第11卷 第4期 空间科学学报 Vol. 11, No. 4
1991 年 10 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1991

太阳高能粒子的电荷态和粒子强度间的相关性

黄 永 年
(中国科学院空间科学与应用研究中心，北京)

摘 要

本文发表了在太阳高能粒子事件中，元素氦、碳、氮、氧、氖、镁、硅、硫和铁的离子电荷态的分布．研究结果表明，除氦之外上述元素的电荷态分布的不同离子价的数目是随元素的质量而增大．核子能量在 2—3 MeV 范围内，这些元素的平均粒子强度相对于碳的平均粒子强度之间的相关性能够用离子价的数目随元素质量的增加来解释，而不能用日冕温度确定的电荷态平衡模型来解释．且得出结论，太阳高能粒子的离子电荷是在太阳耀斑区而不是在星际激波区产生．

关键词 太阳高能粒子，电荷态，粒子强度，相关性

一、引 言

在太阳粒子事件中，元素的电荷态和丰度是确认太阳耀斑粒子所经受的物理机制，发生在太阳上还是在行星际空间，或者同时在这两个区域的一个有力工具．文献[1]—[5]报道过太阳高能粒子的离子电荷态的观测结果，但至今未见报道电荷态的分布及每种元素的离子价的种类．太阳高能粒子的元素的相对丰度也已有一些作者研究过[6-10]，但这些元素的粒子强度之间的相关性的这一问题没有人讨论过，我们根据最新观测资料，对上述问题进行了研究，并从理论上予以阐述．

二、平均粒子强度之间的相关性的观测结果

图 1 表明的是在核子能量为 2—3 MeV 范围内，元素 He、N、O、Ne、Mg、Si、S 和 F 的平均粒子强度相对于 C 的平均粒子强度的相关性，这是 Cane 等人[11]由 ISEE-3 资料中发现的最新结果．图中给出的相关系数表明，与 C 最相似的是 N，其次是 O；其它元素除 He 外相关性随元素的质量而减少．

表 1

Element	C	N	O	Ne	Mg	Si	S	Fe
Q	5.70	6.37	7.00	9.05	10.7	11.0	10.9	14.9
A	12.011	14.0067	15.9994	20.1179	24.305	28.0855	32.06	55.847
Q/A	0.4745	0.4547	0.4375	0.4498	0.4402	0.3916	0.3399	0.2668

本文于 1990 年 11 月 21 日收到．

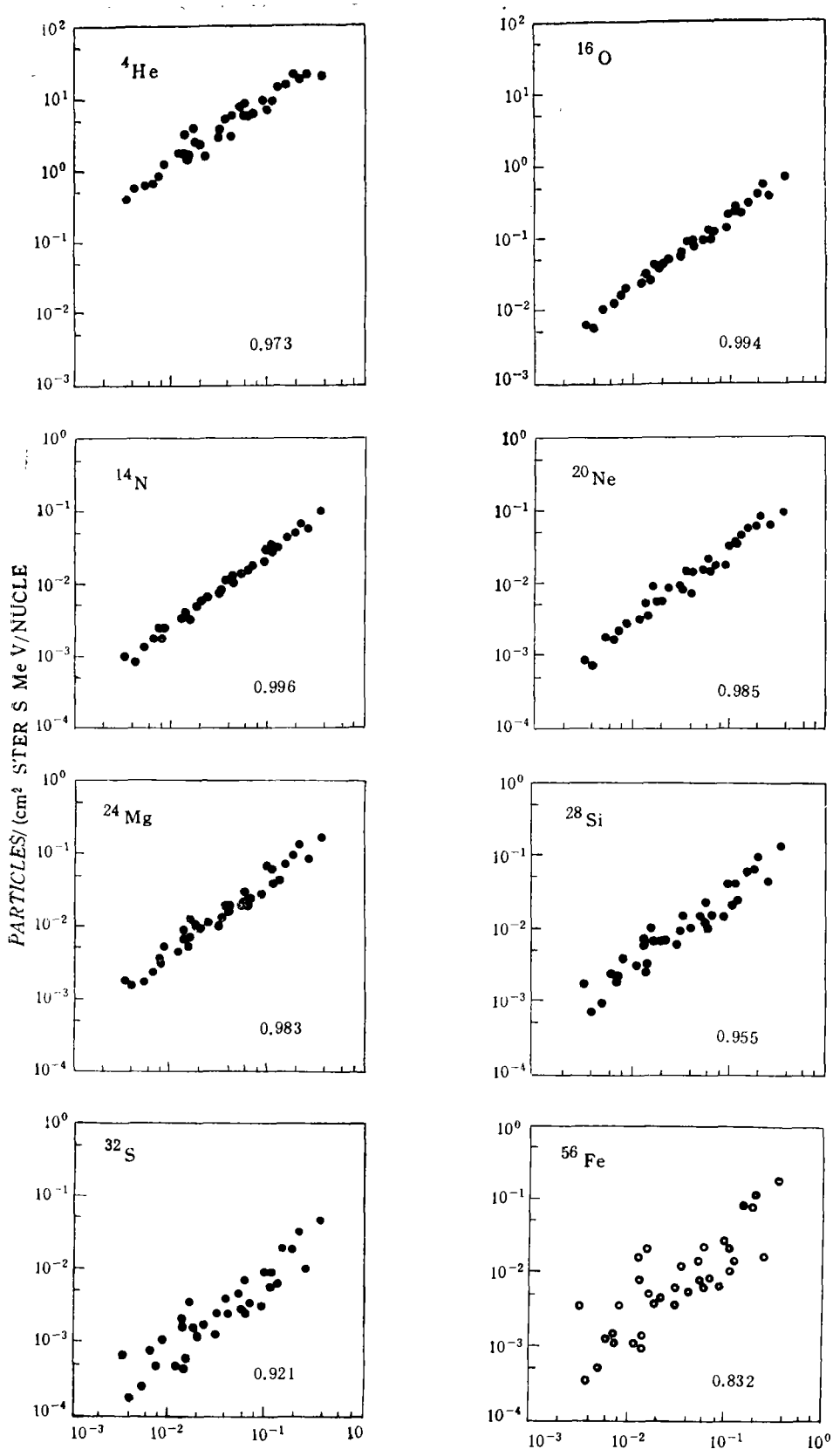
PARTICLES/(cm² STER S Me V/NUCLE
^{4}He
0.973
^{16}O
0.994
^{14}N
0.996
^{20}Ne
0.985
^{24}Mg
0.983
^{28}Si
0.955
^{32}S
0.921
^{56}Fe
0.832

图 1

Fig. 1

Luhn 等人[4]给出了太阳高能粒子事件中粒子的平均电荷态. 表 1 给出了太阳高能粒子事件中粒子的有效电荷 Q 与元素质量 A 的比值，电荷取自 Luhn 等人的观测结果.

由表 1 可见，如果上述元素间的相关与 Q/A 有关，那么 C 最相似的是 N，接着依次为 Ne、Mg 和 O. 而由图 1 的测量资料表出的不是这样，这也就是要从理论上阐明的一个重要问题.

三、太阳耀斑粒子的电荷态的形成

1. 由电子碰撞引起的电离截面

由电子碰撞引起原子电离的截面下列公式表示[12]

$$\begin{aligned} Q &= n\pi a_0^2 \frac{1}{\chi_\epsilon} F(y,\epsilon/\chi) \\ &= \frac{n\pi a_0^2}{\chi^2} q \\ &= 1.63 \times 10^{-14} n(1/\chi_{ev}^2)(\chi/\epsilon)F(y,\epsilon/\chi). \end{aligned} \tag{1}$$

式中 πa_0^2 = 原子单位截面 $= 8.797 \times 10^{-17}\mathrm{cm}^2$，$\chi$ = 以 ryd 单位的电离能量 (1ryd = 27.203eV)，ϵ 是以 ryd 为单位的碰撞前的电子能量，n 为电子数密度. y 是被电离的原子所带的电荷，χ_{ev} 是用 eV 作单位的电离能量. 函数 $F(y,\epsilon/\chi)$ 在表 2 中给出，$q = (\chi/\epsilon)F(y,\epsilon/\chi)$，有时称为约化截面.

表 2　$F(y,\epsilon/\chi)$ 和 $q(y,\epsilon/\chi)$

ϵ/χ	1.0	1.2	1.5	2.0	3	5	10
F(经典) $= 4(1-\chi/\epsilon)$	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.20	3.60
$F(1,\epsilon/\chi)$	0.00	0.31	0.78	1.60	2.9	4.6	6.4
$F(2,\epsilon/\chi)$	0.00	0.53	1.17	2.02	3.3	4.7	6.4
$F(\infty,\epsilon/\chi)$	0.00	0.74	1.54	2.56	3.8	5.0	6.4
q(经典) $= 4(\chi/\epsilon)(1-\chi/\epsilon)$	0.00	0.56	0.89	1.00	0.89	0.64	0.36
$q(1,\epsilon/\chi)$	0.00	0.26	0.52	0.80	0.97	0.92	0.64
$q(2,\epsilon/\chi)$	0.00	0.44	0.78	1.01	1.09	0.94	0.64
$q(\infty,\epsilon/\chi)$	0.00	0.62	1.03	1.28	1.28	1.00	0.64

将方程(1)应用到太阳耀斑中得出，在太阳耀斑高能粒子加速过程中，背景等离子体的电子密度越大，粒子产生电离的截面就越大.

2. 太阳耀斑粒子的电荷态的产生区域

根据方程(1)，粒子的电离截面与加速区中背景等离子体的电子密度成正比. 在太阳耀斑事件中，太阳高能粒子的加速区域既可能在耀斑区，也可能在行星际激波区，或者两个区域内都有加速. 因此，太阳耀斑粒子的电荷态形成可在这两个区域内. 下面将讨论在这些区域内太阳耀斑粒子电荷态的产生问题.

太阳耀斑的观测证明，太阳耀斑活动区最可能是在低日冕，也可能出现在几万公里高度[14]. 在这样的高度区域内，背景等离子体的电子密度为 10^8—$10^{11}\mathrm{cm}^{-3}$.

在行星际激波区的电子密度跟离太阳的径向距离有关. 根据观测[15,16]，在地球轨道附近激波区的电子密度小于 $10\mathrm{cm}^{-3}$，在近太阳的电子密度应大于 $10^2\mathrm{cm}^{-3}$，比 $10^8\mathrm{cm}^{-3}$

小得多.

设耀斑区的背景电子能量和激波区的电子的能量相同，那么太阳耀斑粒子在激波区的电荷态的产生几率可以忽略,因为在激波区的电子密度跟耀斑区相比是非常小的.

为计算核子能量在 2—3 MeV 的粒子在激波区的逗留时间，需要确定磁场强度为 B 的粒子的回旋半径. 根据现有观测资料，在激波区的磁场约为 5×10^{-6}Gs 量级. 若粒子能量用 K 表示,磁场单位为 Gs，m 为粒子质量，q 为粒子的电荷,则粒子在激波区的回旋半径可以写成:

$$r = 1.02(T/11605)^{1/2}\frac{m}{|q|}\cdot B^{-1}(\mathrm{m}). \qquad (2)$$

利用方程(2)，且 $1\mathrm{eV} = 11605K$，即可得到离子在激波区的回旋半径,表 3 给出了粒子在激波区的回旋半径. 激波区的厚度约 10^5km，将激波区厚度同表 3 中回旋半径相比,可见粒子的回旋半径大于激波区厚度. 因此,太阳耀斑粒子在激波区的行进时间是很短的,粒子不能通过与激波区的电子碰撞而产生电荷.

表 3 在磁场 5×10^{-6}Gs 和粒子能量为 2 及 3MeV/核子的离子回旋半径

回旋半径(km) 离子 / 能量(MeV)	C^{+6}_{12}	N^{+6}_{14}	O^{+7}_{16}	Ne^{+9}_{20}	Mg^{+11}_{24}	Fe^{+15}_{56}
2	5.77×10^5	6.72×10^5	6.6×10^5	6.4×10^5	6.3×10^5	1.08×10^5
3	7.08×10^5	8.22×10^5	8.10×10^5	7.86×10^5	7.68×10^5	1.32×10^5

综上所述，可得到如下结论：太阳高能粒子的电荷态形成几率在耀斑区比在激波区大得多. 所以测量到的太阳粒子的电荷态最可能是在太阳上产生而不是在激波区产生，这与 Luhn 等人[4,5]的结果是相符的.

3. 太阳高能粒子的离子电荷态的分布

太阳高能粒子的离子电荷态分布为研究粒子在源区域的加速特性和行星际传播过程提供了重要信息.

每一种太阳能量粒子的离子的电荷态分布,可以通过 Luhn 等人[4]给出的 12 个粒子事件的每一种元素的平均电荷态的分析来导出. 我们发现前面所说的几个元素的可能电离电荷为

1) C $\begin{cases}C^{+5} & \text{少量},\\ C^{+6} & \text{大量};\end{cases}$

2) N $\begin{cases}N^{+6} & \text{一半少些},\\ N^{+7} & \text{一半多些};\end{cases}$

3) O $\begin{cases}O^{+6} & \text{很少量的},\\ O^{+7} & \text{主要的},\\ O^{+8} & \text{很少量的};\end{cases}$

4) Ne $\begin{cases}Ne^{+8} & \text{很少量},\\ Ne^{+9} & \text{大部分},\\ Ne^{+10} & \text{小部分};\end{cases}$

5) Mg $\begin{cases}Mg^{+9} & \text{很少量},\\ Mg^{+10} & \text{有一些}\\ Mg^{+11} & \text{主要部分},\\ Mg^{+12} & \text{很少量};\end{cases}$

6) Si $\begin{cases}Si^{+9} & \text{非常少量},\\ Si^{+10} & \text{很少量},\\ Si^{+11} & \text{主要部分},\\ Si^{+12} & \text{有一些},\\ Si^{+13} & \text{很少};\end{cases}$

7) S $\begin{cases} S^{+8} & \text{极少量,} \\ S^{+9} & \text{少量,} \\ S^{+10} & \text{有一些,} \\ S^{+11} & \text{主要部分,} \\ S^{+12} & \text{很少量,} \\ S^{+13} & \text{极少量;} \end{cases}$　　8) Fe $\begin{cases} Fe^{+12} & \text{极少量,} \\ Fe^{+13} & \text{少量,} \\ Fe^{+14} & \text{少量,} \\ Fe^{+15} & \text{主要部分,} \\ Fe^{+16} & \text{有一些,} \\ Fe^{+17} & \text{少量,} \\ Fe^{+18} & \text{极少量.} \end{cases}$

根据以上 8 种元素的电荷态分布，得到：

(1) 每个元素的离子电离的种数随该元素的原子量的增大而增大；

(2) 每个元素的离子电荷都有一个较强的电离电荷，而其它电离电荷的强度比它弱.

为研究Cane给出的关于丰度和分散度的最新观测结果*，下面将讨论He的离子电荷.

对大的太阳高能粒子事件，He^+/He^{++} 约为 0.07[5]，由此得出的离子电荷为

$$He \begin{cases} He^+ & 7 & \text{少量,} \\ He^{++} & 100 & \text{主要部分.} \end{cases}$$

Cane 等人给出的 He^+/He^{++} 值为 0.3，在这种情况下，He 的离子电荷态分布为

$$He \begin{cases} He^+ & 3 & \text{一些,} \\ He^{++} & 10 & \text{主要部分.} \end{cases}$$

Gloeckler 等人发现[3]，在所有太阳粒子事件中，都存在一价氦离子，He^+/He^{++} 值为 0.01—0.25. 据此可知，在太阳高能粒子事件中，氦的电荷态分布为：

$$\text{从 } He \begin{cases} He^+ & 1 \\ He^{++} & 10 \end{cases} \text{ 到 } He \begin{cases} He^+ & 25, \\ He^{++} & 100. \end{cases}$$

Hovestadt 等人[17]也发现，He^+/He^{++} 比值在 He^+ 丰富的高能粒子事件中大于 0.3；可以在 0.1—10.0 范围内变化. 根据这些观测结果，得到氦的电离态分布为

$$\text{从 } He \begin{cases} He^+ & 1 \\ He^{++} & 10 \end{cases} \text{ 到 } He \begin{cases} He^+ & 10, \\ He^{++} & 1. \end{cases}$$

由这些 He^+/He^{++} 比值可见，在不同的太阳粒子事件中或者在同一事件的不同时期，氦元素的离子电荷态分布有很大的变化.

四、太阳耀斑粒子的相关性和分散度的解释

1. 源物质

(1) 由日冕温度表示的电离电荷

在太阳日冕温度下电荷态的详细计算应考虑碰撞电离，碰撞激发，辐射复合，直接辐射复合和电介复合等过程. Jordan[18] 曾做过这种计算，下面给出三个与日冕温度 $(1—2)\times 10^6$K 相同的F电荷态分布数：

(i) 10^6K	(ii) 1.5×10^6K	(iii) 2×10^6K
Fe^{+11} ~0.08	Fe^{+13} ~0.08	Fe^{+16} ~0.5

* Cane, H. V. et al., Sumitted to Ap. J., 1990.

Fe^{+10}	~0.33	Fe^{+12}	~0.35	Fe^{+15}	~0.23
Fe^{+9}	~0.6	Fe^{+11}	~0.47	Fe^{+14}	~0.1
Fe^{+8}	~0.47	Fe^{+10}	~0.45	Fe^{+13}	~0.23
Fe^{+7}	~0.08	Fe^{+9}	~0.1	Fe^{+12}	0.23
		Fe^{+8}	~0.05	Fe^{+11}	~0.06

由上面计算结果表明，要和测量到的粒子电荷态一致，取温度 2×10^6K 的铁离子值比较接近探测结果，其它二个温度的离子价数太低．根据测量结果[4]，铁元素最可能的离子是 Fe^{+15}，且存在少量 Fe^{+17} 和 Fe^{+18}（见第 3 节第 3 点）．文献[18]的计算，Fe^{+15} 丰度的值总是小于 Fe^{+16} 的值．所以，日冕温度确定的粒子电荷态和太阳耀斑粒子的电荷态看来是不一致的．

(2) 太阳高能粒子的源物质

在一切能量的太阳粒子事件中，都存在大量的 He^+ 离子，它表明源物质来自低温区 ($T < 10^5$K)，且从活动区到进入行星际的行进时间一定很短，否则在高温情况下，He^+ 将全部电离为 He^{++}，或通过多次碰撞 He^+ 也被电离成 He^+，因此不可能测量到 He^+ 的存在．

对同一个能量范围内相同元素来说，低电离态的粒子有高的截止刚度，所以仪器对低电荷态的测量效率比较低．因此，我们不能用测量到的太阳高能粒子的电荷态，完全确定源在太阳上的位置．因为除了测量到的粒子电荷态外，还存在一些仪器没有测量到的低电荷态．源物质的位置是比测量到的电荷态，表明的温度区域要低．

另一个极为重要的观测事实，就是在太阳高能粒子事件中，第一电离势 $I \lesssim 8$eV 的一些重元素，例如 Mg, Si, Fe 等有过量的丰度．这也说明，太阳耀斑粒子的"种子源"来自于太阳上的低温度区域，否则不可能有这样的测量结果．

2. 太阳耀斑粒子的分散性

上面已谈到，太阳高能粒子的源成分不是日冕物质而是高色球层物质．在加速区，太阳耀斑粒子与背景电子碰撞而产生电离，所以不只一种电荷态，而是有一个宽的电荷态分布．另一方面，原子的外轨道电子的不稳定性随原子量而增大，因此正如第 3 节中表明的那样，离子电荷态的分布也随原子量而加宽．

在第 3 节 3. 中的粒子的电荷态分布是由测量的 12 个事件中的平均电荷分布导出来的．为了要对图 1 中表示的粒子强度的分散性进行解释，我们把第 3 节 3. 中给出的每一种元素的电荷态分布中的各种离子看作是存在于相同的事件或不同的事件或者在事件的不同时期．

因为太阳高能粒子的电荷态分布是随粒子的质量而不是比值 Q/A 而加宽，这就解释了在图 1 中给出的相关系数除 He 外是随元素的质量的增大而减小，但不是随 Q/A 的增大而减小．

3. He 的行为

前面已给出 $He^+/He^{++} = 0.1$—0.25，这时 He^{++} 是主要电荷态，也可以 $He^+/He^{++} = 0.1$—10.0．此时，He 的主要电离态从 He^{++} 变到 He^+．也就是说，在太阳高能粒子中，He 虽然只能有二个电离态 He^+ 和 He^{++}，但在同一太阳粒子事件或在不同事

件中，He 元素的主要电荷态不是固定的，而是在 He^{+} 和 He^{++} 之间能够改变的。这种不确定性，解释了图 1 中 ^{4}He 的相关系数为何比 N，O，Ne 和 Mg 要小。

本文是在澳大利亚塔斯马尼亚大学物理系合作访问期间完成的。H. V. Cane 博士提供了太阳耀斑粒子强度相关性的最新资料，并对全文作了详细审阅和进行多次有效的讨论。K. B. Fenton 教授也对本文进行过仔细审阅并给予很多宝贵意见，在此深表感谢。

参　考　文　献

[1] Hovestadt, D. et al., *Astrophys. J. Lett.*, Vol. **246**, L. 81, 1981.
[2] Hovestadt, D. et al., *Adv. Space Res.*, Vol. **1**, p. 61, 1981.
[3] Gloeckler, G. et al., *Proc. 17th ICRC*, Vol. **3**, p. 136, 1981.
[4] Luhn, A. et al., *Proc. 19th ICRC*, Vol. **4**, p. 241, 1985.
[5] Hovestadt, D. et al., *Astrophys. J.*, Vol. **282**, L. 39, 1984.
[6] Meyer, J. P., *Astrophys. J. Suppl.*, Vol. **57**, p. 151, 1985.
[7] Meyer, J. P., *Astrophys. J. Suppl.*, Vol. **57**, p. 173, 1985.
[8] Breneman, H. H. et al., *Astrophys. J. Lett.*, Vol. **299**, L. 57, 1985.
[9] McGuire, R. E. et al., *Astrophys. J.*, Vol. **301**, p. 938, 1986.
[10] Mason, G. M., *Rev. Geography*, Vol. **25**, p. 685, 1987.
[11] Cane, H. V. et al., *Proc. 21st ICRC*, Vol. **5**, p. 37, 1990.
[12] Allen, C. W., Astrophysical Quantities, Athlone Press, p. 41, 1973.
[13] Huang, Y. N. et al., *Proc. 21st ICRC*, Vol. **5**, p. 100, 1990.
[14] 黄永年，空间科学学报，第 **7** 卷，第 198 页，1987.
[15] Goling, J. T. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **81**, p. 2111, 1976.
[16] Hundhausen, A. J., Coronal Expansion and Solar Wind, Springer-Verlag, 1972.
[17] Hovestadt, D. et al., *Astrophys. J.*, Vol. 281, p. 461, 1984.
[18] Jordan, C., *Monthly Notices of the Koyal Astronomical Society*, Vol. **142**, p. 501, 1969.

CHARGE STATES OF SOLAR ENERGETIC PARTICLES AND CORRELATIONS BETWEEN PARTICLE INTENSITIES

Huang Yong-nian

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

A possible ionic charge state distributions of He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S and Fe in solar energetic particle events is presented in this paper. The number of different ionic orders in the distributions of elements increases with the elemental mass except for He. The correlations between the mean particle intensities for the elements as a function of mean intensities of C in the energy range 2—3 MeV per nucleon can be explainel in terms of the increase of ionic-order number with mass for the elements. The ionic charge states cannot be explained in a model in which the coronal temperature determines a charge equilibrium. It is concluded that ionic charges of solar energtic particles can be produced in a solar flaring region rather than in an interplanetary shock region.

Key words　Solar energetic particle, Ionic order, Particle intensity, Relationship