

Theoretical Study of Diagnostic for Fe XVII Spectral Line in Solar Coronal Soft X-Ray

Lamei Liao¹, Hong Cao¹, Yongpeng Shi¹, Jian He²

¹College of Physics and Electron Information, Luoyang Normal University, Luoyang Henan

²School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Email: hejian405@163.com

Received: Feb. 15th, 2015; accepted: Feb. 27th, 2015; published: Mar. 3rd, 2015

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, taking the 1.501 nm spectral line in Fe XVII spectral lines in solar coronal soft X-ray as an example, we analyze the effect of opacity on the 1.501 nm spectral line, then we discuss the diagnostic principle of plasma temperature and electron density. Results show that, the plasma temperature in solar coronal has the 10^6 K order of magnitude, and the electron density has the 10^{10} cm^{-3} order of magnitude, which has the same order of magnitude in actual observation. Through analysis, we obtain some important conclusions. This study will have reference significance and value in solar coronal plasma diagnostic.

Keywords

Solar Coronal, Opacity, Plasma Temperature, Electron Density

太阳日冕软X射线Fe XVII光谱线诊断的理论研究

廖腊梅¹, 曹虹¹, 时永鹏¹, 贺健²

¹洛阳师范学院物理与电子信息学院, 河南 洛阳

²河南科技大学物理工程学院, 河南 洛阳

Email: hejian405@163.com

收稿日期：2015年2月15日；录用日期：2015年2月27日；发布日期：2015年3月3日

摘要

本文以太阳日冕软X射线Fe XVII光谱线中1.501 nm谱线为例，分析了不透明度对1.501 nm谱线的影响，再讨论了太阳日冕等离子体温度和电子数密度的诊断原理。结果表明，太阳日冕等离子体温度的数量级为 10^6 K，电子数密度的数量级为 10^{10} cm⁻³，这些都和实际观测数量级完全相同。通过分析，得到了一些重要结论。本研究对太阳日冕等离子体诊断具有重要的参考意义和价值。

关键词

太阳日冕，不透明度，等离子体温度，电子数密度

1. 引言

日冕处于太阳大气的最外层，厚度达到几百万 km，温度有 100 万 K。在高温条件下，氢、氦、碳、氧等原子序数比较小的原子被电离成带正电的质子、原子核和带负电的自由电子等，物质以等离子体形式存在。日冕层辐射的电磁波段范围极广，包括 X 射线、紫外线、可见光和红外线。

太阳等离子体光谱诊断，就是从太阳等离子体中两条离子辐射线的强度比，分析等离子体的电子温度、离子温度和电子数密度等参量。因此，谱线强度的准确描述对太阳等离子体诊断具有非常重要的意义。早期的太阳等离子体光谱诊断中，均假定谱线是光学薄的。然而，对于太阳等离子体的辐射谱，理论和实践均表明，很多谱线不能看做光学薄的，因此需要考虑不透明度对特定谱线的影响[1]。

太阳极大年任务(SMM)从 1980 年 2 月升空到 1989 年 12 月落地，跨越了 21 周太阳峰年和 22 周峰年的上升期，其上搭载的平板晶体光谱仪(FCS)，视场为 15"，能够扫描软 X 射线 0.1~2 nm 共振线光谱范围 [2]。

Fe XVII 的离子跃迁，产生了太阳日冕软 X 射线的最强辐射线，包含五条辐射线，对应波长分别为 1.501 nm、1.526 nm、1.678 nm、1.705 nm 和 1.710 nm。日冕条件下这些谱线信息对太阳等离子体诊断具有重要意义：

- 1) 这些谱线占据了软 X 射线的大部分区域，相对于其他软 X 射线，这些谱线可用来检验很小的活动区域；
- 2) 这些谱线的振子强度差别非常大，可用光学厚等离子体来诊断太阳日冕的电子数密度；
- 3) 谱线强度比与电离分数无关，因此可用谱线强度比来诊断太阳日冕的温度；
- 4) 这些谱线具有有限的波长范围(1.501~1.710 nm)，因此仪器定标不确定度是最小的。

因此在本文中，我们以报道不透明度影响最大的太阳日冕 1.501 nm 谱线为例，来分析其光学厚度的大小，并根据报道数据，对太阳日冕的温度和电子数密度诊断的原理进行分析和理论模拟。

2. 不透明度对 Fe XVII 离子 1.501 nm 谱线影响的基本理论和观测结果

在太阳光谱测量中，通常用光通量描述光强的相对大小。谱线的光通量可以表示为

$$F_{ij} = \frac{1}{4\pi R^2} A_{ji} \int n_j dV \quad (1)$$

其中 F 的单位为 photon·cm⁻²·s⁻¹， R 为测量半径， A_{ji} 为爱因斯坦自发辐射系数， n_j 为高能级离子数密

度， V 表示体积。假定离子分布均匀，上式可写为

$$F_{ij} = \frac{1}{4\pi R^2} A_{ji} N_j \quad (2)$$

其中， N_j 为高能级离子数。

因此，在光学薄条件下，两条具有共同低能级谱线的光通量之比为

$$\frac{F_{ij}}{F_{ik}} = \frac{A_{ji} N_j}{A_{ki} N_k} \quad (3)$$

通常利用(3)式来判断不透明度对辐射谱线影响大小。若实际观测到强度比和(3)式比较接近，说明不透明度对 $(i-j)$ 跃迁辐射谱线影响较小；若实际观测到强度比远小于(3)式，说明不透明度对 $(i-j)$ 跃迁辐射谱线影响较大。

在光学厚条件下，要考虑不透明度对谱线强度的影响。一个简单实用的方法是逃逸因子理论。根据逃逸因子的基本概念，在光学厚条件下，爱因斯坦自发辐射系数 A_{ji} 减小为 $A_{ji} P_{ji}$ ，其中 P_{ji} 称为逃逸因子，是光学厚度 τ_{ji} 的函数[3]。因此在光学厚条件下，两条具有共同低能级谱线的光通量之比为

$$\frac{F_{ij}}{F_{ik}} = \frac{A_{ji} P_{ji} N_j}{A_{ki} P_{ki} N_k} \quad (4)$$

在无限大平板和高斯展宽条件下，逃逸因子和光学厚度的函数关系为[4]

$$P_{ji} = \exp\left(-\frac{\tau_{ji}}{1.73}\right) \quad (5)$$

在此，我们以太阳日冕中 Fe XVII 离子跃迁产生的软 X 射线中不透明度影响最大的 1.501 nm 和影响最大的 1.678 nm 为例，来分析不透明度对 1.501 nm 谱线影响的大小。这两条谱线的辐射特性如表 1 所示[5]。

根据(3)式和表 1 中的相关数据，在电离程度最高的日冕温度 $T = 3.16 \times 10^6$ K 条件下，利用离子数密度分布的玻尔兹曼分布，即

$$\frac{N_j}{N_k} = \exp\left(-\frac{\Delta E_{jk}}{kT}\right) \quad (6)$$

其中， k 为玻尔兹曼常数。可以得到，在光学薄条件下，1.501 nm 和 1.678 nm 谱线的强度比为 20.08。

然而，根据实际观测数据，1.501 nm 和 1.678 nm 谱线的强度比在 0.81~1.39 之间，平均值为 1.08，远远小于光学薄条件下的比值 20.08，说明不透明度对 1.501 nm 影响非常大。因此，在后面讨论中，我们以 1.501 nm 谱线为例，来分析太阳日冕温度和电子数密度的诊断方法。

3. 太阳日冕温度和电子数密度的诊断原理

谱线中心的光学厚度可表示为[6]

$$\tau_{ji} = 1.16 \times 10^{-6} \sqrt{\frac{M}{T}} \lambda_{ji} f_{ji} A_i A n_e L \quad (7)$$

其中， M 为原子量， f_{ji} 为振子强度， n_e 为电子数密度，对研究的两条谱线 $A_i = 0.776$ 为离子电离分数， $A = 3.24 \times 10^{-5}$ 为元素丰度。

从(7)式可以得到，1.501 nm 和 1.678 nm 谱线光学厚度之比为

Table 1. Radiation characters of 1.501 nm and 1.678 nm spectral lines
表 1. 1.501 nm 和 1.678 nm 谱线的辐射特性

离子	波长(nm)	跃迁	振子强度	自发辐射系数(s ⁻¹)	能量(cm ⁻¹)
Fe XVII	1.501	¹ S ₀ - ¹ P ₁	2.660	2.28 × 10 ¹³	6,660,000
Fe XVII	1.678	¹ S ₀ - ³ P ₁	0.101	8.29 × 10 ¹¹	5,960,870

$$\frac{\tau_{ji}}{\tau_{ki}} = \frac{\lambda_{ji} f_{ji}}{\lambda_{ki} f_{ki}} = 23.56 \quad (8)$$

再根据(4)式和(5)式及实际观测强度比的平均值, 经过计算可以得到对 1.501 nm, 其光学厚度为

$$\tau_{ji} = 0.22 \quad (9)$$

通常利用谱线中心光学厚度 τ_{ji} 的大小描述不透明度对光谱线影响大小, 一般认为若某条谱线中心光学厚度 $\tau_{ji} > 0.05$, 即认为不透明度对光谱线有较大影响。对太阳日冕 Fe XVII 离子 1.501 nm 谱线, 谱线中心光学厚度达 0.22, 说明不透明度对光谱线有很大影响。

根据(4)式和(6)式, 我们有

$$\frac{F_{ij}}{F_{ik}} = \frac{A_{ji} P_{ji}}{A_{ki} P_{ki}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{jk}}{kT}\right) \quad (10)$$

经过整理, 可以得到等离子体温度可以表示为

$$T = \frac{\Delta E_{jk}}{k \ln \frac{F_{ik} A_{ji} P_{ji}}{F_{ij} A_{ki} P_{ki}}} \quad (11)$$

把相关数据带入, 上式化简为

$$T = \frac{10^6}{\ln 1.48R} \quad (12)$$

其中, $R = \frac{F_{ij}}{F_{ik}}$ 为观测强度比。当观测强度比从 0.81 到 1.39 变化时, 可以得到太阳日冕等离子体温度变化如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 太阳日冕等离子体的温度的数量级为 10^6 K, 这 and 实际观测和理论预言的数量级完全相同; 随着观测强度比的增大, 等离子体的温度会减小。

根据(7)式, 我们可以得到电子数密度

$$n_e = \frac{\tau_{ji} \sqrt{T}}{1.16 \times 10^{-6} \sqrt{M} \lambda_{ji} f_{ji} A_i A_L} \quad (13)$$

带入相关数据, 可以得到

$$n_e = 1.03 \times 10^7 \sqrt{T} \quad (14)$$

根据图 1 中的数据, 当观测强度比从 0.81 到 1.39 变化时, 可知等离子体温度从 1.38×10^6 K 到 5.55×10^6 K 变化, 因此根据(14)式, 我们可以得到电子数密度随温度的变化关系, 结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 太阳日冕电子数密度的数量级为 10^{10} cm⁻³, 和实际观测的电子数密度的数量级完全相同; 且随着等离子体温度的升高, 电子数密度会增大。

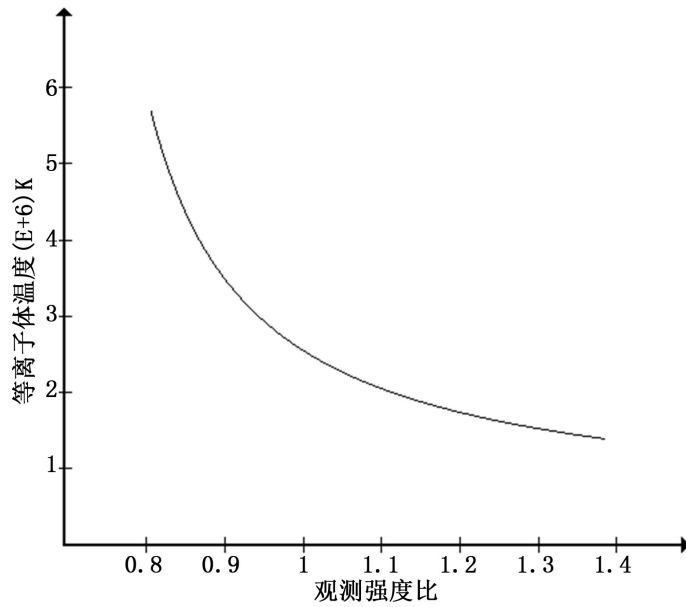


Figure 1. Relation of plasma temperature and observed intensity ratio
图 1. 等离子体温度和观测强度比的关系

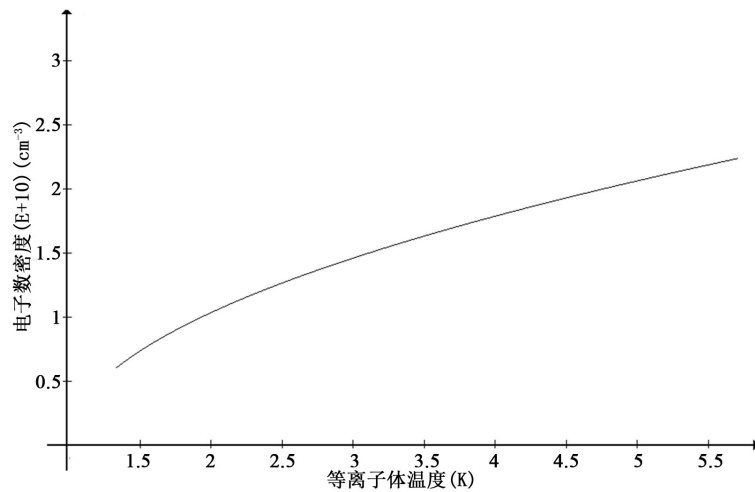


Figure 2. Relation of electron density and plasma temperature
图 2. 电子数密度和等离子体温度的关系

4. 结论

本文分析了不透明度对太阳日冕软 X 射线 Fe XVII 光谱线中 1.501 nm 谱线的影响，然后讨论了太阳日冕等离子体温度和电子数密度的诊断原理。通过分析，可以得到以下重要结论：

- 1) 太阳日冕软 X 射线 Fe XVII 光谱线中 1.501 nm 谱线中心光学厚度为 $\tau_{ji} = 0.22$ ，且实际观测 1.501 nm 和 1.678 nm 谱线强度比远小于光学薄条件下的值，表明不透明度对 1.501 nm 谱线影响很大；
- 2) 太阳日冕等离子体的温度的数量级为 10^6 K，这和实际观测和理论预言的数量级完全相同；随着观测强度比的增大，等离子体的温度会减小；
- 3) 太阳日冕电子数密度的数量级为 10^{10} cm^{-3} ，和实际观测的电子数密度的数量级完全相同；且随着等离子体温度的升高，电子数密度会增大。

基金项目

国家自然科学基金(No.11205047)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Brichhouse N S, Schmelz J T. *Astrophysical Journal Letters*, 2006, 636: L53-L56
- [2] Schmelz J T, Saba J L R, Strong K T. *Astrophysical Journal*, 1992, 398: L115-L118
- [3] He J, Zhang Q G. *Advances in Space Research*, 2013, 51: 2002-2009
- [4] He J, Liao L M. *Spectroscopy Letters*, 2012, 45: 452-457
- [5] Saba J L R, Schmelz J T, Bhatia A K, Strong K T. *Astrophysical Journal*, 1999, 510: 1064-1077
- [6] Kastner S O, Bhatia A K. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1997, 58: 217-231