

基于 ACE 观测数据的太阳风电荷交换 X 射线辐射因子*

梁雅琼¹⁾ 梁贵云^{2)†}

1) (北京物资学院, 北京 101149)

2) (中国科学院国家天文台, 光学天文重点实验室, 北京 100101)

(2024 年 11 月 16 日收到; 2025 年 2 月 16 日收到修改稿)

太阳风电荷交换是太阳风粒子与行星大气中性粒子碰撞过程中的一种非弹性碰撞过程, 碰撞相伴产生软 X 射线辐射, 对行星大气的演化起着重要的影响. 中欧联合卫星——太阳风与地球磁层相互作用全景成像 (SMILE) 正是利用这种 X 射线辐射研究太阳风与地球大气相互作用的全局性结构. 但这种辐射对天体弥散 X 射线源研究是一种重要的干扰, 直接影响对目标源的观测分析. 电荷交换辐射因子是分析空间 X 射线探测器观测数据 (包括中国空间站建议载荷——银河系热重子探寻计划 (DIXE) 和爱因斯坦探针 (EP)) 的关键物理量. 本文采用美国先进成分空间探测器 (ACE) 13 年 (1998—2011 年) 的探测数据, 结合前期发展的辐射分析模型, 研究了不同时间段和不同太阳风起源的电荷交换辐射因子, 并与前人结果进行比较, 统计分析揭示了其随太阳风参数的变化规律, 即平均辐射因子随太阳风质子数密度增大快速变小并达到稳定值, 而随太阳风速度增大而缓慢变大并在 $v_{sw} > 430$ km/s 趋于恒定. 冕物质抛射的辐射因子比冕流和冕洞的大, 太阳活动强周期的辐射因子比弱周期的大.

关键词: 太阳风, 电荷交换, X 射线辐射因子

PACS: 32.30.Rj, 34.70.+e, 95.85.Nv, 96.50.Ci

DOI: 10.7498/aps.74.20241603

CSTR: 32037.14.aps.74.20241603

1 引言

20 世纪 90 年代的 ROSAT 卫星从 3 个能带 (1/4, 3/4 和 1.5 keV) 探测宇宙弥漫热气体的分布^[1,2], 但在 1/4 keV 能带的原始巡天观测数据中发现了大量不规则的带状结构^[1], 这完全不同于 3/4 keV 波段的全天观测特征, 这说明 1/4 keV 波段的辐射与观测方向和时间相关, 而且这种辐射亮度变化的时间尺度也非常复杂、没有规律可循, 有数小时、数天或数月的不等周期, 被称为长期增强

现象 (long-term enhancement)^[1]. Freyberg^[3] 发现这种亮度增强现象与太阳风参数存在关联, 随后 Lisse 等^[4] 在冷暗的百武彗星 (Hyakutake) 的观测中首次发现了 X 射线辐射信号. 这一发现颠覆了天体物理学家对 X 射线辐射的常规认识, 即通常认为 X 射线辐射是源于一个炽热 (温度约百电子伏特) 的等离子体源, 或是受到强辐射源 (如黑洞、活动星系核、X 射线双星等) 的辐照产生的光电离辐射. 为解释彗星中观测到的 X 射线辐射, Cravens^[5] 提出了太阳风离子与彗星中氢原子和水气分子电荷交换的辐射机制, 即彗发中水蒸气分子 (H_2O)

* 国家自然科学基金 (批准号: 12373027)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2022YFA1603204) 和中国科学院战略性先导科技专项 (A/B)(批准号: XDA25030500, XDB34020205) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gyliang@bao.ac.cn

中一个电子在碰撞时被太阳风中的高电荷态离子(如 O^{8+})俘获, 变成 O^{7+} 的高激发量子态, 该量子态不稳定退激发产生 X 射线. 于是, Cox^[6] 和 Cravens^[7] 进一步提出宇宙 X 射线背景中的长期增强现象可能就是源于太阳风与地球磁鞘层氢原子的电荷交换辐射所致. 随后, Wargelin 等^[8] 利用月球暗夜区的钱德拉 (Chandra) 观测数据发现其 X 射线亮度变化与 ROSAT 巡天数据中 3/4 keV 波段的背景辐射相当, 证实了地球邻近空间是背景辐射的重要来源之一. 随后, 利用高能谱分辨、高探测效率的钱德拉 (Chandra, NASA)、X 射线多镜面-牛顿 (XMM-Newton, ESO) 空间望远镜, 天体物理学家在太阳系所有行星的观测中均发现了这种 X 射线辐射, 并获得了线辐射的观测证据^[9]. 理论数值分析揭示这种 X 射线辐射主要来源于太阳风与行星大气相互作用的行星磁鞘层^[10], 因此, 天体物理学家建议将这种 X 射线辐射用于研究行星大气鞘层大尺度结构, 因为其是一种很好的、廉价的远端探测太阳风与行星大气全局性结构的手段, 这为中欧联合联学卫星——太阳风与地球磁层相互作用全景成像卫星 (SMILE) 奠定了坚实的科学基础^[11]. 这种辐射与太阳风的成分、速度、行星大气的成分、密度紧密相关, 因此观测数据的也可以用来诊断太阳风在当地的特征信息^[12,13].

针对宇宙天体的观测, 这种辐射与太阳邻近空间 (100 pc) 热气泡和银河系晕热气体的辐射完全混合在一起, 难以从观测上分辨. 30 年来, X 射线观测天文学家借助于空间物理模型或太阳不同活动周期的观测数据对太阳风电荷交换贡献进行非常有限的约束, 一直没有很好地限定这种辐射对目标源分析的干扰. 这种辐射与热气体的辐射只有在高分辨的能谱上才有明显的区分特征, 比如类氦离子的三重线比值, 即电荷交换的禁戒线比共振线强, 而热辐射中禁戒线较弱. 近年来, Jin 等^[14] 提出中国空间站银河系热重子探寻计划 (DIXE), 其探测器具有 <6 eV 的能谱分辨能力, 可以有效地分辨类氦离子的三重线, 并有望在其巡天观测数据中从能谱的维度分离太阳风电荷交换对宇宙天体的前景干扰.

综上所述, 无论是 SMILE 卫星的成像数据反演^[15], 还是爱因斯坦探针 (EP)^①和 DIXE 的能谱分析, 电荷交换辐射因子是核心物理参数. Schwadron 和 Cravens^[16] 利用类氢近似总截面、两步级联和平均分配各级联跃迁截面的方法给出了一些重要辐射线的辐射率研究彗星的电荷交换 X 射线辐射. Smith 等^[17] 利用类氢近似获得恒定总截面的方法和电子俘获通道的近似处理方法, 结合其 AtomDB 原子数据库^②实现了高分辨电荷交换光谱计算的通用性. Gu 等^[18] 通过收集公开的电荷交换截面数据给出了速度相关的电荷交换光辐射模型. Cumbee 等^[19] 将团队 20 多年系列的、高精度计算截面结果整理形成了 Kronos 电荷交换截面数据库^③, 极大地提高了辐射因子计算结果的准确性. Liang 等^[20] 发展的 SASAL 工具包提供了不同的电荷交换截面数据, 并考虑了双电子俘获的精确辐射因子计算模型^[21]. 但最新的这些电荷交换模型应用于实测太阳风电荷交换辐射因子计算的工作极少, Whittaker 和 Sembay^[22] 采用实验截面研究了美国先进太阳风成分探测器 (advanced composition explorer, ACE) 13 年 (1998—2011 年) 实测的 O^{7+} , $8+$ 离子的辐射因子, 但该工作中没有考虑级联效应. 2024 年, Koutroumpa^[23] 利用其发展的完备的电荷交换模型分类研究了 ACE 探测器 13 年的太阳风粒子不同起源的辐射因子, 但显示了与之前结果的巨大差异.

本文利用我们近年来发展起来的电荷交换辐射计算方法, 通过收集 ACE 探测器 13 年的实测太阳风数据研究了 SMILE 和 DIXE 探测器能谱范围的太阳风离子与氢原子碰撞的辐射因子, 并探讨了其随太阳风粒子特征参数的统计分布关系. 中性氢原子在行星大气和行星际空间的数密度要小一些, 对总辐射的贡献也相对小些^[24], 后续工作中将计算与氢原子碰撞的辐射因子. 结构安排如下: 第 2 节介绍了辐射因子的计算方法与电荷交换截面数据来源, 第 3 节讨论了 ACE 探测器实验太阳风粒子的统计分布, 第 4 节给出了电荷交换辐射因子及讨论分析.

① <https://ep.bao.ac.cn/ep/>

② <http://www.atomdb.org/>

③ <https://sites.physast.uga.edu/research/stancil-group/atomic-molecular-databases/kronos>

2 辐射因子计算方法

太阳风离子 (X^{q+}) 电荷交换辐射率可以表示为如下公式:

$$P^{q+}(r) = n_{\text{sw}}(r) n_{\text{H}}(r) v_{\text{av}} \alpha^{q+}, \quad (1)$$

单位是 $\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 $n_{\text{sw}}(r)$ 表示以地球为坐标中心不同空间位置 r 处太阳风质子数密度; $n_{\text{H}}(r)$ 表示不同空间位置 r 处中性氢原子数密度; 太阳风平均速度 $v_{\text{av}} = \sqrt{v_{\text{sw}}^2 + v_{\text{th}}^2}$, 其取决于太阳风整体速度与离子热速度 ($v_{\text{th}} = \sqrt{3k_{\text{B}}T/m_{\text{p}}}$); α^{q+} 是电荷为 $q+$ 的太阳风离子电荷交换辐射因子, 文献 [22] 中采用如下公式:

$$\alpha = \sum_{q+} \alpha^{q+} = \sum_{q+} \left[\frac{X^{q+}}{X} \right] \left[\frac{X}{\text{H}} \right] \sigma^{q+} E. \quad (2)$$

由于 ACE 数据中心提供的数据给出了这些元素 (除 H 外) 与 O 元素的丰度比, 所以 $\left[\frac{X}{\text{H}} \right]$ 可通过 $\left[\frac{X}{\text{H}} \right] = \left[\frac{X}{\text{O}} \right] \left[\frac{\text{O}}{\text{He}} \right] \left[\frac{\text{He}}{\text{H}} \right]$ 计算获得, 此外该公式中没有考虑辐射级联效应, 本文将 (2) 式中的 $\sigma^{q+} E$ 更换为 $\sum_{ij} \epsilon_{ij}^{(q-1)+} \Delta E_{ij} / v_{\text{av}}$, 其中俘获电子后 $X^{(q-1)+}$ 离子线辐射率 $\epsilon_{ij}^{(q-1)+} \equiv N_j A_{ij}$ 是俘获电子后离子量子态 j 的布居数和自发跃迁速率 A_{ij} 的乘积, 俘获电子后 $X^{(q-1)+}$ 离子量子态 j 的布居 N_j 通过求解速率方程获得, 即

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} N_j^{(q-1)+}(r) \\ &= \sum_{i>j} N_i^{(q-1)+}(r) A_{ij} - \sum_{i<j} N_j^{(q-1)+}(r) A_{ji} \\ &+ n_{\text{H}}(r) \langle n_{\text{sw}}^{q+} \sigma_j v_{\text{av}} \rangle = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 r 表示离子和中性气体数密度球对称分布情况下的不同空间距离. 该方法自洽地考虑了俘获电子后的级联过程. 从中可以看出, 除俘获电子后离子的能级与辐射系数 A_{ij} 外, 量子态分辨的电荷交换俘获截面是精确计算辐射因子的关键. 能级与辐射系数数据来源于我们早期的 Sasal 数据库 [20], 该数据库类似于天体物理领域广泛使用的 AtomDB 数据库^①. 电荷交换截面数据主要采用我们发展电荷交换模型过程中收集的数据 [21], C, N, O 和 Ne

离子数据采用精确全量子的原子/分子轨道耦合计算结果, 对于 Si, Mg 和 Fe 的数据采用修正的 Muller & Salzborn 方法获得其总截面数据 [25] (见该文 (1) 式), 其总截面数值与 Schwadron 和 Cravens [16] 表 1 中所列出的结果一致. 对这些离子, 我们也采用 Wargelin 等 [26] 工作中描述的经验公式, 即 $\sigma = q \frac{A \ln(B/\tilde{E})}{1 + C\tilde{E}^2 + D\tilde{E}^{4.5}}$ (式中 $\tilde{E} = E/q^{0.5}$, q 是离子电荷, A , B 和 C 是系数), 该公式是基于经典轨迹蒙特卡罗计算结果, 其精度在临界碰撞能量 ($E_{\text{crit}} \sim 25\sqrt{q}$ keV/amu) 下好于 30%. 截面数据具体来源情况在表 1 列出.

表 1 不同太阳风离子与中性氢原子碰撞电荷交换截面数据来源

Table 1. Charge exchange cross-section sources of different solar wind ions with neutral hydrogen.

太阳风离子	数据类型	数据来源
O ⁷⁺	总截面	Zhang等 ^[27]
O ⁸⁺	nl分辨	Wu (email通讯)
O ⁶⁺	nl分辨	Wu等 ^[28]
C ⁶⁺	总截面	Gu等拟合公式 ^[18]
C ⁵⁺	nl分辨	Nolte等 ^[29]
Ne ⁹⁺	nl分辨	Liu等 ^[30]
Ne ⁸⁺	nl分辨	Liu等 ^[30]
Mg ¹⁰⁺	总截面	Gu等拟合公式 ^[18]
Mg ^{8+, 9+}	总截面	Midha & Gupta经验公式 ^[25]
Si ⁽⁷⁻¹⁰⁾⁺	总截面	Midha & Gupta经验公式 ^[25]
Fe ⁽⁸⁻¹²⁾⁺	总截面	Wargelin等经验公式 ^[26]

Janev 和 Winter^[31] 揭示电子俘获通道具有选择性, 其俘获后的最大主量子数是:

$$n_{\text{p}} = \sqrt{\frac{1}{2I_{\text{neu}}}} q \left(1 + \frac{q-1}{\sqrt{2q}} \right)^{-0.5}, \quad (4)$$

其中 I_{neu} 是碰撞中性气体的电离势 (采用原子单位), 即本文中氢原子, q 是碰撞前离子的电荷. 总截面在轨道量子态的分配方法与文献 [17, 18] 的方法一样, 这里不再详述.

3 太阳风离子成分

本文采用 ACE 官方网站上提供的 1998 年至 2011 年 8 月的探测数据^②, 之后的数据由于探测器

① <http://www.atomdb.org/>

② <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/index.html>

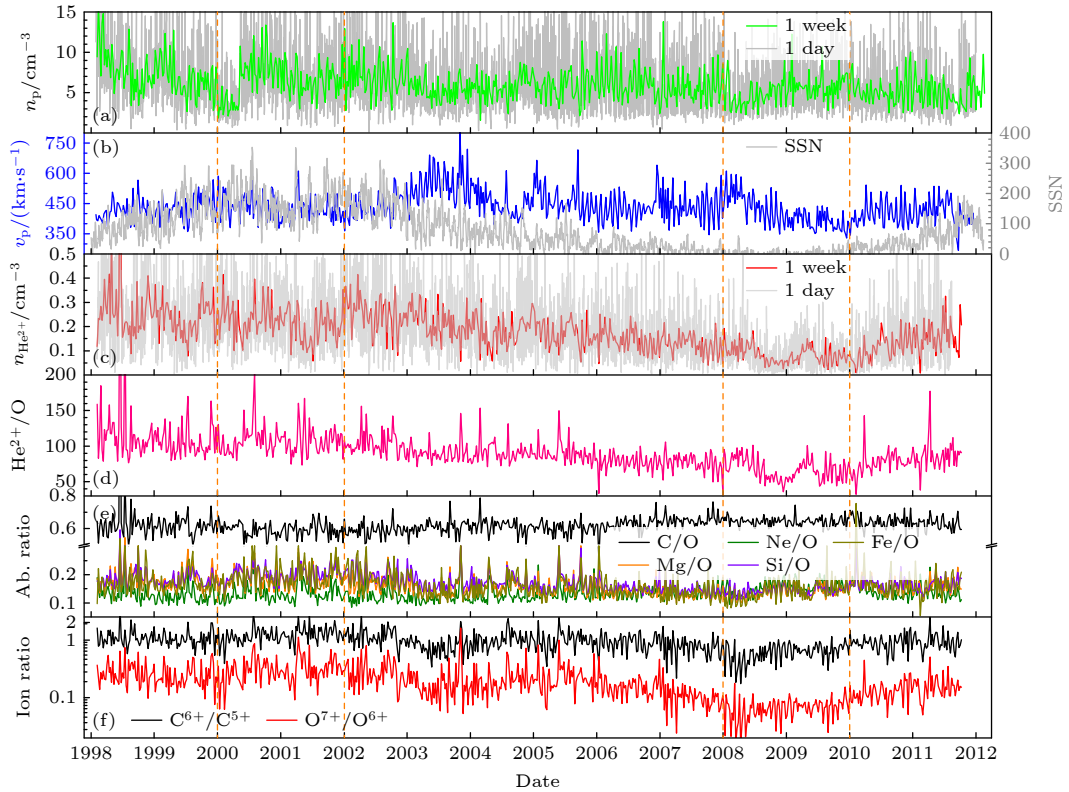


图 1 美国先进成分空间探测器 1998—2011 年监测的太阳风粒子状态数据, 除时序间隔外, 该图与 Koutroumpa^[23] 文中图 2 基本一致 (a) 质子数密度 (cm^{-3}), 灰线是 1 天平均, 绿线是 1 周平均; (b) 质子速度 (km/s , 蓝线) 和太阳表黑子计数 (右纵轴, 灰线, 1 天平均数据), 其来源于比利时太阳黑子指数和长期太阳观测中心^[32]; (c) He^{2+} 离子数密度 (cm^{-3}), 灰线是 1 天平均, 红线是 1 周平均; (d), (e) 不同元素 (He , C , Ne , Mg 和 Si) 与 O 元素丰度比; (f) 高电荷态的 $\text{C}^{6+}/\text{C}^{5+}$ 和 $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$ 离子比; 竖直点划线分隔的 2 个区域 (2000—2002 年和 2008—2010 年) 分别是太阳活动最大和最小时间段

Fig. 1. Status of solar wind particles from ACE during 1998 and 2012. This figure is basically similar with Fig. 2 of Koutroumpa^[23] with exception of time step: (a) Proton density (cm^{-3}), gray line is 1-day averaged, while green line is 1-week averaged; (b) proton bulk velocity (km/s , blue line) and sun spot number (SSN, right-axis) with 1-day averaged from the World Data Center SILSO^[32]; (c) He^{2+} density (in cm^{-3}), gray and red lines refer to 1-day and 1-week averaged; (d), (e) element (He , C , Ne , Mg and Si) abundance ratios relative to oxygen; (f) ion fraction ratio of $\text{C}^{6+}/\text{C}^{5+}$ and $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$. Vertical dashed-dot lines separate two regions (i.e. 2000—2002 year and 2008—2010 year) for solar maximum and minimum, respectively.

故障使得数据不全面而没有被采用. 对于重粒子数据采用 2 h 平均数据, 而质子数据采用可获得的 12 min 平均数据, 并依据时间标识匹配重组成 2 h 平均数据. 表征太阳风状态的 ACE 数据主要有质子数密度、速度、 He^{2+} 数密度、不同元素与氧元素丰度比、离子丰度比值 ($\text{C}^{6+}/\text{C}^{5+}$, $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$) 等, 如图 1 所示. 为了揭示太阳活动性情况在图中也显示了太阳黑子数 (SSN), 该数据来源于比利时太阳黑子指数和长期太阳观测中心^①. 从图 1 各参数的时间序列数据可以看出, 没有规律可循, 只有太阳黑子指数表现了明显的长时标 (约 11 年) 的周期性, 说明太阳风的高度变化复杂性. 除此之外, He^{2+} 离子数密度在长时标上与太阳黑子数密度展现了一

定的相关性, 即太阳活动强的年份 (2000—2002 年) He^{2+} 离子数密度整体偏大, 而太阳活动弱的年份 (2008—2010 年) He^{2+} 离子数密度整体偏小. 同样 $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$ 离子丰度比也表现了与太阳黑子数密度相关的特征.

为了探讨这些看似没有规律的时间序列数据, 我们利用 2 h 平均数据统计研究了不同物理参数之间的关系, 如图 2 所示. 因为同一元素相邻电荷态丰度比与等离子体的温度紧密相关, 且由于高电荷态离子在离开太阳表面 ($0.05\text{--}0.5 R_{\odot}$) 处就处于‘冻结’状态^[33], 因此 Zhao 等^[34] 以离子丰度比值 $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$ 和太阳风速度建立了一个标准来分辨太阳风在太阳表面的起源, 即冕洞 (coronal hole,

① <https://www.sidc.be/SILSO/home>

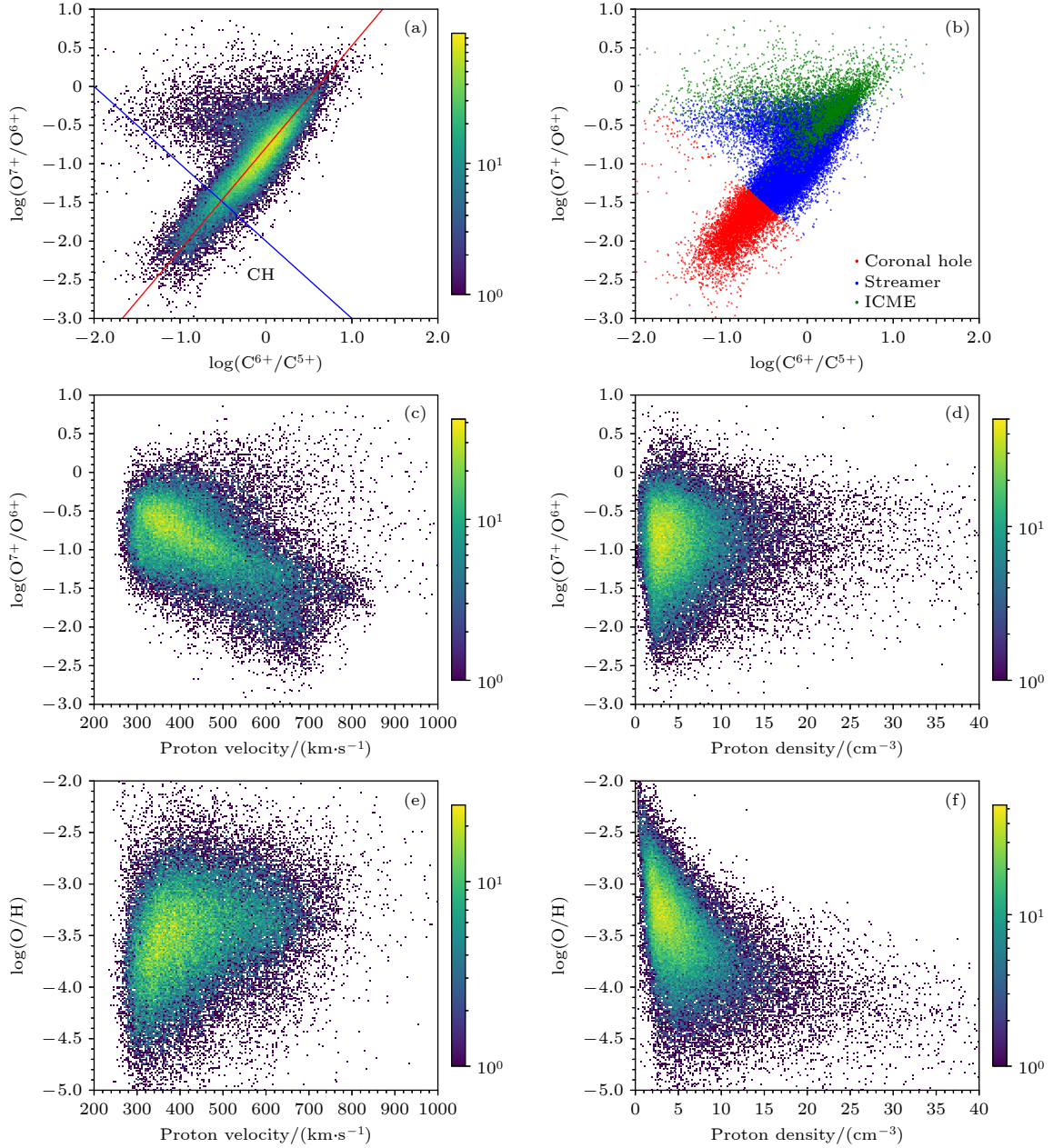


图 2 ACE 卫星 13 年的太阳风粒子监测数据二维直方图或点分布图, 数据采用 ACE 网站的 2 小时平均数据, 其中太阳风质子速度和密度采用 12 min 平均数据重新分组获得. (a), (b) 分别为 $\log(O^{7+}/O^{6+})$ 与 $\log(C^{6+}/C^{5+})$ 关系的柱状分布和点分布, 图 (a) 中蓝色斜线是源于冕洞数据的分隔线, 即 $(O^{7+}/O^{6+}) \times (C^{6+}/C^{5+}) \leq 0.01$, 红色斜线是斜率为 1.32 的线性拟合线; 图 (b) 中按 Koutroumpa^[23] 和 Zhao 等^[34] 的方法对来源于冕洞 (红)、冕流 (蓝) 和星际冕物质抛射物 (深绿) 的不同数据进行了分类. (c), (d) 分别为 $\log(O^{7+}/O^{6+})$ 与太阳风速度和密度关系的二维直方图. (e), (f) 分别为 O 元丰度与太阳风速度和密度关系的二维柱状分布

Fig. 2. 2D histograms and scatter distribution plots of ACE mission data from Feb. 1998 to Aug. 2011. Element and ion fraction data are from the ACE science center with 2-hour averaged, while proton bulk velocity and density are obtained by rebinning the 12-minute data available from the website. (a), (b) The $\log(O^{7+}/O^{6+})$ vs. $\log(C^{6+}/C^{5+})$ in 2D histogram and scatter, respectively. The oblique blue line in panel (a) refers to the criterion value of $(O^{7+}/O^{6+}) \times (C^{6+}/C^{5+}) \leq 0.01$ for coronal hole (CH) and streamer sources, and the red line is a linear fit line with a slope of 1.32. Panel (b) shows the ACE data points of solar wind from different source in Sun by using the distinguish methods of Koutroumpa^[23] and Zhao et al.^[34], e.g. coronal holes (red), streamers (blue) and interplanetary coronal mass ejections (dark green). (c), (d) The $\log(O^{7+}/O^{6+})$ vs. proton velocity and density in 2D histogram, respectively. (e), (f) The O abundance (in log) vs. Proton velocity and density in 2D histogram, respectively.

CH)、冕流 (Streamer)、行星际冕物质抛射 (ICME).

2024 年, Koutroumpa^[23] 提出以 C 和 O 离子丰度

乘积 $(O^{7+}/O^{6+}) \times (C^{6+}/C^{5+}) \leq 0.01$ 作为区分冕洞

和冕流起源的判据, 本文采用这一方法重新分类了

源于冕流和冕洞的数据点, 而 ICMEs 的数据点直接采用 ACE 数据中心提供的分类标签. 所以图 2(a) 以二维直方图显示了所有 ACE 2 h 平均数据的这两个离子丰度比在 200×200 网格坐标空间数据点的统计分布关系, 其颜色表示每个小方隔空间所包含的数据点数目. 利用 Koutroumpa^[23] 和 Zhao 等^[34] 的分类方法 (详情见该文表 2), 图 2(b) 以不同颜色给出这 3 种太阳风粒子起源的所有数据点 (共 56641 条) 的分布, 其中冕流的统计记录最多. 除少数数据点外, 绝大多数数据点都位于一条丰度比对数值的线性区域, 其斜率约 1.32, 见图 2(a) 中红色斜线. 针对这些偏离的数据点 (Outliers) 的起源, Zhao 等^[35] 的详尽分析揭示其可能是来源于太阳冕区的磁重联事件导致太阳风电离度降低.

太阳风的质子数密度和速度是太阳风的两个非常重要的特征能数, 图 2(c) 和图 2(d) 给出了 O^{7+}/O^{6+} 值与质子数密度和速度关系的统计分布. O^{7+}/O^{6+} 值与速度存在强关联, 即高电荷态 O^{7+} 越少 (即温度越低) 其速度越大, 而与质子数密度没有显示任何相关性. (2) 式中决定辐射因子大小的另一个重要参数是元素丰度, 其中 O 元素是太阳风中丰度最高的重元素, 因此, 我们也研究了 O 丰度 (指相对 H 丰度) 随太阳风质子速度和密度的关系, 如图 2(e) 和图 2(f), 整体上质子速度越大, 记录的数据不仅快速减少, 且整体 O 丰度偏高些.

而 O 丰度与质子数密度的关系却是整体快速减小.

4 辐射因子 α 值结果与比较

基于第 2 节、第 3 节, 获得了辐射光子能段 0.1—2.0 keV 的辐射因子, 如图 3 所示, 这也是 SMILE 卫星 (0.2—5.0 keV)^[11]、中国空间站 DIXE 载荷 (0.1—10.0 keV)^[14] 和 EP 卫星 (0.5—4.0 keV)^[36] 覆盖的重要观测能段. 图 3(a) 给出了 2 h 平均 1998—2011 年所有高质量有效数据 ACE 记录的 C (红色)、O (蓝色) 和 Ne (深绿色) 元素的 α 值, 图 3(a) 右侧给出了这些 α 对数值的统计分布. 我们 1998—2011 年时间段的平均结果 ($4.6^{+9.9}_{-3.1} \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$) 小于 Koutroumpa^[23] 的结果 ($7.1^{+4.7}_{-2.9} \times 10^{-16}$ (冕洞)、 $7.8^{+7.0}_{-3.7} \times 10^{-16}$ (冕流) 以及 $8.8^{+8.8}_{-4.4} \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$ (冕物质抛射)), 但在误差范围内. 这个值也与空间物理学家采用的经典值 ($6.0 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$) 相一致, 即图中的黑色水平虚线. 但这些基于 ACE 实测数据结果远远大于 Whittaker 和 Sembay^[22] 的统计分布结果, 如图中 $\star$ 形点分布. 百分比分布图 (图 3(b)) 清晰地说明 C 和 O 是该波段辐射辐射因子 α 值的主要贡献来源, 分别是 44% 和 34%.

进一步研究了不同时间段和不同太阳风起源的辐射因子 α 值, 如图 4 所示. 在全观测周期中 (1998—2011 年), 源于冕物质抛射的辐射因子 α 值

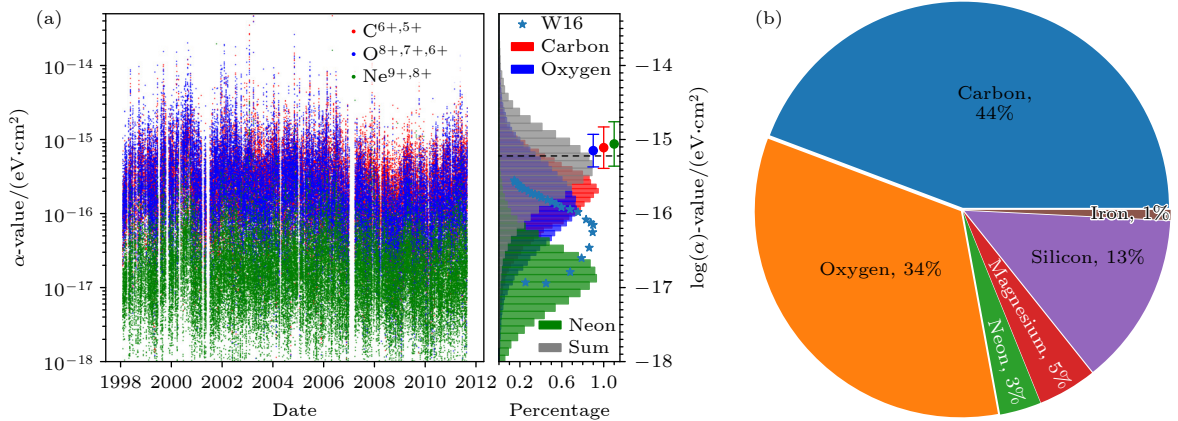


图 3 (a) 1998 年至 2011 年 ACE 监测到的不同太阳风离子 ($C^{6+, 5+}$, $O^{8+, 7+, 6+}$ 和 $Ne^{9+, 8+}$) 电荷交换 X 射线辐射在 0.1—2.0 keV 能带的辐射因子 α 值的点分布图 (左) 和统计百分比分布 (右). $\star$ 形点来源于 Whittaker 和 Sembay 的结果^[22], 标记为 W16; 水平虚线是经典结果 ($6 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$); 带误差棒的实心圆点是来源于 Koutroumpa 的不同太阳风起源的结果^[23], 即冕流 (红色)、冕洞 (蓝色) 和星际冕物质抛射 (绿色), 其能带宽是 0.1—2.0 keV. (b) 所有记录点统计的平均辐射因子中各元素贡献百分比

Fig. 3. (a) Scatter plot and statistical distribution of the charge-exchange emission factor α -value of the ACE solar wind particles ($C^{6+, 5+}$, $O^{8+, 7+, 6+}$ and $Ne^{9+, 8+}$) in the energy ranges of 0.1—2.0 keV. $\star$ symbol points are from the results of Whittaker & Sembay^[22], marked as W16. Horizontal dashed line is the empirical value of $6 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$. Filled circles with errorbar refers to the calculation by Koutroumpa^[23] for different solar wind (e.g. streamers (red), CH (blue), and ICMEs (green)). (b) Percentage contribution from the different elements to the mean emission factor α -value of all recorded data.

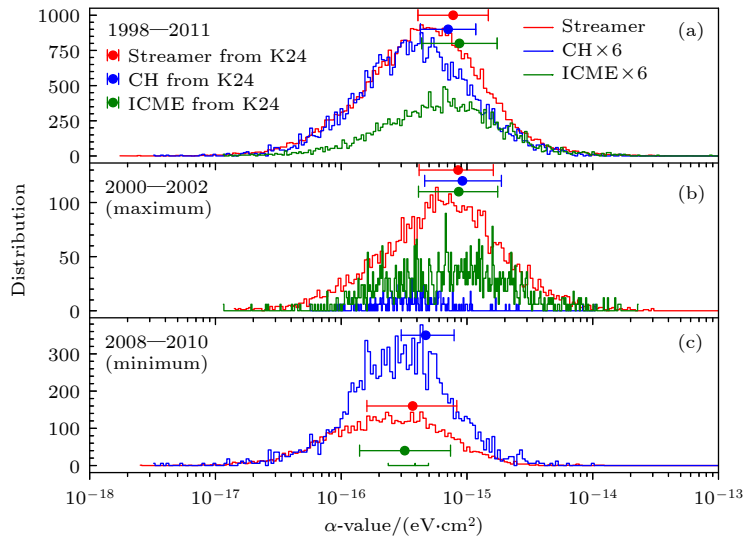


图 4 不同观测时间段和不同太阳风起源的电荷交换辐射因子 α 值的统计分布, 及其与 Koutroumpa^[23] 结果 (K24) 的比较. 冕流: 红色阶梯线和带误差棒的实心圆点; 冕洞: 蓝色; 星际冕物质抛射: 绿色. 由于冕洞和星际冕物质抛射的统计数值小, 为便于比较, 均乘了 6 倍的任意数值. (a) 1998—2011 年全时间段; (b) 太阳活动强周期 2000—2002 年; (c) 太阳活动弱周期 2008—2010 年

Fig. 4. Statistical distribution of solar wind charge-exchange emission factor α -value during different observational period and for different solar wind sources, as well as its comparison with the results of Koutroumpa^[23] (K24). Streamer: red step lines and filled circles with errorbars, CH: blue lines and symbols, ICMEs: green lines and symbols. For comparison, the statistical distribution of CH and ICMEs are multiplied by an arbitrary value of six. (a) Full period of 1998—2011; (b) 2000—2002 of solar maximum; (c) 2008—2010 of solar minimum.

均值 ($6.3 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$) 大于冕流 ($4.6 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$) 和冕洞 ($3.9 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$), 这与 Koutroumpa^[23] 的结论相一致, 主要是由于冕物质抛射中高电荷态离子相对多些, 即冕物质抛射中 $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$ 平均值比冕流和冕洞中的大, 如图 2(b) 所示, 辐射光子的能量偏大导致的, 也与太阳风起源分辨标准 (文献 [34] 中表 2) 一致. 但该均值比 Koutroumpa^[23] 的结果小 30%—45%. 在太阳活动强周期 (2000—2002 年), 本文的辐射因子均值分别是 $7.2 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$ (星际冕物质抛射)、 $6.5 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$ (冕流) 和 $3.9 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$ (冕洞), 比 Koutroumpa^[23] 的结果分别小 16%, 24% 和 58%, 即源于冕洞太阳风粒子的数据差异最大. 在太阳活动弱周期 (2008—2010 年), 冕物质抛射、冕流和冕洞的辐射因子平均值分别是 3.6×10^{-16} , 2.4×10^{-16} 和 $3.0 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$, 与 Koutroumpa^[23] 的结果相比, 冕物质抛射的 α 值一致, 而冕流和冕洞的 α 值小约 35%. 太阳活动强周期的辐射因子是弱周期的 α 均值的 2.0、2.7 和 1.3 倍, 这主要是由于太阳活动强周期离子丰度整体较高所致 [23]. 在上述辐射因子均值中, 太阳活动强周期源于冕流的辐射因子大于冕洞的值, 而在太阳活动弱周期冕洞的辐射因子略高于冕流, 这与 Koutroumpa^[23] 的结果不同, 即在强和

弱周期都是冕洞的辐射因子均值大. 弱周期源于冕洞的辐射因子略偏大主要是由于太阳风中 C^{6+} 离子相对增丰所致, 这与图 2(a) $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$ 与 $\text{C}^{6+}/\text{C}^{5+}$ 关系拟合直线的斜率 (1.32) 大于 1 相一致. 整体上来说, 全观测周期和太阳活动强周期的星际冕物质抛射的辐射因子差异小些、其次是冕流, 差异较大的是冕洞. 不同结果的差异, 可能是由于采用的原子结构和碰撞参数不同所致, 总碰撞截面向量子态分辨分配截面处理方法不同也是一个重要原因, 如 Liang 等 [21] 揭示 300 eV 以下的辐射线强度对量子态的选择效应存在近 2 倍的差异. 但可获得的精确量子态 nl 分辨的碰撞截面数据仍然很少, 天文应用分析仍然需要借助于一些近似处理方法 [17,18]. 由于宽能段辐射因子计算中涉及到了 19 个离子的数据, 很难推断是由于哪个离子的数据差异所引起, 这需要逐个离子逐个原子参数的精细比较才能辨别, 这也是国际上不同辐射模型 (包括热辐射) 未来需要解决的前沿问题, 这不是本文的主要研究内容. 此外, 不同太阳风起源的辐射因子统计均值差异的大小不一样, 说明 ACE 数据处理方法的不同也是一种原因, 比如, 本文处理 ACE 数据时没有进一步区分上层弱风 (upper depleted wind, UDW) 和磁重联慢太阳风 (Outliers) [35].

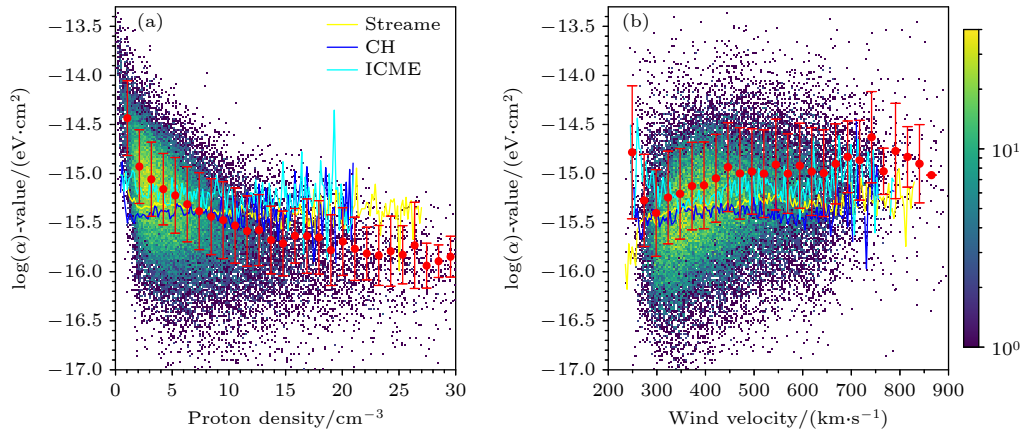


图 5 1998—2011 年 2 小时平均的不同太阳风离子电荷交换 X 射线总辐射因子 α 值与质子数密度 (a) 和速度 (b) 的二维直方图。带误差棒实心圆点表示质子数密度和速度相应网格辐射因子的平均值和其方差, 折线分别表示冕物质抛射 (青色)、冕流 (黄色) 和冕洞 (蓝色) 的辐射因子平均值

Fig. 5. 2D histograms of the charge-exchange emission factor α -value of all particles in solar wind versus proton density (a) and velocity (b) for 2-hour averaged data in 1998–2011. Filled symbols with errorbars refer to mean and standard variance of the α distribution at the grids of the proton density and velocity. Broken curves denotes mean α -value for ICMEs (cyan), Streamer (yellow) and CH (blue).

我们进一步分析了总辐射因子 α 值随太阳风特征参数 (质子速度与数密度) 的统计分布, 如图 5 所示。 α 值的平均值随质子数密度的增大快速变小, 在 $n_p > 13 \text{ cm}^{-3}$ 以上达到相对稳定的值 ($\log(\alpha) \approx -15.7 \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$)。随质子速度的增大, α 值的平均值也存在增大的趋势 (低速度且统计数据少的两个点除外), 但相对缓慢, 并在 $v_{sw} > 430 \text{ km/s}$ 以上时趋于恒定。在较高统计的质子数密度和速度区域, 源于冕物质抛射的辐射因子平均值大于冕流和冕洞的值。这种关系与图 2 中 O 元素丰度的表现很相似, 这主要是由于 0.1—2.0 keV 能段的总辐射因子主要是由太阳风中高电荷态 O (34%) 和 C (44%) 离子的贡献所主导所致。

5 结 论

本文通过分析美国先进成分空间探测器数据 13 年 (1998—2011) 的实测数据, 研究了这些 ACE 数据中电离态和元素丰度与太阳风特征参数的统计分布, 发现电离度整体上与太阳风速度存在强相关性, 即速度越大电离度越低, 即温度越小。冕流的高统计值说明太阳风更多起源于电离度高 (温度高) 的冕流。而 O 元素丰度却与质子数密度存在强相关性, 即质子密度越大, O 丰度越小。基于 ACE 实测太阳风参数计算的电荷交换辐射因子与 Koutroumpa 最新的计算结果^[23] 相比整体偏低些

(30%—48%)。不同太阳风起源 α 值统计平均的分析揭示冕物质抛射的 α 值比冕流和冕洞的大, 太阳活动强周期的辐射因子是弱周期的 1.3—2.7 倍。此外, 统计分析发现 α 值与太阳风质子速度和密度的关系与 O 丰度的表现相一致, 即随质子数密度的增大快速变小, 随质子速度的增大缓慢变大, 并分别在 $n_p > 13 \text{ cm}^{-3}$ 和 $v_{sw} > 430 \text{ km/s}$ 时趋于恒定, 这种一致性是由于宽能带的总辐射因子 α 值, 主要是由高电荷态 O 和 C 离子所主导。这些基于可获得的精确碰撞截面所计算的 α 值, 将对中欧联合科学卫星 SMILE、中国空间站银河系热重子探寻计划 DIXE, 以及爱因斯坦探针 EP 观测数据的分析起到重要支撑作用。

参考文献

- [1] Snowden S L, Freyberg M J, Plucinsky P P, Schmitt J H M M, Trümper J, Voges W, Edgar R J, McCammon D, Sanders W T 1995 *Astrophys. J.* **454** 643
- [2] Snowden S L, Egger R, Freyberg M J, McCammon D, Plucinsky P P, Sanders W T, Schmitt J H M M, Trümper J, Voges W 1997 *Astrophys. J.* **485** 125
- [3] Breitschwerdt D, Freyberg M J, Trümper J 1998 *The Local Bubble and Beyond* (Berlin: Springer)
- [4] Lisse C M, Dennerl K, Englhauser J, Harden M, Marshall F E, Mumma M J, Petre R, Pye J P, Ricketts M J, Schmitt J, Trümper J, West R G 1996 *Science* **274** 205
- [5] Cravens T E 1997 *Gelphys. Res. Lett.* **24** 105
- [6] Breitschwerdt D, Freyberg M J, Trümper J 1998 *The local bubble and beyond: proceedings of the IAU Colloquium no. 166* Garching, Germany, April 21–25 1997 p121
- [7] Cravens T E 2000 *Astrophys. J.* **532** L153

- [8] Wargelin B J, Markevitch M, Juda M, Kharchenko V, Edgar R & Dalgarno A 2004 *Astrophys. J.* **607** 596
- [9] Bhardwaj A, Gladstone G R, Elsner R F, et al. 2002 *Proc. ESLAB 36 Symposium: Earth-Like Planets and Moons Noordwijk, Netherlands, June 3–8, 2002* pp215–226
- [10] Robertson I P, Cravens T E 2003 *Gelphys. Res. Lett.* **30** 1439
- [11] Sembay S, Alme A L, Agnolon D, et al. 2024 *Earth Planet. Phys.* **8** 5
- [12] Beiersdorfer P, Boyce K R, Brown G V, Chen H, Kahn S M, Kelley R L, May M, Olson R E, Porter F S, Stahle C K, Tillotson W A 2003 *Science* **300** 1558
- [13] Zhang R T, Liao T, Zhang C J, Zhou L P, Guo D L, Gao Y, Gu L Y, Zhu X L, Zhang S F, Ma X 2023 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **520** 1417
- [14] Jin H, Mao J J, Chen L B, Chen N H, Cui W, Gao B, Li J J, Li X F, Liu J J, Quan J, Jiang C Y, Wang G L, Wang L, Wang Q, Wang S F, Xiao A M, Zhang S 2024 *J. Low Temperature Phys.* **215** 256
- [15] Sun T R, Connor H, Samsonov A 2024 *Earth Planet. Phys.* **8** 1
- [16] Schwadron N A, Cravens T E 2000 *Astrophys. J.* **544** 558
- [17] Smith R K, Foster A R, Brickhouse N S 2012 *Astron. Nachr* **333** 301
- [18] Gu L Y, Kaastra J, Raassen A J J 2016 *Astron. Astrophys.* **588** A52
- [19] Cumbee R, Stancil P, Mcilvane S 2021 *American Astronomical Society Meeting* **238** 12601
- [20] Liang G Y, Li F, Wang F L, Wu Y, Zhong J Y, Zhao G 2014 *Astrophys. J.* **783** 124
- [21] Liang G Y, Zhu X L, Wei H G, Yuan D W, Zhong J Y, Wu Y, Hutton R, Cui W, Ma X W, Zhao G 2021 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **508** 2194
- [22] Whittaker I C, Sembay S 2016 *Gelphys. Res. Lett.* **43** 7328
- [23] Koutroumpa D 2024 *Earth Planet. Phys.* **8** 105
- [24] Liang G Y, Sun T R, Lu H Y, Zhu X L, Wu Y, Li S B, Wei H G, Yuan D W, Zhong J Y, Cui W, Ma X W, Zhao G 2023 *Astrophys. J.* **943** 85
- [25] Midha J M, Gupta S C 1994 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **52** 897
- [26] Wargelin B J, Beiersdorfer P, Brown G V 2008 *Can. J. Phys.* **86** 151
- [27] Zhang R T, Seely D G, Andrianarijaona V M, Draganić I N, Havener C C 2022 *Astrophys. J.* **931** 1
- [28] Wu Y, Stancil P C, Schultz D R, Hui Y, Liebermann H P, Buenker R J 2012 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **45** 235201
- [29] Nolte J L, Stancil P C, Liebermann H P, Buenker R J, Hui Y, Schultz D R 2012 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **45** 245202
- [30] Liu L, Wu Y, Wang J G, Janev R K 2022 *At. Data & Nuclear Data Tables* **143** 101464
- [31] Janev R K, Winter H 1985 *Phys. Rep.* **117** 265
- [32] *Royal Observatory of Belgium, Brussels* (Sunspot Number catalogue ‘1998-2012’) <http://www.sidc.be/SILSO/>
- [33] Landi E, Gruesbeck J R, Lepri S T, Zurbuchen T H, Fisk L A 2012 *Astrophys. J.* **761** 48
- [34] Zhao L, Zurbuchen T H, Fisk L A 2009 *Gelphys. Res. Lett.* **36** L14104
- [35] Zhao L, Landi E, Lepri S T, Kocher M, Zurbuchen T H, Fisk L A, Raines M J 2017 *Astrophys. J. Supp. Ser.* **228** 4
- [36] Zhang C, Ling Z X, Sun X J, et al. 2022 *Astrophys. J. Lett.* **941** L2

Solar wind charge-exchange X-ray emission factor based on ACE observation data^{*}

LIANG Yaqiong¹⁾ LIANG Guiyun^{2)†}

1) (*Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China*)

2) (*Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(Received 16 November 2024; revised manuscript received 16 February 2025)

Abstract

This study aims to quantify the solar wind charge-exchange (SWCX) X-ray emission factor (denoted as α -value) and its dependence on solar wind parameters, solar activity cycle, and solar wind origin. By analyzing 13-year (1998–2011) *in-situ* measurements from the advanced composition explorer (ACE) spacecraft, we investigate the statistical correlations between solar wind ionization states, elemental abundances (particularly oxygen), and bulk plasma parameters (proton speed, density). The derived α -values are critical for explaining the data from solar wind and magnetosphere interaction linker explorer (SMILE), and disentangling SWCX foreground emissions from diffuse astrophysical X-ray sources observed by Einstein Probe (EP) and proposed diffuse X-ray explorer (DIXE) payload on Chinese space station. In this work, high-resolution solar wind ion composition data and plasma parameters from ACE are investigated. Events are categorized by solar wind origin (coronal holes, streamers, interplanetary coronal mass ejections (ICMEs)) and solar cycle phase (minimum *vs.* maximum). The α -value, defined as the total soft X-ray photon emission cross section per solar wind proton, is computed using an updated charge-exchange model that combines the state-resolved cross-section for highly charged ions. The model takes into consideration the velocity-dependent cross-section of solar wind-neutral interaction. Statistical method and bin-averaging techniques are adopted to extract the relations between α , solar wind speed (v_{sw}), proton density (n_p), and oxygen abundance. The main results are as follows.

1) Ionization state dynamics: A strong anti-correlation exists between solar wind ionization degree and bulk speed: high-speed winds (> 500 km/s) exhibit lower ionization states than slow-speed winds (< 400 km/s).

2) Elemental abundance trends: Oxygen abundance ($[O/H]$) is inversely correlated with n_p : the $[O/H]$ of denser solar wind plasmas ($n_p > 13$ cm⁻³) decreases by 30%–50%, indicating the presence of fractionation during plasma acceleration. No significant speed dependence of $[O/H]$ is observed, compared with earlier research results.

3) Emission factor (α -value) behavior: α -value decreases rapidly with the increase of n_p and stabilizes for $n_p > 13$ cm⁻³. Conversely, α -value increases gradually with v_{sw} up to 430 km/s, beyond which it plateaus. The ICME-associated α exceeds streamer and coronal hole values by 35%–60%, which is attributed to higher averaged ionic state in transient ejecta. Solar maximum α (2000–2002) is 1.3–2.7 times higher than solar minimum (2008–2010), reflecting cycle-dependent ion composition changes.

By bridging *in-situ* solar wind measurements and X-ray emission physics, this work enhances the ability to diagnose solar wind-magnetosphere coupling and diffuse X-ray background. The validated α -value will be of benefit to the data analysis for Chinese aerospace projects in the 2020s, such as SMILE, DIXE, and EP.

Keywords: solar wind, charge-exchange, X-ray emission factor

PACS: 32.30.Rj, 34.70.+e, 95.85.Nv, 96.50.Ci

DOI: [10.7498/aps.74.20241603](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241603)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241603](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241603)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12373027), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1603204), and the Strategic Priority Research Program (A/B) of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDA25030500, XDB34020205).

[†] Corresponding author. E-mail: gyliang@bao.ac.cn



基于ACE观测数据的太阳风电荷交换X射线辐射因子

梁雅琼 梁贵云

Solar wind charge-exchange X-ray emission factor based on ACE observation data

LIANG Yaqiong LIANG Guiyun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 103201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241603

CSTR: 32037.14.aps.74.20241603

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241603>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

态选择电荷交换实验测量以及对天体物理软X射线发射模型的检验

Experimental measurement of state-selective charge exchange and test of astrophysics soft X-ray emission model

物理学报. 2021, 70(8): 080702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201685>

^{252}Cf 自发裂变K X射线发射与动能-电荷关系

K X-ray emission and kinetic energy-nuclear charge relationship of ^{252}Cf spontaneous fission

物理学报. 2024, 73(14): 142501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240563>

基于CT扫描数据的X射线能谱估计方法

Computed tomography data based X-ray spectrum estimation method

物理学报. 2023, 72(11): 118701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222307>

铜氧化物超导体电荷序的共振X射线散射研究进展

Research progress of resonant X-ray scattering of charge order in cuprate superconductors

物理学报. 2025, 74(8): 087402 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241402>

铜氧超导材料电荷密度波和元激发的共振非弹性X射线散射研究

Resonant inelastic X-ray scattering study of charge density waves and elementary excitations in cuprate superconductors

物理学报. 2024, 73(19): 197401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240983>

基于超快激光调制的纳秒脉冲X射线发射源

Nanosecond pulse X-ray emission source based on ultrafast laser modulation

物理学报. 2024, 73(4): 040701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231505>