982)和 Anders 与 Ebihara (1982)^[6]的两个太阳系元素丰度表都综合了 C1 陨石的的分析结果,但前者仅用到 1976 年的资料,而后者用到 1982 年的资料。综合近年的陨石资料,Anders 与 Grevesse(简记 AG, 1989)编制了 C1 陨石的 74 种元素平均丰度表(表 1)^[6],表中也给出 C1 陨石 Orgueil 的最新测定结果。

三、太阳光球的元素丰度

由太阳光球的光谱线观测资料和理论天体物理学的计算结果(谱线的等值宽度 W_λ 与元素丰度 N 的关系),应用“生长曲线法”得出太阳光球的元素丰度。天文学中各元素的丰度(天文丰度)常以各元素的原子数与氢原子数(取为 $N_{\text{H}} = 10^{12}$)比值的对数,即 $A_{\text{el}} = \log(N_{\text{el}}/N_{\text{H}})$

表 2 太阳光球的元素丰度($\log N_{\text{H}} = 1200$)^[6]

| 元素 | 光球* | 陨石* | 光球-陨石 | 元素 | 光球 | 陨石 | 光球-陨石 |
|-------|----------------|--------------|---------|-------|--------------|-------------|---------|
| 1 H | 12.00 | [12.00] | — | 44 Ru | 1.84 ±0.07 | 1.82 ±0.02 | +0.02 |
| 2 He | [10.99 ±0.035] | [10.99] | — | 45 Rh | 1.12 ±0.12 | 1.09 ±0.03 | +0.03 |
| 3 Li | 1.16 ±0.1 | 3.31 ±0.04 | -2.15 | 46 Pd | 1.69 ±0.04 | 1.70 ±0.03 | -0.01 |
| 4 Be | 1.15 ±0.10 | 1.42 ±0.04 | -0.27 | 47 Ag | (0.94 ±0.25) | 1.24 ±0.01 | (-0.30) |
| 5 B | (2.6 ±0.3) | 2.88 ±0.04 | (-0.28) | 48 Cd | 1.86 ±0.15 | 1.76 ±0.03 | +0.10 |
| 6 C | 8.56 ±0.04 | [8.56] | — | 49 In | (1.66 ±0.15) | 0.82 ±0.03 | (+0.84) |
| 7 N | 8.05 ±0.04 | [8.05] | — | 50 Sn | 2.0 ±(0.3) | 2.14 ±0.04 | -0.14 |
| 8 O | 8.93 ±0.035 | [8.93] | — | 51 Sb | 1.0 ±(0.3) | 1.04 ±0.07 | -0.04 |
| 9 F | 4.56 ±0.3 | 4.48 ±0.06 | +0.08 | 52 Te | — | 2.24 ±0.04 | — |
| 10 Ne | [8.09 ±0.10] | [8.09 ±0.10] | — | 53 I | — | 1.51 ±0.08 | — |
| 11 Na | 6.33 ±0.03 | 6.31 ±0.03 | +0.02 | 54 Xe | — | 2.23 ±0.08 | — |
| 12 Mg | 7.58 ±0.06 | 7.58 ±0.02 | 0.00 | 55 Cs | — | 1.12 ±0.02 | — |
| 13 Al | 6.47 ±0.07 | 6.48 ±0.02 | -0.01 | 56 Ba | 2.13 ±0.05 | 2.21 ±0.03 | -0.08 |
| 14 Si | 7.55 ±0.06 | 7.55 ±0.02 | 0.00 | 57 La | 1.22 ±0.09 | 1.20 ±0.01 | +0.02 |
| 15 P | 5.45 ±(0.04) | 5.57 ±0.04 | -0.12 | 58 Ce | 1.55 ±0.20 | 1.61 ±0.01 | -0.06 |
| 16 S | 7.21 ±0.06 | 7.27 ±0.05 | -0.06 | 59 Pr | 0.71 ±0.08 | 0.78 ±0.01 | -0.07 |
| 17 Cl | 5.5 ±0.3 | 5.27 ±0.06 | +0.23 | 60 Nd | 1.50 ±0.06 | 1.47 ±0.01 | +0.03 |
| 18 Ar | [6.56 ±0.10] | [6.56 ±0.10] | — | 62 Sm | 1.00 ±0.08 | 0.97 ±0.01 | -0.03 |
| 19 K | 5.12 ±0.13 | 5.13 ±0.03 | -0.01 | 63 Eu | 0.51 ±0.08 | 0.54 ±0.01 | -0.03 |
| 20 Ca | 6.36 ±0.02 | 6.34 ±0.03 | +0.02 | 64 Gd | 1.12 ±0.04 | 1.07 ±0.01 | +0.05 |
| 21 Sc | 3.10 ±(0.09) | 3.09 ±0.04 | +0.01 | 65 Tb | (-0.1 ±0.3) | 0.33 ±0.01 | (-0.43) |
| 22 Ti | 4.99 ±0.02 | 4.93 ±0.02 | +0.06 | 66 Dy | 1.1 ±0.15 | 1.15 ±0.01 | -0.05 |
| 23 V | 4.00 ±0.02 | 4.02 ±0.02 | -0.02 | 67 Ho | (0.26 ±0.16) | 0.50 ±0.01 | (-0.24) |
| 24 Cr | 5.67 ±0.03 | 5.68 ±0.03 | -0.01 | 68 Er | 0.93 ±0.06 | 0.95 ±0.01 | -0.02 |
| 25 Mn | 5.39 ±0.03 | 5.53 ±0.04 | -0.14 | 69 Tm | (0.00 ±0.15) | 0.13 ±0.01 | (-0.13) |
| 26 Fe | 7.67 ±0.03** | 7.51 ±0.01 | +0.16** | 70 Yb | 1.08 ±(0.15) | 0.95 ±0.01 | +0.13 |
| 27 Co | 4.92 ±0.04 | 4.91 ±0.03 | +0.01 | 71 Lu | (0.76 ±0.30) | 0.12 ±0.01 | (+0.64) |
| 28 Ni | 6.25 ±0.04 | 6.25 ±0.02 | 0.00 | 72 Hf | 0.88 ±(0.08) | 0.73 ±0.01 | +0.15 |
| 29 Cu | 4.21 ±0.04 | 4.27 ±0.05 | -0.06 | 73 Ta | — | 0.13 ±0.01 | — |
| 30 Zn | 4.60 ±0.08 | 4.65 ±0.02 | -0.05 | 74 W | (1.11 ±0.15) | 0.68 ±0.02 | (+0.43) |
| 31 Ga | 2.88 ±(0.10) | 3.13 ±0.03 | -0.25 | 75 Re | — | 0.27 ±0.04 | — |
| 32 Ge | 3.41 ±0.14 | 3.63 ±0.04 | -0.22 | 76 Os | 1.45 ±0.10 | 1.38 ±0.03 | +0.07 |
| 33 As | — | 2.37 ±0.05 | — | 77 Ir | 1.35 ±(0.10) | 1.37 ±0.03 | -0.02 |
| 34 Se | — | 3.35 ±0.03 | — | 78 Pt | 1.8 ±0.3 | 1.68 ±0.03 | +0.12 |
| 35 Br | — | 2.63 ±0.08 | — | 79 Au | (1.01 ±0.15) | 0.83 ±0.06 | (+0.18) |
| 36 Kr | — | 3.23 ±0.07 | — | 80 Hg | — | 1.09 ±0.05 | — |
| 37 Rb | 2.60 ±(0.15) | 2.40 ±0.03 | +0.20 | 81 Tl | (0.9 ±0.2) | 0.82 ±0.04 | (+0.08) |
| 38 Sr | 2.90 ±0.06 | 2.93 ±0.03 | -0.03 | 82 Pb | 1.85 ±0.05 | 2.05 ±0.03 | -0.20 |
| 39 Y | 2.24 ±0.03 | 2.22 ±0.02 | +0.02 | 83 Bi | — | 0.71 ±0.03 | — |
| 40 Zr | 2.60 ±0.03 | 2.61 ±0.03 | -0.01 | 90 Th | 0.12 ±(0.06) | 0.08 ±0.02 | +0.04 |
| 41 Nb | 1.42 ±0.06 | 1.40 ±0.01 | +0.02 | 92 U | (<-0.47) | -0.49 ±0.04 | — |
| 42 Mo | 1.92 ±0.05 | 1.96 ±0.02 | -0.04 | | | | |

* 括号内的值不确切

* 括号内的值依据太阳或其他天文资料

+12.00 来表示。由于谱线强度的观测误差、理论的等值宽度跟太阳大气模型条件及产生谱线的振子强度(或跃迁概率)有关,天文丰度结果的精度较低。1984年 Grevesse 综合了太阳光球的元素丰度^[7]; AG 用近年的精确跃迁概率等资料,改进了一些元素的丰度值,尤其是用空间红外光谱中 CO、CH、OH、NH 诸分子的振动—转动及纯转动谱线的仔细分析提高了元素 H、C、N、O 的丰度精度。AG 编制了太阳光球的 70 种元素丰度表(表 2,表中太阳光球简记为光球, C1 陨石简记为陨石),其中 C1 陨石的天文丰度是由表 1 的重量丰度归算的。若以 C 表示重量丰度(ppm)、N 表示原子数丰度($N_{\text{H}} = 10^{12}$)、A 为原子量,则两种丰度的换算关系为 $C = 1.0676 \times 10^{-4} N A$ 。AG 的太阳光球元素丰度更接近于 C1 陨石的元素丰度(表 2)。

四、日冕和太阳风的元素丰度

综合日冕的光谱观测和来自日冕的太阳风粒子以及太阳高能粒子(SEP)探测结果, AG 编制了日冕的元素丰度采用值(表 3)。在误差范围内(0.20 dex),由太阳风和日冕光谱得出的日冕元素丰度基本是一致的。由 SEP 得到的元素丰度较准确,也与日冕光谱结果一致。从表 3 可见,在误差范围内,日冕多数元素的丰度与光球一致,但 O、C、N 等元素丰度有系统差,这将在后面讨论。

表 3 日冕的元素丰度*^[6]

| 元 素 | 光 谱 | 太 阳 风 | SEP | 日 冕 采 用 值 | 光 球 | 冕-光球 |
|------|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| 1H | 11.88 ±0.30 | 11.53 ±0.08 | — | — | =12.00 | — |
| 2He | (10.88 ±0.48) | 10.13 ±0.10 | 10.14 ±0.06 | 10.14 ±0.06 | 10.99 ±0.035 | -0.85 |
| 6C | 8.33 ±0.48 | 7.88 ±0.02 | 7.92 ±0.04 | 7.90 ±0.06 | 8.56 ±0.04 | -0.66 |
| 7N | 7.55 ±0.23 | 7.42 ±0.15 | 7.40 ±0.03 | 7.40 ±0.06 | 8.05 ±0.04 | -0.85 |
| 8O | 8.35 ±0.20 | 8.25 ±0.15 | 8.30 ±0.03 | 8.30 ±0.06 | 8.93 ±0.035 | -0.83 |
| 9F | — | — | (4.00 ±0.30) | (4.00 ±0.30) | 4.56 ±0.30 | (-0.56) |
| 10Ne | 7.50 ±0.20 | 7.48 ±0.05 | 7.44 ±0.04 | 7.46 ±0.06 | 8.07 ±0.18 | -0.61 |
| 11Na | 6.40 ±0.23 | — | 6.38 ±0.04 | 6.38 ±0.06 | 6.33 ±0.03 | +0.05 |
| 12Mg | 7.53 ±0.11 | — | 7.59 ±0.03 | 7.59 ±0.06 | 7.58 ±0.05 | +0.01 |
| 13Al | 6.40 ±0.23 | — | 6.47 ±0.03 | 6.47 ±0.06 | 6.47 ±0.07 | 0.00 |
| 14Si | =7.55 ±0.11 | =7.55 ±0.13 | =7.55 ±0.03 | =7.55 ±0.05 | 7.55 ±0.05 | 0.00 |
| 15P | — | — | 5.24 ±0.06 | 5.24 ±0.08 | 5.45 ±0.04 | -0.21 |
| 16S | 6.89 ±0.23 | — | 6.93 ±0.02 | 6.93 ±0.06 | 7.21 ±0.06 | -0.28 |
| 17Cl | — | — | 4.93 ±0.14 | 4.93 ±0.14 | 5.5 ±0.3 | -0.57 |
| 18Ar | 6.28 ±0.26 | 5.85 ±0.10 | 5.93 ±0.06 | 5.89 ±0.10 | 6.58 ±0.18 | -0.69 |
| 19K | — | — | 5.14 ±0.17 | 5.14 ±0.17 | 5.12 ±0.13 | +0.02 |
| 20Ca | 6.43 ±0.20 | — | 6.46 ±0.06 | 6.46 ±0.08 | 6.36 ±0.02 | +0.10 |
| 21Sc | — | — | (4.04 ±0.40) | (4.04 ±0.40) | 3.10 ±0.09 | (+0.96) |
| 22Ti | — | — | 5.24 ±0.12 | 5.24 ±0.13 | 4.99 ±0.02 | +0.25 |
| 23V | — | — | (4.23 ±0.40) | (4.23 ±0.40) | 4.00 ±0.02 | (+0.23) |
| 24Cr | — | — | 5.81 ±0.08 | 5.81 ±0.09 | 5.67 ±0.03 | +0.14 |
| 25Mn | — | — | 5.38 ±0.17 | 5.38 ±0.18 | 5.39 ±0.03 | -0.01 |
| 26Fe | 7.55 ±0.15 | 7.53 ±0.27 | 7.65 ±0.04 | 7.55 ±0.06 | 7.67 ±0.03 | -0.02 |
| 28Ni | 6.29 ±0.23 | — | 6.22 ±0.06 | 6.22 ±0.03 | 6.25 ±0.04 | -0.03 |
| 29Cu | — | — | (4.31 ±0.40) | (4.31 ±0.40) | 4.21 ±0.04 | (+0.10) |
| 30Zn | — | — | 4.76 ±0.18 | 4.76 ±0.19 | 4.60 ±0.08 | +0.16 |

*归化到 $\log N(\text{Fe}) = 7.55$, 括号内的值不确切。

五、太阳系的元素丰度

太阳系的元素丰度是指整个太阳系的原始丰度。经过分异等过程演化了的地球及行星等

表层样品不能代表原始太阳系物质, 本文也不讨论太阳内部的元素丰度情况。太阳系的元素丰度主要由演化程度少的 C1 陨石实验分析结果和太阳大气(光球、日冕)观测分析结果综合编制的。由于太阳系元素丰度是各类天体中测定的元素种类最多最准确的, 也是讨论各类天体元素丰度差别的基础, 因而常称作标准元素丰度或宇宙丰度。

全面地综合和评价了到 1988 年的 C1 陨石、太阳光球、日冕以及有关的天文资料, AG 编制了太阳系元素丰度新表(表 4), 以 Si 原子数 10^6 归化出 83 种元素的原子数丰度及其误差 σ , 其中大多数元素主要采用 C1 陨石的平均元素丰度, 元素 H、C、N、O 的丰度采用太阳光球结果, He 和惰性气体则依据日冕、H II 区、H I 区及恒星资料及理论结果。跟 Anders 和 Ebihara (1982, 简记 AE) 的太阳系元素丰度表对比, 有 61 种元素的丰度值改进了, 但仅少数元素(如 Hg)的丰度值改变超过 20%(图 1)。AG 新表中大多数元素的丰度好于精度 10%, 而且用不同丰度标的太阳($N_{\text{H}} = 10^{12}$)与陨石($N_{\text{Si}} = 10^6$)元素丰度归化结果更匹配。原则上, 可由所有元素的“太阳/陨石”丰度比来求出两种丰度标转换因子 $R = \log(\text{“太阳”}/\text{“陨石”})$, 一般 R 在 1.52—1.58 之间, 对多数元素 $R = 1.55$, AG 对 12 种元素(Na、Mg、Si、

表 4 太阳系的元素丰度($N_{\text{Si}} = 10^6$)[6]

| 元 素 | Anders & Grevesse (89) | Anders & Ebihara (82) | σ % | 元 素 | Anders & Grevesse | Anders & Ebihara | σ % |
|-------|------------------------|-----------------------|------------|-------|-------------------|------------------|------------|
| 1 H | 2.79×10^{10} | 2.72×10^{10} | | 44 Ru | 1.86 | 1.86 | 5.4 |
| 2 He | 2.72×10^9 | 2.18×10^9 | | 45 Rh | 0.344 | 0.344 | 8 |
| 3 Li | 57.1 | 59.7 | 9.2 | 46 Pd | 1.39 | 1.39 | 6.6 |
| 4 Be | 0.73 | 0.78 | 9.5 | 47 Ag | 0.486 | 0.529 | 2.9 |
| 5 B | 21.2 | 24 | 10 | 48 Cd | 1.61 | 1.69 | 6.5 |
| 6 C | 1.01×10^7 | 1.21×10^7 | | 49 In | 0.184 | 0.184 | 6.4 |
| 7 N | 3.13×10^6 | 2.48×10^6 | | 50 Sn | 3.82 | 3.82 | 9.4 |
| 8 O | 2.38×10^7 | 2.01×10^7 | 10 | 51 Sb | 0.309 | 0.352 | 18 |
| 9 F | 843 | 843 | 15 | 52 Te | 4.81 | 4.91 | 10 |
| 10 Ne | 3.44×10^6 | 3.76×10^6 | 14 | 53 I | 0.90 | 0.90 | 21 |
| 11 Na | 5.74×10^4 | 5.70×10^4 | 7.1 | 54 Xe | 4.7 | 4.35 | 20 |
| 12 Mg | 1.074×10^6 | 1.075×10^6 | 3.8 | 55 Cs | 0.372 | 0.372 | 5.6 |
| 13 Al | 8.49×10^4 | 8.49×10^4 | 3.6 | 56 Ba | 4.49 | 4.36 | 6.3 |
| 14 Si | 1.00×10^6 | 1.00×10^6 | 4.4 | 57 La | 0.4460 | 0.448 | 2.0 |
| 15 P | 1.04×10^4 | 1.04×10^4 | 10 | 58 Ce | 1.136 | 1.16 | 1.7 |
| 16 S | 5.15×10^5 | 5.15×10^5 | 13 | 59 Pr | 0.1669 | 0.174 | 2.4 |
| 17 Cl | 5240 | 5240 | 15 | 60 Nd | 0.8279 | 0.836 | 1.3 |
| 18 Ar | 1.01×10^5 | 1.04×10^5 | 6 | 62 Sm | 0.2582 | 0.261 | 1.3 |
| 19 K | 3770 | 3770 | 7.7 | 63 Eu | 0.0973 | 0.0972 | 1.6 |
| 20 Ca | 6.11×10^4 | 6.11×10^4 | 7.1 | 64 Gd | 0.3300 | 0.331 | 1.4 |
| 21 Sc | 34.2 | 33.8 | 8.6 | 66 Tb | 0.0603 | 0.0589 | 2.2 |
| 22 Ti | 2400 | 2400 | 5.0 | 66 Dy | 0.3942 | 0.398 | 1.4 |
| 23 V | 293 | 295 | 5.1 | 67 Ho | 0.0889 | 0.0875 | 2.4 |
| 24 Cr | 1.35×10^4 | 1.34×10^4 | 7.6 | 68 Er | 0.2508 | 0.253 | 1.3 |
| 25 Mn | 9550 | 9510 | 9.6 | 69 Tm | 0.0378 | 0.0386 | 2.3 |
| 26 Fe | 9.00×10^5 | 9.00×10^5 | 2.7 | 70 Yb | 0.2479 | 0.243 | 1.6 |
| 27 Co | 2250 | 2250 | 6.6 | 71 Lu | 0.0367 | 0.0369 | 1.3 |
| 28 Ni | 4.93×10^4 | 4.93×10^4 | 5.1 | 72 Hf | 0.154 | 0.176 | (1.9) |
| 29 Cu | 622 | 514 | 11 | 73 Ta | 0.0207 | 0.0226 | 1.8 |
| 30 Zn | 1260 | 1260 | 4.4 | 74 W | 0.133 | 0.137 | 5.1 |
| 31 Ga | 37.8 | 37.8 | 6.9 | 75 Re | 0.0517 | 0.0507 | 9.4 |
| 32 Ge | 119 | 118 | 9.6 | 76 Os | 0.675 | 0.717 | 6.3 |
| 33 As | 6.56 | 6.79 | 12 | 77 Ir | 0.661 | 0.660 | 6.1 |
| 34 Se | 62.1 | 62.1 | 6.4 | 78 Pt | 1.34 | 1.37 | 7.4 |
| 35 Br | 11.8 | 11.8 | 19 | 79 Au | 0.187 | 0.186 | 15 |
| 36 Kr | 45 | 45.3 | 18 | 80 Hg | 0.34 | 0.52 | 12 |
| 37 Rb | 7.09 | 7.09 | 6.6 | 81 Tl | 0.184 | 0.184 | 9.4 |
| 38 Sr | 23.5 | 23.8 | 8.1 | 82 Pb | 3.15 | 3.15 | 7.8 |
| 39 Y | 4.64 | 4.64 | 6.0 | 83 Bi | 0.144 | 0.144 | 8.2 |
| 40 Zr | 11.4 | 10.7 | 6.4 | 90 Th | 0.0335 | 0.0335 | 5.7 |
| 41 Nb | 0.698 | 0.71 | 1.4 | 92 U | 0.0090 | 0.0090 | 8.4 |
| 42 Mo | 2.55 | 2.62 | 5.5 | | | | |

表 5 太阳系核素(同位素)丰度($Si = 10^6$)^[6]

| 元素 A | 原子% 过程 | 丰度* | 元素 A | 原子% 过程 | 丰度* | 元素 A | 原子% 过程 | 丰度 | 元素 A | 原子% 过程 | 丰度 | |
|------|---------|-----------------------|--------|--------|--------------|--------------|--------|------------|-------|---------|------------------------------|------|
| 1H | 99.9986 | 2.79×10^{10} | 30Zn | 48.63 | Ex, E 613 | 51Sb | 121 | 57.362 | 71Lu | 175 | 97.41 | |
| 2 | 0.0034 | 9.49×10^5 | 66 | 27.90 | E 352 | 123 | 42.638 | R | 176 | 2.59 | S | |
| 2He | 3 | 0.0142 | U, h? | 4.10 | E, S 51.7 | 52Tc | 120 | 0.09 | 72Hf | 174 | 0.162 | |
| 4 | 99.9858 | 3.86×10^5 | 68 | 18.75 | E, S 236 | 122 | 2.87 | S | 176 | 5.206 | S | |
| | | 2.72×10^6 | 70 | 0.62 | E, S 7.8 | 124 | 4.76 | S | 177 | 0.00793 | S | |
| 3Li | 6 | 7.5 | X | 60.108 | S, e, r 22.7 | 125 | 7.10 | R, S | 178 | 18.606 | R, S | |
| 7 | 92.5 | U, x, h | 71 | 39.892 | S, e, r 15.1 | 126 | 18.89 | R, S | 177 | 27.297 | R, S | |
| 4Be | 9 | 100 | X | 20.5 | S, e 24.4 | 128 | 31.73 | R | 179 | 13.629 | R, S | |
| | | 0.73 | 32Ge | 72 | 27.4 | S, e, r 9.28 | 130 | 33.97 | R | 180 | 35.100 | S, R |
| 5B | 10 | 19.9 | X | 73 | 7.8 | e, s, r 43.4 | 53I | 127 | 100 | 0.012 | P, s, r 248×10^{-6} | |
| 11 | 80.1 | X | 74 | 36.5 | e, s, r 9.28 | 54Xe | 124 | 0.121 | 181 | 99.988 | R, S | |
| | | 16.98 | 76 | 7.8 | E 9.28 | 126 | 0.108 | P | 182 | 0.13 | P | |
| 6C | 12 | 98.90 | He | 75 | 100 | R, s 6.56 | 128 | 2.19 | 182 | 26.3 | R, S | |
| 13 | 1.10 | H, N | 33As | 74 | 0.88 | P 0.55 | 129 | 27.34 | 183 | 14.3 | R, S | |
| | | 9.99×10^6 | 77 | 9.0 | S, p 5.6 | 130 | 4.35 | R | 184 | 30.67 | R, S | |
| | | 1.11×10^5 | 34Se | 76 | 7.6 | R, s 4.7 | 131 | 21.69 | 186 | 28.6 | R | |
| 7N | 14 | 99.634 | H | 77 | 9.0 | R, s 14.7 | 132 | 28.50 | 187 | 0.00173 | P | |
| 15 | 0.366 | H, N | 78 | 23.6 | R, s 14.7 | 134 | 9.76 | R | 188 | 0.0350 | R, S | |
| | | 3.12×10^6 | 80 | 49.7 | R, s 30.9 | 136 | 7.94 | R | 189 | 0.0190 | R, S | |
| | | 1.15×10^4 | 82 | 9.2 | R, s 5.7 | 138 | 100 | R | 188 | 13.3 | R, S | |
| 8O | 16 | 99.762 | He | 79 | 50.99 | R, s 5.98 | 55Cs | 133 | 100 | 0.018 | P | |
| 17 | 0.038 | N, H | 81 | 49.31 | R, s 5.82 | 56Ba | 130 | 0.106 | 186 | 1.58 | S | |
| 18 | 0.200 | He, N | 82 | 9.2 | R, s 5.7 | 132 | 0.101 | P | 187 | 1.6 | S | |
| | | 4.76×10^4 | 35Br | 78 | 0.339 | P 0.153 | 134 | 2.417 | 187 | 0.00807 | S | |
| | | 843 | 80 | 2.22 | S, p 0.999 | 135 | 6.592 | R, S | 188 | 0.0898 | R, S | |
| 9F | 19 | 100 | N | 82 | 11.45 | S 5.15 | 136 | 7.854 | 189 | 18.1 | R, S | |
| | | 3.20×10^6 | 84 | 57.11 | R, s 25.70 | 137 | 11.23 | S, r 0.353 | 190 | 26.4 | R | |
| 10Ne | 20 | 92.99 | C | 86 | 17.42 | S, r 7.84 | 138 | 71.70 | 192 | 41.0 | R | |
| 21 | 0.226 | C, Ex | 85 | 72.165 | R, s 5.12 | 57La | 138 | 0.089 | 191 | 37.3 | R | |
| 22 | 6.79 | He, N | 87 | 27.835 | S 2.11* | 136 | 99.911 | S, r 0.446 | 193 | 62.7 | R | |
| | | 7.77×10^5 | 36Kr | 78 | 0.339 | P 0.153 | 58Ce | 136 | 0.19 | 0.00397 | P | |
| | | 2.34×10^5 | 82 | 11.45 | S 5.15 | 138 | 0.25 | P 0.00234 | 192 | 0.78 | S | |
| 11Na | 23 | 100 | CNeEx | 82 | 11.47 | R, s 5.16 | 138 | 88.48 | 194 | 32.9 | R | |
| | | 5.74×10^4 | 84 | 57.11 | R, s 25.70 | 140 | 11.08 | S, r 1.005 | 195 | 33.8 | R | |
| 12Mg | 24 | 78.99 | N, Ex | 86 | 17.42 | S, r 7.84 | 142 | 11.08 | 196 | 25.2 | R | |
| 25 | 10.00 | Ne, ExCl | 87 | 27.835 | S 2.11* | 59Pr | 141 | 100 | 198 | 7.19 | R | |
| 26 | 11.01 | Ne, ExCl | 88 | 82.56 | S, r 19.41 | 142 | 11.08 | R, S 0.126 | 199 | 16.873 | R, S | |
| | | 1.18×10^5 | 89 | 100 | S 4.64 | 60Nd | 142 | 27.13 | 200 | 23.086 | S, r | |
| 13Al | 27 | 100 | Ne, Ex | 84 | 0.56 | P 0.132 | 143 | 12.18 | 196 | 0.1534 | P | |
| | | 8.49×10^4 | 38Sr | 86 | 9.86 | S 2.32 | 143 | 0.101 | 198 | 9.968 | S | |
| 14Si | 28 | 92.23 | O, Ex | 87 | 7.00 | S 1.64 | 143 | 0.100* | 199 | 0.0339 | S | |
| 29 | 4.67 | Ne, Ex | 87 | 7.00 | S 1.64 | 144 | 23.80 | S, r 0.197 | 200 | 0.0674 | R, S | |
| 30 | 3.10 | Ne, Ex | 88 | 82.56 | S, r 19.41 | 144 | 23.80 | S, r 0.197 | 200 | 0.0674 | R, S | |
| | | 3.10×10^4 | 88 | 82.56 | S, r 19.41 | 144 | 23.80 | S, r 0.197 | 200 | 0.0674 | R, S | |
| 15P | 31 | 100 | Ne, Ex | 88 | 82.56 | S, r 19.41 | 144 | 23.80 | 197 | 100 | R | |
| | | 1.04×10^4 | 39Y | 89 | 100 | S 4.64 | 60Nd | 142 | 27.13 | S 0.225 | P | |
| 16S | 32 | 95.02 | O, Ex | 90 | 51.45 | S 5.87 | 143 | 12.18 | 198 | 9.968 | S | |
| 33 | 0.75 | Ex | 91 | 11.22 | S 1.28 | 143 | 12.18 | R, S 0.101 | 199 | 16.873 | R, S | |
| 34 | 4.21 | O, Ex | 92 | 17.15 | S 1.96 | 143 | 12.18 | R, S 0.101 | 199 | 16.873 | R, S | |
| 36 | 0.02 | Ex, Ne, S | 94 | 17.38 | S 1.98 | 144 | 23.80 | S, r 0.197 | 200 | 23.086 | S, r | |
| | | 1.03×10^2 | 17Cl | 35 | 75.77 | Ex 2860 | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---------|---------|---------------------|------|--------|--------|--------|-----|-------|-----|---------|------|---------|--------|----------|-----------------------|
| 37 | 24.23 | Ex,C,S | 913 | 96 | 2.80 | R | 0.320 | 145 | 8.30 | R,s | 0.0667 | 201 | 13.181 | S,r | 0.0448 | |
| 18Ar | 36 | 84.2 | Ex | 41Nb | 93 | 100 | S | 146 | 17.19 | R,S | 0.142 | 202 | 29.863 | S,r | 0.1015 | |
| 38 | 15.8 | O,Ex | 1.60×10^4 | 42Mo | 92 | 14.84 | P | 148 | 5.76 | R | 0.0477 | 204 | 6.865 | R | 0.0233 | |
| 40 | | S,Ne | 26 | 94 | 9.25 | P | 0.378 | 150 | 5.64 | R | 0.0467 | 817I | 203 | 29.524 | R,S | 0.0543 |
| 40 | | | $26 \pm 14^*$ | 95 | 15.92 | P | 0.406 | 144 | 3.1 | P | 0.0800 | 205 | 70.476 | S,R | 0.1287 | |
| 19K | 39 | 93.2561 | Ex | 96 | 5.52 | P | 0.103 | 147 | 15.0 | R,s | 0.0387 | 82Pb | 204 | 1.94 | S | 0.0611 |
| 40 | 0.01187 | S,Ex,Ne | 0.440 | 98 | 12.7 | P | 0.0350 | 147 | 15.0 | R,s | 0.0399* | 206 | 19.12 | R,S | 0.602 | |
| 40 | | | 5.48* | 99 | 12.7 | R,s | 0.234 | 148 | 11.3 | S | 0.0232 | 206 | 19.12 | R,S | 0.593* | |
| 40 | | | | 100 | 12.6 | S | 0.426 | 149 | 13.8 | R,S | 0.0355 | 207 | 20.62 | R,S | 0.650 | |
| 41 | 6.7302 | Ex | 253.7 | 101 | 17.0 | R,s | 0.316 | 150 | 7.4 | S | 0.0191 | 207 | 20.62 | R,S | 0.644* | |
| 20Ca | 40 | 96.941 | Ex | 102 | 31.6 | R,S | 0.588 | 152 | 26.7 | R,S | 0.0889 | 208 | 58.31 | R,s | 1.837 | |
| 42 | 0.647 | Ex,O | 5.92×10^4 | 104 | 18.7 | R | 0.348 | 154 | 22.7 | R | 0.0586 | 208 | | R,s | 1.828* | |
| 43 | 0.135 | Ex,C,S | 82.5 | 44Ru | 96 | 5.52 | P | 151 | 47.8 | R,s | 0.0465 | 83Bi | 209 | 100 | R,s | 0.144 |
| 44 | 2.086 | Ex,S | 1275 | 98 | 1.88 | P | 0.0350 | 153 | 52.2 | R,s | 0.0508 | 90Th | 232 | 100 | RA | 0.0335 |
| 46 | 0.004 | ExCNe | 2.4 | 99 | 12.7 | R,s | 0.234 | 155 | 14.80 | R,s | 0.0468 | 232 | | RA | 0.0420* | |
| 48 | 0.187 | E,Ex | 114 | 100 | 12.6 | S | 0.426 | 156 | 20.47 | R,s | 0.0676 | 92U | 235 | 0.7200 | RA | 6.48 $\times 10^{-5}$ |
| 21Sc | 45 | 100 | ExNeE | 101 | 17.0 | R,s | 0.316 | 157 | 15.65 | R,s | 0.0516 | 235 | | RA | 0.00573* | |
| 22Ti | 46 | 8.0 | Ex | 102 | 31.6 | R,S | 0.588 | 158 | 24.84 | R,s | 0.0820 | 238 | 99.2745 | RA | 0.00893 | |
| 47 | 7.3 | Ex | 175 | 104 | 18.7 | R | 0.348 | 160 | 21.86 | R | 0.0721 | 238 | | RA | 0.0181* | |
| 48 | 73.8 | Ex | 1771 | 46Pd | 102 | 1.020 | P | 152 | 0.20 | P,s | 0.00056 | | | | | |
| 49 | 5.5 | Ex | 132 | 104 | 11.14 | S | 0.155 | 154 | 2.18 | S | 0.00719 | | | | | |
| 50 | 5.4 | E | 130 | 106 | 22.33 | R,S | 0.310 | 155 | 14.80 | R,s | 0.0468 | | | | | |
| 23V | 50 | 0.250 | Ex,E | 108 | 26.48 | R,S | 0.368 | 156 | 20.47 | R,s | 0.0676 | | | | | |
| 51 | 99.750 | Ex | 0.732 | 110 | 11.72 | R | 0.163 | 157 | 15.65 | R,s | 0.0516 | | | | | |
| 24Cr | 52 | 4.345 | Ex | 46Rh | 103 | 100 | R,s | 159 | 100 | R | 0.0603 | | | | | |
| 53 | 9.501 | Ex | 1.131×10^6 | 104 | 11.14 | S | 0.155 | 156 | 0.056 | P | 0.00221 | | | | | |
| 54 | 2.365 | E | 319 | 106 | 22.33 | R,S | 0.310 | 158 | 2.34 | S | 0.00378 | | | | | |
| 25Mn | 55 | 100 | Ex,E | 108 | 26.48 | R,S | 0.368 | 161 | 18.91 | R | 0.0922 | | | | | |
| 56 | 5.8 | Ex | 5.22×10^4 | 47Ag | 107 | 51.839 | R,s | 162 | 25.51 | R,s | 0.101 | | | | | |
| 56 | 91.72 | Ex,E | 8.25×10^5 | 109 | 48.161 | R,s | 0.252 | 163 | 24.90 | R,s | 0.0982 | | | | | |
| 57 | 2.2 | E,Ex | 1.98×10^4 | 48Cd | 108 | 1.25 | P | 164 | 1.61 | P,S | 0.00404 | | | | | |
| 58 | 0.28 | He,E,C | 2.62×10^3 | 110 | 11.72 | R | 0.163 | 166 | 33.6 | R,s | 0.0843 | | | | | |
| 26Co | 59 | 100 | E,C | 111 | 12.80 | R,S | 0.206 | 167 | 22.95 | R,R | 0.0576 | | | | | |
| 58 | | | | 112 | 24.13 | S,R | 0.388 | 168 | 26.8 | R,S | 0.0572 | | | | | |
| 28Ni | 58 | 66.27 | E,Ex | 113 | 12.22 | R,S | 0.197 | 169 | 100 | R,s | 0.0378 | | | | | |
| 60 | 26.10 | E | 1.29×10^4 | 114 | 0.89 | P | 0.0143 | 170 | 0.13 | P | 0.00322 | | | | | |
| 61 | 1.13 | E,Ex,C | 557 | 49In | 115 | 95.7 | R,S | 168 | 3.05 | P | 0.00756 | | | | | |
| 62 | 3.59 | E,Ex,O | 1770 | 115 | 12.49 | S | 0.201 | 171 | 14.3 | R,S | 0.0354 | | | | | |
| 64 | 0.91 | Ex | 449 | 116 | 7.49 | R | 0.121 | 172 | 21.9 | R,S | 0.0543 | | | | | |
| 29Cu | 63 | 69.17 | Ex,C | 118 | 24.217 | R,S | 0.293 | 173 | 16.12 | R,s | 0.0400 | | | | | |
| 66 | 30.33 | Ex | 161 | 119 | 8.587 | S,r | 0.328 | 174 | 31.8 | S,R | 0.0788 | | | | | |
| | | | | 120 | 32.586 | S,R | 1.245 | 176 | 12.7 | R | 0.0315 | | | | | |
| | | | | 122 | 4.682 | R | 0.177 | | | | | | | | | |
| | | | | 124 | 5.787 | R | 0.221 | | | | | | | | | |

核合成过程

U = 宇宙学核合成

H = 氢燃烧

N = 热(或爆炸)氢燃烧

He = 氦燃烧

C = 碳燃烧

O = 氧燃烧

Ne = 氖燃烧

Ex = 爆炸核合成

E = 核统计平衡

S = s过程

R = r过程

RA = r过程生成的放射核

P = p过程

X = 宇宙线散裂

45.5亿年前的值

Ca、V、Cr、Co、Ni、Y、Zr、Nb、Mo)平均得 $R=1.554\pm 0.020$, 与以前结果 [Meyer (1979), $R=1.57\pm 0.16$; Cameron (1982), $R=1.576$; AE(1982), $R=1.566\pm 0.023$]相近。

从表 4 的元素丰度, AG 算出 H、He 和重元素(Li—U)的质量百分率,

$$X(\text{H}) = 70.683(70.643) \pm 2.5\%$$

$$Y(\text{He}) = 27.431(27.416) \pm 6\%$$

$$Z(\text{Li—U}) = 1.886(1.941) \pm 8.5\%$$

括号内的值相应于太阳的 $\log N_{\text{Fe}} = 7.67$, 括号外的值相应于 C1 陨石的 $\log N_{\text{Fe}} = 7.51$.

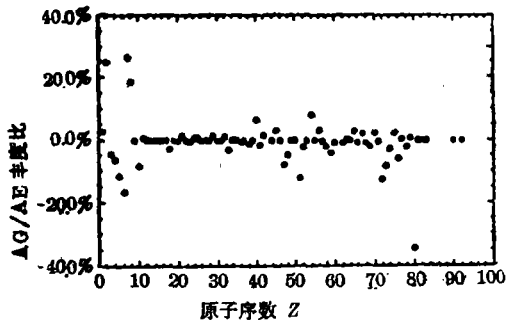


图 1 Anders & Grevesse (1989)与Anders & Ebihara (1982)的太阳系元素丰度对比

六、太阳系的核素丰度

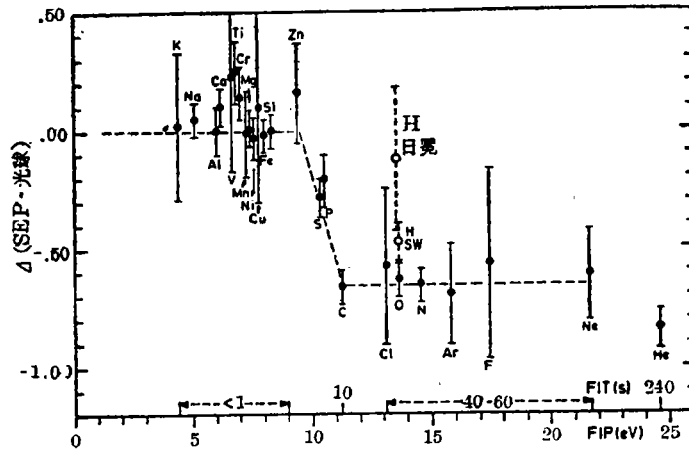
每种元素有特定的原子序数 Z , 包含 $(A-2Z)$ 种不同质量数 A 的同位素(核素)。AG 系统地综合和评价了近年的有关资料, 编制了太阳系的核素丰度新表(表 5), 其中放射核和放射成因核的丰度(斜体数字)是 45.5 亿年前的值, 对每种元素的各种核素分别给出百分率及数目(取 $N_{\text{si}} = 10^6$)丰度, 并给出其产生的核合成过程。

除了氢和惰性气体之外, 同位素(核素)丰度一般采用地球值, 而不是太阳值; 这是因为太阳光谱中的同位素谱线位移常常小于谱线宽度, 很难用光谱方法来准确测定太阳的同位素(核素)丰度, 较好的情况是由 CO 分子的红外振动-转动谱带测得 C 与 O 的同位素丰度比, 并确证跟地球值一致。国际纯化学与应用化学联合会(IUPAC, International Union for Pure and Applied Chemistry)推荐的同位素丰度仅代表实验室常见物质, 未必是最丰富的自然物质, 对于较轻元素(Li、B、C、O)和放射成因核的组分少的元素(Sr、Nd、Hf、Os)只有微少差别, 而对于地球上匮乏的元素(H、N、惰性气体)和放射成因核多的元素(Pb)则有很大差别。AG 对后一组(差别大的)核素丰度作了详细讨论和选取。对于氢, AG 考虑到太阳风的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 丰度比 $[(4.9 \pm 0.5) \times 10^{-4}]$ 与陨石中的“行星”He $[(1.42 \pm 0.2) \times 10^{-4}]$, 对他们的 He/H 丰度比, 重新算出原太阳的 D/H 丰度比为 $(3.4 \pm 1.0) \times 10^{-5}$, 这跟木星和土星的结果一致, 但大于星际介质结果 $(0.8 \leq \text{D}/\text{H} \leq 2 \times 10^{-5})$ 。对于氮, AG 采用地球大气的同位素丰度比(因为它在误差范围内符合太阳风探测结果)。对于铅, AG 采用 Orgueil 陨石的最准确分析结果。对于惰性气体, AG 主要采用太阳风的同位素丰度。

七、比较与讨论

1. 太阳光球与日冕的元素丰度比较

如前面所述(或见表 3), 日冕的某些元素丰度跟光球有系统差。图 2 绘出 SEP 与光球的元素(天文)丰度差与第一电离电位(FIP)的关系, 可以看出, 日冕中 FIP 高的元素比 FIP 低的元素匮乏, 在 FIP 从 9.5eV 到 11eV 丰度差变化约 0.65dex(数丰度变化约 4.5 倍), 呈原子-离子分离“双坪模式”。H 和 He 的情况又不同于其他元素, 太阳风(SW)的 H 丰度大

图 2 SEP 与光球丰度比跟 FIP 的关系^[6]

于 FIP 低坪，而日冕光谱得出的 H 丰度更大；太阳风和 SEP 的 He 丰度小于 FIP 低坪约 0.2dex。在银河宇宙线中也有类似的元素丰度差与 FIP 的关系。众所周知，太阳大气从光球层向外经色球层到日冕是物质密度递减、而温度递升的。对上述原子-离子分离“双坪模式”的发生机制和地方，已有探讨，一般认为发生在较低温(10⁴K)、由中性和一次电离原子组成的色球物质中，中性原子扩散进入日冕，而磁场阻止离子扩散，于是导致日冕与光球元素丰度的系统差。

2. 陨石与太阳的元素丰度比较

如前所述，陨石的元素丰度主要是 C1 陨石的平均，少数资料取自其他陨石；太阳的元素丰度主要是光球光谱分析结果，少数资料由日冕(太阳风，SEP)及其他天文资料导出。图 3(a)和 (b) 分别按元素的宇宙化学特性分组和按原子序数 Z 绘出太阳(光球)/陨石的元素丰度比，(a)图中空心符号代表太阳丰度测定精度低的元素。总的说来，C1 陨石与太阳光球的元素丰度基本一致，除了很不确定丰度的元素 Ag、Tb、Ho、Lu、Tl 及不谐和的 In、W 等之外，其余元素的太阳-陨石丰度的平均差为 $-0.005 \pm 0.10\text{dex}$ ；若仅限于丰度精度好于 0.10dex(25%)的 32 种元素，则平均差为 $-0.006 \pm 0.04\text{dex}$ ；若限于 29 种丰度准确的元素(谱线多、跃迁概率值准确)，则在 $\pm 0.036\text{dex}$ (9%)程度上太阳光球与 C1 陨石的元素丰度是一致的。在后两种平均中，去掉了丰度值准确、但不谐和的 4 种元素(Mn、Fe、Ge、Pb)。

在丰度差大于 0.10 到 0.15dex 的元素中，Li 和 Be 是由于太阳对流层底部的核反应而匮乏，另 20 种元素(B、F、P、Cl、Ga、Rb、Ag、In、Sn、Sb、Ce、Tb、Ho、Tm、Yb、Lu、Hf、Pt、Au、Tl)或其可用谱线少且混合、或缺乏准确的跃迁概率值、或兼有两种原因，其光球丰度测定结果不准确。但是，有 5 种元素(Ge、Pb、W、Fe、Mn)的丰度差显然不属观测误差，而是真实的。在球粒陨石中，挥发性和宇宙化学性质相似的元素通常是一起按相似因子分馏，因此，若这 5 种元素被已知的宇宙化学过程分馏，则跟它们同一宇宙化学组的其他元素也应按相似因子分馏。所以，有待研究 C1 陨石中仅影响这 5 种元素又不影响其他元素的选择分馏过程。去掉这 5 种元素和丰度精度低的元素，各宇宙化学组的光球/陨石

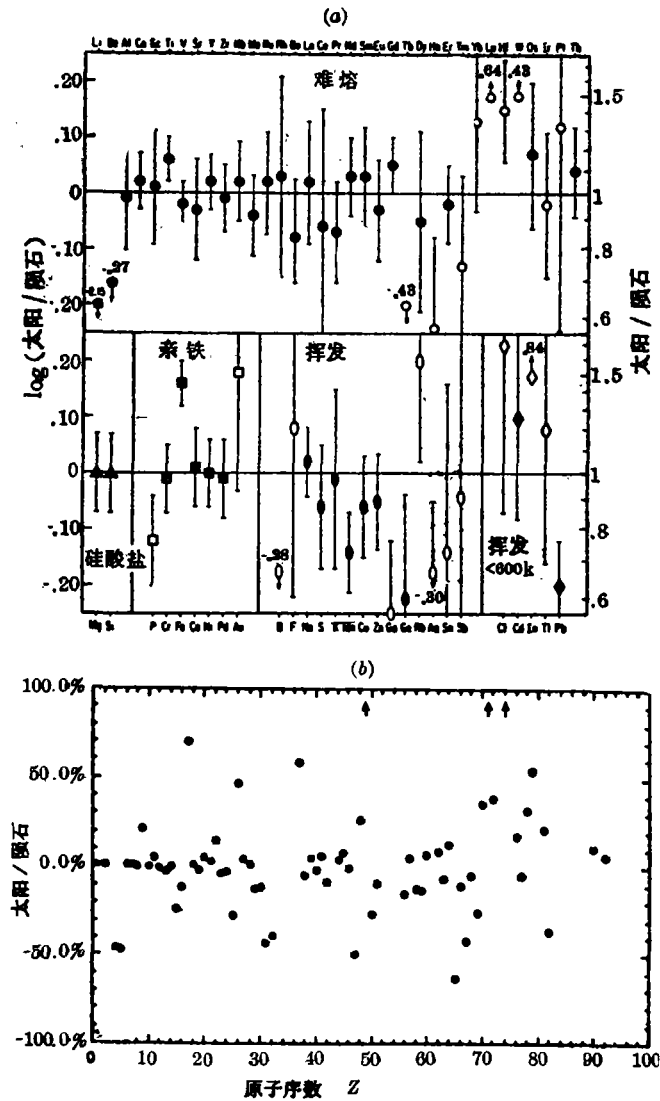


图 3 太阳光球与CI陨石的比较^[6]
 (a)按元素的宇宙化学性质分组 (b)按原子序数

平均丰度比列于表 6。显然，除了 <600K 的挥发元素之外，光球与陨石的元素丰度差别小于 1σ 。

3. 丰度曲线的平滑性

Suess (1947)首先提出，核素丰度是质量数 A (尤其奇数 A) 的平滑函数，为使丰度曲线连续平滑，他曾调整元素丰度(如，Re 丰度调整上百倍)，并被后来测定值证实是成功的。现在 CI 陨石的大多数元素丰度的精度好于 10%，可以更准确地检验丰度曲线的平滑性了。图 4(a)和(b)分别绘出质量数 $A = 67-139$ 和 $135-209$ 的核素丰度分布，可见有一定的平滑趋势，但在高精度下平滑性失效，这是因为太阳系的核素实际上是来自前太阳系的多种核合成过程的混合，而每种核合成的参数也不是 A 的简单平滑函数。

表 6 光球/陨石丰度比

| 元 素 | N | log(光球/陨石) | |
|---------------|----|--------------------|-------------------|
| | | AE(1982) | AG(1989) |
| 难熔元素 | 23 | -0.029 ± 0.15 | 0.002 ± 0.04 |
| 硅酸盐 | 2 | -0.007 ± 0.013 | 0.000 ± 0.00 |
| 亲铁元素 | 4 | -0.054 ± 0.081 | -0.003 ± 0.01 |
| 挥发, 1300—600K | 5 | -0.099 ± 0.015 | -0.022 ± 0.04 |
| 挥发, <600K | 3 | 0.059 ± 0.10 | (0.13 ± 0.08) |

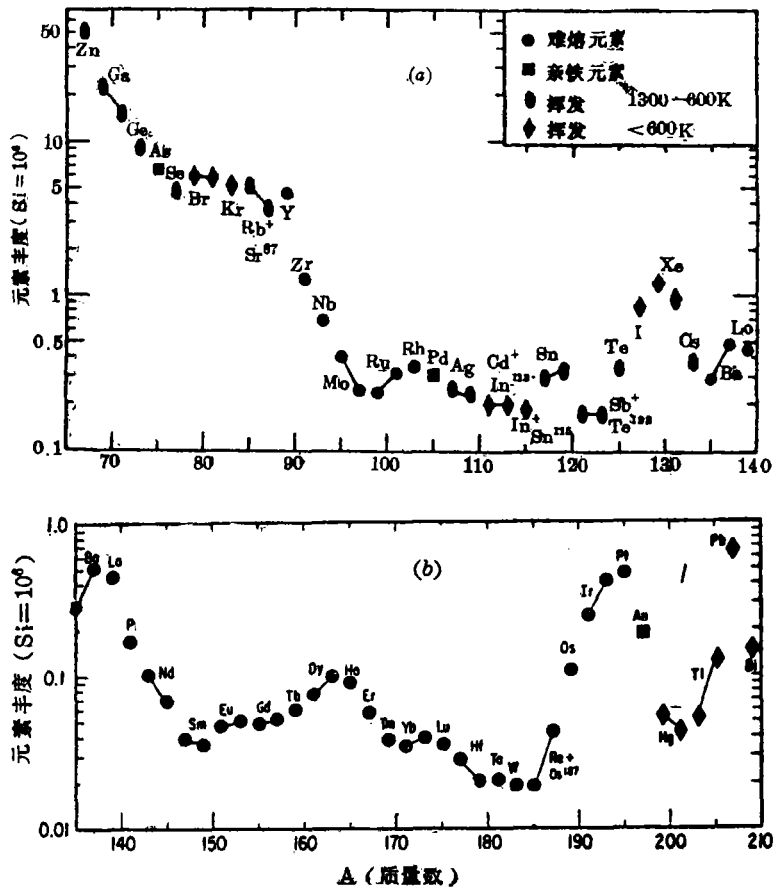


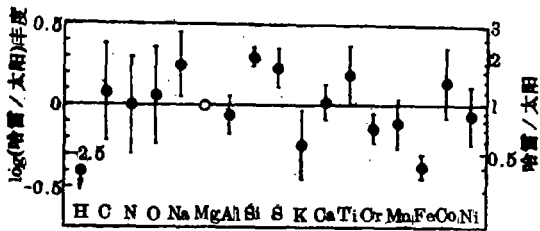
图 4 元素丰度与A(质量数)的关系^[6]
 (a) $A=67-139$ Zn—La (b) $A=135-209$ Ba—Bi

4. 哈雷彗星与太阳的元素丰度比较

彗星富含挥发物质，一般认为它们是比 C1 陨石更好地代表太阳系原始物质。但是，直到 1986 年飞船首次穿越哈雷彗星的彗发，用质谱法探测了尘埃成分，再加上光谱法得到的气体成分，才得出了其元素丰度(表 7)^[8-10]。归化到 Mg 的元素相对丰度后，跟太阳(光球)元素丰度的比较示于图 5。除了氢显著匮乏之外，哈雷彗星的 16 种元素丰度与太阳(光球)符合得很好。差别较大的是 Si(+0.30dex)、Fe(-0.37dex)、S(+0.23dex)；相对于 C1 陨

表 7 哈雷彗星的元素丰度^[6]

| 元素 | 哈雷彗星 | | | 太阳 | 太阳系 | 哈彗-太阳 |
|----|--------------|----------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | Geiss (1987) | Delsemme(1988) | Jessberger等 (1988) | | | |
| H | 9.41 | 9.21 | 9.47±0.08 | 12.00 | 12.00 | -2.53 |
| C | 8.90 | 8.66 | 8.64±0.08 | 8.56 | 8.56 | 0.08 |
| N | 7.59±0.4 | 7.88 | 8.05±0.12 | 8.05 | 8.05 | 0.00 |
| O | 9.17 | 9.00 | 8.99±0.05 | 8.93 | 8.93 | 0.06 |
| Na | | 6.58 | 6.58±0.20 | 6.33 | 6.31 | 0.25 |
| Mg | | =7.58 | =7.58 | 7.58 | 7.58 | =0.00 |
| Al | | | 6.41±0.10 | 6.47 | 6.48 | -0.06 |
| Si | =7.79 | 7.73 | 7.85±0.04 | 7.55 | 7.55 | 0.30 |
| S | | 7.53 | 7.44±0.12 | 7.21 | 7.27 | 0.23 |
| K | | | 4.88±0.18 | 5.12 | 5.13 | -0.24 |
| Ca | | | 6.38±0.11 | 6.36 | 6.34 | 0.02 |
| Ti | | | 5.18±0.18 | 4.99 | 4.93 | 0.19 |
| Cr | | | 5.53±0.09 | 5.67 | 5.68 | -0.14 |
| Mn | | | 5.28±0.15 | 5.39 | 5.53 | -0.11 |
| Fe | | 7.58 | 7.30±0.07 | 7.67 | 7.51 | -0.37 |
| Co | | | 5.06±0.22 | 4.92 | 4.91 | 0.14 |
| Ni | | | 6.19±0.18 | 6.25 | 6.25 | -0.06 |

图 5 哈雷彗星与太阳光球元素丰度对比
(归化到Mg丰度)^[6]

相对于Mg的丰度而言,哈雷彗星的元素C、O、N(“冰”成分)跟太阳光球(“宇宙”)丰度一致;(2)哈雷彗星的Fe/Mg和Mg/Si丰度比是太阳系天体中最小的,它不会是初始的恒星际物质,至少其尘埃成分受到太阳系别处使元素分馏过程的影响。

石的元素丰度而言, Si和Fe的丰度差别小些,但仍大于误差,而且差别是反向的,不能由归化(从Mg改为Si)方法消除。

在太阳系中,随远离太阳,Fe/Mg和Mg/Si丰度比显示减少趋势(太阳>陨石>哈雷彗星。从现有资料,大致得出以下结论:(1)

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远, 天体化学, 科学出版社(1988)。
 [2] Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A. and Hoyle, F., *Rev. Mod. Phys.*, 29 (1957), 547.
 [3] Mathews, G. J., (ed.), *Origin and Distribution of the Elements*, world Scientific, (1988).
 [4] Cameron, A. G. W., *Space Sci. Rev.*, 15 (1973), 121.
 —, in *Essays in Nuclear Astrophysics*, ed. by L. H. Ahrens, p. 23, Cambridge Univ. Press, (1982).
 [5] Anders, E. and Ebihara, M., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46 (1982), 2363.
 [6] Anders, E. and Grevesse, N., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53 (1989), 197.
 [7] Grevesse, N., in *Frontiers of Astronomy and Astrophysics*, ed. by R. Pallavicini, p. 71. Ital. Astron. Soc., Florence (1984).
 [8] Geiss, J., *Astron. Astrophys.*, 187 (1987), 859.
 [9] Delsemme, A. H., *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A325 (1988), 509.
 [10] Jessberger, E. K. et al., *Nature*, 332 (1988), 691.

(责任编辑 刘金铭)

Solar System Abundances of the Elements

Hu Zhongwei

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

Solar system abundances of the elements and their isotopes (nuclides), so called the cosmic abundances of the elements, are important data for inquiring into the origin of the elements and evolution of the celestial bodies. In this paper, recent results on element abundances of solar photosphere, solar corona, solar wind and C1 carbonaceous chondrites etc. are reviewed, new tables on solar system abundances of the elements and their isotopes (nuclides) are listed, finally, some comparisons and discussions are made.