第9卷 第1期 空间科学学报 Vol. 9, No. 1
1989 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1989

太阳宇宙线的有效电荷及计算*

陈贵福 黄永年
(中国科学院空间科学与应用研究中心，北京)

摘 要

本文讨论了太阳宇宙线成份的高电离态的产生，提出了计算平均有效电荷的公式，结果与观测资料对比能很好地符合.

一、引 言

空间探测表明，太阳宇宙线能量粒子事件中，元素的第一电离电势 $I \leqslant 8\text{eV}$ 的重粒子具有过量的相对丰度；同时还观测到大量低氦电离态 He^+ 的存在，He^+ 与 He^{++} 的比值约为 0.1[1]. 这些结果表明，形成太阳宇宙线的源物质具有较低的温度，在初始加速时，也许基本上是一阶电离态. 最近，文献[2]根据重粒子丰度过量的资料及其定量计算，得到太阳能量粒子源物质的温度 $T = (5.77 \pm 0.91) \times 10^4\text{K}$. 这一温度正好适合于第一电离势 $I \leqslant 8\text{eV}$ 的重粒子电离成一价离子. 由这个温度确定了太阳能量粒子源物质的确切位置是高色球层.

而空间探测也表明，太阳能量粒子是高价离子，由此提出太阳宇宙线是如何从低电离态的源物质变成探测到的高价离子的宇宙线的问题. 这是太阳宇宙线形成的基本问题之一. 本文就此问题进行了研究. 基本思想是，粒子加速时，随着粒子能量或速度变大，粒子的有效电荷增加的结果. 关于粒子的有效电荷随粒子能量的增加而变大问题，目前还没有人做过定量的讨论. 本文讨论了这一问题，并给出了与探测结果符合得很好的计算公式.

二、有效电荷及计算

下面将讨论源物质的带电粒子，在某加速机制的作用下，能量增加的过程中，粒子的有效电荷与其能量的关系.

设 I_i 是某种元素的第 i 电离电势，M 为该元素的原子质量，v_{ei} 为电子相对于原子的速度，m_e 为电子质量. 当这样一束运动电子与原子相碰撞时，v_{ei} 满足关系式

本文于 1988 年 1 月 7 日收到.
* 国家自然科学基金资助项目.

$$\frac{1}{2} m_e v_{ei}^2 \geqslant I_i, \tag{1}$$

则该元素的原子就可以被电离成 i 价离子. 反之，当速度为 v_i 的原子通过电子背景时，如果忽略电子的运动，则原子相对于电子的速度 v_{ie} 为

$$v_{ie} = v_i. \tag{2}$$

若相对速度 v_{ie} 满足

$$v_{ie} = v_{ei}, \tag{3}$$

则这一原子同样可以被电离成为 i 价离子. 于是，由(1)、(3)两式可知，i 价离子应具有的相对于电子的最小动能 E_{ie} 为

$$E_{ie} = \frac{1}{2} M v_{ie}^2 = \frac{M}{m_e} I_i. \tag{4}$$

忽略电子的热运动时，由(2)式可知，E_{ie} 也就等于 i 价离子应具有的最小动能 E_i:

$$E_i = E_{ie} = \frac{M}{m_e} I_i. \tag{5}$$

事实上，在耀斑活动区内，背景电子的热运动是不能忽略的. 计入电子的热运动时，i 价离子应具有的最小动能实际上要比由(4)、(5)两式所确定的值小些.

考虑耀斑等离子体中电子的热运动. 设电子速度为 $\boldsymbol{v}_e$，离子的速度为 $\boldsymbol{v}_i$，而离子相对于电子的速度为 $\boldsymbol{v}_{ie}$. 考虑离子与电子碰撞的相对速度，即有

$$\boldsymbol{v}_{ie} = \boldsymbol{v}_i - \boldsymbol{v}_e. \tag{6}$$

上式两边取平方后得

$$v_{ie}^2 = v_i^2 + v_e^2 - 2\boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{v}_e. \tag{7}$$

因为在太阳活动区，等离子体中电子的速度分布可以看做麦克斯韦分布. 于是，(7)式对电子的分布函数取平均得 $\bar{v}_{ie}^2 = \bar{v}_i^2 + \bar{v}_e^2 - 2\overline{\bar{v}_i \cdot \bar{v}_e}$. 对速度为 $\boldsymbol{v}_i$ 的粒子的电离，也即具有某一确定速度的粒子在耀斑活动区中运动时的电离效应，取平均时应讨论 $\boldsymbol{v}_i$ 为常矢量的情形. 因此，对电子的分布函数平均之后，上式有

$$\bar{v}_e^2 = 3kT/m_e, \quad \overline{2\boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{v}_e} = 2\boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{v}_e = 0.$$

由此可得 $\bar{v}_{ie}^2 = \bar{v}_i^2 + 3kT/m_e$. 由上式可知，考虑了背景电子的热速度的影响，有 $\bar{v}_i^2 < \bar{v}_{ie}^2$，而不是公式(2). 将上式两边同乘 $\frac{1}{2} M$，可得

$$\bar{E}_{ie} = \bar{E}_i + \frac{M}{m_e} \cdot \frac{3}{2} kT. \tag{8}$$

式中 k 为玻尔兹曼常数，T 为等离子体背景电子温度. 由(8)式得

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{ie} - \frac{M}{m_e} \cdot \frac{3}{2} kT. \tag{9}$$

对(9)式，当离子对电子的相对动能 $\overline{E_{ie}}$ 取(4)式所定值时，$\bar{E}_i$ 即为考虑了背景电子的热运动后，产生 i 价离子应具备的最小平均动能. 因此，由(4)式、(9)式可知，要产生 i 次电离，离子具有的平均动能 $\bar{E}_i$ 应满足关系式

$$\bar{E}_i \geqslant E_i - \frac{M}{m_e} \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{M}{m_e}\left(I_i - \frac{3}{2} kT \right). \tag{10}$$

就其平均效果来说，当离子的动能满足关系式(10)时，在足够多的电子背景中，能与电子发生足够多次的碰撞，总是可以被电离成 i 价离子的.

比较(10)式与(5)式可知，在计入等离子体电子温度的条件下，要获得 i 次电离，离子应具有的最小动能，比不考虑电子温度时 i 价离子的最小动能要小 $\frac{M}{m_e}\left(\frac{3}{2} kT\right)$. 此结果对低电离态离子动能的影响尤为显著，而且温度越高，影响越大.

为了研究太阳宇宙线加速时的有效电荷，必须考虑加速区的背景等离子体的电子温度. 根据观测，宇宙线耀斑通常发生在高色球层到日冕之间，有时可达几万公里高度. 在此区域，高度由低到高对应的温度一般在 5×10^4K 到 2×10^6K 之间. 与此温度范围对应的 $\frac{M}{m_e}\left(\frac{3}{2} kT\right)$ 值，其范围为 12keV/n 到 475keV/n. 为将计算结果与观测到的 12 个太阳耀斑粒子事件中一些元素的平均电荷进行比较，下面对 $\frac{M}{m_e}\left(\frac{3}{2} kT\right)$ 取 200keV/n 作为这 12 个太阳耀斑不同高度对应值的统计平均.

选定背景电子温度，即选定了 $\frac{M}{m_e}\left(\frac{3}{2} kT\right)$ 值，这样就可以由元素的第 i 电离势 I_i，用(4)式和(10)式算出各价离子的 E_{ie} 值及 $\overline{E_i}$ 的最小值. 表 1 给出了 C、N、O、Ne 和 Fe 五种元素的电荷状态与 E_{ie} 的对应关系. 表中元素的电离电势取自文献[3]，电离电势的值以电子伏为单位，离子的能量则以每个核子千电子伏为单位.

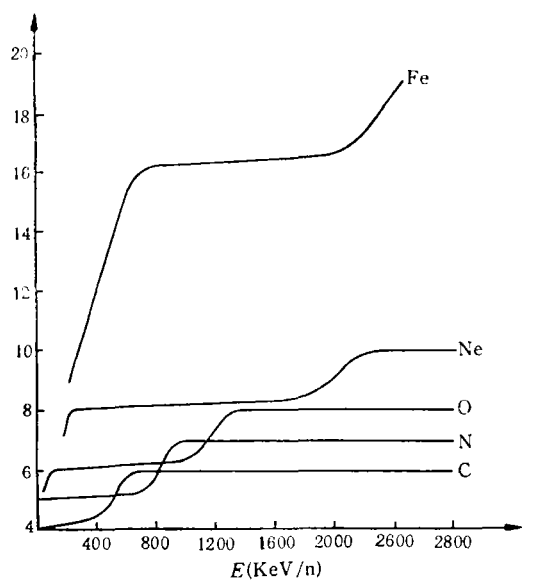

图 1　粒子的有效电荷和能量的关系

Fig. 1　Correlation of effective Charges of solar energetic particles with their kinetic energies

表 1 元素的电荷状态与 E_{ie} 的关系

C	I_i	11.26	24.38	47.86	64.48	391.99	489.84				
	E_{ie}	20.7	44.8	87.9	118.5	720.1	899.8				
	Q	1	2	3	4	5	6				
N	I_i	14.54	29.61	47.43	77.45	97.86	551.92	667.03			
	E_{ie}	26.7	54.4	81.1	142.3	179.8	1013.9	1225.3			
	Q	1	2	3	4	5	6	7			
O	I_i	13.61	35.15	54.93	77.39	113.87	138.08	739.32	871.39		
	E_{ie}	25.0	64.6	100.9	142.2	209.2	253.7	1358.1	1600.7		
	Q	1	2	3	4	5	6	7	8		
Ne	I_i	21.56	41.07	64	97.16	126.4	157.91	207.27	239.09	1195.97	1362.16
	E_{ie}	39.6	75.4	117.6	178.5	232.2	290.1	380.8	439.2	2196.7	2502.3
	Q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	I_i	7.87	16.18	30.64	57	79	103	130	151	235	262
	E_{ie}	14.5	29.7	56.3	104.7	145.1	189.2	238.8	277.4	431.7	421.3
	Q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	I_i	290	330	355	390	457	489	1266	1354	1450	
	E_{ie}	532.7	606.2	652.1	716.4	839.5	898.3	2325.6	2487.3	2663.7	
	Q	11	12	13	14	15	16	17	18	19	

图 1 表示在 $\frac{M}{m_e}\left(\frac{3}{2}kT\right)=200\text{keV/n}$ 的背景电子中，C、N、O、Ne 和 Fe 五种元素的有效电荷随离子能量 $\bar{E}_i$ 的变化．由图 1 可知，粒子有效电荷随能量变化可以用两段抛物线描述．于是，根据表 1 中给出的数据和(10)式，利用数值分析的方法，可以分段构造出二次函数来拟合有效电荷随粒子能量变化的函数关系．对于 C、N、O 和 Ne，其表达式为

$$Q(\bar{E}_i)=\begin{cases}a_1-a_2(1-a_3\bar{E}_i)^{1/2}, & \alpha_1\leqslant\bar{E}_i\leqslant\alpha_2;\\ b_1+b_2\bar{E}_i-b_3\bar{E}_i^2, & \alpha_2\leqslant\bar{E}_i\leqslant\alpha_3;\\ Z, & \alpha_3\leqslant\bar{E}_i.\end{cases}\tag{11.1}$$

对于 Fe 元素，其表达式为

$$Q(\bar{E}_i)=\begin{cases}a_1+a_2\bar{E}_i-a_3\bar{E}_i^2, & \alpha_1\leqslant\bar{E}_i\leqslant\alpha_2;\\ b_1-b_2(1-b_3\bar{E})^{1/2}, & \alpha_2\leqslant\bar{E}_i\leqslant\alpha_2.\end{cases}\tag{11.2}$$

以上公式中，$\bar{E}_i$ 和 α 的单位为 keV/n．

表 2 列出了公式(11.1)和(11.2)中系数值．

表 2

元素 \ 常数	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	α_1	α_2	α_3
C	5.088	1.0119	1.9084×10^{-3}	−9.159	0.04332	3.095×10^{-5}	0	520	700
N	6.073	1.0595	1.2229×10^{-3}	−16.514	0.04587	2.2365×10^{-5}	0	814	1025
O	7.062	1.0871	8.6068×10^{-4}	−25.335	0.04760	1.699×10^{-5}	54	1158	1400
Ne	9.048	1.1162	4.9991×10^{-4}	−46.761	0.04930	1.0708×10^{-5}	239	1997	2302
Fe	3.216	0.0282	1.42×10^{-5}	17.627	1.936	4.210×10^{-4}	232	698	2287

三、与观测结果的比较

由于测量的是在一定能量范围 $(\bar{E}_1 \leqslant \bar{E}_i \leqslant E_2)$ 内的宇宙线的平均有效电荷，因此，为了将计算值与观测值进行比较，需要求出粒子在一定能量范围内的电荷平均值.

设宇宙线的微分能谱为 $j(\bar{E}_i)$，粒子能量为 $\bar{E}_i$ 时的有效电荷为 $Q(\bar{E}_i)$，则有效电荷的平均值可用下式表示:

$$\bar{Q}(E_1 \leqslant \bar{E}_i \leqslant E_2) = \int_{E_1}^{E_2} Q(\bar{E}_i) j(\bar{E}_i) \mathrm{d}\bar{E}_i \Big/ \int_{E_1}^{E_2} j(\bar{E}_i) \mathrm{d}(\bar{E}_i). \tag{12}$$

根据观测结果，宇宙线的微分能谱一般具有幂指数形式[4]

$$j(\bar{E}_i) = A\bar{E}_i^{-\gamma} \tag{13}$$

式中 A 为常数，γ 为能谱指数. 对特定的太阳能量粒子事件中的某一元素，γ 通常是一个常数. 但对不同的耀斑事件，γ 是不同的. 为了同 12 个事件中观测到的元素的平均电荷作比较，分别用这 12 个事件的能谱——计算其平均电荷，进而做电荷值的统计平均. 但由于这12个事件的能谱资料一时难以逐一考证，这里仅采用其中一次事件，即 1979 年 6 月 6 日—9 日的太阳能量粒子事件的能谱. 由此，将(11.1)、(11.2)和(13)式代入(12)式，便可得出能量范围为 $E_1 \leqslant \bar{E}_i \leqslant E_2$ 的粒子平均有效电荷值.

表 3 给出了 1978 年 9 月到 1979 年 9 月期间探测到的 12 次太阳耀斑粒子事件中 C、N、O、Ne 和 Fe 分别为 450—2340keV/n、450—2620keV/n、540—2640keV/n、560—

表 3　平均有效电荷的计算值与观测值的比较

元　素	C	N	O	Ne	Fe
谱指数 γ	1.80	1.76	1.72	1.64	2.15
$Q_{\text{测}}$	5.70	6.37	7.00	9.05	14.9
$\bar{Q}_{\text{计算}}$	5.71	6.22	6.98	8.55	14.3

3140keV/n 和 340—1780keV/n. 可以看出，本文计算的结果与探测结果符合得很好.

四、讨 论

1. 由于不同的太阳宇宙线能量粒子事件中同一元素的能谱不完全相同，因此在一定的能量范围内其平均电荷也有差别，但由于能谱指数差别不大，所以平均电荷差别也很小. 本文如果用 12 个事件的能谱分别计算其平均电荷，而后再对 12 个事件做总的平均，也许会得到与观测结果符合得更好的值.

2. 在表 3 中对太阳宇宙线中 C、N、O、Ne 和 Fe 所列出的有效电荷值，根据文献[5]，它们是用同一仪器测出的 12 个太阳宇宙线事件的平均值. 由于在行星际传播过程中，粒子电离态的改变是可以忽略的[6]，所以，这些粒子的高电离态是在耀斑活动区内加速过程中形成的. 电荷的计算值与观测值能很好地符合，说明本文关于宇宙线的有效电荷态形成的基本思想及计算方法是比较合理的.

3. 因为观测到的太阳宇宙线的高电荷状态是加速过程中随粒子能量的增加而产生的，所以在初始加速的时候，太阳能量粒子处于较低的电离态.

4. 文中公式 (10) 表明的是具有最小平均动能 $\bar{E}_i$ 的离子和背景等离子体发生足够多的碰撞后可以产生 i 次电离. 在理论计算中确定耀斑加速区温度时，由于一时难以查找这 12 个耀斑的温度，因而取通常情况下，耀斑发生的高度范围对应温度的平均值，即取 $\frac{M}{m_e}\left(\frac{3}{2}kT\right)$ 为 200keV/n；同时，本文取 12 个耀斑粒子事件的能谱指数为常数来计算平均电荷，并与 12 个事件中观测到的平均有效电荷作比较，所以，本文阐述的模型具有统计性质.

作者对美籍学者范章云教授的有益讨论表示衷心地感谢.

参 考 文 献

[1] Fan, C. Y. et al., *Space Science Reviews*, Vol. **38**, p. 143, 1984.
[2] 黄永年，空间科学学报，第 **7** 卷，第 198 页，1987.
[3] Allen, C. W., Astrophysical Quantities (2nd Press), Athlone Press, p. 37, 1963.
[4] Gloeckler, G. et al., *Proc. 17th ICRC*, Vol. **3**, p. 136, 1981.
[5] Luhn, A. et al., *Proc. 19th ICRC*, Vol. **4**, p. 241, 1985.
[6] Hovestadt, D. et al., *Ap. J.*, Vol. **281**, p. 463, 1984.

CALCULATION OF EFFECTIVE CHARGES OF SOLAR ENERGETIC PARTICLES

Chen Gui-fu　Huang Yong-nian

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

Abstract

This paper presents a new idea by correlating the effective charges of ions in solar energetic particles with their energies during the acceleration in flaring region. Based on ionization potentials of elements and taking account of the effect of thermal velocities of electrons in plasma of flare active region, one formula is suggested to calculate charge states of the elements C, N, O, Ne and another formula for Fe. From the formulae, the calculations for the elements are in good agreement with the observations.