



中国科学技术大学博士论文答辩

论文题目：多成份太阳风模型

专业：空间物理

姓名：陈耀

导师：胡友秋 Ruth Esser 李中元

MULTI-FLUID SOLAR WIND MODELS

***** 绪 论 *****

- 太阳风物理背景简介

***** 多成份太阳风模型 *****

- 电子、质子二维太阳风模型
- 三成份低速流太阳风模型
- 太阳风高速流少数离子电荷态模型
- 太阳风高速流的双电子流体模型

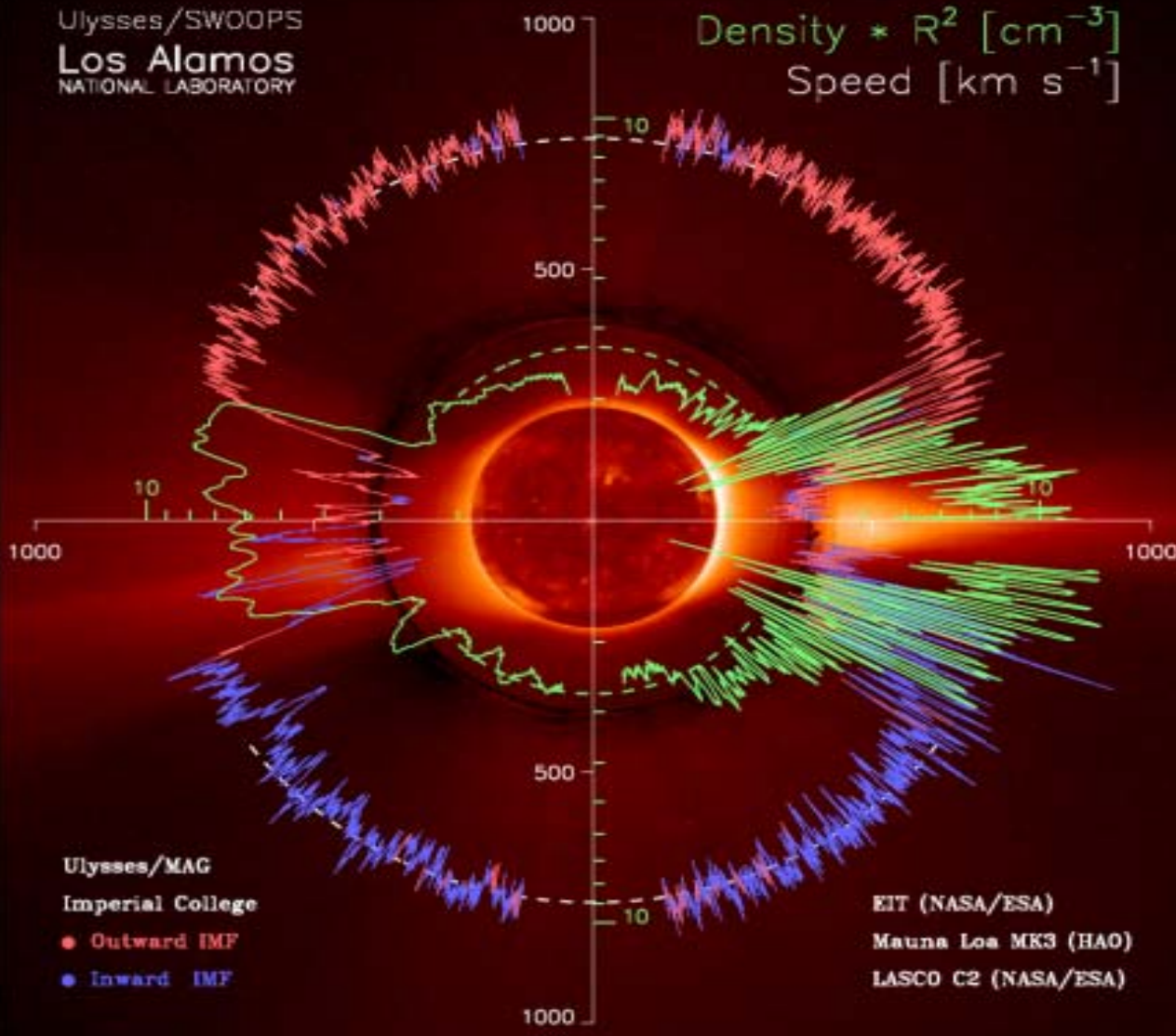
***** 总结 *****

• 太阳风物理背景简介 I :

定义：太阳风是由日冕不断向行星际空间发出的持续超声速带电粒子流。

太阳风等离子体的组成：

{
电子
质子
alpha粒子 (~1 - 4%)
少数离子 (C, O, Mg, Fe, Si等) } 重离子



太阳风背景简介I:

太阳风高速流:

快、稀、热

更均匀、稳定

太阳风低速流:

慢、密、冷

变化较大

日冕:

冕洞 + 冕流区域

高速流与冕洞相关,

低速流与冕流相关。

太阳活动低年子午面内日冕与太阳风的全球结构示意图

曲线: Ulysses飞船在1992 - 1997六年间的测量数据

(至今唯一的日球高纬空间实测)

太阳风背景简介II:

太阳风理论模型发展过程

Parker (1958) (单成份等温模型):

太阳风是日冕气体高温膨胀的直接结果：
向外的热压梯度力超过重力从而形成超声速太阳风 → “热驱动”太阳风

基于Parker模型，引入各种改进(1960-70s)

这些模型的基本、共同结论：

必定存在非热能源（加速和加热太阳风）
以解释高速流太阳风的观测特征

80年代 - 现在:

寻找合适的太阳风驱动机制
(世纪难题)

假说之一: 离子回旋共振机制

阿尔文波湍流串级供能的离子回旋共振机制

- 太阳风扰动主要是低频阿尔文波脉动
- 有利于回旋共振机制的观测事实：
 太阳附近、行星际空间高速流重离子的
 优势加热(垂直)与加速特征(比质子热且快)

主要物理思想:

假设太阳风中的阿尔文扰动不断将能量湍流串级至
高频离子回旋波段→离子回旋共振波粒相互作用
→加热和加速太阳风离子

- 已被用来建立不同复杂程度的太阳风模型：
 - (1) 不同成份：两、三、四、背景 + 试验粒子
 - (2) 不同区域：高速流、低速流、过渡区
 - (3) 不同维数：一维、二维

MULTI-FLUID SOLAR WIND MODELS

第二章：阿尔文波驱动的二维太阳风模型： 流管几何对太阳风特性的影响

阿尔文波耗散机制被普遍认为是一种有效的高速流太阳风驱动机制。但是在低速流中也观测到阿尔文波，而低速流却不象高速流那样得到有效的加速和加热，为什么？

→必须进行二维模拟（同时考虑高速流与低速流）。

前人工作：

(1) 该机制研究主要局限于一维高速流太阳风

(2) 以往二维太阳风模型缺陷：

供能机制不明确：大都使用多方、等温过程
(存在不明热源)

本章二维模型：

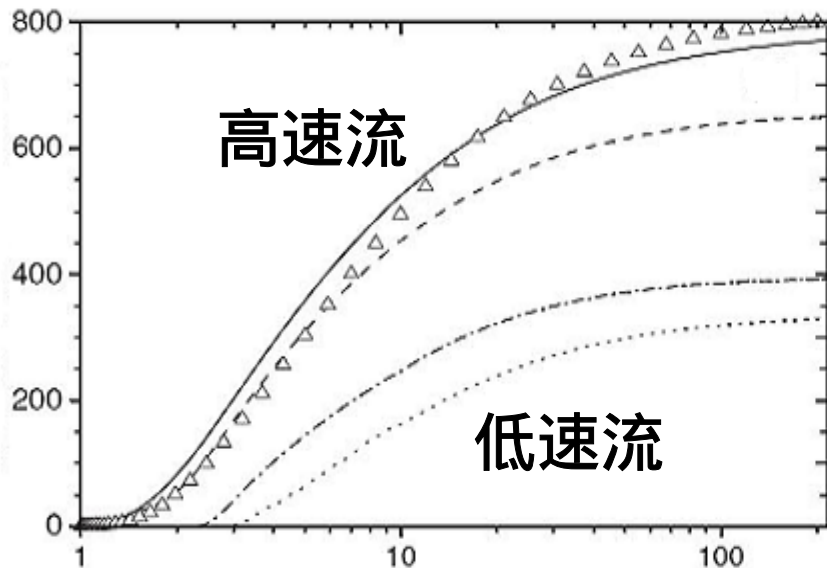
(1) 取阿尔文波的耗散作为唯一外加能源

(2) 阿尔文波耗散机制：

湍流串级供能的离子回旋共振机制

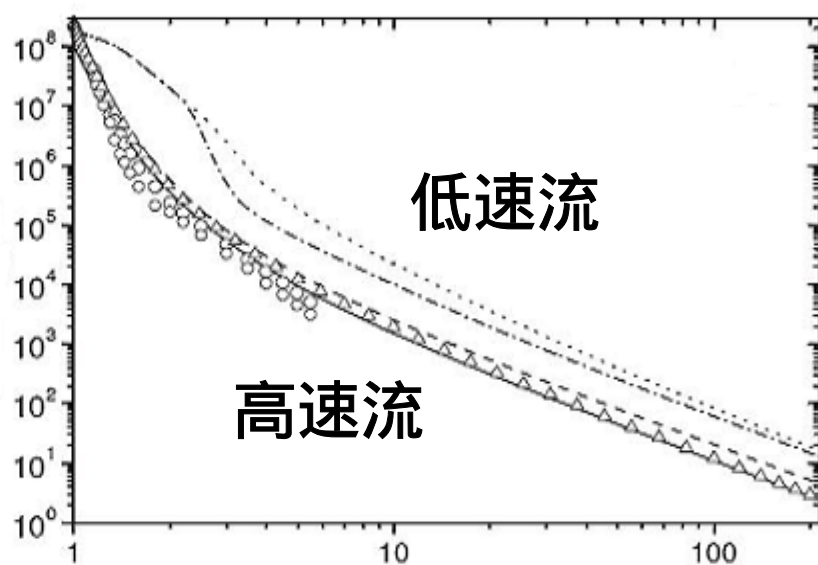
主要结果：太阳风参数在不同纬度上的径向剖面

太阳风速度



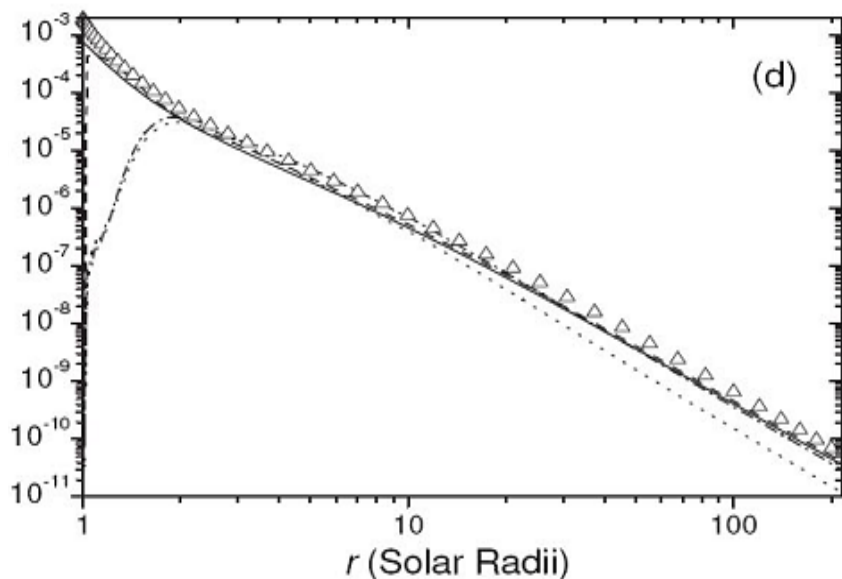
日心距离 (太阳半径)

太阳风数密度

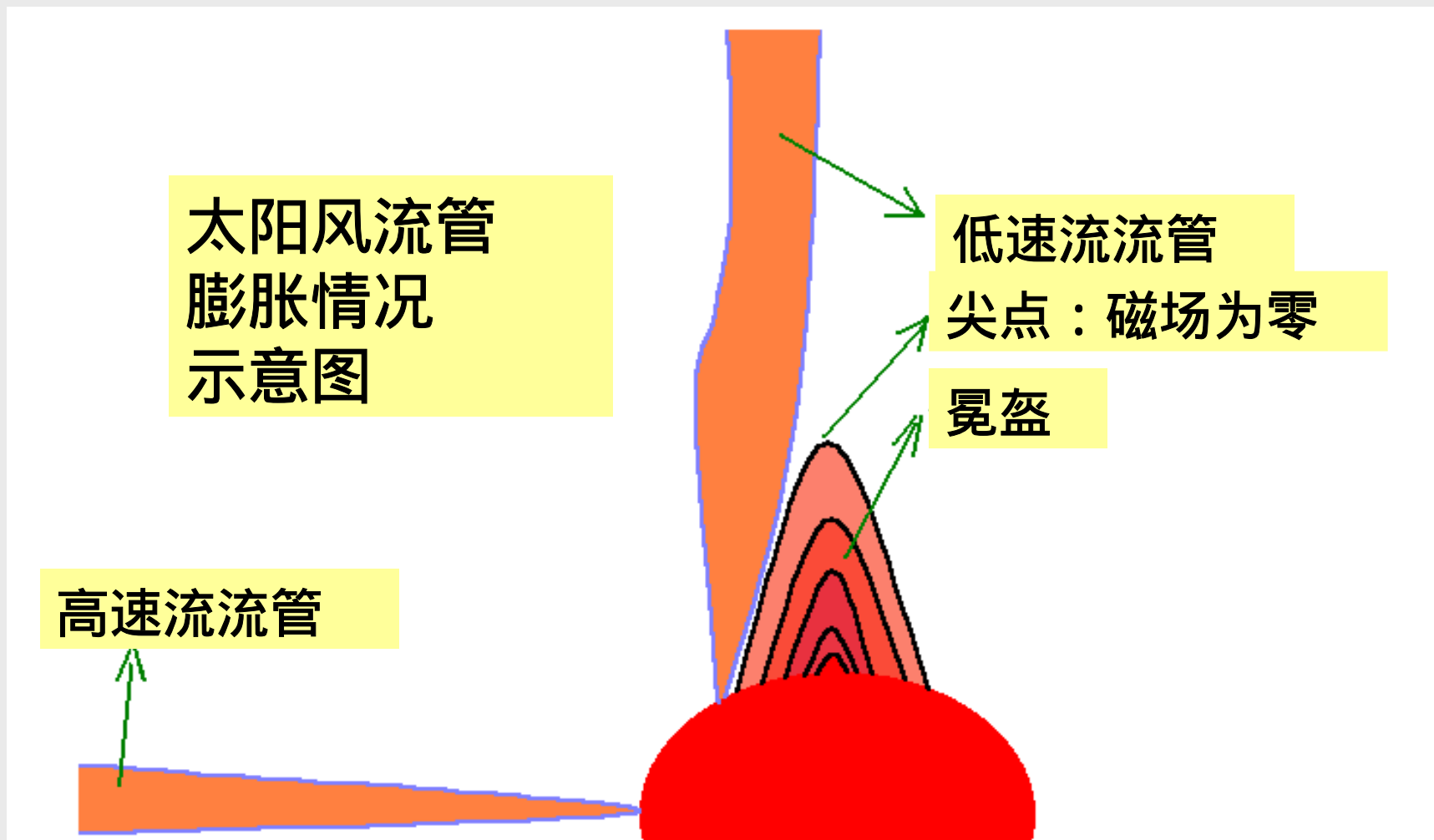


日心距离 (太阳半径)

阿尔文波压



1. 高速流：快、稀
低速流：慢、密
2. 高、低速流中都可存在幅度相当的阿尔文波，为什么高、低速流却具有截然不同的物理性质？

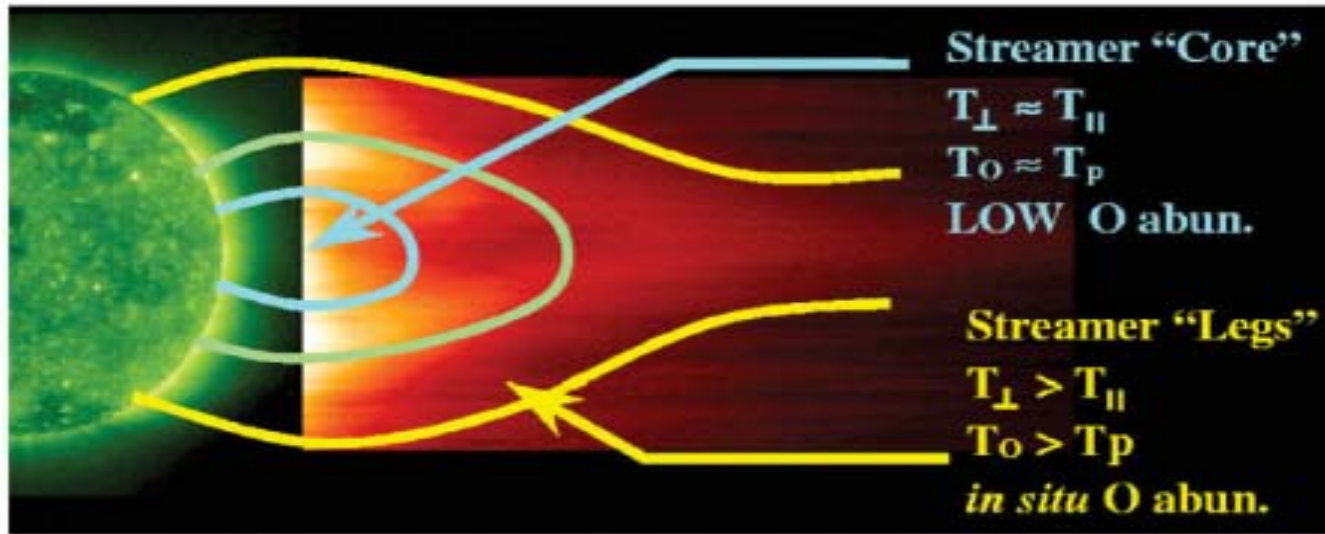


- 高速流流管单调膨胀
 - 低速流流管非单调膨胀：膨胀 收缩 再膨胀
- 只改变流管膨胀过程 → 可分别得到高低速流太阳风

→流管几何对低速流太阳风物理特性的形成具有决定性影响。该模型指出阿尔文波的耗散机制可同时作为驱动高速流与低速流太阳风的物理机制；澄清了为什么低速流中也观测到阿尔文波但却没有得到足够的加热与加速的疑问。

相关论文已被国际同行引用10次以上，且被太阳和日球观测台(SOHO: NASA&ESA)科学工作组2003年向NASA提交的延长SOHO工作寿命(五年)申请书(网上)引用。

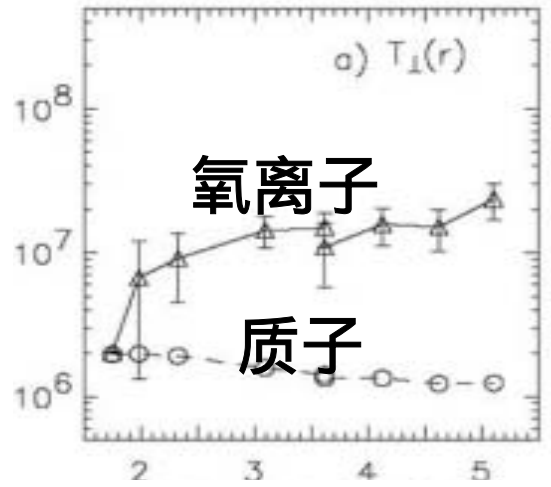
第三章：回旋共振机制驱动的二成份低速流太阳风模型



太阳和日球观测台紫外日冕仪 (UVCS/SOHO) 最新观测结果: (2002,2003,ApJ)

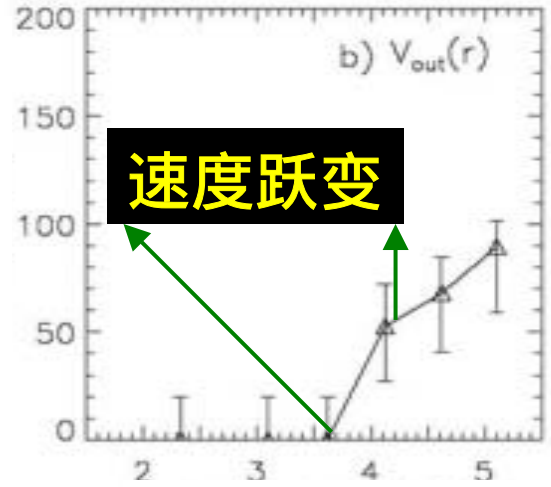
- 冕流边缘处元素丰度 \rightarrow 低速流起源
- 冕盔上方
 - $T(O^{+5}) > T(p)$
 - $T_{perp} > T_{para}$
- 沿冕流轴线的速度跳变.

垂直温度



日心距离

氧5速度



日心距离

太阳活动低年冕流的OVI 图像与沿冕流轴线的离子参数

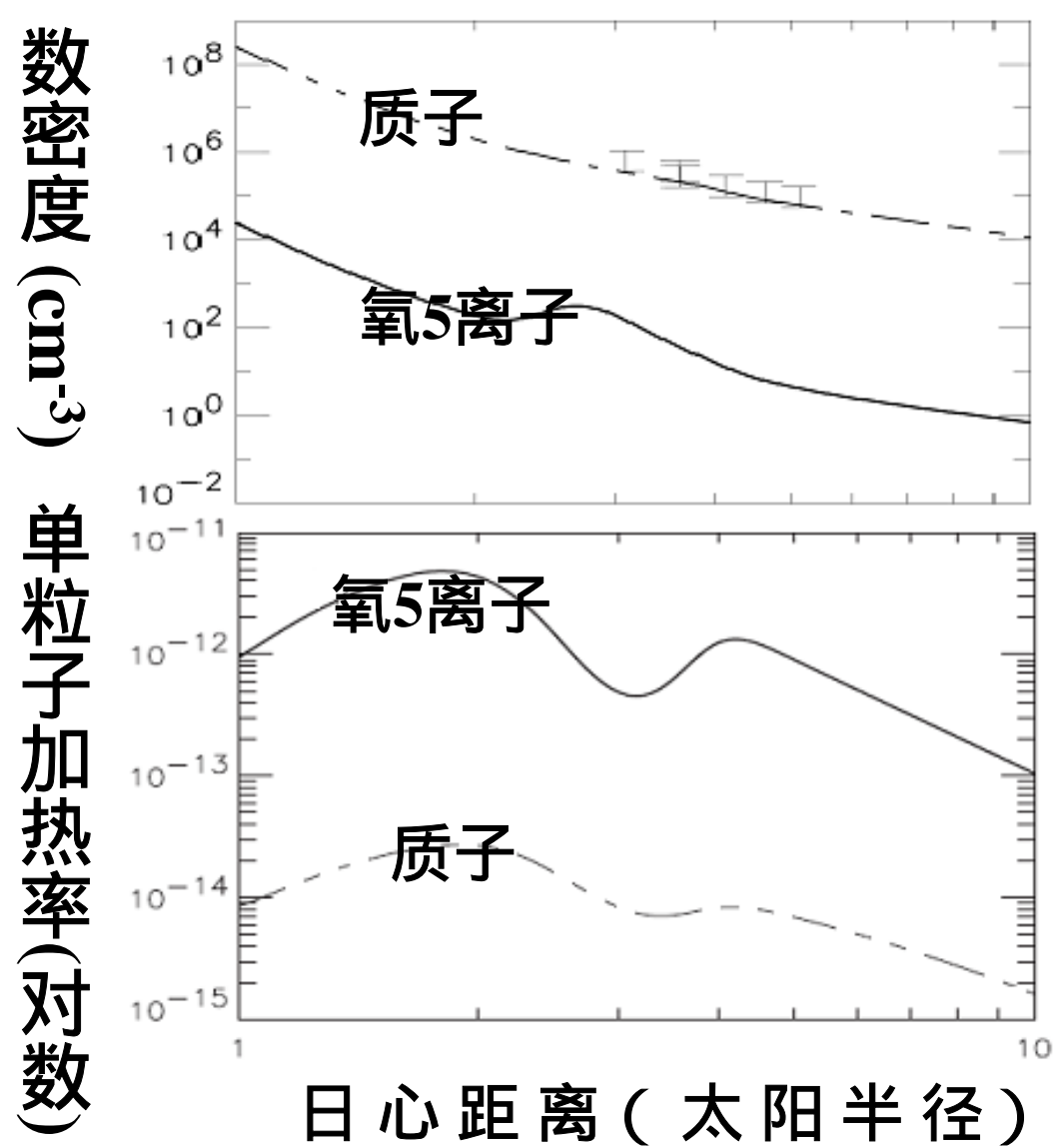
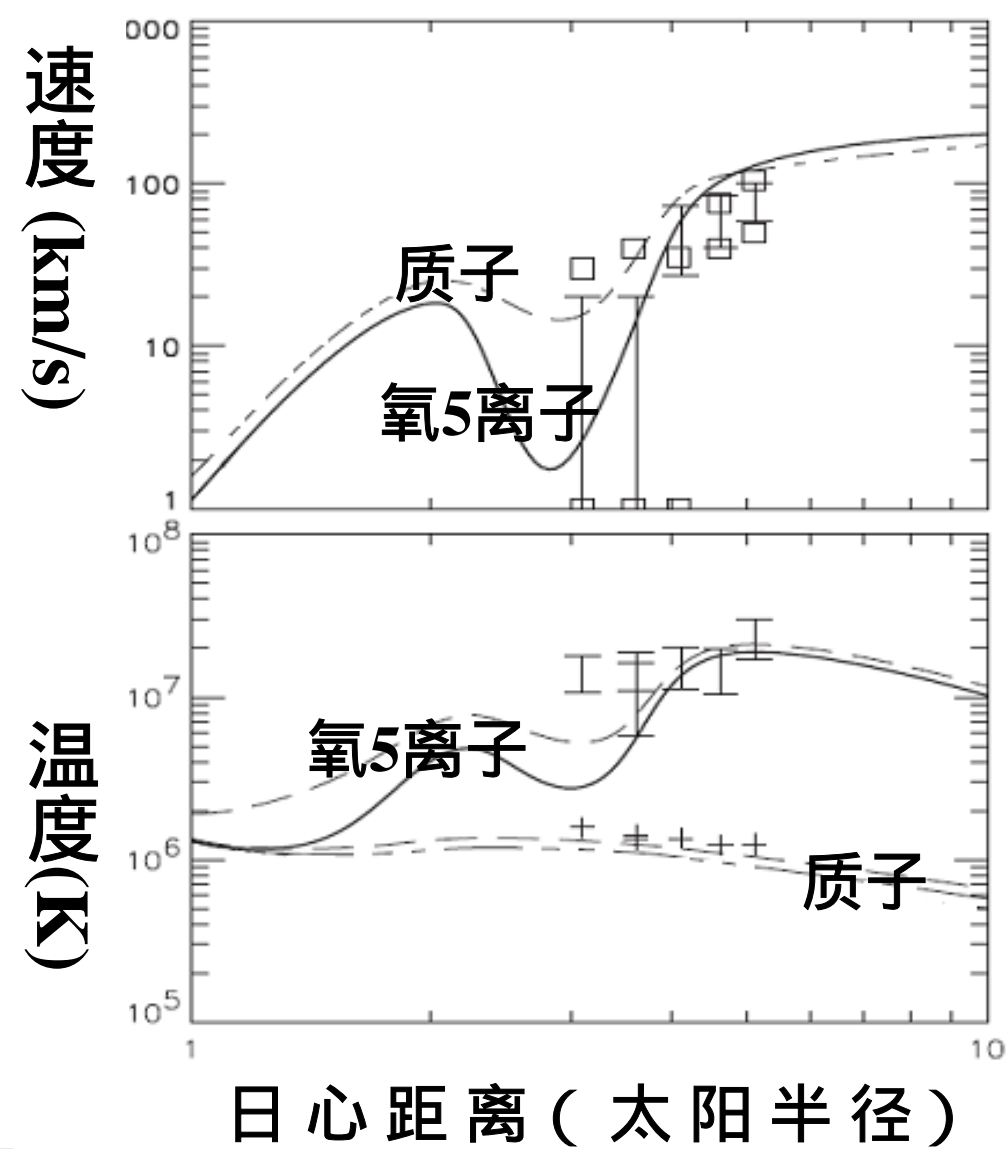
冕流与低速流区域氧5离子的观测特征与高速流中的相似。而离子回旋共振机制被用来解释高速流中少数离子的优势加热与加速。

→ 问题：可以用该机制解释低速流中少数离子的性质吗？

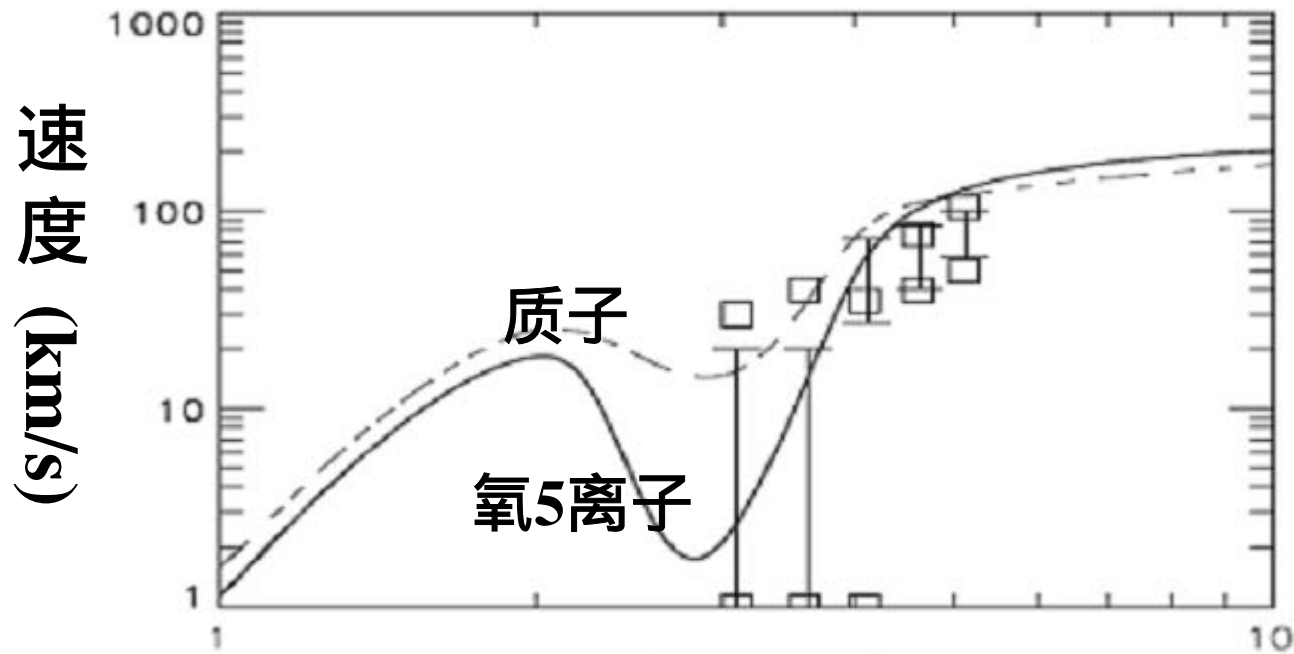
模型主要假设:

- 一维、三成份 (e 、 p 、 O^{+5})
- 给定低速流流管的膨胀过程
(特征: 非单调膨胀剖面, 与二维计算相似)
- 阿尔文波湍流串级供能的离子回旋共振机制
为计算共振加热率与加速度的大小, 假设:
 - Kolmogorov型串级率
 - 准线性的波粒相互作用理论
 - 离子回旋波色散关系的冷等离子体近似
 - 回旋波功率谱取为幂率谱

观测限制: 紫外日冕仪测量结果及低速流质子通量



1. O^{+5} 离子滞流现象 \rightarrow 密度鼓包
2. O^{+5} 离子的优势加热 (超过质量比)
3. 加热率凹陷 \leftarrow 流管的快速膨胀 \rightarrow 影响温度



日心距离 (太阳半径)

氧离子所受主要作用力：

- 重力 (与质量成正比，最重要的减速力)
- 与质子的库仑碰撞力 ($\propto Z_i^2$, \propto 速度差, \propto 质子密度)
- 2-3 R_s 以内最重要的加速力
- 热压梯度力 (由加热机制决定，稍远处 ($>3R_s$) 很重要)
- 极化电场力 ($\propto Z_i$)

滞流现象成因

要点：

- 首次将离子回旋共振机制用于理解低速流太阳风重离子的观测特性, 首次解释了紫外日冕仪最新观测数据
- 发现并解释了低速流中 O^{+5} 离子的“滞流现象”

“滞流现象”的重要性：

- (1) 根据 O^{+5} 离子的速度跃变只能给出尖点位置的上限.
- (2) 影响离子的膨胀时间尺度→
对于低速流中电荷态的形成即冻结过程可能有重要作用.

第四章：太阳风高速流少数离子电荷态间差动速度及其对冻结过程的影响

少数离子的电荷态方程：

$$\frac{\partial f_i}{\partial r} = n_e \left\{ \frac{f_j}{v_j} R_j + \frac{f_k}{v_k} C_k - \frac{f_i}{v_i} (C_i + R_i) \right\}, \quad f_i = \frac{n_i v_i}{\sum n_l v_l}$$

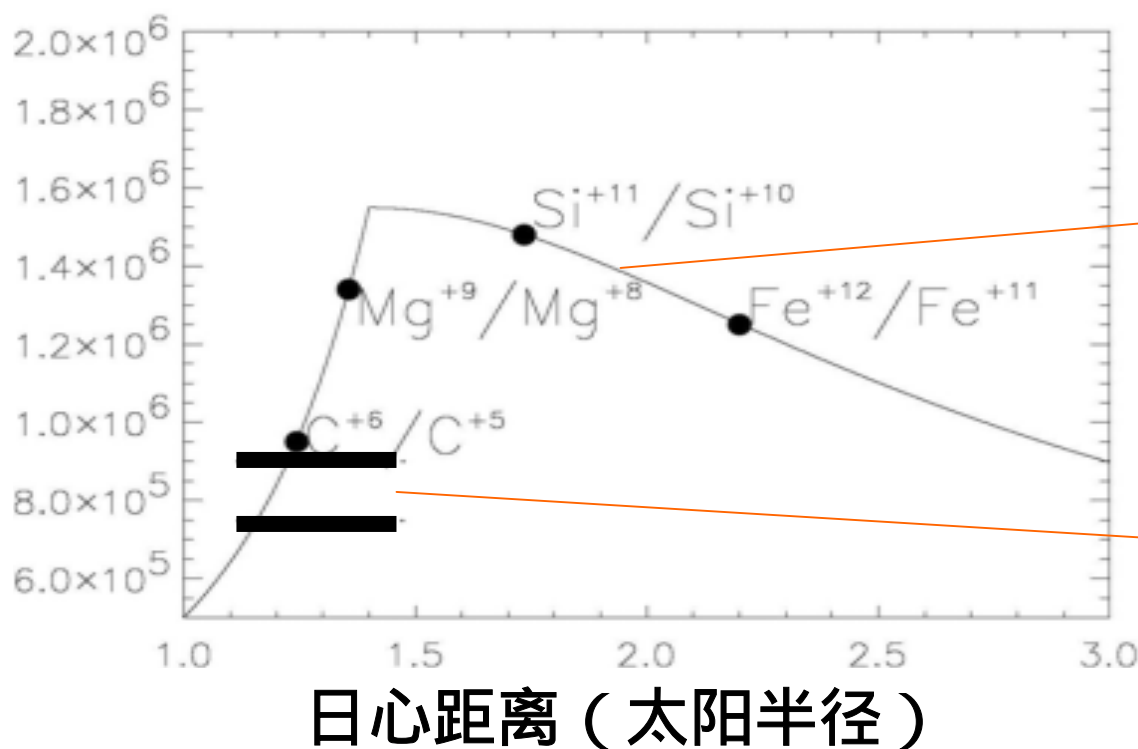
C, R : 电离、复合率(由电子速度分布函数决定)

n_e : 电子数密度 v : 离子速度

n_e 足够小或者 v 足够大 \rightarrow 电荷态相对通量 f_i 为常数 \rightarrow 冻结过程 (1-2太阳半径之内)

\rightarrow 由远处如地球附近的电荷态分布观测数据可以推断近日物理参数(如根据电离程度推测日冕电子温度)

冕洞高速流电子温度



由电荷态冻结过程倒推出的冕洞电子温度

谱线观测推出的电子温度

当前太阳风电荷态研究中的一大谜（难）题：
根据冻结过程导出的冕洞电子温度高出谱线测量出的电子温度（约1MK）近0.5 MK！？**原因何在？**

- (1) 内冕电子非M分布，存在少量(如5%)高能电子
- (2) 电荷态间存在较大的速度差别即差动速度
((2) 缺陷：所有模型均采用人为假设的差动速度)

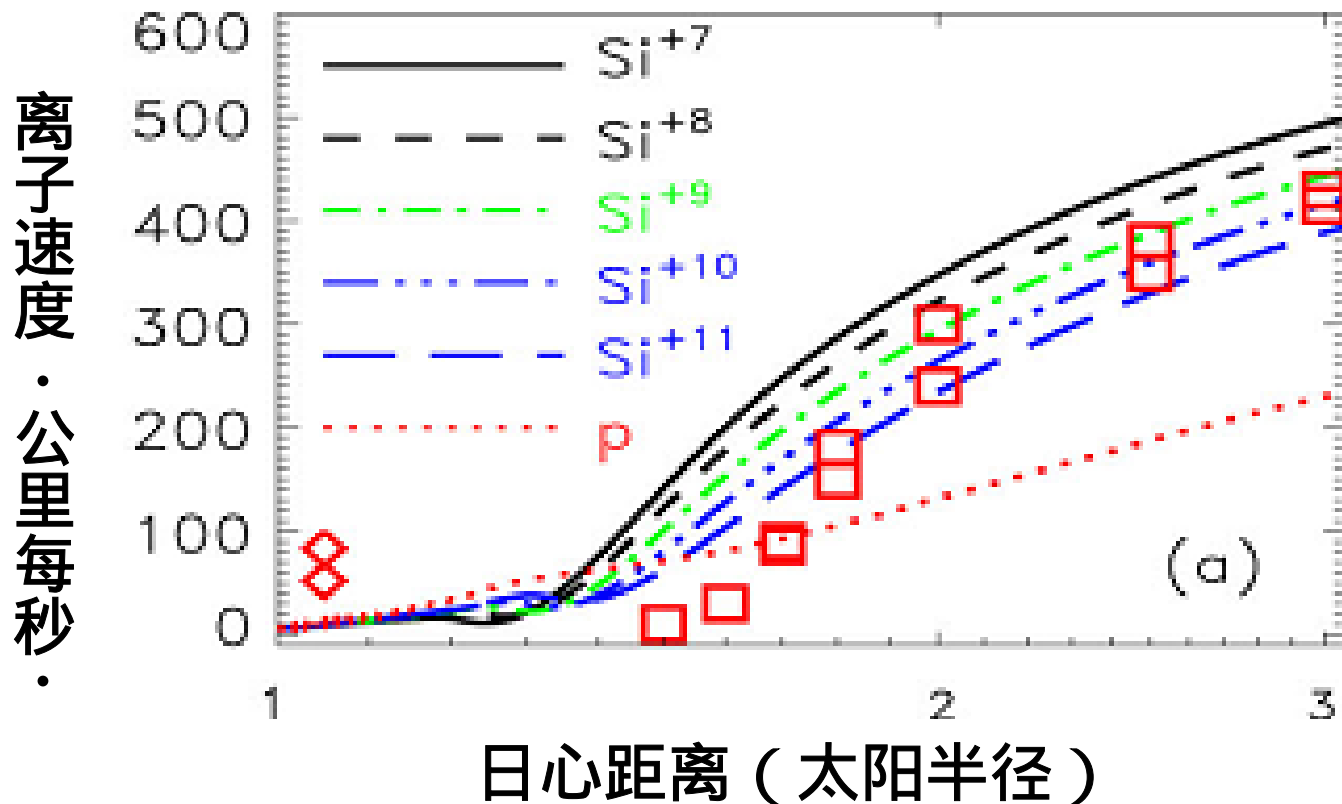
模型简介：

三成份 (e, p, alpha) 背景太阳风模型 +
五成份少数离子模型 (共15个方程)

差动速度由下列主要作用力平衡产生：

- 重力 (与质量成正比，最重要的加速力)
- 与背景太阳风离子成份的库仑碰撞作用
($\propto Z_i^2$, 太阳附近少数离子所受最重要的加速力)
- 热压梯度力 (由加热机制决定，稍远处很重要)
- 极化电场力 ($\propto Z_i$)

Si电荷态 (Si +7—+11) 速度径向剖面



- 各成份速度相等 ← 与背景太阳风的耦合作用及电离复合过程
- $V_i < V_p$: 质量大, 通过与质子的库仑碰撞获得加速
- 减速过程: 库仑碰撞力 $<$ 重力
- 小电荷离子先减速 (库仑碰撞力 $\propto Z_i^2$), 也先加速 (回旋波对回旋频率小的优势加热和加速)

Si⁺⁷, - Si⁺¹¹离子的电荷态丰度计算结果与观测数据对照

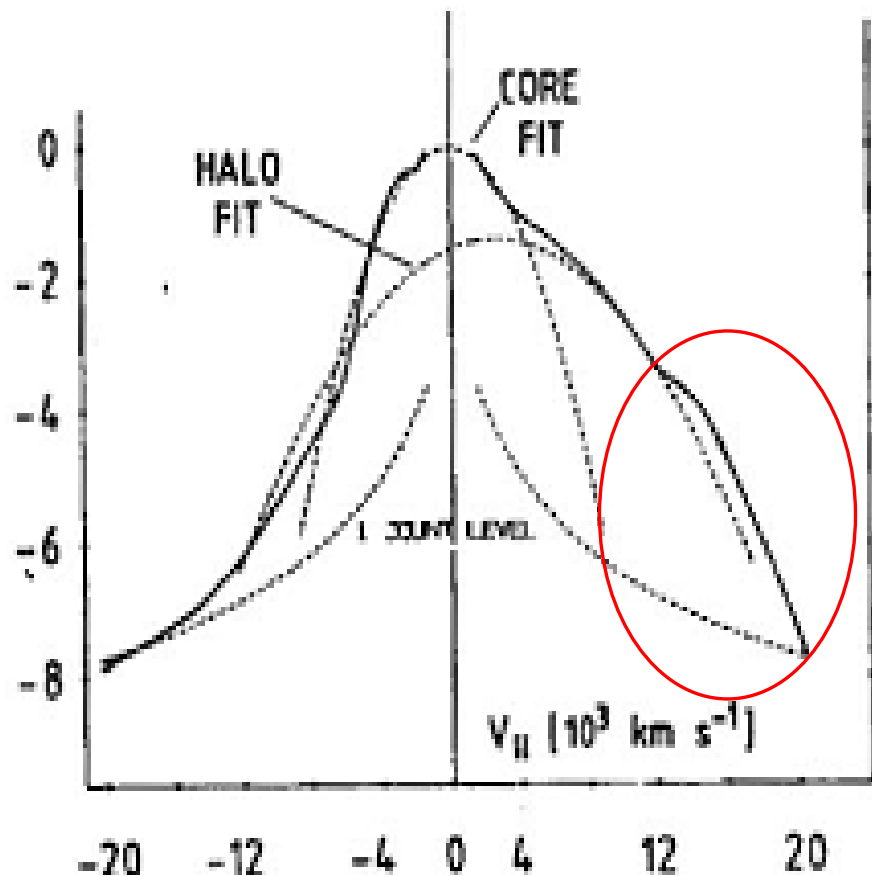
Ion species	Si ⁺⁷	Si ⁺⁸	Si ⁺⁹	Si ⁺¹⁰	Si ⁺¹¹
Ionic fractions:					
Model A	0.437	0.398	0.145	0.019	7E-4
Model B	0.470	0.385	0.127	0.017	6E-4
Observed lower*	0.045	0.161	0.402	0.189	0.035
Observed upper*	0.066	0.262	0.456	0.275	0.072

- 模型A: 包含差动速度 模型B: 各电荷态速度相等
计算得到的电荷态分布向低电荷态偏移两个电荷
- 使用不同加热函数：
不可能在1.1--1.2 Rs之内得到显著的差动速度
差动速度只有在一定日心距离之外才可以发展起来，
此处已有相当一部分离子形成，所以仅仅使用差动速度
无法解释高速流中高电荷态分布与冕洞低电子温度之间的
矛盾，必须另辟蹊径（例如内冕非热电子速度分布）。

第五章： 太阳风高速流的双电子流体模型

核电子成份 + 环电子成份

相对电子数 (对数)



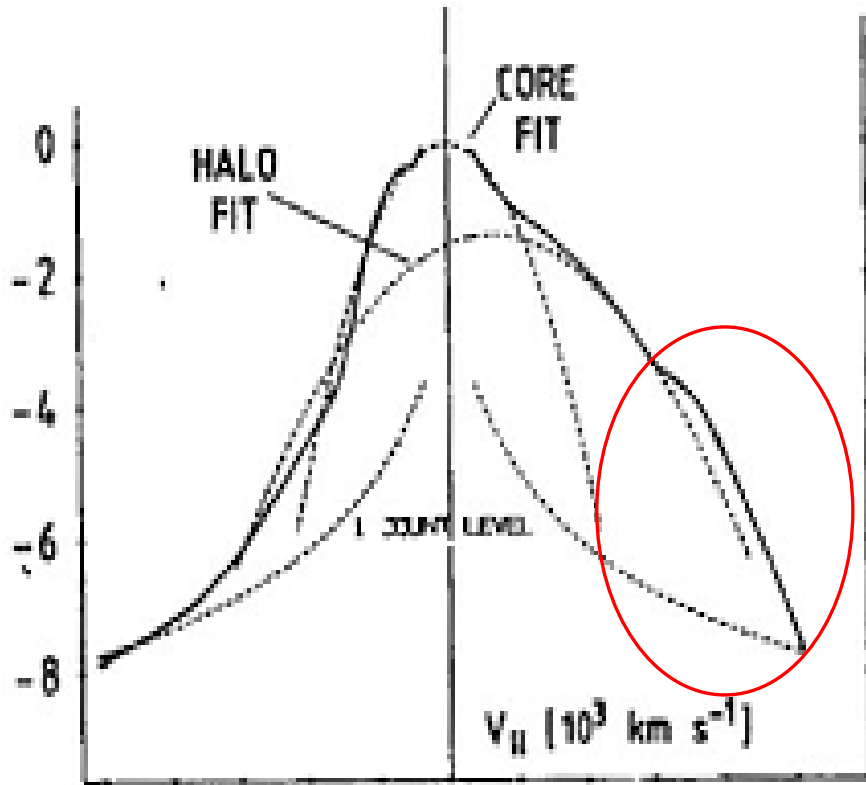
电子平行速度 (1000km/s)

高速流中电子速度分布
函数主要观测特征(1 AU) :

- (1) 低温高密度核分量 (Core)
- (2) 高温低密度环分量 (Halo)
- (3) h-p 密度比 : 约4%
- (4) h-c 相对漂移速度 :
1000-3000km/s
- (5) Th: 0.6-1 MK
Tc: 0.1 MK

核电子成份 + 环电子成份

相对电子数 (对数)



电子平行速度 (1000km/s)

- 流体模型：
对分布函数作Maxwell I 假定
- 动力学模型：不作假定
(求解困难，均匀介质)
- 将电子近似为两种流体成份，研究电子速度分布的成因；分析影响分布的主要物理过程：
库仑碰撞相互作用？
异常输运现象？

理论模型简介：

$$\frac{\partial n_h}{\partial t} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial r} (n_h v_h a) = 0$$

连续方程

$$m_e \left(\frac{\partial v_h}{\partial t} + v_h \frac{\partial v_h}{\partial r} + \frac{GM_S}{r^2} \right) = - \frac{1}{n_h} \frac{\partial p_h}{\partial r} - eE + (1 + \alpha) [CCT]$$

动量方程
能量方程

$$\frac{n_h k_B}{\gamma - 1} \left[\frac{\partial T_h}{\partial t} + v_h \frac{\partial T_h}{\partial r} + (\gamma - 1) \frac{T_h}{a} \frac{\partial}{\partial r} (v_h a) \right] = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial r} (a \kappa_h \frac{\partial T_h}{\partial r}) + Q_h + (1 + \alpha) [CCT]$$

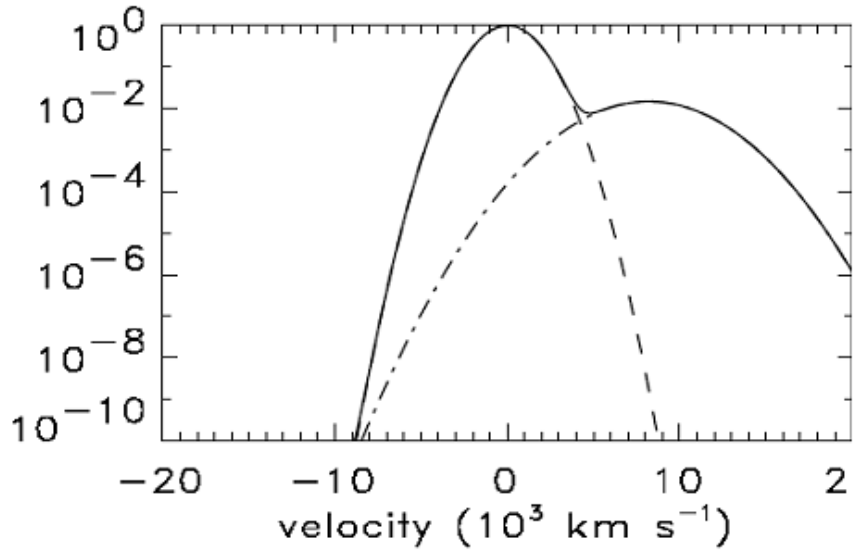
$\alpha = 0$: 模型中只考虑库仑碰撞项,

$\alpha > 0$: 使用增强的库仑碰撞项近似异常输运现象.

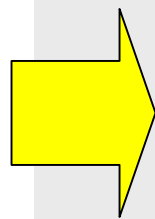
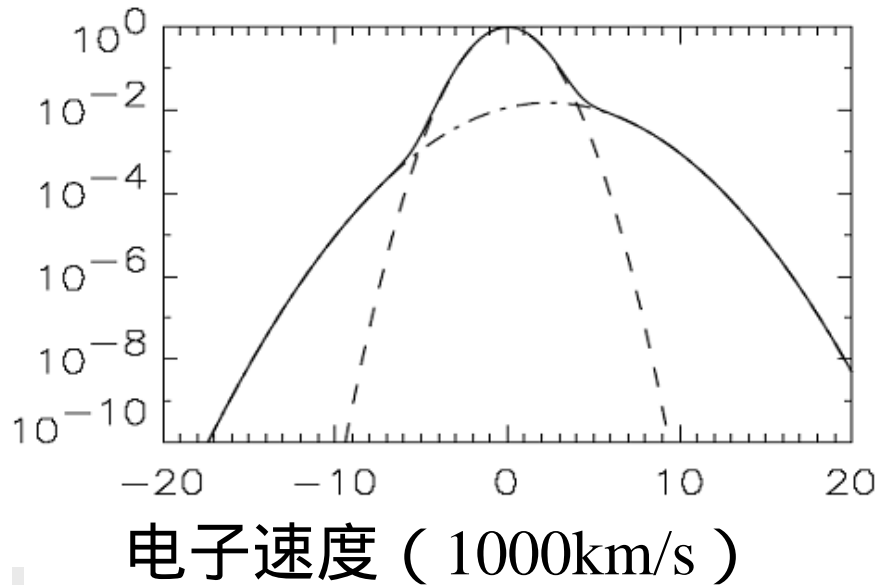
增加环电子分量的能量注入

$$Q_h = n_h Q_{h0} \exp\left(\frac{R_S - r}{\sigma_h}\right), \sigma_h = 100 R_S (\alpha = 0), 1000 R_S (\alpha > 0)$$

相对电子数

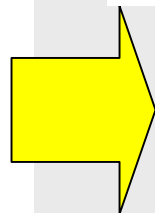
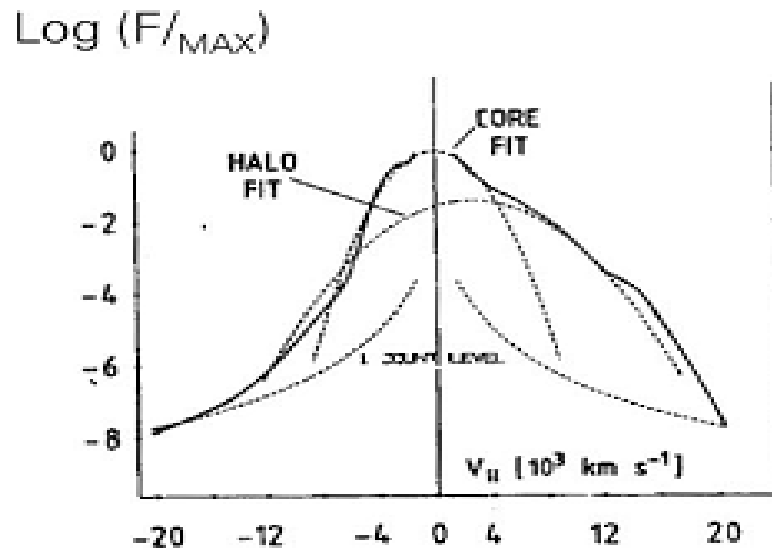


相对电子数



只考虑库仑碰撞过程，则
电子间漂移速度 \gg 观测值

相对电子数 (对数)



必须考虑适当的异常输运
过程，方可得到与符合观
测的电子速度分布函数。

➔ 异常输运现象在电子速度分布形成过程中具有重要作用

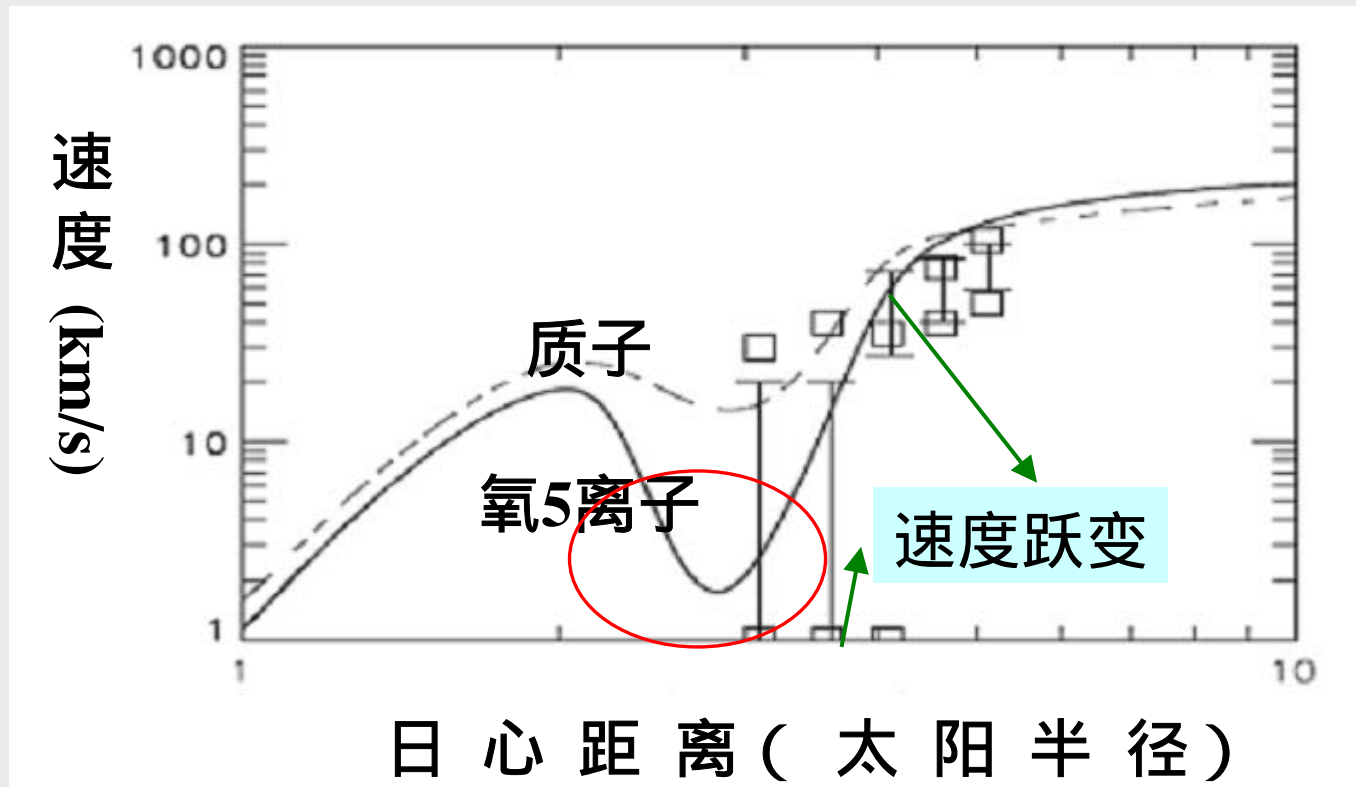
总结 I :

阿尔文波驱动的二维太阳风模型：流管几何的影响

阿尔文波耗散机制被普遍认为是一种有效的高速流太阳风加热与加速机制。在低速流中也观测到幅度相当的阿尔文波，而低速流却没有得到有效的加速和加热。（→(阿尔文波的出现与太阳风性质无关)）
二维及一维计算表明：阿尔文波耗散可以同时作为驱动高低速流的物理机制，而高低速流具有截然不同物理特性的原因就是不同的流管膨胀过程，这是通过磁场与流场以及波耗散过程的相互作用来实现的。

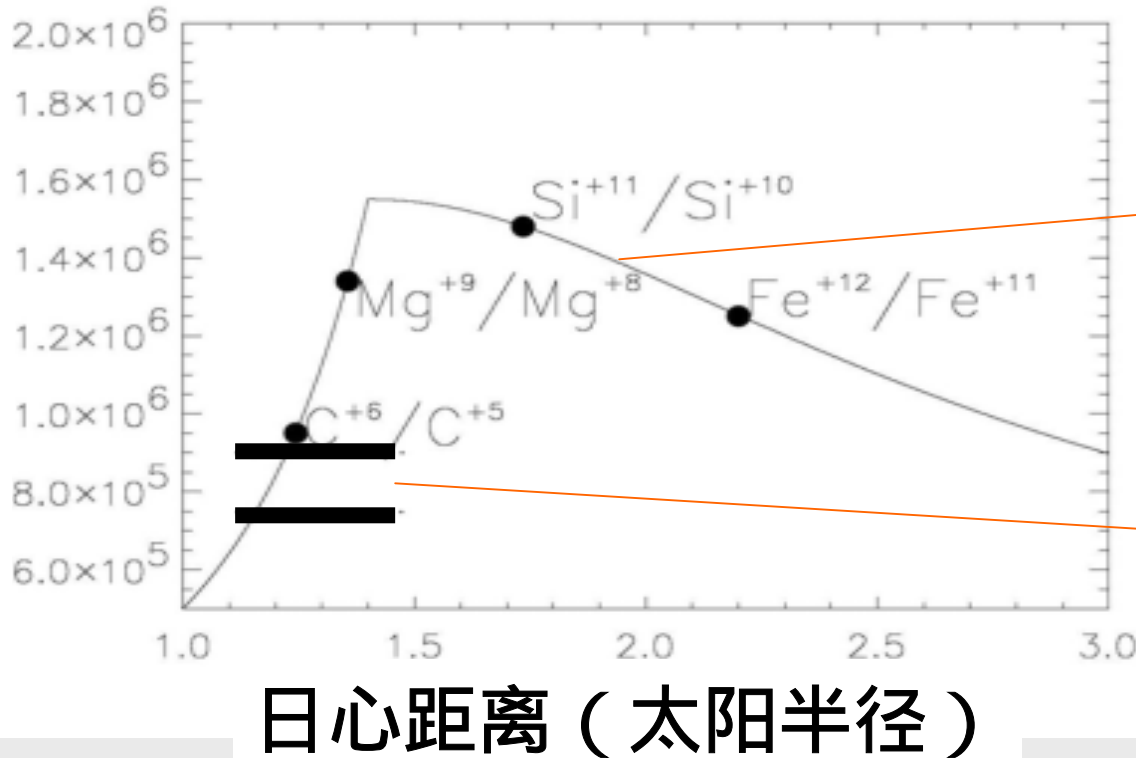
总结 II：回旋共振机制驱动的二成份低速流模型：

- 解释紫外日冕仪最新观测数据
- 将通常用于解释冕洞高速流太阳风少数离子特性的回旋共振机制推广至低速流少数离子。
- 预言并解释了低速流中 O^{+5} 离子的“滞流现象”



III: 太阳风高速流电荷态间差动速度及其对冻结过程的影响

冕洞电子温度



由电荷态冻结过程倒推出的冕洞电子温度 (细实线)

谱线观测推出的冕洞电子温度 (粗实线)

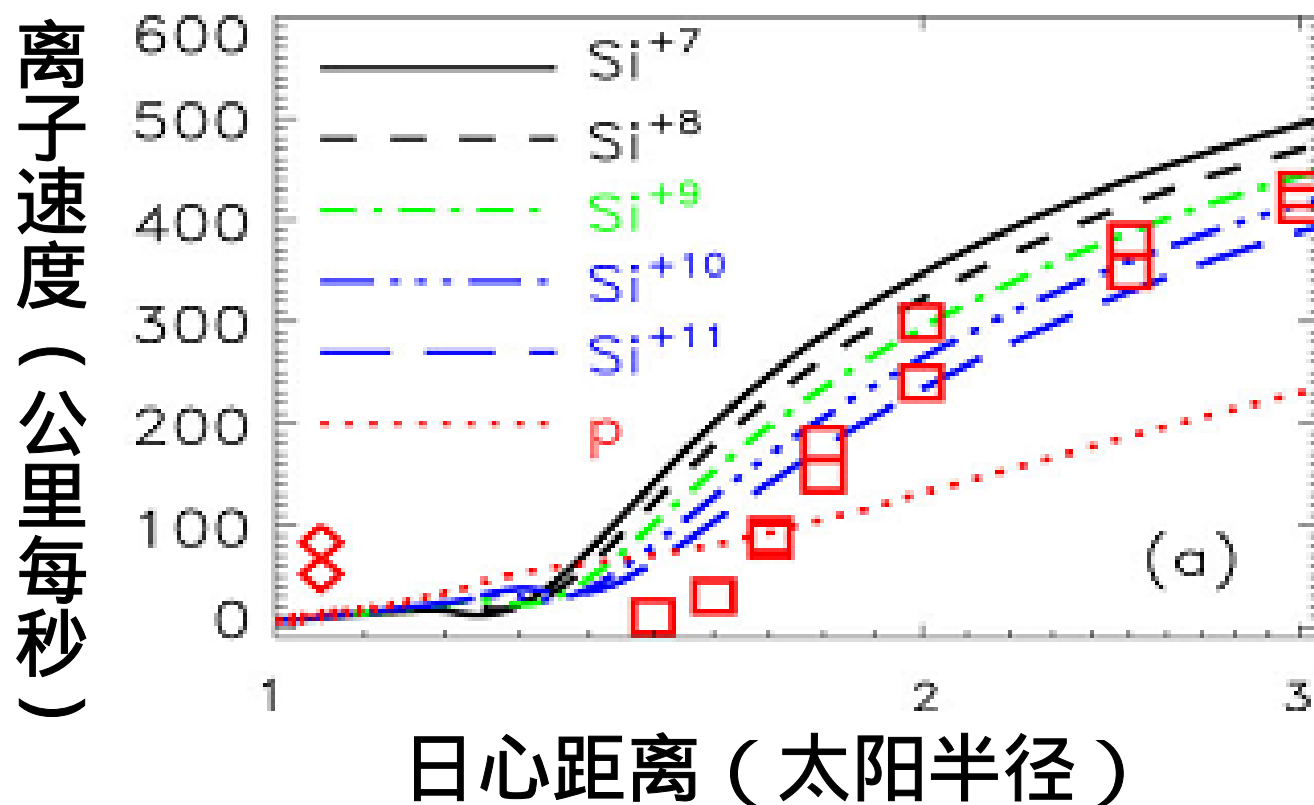
当前太阳风电荷态研究中的一大谜 (难) 题：

高速流高电荷态与冕洞低电子温度不符！？

假说之一：电荷态间存在较大的速度差别即差动速度

缺陷：所有模型均采用人为假设的差动速度

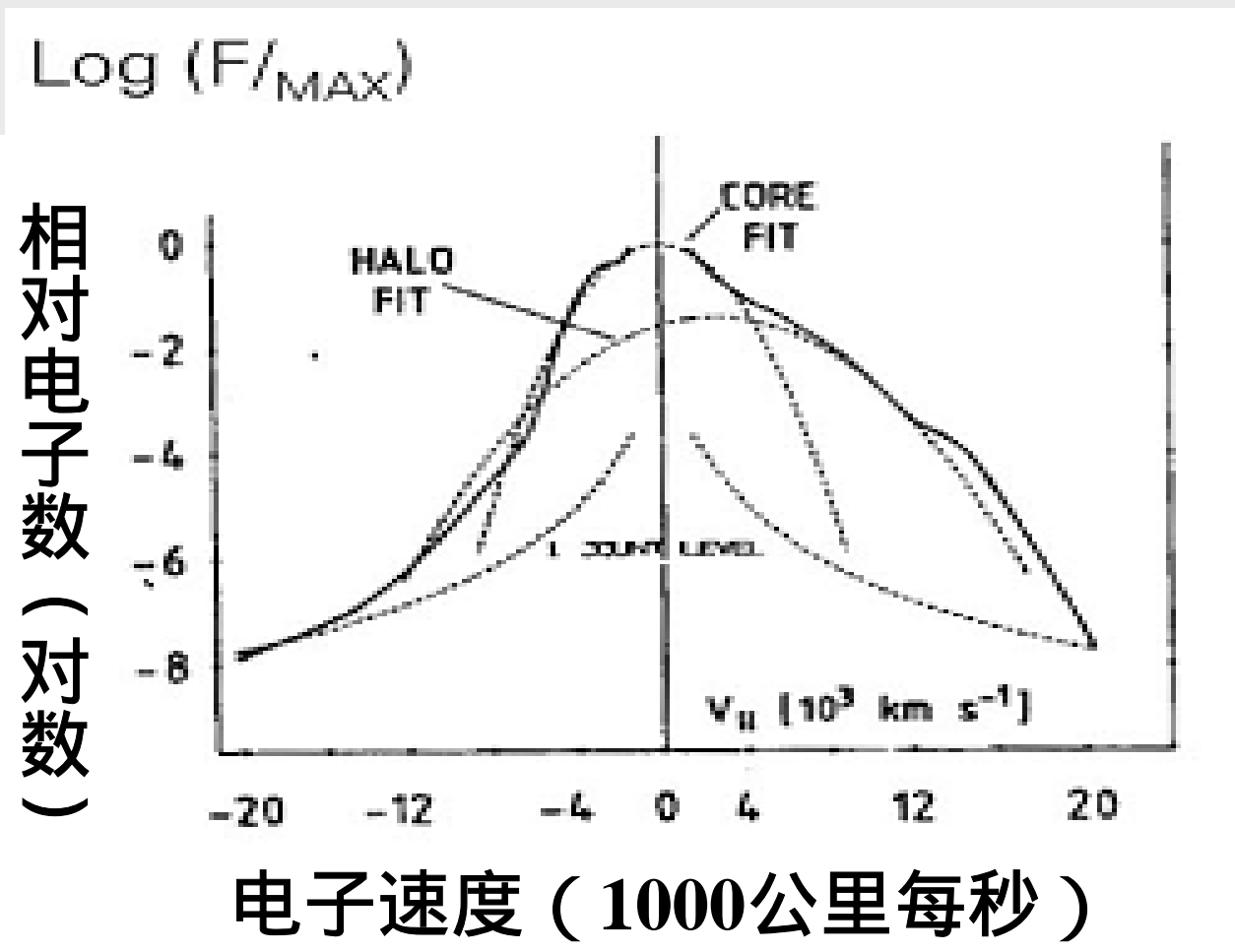
Si元素五种电荷态的速度径向剖面



首次自洽描述电荷态间的差动速度情况；
否定电荷态成因的差动速度假说。

总结IV: 太阳风高速流的双电子流体模型

高速流中电子速度分布函数观测特征：
可分解为两种Maxwell分布的叠加：



模型创新之处：

利用双电子流体模型研究电子速度分布函数的演化过程。

- 大大发掘了流体模型的潜力，为太阳风中电子乃至离子速度分布函数的深入研究开辟了一条新的途径**
- 发现异常输运现象在电子速度分布函数形成过程中具有重要作用**