



# 南京大學

## 本科畢業論文

院 系 匡亞明學院

專 業 天文學

題 目 彗星與太陽風的電荷交換過程

年 級 2014 學 號 141250154

學生姓名 邢澤曦

指導老師 蘇萌 李志遠 職 稱 副教授 教授

論文提交日期 2018 年 6 月 15 日

# 南京大学本科生毕业论文（设计）中文摘要

毕业论文题目：彗星与太阳风的电荷交换过程

匡亚明学院 院系 天文学 专业 2014 级本科生姓名：邢泽曦

指导教师（姓名、职称）：苏萌 副教授；李志远 教授

## 摘 要

彗星与太阳风的电荷交换过程对理解该过程本身、以太阳风为代表的恒星风、彗星的性质和结构等都有重要的作用。针对近地彗星出现的频率低、偶然性大导致给观测带来的挑战，我们预计在近期发射一颗极紫外波段的空间探测器，将观测彗星电荷交换过程作为科学目标之一。本研究即旨在为该探测器选择合适的设计能段。在充分调研和总结彗星与太阳风电荷交换过程的基本概念、发现和证认过程、理论模型的建立和发展等背景信息之后，本文详细介绍了研究的方法和对结果的讨论。研究用 SPEX 软件包中的电荷交换模型[19]对 Chandra X 射线天文台观测到的 5 颗彗星的光谱进行了迭代拟合。考虑到日冕物质抛射的情况，又对彗星 153P/2002 引入了镁、硅和铁元素的丰度三个自由参数重新拟合。最终得到了 5 个彗星的拟合结果，并以此预言了彗星在极紫外波段的谱线。随后通过与 AtomDB 中的数据进行比对，成功证认出极紫外波段较强的发射线，通过统计给出了对探测器设计的建议：根据可能的分辨能力选择不同的能段，同时注意避免探测器响应函数的影响。最后对研究可能的改进和未来的方向进行了展望。

关键词：彗星；太阳风；电荷交换过程；X 射线；极紫外波段

# **南京大学本科生毕业论文（设计）英文摘要**

THESIS : Solar Wind Charge Exchange in Comets

DEPARTMENT : Kuang Yaming Honors School

SPECIALIZATION: Astronomy

UNDERGRADUATE: Zexi Xing

MENTOR: Associate Professor Meng Su ; Professor Zhiyuan Li

## **ABSTRACT**

Solar wind charge exchange process in comets plays an important role in understanding the process itself, the stellar wind represented by the solar wind, the nature and structure of comets, and so on. In view of the low frequency and occasional nature of near-Earth comets that pose challenges for observations, we expect to launch a space detector in the extreme ultraviolet band in the near future. Observing solar wind charge exchange process in comets will be one of its scientific goals. Thus this study is intended to select an appropriate bandpass for the detector. After fully investigating and summarizing the background information of the basic concepts, discovery and identification process, theoretical model establishment and development of solar wind charge exchange process in comets, this paper introduces the research methods and discusses the results in detail. The charge exchange (CX) model in the SPEX software package [19] was used to iteratively fit the spectra of five comets observed by Chandra X-ray Observatory. Taking into account the coronal mass ejection, the three free parameters of magnesium, silicon, and iron elements were introduced into the comet 153P/2002 to re-fit. Finally, the fitting results of five comets are obtained, which predicts the spectral lines

of comets in the extreme ultraviolet band. Then by comparing with the data in AtomDB, we successfully identify some strong extreme ultraviolet emission lines, and give a proposal for the design of the detector by statistics: Select different energy band according to the possible resolution, and at the same time pay attention to the detector's response function. Finally, we look into the possible improvements and future directions.

KEY WORDS: Comets; Solar wind; Charge exchange process; X-ray; Extreme ultraviolet

# 目录

第一章 引言 .....	1
第二章 基本原理与观测历史 .....	4
2.1 彗星的基本介绍 .....	4
2.2 太阳风的基本介绍 .....	5
2.2.1 起源与成分 .....	5
2.2.2 传播 .....	6
2.2.3 快太阳风和慢太阳风 .....	6
2.2.4 彗星位置的太阳风的推算 .....	7
2.3 太阳风与彗星间电荷交换过程的发现 .....	8
2.4 彗星 X 射线辐射的特点 .....	9
2.4.1 空间分布 .....	9
2.4.2 光度 .....	10
2.4.3 时间变化 .....	10
2.4.4 光谱 .....	11
2.5 彗星 X 射线/极紫外辐射的证认 .....	12
2.6 电荷交换过程产生 X 射线的机制 .....	13
第三章 太阳风与彗星间电荷交换的理论模型 .....	15
3.1 模型建立和应用简况 .....	15
3.1.1 空间分布 .....	15
3.1.2 光度随时间的变化 .....	16
3.1.3 光谱 .....	16
3.2 光谱模型的建立 .....	17
3.2.1 彗星模型, 太阳风模型和两者的相互作用模型 .....	17
3.2.2 碰撞截面和跃迁概率的获取 .....	18
3.2.3 对光谱模型的分析 .....	20
3.2.4 本研究所使用模型的简述 .....	21
3.3 模型拟合的难点 .....	22
3.3.1 高纬度地区太阳风的观测 .....	22
3.3.2 软 X 射线背景 .....	22
3.3.3 影响观测结果的因素众多 .....	23

3.3.4 光谱观测的分辨率低.....	23
<b>第四章 对彗星光谱的拟合 .....</b>	<b>23</b>
4.1 研究计划 .....	23
4.2 数据介绍 .....	24
4.3 基本数据处理 .....	28
4.3.1 减去背景.....	28
4.3.2 格式转换.....	30
4.4 X 射线波段的光谱拟合.....	30
<b>第五章 拟合结果分析 .....</b>	<b>32</b>
5.1 对拟合结果的讨论 .....	32
5.2 对紫外波段的预测 .....	35
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>40</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>42</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>45</b>

## 第一章 引言

1996 年, EUVE 探测器和 ROSAT 卫星对彗星 C/1996 B2 (Hyakutake) 的观测首次发现来自彗星的强 X 射线辐射[2][3]。因为 X 射线和极紫外辐射通常与高温环境有关, 而根据脏雪球模型, 气体状彗发的温度却大概仅为 50K。这出人意料的观测结果要求着新理论的出现。根据不断的新的发现和观测数据, 多种猜想被提出又被一一都被否决(详见 2.5), 只有太阳风的电荷交换过程和微尘埃散射的可能性较大[5]。彗星 C/1999 S4 的 X 射线辐射的发现证明了前者最为主要[8]。

彗星与太阳风的电荷交换机制可以简单地作以下概括。当彗核从遥远的空间飞向太阳, 距离太阳约 3~4AU 时, 彗核内的物质开始升华, 形成以水分子和尘埃为主的彗发。水分子在光解和光致电离的作用下产生 H, OH, H<sub>2</sub> 等分解物。当彗发与太阳风发生相互作用时, 太阳风中的重离子可俘获这些分子中的电子, 即发生电荷交换作用。电子一般被俘获至激发态, 在跃迁至基态的过程中可以发出 X 射线辐射和(极)紫外辐射。太阳风的速度一般在 250~750km s<sup>-1</sup>, 相当于入射离子与彗星分子的碰撞能量在 1~5keV s<sup>-1</sup>。在此能量下, 碰撞截面较大( $10^{-15}\text{cm}^2$ ), 可以产生较强的单电子俘获(即彗星分子中的单个电子被入射离子俘获), 从而辐射出足以被探测到的 X 射线和(极)紫外光子。

研究彗星与太阳风的电荷交换过程对理解该过程本身有重要的意义。因为彗星分子的温度较低, 所以几乎不会产生热 X 射线辐射; 因为彗星周围没有强电磁场, 所以由高能电子产生的 X 射线也可被忽略; 因为彗核较小, 彗发和彗尾也足够稀疏, 所以就没有足够的靶粒子来散射太阳产生的 X 射线[12]。这些原因就使得电荷交换过程在彗星产生的 X 射线中占有绝对重要的比重( $\geq 90\%$ , [12])。因此, 彗星也许可以提供理解电荷交换过程最好的空间。

因为彗星 X 射线和紫外辐射的产生综合了彗星的气体产生速率、太阳风速度和重离子成分, 所以这项研究也对厘清彗星的性质和结构, 与以太阳风为代表的恒星风有深刻的影响。对于彗星而言, 活动彗星的气体产生速率在  $10^{29}\text{mol s}^{-1}$  以上, 在 X 射线波段从侧面观测时呈现为新月形, 通过新月中心与彗核的距离可

以进一步了解气体产生速率，弱活动彗星则会在核、喷流等结构周围较为明亮，对于研究彗星的这些结构有所帮助。彗星辐射随时间的变化也可以反映彗星喷发等事件的发生[17]。更重要的还是对太阳风来说，彗星的电荷交换有四个方面的优势：1. 彗发的体积大，可以达到  $10^5\text{km}$ ，使太阳风与彗发反应的概率和程度大大增加；2. 彗星的数量稳定。根据现有理论，能与太阳风发生电荷交换的彗星大部分来自于奥特星云和柯伊伯带，长期来看彗星的数量稳定，一般不会出现某些年份的数量极少的情况，所以可以监视 11 年太阳周期的各个时期；3. 彗星的分布广，被观测到的彗星可有广泛的黄纬分布，实际上，因为太阳风传播机制的不完善和探测能力的限制，直到现在，研究彗星的电荷交换也几乎是唯一研究黄道面以外区域的太阳风的途径；4. 相应观测相对容易，随着 X 射线和紫外波段探测器的发展，已经有超过 20 颗彗星的相关辐射被探测到（详见表 4-1），这些观测样本提供了多种多样的反应环境和观测条件，大大发挥了彗星电荷交换的诊断意义。

此外，因为彗星产生的 X 射线也有可能成为太阳系外 X 射线源的前景辐射，所以对彗星电荷交换的准确模拟有助于 X 射线改正。彗星展源的特征是研究二维弓形激波的一个重要窗口。所以这项研究可以涉及并惠及包括电荷交换过程、原子物理基本数据和天体（太阳风，彗星）性质在内的多个课题。

因彗星电荷交换的重要性和不可替代的作用，对它的观测越来越受到重视。彗星的特点使测光和分光观测都很重要：彗星是展源，测光观测可以分辨空间结构；光谱中谱线的波长和强度是理解交换过程的关键；此外，彗星电荷交换数据随时间频繁的变化使修正彗星运动和辨析太阳风事件（日冕物质抛射，共旋相互作用，耀斑等）成为可能。到目前为止，已经有一些轨道天文台对彗星的 X 射线辐射进行过观测：ROSAT, EUVE, BeppoSAX, Chandra X 射线天文台 (CXO), XMM-Newton 和 Suzaku。此外，Einstein 卫星，XTE 和 ASCA 对彗星中的 X 射线的观测并未成功。

然而，由于目前观测能力的限制，只有 20 多颗彗星有 X 射线波段的观测数据，且普遍的低分辨率也限制了对这些数据的分析，观测和分析的潜力还很大。比如，最初观测的光谱分辨率仅足以分辨慢快太阳风两部分，不能辨析太阳风离子的相对丰度，随着谱分辨率的提高，C、N、O、Ne、Mg 和 Si 的谱线逐渐得以分



辨，但仍有不少缺陷：太阳风离子不同电荷态（如  $C^{5+}$  和  $C^{6+}$ ）的谱线还不能得以分辨，影响了离子比的计算，进而影响对太阳风性质的分析，还有因日冕物质抛射可能产生的铁线不能被分辨，从而影响对其他元素的判断，等等。这些限制亟待由新的更高分辨率或者更强观测能力的探测器来解决。

所以我们打算在近期（2019-2020 年）发射一颗极紫外波段的空间探测器，将对彗星的观测作为主要目标，弥补以上缺憾。太阳风中最丰富的  $He^{2+}$  和  $O^{6+}$  与彗星发生电荷交换时发射线就会落在紫外波段，对这一波段的观测数据却十分有限。未来 2-3 年也恰逢太阳活动极小期，可以扩大快太阳风环境的数据样本量。另外，预计将于 2018 年年底发射的龙虾眼 X 射线轨道天文台也会将这一过程作为科学目标之一，在 X 射线波段对彗星进行观测，后者的大视场（约  $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ ）对寻找和观测黄道面附近的彗星很有利。

为了确定紫外探测器的性能指标，我们需要尽快确定需要重点观测的波段。所以本课题就试图以彗星在 X 射线波段的数据为基础，预言不同环境中的彗星在紫外波段可能产生的谱线，找到较强烈和较易分辨的谱线，从而为空间探测器的制造提供理论帮助。

本研究选择采用已有的模型—SPEX 软件包中的电荷交换模型[19]对 CX0 的数据进行拟合。这些数据也曾被多篇文献用其他模型研究过，可以与我的拟合结果进行比较，从而对拟合过程进行补充和完善。再用拟合结果的参数分别对每颗彗星模拟极紫外波段的光谱，证认特征谱线，得到理论结果。贯穿整个过程的文献调研也是本课题的重要任务。

本文从基本原理入手，对彗星、太阳风和电荷交换过程的一些基本概念和统计/计算参数进行了说明，并由彗星产生 X 射线的原因的证认介绍了此过程的特点（第二章）；然后介绍了彗星电荷交换的理论模型，在碰撞截面的获取、跃迁概率的计算、对光谱的分析和难点等方面进行了总结，并简单介绍了采用的模型，为后文对光谱的拟合做了铺垫（第三章）；接下来是对拟合过程的说明，结合文献详细展示了数据处理和拟合过程（第四章）；后面是对拟合结果的讨论和对拟合结果中谱线的证认，得出了初步的结论（第五章）；最后是对进一步研究的展望（第六章）。

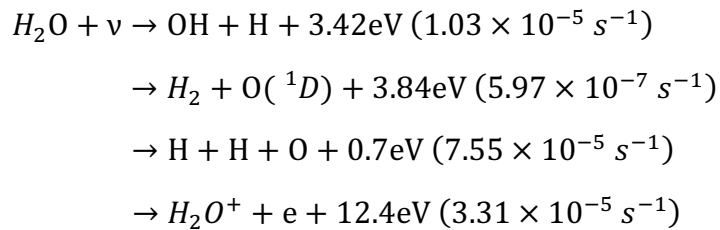
## 第二章 基本原理与观测历史

### 2.1 彗星的基本介绍

脏雪球模型是广泛认可的彗核模型，指彗核是  $1\sim 15\text{km}$  的冰和凝结的粒子的混合物，有不规则的形状。绕日周期在 200 年之内的彗星被称为短周期彗星，周期更长的彗星被称为长周期彗星。后者一般被认为来自于距太阳至少  $10^3\text{AU}$  的奥特星云。据估算，奥特星云中有  $10^{11}$  到  $10^{12}$  个彗核，总质量在  $1\sim 50$  个地球质量。短周期彗星则是起源于海王星轨道 ( $30\text{AU}$ ) 外的柯伊伯带，矮行星冥王星和冥卫一也在其中。柯伊伯带更接近盘状，所以来自柯伊伯带的彗星一般比来自奥特星云的彗星有更小的轨道倾角 ( $<30^\circ$ )。[16]

彗星会形成富有特点的两种彗尾。一般来说，两条彗尾可以被分辨出来：一条是散射太阳光形成的白色的尘埃尾，另一条是荧光机制形成的蓝色的离子尾。尘埃尾中的尘埃粒子被光压从彗发中推出，并因开普勒定律发生弯曲。离子尾的动力学原理一直到太阳风的发现才得以确认：太阳风卷携了彗发中的离子，将它们吹成了笔直的粒子尾，因此总是背离太阳。离子尾的延展通常能超过  $1\text{AU}$ 。

当彗星接近太阳时，气体就会从彗核中升华，形成由气体和尘埃组成的彗发。挥发出的气体主要是  $\text{H}_2\text{O}$ ， $\text{CO}$  ( $<30\%$ )， $\text{CO}_2$  ( $<10\%$ ) 和少量其他物质。因为彗星的引力不足以束缚这些气体，彗发的区域就一直延展，直到被太阳光电离或分解。在  $1\text{AU}$  处，气体分子的典型寿命为约  $10^5\text{s}$ ，但在不同分子中也会有很大差异。 $\text{H}_2\text{O}$  的分解过程主要有以下几种[14]，



括号中是宁静太阳条件下距太阳  $1\text{AU}$  处左右的反应速率。第一个反应最有可能，在 86%左右。在分解之后，释放出的  $3.24\text{eV}$  的动能使  $\text{OH}$  分子和氢原子分别获得  $1.5\text{km s}^{-1}$  和  $26\text{km s}^{-1}$  的速度，因此氢原子可以被从彗发中抛射出，在彗核周围形成很大的晕。而  $\text{OH}$  分子则很可能继续通过光致分解等产生产物粒子，继

续被加速。所以彗发内部 ( $10^5\text{km}$ ) 是以  $\text{H}_2\text{O}$  为主导, 最边缘处则是被电离的  $\text{O}$  和  $\text{H}$  为主导。 $\text{CO}$  的寿命更长, 所以在彗发外部的含量相对于内部会有所提高。下图是距彗核不同距离处的原子/分子的密度分布[14]。

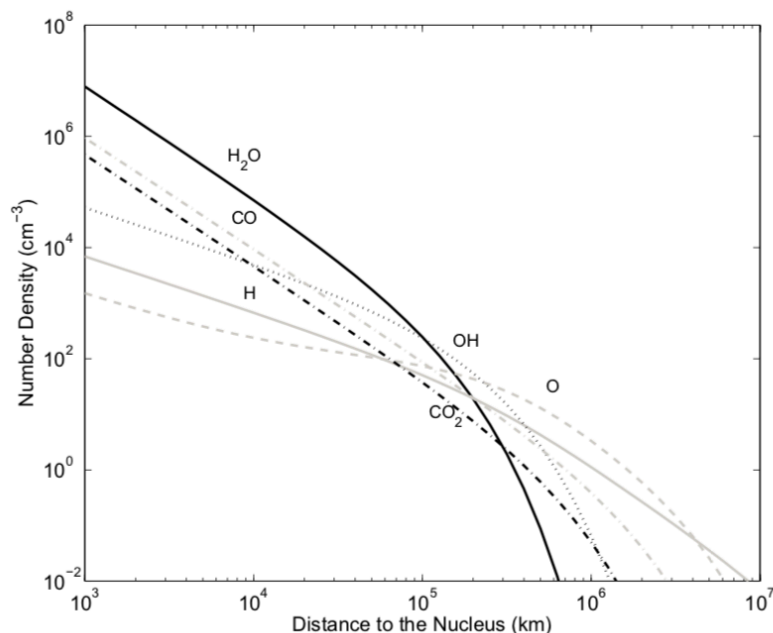


图 2-1 在距太阳 1AU 处气体产生速率为  $10^{29}\text{mole s}^{-1}$  的彗星的密度分布模型

## 2.2 太阳风的基本介绍

### 2.2.1 起源与成分

太阳风是一种高度电离并很稀薄的气体 (即等离子体)。其源位于日冕中, 气体致密且高温 ( $10^6\text{K}$ ), 处于碰撞平衡状态, 每秒钟约有  $10^9\text{kg}$  的物质被抛射成为太阳风。在几个太阳半径之内的气体外流区内, 从中心向边缘的密度很快下降, 碰撞不再频繁。日冕本身也是很强的 X 射线源。太阳风和日冕都有“太阳”的成分——占体积 92% 的氢, 8% 的氦和 0.1% 的重离子。因为日冕温度很高, 这些更重的“次级离子”都被高度电离 (比如氧就有类氢的  $\text{O}^{7+}$  和类氦的  $\text{O}^{6+}$ ,  $\text{N}^{6+}/\text{N}^{5+}$ ,  $\text{C}^{5+}/\text{C}^{4+}$ ,  $\text{Ne}^{8+}$ ,  $\text{Si}^{9+}$  等等)。但因为太阳风源的变化和太阳风本身的动力学的变化, 离子的电荷态会随时间发生显著变化。常用来表征太阳风的成分的参数是冻结温度 (freeze-in temperature), 定义是某元素中相邻两种电荷态的离子达到电离平衡 (丰度比达到平衡) 时的电子温度[9]。

## 2.2.2 传播

在日冕中太阳风缓慢外流，但是到几个太阳半径时会变为超音速。气体膨胀时逐渐冷却，在 1AU 处从  $T \sim 10^6 \text{K}$  冷却到  $T \sim 10^5 \text{K}$ ，质子数密度约为  $7 \text{cm}^{-3}$ ，速度约为  $450 \text{km s}^{-1}$ ，磁场强度约为 5nT，马赫数约为 8[11]。然而，在远离太阳的位置的成分仍与日冕中的值十分接近。在地球周围，每平方厘米的太阳风包括大约 9 个质子，10 个电子，0.5 个  $\alpha$  粒子和少量重离子[11]。太阳风的速度和成分结构也可根据日冕中的情况进行推算。太阳风在激波中“结束”（即到达太阳风顶层），从日冕到太阳风顶层的空间区域大概有 100AU，被称为日光层。很小的一部风太阳风会与行星和彗星发生相互作用；大量的太阳风则与日光层和顶层中中性的星际介质气体和顶层中电离态的星际介质发生相互作用[11]。

当彗星中的粒子被太阳辐射或太阳风电离时，太阳风就与彗星离子混合在一起。太阳风中离子质量的增加使太阳风的速度变慢，在彗星前面还会形成弓形激波。弓形激波不会影响太阳风内离子电荷态的分布，而会降低流的速度，升高温度。比如，从激波前的超音速到激波后的次音速的变化发生在哈雷彗星半径约  $4 \times 10^5 \text{km}$  的位置。离核越近，彗星气体的密度就越高，碰撞也更频繁，太阳风流就几乎停滞，X 射线最亮的位置就在这个区域。磁场线会在此区域的磁塞中堆积，在彗头前扭曲，形成了下风方向并可在光学波段观测到的等离子尾[9]。

## 2.2.3 快太阳风和慢太阳风

太阳风主要以两种状态存在，分别被称为慢太阳风和快太阳风，但是两者之间的区别不仅仅是速度。在近地空间中，慢太阳风的速度约为  $300\text{--}500 \text{km s}^{-1}$ ，温度约为  $1.4 \sim 1.6 \times 10^6 \text{K}$ ，成分与日冕中的成分类似。快太阳风的典型速度大约为  $750 \text{km s}^{-1}$ ，温度约为  $8 \times 10^5 \text{K}$ ，与太阳的光球层的成分接近。慢太阳风的密度大约是快太阳风的两倍，并且比后者更易随时间变化[14]。

慢太阳风一般起源于太阳的赤道附近的日冕中，物质释放的具体机制尚有争议。从 1996 到 2001 年的观测表明在太阳活动极小期，慢太阳风是黄纬约  $30^\circ$  内的区域发射的，随着太阳周期接近极大期，慢太阳风的纬度区域逐渐向两级拓展。在太阳活动极大期，甚至两极也能发射慢太阳风。

较冷的快太阳风源于太阳磁场中漏斗状的开放的一个区域——冕洞。这种开放的磁场线在太阳的磁极比较普遍。快太阳风所含离子的电荷量一般比慢太阳风低。

表 2-1 两种太阳风的特征参数[14]

参数	慢太阳风	快太阳风
速度	300-400km s <sup>-1</sup>	700-800km s <sup>-1</sup>
密度	10cm <sup>-3</sup>	3cm <sup>-3</sup>
流量	3×10 <sup>8</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	2×10 <sup>8</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
结构	极异变	均匀，缓慢变化
He/H	1-30%	5%
T <sub>f</sub> (O <sup>7+</sup> /O <sup>6+</sup> )	1.2-1.7MK	≤1.2MK
日冕结构	条带	冕洞
太阳活动极小期的纬度	≤15°	>30°
太阳活动极大期的纬度	所有纬度	一般以瞬变形式出现

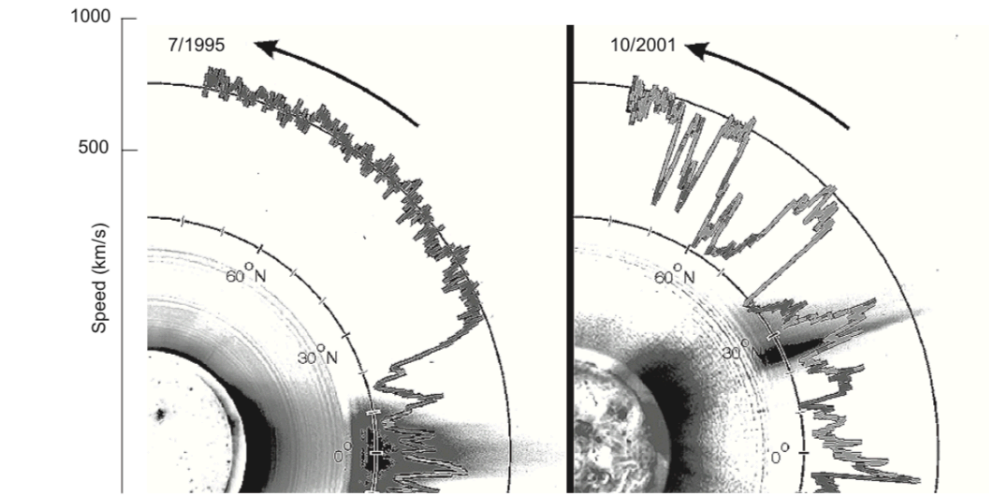


图 2-2 太阳活动极小期（左）和极大期（右）时的太阳风速度（Ulysses/swoops 组）[14]

### 2. 2. 4 彗星位置的太阳风的推算

太阳风的数据一般可以从 ACE 和 SOHO 的线上数据库中获取（ACE：从 SWEPAM 获得质子速度和密度，从 SWICS 和 SWIMS 获得重离子流量；SOHO：从质子监测器获得质子流量）。ACE 和 SOHO 都位于地球的 L1 点附近，所以要想根据此位置的信息推算彗星位置的太阳风信息，就要知道彗星和探测器的准确位置、在三维空间中的传播机制（速度和成分的变化）和太阳风信息随时间的变化。然而，由于探测器的限制，对高纬区域的太阳风的研究还很少，太阳风的传播机制模型尚不

完善。此外，有时快太阳风也可能被从太阳赤道附近的冕洞抛射出来，与慢太阳风形成共旋相互作用区域（CIR），日冕物质抛射（CME）也可能会干扰两种太阳风的传播，这些太阳风的磁流体动力学行为的偶发性也加大了传播模型建立的难度。

## 2.3 太阳风与彗星间电荷交换过程的发现

空间科学诞生自第二次世界大战后的 1946 年，当时德国的军事 V2 火箭被美国作为战利品用于研究太阳和上层大气的紫外光谱。在 1957 年，前苏联的 Sputnik 卫星发射之后，空间中的长期实验也成为了可能。1962 年，一次对月球 X 射线的观测却导致了对太阳系外 X 射线源的首次发现[1]。这次意料之外的观测孕育了 X 射线天文学。

对彗星的 X 射线的观测同样在意料以外。这主要得益于活动彗星 C/1996 B2 在飞跃地球时与地球的极近距离（大约 0.1AU）。在 1996 年 3 月 21 日至 24 日这颗彗星被极紫外探测器 EUVE 第一次探测到 X 射线和极紫外波段的辐射，且在该次观测中，软 X 射线照相机有始料未及的强烈信号出现，证明了该彗星为极强的软 X 射线源。在 1996 年 3 月 26 日至 28 日，该彗星又被 ROSAT 卫星观测到，观测数据被第一次公开[2]。将对 C/1996 B2 的观测结果和对月球的 X 射线的观测结果进行比较可以得到有趣的结果：假定平均光子能量和望远镜的有效面积后，可以推得其 X 射线光度为  $4 \times 10^{15} \text{erg s}^{-1}$ ，比月球高了 6000 倍，另外，彗发和月球的有效半径分别是  $5 \times 10^4 \text{km}$  和 1740km，该彗星的 X 射线对可见光波段的比值也要远远高于月球，综合这些考虑，此彗星的 X 射线辐射效率要比月球高 80,000 倍。

如此高效的 X 射线辐射引起了天文学家们的关注。在此之后，一系列的观测数据表明，太阳系内几乎所有视亮度在 12 星等以下的彗星（ $\leq 2\text{AU}$ ）都能被探测到 X 射线辐射（Dennerl 等 1997）。在 0.2 至 1.0keV 的波段内总 X 射线能大概在 0.004–1.2GW，并且辐射强度随时间变化。此外，大部分的彗星在 X 射线能段的测光图像上都呈现为新月形。根据这些发现，1997 年，Krasnopolsky 对可能的 14 种辐射机制进行了讨论[5]，证明只有与太阳风的电荷交换过程和微尘埃散射是可能的原因。彗星 C/1999 S4 的 X 射线辐射的发现证明了前者最为主要。

## 2.4 彗星 X 射线辐射的特点

彗星 X 射线辐射的特点主要可以被归为四类：（1）空间分布，（2）总 X 射线光度，（3）时间变化，（4）能谱。解释彗星 X 射线的物理机制要从这四类特点入手。

### 2.4.1 空间分布

所有彗星的 X 射线和紫外波段都有相似的空间分布。这些射线一般都只出现在彗核和太阳连线之间的彗发中，在尘埃尾或离子尾中均未发现该波段的发射线。随着离彗核的距离  $r$  的增大，X 射线的亮度以大概  $r^{-1}$  或  $r^{-2}$  的关系逐渐递减。在距离弱活动彗星约  $10^4\text{km}$  的地方，或距离很明亮的彗星约  $10^6\text{km}$  的地方，X 射线的亮度就降低到软 X 射线背景的程度。辐射最亮的区域呈新月形，在彗核和太阳之间，距彗核的距离随气体产生速率的增加而增加，对于 C/1996 B2 来说，此距离为约  $2 \times 10^4\text{km}$ 。

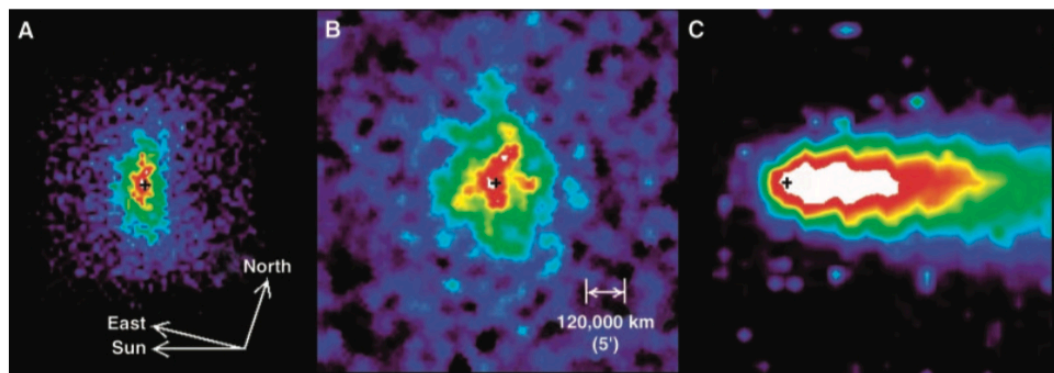


图 2-3 A 到 C 均为彗星 C/1999 S4 的图像。（A）由 Chandra X 射线天文台 ACIS-S 拍摄到的软 x 射线辐射（0.20 至 0.80keV）。（B）由 EUVE 卫星拍摄的极紫外辐射（0.09 至 0.25keV）。（C）可见光波段的彗发和彗尾。[9]

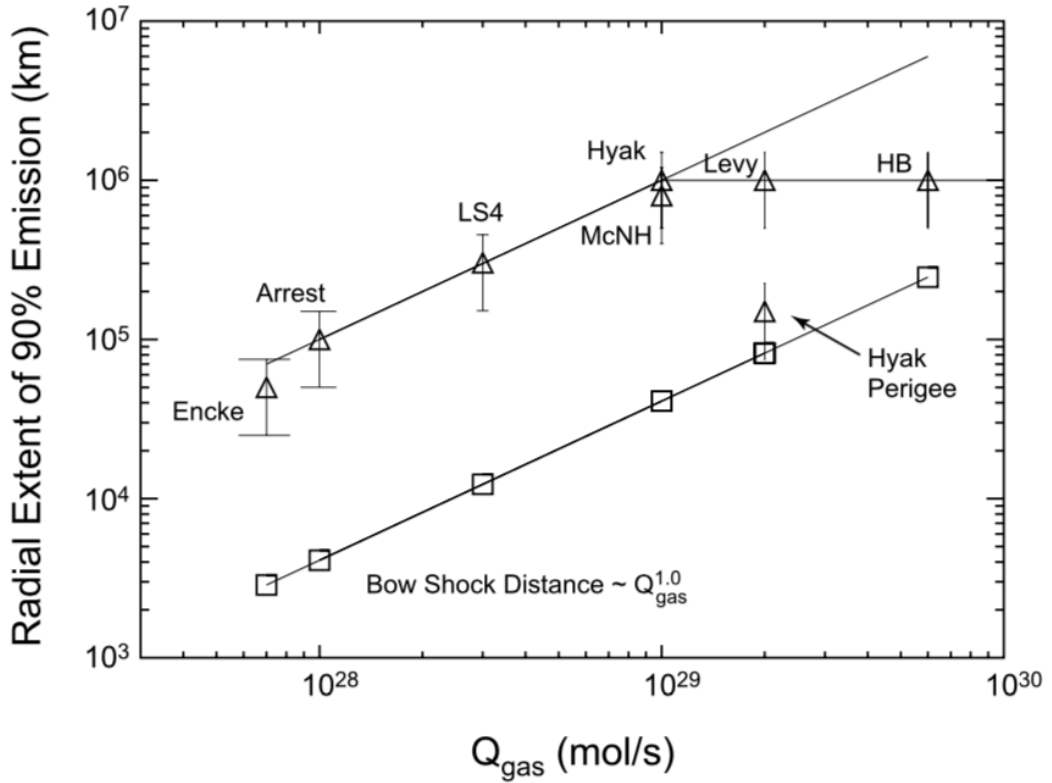


图 2-4 上方曲线为彗星在 X 射线波段的空间延展随气体产生速率的变化，下方曲线为对每次观测的弓形激波的位置估计。[11]

#### 2.4.2 光度

彗星 C/1996 B2 的观测到的 X 射线光度  $L_X$  为  $4 \times 10^{15} \text{ erg s}^{-1}$  (注：孔径半径为  $1.2 \times 10^5 \text{ km}$ ，ROSAT 的光子辐射率被假定为  $P_X \sim 10^{25} \text{ s}^{-1}$  (0.1–0.6 keV))。相比起尘埃产生速率  $Q_{\text{dust}} \sim L_{\text{opt}}$ ， $L_X$  与气体产生速率  $Q_{\text{gas}}$  的关系更强。尤其是对尘埃彗星，比如 Hale-Bopp，X 射线辐射光度比根据光学光度  $L_{\text{opt}}$  估计的要小。X 射线的峰值亮度随距太阳的距离的增大而减小，与气体产生速率的关系不大，但总光度与距太阳的距离无关[11]。

#### 2.4.3 时间变化

X 射线和极紫外辐射的光变曲线呈现为长期的基线水平，伴随有可持续几个小时跃变，最大可以达到基线水平的 3 至 4 倍。图 2-5 就展现了 2P/Encke 1997 太阳风光子流量、太阳风磁场强度和彗星的 X 射线辐射强度随时间的变化。在比



较了 C/1996 B2 的 ROSAT、EUVE 观测到的光度和其他空间探测器观测到的太阳风光子流量、氧离子流量和太阳的 X 射线辐射强度之后，研究发现在时间尺度上，彗星辐射和氧离子流量之间有很强的相关关系，彗星辐射和太阳风质子流量间也有好的相关性，但彗星辐射和太阳的 X 射线辐射强度间却无显著关系[7]。

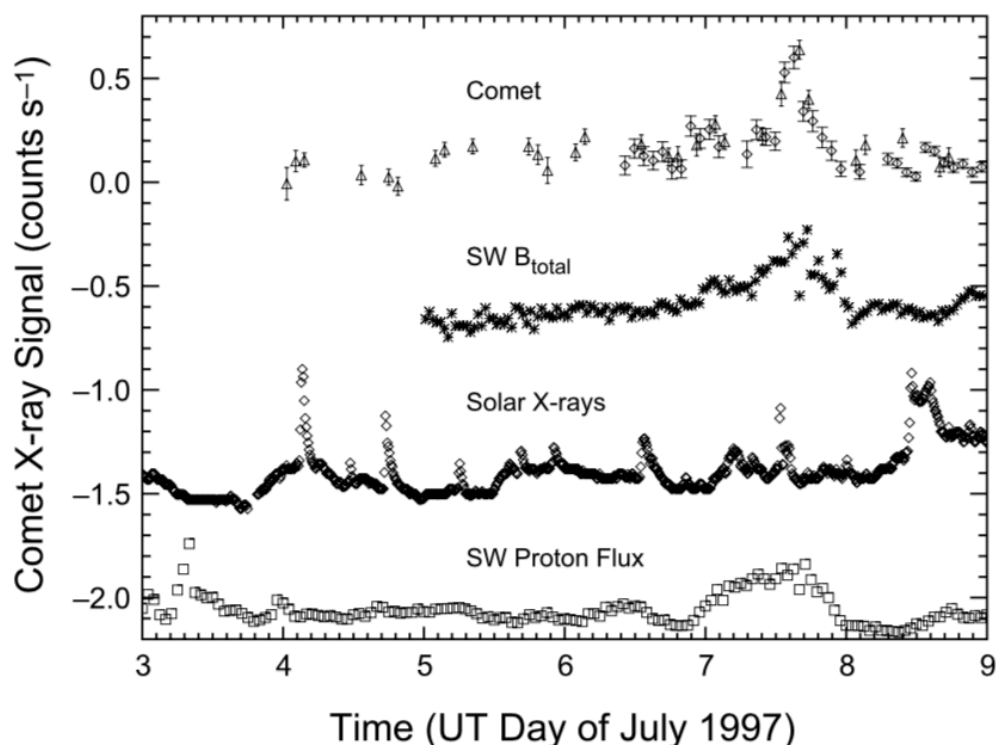


图 2-5 1997 年 7 月 4 日至 9 日 X 射线信号的时间变化。由上至下分别是 ROSAT ( $\Delta$ ) 和 EUVE ( $\diamond$ ) 对彗星 2P/Encke 1997 的观测结果；太阳风的总磁场强度；太阳的 X 射线流量；太阳风的质子流量。

#### 2.4.4 光谱

直到 2001 年，所有发表论文中已被研究过的彗星的 X 射线光谱都有很低的能量分辨率（在 300~600eV 处  $\Delta E/E$  约为 1），此阶段的观测结果显示彗星的光谱很软，并且可以分别得到碳和氧在 0.28keV 和 0.53keV K 层共振荧光的流量上限[11]。

Chandra X 射线天文台在 (CXO) 2001 年探测到了 C/1999 S4 (LINEAR) 的 X 射线光谱，能量分辨率的 FWHM 可以达到  $\Delta E=0.11\text{keV}$  (0.2-0.8keV)，是高分辨率观测的里程碑。光谱中没有连续谱，以发射线为主导。CXO 观测到的 C/1999

T1, XMM-Newton 观测到的 C/1999 T1、C/2000 WM1 和 C/2002 C1 也是类似的情况。由 EUVE 观测到的 C/1996 B2 也显示出了线状谱[11]。

## 2.5 彗星 X 射线/极紫外辐射的证认

在 1996 年观测到彗星的 X 射线辐射后, 许多可能的理论被提出。这其中包括太阳风中的电子和彗星中的中性气体和尘埃碰撞导致的热韧致辐射, 微尘埃碰撞, 电子碰撞引起的中性原子的 K 层电离, 彗星中气体或小的尘埃微粒对太阳的 X 射线的散射或荧光, 以及太阳风中带电离子和彗发中中性物质的电荷交换过程。在热韧致辐射中, 快电子在与带电靶粒子的碰撞过程中发生偏转, 发射出连续辐射, 产生出 X 射线需要电子能量超过 100eV ( $T > 10^6 \text{K}$ ) 的条件。在 K 层电离的理论中, 快电子会撞走靶原子内层的一个轨道电子。早期对这些机制的研究证明只有热韧致辐射、微尘埃粒子的散射和电荷交换过程是可能的机制[5]。

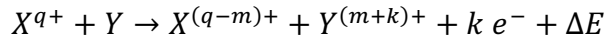
涉及到太阳风电子的机制(即韧致辐射和 K 层电离)存在一些重要缺陷, 使得计算出的辐射光度比观测到的小了 2 至 3 个量级: 彗星附近的高能太阳风电子的流量太低; X 射线也在距离彗核很远的地方(甚至在弓形激波以外)被观测到过, 但未被激波扰动的太阳风电子的热能只有大概 10eV; 彗星离子尾有相似的等离子密度和温度, 但在其中也从未观测到过此波段的辐射; 谱线应为连续谱或一些 K 层发射线, 但最后高分辨率光谱却辨识出了多条原子谱线。也有研究尝试用热韧致辐射的模型来拟合彗星的 X 射线光谱, 但是都未能成功。

以微小尘埃粒子为基础的机制也有一些问题。太阳的 X 射线被常规体积的彗星尘埃微粒(尺度大约为  $1 \mu\text{m}$ ) 进行瑞利散射后不能得到被观测到的情况——这个过程的碰撞截面太小了。可能的解决措施之一就是引入埃克级( $10^{-19} \text{g}$ ) 的粒子, 其半径为观测到的 X 射线波长的量级(即 10-100Å), 可以将入射的 X 射线辐射进行共振散射。因为不能被光学观测探测到, 彗星中这种埃克级的尘埃的含量还不是很清楚。然而, 一些彗星的性质的统计研究表明彗星的 X 射线辐射随彗星的气体产生速率变化, 与尘埃产生速率无关; 此外, 彗星的 X 射线光变曲线与太阳风的离子流量有关, 却与太阳的 X 射线强度无关; 最后, 尘埃散射机制不能解释高分辨率光谱中显著的发射线——尘埃散射的发射线应该与太阳的 X 射线连续谱类似。

电荷交换过程要求要求被观测到的 X 射线发射由太阳风驱动，X 射线辐射的主体可以是线状谱。位置是在彗发的太阳一侧，类太阳风的时间变化，和以线状谱为主体的谱线特征都有力地支持彗星的 X 射线辐射的原因是电荷交换过程。

## 2.6 电荷交换过程产生 X 射线的机制

电荷交换过程(又称电荷转移或电荷俘获过程)是一类发生在两粒子(原子，离子或分子)之间的非弹性碰撞过程，其中一个粒子的电子会被另一个粒子俘获。反应式可以写为



中性 Y 原子失去了 m+k 个电子，其中 m 个电子被入射离子 X 俘获，k 个电子被电离(激发到连续态)，并有能量  $\Delta E$  被释放(即系统内能的改变量)。当碰撞能量小于  $1 \sim 5 \text{keV u}^{-1}$  (典型太阳风速度)时，碰撞系统的主要过程为  $(m, k) \rightarrow (1, 0)$ ，即单电子俘获(single electron capture, SEC)。在大多数的天体物理环境中，反应前  $X^{q+}$  和 Y 一般在电子基态。对于彗星与太阳风的碰撞而言，当入射离子与中性原子的距离在大约 1nm 内时会发生电荷交换，碰撞截面很大(在  $10^{-15} \text{cm}^2$  量级)。

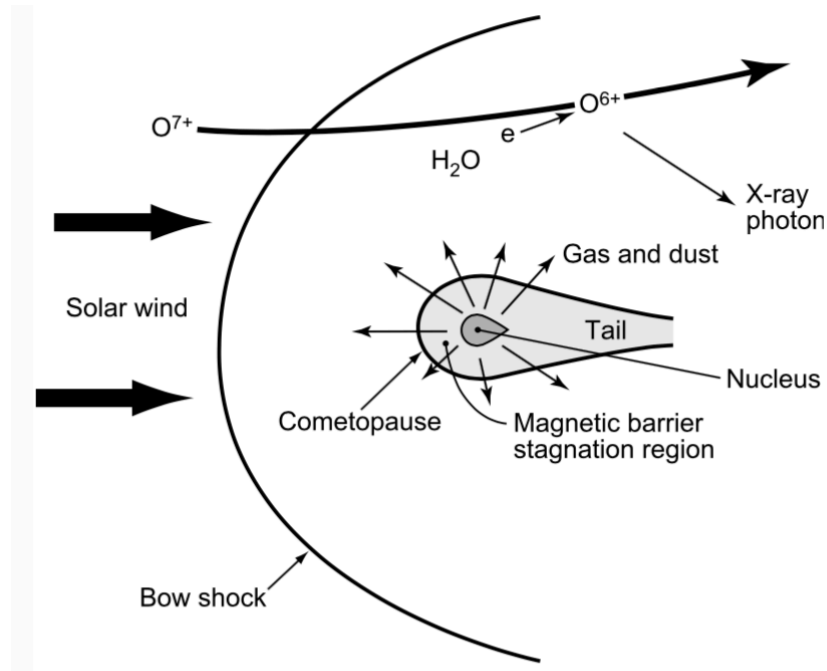


图 2-6 太阳风和彗星相互作用的图示。为了图示的清晰，该图未考虑空间比例，仅展示了相对位置。[11]

对于单电荷俘获来说，当入射离子的初始电荷量大于 3 时，电子一般会被俘获至产物离子  $X^{(q-1)+*}$  的激发态  $(n, l^{2S+1}L_J)$ ，其中  $n$ ,  $l$ ,  $S$ ,  $L$  和  $J$  分别为主量子数，单电子轨道角动量量子数，总自旋量子数，总轨道角动量量子数和总角动量量子数。得到的激发态会跃迁至基态或较低能量的激发态，并辐射出光子[12]。降激发过程通常是通过中间态逐渐降到基态。当  $q$  足够大时，降激发跃迁就会导致 X 射线的辐射。对于彗星内电荷交换的情况，产物离子  $X^{(q-1)+}$  的主量子数大约为  $n=4, 5$  或  $6$ 。此辐射的能量来源于太阳日冕，被储存在太阳风离子的势能中，在与中性粒子的电荷交换过程中以 X 射线和紫外辐射的形式释放出来[9]。

除单电荷俘获之外，如  $(m, k) = (2, 0)$  和  $(1, 1)$  一类的双电子过程也同样很重要。前者被称作 True Double Capture(TDC), 后者为 Transfer Ionization (TI)。同时前者产生的双激发电子态也可能通过辐射出一个电子成为单激发电子态，从而间接地实现  $(m, k) = (1, 1)$ ，这个过程称为 Autoionization following Double Capture (ADC)。在碰撞能量小于  $10\text{keV u}^{-1}$  时，TI 过程的碰撞截面随碰撞能量的减小指数递减，从而在太阳风的速度量级上不太重要。然而随  $(X, Y, q)$  的组合不同，TDC 和 ADC 过程的碰撞截面可以达到单电荷俘获碰撞截面的量级，甚至超过单电荷俘获过程。因此虽然单电荷俘获过程对 X 射线辐射有主要贡献，但 ADC 和 TDC 过程同样有重要作用。因为实验数据和理论模型的限制，在本课题中只考虑单电子俘获过程[12]。

从物理图像上来说，电荷交换过程可以用 Classical Over-the Barrier (COB) 模型进行简单理解。在此图像中，碰撞体可以由以核为中心的类库伦势来表征，且电子在这些库伦势中为束缚态。当核间距离较远时，在两个势阱之间存在势垒；当两个碰撞体逐渐靠近，核间距离减小，势垒降低。当势垒减小到 Y 基态的结合能大小时，电子就可越过势垒，并被入射离子束缚。因为太阳风中的重离子带有较多电荷，他们的电离势就要比中性靶原子 (Y) 的电离势大得多，所以电子会被俘获至入射离子的激发态上，且此激发态的结合能与靶原子的结合能十分相近。这样的过程也可被称作准共振态 (quasi-resonant) [12]。

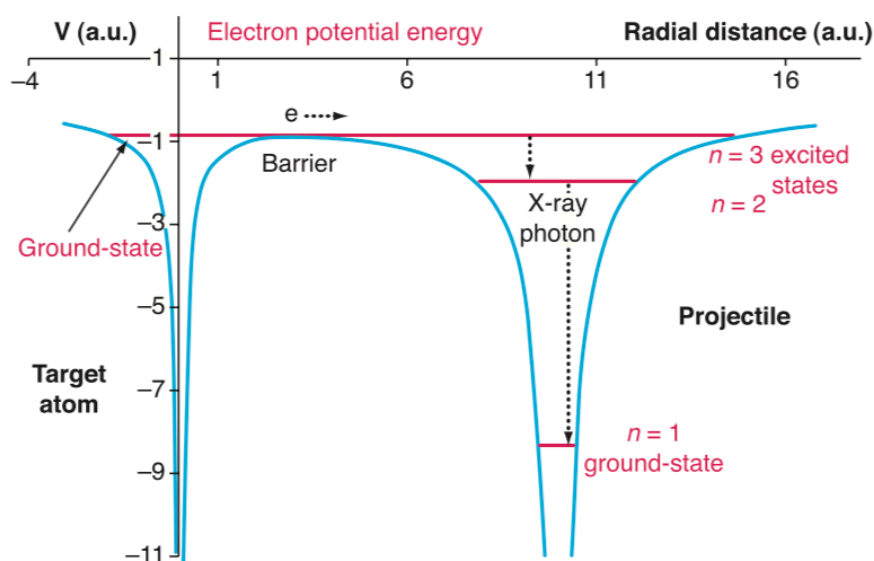


图 2-7 电荷交换过程的 COB 物理模型图示。图中的数值是根据氢原子和  $\text{Be}^{4+}$  计算的。

电子从氢原子的基态越过势垒，到达  $\text{Be}^{4+}$  主量子数为 3 的能级，并跃迁至基态。[9]

### 第三章 太阳风与彗星间电荷交换的理论模型

太阳风的电荷交换模型成功地解释了观测现象。更进一步的理论发展就需要综合并发展一些模型：(1)可充分描述太阳风相互作用的磁流体动力学模型；(2)太阳风成分的精确含量；(3)从实验测量和理论工作中获得更完备的原子碰撞截面数据，尤其是在靶原子为彗星分子的情况下。各种理论模型都还有一些缺陷，比如没有专门针对彗星中的靶原子（如  $\text{H}_2\text{O}$ ）进行的计算，或假设的碰撞能量与太阳风的典型速度不符，或对离子末态没有还足够多的信息。实验和理论工作仍在发展中。

#### 3.1 模型建立和应用简况

##### 3.1.1 空间分布

在发现彗星 C/1996 B2 的 X 射线辐射之后，对彗星中电荷交换模型的建立就蓬勃发展起来。在 1997 年和 1998 年，磁流体动力学模型和水力模型被用于预测

太阳风的速度、密度和在彗星周围的辐射。拟合出的 X 射线图像和观测结果比较接近。发射线是在彗发中朝向太阳的一侧上，会随着太阳风接近彗星时的碰撞厚度产生变化。发射线被预测会出现在软 X 射线、紫外和光学波段，光子越软，发射的位置就离彗核越近。

早期的观测能量分辨率较低，但仍可用空间成像解决部分问题。举例来说，依据彗星的 X 射线成像和彗发中的莱曼  $\alpha$  成像并不相似的结果，和后来 SOHO UVCS 对彗星 2P/Encke 的探测，可以证实电荷交换产生的高红移中性氢效应[12]。

### 3.1.2 光度随时间的变化

通过假设在通过彗发时，每个太阳风离子只发生一次电荷交换，电荷交换过程的 X 射线能量密度  $P_X$  可以用以下表达式做近似[11]：

$$P_X = \alpha n_{sw} u_{sw} n_n$$

其中  $n_{sw}$ ,  $u_{sw}$  和  $n_n$  分别是太阳风质子密度、太阳风速度和中性靶原子的速度。所有“原子和分子的具体参数”和太阳风重离子比例  $f_h$  都被参数  $\alpha$  概括： $\alpha \sim f_h \langle \sigma_{ct} \rangle E_{ave}$ ，其中  $\langle \sigma_{ct} \rangle$  是所有元素和电荷态的平均碰撞截面， $E_{ave}$  是平均光子能量。彗发的中性原子密度可以由球对称近似进行简单估计： $n_n = Q / (4 \pi u_n r^2)$ ， $t \sim 10^6$  s (1AU) 为电离寿命， $u_n \sim 1 \text{ km s}^{-1}$  为中性气体的速度。将  $P_X$  对彗发的体积进行积分，可以得到 X 射线的光度大概在观测光度的 2~3 倍以内。观测到的光度同时由太阳风流量密度和彗星的气体产生速率决定。在 0.2-0.5keV 的能段中 X 射线的光度预计最大可以达到  $10^{16} \text{ erg s}^{-1}$  (1AU)。太阳风流量的变化则会导致 X 射线辐射的变化。

### 3.1.3 光谱

电荷交换模型在光谱上的应用要包含几方面：太阳风离子的种类和含量，跃迁概率和碰撞截面。很多模型只能具体地考虑其中的一两个方面。电荷交换的光谱模型的建立仍有很大的发展空间，比如电荷交换过程之后的碰撞，太阳风离子和尘埃的碰撞和彗发中元素种类的分布等问题都还需要被进一步实验和计算。

## 3.2 光谱模型的建立

### 3.2.1 彗星模型，太阳风模型和两者的相互作用模型

由于望远镜的空间分辨率和灵敏度的限制和彗星物理性状的变化，在抽取彗星光谱时一般是将视场内所有能量在被研究的波段内的光子抽取到同一光谱中，再减去背景。所以目前在一次观测中尚不能分辨彗星不同空间位置的光谱。但是可以根据望远镜的指向和视场，判断观测到的彗星的主要成分结构。比如以彗核为中心，根据视场的大小，可以判断观测范围内彗发中主要的中性分子：彗发内部 ( $10^5\text{km}$ ) 是以  $\text{H}_2\text{O}$  为主导，最边缘处则是被电离的  $\text{O}$  和  $\text{H}$  (详见 2.1)，当视场较大时，可以更多地考虑  $\text{H}$  原子的反应，从而继续电荷交换过程的计算。为此，D. Bodewits 等 (2007) 就在分析 CXO 的观测数据时对彗星模型进行了假设：1. 彗发是球状延展的中性气体；2. 太阳辐射场中不同元素的中性分子的寿命差异很大，也与太阳紫外辐射流的强度有关，因此中性分子气体的尺度与距离太阳的距离有关；3. 弓形激波的位置可以根据 Wegmann 等 (2004) 提出的规则进行估计。

在彗发中，太阳风内的离子最终会通过电荷交换成为中性分子从而减速和冷却。为了简化，一般假设太阳风在通过弓形激波前后的速度不变。实际上，在本文所使用的程序中，可以在一个模型中引入多个电荷交换的模型组分 (component)，使每个组分的速度和温度改变，其他参数不变来模拟太阳风状态的变化。然而，引入多个组分后参数的数量会大大增加，导致拟合时间过长，所以本项目只使用了一个组分来做较粗略的拟合。

太阳风中的离子含量也会被假设。根据彗星的气体产生速率和太阳风的速度，可以粗略地估计太阳风在太阳-彗星连线上的分布。下图是 D. Bodewits 等 (2007) 对太阳风成分分布的模拟。

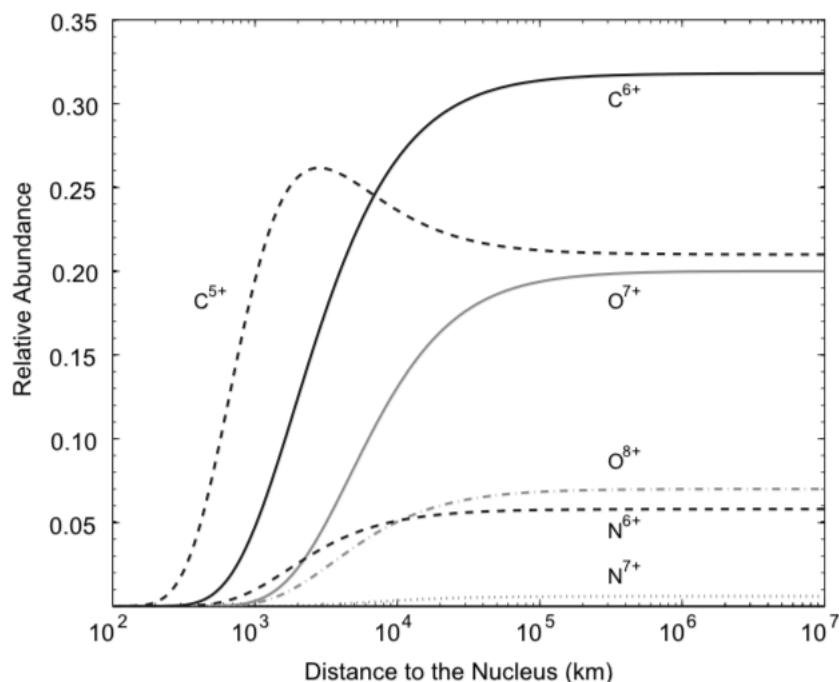


图 3-1 在彗星-太阳连线上的电荷态分布模型（假设太阳风速度为  $300\text{ km s}^{-1}$ ，彗星距太阳为 1AU，气体产生速率为  $10^{29}\text{ mole s}^{-1}$ ）[15]

在发生电荷交换时，电荷的俘获反应与中性靶粒子关系紧密。靶粒子是中性氢或其他粒子的区别在于是否有多个电子，即是否允许多电荷交换过程的发生。根据 2.6，双电荷俘获也可能导致 X 射线的产生。然而，与很多种彗发分子（如  $\text{H}_2\text{O}$ ，O 和 CO）有关的实验数据还都很不完善。又因为这些粒子的第一电离势与氢原子的第一电离势很接近，所以仅考虑太阳风和氢原子的电荷交换就是一种合理的近似。在大部分模型中都只考虑氢原子参与的单电荷俘获过程。

### 3.2.2 碰撞截面和跃迁概率的获取

碰撞截面和跃迁概率两类数据是计算电荷交换过程产生的发射线的关键，也是建立模型的关键和难点。目前碰撞截面的数据主要依靠实验获得，但由于太阳风离子和彗发分子的种类众多，碰撞速度连续，所以实验数据远不完备，还需要理论和经验关系加以补充。跃迁概率一般采用理论计算。

电荷交换产生的类氢离子和类氦离子的跃迁过程不同，需要的碰撞截面数据也不同。两者的主要差异在于后者的电子数大于1，根据量子力学的理论，电子被俘获后可能处于单态或三重态。如下图， $n=2$ 和 $n=1$ 的能级差最大，发生在两者之间的跃迁可以产生最强的发射线，类氢离子可以从 $n=2$ 的单态或三重态跃



迁至 $n=1$ 的能级，产生禁戒跃迁（ $z: 1s^2\ ^1S_0-1s2s\ ^3S_1$ ），自旋禁戒跃迁（ $y, x: 1s^2\ ^1S_0-1s2p\ ^3P_{1,2}$ ）和共振跃迁（ $w: 1s^2\ ^1S_0-1s2p\ ^1P_1$ ）。不同于许多其他的天文环境，彗星的环境满足禁戒跃迁产生的条件（亚稳定态在衰变前没有被紫外辐射流或碰撞等因素破坏），使禁戒跃迁成为电荷交换过程的特征之一。另外，对于彗星C/1999 T1和许多其他彗星来说， $O^{6+}$ 从三态 $2\ ^3S_1$ 到单态 $1\ ^1S_0$ 在561eV可以产生最强的谱线[12]。

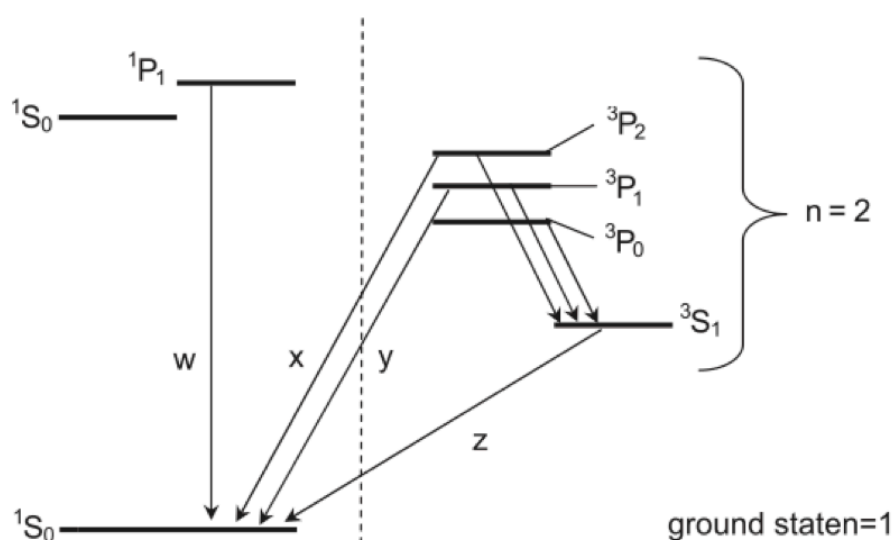


图 3-2 类氢离子跃迁的示意图： $1S_0$ 态通过辐射两个光子向下跃迁至基态。[15]

所以对于产物离子为类氢离子的反应而言，除了需要不同碰撞速度下离子的总碰撞截面外，还需要不同主量子数能级的碰撞截面（ $n$ -resolved cross section, NRCS）和电子在三态与单态的分布。前者可以根据实验数据确定，以经验关系作为补充；而根据统计规律，后者的比值一般假设为 3。后者的现有数据还很少，也是产生误差的重要原因。

而对于产物离子为类氢离子的反应来说， $n=2$  和  $n=1$  的能级之间的跃迁会产生莱曼  $\alpha$  射线。相应计算需要总碰撞截面，不同主量子数的碰撞截面（ $n$ -resolved cross section, NRCS）和不同轨道角动量子数的碰撞截面（ $l$ -resolved cross section, LRCS）。在理论方面，从 1980 年起就有很多近似对此做过研究。COB 模型最为粗略，只能计算总碰撞截面和最可能的主量子数能级的碰撞截面，既没有考虑电子的内部结构，也没有考虑入射能量。朗道齐纳近似（Landau-Zener 或者多通道朗道齐纳（MCLZ））可以弥补这两个缺陷，但也仅适用于碰撞能量在  $1 \sim 10 \text{keV u}^{-1}$ ，准确性也不能保证。COB 的优化版本和 MCLZ 都可以对平均角动量

量子数能级 ( $<1>$ ) 的碰撞截面做出计算, 但都仅适用于部分电离的入射离子。1983 年, Janev 提出可以对 MCLZ 得到的 NRCS 乘一分布函数, 来近似估计完全电离离子的 LRCS。目前也是依赖大量的实验数据, 和针对不同环境下的分布函数来对实验没有涉及的情况加以预测[12]。

1997 年, 最初的电荷交换模型相当粗略: 对碳和氧离子仅考虑与氢原子的交换, 氮离子在不同入射速度下的碰撞截面都考虑为常数, 主量子数也仅考虑  $n \sim q^{0.75}$ , 并忽略除  $\Delta n=1$  之外的跃迁。计算出的 X 射线的空间分布与观测接近, 但模拟的发射线的数量很少[4]。次年, Wegmann 采用 COB 的标准版本和类氢的能级结构, 所有向更低主量子数能级的跃迁都被认为是同可能的, 该研究再现了观测到的空间分布和 X 射线的光度。后来 Wegmann 的模型被用于模拟太阳风不同速度和彗星不同气体产生速率的光谱, 比如在低气体产生速率时仅考虑  $O^{8+}$  和  $O^{7+}$ , 在碰撞厚的条件下又考虑了  $O^{6+}$ ,  $O^{5+}$  和  $O^{4+}$ 。结果预测彗星 Levy 处于快太阳风和碰撞薄的条件下[6]。2000 年, Kharchenko 使用近似公式对不完备的实验数据进行了补充, 应用了 C、O 和 Ne 的较完整的跃迁概率, 对 Mg 等少量其他重元素仅考虑类氢能级[12]。2007 年 Bodewits 更多地考虑了三态和单态分别的跃迁概率, 对理论的跃迁概率乘一个量子数决定的分布函数得到。这种多电子的情况仅对最强的发射线加以考虑, 更高能级之间的跃迁没有涉及[14]。2015 年 Krasnopolsky 用  $H_2O$  取代 H 作为靶粒子, 采用实验室对  $H_2O$  的碰撞截面的研究来进行计算[18]。2016 年 Liyi Gu 全面统计了 H 作为靶粒子的总碰撞截面、不同主量子数和角动量子数能级的碰撞截面, 综合了  $n=16$  能级以下的跃迁概率, 对三态和单态的比值加以修正, 用 SPEX 软件包设计了新的电荷交换程序[19]。2017 年 Mullen 研究了多种靶粒子的情况, 首次用对 X 射线光谱的拟合来确定彗发中的 H 和  $H_2O$  的比例。随着实验的发展和理论的进步, 对彗星中的电荷交换过程的研究会越来越精细[21]。

### 3. 2. 3 对光谱模型的分析

在建立较完善的光谱模型的基础上, 可以用模型模拟或拟合出很多有价值的结果。首先, 调整模型本身的参数可以预言不同参数对光谱的影响情况, 比如, 根据 D. Bodewits 等 (2007), (1) 在常规太阳风速度以下, 速度对碰撞截面的

影响更明显；(2) 碰撞不透明度可以影响光谱形状，但主要还是对小视场范围内的活动彗星而言，所以影响光谱形状的主要因素还是太阳风的状态。其次，根据模型对光谱的拟合结果，可以估计不同元素的电荷态分布，V. Kharchenko 等 (2003) 就用  $O^{8+}/O^{7+} \sim 0.34$  和  $Ne^{9+}/O^{7+} \sim 0.02$  成功拟合出观测到的光谱，从而可以得到冻结温度，进一步研究该彗星所处的太阳风条件。最后，太阳风离子与地冕可能会产生软 X 射线背景，该背景的辐射特点与彗星中电荷交换的辐射特点部分吻合（详见 3.3.2），因为禁戒跃迁是电荷交换过程的一大特点，所以可以用三态和单态的跃迁比例来将两种辐射分辨开，扣除背景的影响。

### 3.2.4 本研究所使用模型的简述

本研究使用 SPEX 软件包中的电荷交换模型对 X 射线光谱进行拟合。该程序建立在 Liyi Gu 等 (2016) 的研究工作之上，下面对该模型加以简述。

该模型建立在三条假设的基础上：(1) 仅考虑单电子俘获过程；(2) 仅考虑 H 原子作为靶粒子；(3) 忽略与自由电子有关的辐射过程（如碰撞激发、辐射复合等）。

计算电荷交换产生的辐射线需要先得到电子被俘获后的离子态分布，再根据跃迁概率得到从激发态到基态的发射线强度。前者可以被进一步分为三部分：获得总碰撞截面，获得不同主量子数能级的碰撞截面和获得不同轨道角动量量子数能级的碰撞截面。由于实验数据不完备，一些经验规律被用于计算实验未得到的数据。不同离子的碰撞截面的来源可以参照 Liyi Gu 等 (2016) 的表 1。不同的碰撞能量需要采用的不同经验关系为该文章的式 (4) 至式 (8)。

该模型的输入参数主要包括电离温度  $T$ 、元素丰度  $A$ 、碰撞速度  $v$  和归一化系数  $norm$ 。此外，该模型还包括在不同物理条件下的另三个参数：(1) 碰撞速度可以被由  $T_i$  表征的随机热运动取代，适用于热等离子体的情况；(2) 可以选择考虑多电子俘获过程。此时，太阳风离子会经历连续的电荷交换过程，直到成为电中性，适用于致密靶粒子的情况；(3) 可以固定计算碰撞截面需要的经验关系，也可以选择根据不同的碰撞能量自动调整。

经过与作者的邮件沟通，获知在文章发表后，该模型又对数据库进行了很大的更新，在计算碰撞截面时考虑了更多地 MCLZ 近似，计算的具体细节可以参考

Mullen 等 (2017)。

### 3.3 模型拟合的难点

#### 3.3.1 高纬度地区太阳风的观测

两个观测太阳风的主要空间天文台——ACE 和 SOHO 都固定在地球附近的拉格朗日点 L1，要想精确地模拟电荷交换的光变曲线，就需要推测出彗星位置的太阳风性质，也就要知道观测太阳风时和传播到彗星处并与彗星发生相互作用时的时间差。太阳风不仅仅沿径向传播，还会随太阳的自旋旋转（周期约为  $T_{\text{sun}} \sim 27$  days），称为共旋。所以这个时间差就主要包括两部分：径向传播的时间差和共旋传播的时间差。径向时间差可以根据太阳风的速度和距彗星的距离来估计，彗星的速度可以忽略。共旋时间差可根据纬度差和周期进行计算。然而这种方法只适用于宁静太阳风条件下十分邻近的彗星。不能涵盖太阳风在纬度方向上的结构，也忽略了太阳风的磁流体动力学行为（比如激波和日冕物质抛射的传播），就为高纬度和远距离的彗星周围的太阳风性质的估算引入了很多不确定性，限制了将太阳风数据和彗星的 X 射线观测进行对比。

#### 3.3.2 软 X 射线背景

日光层和地冕中的气体与太阳风离子也可能会发生电荷交换而产生弥漫的软 X 射线背景。因为太阳风的快速变化，这种背景的变化也十分迅速，需要被细致对待。2002 年 McCammon 等分析了对 X 射线背景的高分辨率观测，发现分别在 561–674keV 和 654keV 两个区域内的辐射强度之比大约为  $0.33 \pm 0.13$ 。这两类谱线可能来自于  $O^{6+}$  和  $O^{7+}$ ，恰巧与太阳风在氢氦混合原子（彗星气体中有大量氢）中预计产生的辐射比吻合，所以就很难对该背景进行修正。由类氢的氧离子和碳离子产生的三态比单态发射线的比例可能是突破口：对电荷交换过程而言，三态跃迁比单态跃迁的比例大约为 3，但对热等离子体而言，这个值一般为 1，甚至更小。

另外，对于在距太阳 1AU 处，大多数的电荷交换过程都发生在距彗核约  $10^5$ km 的彗发中，这导致当观测邻近彗星时，彗星的发射区域会远超出视场，更增加了

处理背景的难度。

### 3.3.3 影响观测结果的因素众多

彗星的 X 射线/紫外的光度/光谱是由彗星的气体产生速率、太阳风流量和重离子成分等多种因素影响的,对同一观测结果可能会有多种不同的解释,常常还需要其他的线索来分辨各个因素的影响。举例来说,在彗发内太阳风离子的电荷量逐渐变小,使发生电荷交换后产生的光子的能量变低(X 射线变软),同时太阳风离子的速度也逐渐降低;来自冕洞的快太阳风的速度较高,电荷量比慢太阳风低,也会产生低能量的光子(软 X 射线)。所以在硬度相似的情况下(500eV 以上和以下的光度比相似),太阳风的情况也不确定:彗星 C/1999 S4 和 C/1999 T1 的该比值就类似,但太阳风的速度分别为 500 和 390km s<sup>-1</sup>。这就为分析观测结果引入了更复杂的困难。

### 3.3.4 光谱观测的分辨率低

低光谱分辨率阻碍了对谱线的辨别,限制了拟合精度。更高的光谱分辨率可以极大促进对电荷交换过程的研究。高光谱分辨率的潜力主要体现在以下几方面:

(1) 揭示微量离子(铁离子,镁离子和硅离子)的特征;(2) 可直接测量 C<sup>5+</sup>或 O<sup>7+</sup>经过电荷交换后的三态和单态辐射的比值;(3) 可以测量如 CO<sub>2</sub> 等分子的荧光特征 [13];(4) 可以探测占总辐射约 5% 的连续谱[5];(5) 可以更好地探测 300eV 以下的辐射。

## 第四章 对彗星光谱的拟合

### 4.1 研究计划

本研究的目的是为计划于明年发射的紫外探测器的科学目标之一——观测彗星与太阳风的电荷交换过程寻找合适的波段,从理论上帮助确定探测器的主要参数。根据与相关实验室的联系,采用正入射系统可以提高分辨率,但可能每个系统的波段范围不够宽。备选的波段主要有 80–130Å, 130–170Å, 170–250Å, 250–

370Å 和 370–500Å，低于 80Å 的带宽较窄，但也可以考虑。所以本研究希望能预测紫外段内的光谱，找出在大部分空间条件下（即快、慢两种太阳风和碰撞薄、厚两种彗发的组合）都较强的发射线，将该谱线所处的波段作为主要的选择方案。

预测紫外波段较强的发射线主要有两种思路：第一是将合适的参数提供给模型，通过调整参数来改变空间条件，直接用模型模拟出不同条件下的光谱并进行统计；第二是选择不同空间条件下彗星的真实观测数据，对光谱数据进行拟合，统计拟合结果在紫外波段的情况。经过比较，本研究选择后者，原因主要有三点：

（1）拟合光谱数据的拟合结果可以和其他文献中的结果进行比较，检验模型的合理性；（2）对太阳风在高纬空间的情况的研究尚不充分，不能直接为模型提供相关参数；（3）太阳风与彗星发生电荷交换的真实情况很复杂，比如太阳风在彗星的弓形激波后会减速，成分也会发生变化，都不能用给模型输入简单参数做模拟的方法解决，对真实数据的拟合则会得到相关参数在观测区域内的平均值，更接近实际情况。

在整理了相关数据后，本研究决定用 Chandra X 射线天文台（CX0）对 5 颗彗星在 X 射线波段的观测数据作为样本，用 SPEX 软件包中的电荷交换模型（CX）对谱线进行拟合，再用拟合结果的参数推测彗星样本在紫外波段的光谱，统计所有紫外光谱中较强的发射线，进而给出波段选取的建议。

4.2 数据介绍

自从第一次彗星产生的 X 射线被探测到以来，已经有 25 颗左右的彗星被 X 射线或紫外段望远镜观测到，相关信息被列在表 1 中。

表 4-1 到目前为止对彗星 X 射线波段的观测（不完全统计）

望远镜	彗星	相关文献
ROSAT	C/1990 K1 (Levy);	Dennerl et al. 1997; Lisse et al. 1996
	C/1990 N1 (T - K);	
	45P (HMP);	
	C/1991 A2 (Arai);	
	C/1996 B2 (Hyak.);	
	C/1996 Q1 (Tabur);	
	C/Hyakutake 1996 B2	
EUVE	6P/d' Arrest;	Mumma et al. 1997

	C/1995 Q1 Bradfield;	
	C/1996 B2 Hyakutake;	
	C/1995 01 Hale-Bopp	
<b>BeppoSAX</b>	C/1995 01 (Hale-Bopp)	Owens et al. 1998
<b>Chandra</b>	LINEAR 1999 S4; C/1999 T1; C/2000 WM1 (LINEAR); C/2002 C1; 2P/Encke (2003); C/2001 Q4 (NEAT); 9P/Tempel 1; 73P/Schwassmann-Wachmann 3-B; 17P/Holmes; 103P/Hartley 2; Comet 2011 L4 (PANSTARRS); Comet C/2012 S1 (ISON); Comet C/2013 A1 Siding Spring	Bodewits et al. 2007; Christian et al. 2010; Krasnopolsky et al. 2004; Lisse et al. 2001; Wolk et al. 2009
<b>CHIPS</b>	C/2001 Q4;  C/2002 T7;  C/2004 Q2	Sasseen et al. 2006
<b>FUSE</b>	C/2001 Q4 (NEAT)	Feldman 2005
<b>XMM-Newton</b>	C/2000 WM1 (LINEAR)	Dennerl 2012; Schultz et al. 2006
<b>Suzaku</b>	73P/Schwassmann-Wachman	Brown et al. 2010
<b>Swift</b>	C/2007 N3 (Lulin)	Carter et al. 2012; Willingale et al. 2006

可以看出, CX0 的观测数据和相关的参考文献都较丰富, 能够提供多种空间条件下的观测数据; 另外 D. Bodewits (2007) 对其中 8 颗彗星进行了拟合, 其结果可以与本研究的结果进行比较; CX0 的分辨率也较高, ACIS-S 在  $0.3 \sim 1.5 \text{ keV}$  的分辨能力大约为  $\sigma \sim 50 \text{ eV}$ ; 另外 CX0 用很完善的数据处理程序 CIAO。所以本研究选用 Chandra 的观测结果进行拟合。

CX0 既有高新 CCD 成像摄谱仪 (ACIS), 也有高能/低能透射光栅摄谱仪 (HETGS/LETGS), 将两者结合可以得到更好的分辨率, 然而彗星是展源, 结合后的有效面积会降低约 20 倍, 所以观测彗星时一般只使用 ACIS。ACIS-S3 对低能响应较敏感, 且大部分被观测的彗星都位于其中心, 所以我们在这里选用 ACIS-

S3 观测到的 5 个彗星的数据作为样本，除 C/2011 L4 （PanSTARRS） 之外的 4 颗彗星在 D.Bodewits （2007） 进行过分析。

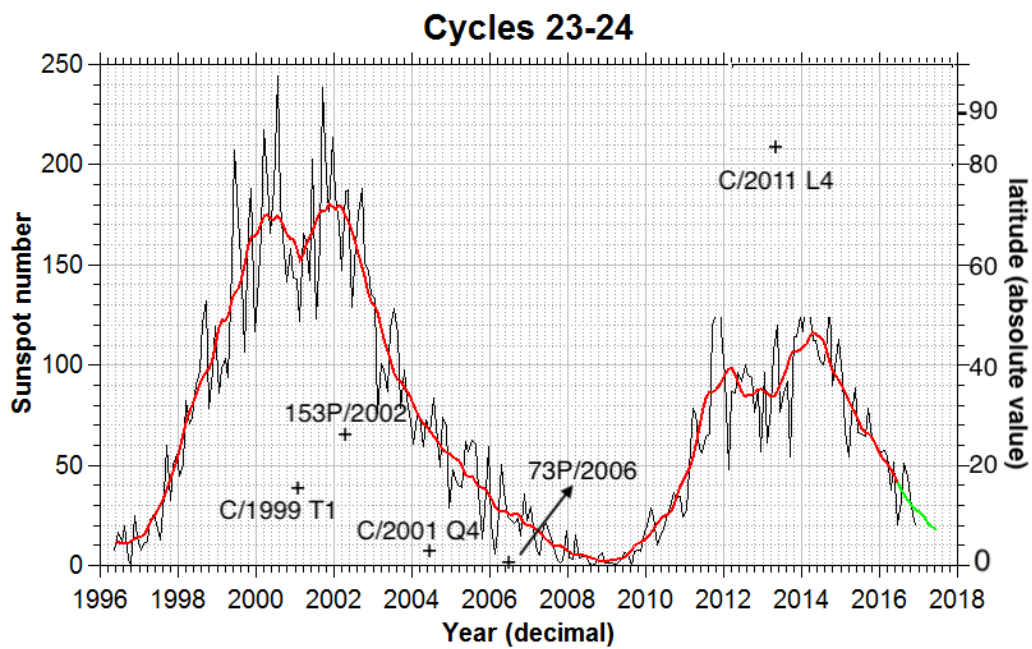
5 颗彗星的基本数据整理在表 2 中。彗星位置太阳风的速度是由 ACE 和 SOHO 的观测数据结合彗星和观测器之间的距离推测得到的，部分彗星的纬度较高，不能准确推测出该处太阳风的速度，就用\*注明。视场半径是用 CX0 的视场和彗星距地球的距离估算得到的，其中 CX0 的视场与处理数据时使用的值一致，均为 8arcmin。

表 4-2 五颗彗星的观测数据[15][20]

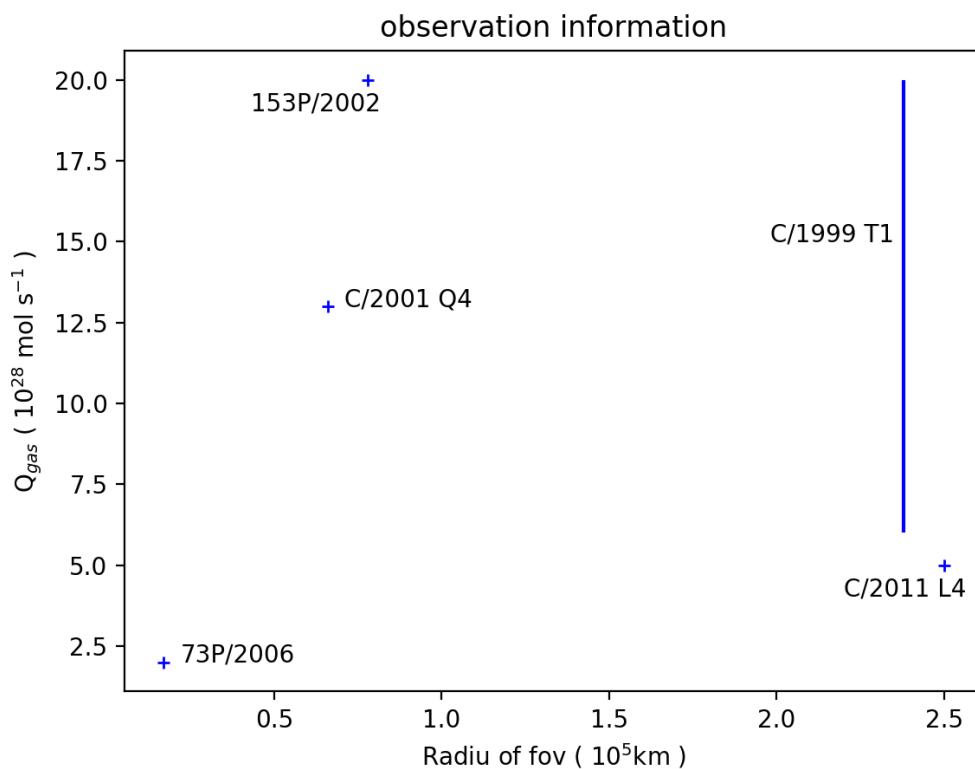
彗星	C/1999 T1	153P/2002	C/2001 Q4	73P/2006	C/2011 L4
观测时间	2001/1/8-15	2002/4/1-5-16	2004/5/1-2	2006/5/2-3	2013/4/1-7-23
曝光时间 (ksec)	16.9	24	10.51	20	45
距地球的距离 (AU)	1.37	0.45	0.38	0.10	1.44
纬度 (度)	15	26	-22	5	84.16
气体产生速率 ( $10^{28}\text{mole s}^{-1}$ )	6-20	20	13	2	5
太阳风速度 (估算, $\text{km s}^{-1}$ )	353	372*	352	449	377*
视场半径 ( $10^5\text{ km}$ )	2.38	0.78	0.66	0.17	2.50

图 4-1 可以检验样本的完备性。可以看出,C/2000 WM1, 153P/2002 和 C/1999 S4 的纬度虽然相对较大，但因被 CX0 探测时处于太阳活动较强的时期，很有可能暴露在慢太阳风之中（详见 2.2.3）。C/2011 L4 处于太阳活动较强的阶段，但纬度极高，反映慢太阳风或快太阳风均有可能。图 b 中气体产生速率越高，视场越小，观测到碰撞厚区域的可能就越高，反之可能越小。可以看出，样本在碰撞薄厚的分布上较为平均。因为 CX0 对彗星的观测的样本量较小，在选择研究彗星时很难完备，本研究就缺少太阳活动极小期的彗星样本，有待更多观测数据的补充。但仍能反映大部分的空间条件，所以本研究以这些彗星做出初步的判断。





(a) 彗星纬度分布与所处的太阳活动周期，后者数据来源于 [www.solen.info](http://www.solen.info)。



(b) 彗星样本的气体产生速率  $Q_{gas}$  与视场半径 fov 的分布。

图 4-1 彗星样本的完备性检验

### 4.3 基本数据处理

在从 Chandra Data Archive 下载下彗星的数据后，本研究用 CIAO (Chandra Interactive Analysis of Observations) 对数据进行基本处理。在对数据进行解压和重命名、探测图像中的源、处理坏像素等基本操作后，用 `specextract` 命令对光谱进行抽取，同时减去背景，再用 `combine_spectra` 命令对同一颗彗星的不同观测进行叠加。考虑到光谱会包括图像中所有的光子，叠加时未进行天球坐标的对齐，而是直接对像素坐标进行叠加。

#### 4.3.1 减去背景

因为彗发部分的延展很大，而 CX0 的视场较小 ( $\sim 8$  角分)，所以视场之内往往会被彗星的 X 射线辐射填充，很难有效地减去弥漫的 X 射线背景。传统上扣除背景一般采取两种方法：(1) 在同一个观测图像内进行孔径测光；(2) 拟合图像中源的光度随空间的分布，将远处的光度作为背景光度。本研究参考了 D. Bodewits 的方法，利用 CX0 的特点解决这一问题：从 ACIS-S3 中抽取总光谱，再将 ACIS-S1 的观测结果作为背景从 S3 的结果中扣除。因为 S1 CCD 和 S3 CCD 同为背部受光，且两片 CCD 是同时对同一个方向进行观测，因此两者观测到的空间条件类似，只是指向中心稍有偏离，所以当 S3 CCD 对彗星进行观测时 S1 CCD 可以拍摄到当时的背景信息。下图是 CX0 对 C/1999 T1 的测光成像，S1 CCD 和 S3 CCD 的测光结果分别用绿色和白色的框框出。

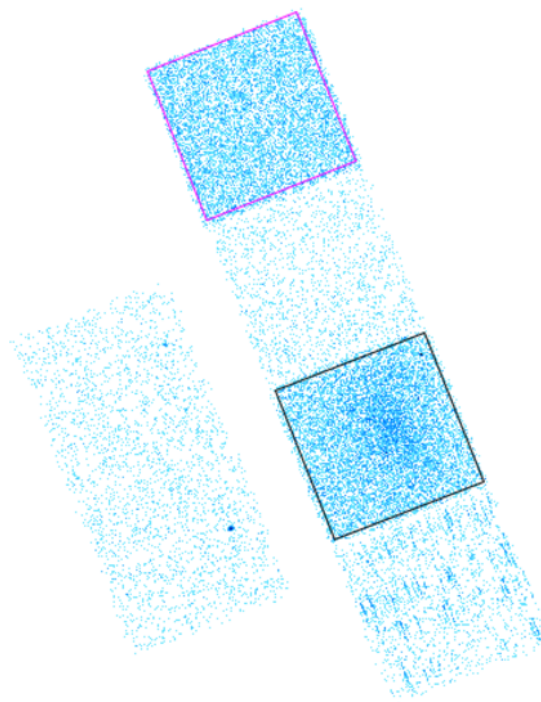


图 4-2 CXO 对 C/1999 T1 的测光成像，S1 CCD 和 S3 CCD 的测光结果分别用紫色和黑色的框标出，可看到 S3 中存在显著的延展源。

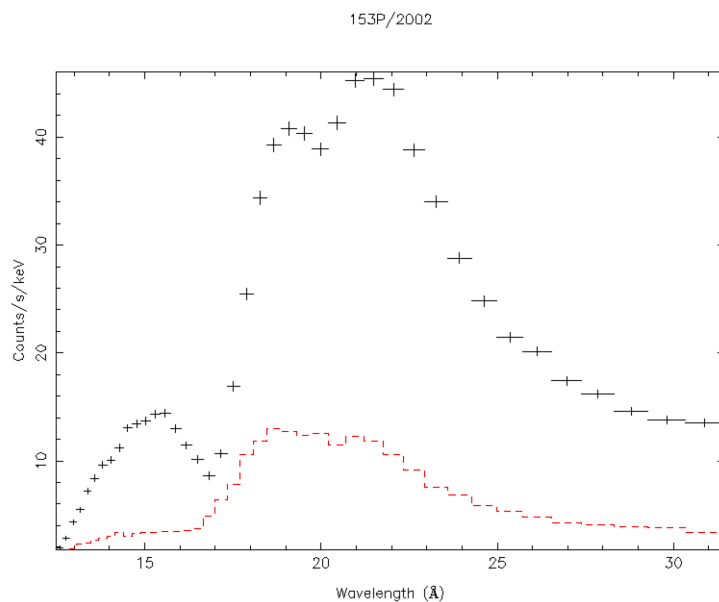


图 4-3 CXO 观测到的 153P/2002 的光谱，红色的点为背景强度，黑色的点是减过背景的信号强度。

这种方法对大多数彗星是有效的，但是也有少数例外。比如 153P/2002 的背景就不能被有效扣除。这颗彗星有很高的气体产生速率，距离 CXO 很近，观测时

也是一直固定彗星在视场中心，增加了有效视场，所以该彗星的信噪比可以达到 50 以上。但因为辐射较强，所有的 ACIS-CCDs 都记录了该彗星的信号，S1 CCD 中除了背景信息之外还有较强的彗星电荷交换产生的辐射，不能被减干净。该彗星的光谱如图 4-3，其中红色的点为背景强度，黑色的点是减过背景的信号强度，两者形状有相似之处，对拟合结果可能产生一定的误差。

### 4.3.2 格式转换

从 Chandra 的数据中抽取出的光谱一般为标准的 OGIP 格式，但 SPEX 软件包需要的文件格式与之不同，本着“尽可能简单”的原则，SPEX 仅用一个文件就包括背景在内的光谱的所有信息，也仅有一个文件涵盖仪器的响应矩阵，两种格式之间要用 trafo 程序进行格式转换。

然而根据与 Liyi Gu 的邮件沟通，在格式转换的过程中可能会出现问题：两种格式的文件通道的长度（单位为 eV 或 Ang）也许不同，导致转换前后的 bin 的大小发生改变，从而改变了光谱形状，影响拟合结果。为了避免格式转换的问题，Liyi Gu 在处理用 XMM-Newton 观测的 C/2000 WM 的过程中，就用 rgsproc 和 rgsfluxcombine 两个 SPEX 的伴随程序直接从数据中得到 SPEX 格式的光谱。但 CXO ACIS-S 不是光栅系统，无法使用这两个程序。为了避免单位问题，需要保证格式转换之前没有对光谱数据进行 bin 处理。

## 4.4 X 射线波段的光谱拟合

如上文所述，本研究选用 Liyi Gu (2016) 在 SPEX 软件包中设计的电荷交换模型 CX 对光谱进行拟合，主要出于以下几点考虑：（1）该模型使用最新和较全面的碰撞截面和跃迁概率数据；（2）该模型的数据还在进行持续的更新，对后续研究很有价值；（3）该模型的程序比较完善，可以通过调整参数等简单步骤调用模型；（4）虽然尚未健全，但该模型可以拟合多电子俘获过程，也可以考虑不同靶粒子的情况[21]，有较大的发展潜力。

拟合的波段为 0.4-1.0keV。是因为 0.4keV 以下 CXO ACIS-S3 的有效面积很小且仪器响应定标的不确定性较大（如图 4-4），所以不使用该处的数据。电荷交换产生的 X 射线一般在 1keV 以下的软 X 射线波段，对高能段的研究还不多，所

以不考虑 1keV 以上的波段。但是也有研究 (Carter 等 2010) 发现在地球外大气层有铁、镁和硅离子产生的辐射线, 可能与日冕物质抛射有关, 这些离子可能会通过电荷交换过程产生 1keV 以上的辐射线。

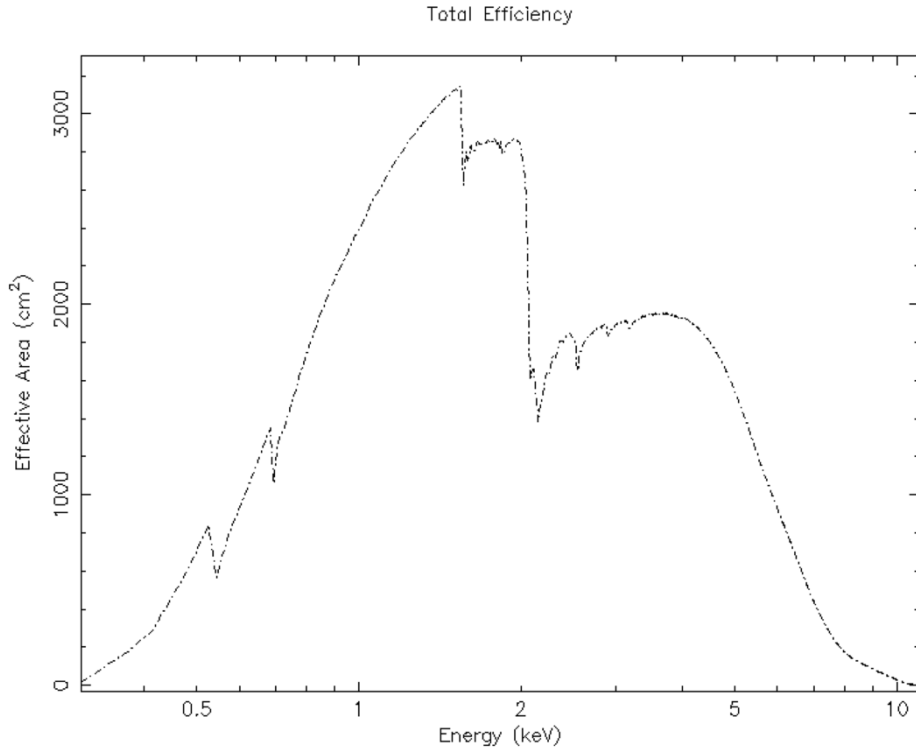


图 4-4 CX0 的有效面积随能量的分布

彗星的速度大约为 10 到 70km s<sup>-1</sup>, 产生的多普勒效应在 CX0 ACIS 的光谱分辨率之内, 所以可不考虑彗星自身的速度对谱线位置的影响。

为了避免拟合时不合适的初值带来的局域最小值的影响, 我们采用迭代拟合的方法。思路是先用观测值固定一部分参数进行拟合, 再将拟合结果作为新的初值, 逐渐扩大自由参数的范围进行拟合, 使卡方收敛到最小。在电荷交换模型中, 需要拟合得到的参数共有 7 个: 碰撞速度 (决定碰撞截面的大小); 电离温度 (决定太阳风中每种元素电荷态的分布); 归一化系数 (可以反应彗星的气体产生速率); C、N、O、Ne 四种元素相对于 H 的丰度。其中速度也可以根据 ACE 和 SOHO 的观测结果进行估算, 所以在第一次拟合时用估算结果固定速度, 温度的初始值设定为 0.14keV, 丰度的初始值均设定为 1。再将 7 个参数均作为自由参数, 将第一次拟合的结果作为初始值进行第二次拟合, 得到的结果作为最终拟合结果。

我也对用复合模型做拟合进行了探索。复合模型是指在同一个模型中引入多

个电荷交换的模型组分，使每个组分的速度或温度改变，其他参数不变来模拟视场中太阳风的状态在不同位置的变化。此外，根据邮件沟通，模型中最新的 O8+ 的碰撞截面的值比更新之前要低，用单温度模型不能对 O<sup>8+</sup> 的发射线做出很好拟合，解决方法之一就是引入两个不同电离态的电荷交换模型的组分，等效地提高 O<sup>8+</sup> 的碰撞截面。因为后一种原因，Liyi Gu 在拟合 C/2000 WM 时就使用了复合模型。我也尝试了用有不同电离温度的两个组分的模型来拟合 73P/2006 的光谱（拟合结果如表 4-3），发现需要的拟合时间很久，且拟合结果没有很大的改善（卡方值没有大程度的减小），所以在此初期阶段暂时用单组分模型。

表 4-3 73P/2006 用不同的拟合方法得到的结果比较

拟合方法	迭代拟合	复合拟合
归一系数 ( $10^{64}\text{m}^{-3}$ )	2.38	1.92
电离温度 (keV)	0.15	0.16, 0.12
碰撞速度 ( $\text{km s}^{-1}$ )	599.82	599.76
C 的丰度	13.32	5.83
N 的丰度	7.38	5.09
O 的丰度	2.51	1.48
Ne 的丰度	3.03	1.97
约化卡方值	0.75	0.8

## 第五章 拟合结果分析

### 5.1 对拟合结果的讨论

对 5 个 CX0 观测到的彗星的拟合结果可见图 5-1 和表 5-1。拟合结果中包含温度和元素的丰度比，根据电离平衡的假设可以推算得到各元素的电荷态分布，各电荷态与 O<sup>7+</sup> 的含量的比值也列在了表中。

表 5-1 拟合结果

彗星	C/1999 T1	C/2001 Q4	153P/200 2	73P/2006	C/2011 L4
归一系数 ( $10^{64}\text{m}^{-3}$ )	3.39	2.09	22.23	2.38	5.19
电离温度 (keV)	0.18	0.12	0.22	0.15	0.19
碰撞速度 ( $\text{km s}^{-1}$ )	628.34	630.67	199.83	599.82	199.09
C 的丰度	16.91	4.55	94.46	13.32	44.96
N 的丰度	12.86	27.17	35.41	7.38	0.0
O 的丰度	3.96	4.46	10.63	2.51	3.00

Ne 的丰度	7.63	34.34	14.29	3.03	6.85
$O^{8+}/O^{7+}$	0.27	50.74	0.67	315.48	0.35
$C^{5+}/O^{7+}$	0.57	140.86	0.03	826.28	1.68
$C^{6+}/O^{7+}$	7.92	264.25	0.69	4357.30	27.64
$N^{6+}/O^{7+}$	2.05	2.64	1.24	0.36	0.0
$N^{7+}/O^{7+}$	4.04	1198.95	5.10	1458.10	0.0
约化卡方值	0.99	0.51	6.38	0.75	2.15

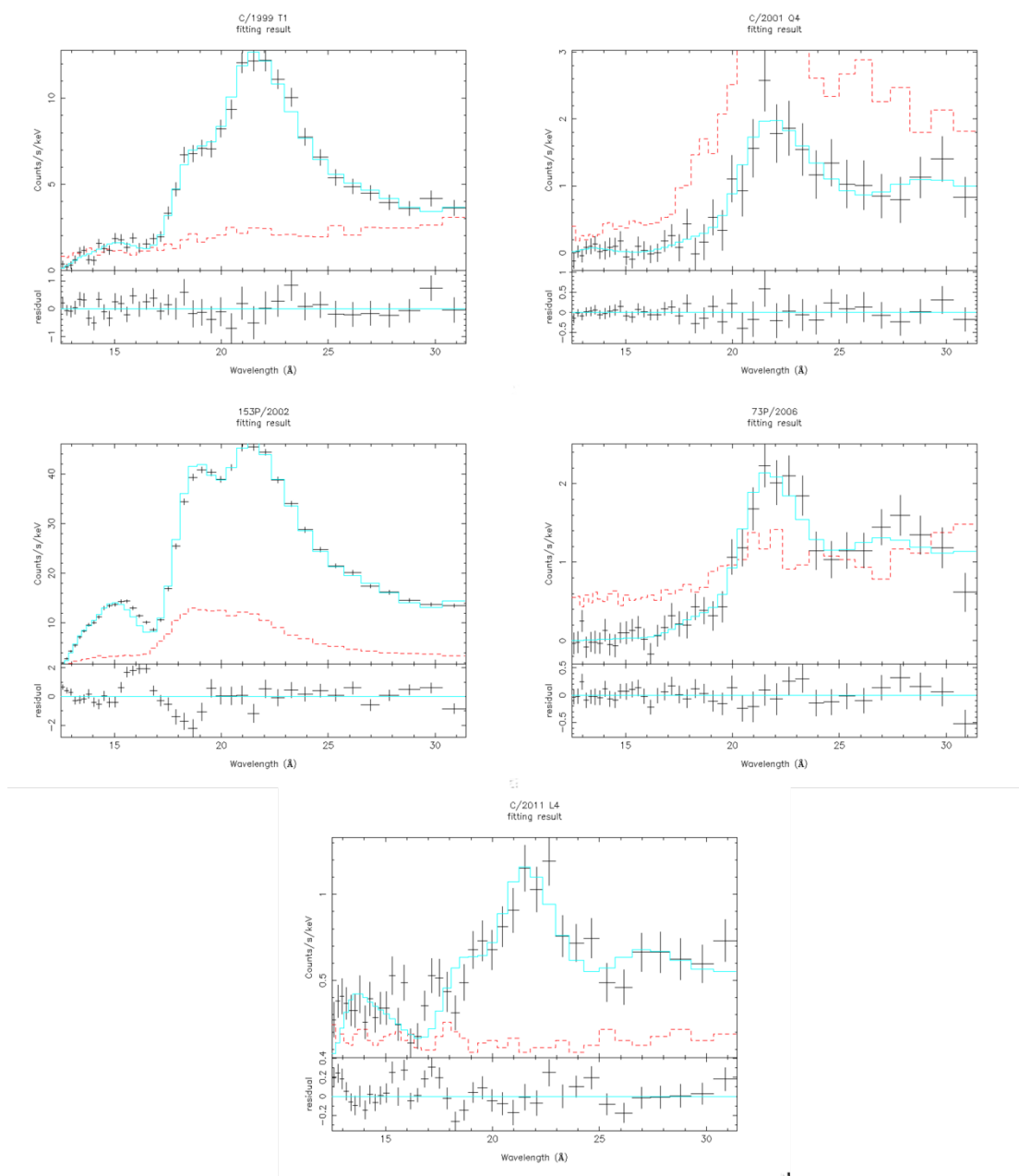


图 5-1 使用迭代拟合得到的拟合结果。其中黑色为减去背景的观测数据，红色为背景，青色为拟合曲线。

除 153P/2002 和 C/2011 L4 之外的 3 颗彗星的约化卡方值较小，可以很好拟

合出谱线形状。但与观测数据相比（表 4-2），拟合得到的速度较大，这有两方面可能的原因：（1）在此模型中，速度是根据归一化系数和丰度比计算出来的，而相对于速度来说，碰撞截面对元素的种类更敏感，所以如果发射线不能被很好的分辨，那么丰度比的少量偏差就会使速度发生较大的改变。可以看出，在 30Å 左右三个彗星均没能被很好的拟合，原因有 2：a）可能是 ACIS-S 在该波段较低的有效面积导致的观测误差产生的，对该处观测误差的拟合使拟合得到的 C 和 N 的丰度比偏离了真实值，对拟合结果中的速度产生了较大影响；b）C 和 N 的丰度比对真实值的偏离也可能是物理因素造成的，比如根据太阳风的数据，C/1999 T1 和 73P/2006 处于共旋相互作用区域，慢太阳风在快太阳风的推动下旋转，使电荷态不满足单温度的电离平衡状态，从而使 C 和 N 在 30Å 左右的发射线偏离了模型，也可能使 Mg、Si 等少量未考虑的元素发射线影响了对 C 和 N 的丰度的判断，使速度有所偏离。（2）事实上，因为太阳风的快速变化，太阳风速度的观测值与拟合值很难进行比较。太阳风的速度和成分都会随时间快速变化，甚至在一次观测之内都可能变化 50% 以上，即使不考虑传播机制的误差，计算得到的彗星位置太阳风的状态也实际是 ACE/SOHO 的观测时间的太阳风的状态，而不是发生电荷交换的太阳风情况，何况传播机制本身也有很大误差，所以观测结果基本不能被用来与拟合结果进行比较。

虽然这 3 颗彗星的谱线拟合在 30Å 处有所偏离，但是约化卡方值很小可以证明拟合的可信度，模型形状与观测到的谱线形状总体上也十分接近，所以在后续对紫外波段的发射线的分析中仍使用此次拟合的结果。

153P/2002 的误差很大，可能有两方面原因：（1）153P/2002 有很高的气体产生速率，彗星距 CX0 的距离也较近，产生的 X 射线辐射很强，ACIS-S3 和 ACIS-S1 都记录了该彗星的信号，背景信号不能依 ACIS-S1 有效扣除。（2）依 D. Bodewits（2007），该彗星在观测时可能在经历日冕物质抛射，带来包括镁、硅和铁离子等更多重离子，拟合中没有考虑这些离子的谱线，给拟合带来误差。图 5-2 为该彗星在 0.4-2keV 的谱线，可以发现 Mg 在 1.35keV (9.3Å) 产生的发射线可以解释光谱在 9.5Å 左右的发射线，是彗星遭遇日冕物质抛射的有力证据。根据 AtomDB，光谱在 12Å 左右的发射线只可能是 Fe 或 Ne 造成的，日冕物质中的 Si 也可能在拟合的波段产生较强的发射线，于是在原有自由参数的基础上再令 Mg、Si 和 Fe



的丰度成为自由参数，得到拟合结果如表 5-2 所示。虽然新的拟合结果的约化卡方值仍然很大，但与之前的结果相比，对 9.5Å 左右和 25~30Å 的发射线都有更好的拟合，所以在后续分析紫外波段的谱线时采用修改之后的结果。加入新元素的拟合结果的约化卡方值仍然较大，主要是因为 12Å 左右的发射线没有被拟合好，但通过调整模型中的 Fe 和 Ne 的丰度均不能使模型在该处产生发射线，具体原因还有待探究。

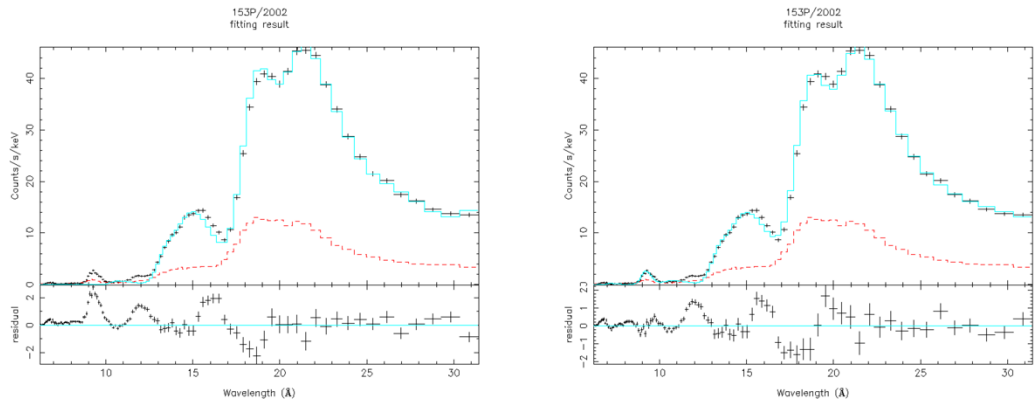


图 5-2 左图为未考虑 Mg、Si 和 Fe 的拟合结果，右图为考虑这些自由参数的拟合结果。可以看到在 9.3Å 处的 Mg 线在修正后可以被很好的拟合。

表 5-2 考虑 Mg、Si 和 Fe 后 153P/2002 的拟合结果

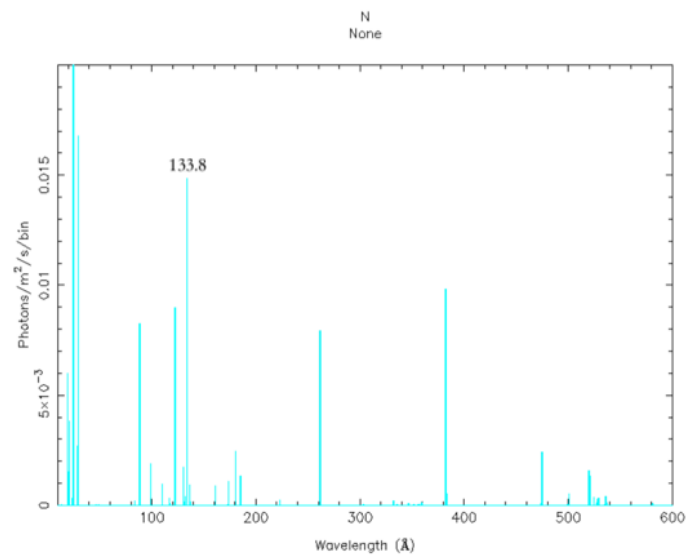
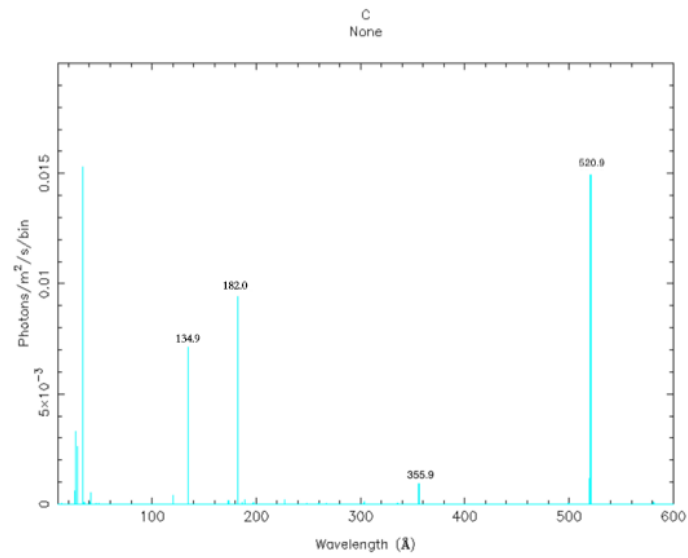
彗星	归一系数 ( $10^{64}\text{m}^{-3}$ )	电离温度 (keV)	碰撞速度 ( $\text{km s}^{-1}$ )	C 的丰度	N 的丰度
153P/2002	19.21	0.22	199.91	3.93	35.48
O 的丰度	Ne 的丰度	Mg 的丰度	Si 的丰度	Fe 的丰度	约化卡方
11.34	15.71	140.29	97.00	147.10	11.03

C/2011 L4 是一颗纬度很高的彗星，若处于快太阳风的影响中，理论上来说太阳风速度的拟合结果应该较高，温度较低，但实际的拟合结果并非如此。原因可能与该彗星的尘埃和气体的比值较高有关，气体量较少导致电荷交换产生的 X 射线辐射的信噪比较低，可能会对拟合带来较严重的影响。具体原因仍有待探究。

## 5.2 对紫外波段的预测

本研究结合 AtomDB 的数据对紫外波段的较强谱线进行了证认：通过 SPEX 中的电荷交换模型 (CX)，控制其他元素的含量为 0，绘制出了单元素的在紫外波段的发射线，再将这些发射线与 AtomDB 中的数据进行比对，得到了 C、N 和 O 的谱

线证认结果（如图 5-3）。值得注意的是，N 的发射线很弱，就修改了归一系数来得到更强的发射线，从而保证作图的清晰，也只对 80Å 以后最强的 N 线进行了证认。



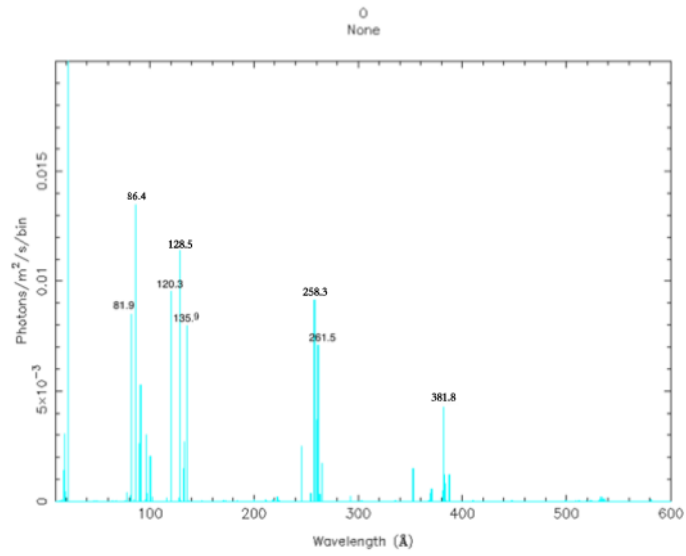


图 5-3 C、N 和 O 在极紫外波段较强发射线的证认

根据证认结果，对每个彗星的拟合结果在紫外波段的情况进行了标注，红线为预测的发射线，绿色为 C 的证认线，黄色为 N 的证认线，蓝线为 O 的证认线。灰线隔开了 5 个建议波段：80-130Å，130-170Å，170-250Å，250-370Å 和 370-500Å。5 颗彗星在紫外段的预测结果如图 5-4。

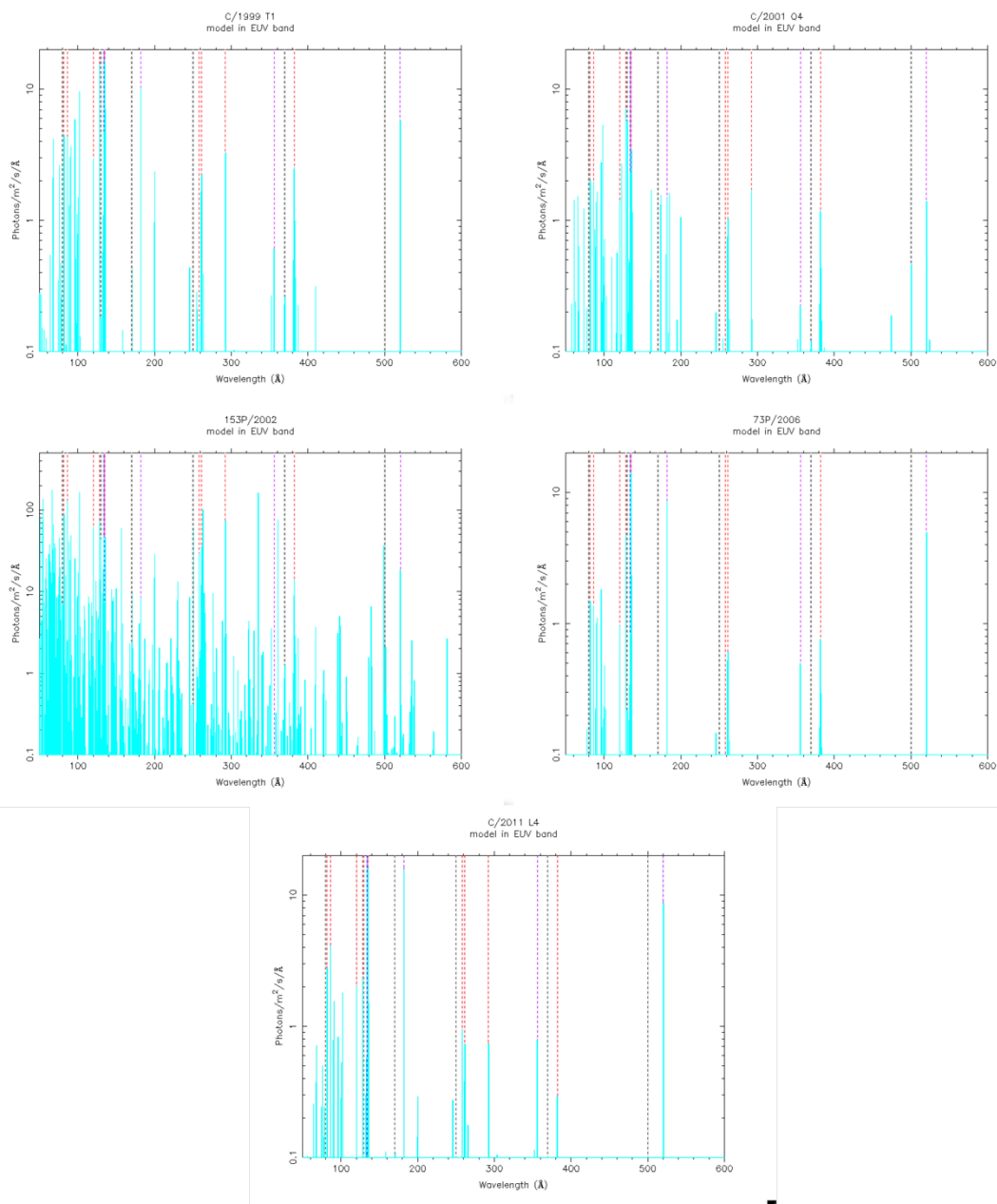


图 5-4 5 颗彗星在紫外波段的预测结果。其中青色是发射线，红色、紫色和深蓝色的虚线分别标出了氧离子、碳离子和氮离子较强的发射线。因为氮离子在 133.8Å 的线与碳离子的 134.9Å 和氧离子在 135.9Å 的线十分接近，所以深蓝线不易看到。背景中灰色的线隔开了几个建议波段。

为了对 5 颗彗星的结果进行统计，首先用 SPEX 程序将紫外波段的谱线抽取成 QDP 格式，然后 Python 进行统计，统计的思路如下：首先从每一个彗星中找出强度最高的 30 条紫外段（80~600Å）的谱线并进行归一化，归一系数为该彗星中最强谱线的强度的倒数，这样得到的每条谱线的强度都是相对于该彗星中最强的谱线的强度而言，而不是绝对值；再将 5 个彗星的归一化后的相对谱线强度进

行累加，横坐标为波长，纵坐标为累加值。这样可以找到强度较高，在彗星中出现次数又较多的谱线。结果如图 5-5。

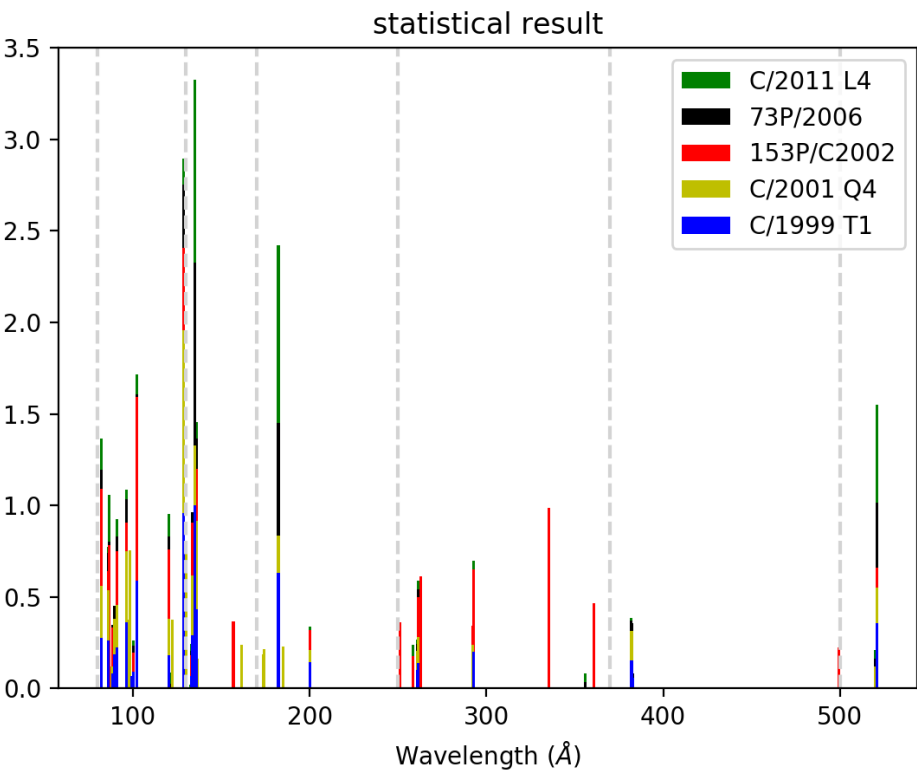


图 5-5 预测的极紫外波段彗星较强的发射线的统计结果

根据统计结果，可以看到在 80~140Å 左右的波段中的辐射线很密集，经过证认主要是 C 和 O 的线，在 135Å 左右紧靠在一起的发射线分别是由 N<sup>6+</sup> (133. 8Å)、C<sup>5+</sup> (134. 9Å) 和 O<sup>6+</sup> (135. 9Å) 产生的；170Å~250Å 中较强的是在 182. 3Å 由 C<sup>5+</sup> 发出的线；250~370Å 中出现较频繁且较强的线是 258. 3Å 和 261. 5Å 两条靠在一起的由氧离子发出的线，Ne<sup>8+</sup> 在 292. 7Å 发出的发射线次之，Fe<sup>11+</sup> 在 335. 5Å 的发射线虽然很强，但只出现在彗星 153P/C2002 中；370~500Å 中较强的线只有 381. 8Å 的 O<sup>6+</sup> 线；另外，在 520. 9Å 的 C<sup>5+</sup> 线也很强。最强的 15 条线的证认列在表 5-3 中。对这些谱线在五颗彗星中的预测强度取中值，假设探测器的有效面积为 50cm<sup>2</sup> 时，可以得到预测的光子流量。

表 5-3 统计图中最强的 15 条线的证认

波长 (Å)	在统计图中的强度	发射谱线的离子	预测的光子流量 (counts ks <sup>-1</sup> )
134. 9	3. 33	C <sup>5+</sup>	14. 85
128. 5	2. 90	O <sup>6+</sup>	7. 01
182. 3	2. 42	C <sup>5+</sup>	9. 26

102.5	1.72	O <sup>7+</sup>	5.60
520.9	1.55	C <sup>5+</sup>	5.69
135.9	1.46	O <sup>6+</sup>	3.35
81.9	1.37	O <sup>6+</sup>	2.72
182.0	1.34	C <sup>5+</sup>	5.15
96.2	1.09	O <sup>6+</sup>	2.71
86.4	1.06	O <sup>6+</sup>	4.07
335.5	0.99	Fe <sup>11+</sup>	158.93
133.8	0.96	N <sup>6+</sup>	3.48
120.3	0.95	O <sup>6+</sup>	1.99
91.0	0.93	O <sup>6+</sup>	1.63
102.3	0.89	O <sup>7+</sup>	4.90

观测波段的选择需要考虑能达到的能量分辨率。若设计为测谱仪，能量分辨率可以在 1000 左右，那么 80~140Å 就是很好的选择：较强的谱线很多，且 C、N 和 O 元素都有比较强的发射线，最强的两条线的能量间隔为 0.8Å，可以在分辨率大于 200 的情况下分辨开。但如果不能有很好 (>200) 的能量分辨率，该带宽内的谱线强度类似且十分密集，三种元素的线也很近，就很难分辨，在这种情况下，另外三段带宽就更为有利。若分辨能力尚可，250~370Å 就是很好的选择，因为不仅对于安静的太阳风可以观测到 O<sup>7+</sup>线和 Ne<sup>8+</sup>线，可能的 Fe<sup>11+</sup>线对显示太阳风的磁流体动力学活动（如日冕物质抛射）很有帮助。若探测器只有测光能力，那么 170~250Å 中很强的 C<sup>5+</sup>线较易观测。需要注意的是，较强的谱线大部分恰好在备选几个能段的边缘，探测器的响应函数可能不佳，希望能够稍微调整观测能段或优化响应函数以弥补这种缺陷。

## 第六章 总结与展望

彗星与太阳风的电荷交换过程对理解该过程本身、以太阳风为代表的恒星风、彗星的性质和结构、其他 X 射线辐射现象和原子物理参数都有重要的作用。然而受限于近地彗星较少的数量和探测器较弱的能力，目前对该过程的研究尚未充分深刻，仍有很大的进步空间。以此为科学目标之一，我们预计在近期（2019-2020 年）发射一颗极紫外波段的空间探测器，恰逢太阳活动极小期，可以获得更多有价值的彗星电荷交换的数据样本。本研究的目的即是通过分析已有的彗星数据，为此探测器选择一合适的设计能段。

本文前部分系统总结了彗星与太阳风的电荷交换过程的背景内容，包括基本概念、发现和证认的过程、理论模型的建立和发展。后部分详细展示了数据处理和拟合过程，用 SPEX 软件包中的电荷交换模型对 Chandra X 射线天文台观测到的 5 颗彗星的光谱进行了迭代拟合，考虑到日冕物质抛射的情况，又对 153P/2002 引入了镁、硅和铁元素的丰度三个自由参数重新拟合，最终得到了 5 个彗星的拟合结果，并以此预言了彗星在紫外波段的谱线。随后通过与 AtomDB 中的数据进行了比对，成功证认出紫外波段较强的发射线，通过统计给出了对探测器设计的建议：根据可能的分辨能力选择不同的能段，同时注意避免探测器响应函数的影响。

虽然成功给出了设计建议，但本研究仍有许多不足之处：样本量少且不能充分代表各种空间条件，数据处理阶段没有将彗星在天球坐标对齐进行叠加，没有考虑 ACIS-S 的灵敏度和分辨率随时间的变化，对背景的扣除还不完美，没有使用多组分拟合的方法，对 153P/2002 和 C/2011 L4 两颗彗星的拟合结果的解释还不充分，对紫外波段的谱线的应用尚不清晰等。模型本身也还有缺陷：碰撞截面的数据库有待完善，仅考虑了单电子俘获过程，对多参数的情况拟合过程较慢等。研究的下一步是完善研究的不足之处，再尝试用其他模型进行拟合，比较不同模型的结果。也希望能够在研究基础上较准确地预测彗星在不同空间状态下可能产生的光谱，和彗星不同结构处可能产生的光谱，为紫外探测器的工作提供更详实的理论支持。

## 参考文献

- [1] Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., & Rossi, B. B. (1962). Evidence for X rays from sources outside the solar system. *Physical Review Letters*, 9(11), 439.
- [2] Lisse, C. M., Dennerl, K., Englhauser, J., Harden, M., Marshall, F. E., Mumma, M. J., ... & Trümper, J. (1996). Discovery of X-ray and extreme ultraviolet emission from Comet C/Hyakutake 1996 B2. *Science*, 274(5285), 205-209.
- [3] Mumma, M. J., Krasnopolsky, V. A., & Abbott, M. J. (1997). Soft X-rays from four comets observed with EUVE. *The Astrophysical Journal Letters*, 491(2), L125.
- [4] Häberli, R. M., Gombosi, T. I., De Zeeuw, D. L., Combi, M. R., & Powell, K. G. (1997). Modeling of cometary X-rays caused by solar wind minor ions. *Science*, 276(5314), 939-942.
- [5] Krasnopolsky, V. (1997). On the nature of soft X-ray radiation in comets. *Icarus*, 128(2), 368-385.
- [6] Wegmann, R., Schmidt, H. U., Lisse, C. M., Dennerl, K., & Englhauser, J. (1998). X-rays from comets generated by energetic solar wind particles. *Planetary and space science*, 46(5), 603-612.
- [7] Neugebauer M., Cravens T. E., Lisse C. M., Ipavich F. M., Christian D., von Steiger R., Bochsler P., Shah P. D., Armstrong T. P. (2000) The relation of temporal variations of soft X-ray emission from Comet Hyakutake to variations of ion fluxes in the solar wind. *J. Geophys. Res.*, 105, 20949 - 20956.
- [8] Lisse, C. M., Christian, D. J., Dennerl, K., Meech, K. J., Petre, R., Weaver, H. A., & Wolk, S. J. (2001). Charge exchange-induced X-ray emission from Comet C/1999 S4 (LINEAR). *Science*, 292(5520), 1343-1348.



- [9] Cravens, T. E. (2002). X-ray emission from comets. *Science*, 296(5570), 1042–1045.
- [10] Kharchenko, V., Rigazio, M., Dalgarno, A., & Krasnopolsky, V. A. (2003). Charge abundances of the solar wind ions inferred from cometary X-ray spectra. *The Astrophysical Journal Letters*, 585(1), L73.
- [11] Lisse, C. M., Cravens, T. E., & Dennerl, K. (2004). X-ray and extreme ultraviolet emission from comets. *Comets II*, 631643.
- [12] Krasnopolsky, V. A., Greenwood, J. B., & Stancil, P. C. (2004). X-ray and extreme ultraviolet emissions from comets. *Space Science Reviews*, 113(3–4), 271–373.
- [13] Dennerl, K., Lisse, C. M., Bhardwaj, A., Burwitz, V., Englhauser, J., Gunell, H., ... & Rodríguez-Pascual, P. M. (2006). First observation of Mars with XMM-Newton-High resolution X-ray spectroscopy with RGS. *Astronomy & Astrophysics*, 451(2), 709–722.
- [14] Bodewits, D. (2007). Cometary X-rays. *Solar wind charge exchange in cometary atmospheres*.
- [15] Bodewits, D., Christian, D. J., Torney, M., Dryer, M., Lisse, C. M., Dennerl, K., ... & Hoekstra, R. (2007). Spectral analysis of the Chandra comet survey. *Astronomy & Astrophysics*, 469(3), 1183–1195.
- [16] Swamy, K. K. (2010). *Physics of comets*. World Scientific.
- [17] Bodewits, D., Christian, D. J., Carter, J. A., Dennerl, K., Ewing, I., Hoekstra, R., ... & Wolk, S. J. (2012). Cometary charge exchange diagnostics in UV and X-ray. *Astronomische Nachrichten*, 333(4), 335–340.
- [18] Krasnopolsky, V. A. (2015). CXO X-ray spectroscopy of comets and abundances of heavy ions in the solar wind. *Icarus*, 247, 95–102.

- [19] Gu, L., Kaastra, J., & Raassen, A. J. J. (2016). Plasma code for astrophysical charge exchange emission at X-ray wavelengths. *Astronomy & Astrophysics*, 588, A52 – 11.
- [20] Snios, B., Kharchenko, V., Lisse, C. M., Wolk, S. J., Dennerl, K., & Combi, M. R. (2016). Chandra observations of comets c/2012 s1 (ison) and c/2011 14 (panstarrs). *The Astrophysical Journal*, 818(2), 199.
- [21] Mullen, P. D., Cumbee, R. S., Lyons, D., Gu, L., Kaastra, J., Shelton, R. L., & Stancil, P. C. (2017). Line Ratios for Solar Wind Charge Exchange with Comets. *The Astrophysical Journal*, 844(1), 7.

## 致谢

大学四年，兜兜转转参加过许多领域的项目，我还是选择了天文作为专业方向。我觉得这是一个每天都能让人充满惊喜充满期待的、大家齐心协力还十分接地气儿的领域，我喜欢能让自己参与到最前沿，去感受时代强音。大二起兴参加了北京大学宇宙主题的暑期学校，别的不记得什么，但苏萌老师展示的无数精彩体验和国之重器的蓬勃发展，为我选择天文提供了强大助力。没想到两年之后，我能荣幸地成为苏老师的博士生，一起投身天文发展的洪流浪潮。感谢苏老师和香港大学的认可，这是难得的机遇。

我毕业设计期间在南大，而苏老师作为指导老师在港大，交流确实不太方便。所以我在四月中旬拜访了港大，受到苏老师、任静远学姐和杨丰维学长的热情接待，帮我对香港、对港大和对我们的课题都有了更深刻的理解，十分感谢。

李志远老师作为校内指导老师，为我在方向和细节上都提供了莫大的帮助。我们几乎每周一和周三都会对之前存在的问题进行讨论，摸清下一步的方向。老师还常常为我推荐文献和相关参考书，帮我联系老师和同学来指导我软件的操作，联系紫台相关领域的老师讨论理论问题，鼓励我与文献作者直接交流，在课堂上用英文讲解文献，还带我在四月上旬去上海与同济大学的实验室讨论紫外探测器的设计。之前我收到几所大学的录取时，也和李老师进行了充分的沟通。能遇到李老师何其幸运，由衷感激。

研究过程中，我也与模型的作者顾力意老师沟通了模型和拟合的情况。感谢老师那么耐心地邮件回复我各种问题，分享原代码和数据，推动了项目的进展。此外，也感谢姜冰老师、侯美存学姐和施方正学姐的技术指导，我能在短期内掌握多个软件和数据库的操作多亏了她们。

父母、男朋友、舍友和同学也都在这半年里为我提供经济上、心理上、生活上等无处不在的帮助，毕业论文的顺利完成与他们的支持绝对是分不开的。

做毕业设计这半年经历了太多，却何不是四年大学的缩影，老师同学亲朋好友都是一如既往得可爱。最后也要感谢自己，不断尝试一直坚持，一直在勇敢追求自己喜欢的。继续，加油。