



# 太阳爆发事件和日冕 加热中磁拓扑的研究

姓名：杨凯  
学院：天文与空间科学学院  
学号：DG1526017  
导师：丁明德 教授



# 提纲

- 简介
- 磁场拓扑分界层与爆发性事件的研究
- 磁场拓扑量与爆发性事件的研究
- 磁场连接性改变与日冕加热的研究
- 总结与展望

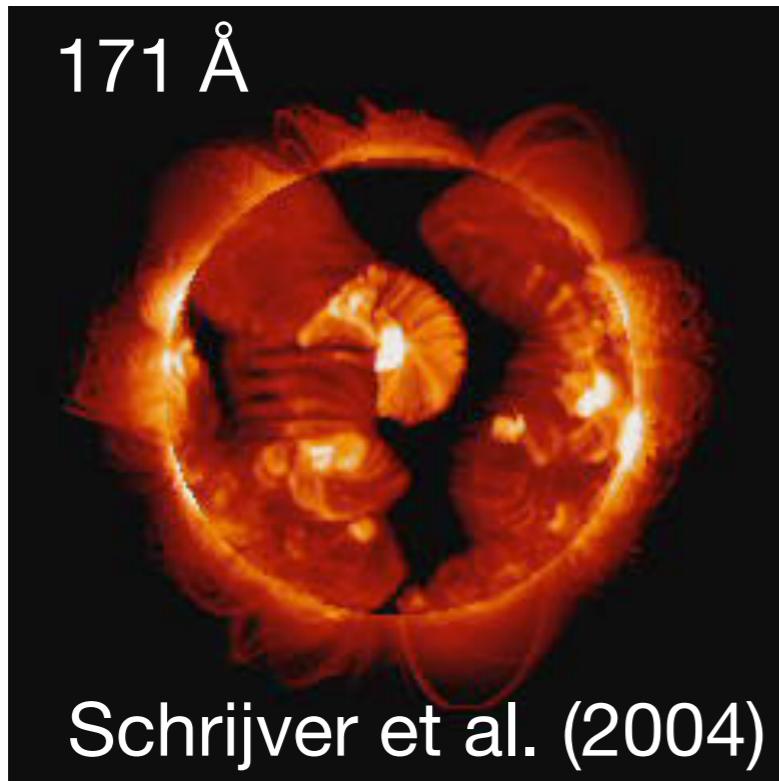


# 提纲

- 简介
- 磁场拓扑分界层与爆发性事件的研究
- 磁场拓扑量与爆发性事件的研究
- 磁场连接性改变与日冕加热的研究
- 总结与展望



# 简介：日冕中的磁场拓扑

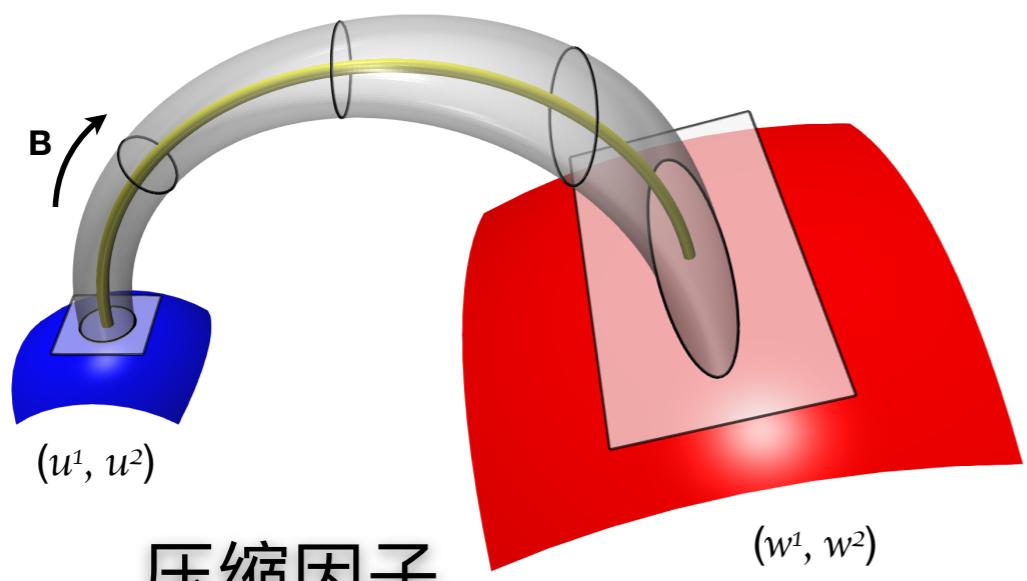
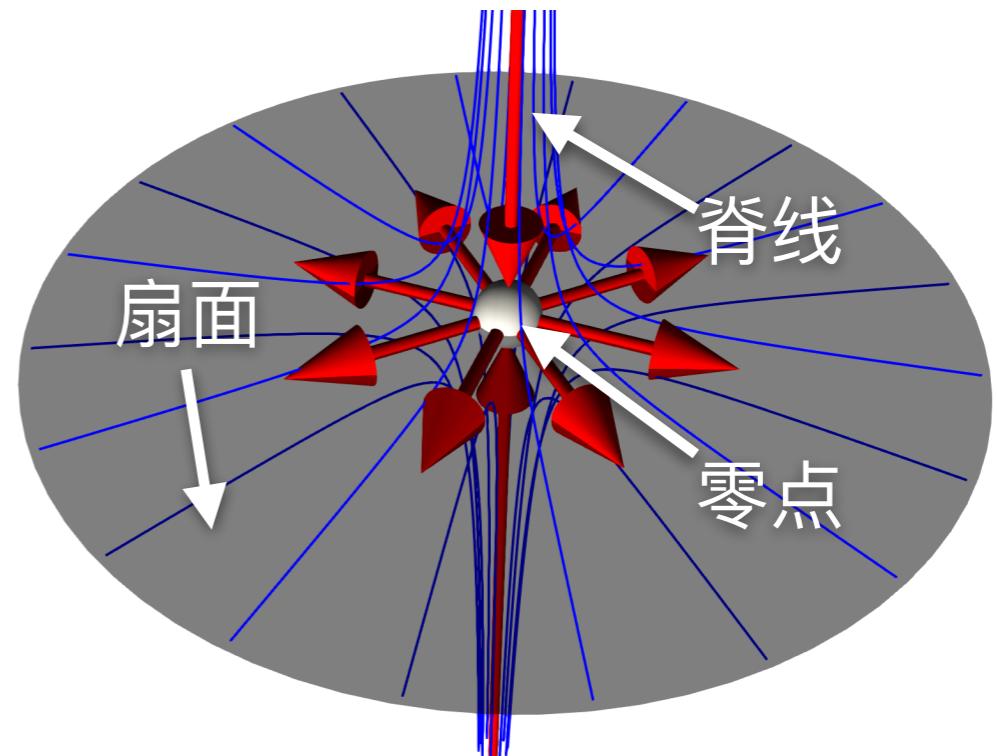


- 日冕中的磁力线将日冕分割成很多小的拓扑系统。
- 磁拓扑系统的边界是非理想过程的高发区。
- 磁场拓扑对于爆发事件有着重要的作用。

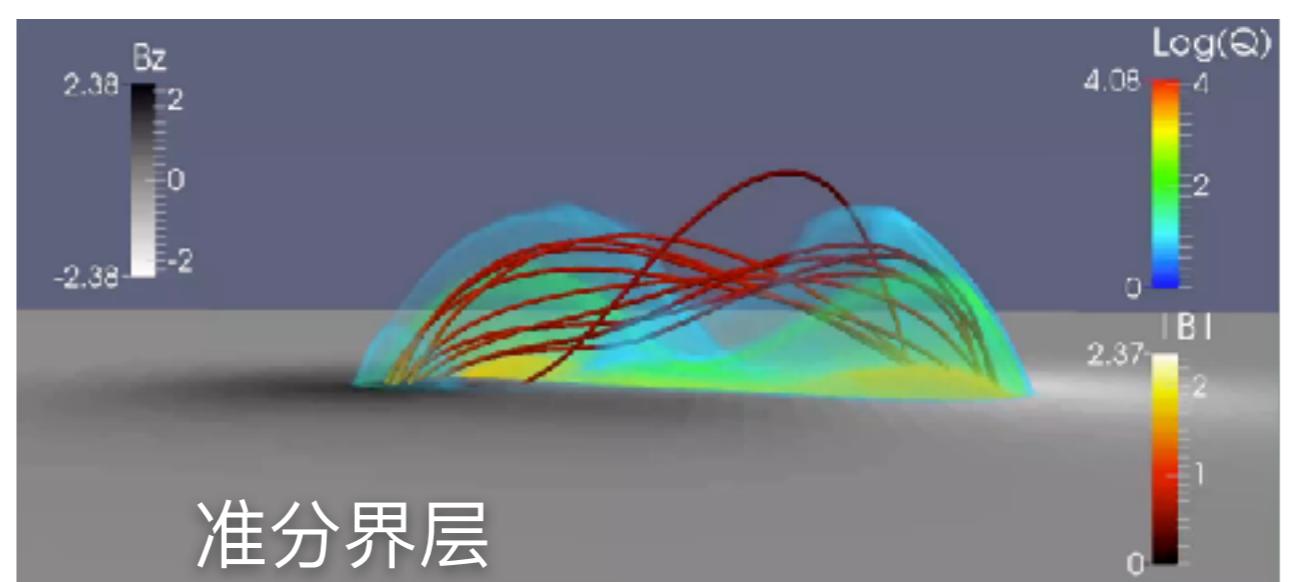
# 简介：磁拓扑的分界面



- 磁分界面的定义需要利用如零点和秃斑等结构来定义。
- 磁分界面概念的推广：准分界层。



Titov et al. (2002)



准分界层

# 简介：磁场拓扑量

- 磁螺度

$$H = \iint d\Phi d\Phi' \mathcal{L}$$

$$\mathcal{L} = \oint \oint dl \times dl' \cdot \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}'}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3}$$

理想MHD下是守恒量

非理想MHD下是近似守恒量

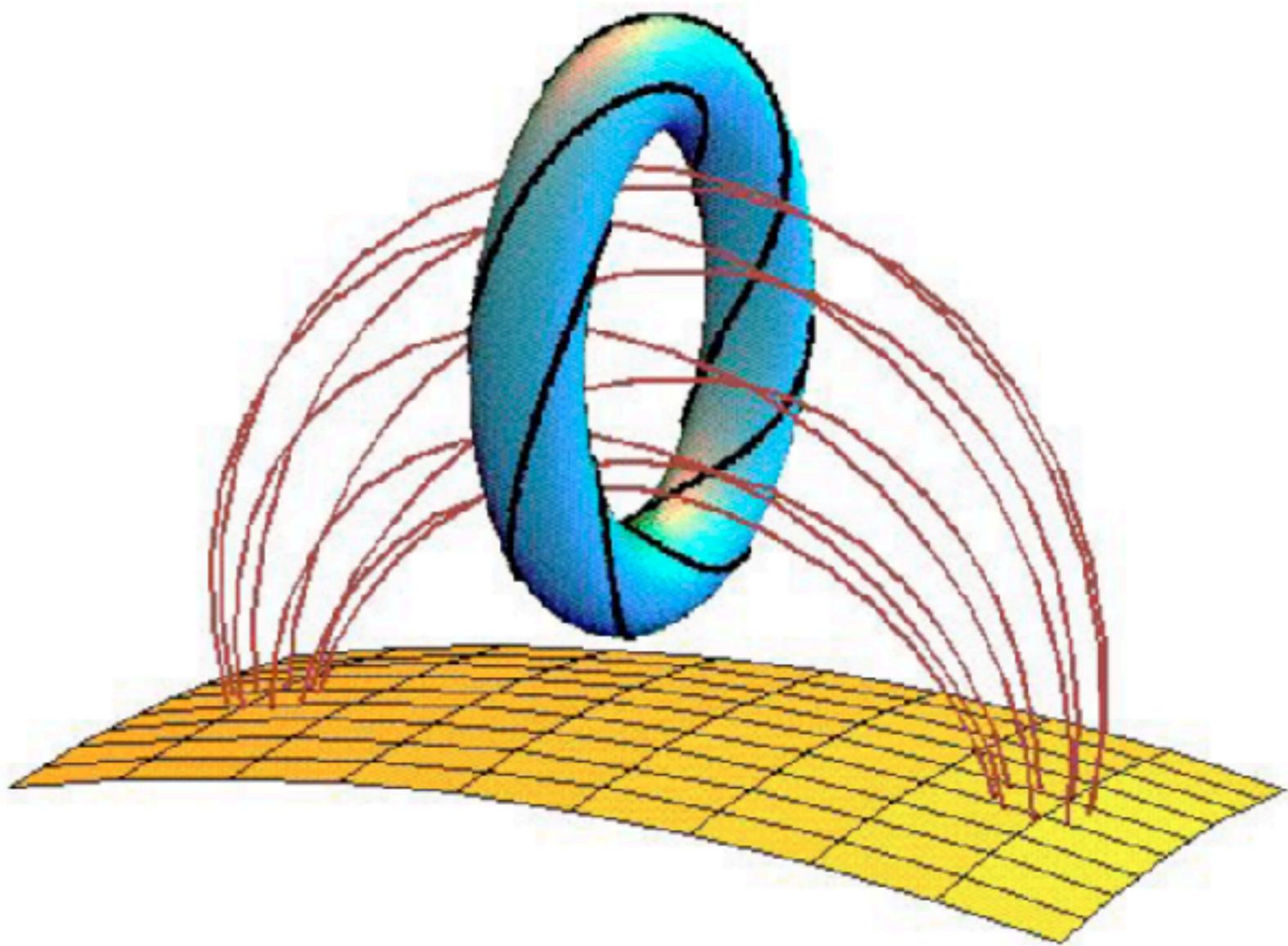
- 相对磁螺度

$$H_R = \int_{\Omega} (\mathbf{A} + \mathbf{A}_R) \cdot (\mathbf{B} - \mathbf{B}_R) d^3x$$

$$\mathbf{B}_R = -\nabla\Phi$$

$$(\mathbf{B}_R - \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0$$

Berger & Field (1984)

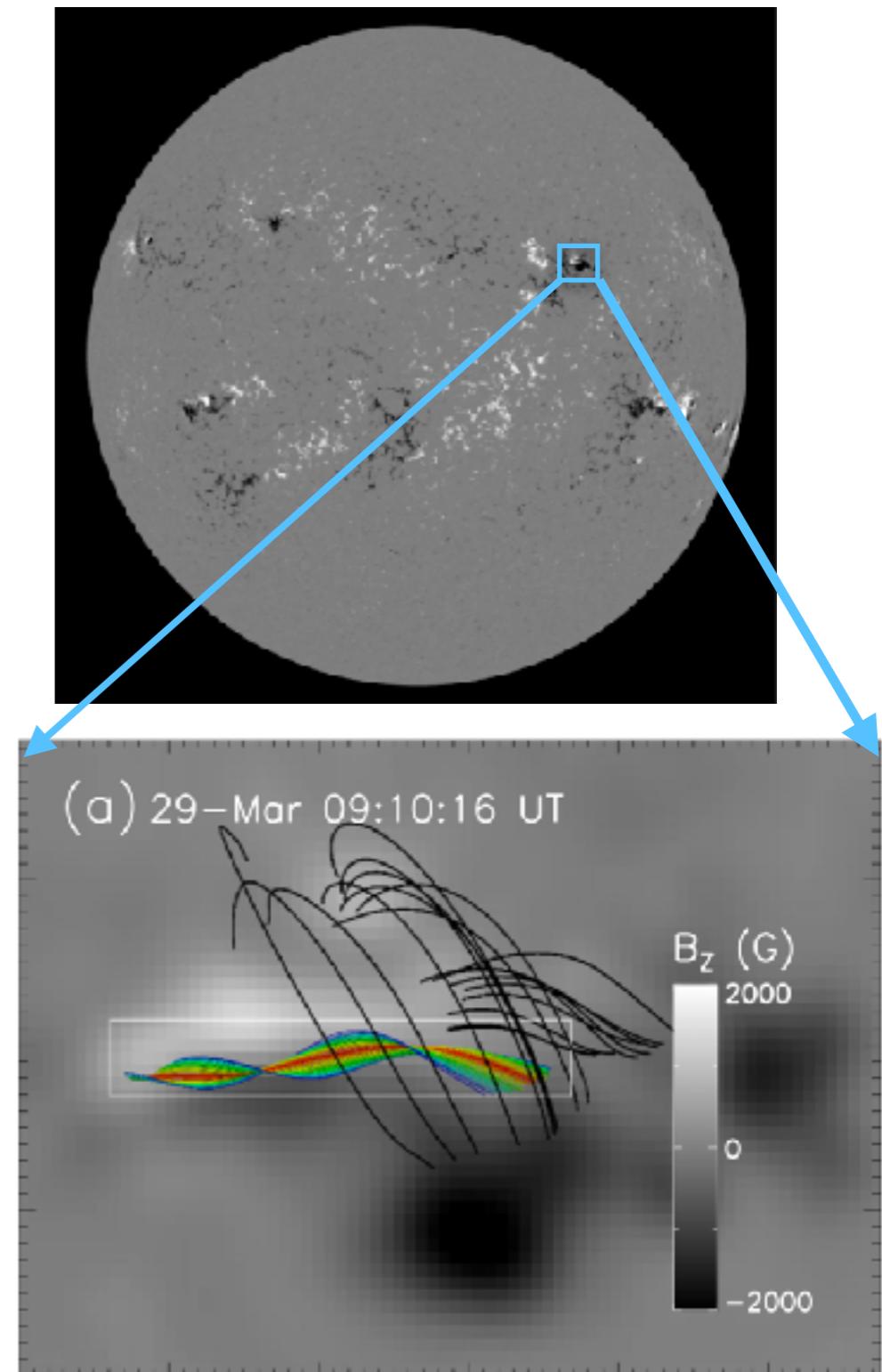


# 简介：日冕磁场重构

- 光球磁场数据来自 SDO/HMI的观测。
- 我们使用优化方法对日冕三维磁场进行重构。

$$L = \int_{\Omega} \left\{ \omega_f \frac{|(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|}{B^2} + \omega_d |\nabla \cdot \mathbf{B}|^2 \right\} dV \\ + \nu \int_{\partial\Omega} (\mathbf{B} - \mathbf{B}_{\text{obs}}) \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{B} - \mathbf{B}_{\text{obs}}) dS$$

Wiegelmann et al. (2012)





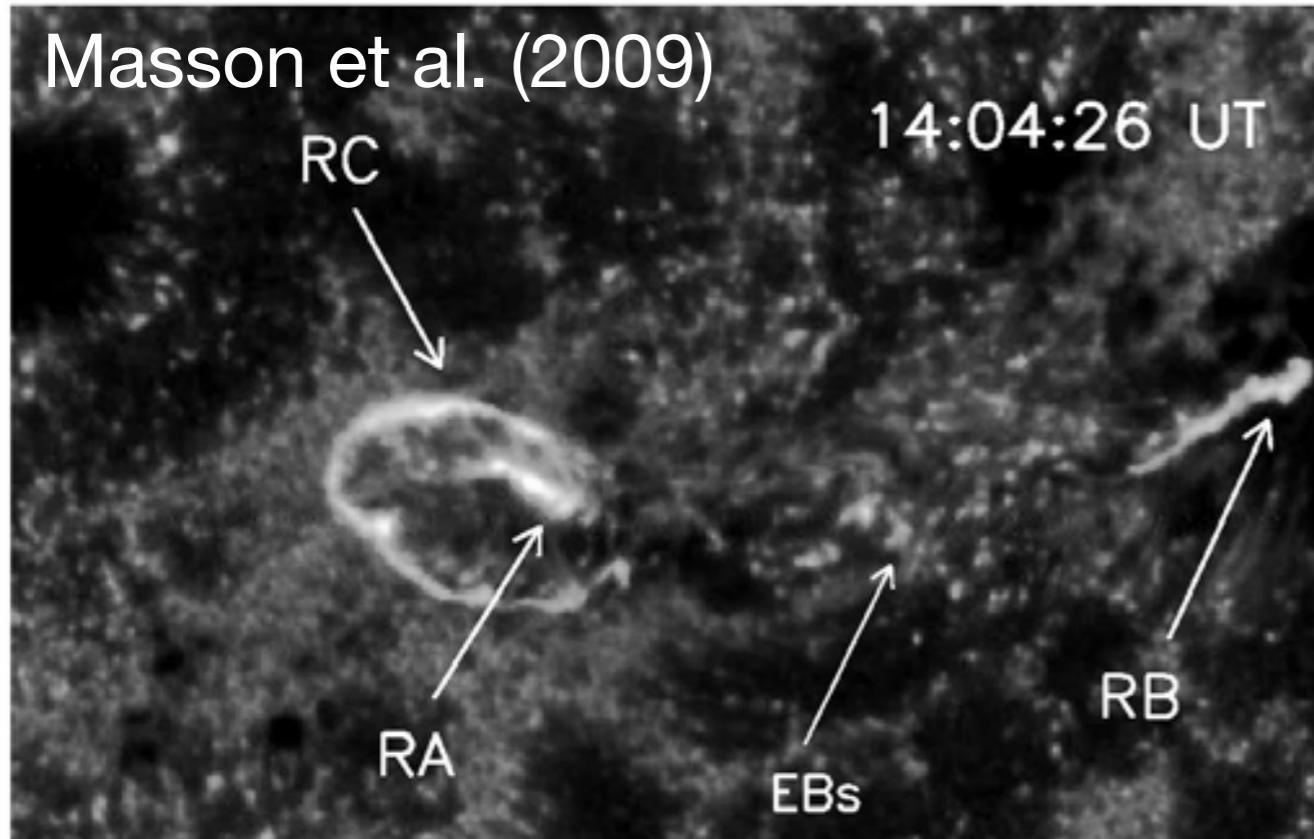
# 提纲

- 简介
- 磁场拓扑分界层与爆发性事件的研究
- 磁场拓扑量与爆发性事件的研究
- 磁场连接性改变与日冕加热的研究
- 总结与展望

# 拓扑分界层与爆发事件的研究

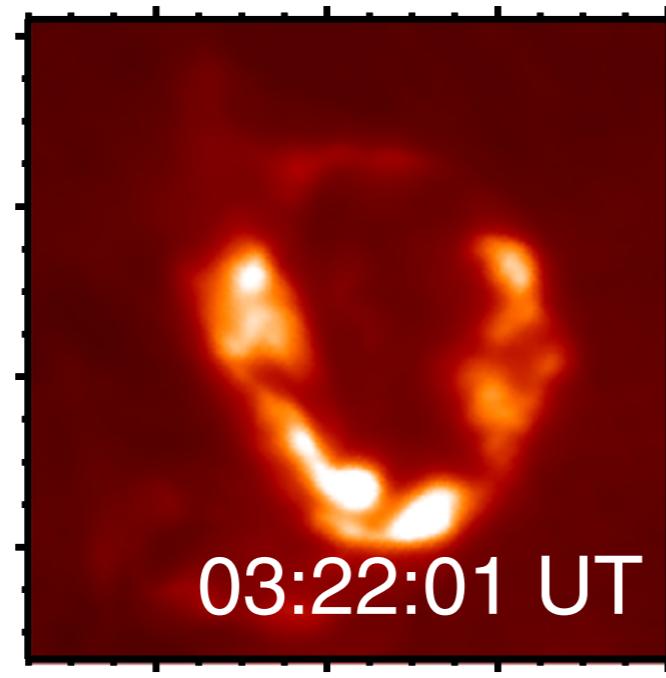
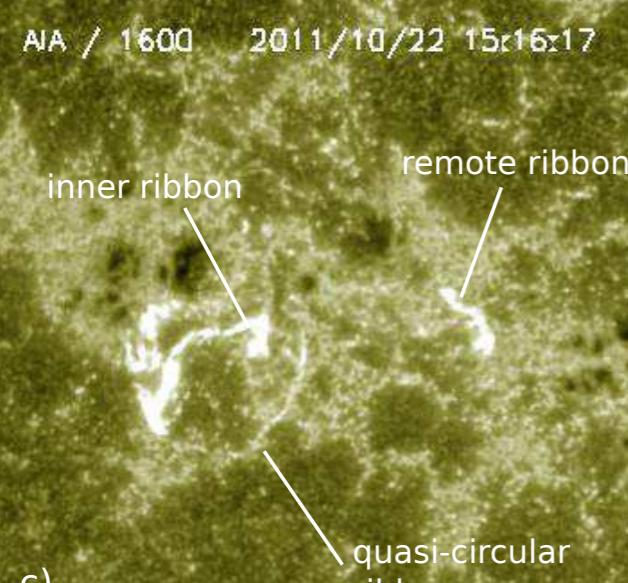
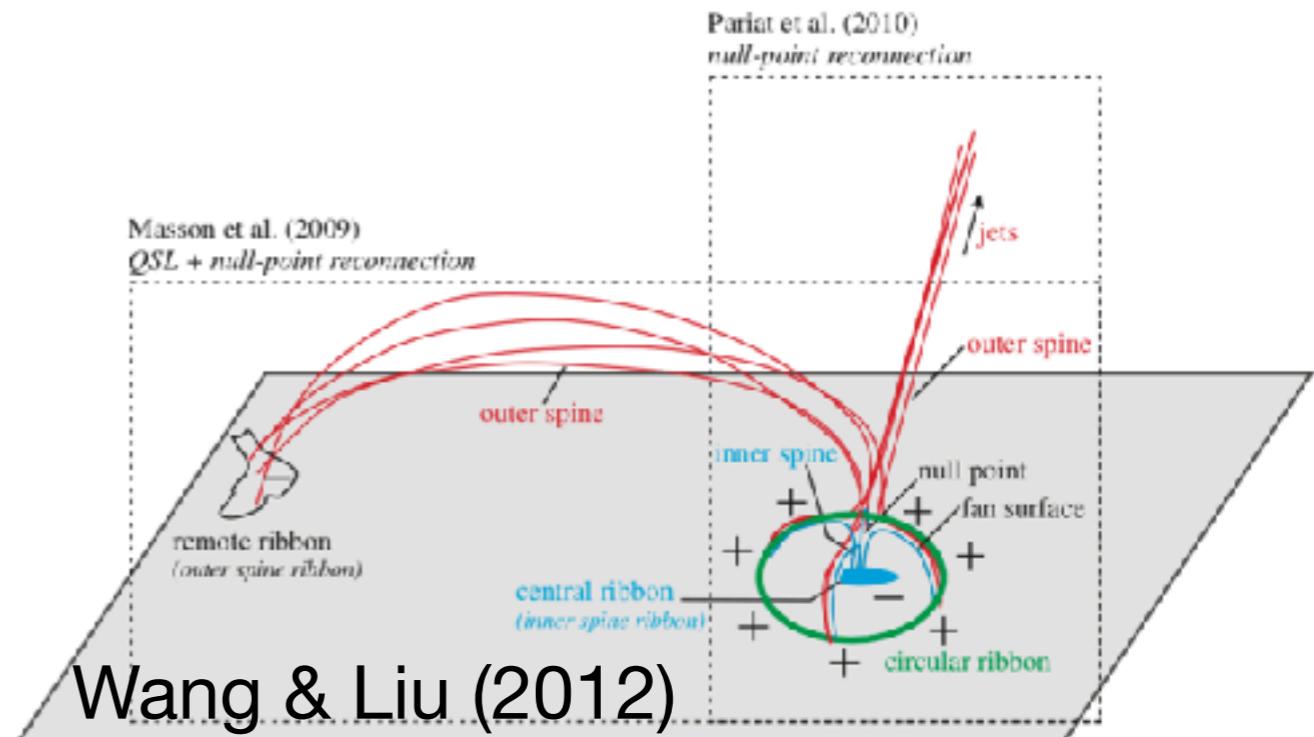


Masson et al. (2009)



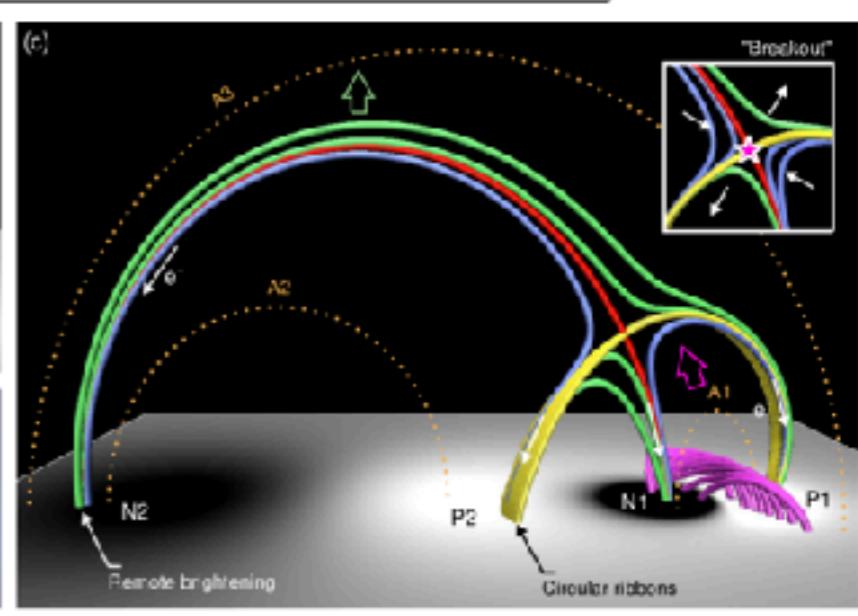
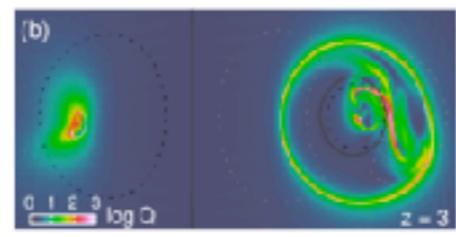
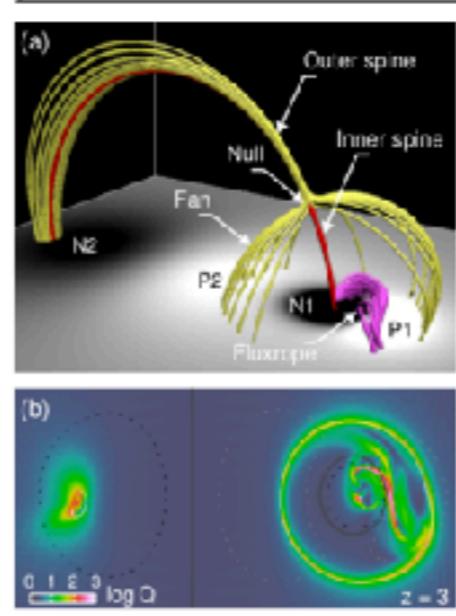
Pariat et al. (2010)  
*null-point reconnection*

Masson et al. (2009)  
*QSL + null-point reconnection*



Masson et al. (2017)

Hao et al. (2018)



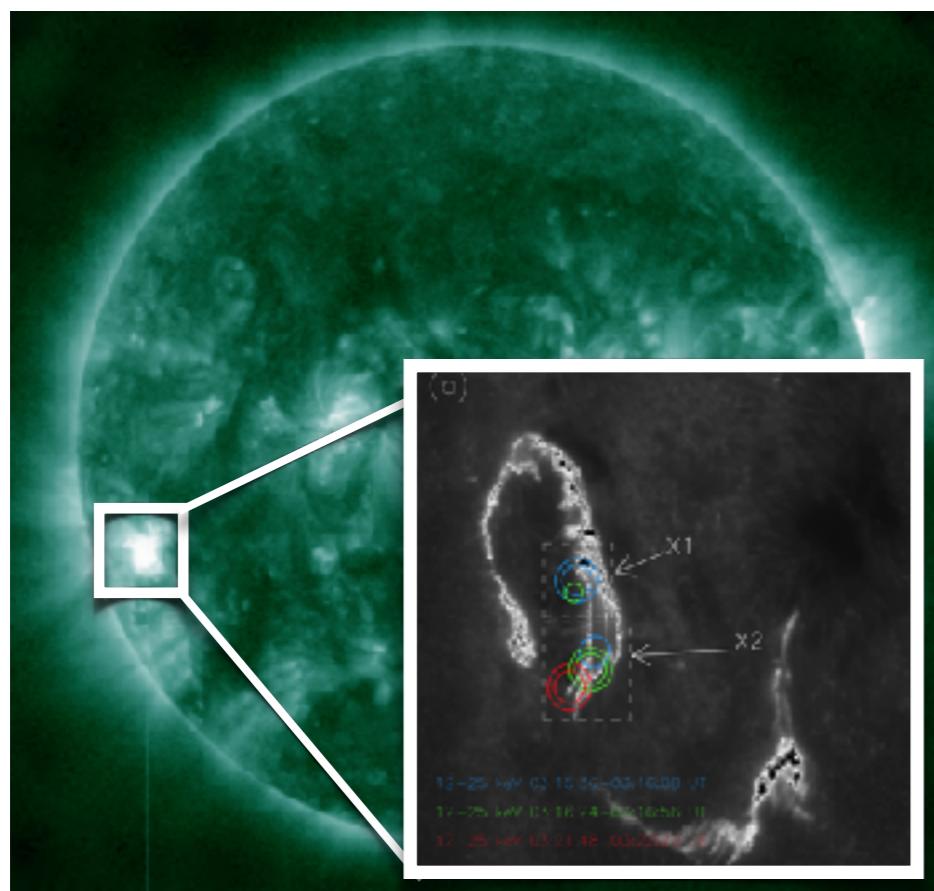
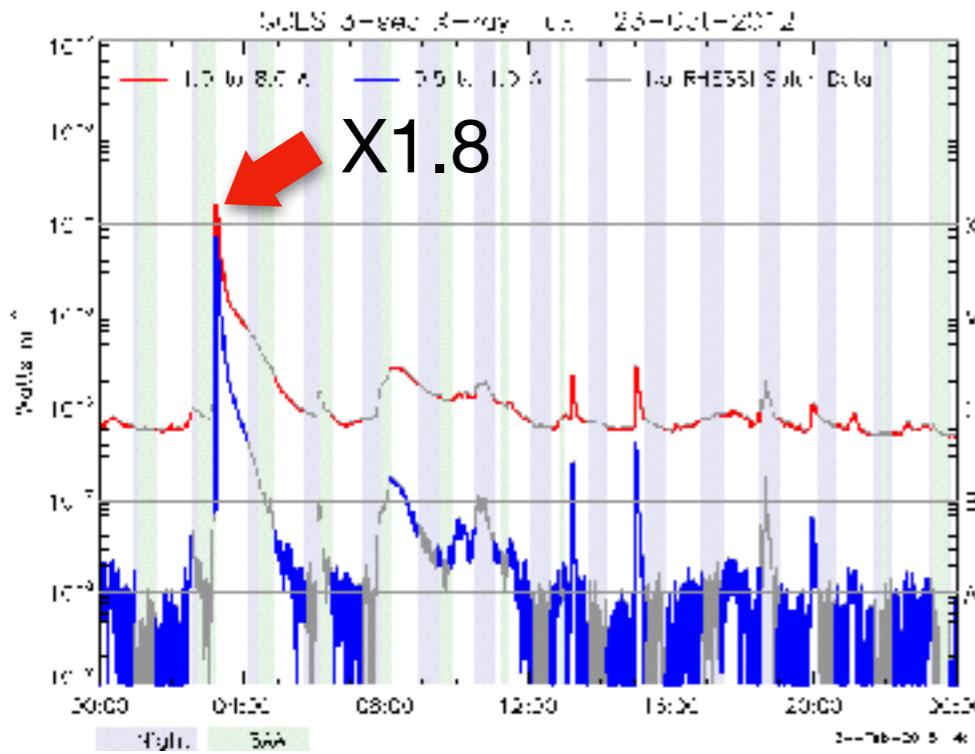
Sun et al. (2013)

# 磁拓扑分界层研究的动机



复杂的磁拓扑结构，在爆发性过程中是如何对其形态学进行限制的，在观测上是如何表现的。

# 拓扑分界层与爆发事件的研究

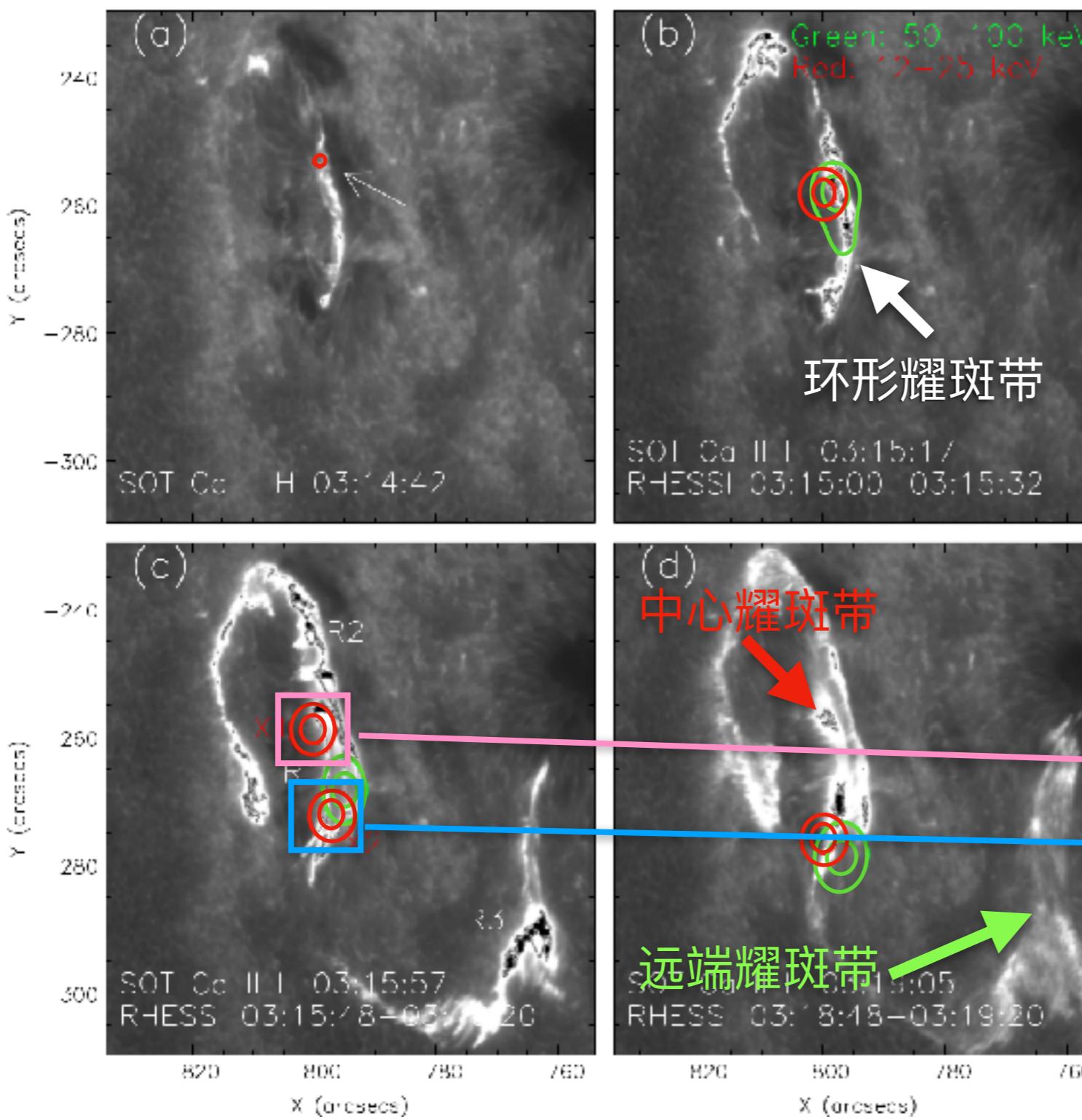


- 为了研究拓扑分界层在太阳爆发事件中的对磁活动的限制，我们进行了一次个例子分析。
- 活动区11598在2012年10月28日，（准）环形耀斑。

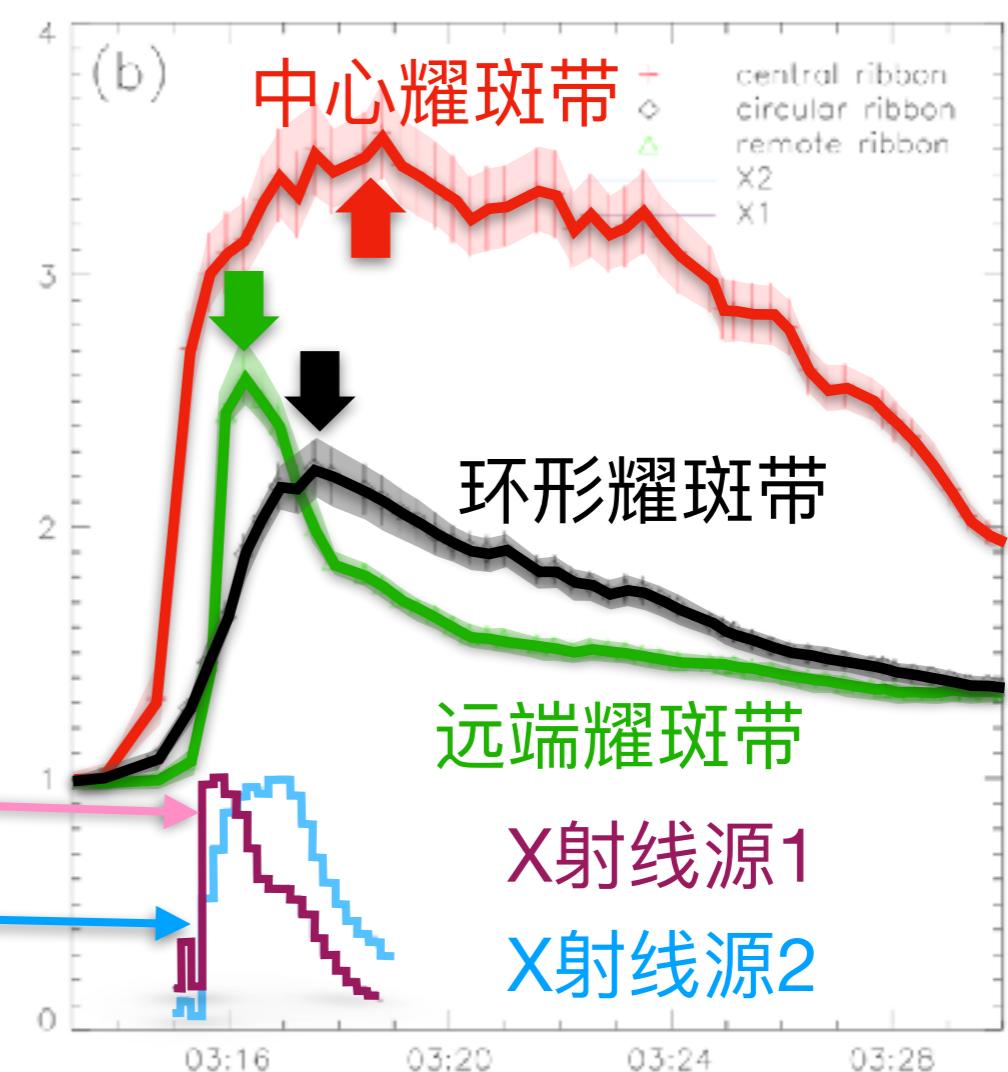
# Ca II H与X射线源的观测



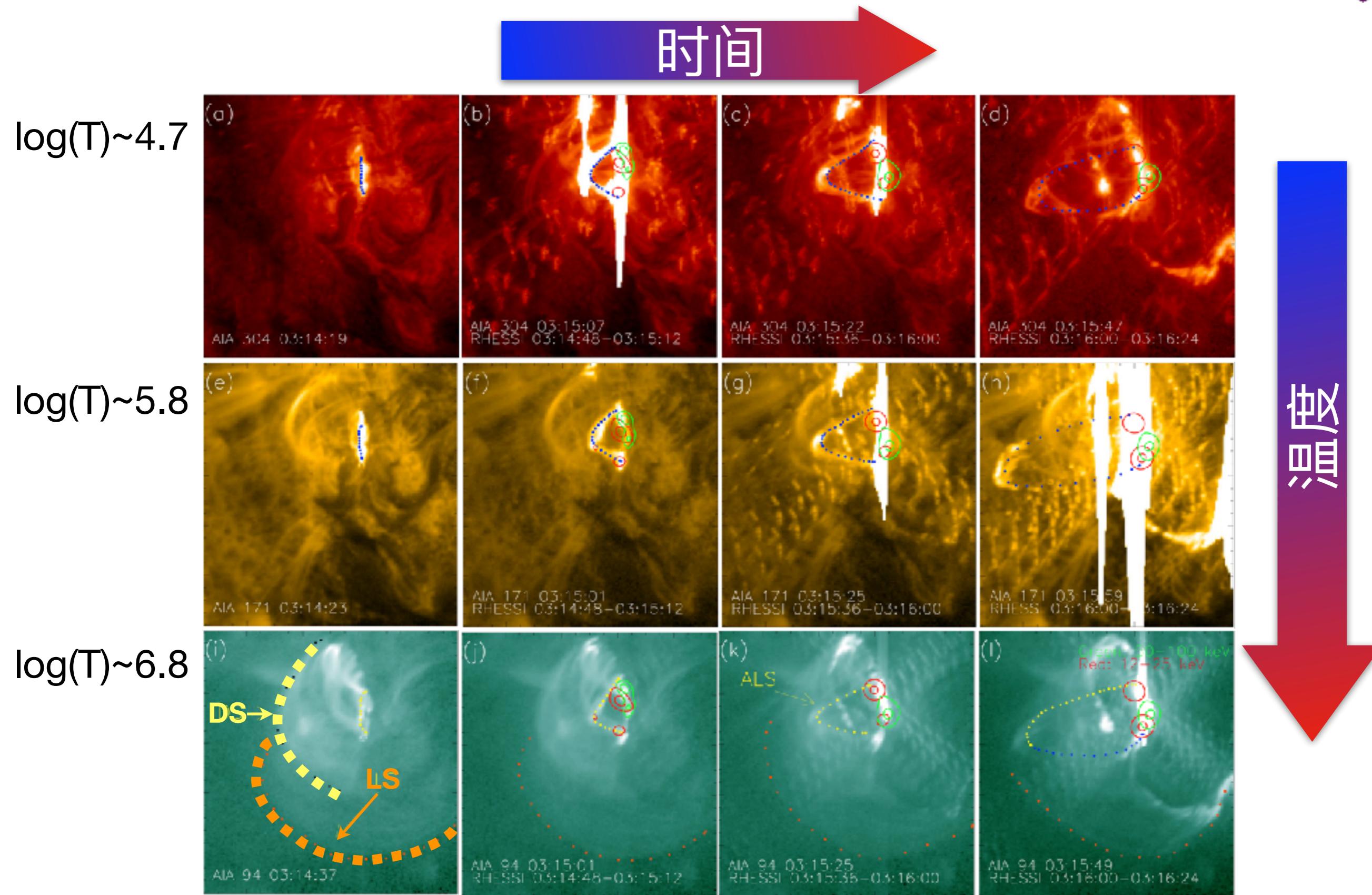
- 耀斑带的演化



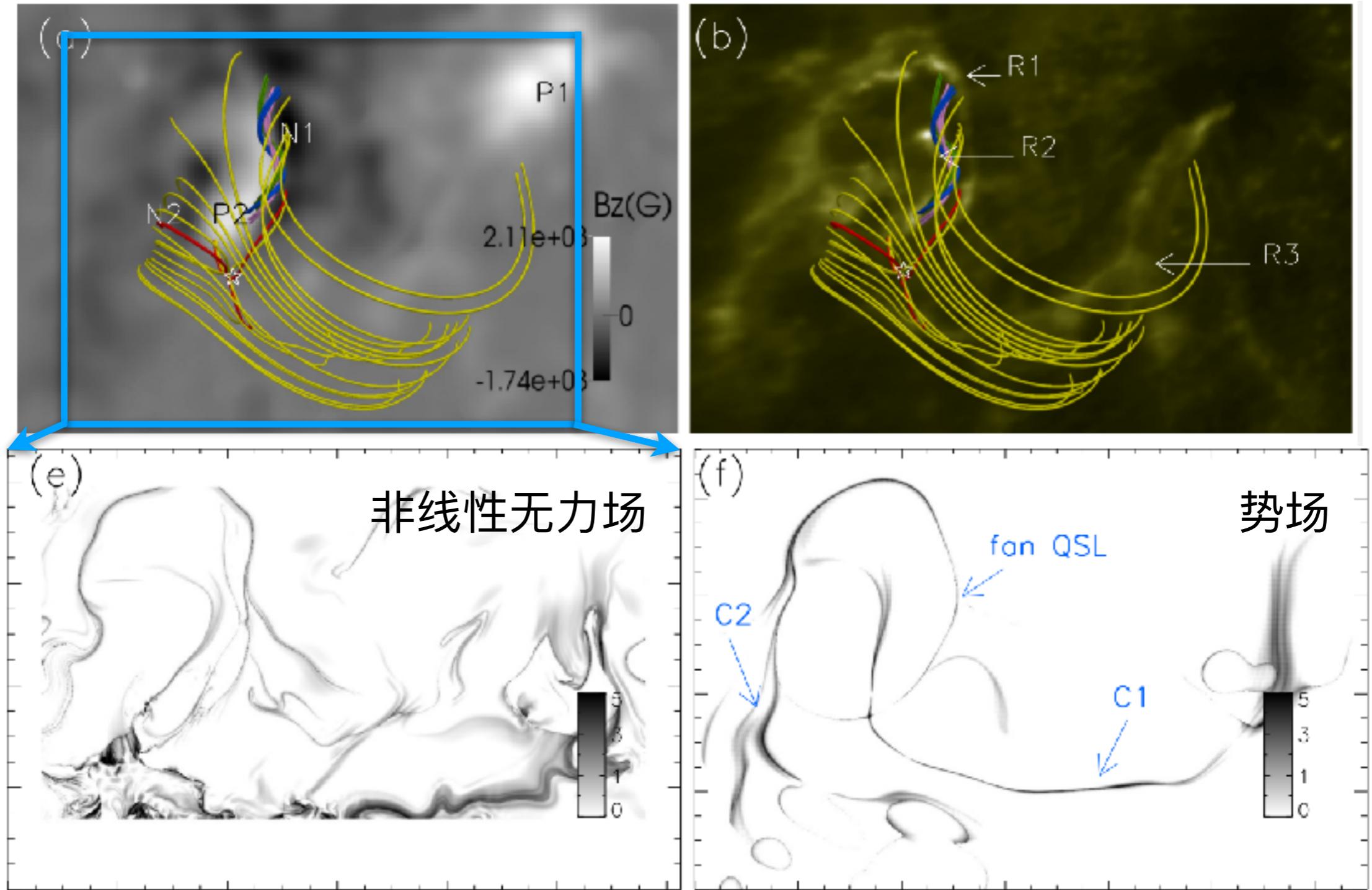
- 耀斑带与X射线源的光变曲线



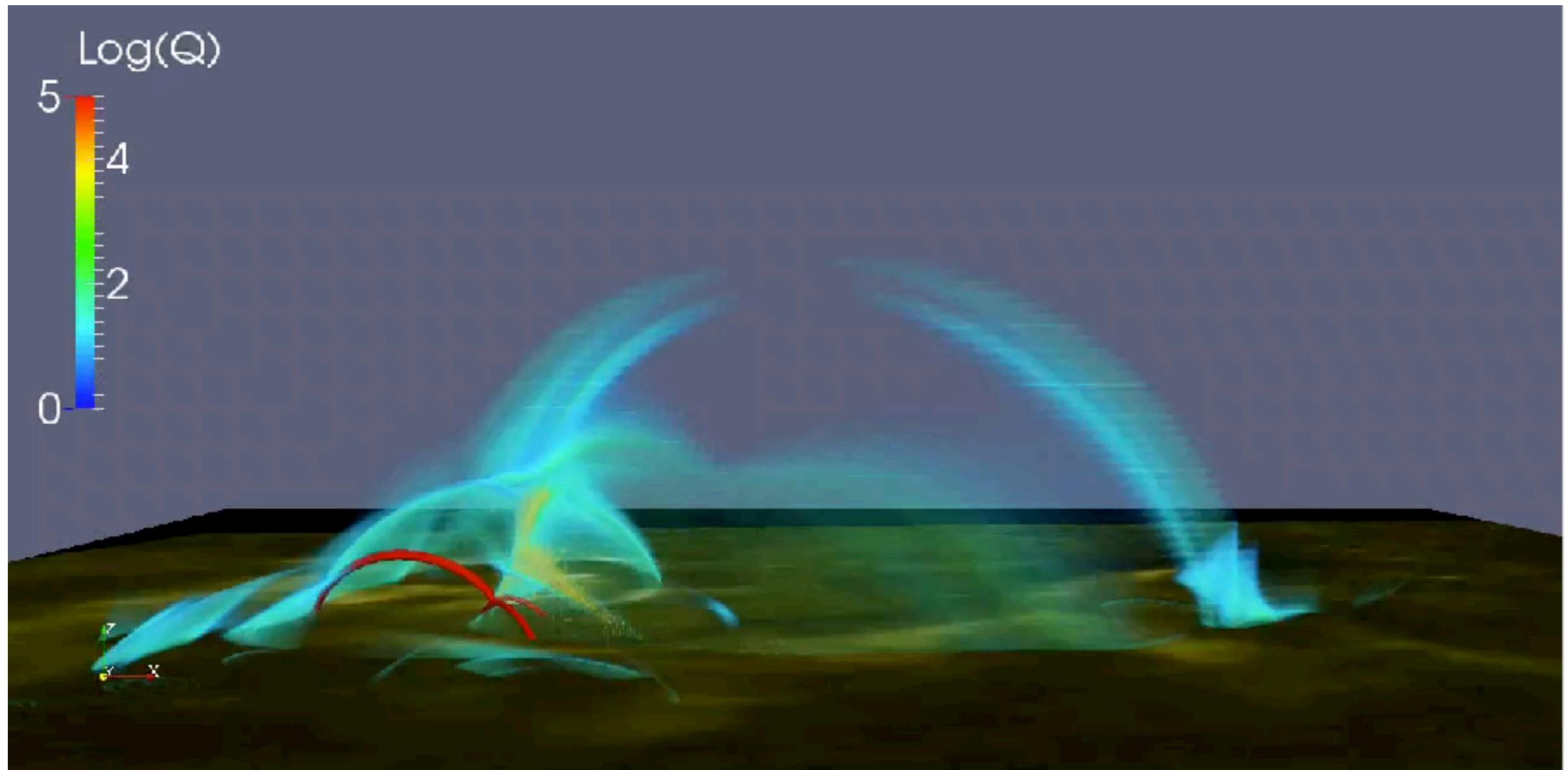
# 耀斑的极端紫外观测



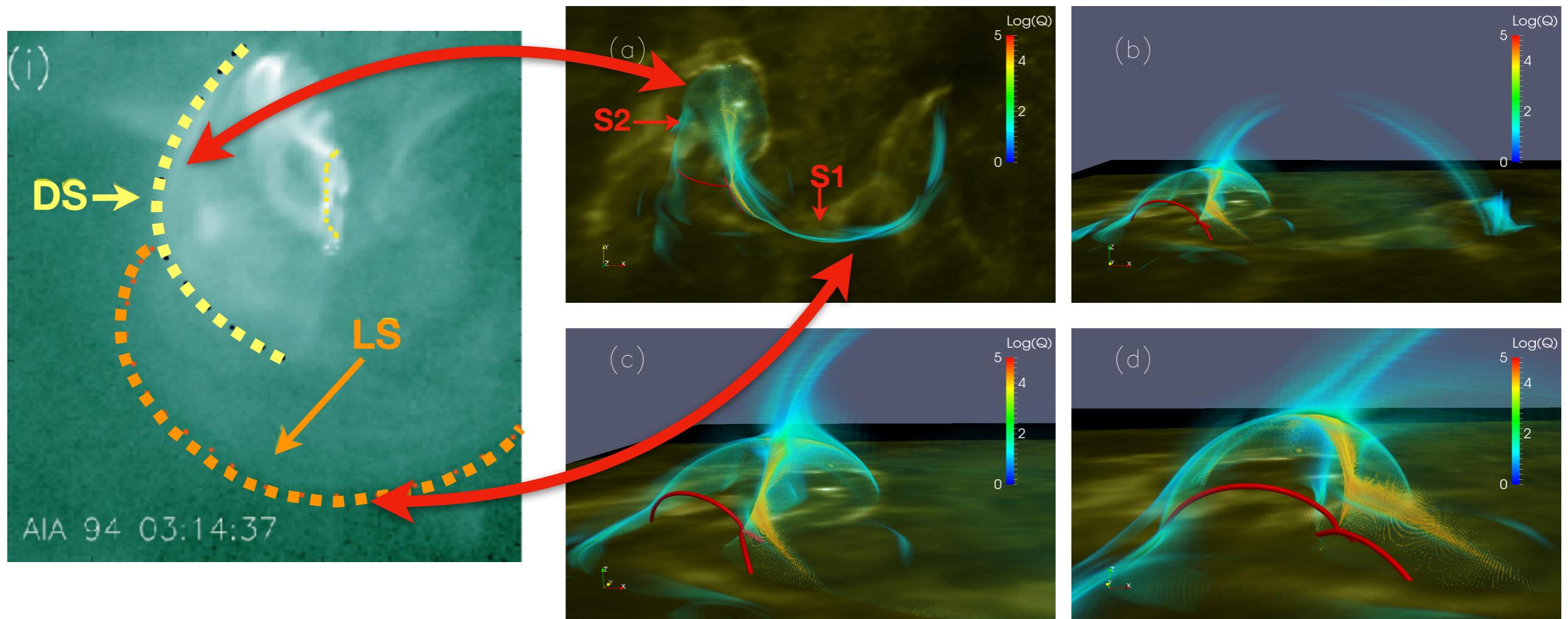
# 活动区的三维磁场结构



# 三维准分界层



# 与耀斑结构对应的准分界层





# 小结

- 该活动区中有一个磁零点、一个磁绳和一个大尺度准分界层。
- 大尺度准分界层与紫外和极紫外中展现出来的结构有很好的对应性。
- 说明磁场拓扑的边界在加热等过程十分有效。



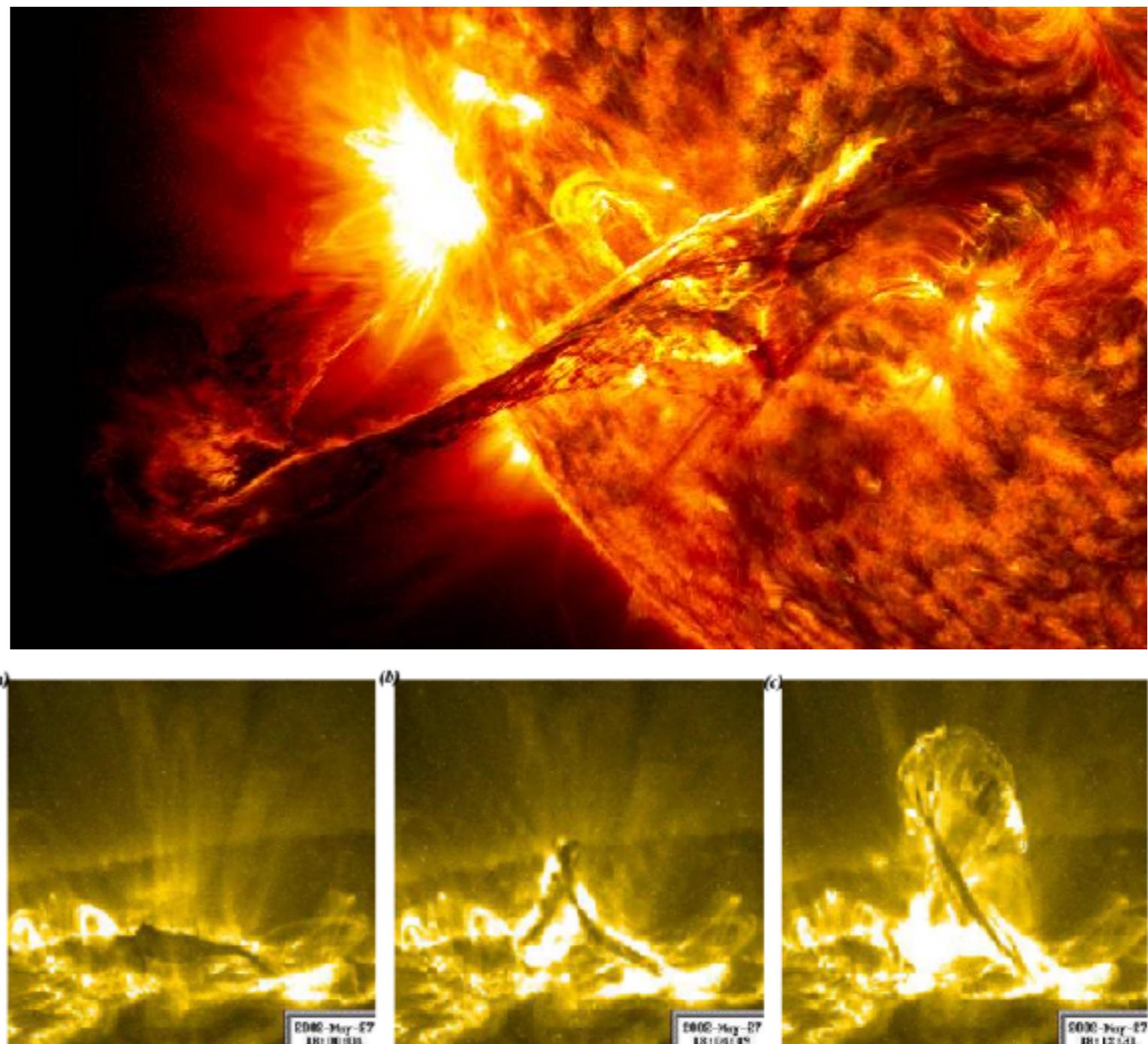
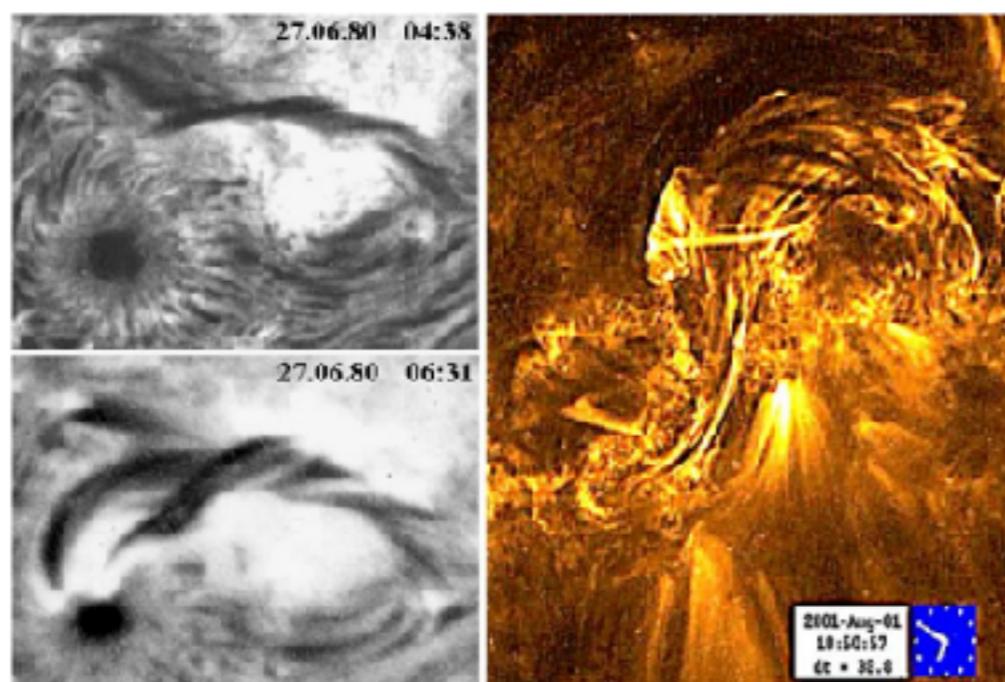
# 提纲

- 简介
- 磁场拓扑分界层与爆发性事件的研究
- 磁场拓扑量与爆发性事件的研究
- 磁场连接性改变与日冕加热的研究
- 总结与展望

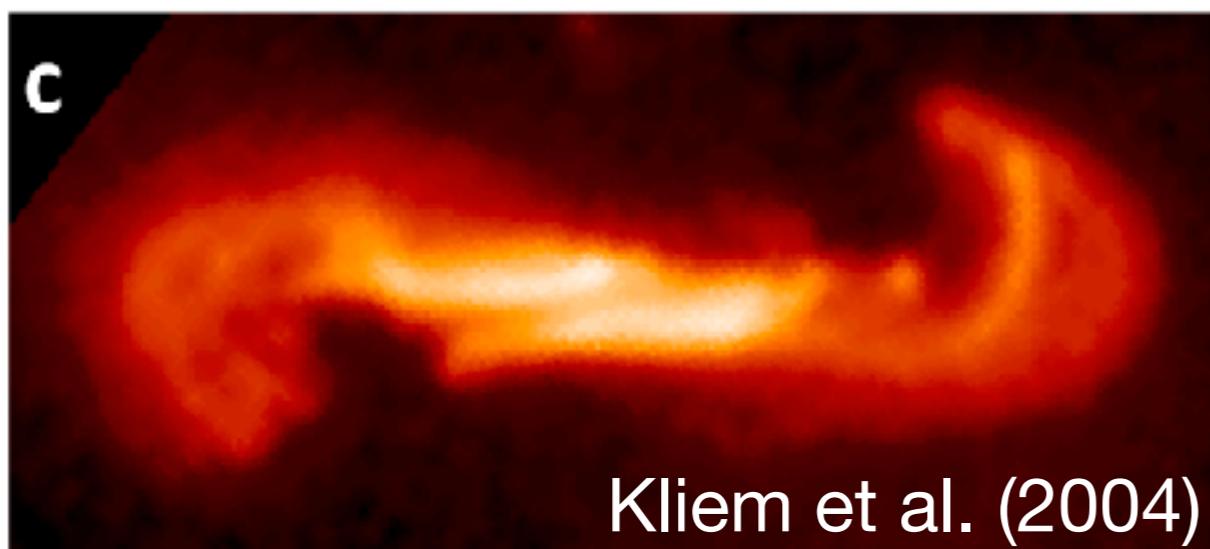
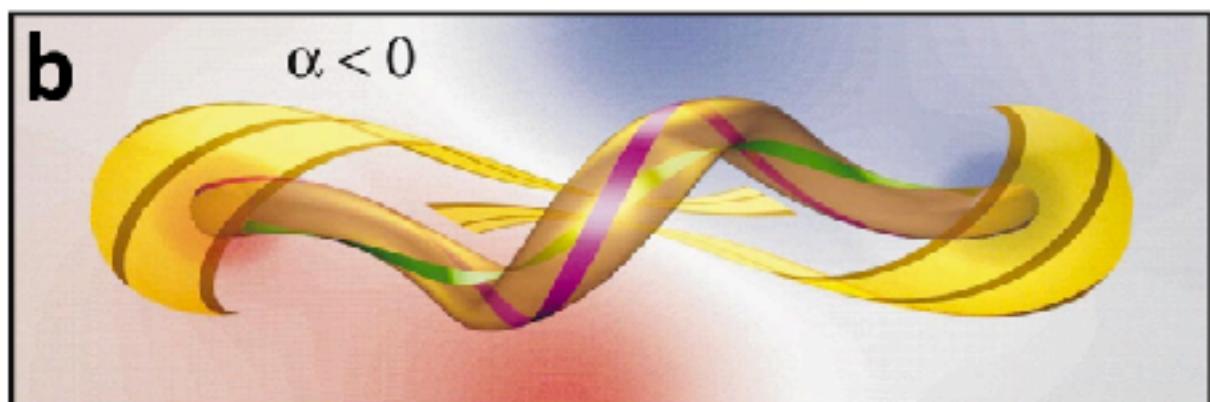
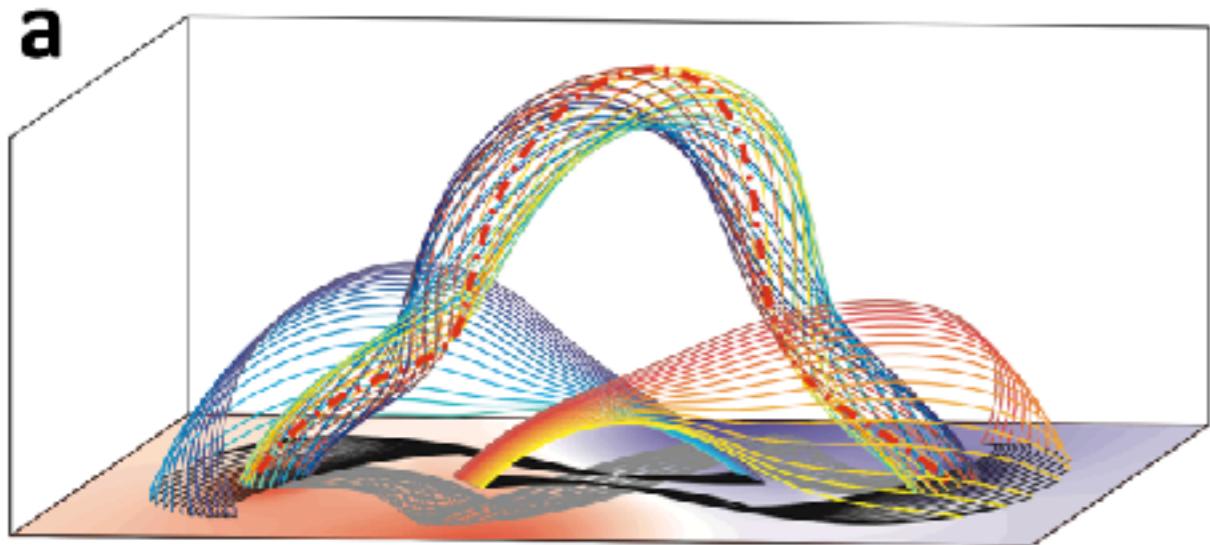
# 磁场拓扑量与爆发事件的研究



磁绳结构的活动往往导致了爆发性事件的发生，从而对于磁绳的拓扑研究具有重要意义。



# 磁场拓扑量与爆发事件的研究



$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \nabla \times (\boldsymbol{\xi} \times \mathbf{B}_0) \\ + \frac{1}{2} \nabla \times \{ \boldsymbol{\xi} \times [\nabla \times (\boldsymbol{\xi} \times \mathbf{B}_0)] \} + \dots,$$

$$W = \underbrace{\frac{1}{8\pi} \int |\mathbf{B}_0|^2 d^3x}_{①} - \underbrace{\frac{1}{4\pi} \int [(\nabla \times \mathbf{B}_0) \times \mathbf{B}_0] \cdot \boldsymbol{\xi} d^3x}_{②} \\ + \underbrace{\frac{1}{8\pi} \int |\nabla \times (\boldsymbol{\xi} \times \mathbf{B}_0)|^2 d^3x}_{③} \\ - \underbrace{\frac{1}{8\pi} \int \{ (\boldsymbol{\xi} \times \nabla \times \mathbf{B}_0) \cdot \nabla \times (\boldsymbol{\xi} \times \mathbf{B}_0) \} d^3x}_{④} + \dots$$

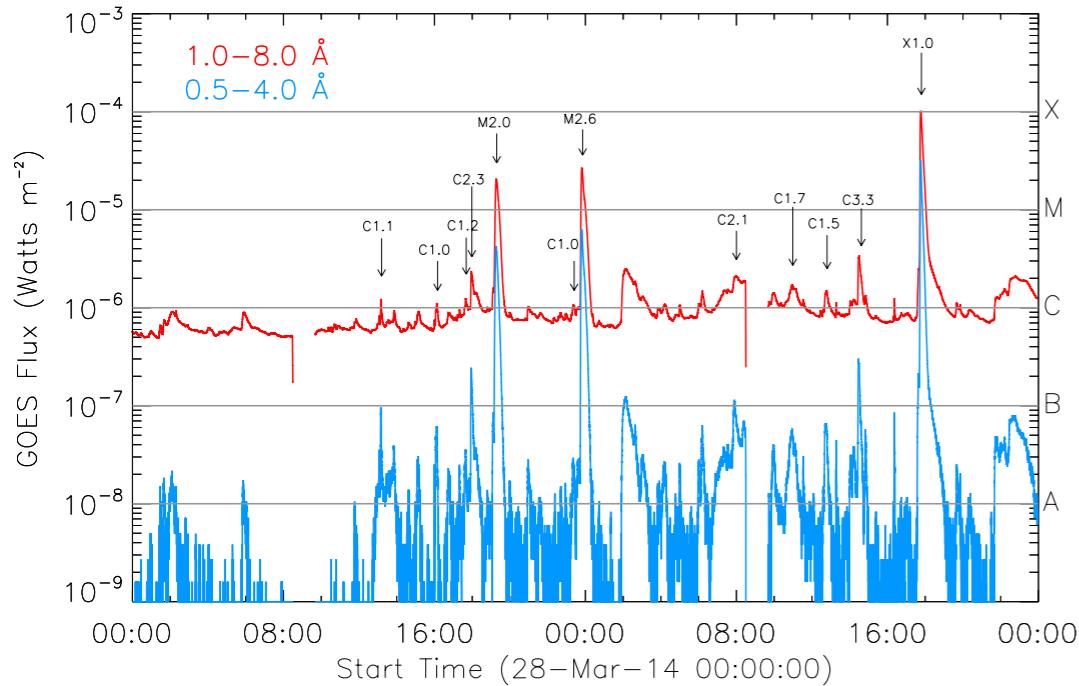
- 扭曲不稳定性:  $T \sim 2\pi - 6\pi$
- 螺环不稳定性:  $n \sim 0.8, 1.1 - 1.3, 1.5$

# 磁场拓扑量研究的动机

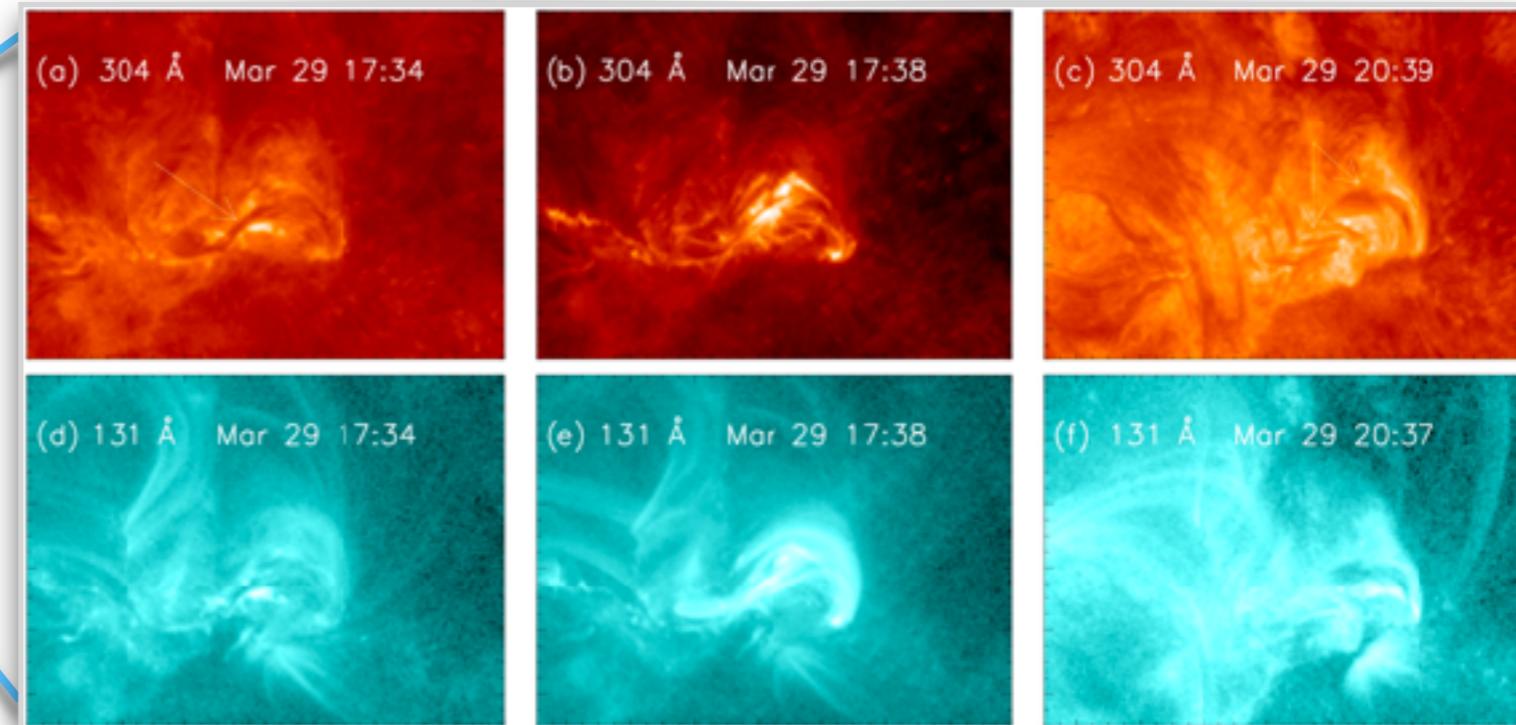
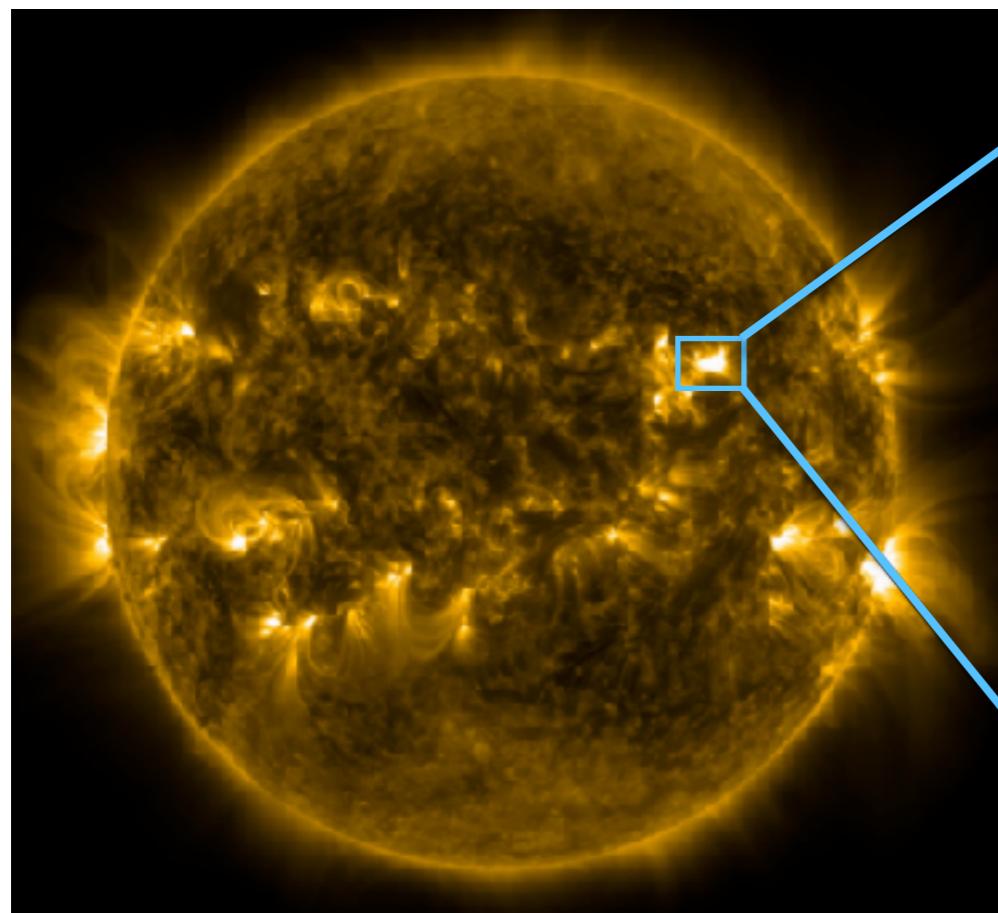


磁场拓扑量及其时间演化  
与磁流体不稳性和爆发  
现象之间的定量的关联。

# 磁场拓扑与爆发事件的研究



- 为了研究磁绳活动与爆发事件的关联。
- 活动区12017在2014年3月28日至29日的两天内发生了多次耀斑事件。





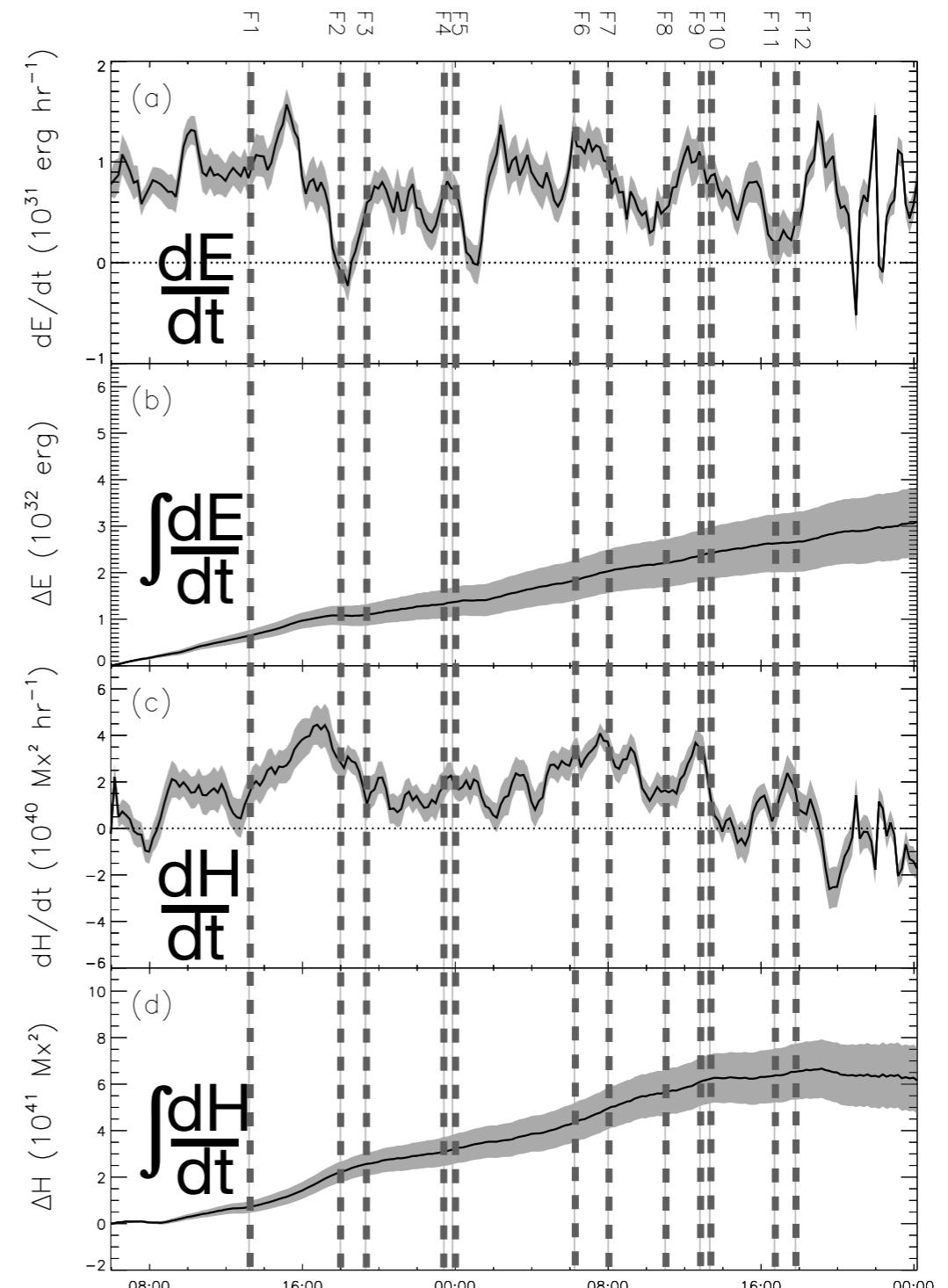
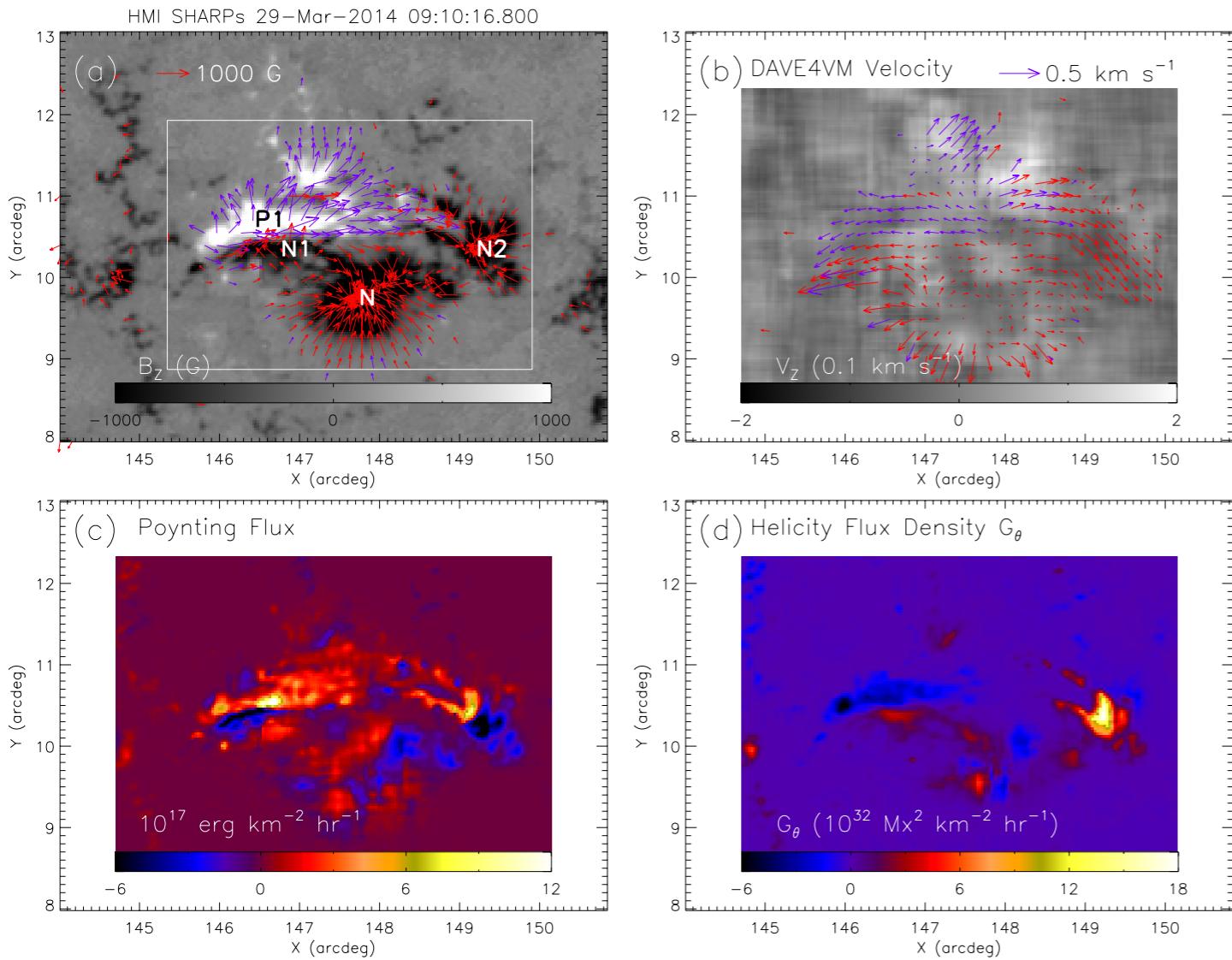
# 磁场拓扑与爆发事件的研究

| 耀斑编号 | 峰值时间         | 耀斑级别 | 是否伴随CME |
|------|--------------|------|---------|
| F1   | Mar 28 13:12 | C1.1 | 否       |
| F2   | Mar 28 17:59 | C2.3 | 否       |
| F3   | Mar 28 19:18 | M2.0 | 是       |
| F4   | Mar 28 23:24 | C1.0 | 否       |
| F5   | Mar 28 23:51 | M2.6 | 是       |
| F6   | Mar 29 06:14 | C1.4 | 否       |
| F7   | Mar 29 08:00 | C2.1 | 否       |
| F8   | Mar 29 10:59 | C1.7 | 否       |
| F9   | Mar 29 12:48 | C1.5 | 否       |
| F10  | Mar 29 13:19 | C1.0 | 否       |
| F11  | Mar 29 16:24 | C1.1 | 否       |
| F12  | Mar 29 17:48 | X1.0 | 是       |

我们认证了被同一个暗条活动（磁绳活动）所导致的12个耀斑事件，其中，9个C级，2个M级，1个X级。

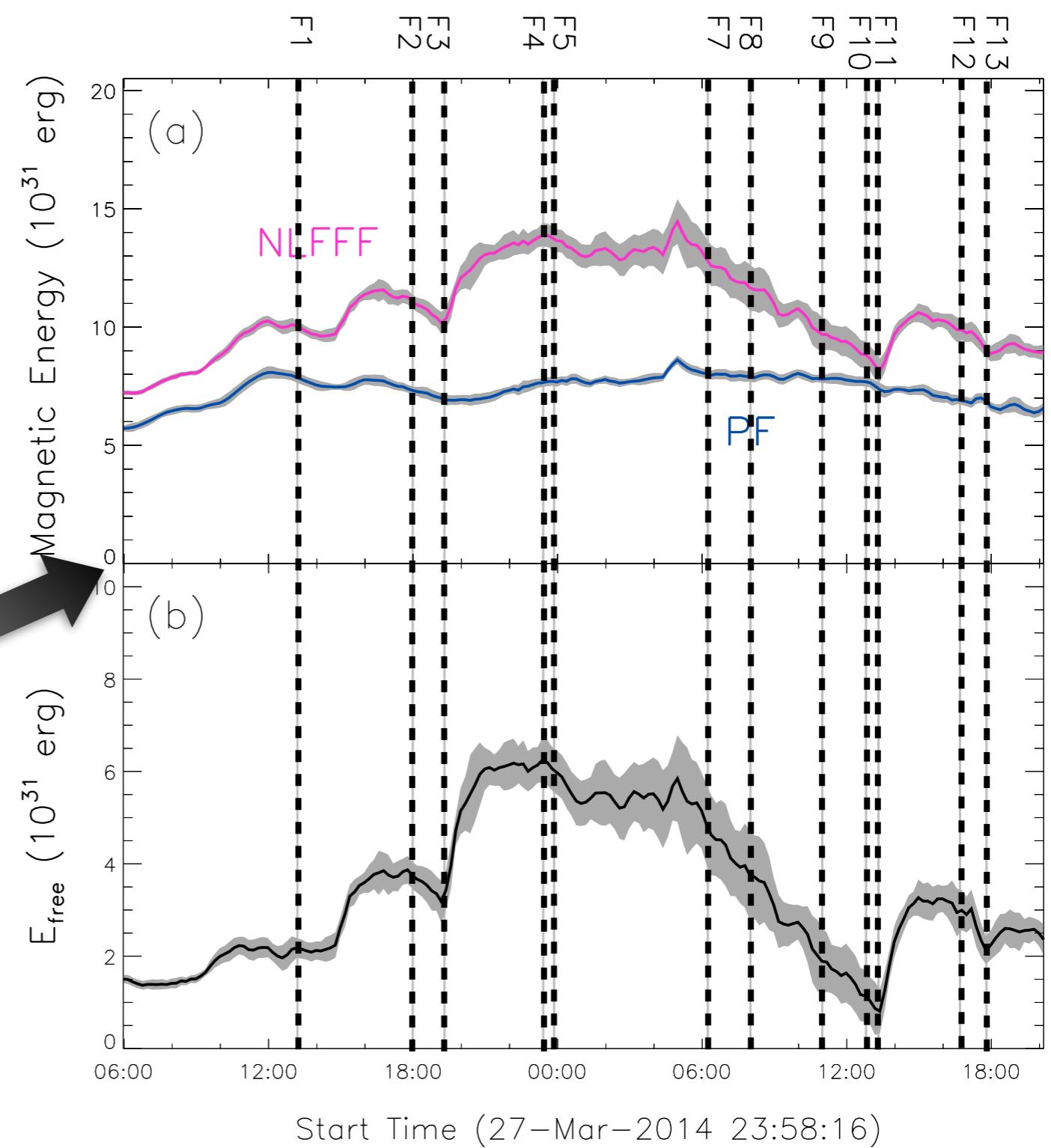
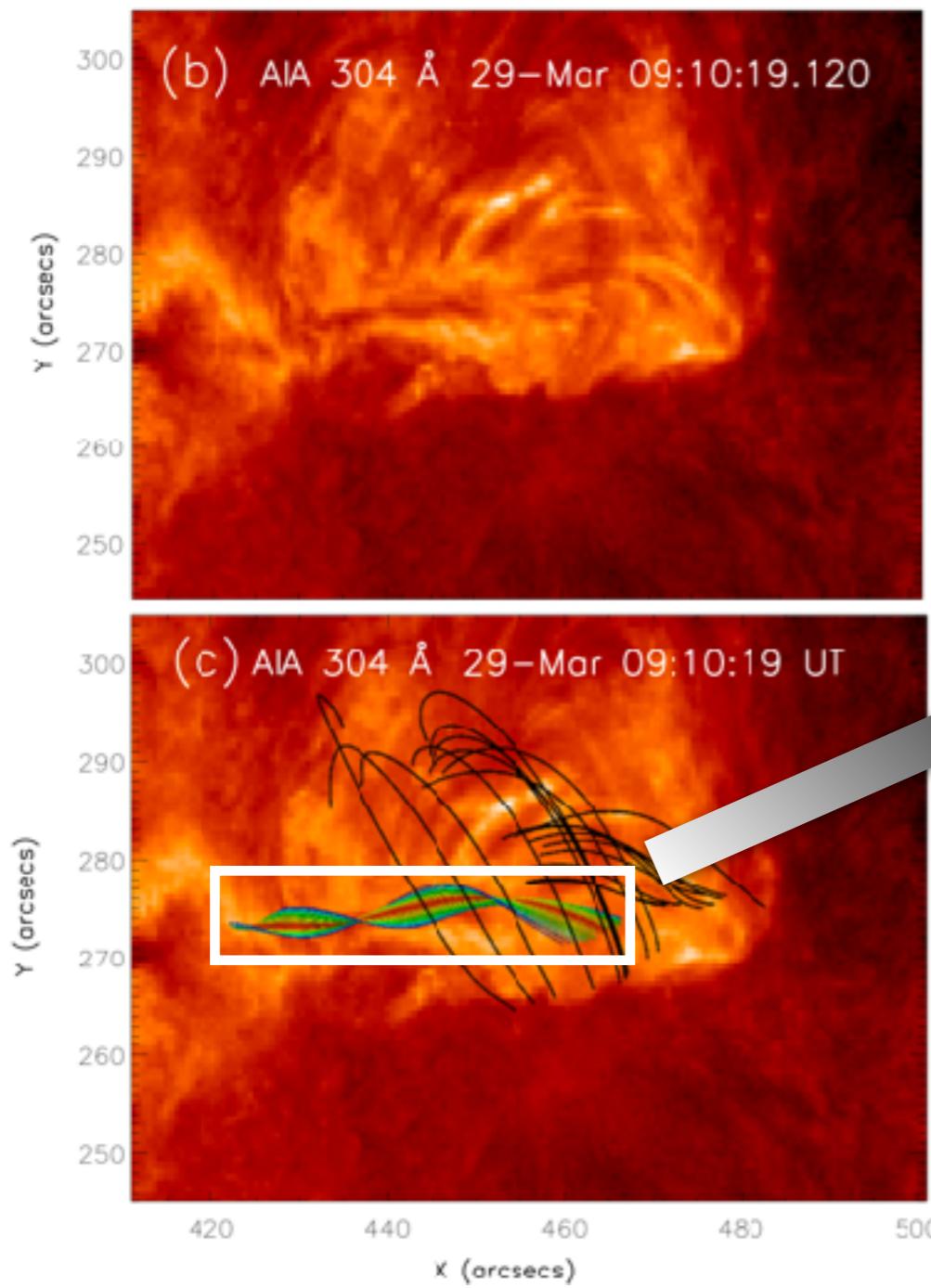
# 新浮现的磁极携带的能量和螺度

新浮现的磁极携带了能量和螺度进入该区域。

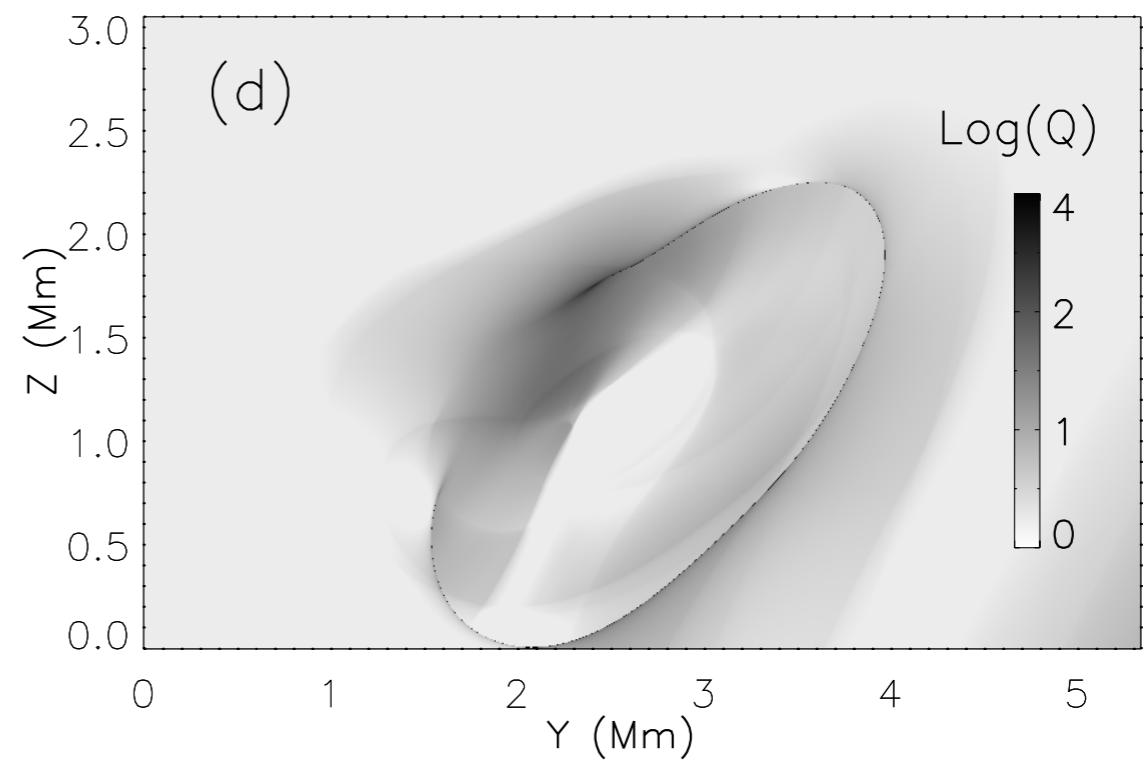
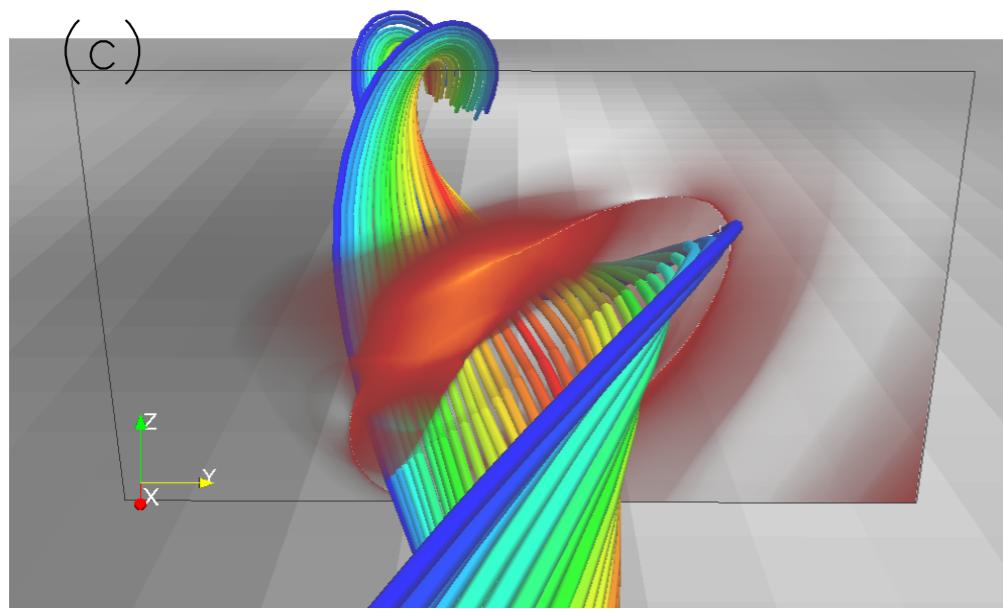
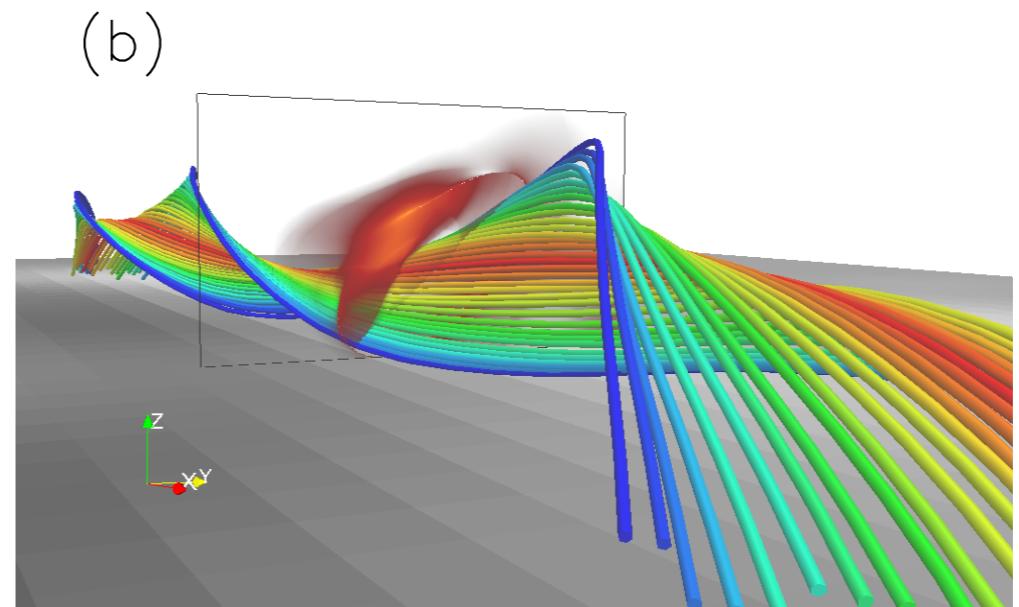
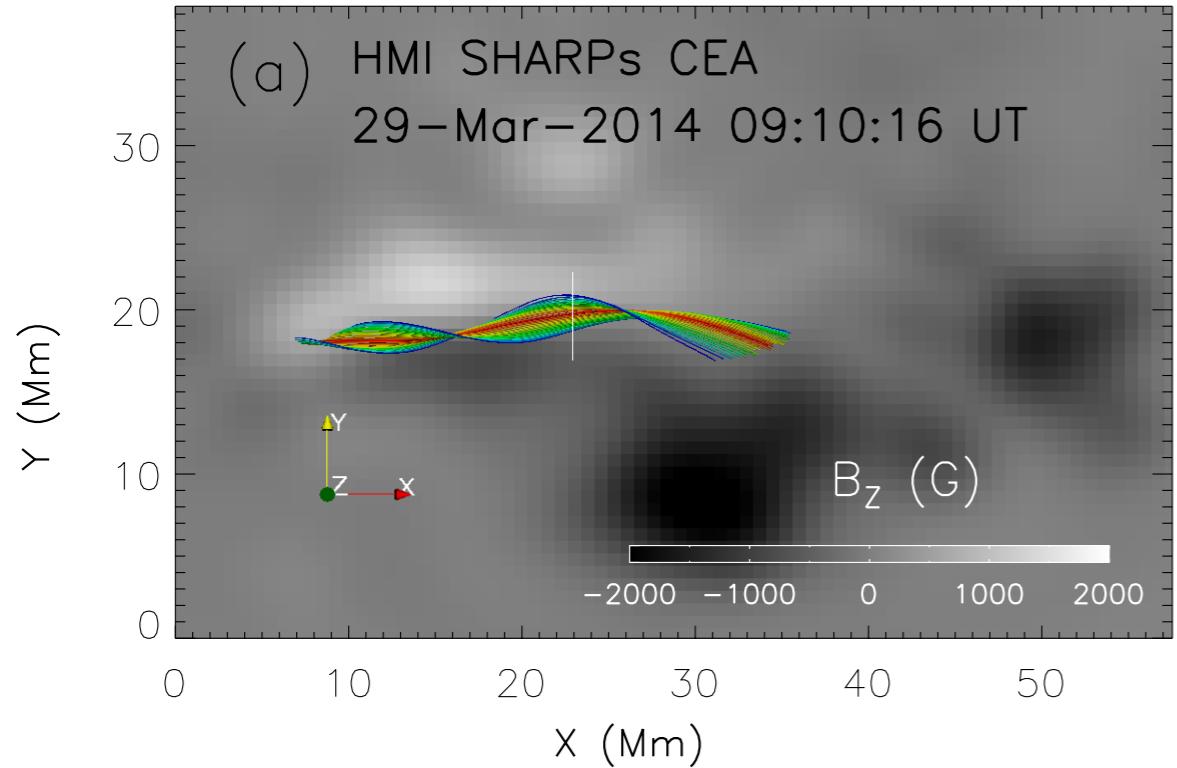


Start Time (28-Mar-2014 05:58:16)

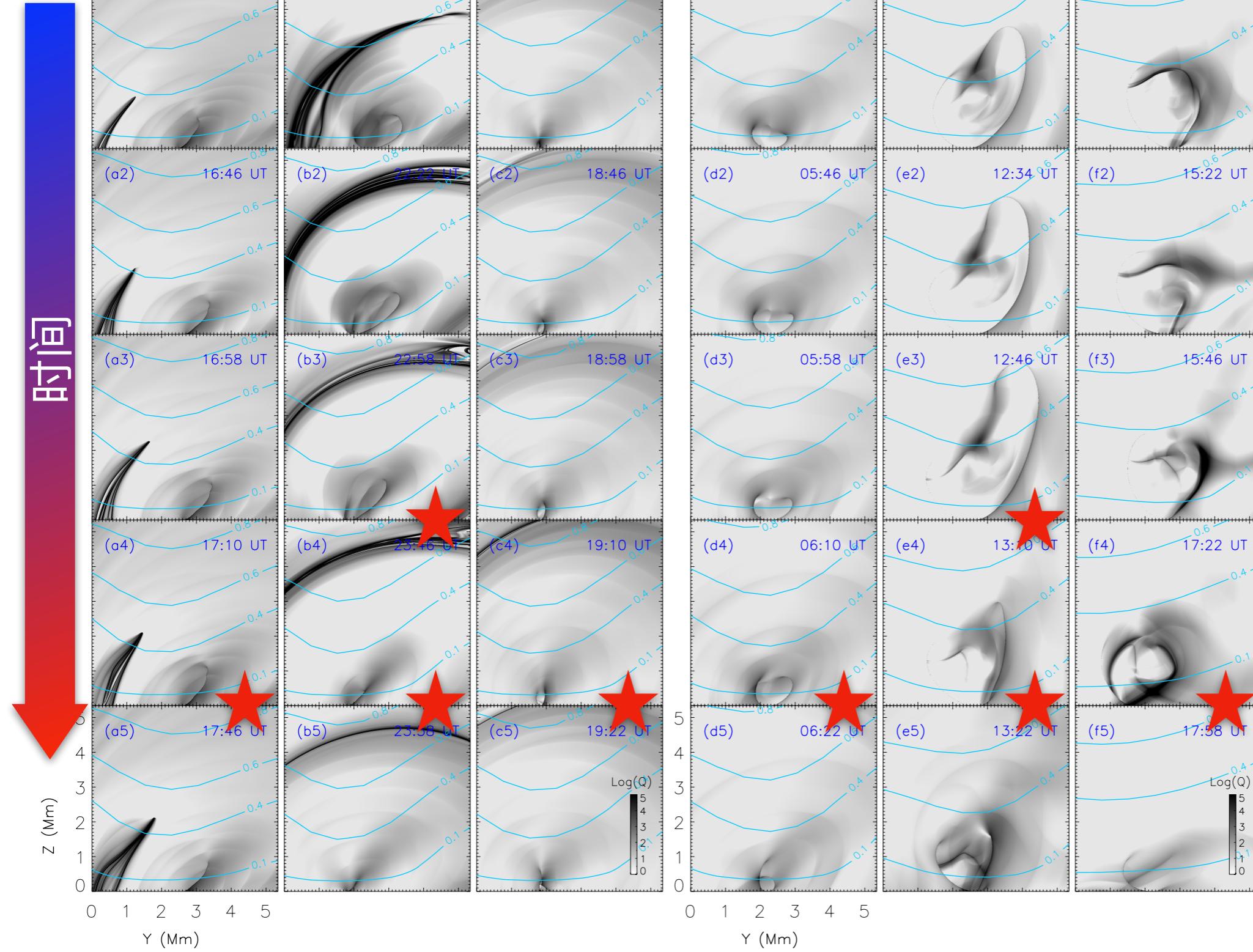
# 三维磁绳的能量



# 磁绳边界 的定义



# 准分界层的演化



- 耀斑前后准分界层的大小有明显改变。
- 衰减因子n的等高线显示最大值为0.6。

$$n = -\frac{h}{B_p} \frac{\partial B_p}{\partial h}$$

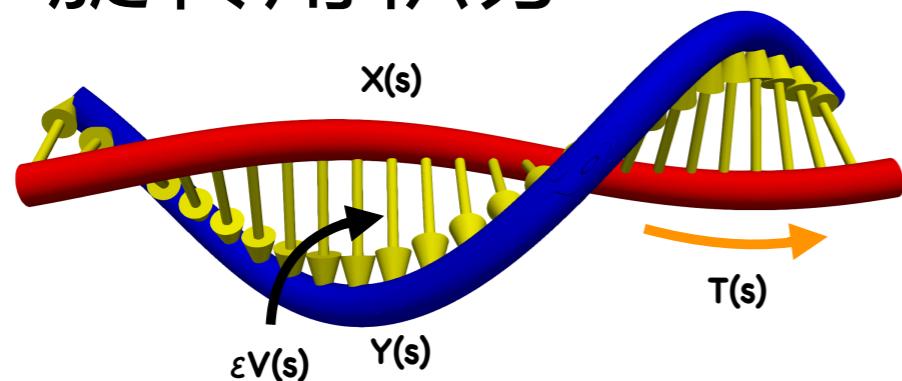
# 磁绳缠绕数的演化

- 平行电流积分

$$T_1 = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\nabla \times \mathbf{B}(s) \cdot \mathbf{B}(s)}{|\mathbf{B}(s)|^2} ds$$

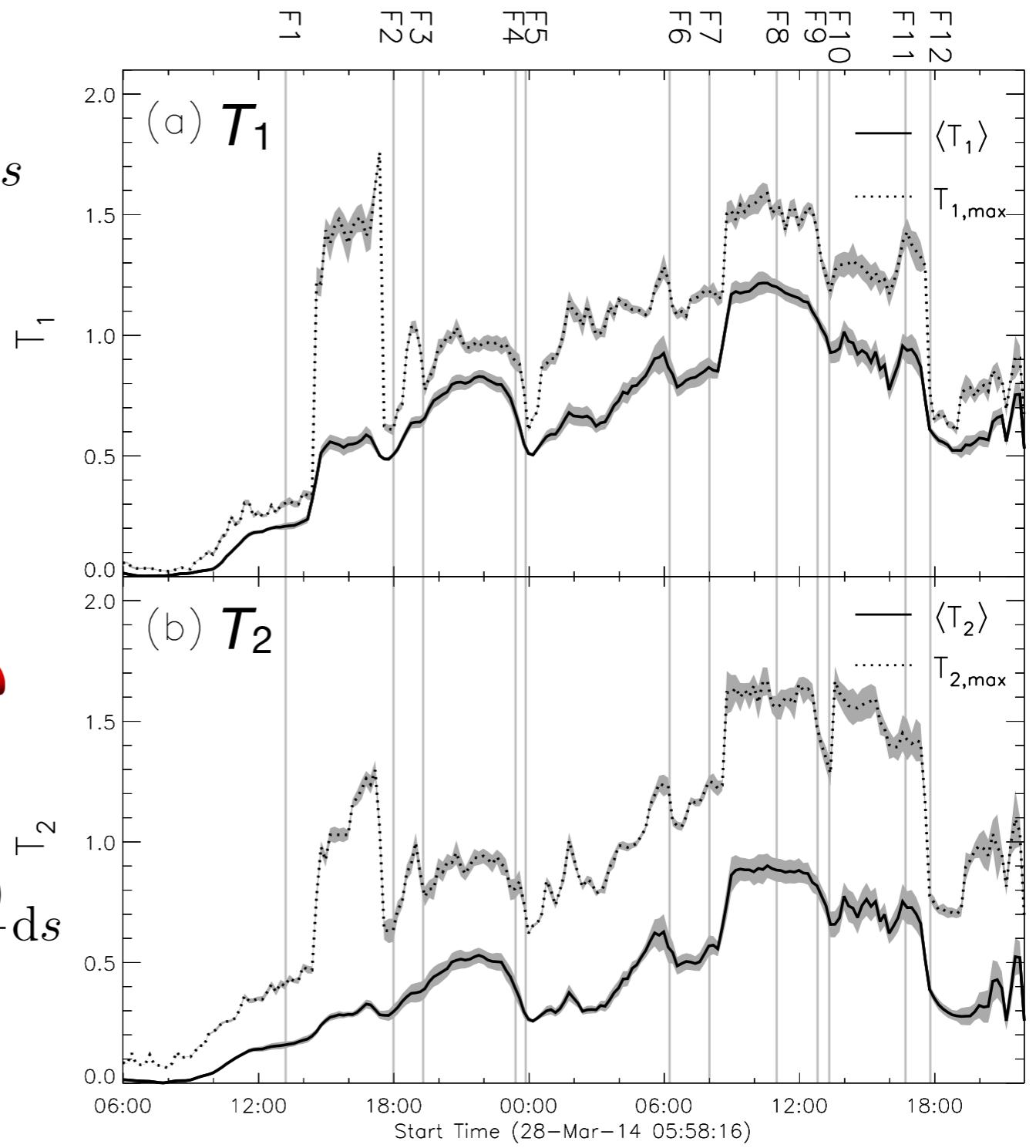
$$\langle T_1 \rangle = \frac{\sum_i \Phi_i T_{1,i}}{\sum_i \Phi_i}$$

- 旋转角积分



$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \int_S \mathbf{T}(s) \cdot \mathbf{V}(s) \times \frac{d\mathbf{V}(s)}{ds} ds$$

$$\langle T_2 \rangle = \frac{\sum_{i,j} \Phi_i \Phi_j T_{2,ij}}{\sum_{i,j} \Phi_i \Phi_j}$$



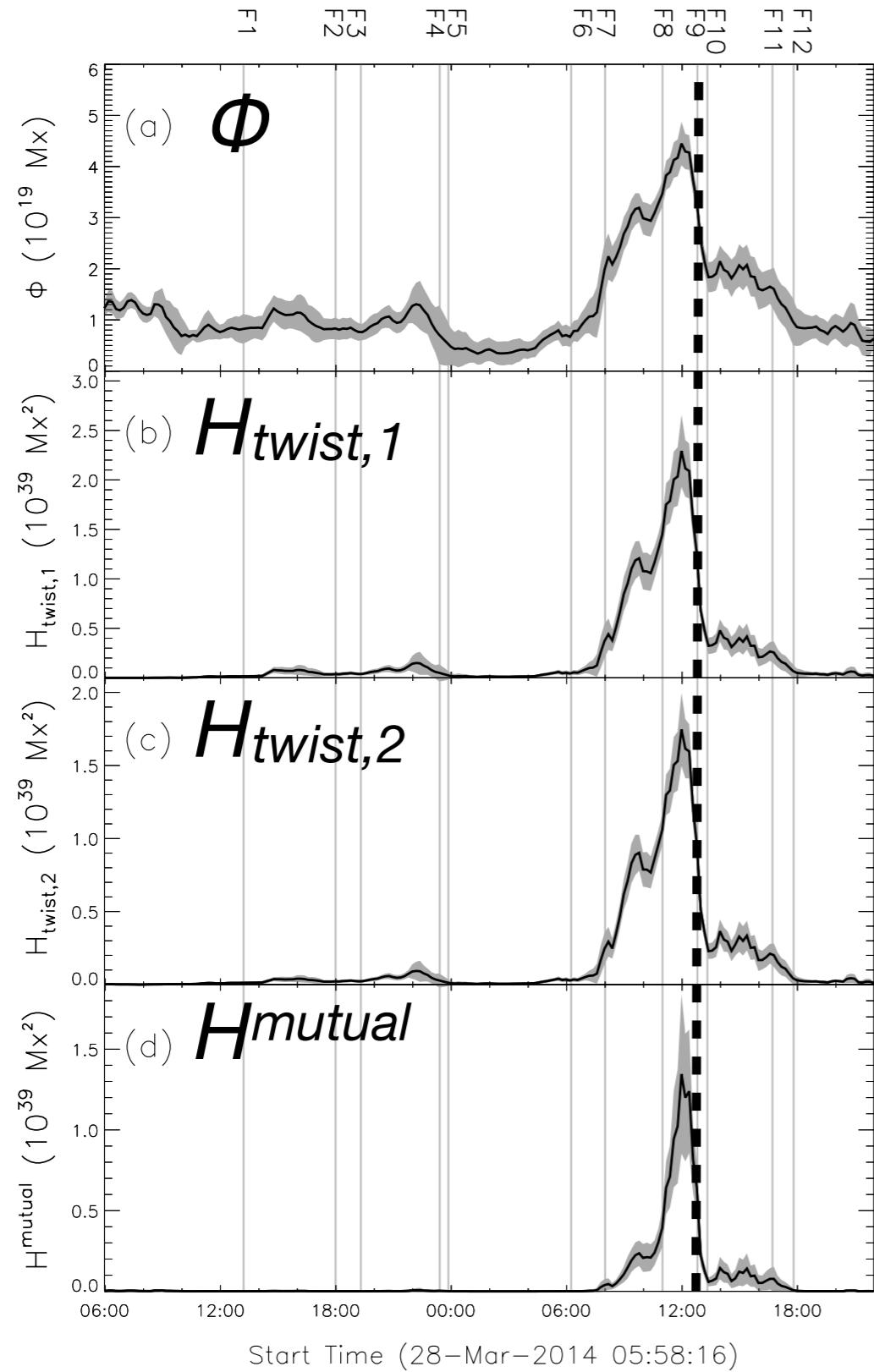


# 缠绕数的变化

| 耀斑编号 | $\Delta T_{1,\max}(\%)$ | $\Delta T_{2,\max}(\%)$ | $\Delta \langle T_1 \rangle(\%)$ | $\Delta \langle T_2 \rangle(\%)$ |
|------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| F1   | -1±6                    | 6±5                     | 5±9                              | 8±11                             |
| F2   | -65±1                   | -40±3                   | -1±3                             | 4±11                             |
| F3   | -24±3                   | -22±6                   | 3±5                              | 5±14                             |
| F4   | -9±5                    | -7±6                    | -19±6                            | -25±11                           |
| F5   | -32±4                   | -23±5                   | -25±5                            | -33±11                           |
| F6   | -9±6                    | -13±6                   | -8±9                             | -12±13                           |
| F7   | 2±5                     | 7±4                     | 2±7                              | 14±10                            |
| F8   | -4±3                    | -6±5                    | -2±4                             | -2±7                             |
| F9   | -15±2                   | -14±3                   | -10±3                            | -11±7                            |
| F10  | -18±3                   | -13±5                   | -13±4                            | -20±8                            |
| F11  | 17±6                    | 2±7                     | 13±8                             | 12±11                            |
| F12  | -51±5                   | -47±6                   | -33±6                            | -47±9                            |

F2, F3, F5, F9,  
F10, F12中的  
 $\Delta T_{\max}$ 变化超过  
了10%。

# 磁绳螺度的演化



- 磁绳的细磁流管近似

$$H_{\text{twist},1(2)} = \langle T_{1(2)} \rangle \Phi^2$$

- 磁绳分解的多磁流管近似

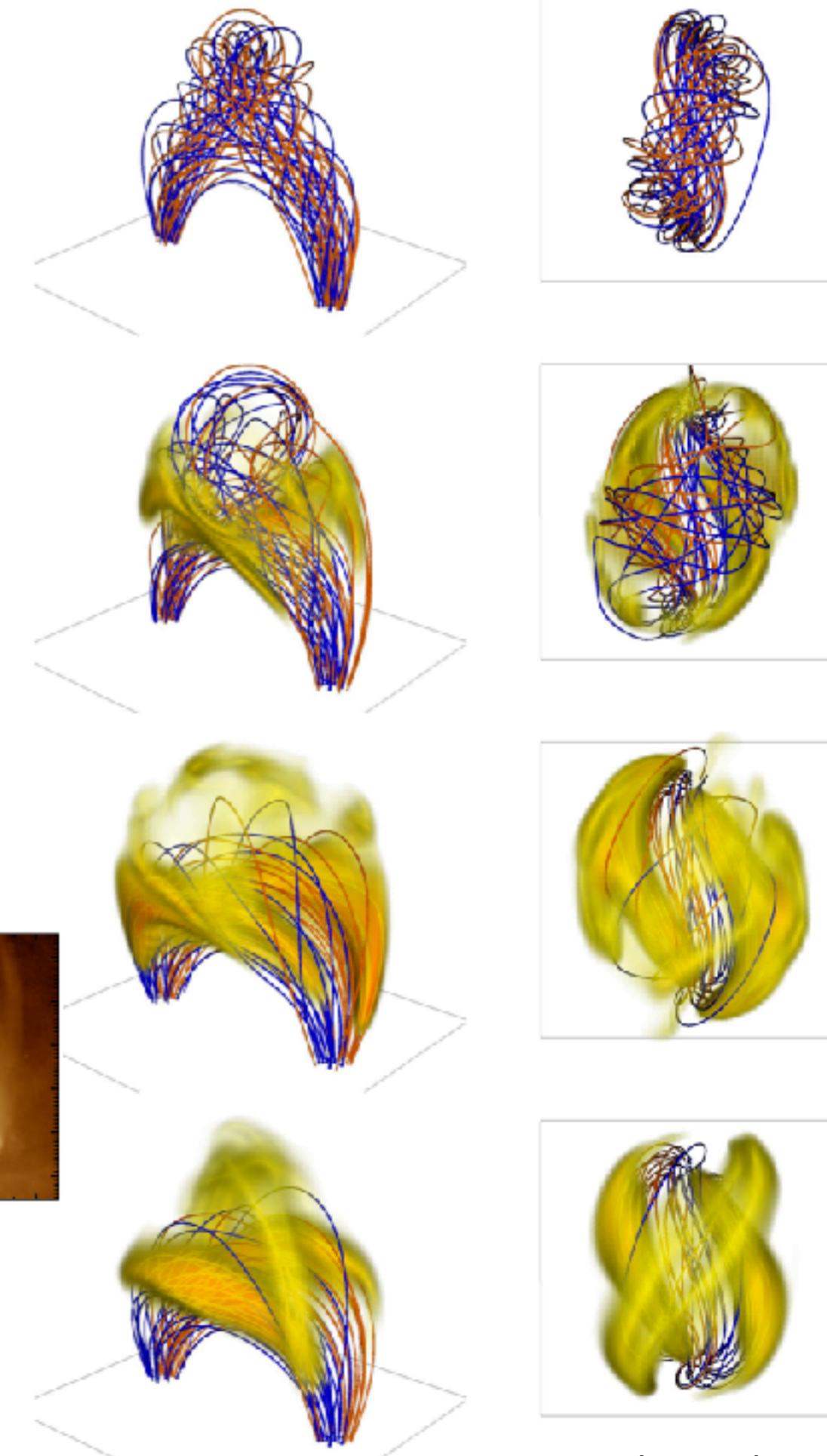
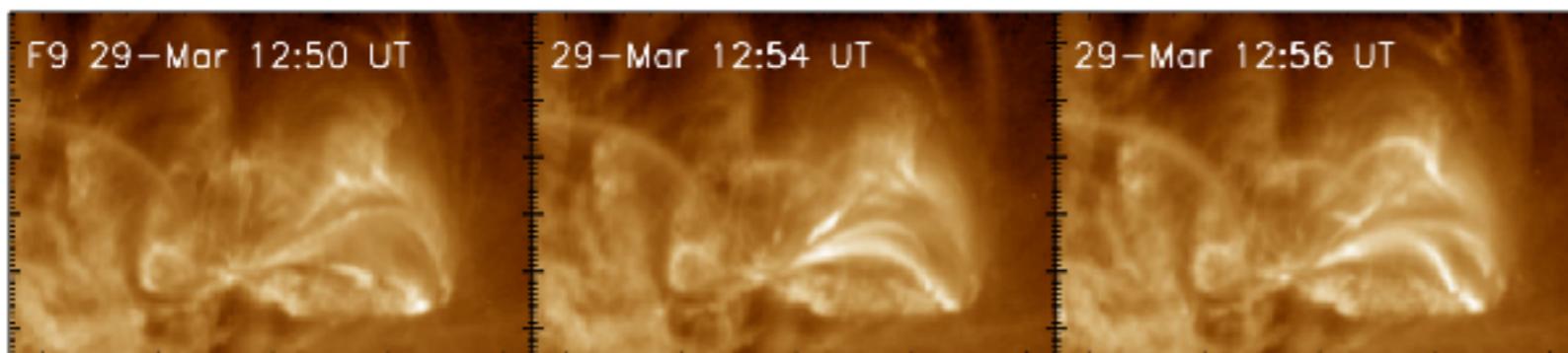
$$H^{\text{mutual}} = \sum_{i,j} \mathcal{L}_{ij} \Phi_i \Phi_j$$

$$\mathcal{L}_{ij} = \mathcal{L}_{ij}^{\text{closed}} + \mathcal{L}_{ij}^{\text{arch}}$$

Demoulin & Pariat (2006)

# 磁螺度衰减的解释

磁绳与背景场之间的重联  
导致了磁绳的瓦解，同时  
也令磁绳的螺度转移到了  
周围磁场之中。





# 小结

- 包裹着磁绳的准分界层结构在耀斑爆发前缓慢演化，在爆发过程中则是急剧地减少。
- 组成磁绳的磁力线的缠绕数的极值可以更好的表征耀斑的发生。

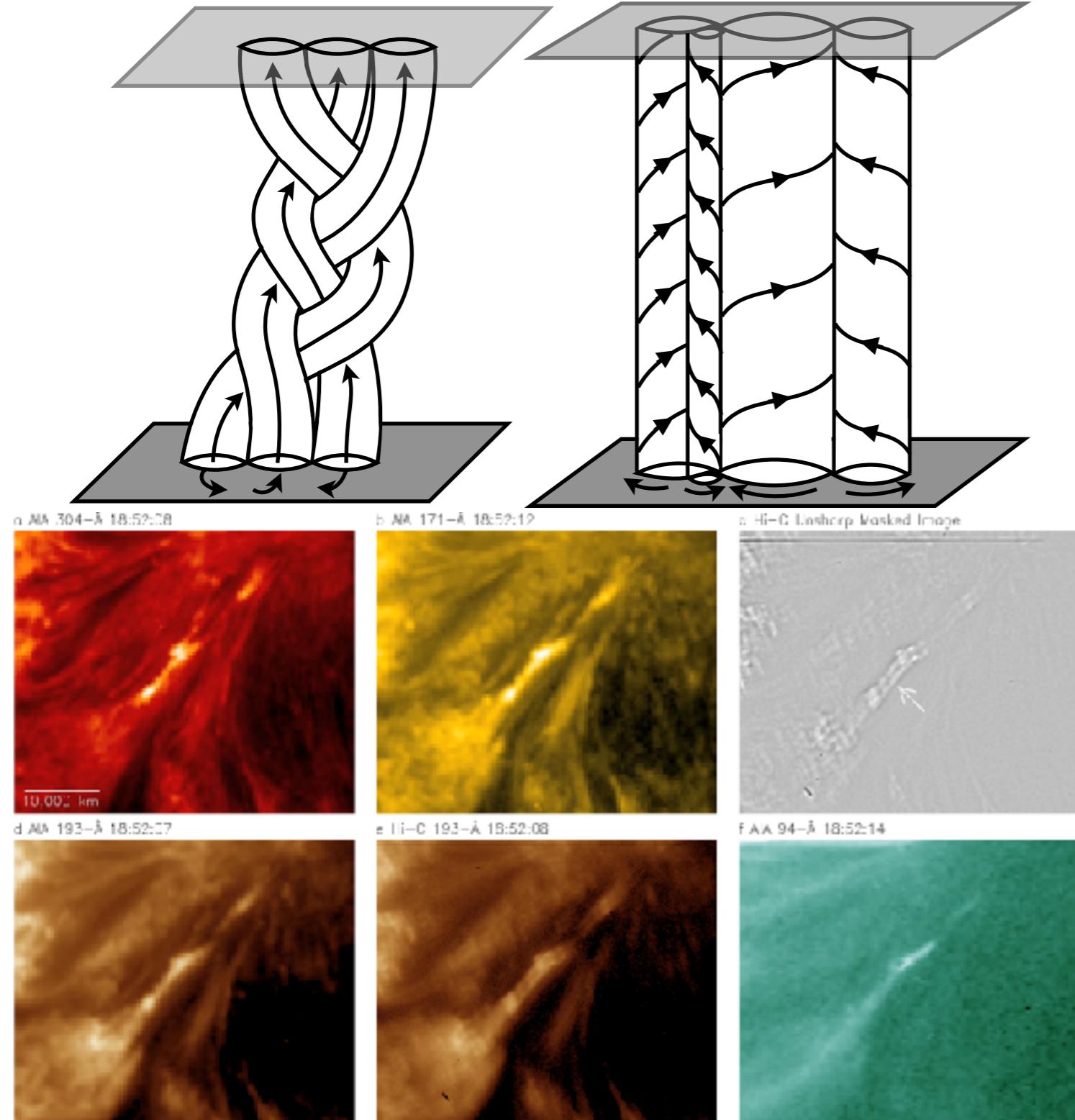


# 提纲

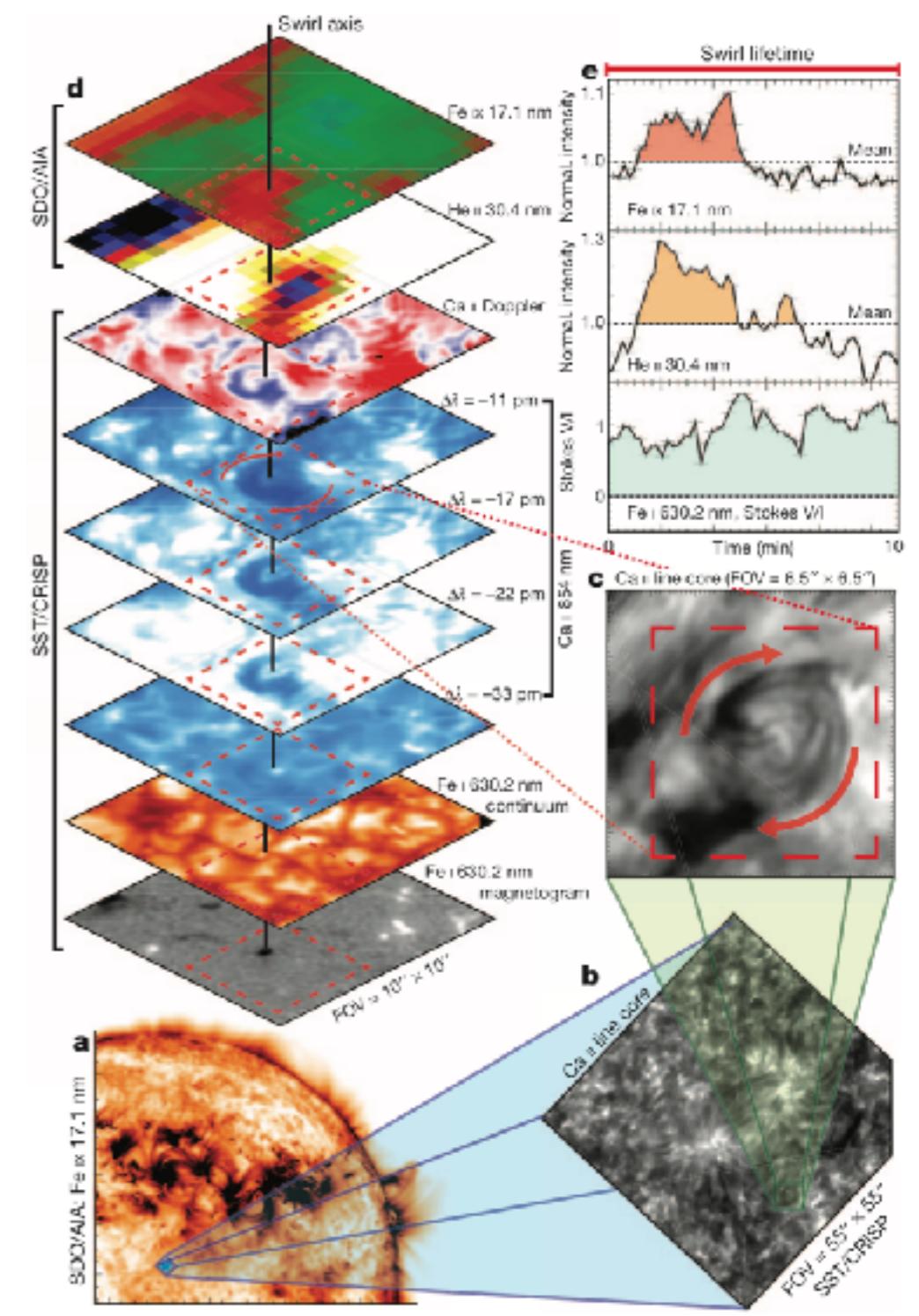
- 简介
- 磁场拓扑分界层与爆发性事件的研究
- 磁场拓扑量与爆发性事件的研究
- 磁场连接性改变与日冕加热的研究
- 总结与展望

# 磁拓扑改变与日冕加热的研究

## 磁重联加热



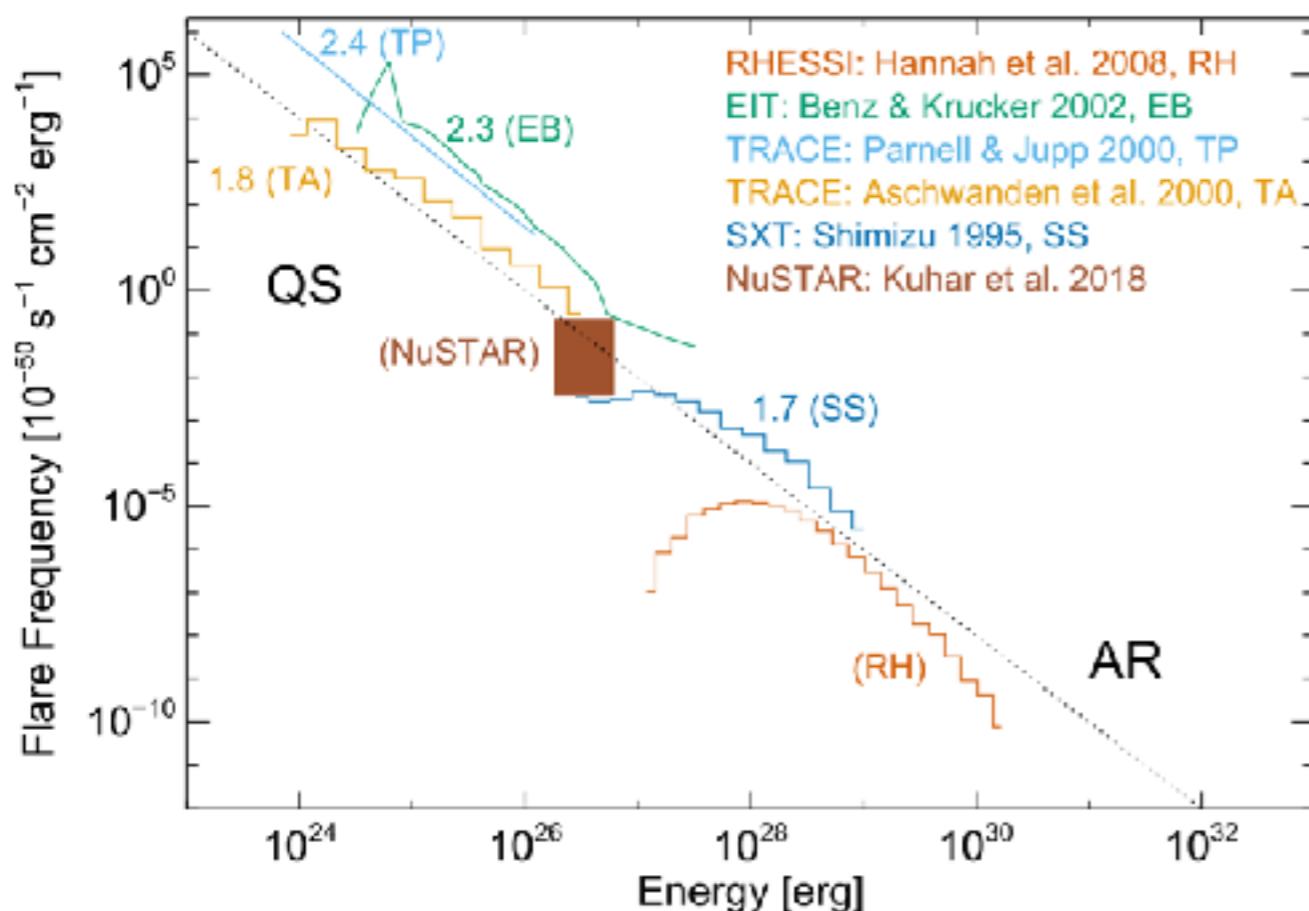
## 阿尔文波加热



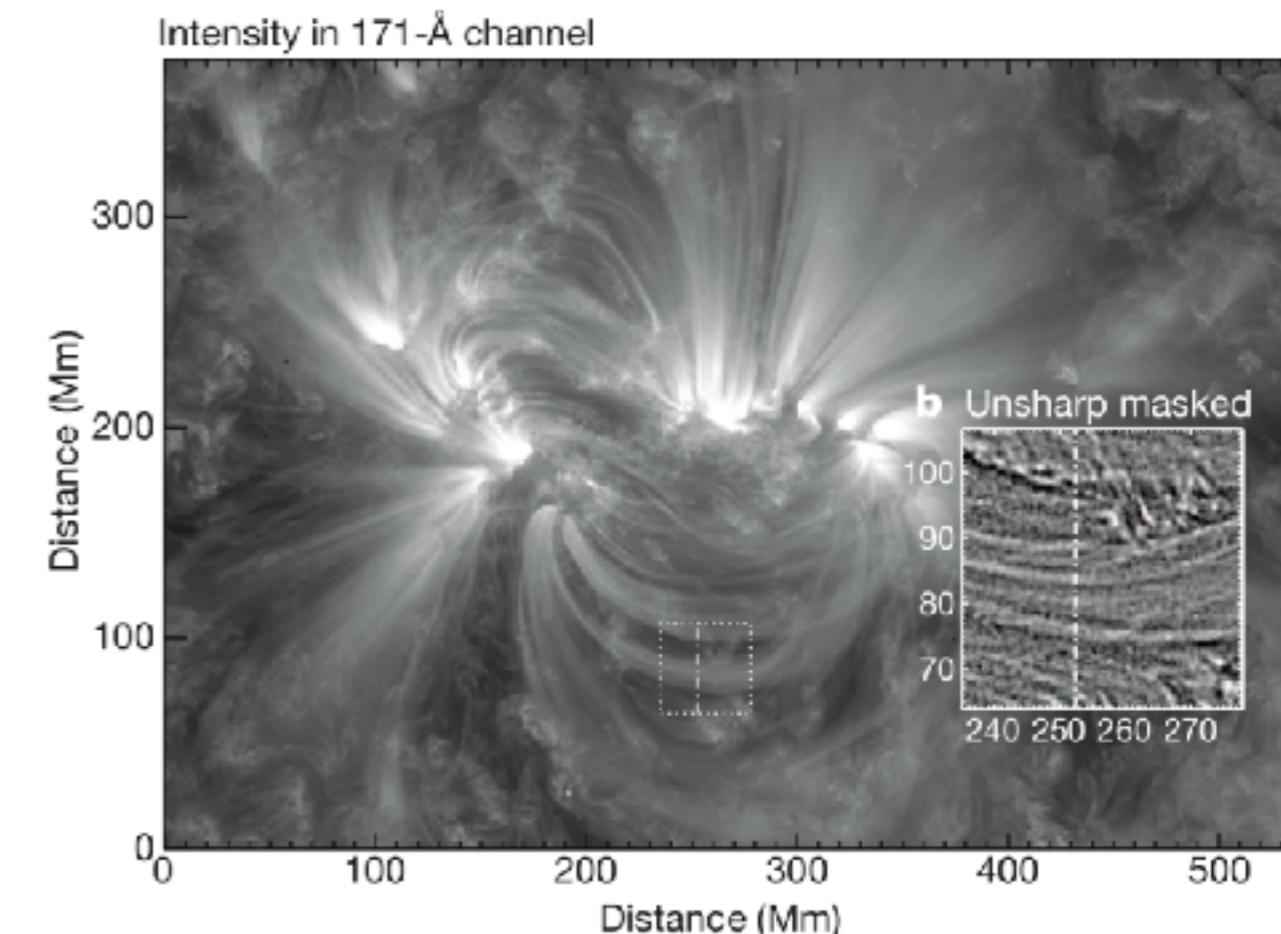
# 磁拓扑改变与日冕加热的研究

- 然而，各种理论的系统性的定量测量十分匮乏。

## 纳耀斑



## 阿尔文波



$$\frac{dN}{dW} \sim W^{-\alpha}$$

Kuhar et al. (1991)

$W \sim 100 - 200 \text{ W m}^{-2}$

McIntosh et al. (2011)

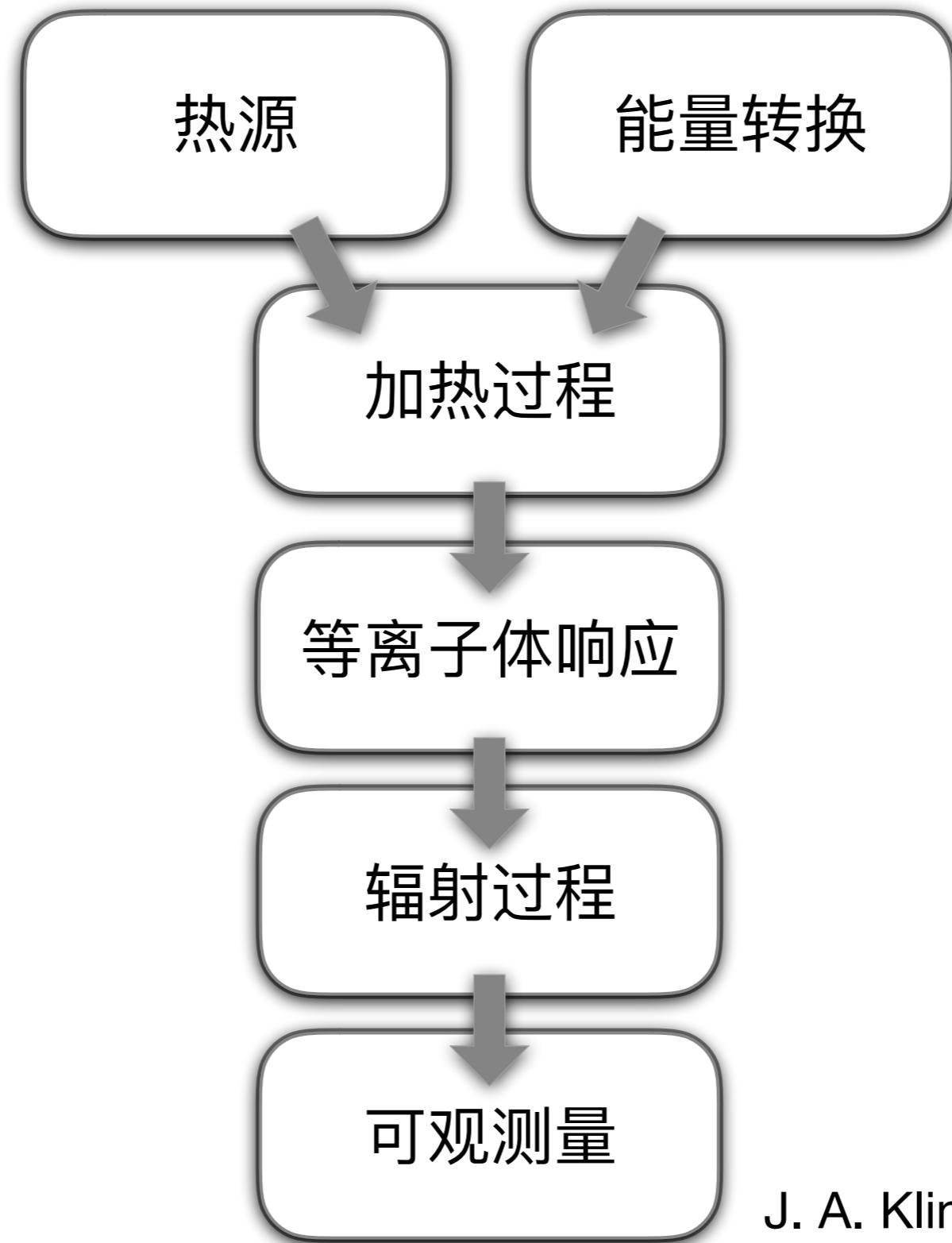


# 日冕加热的研究的动机

为了能够定量地进行研究，我们提出了一个利用观测量进行反馈的基于磁重联的定量的日冕加热模型。



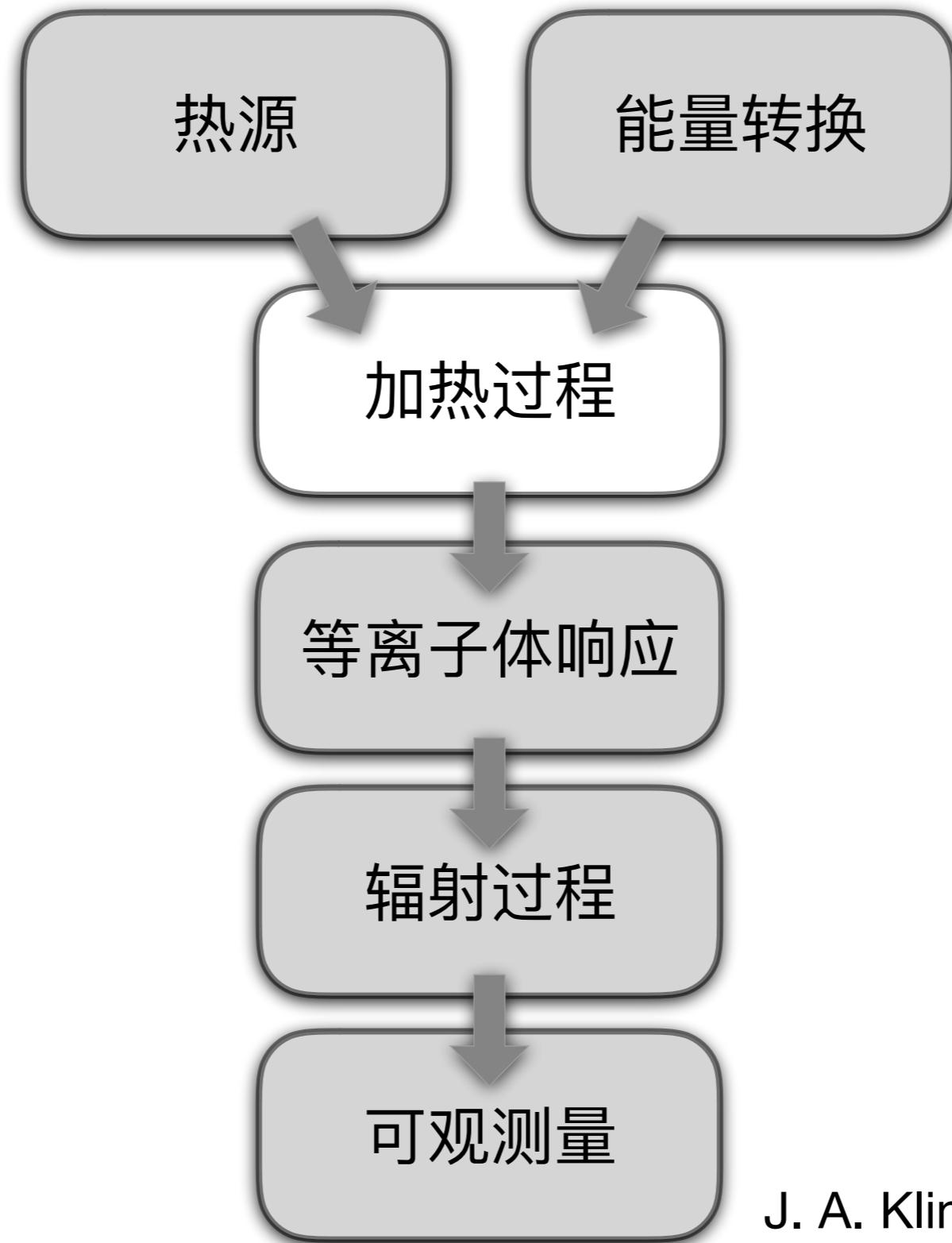
# 日冕加热的研究的流程图



J. A. Klimchuk (2006)

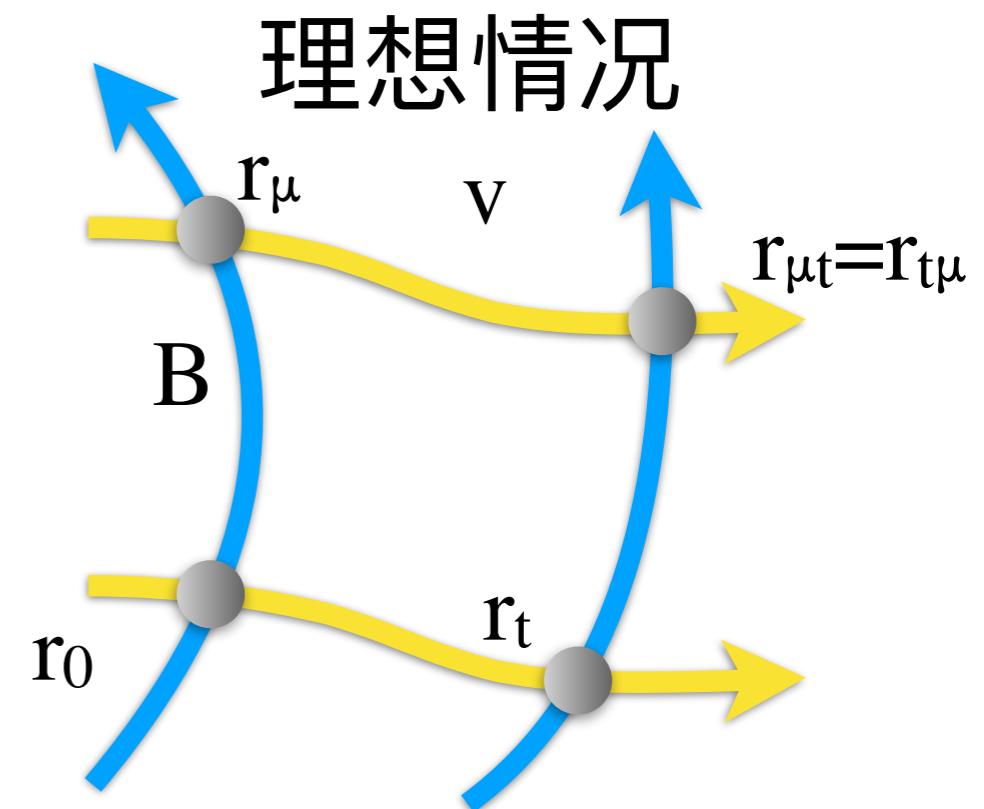
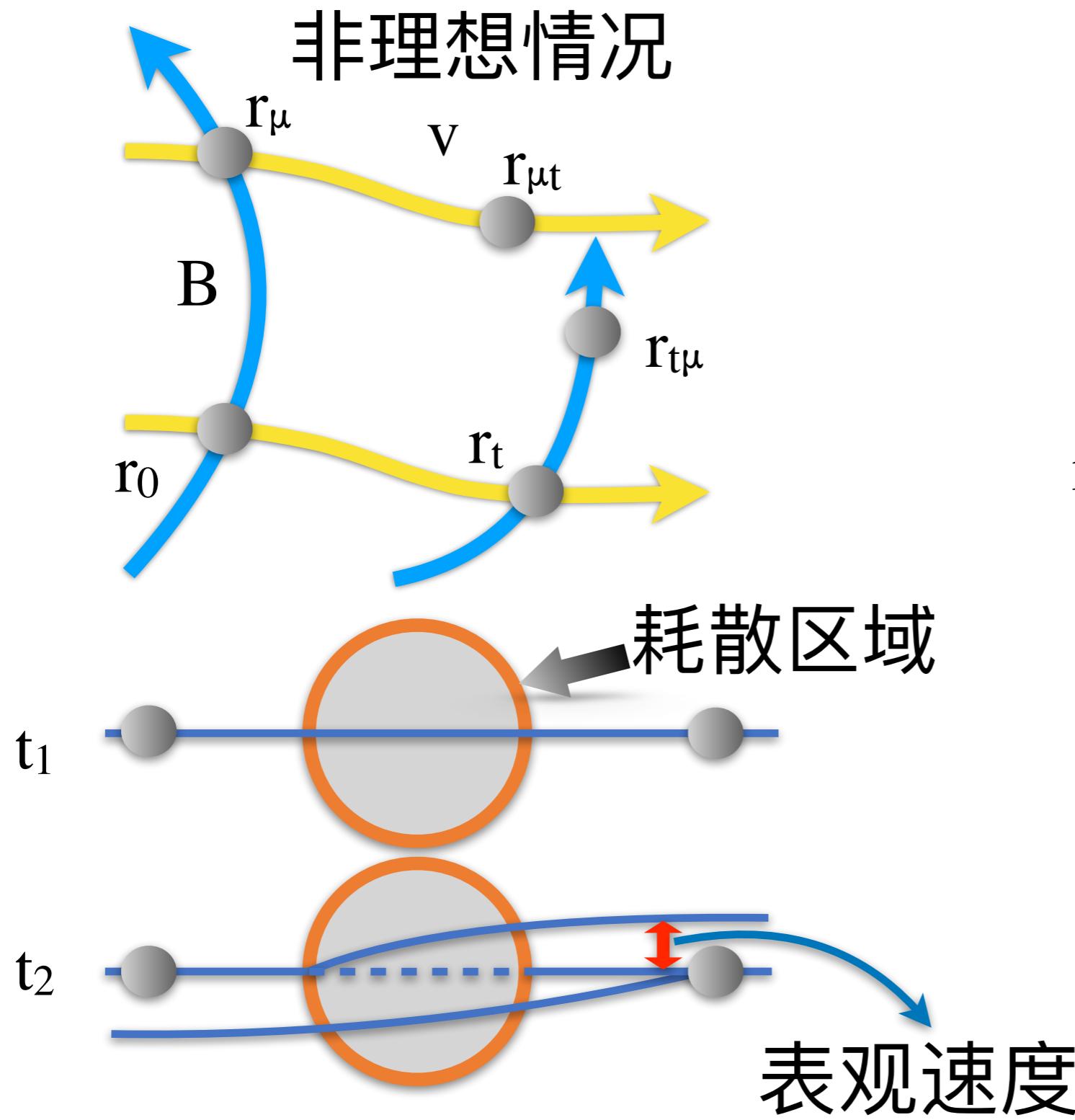


# 日冕加热的研究的流程图



J. A. Klimchuk (2006)

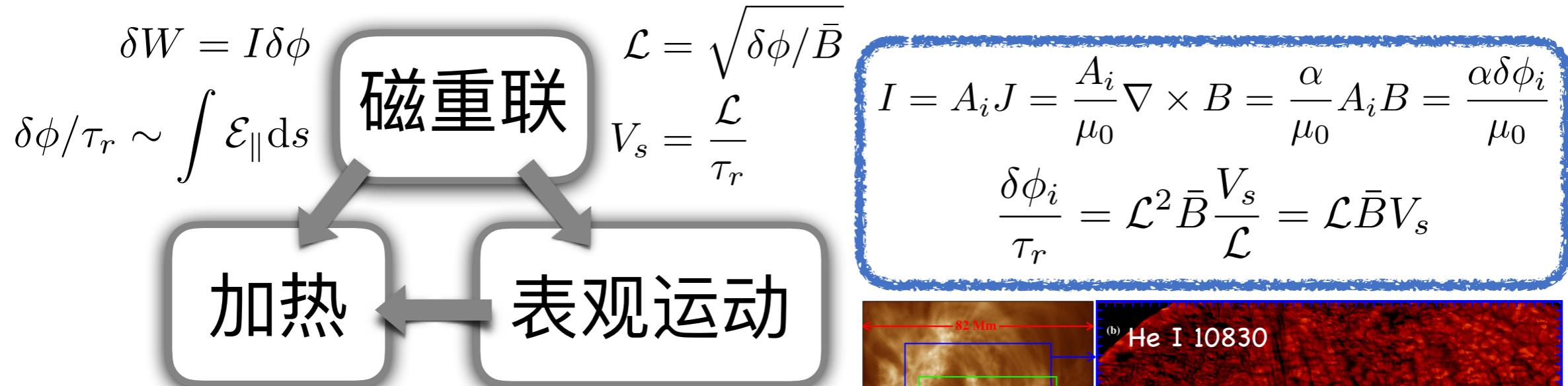
# 加热过程：非理想速度



$$\dot{\phi} \sim \int \mathcal{E}_{||} ds$$

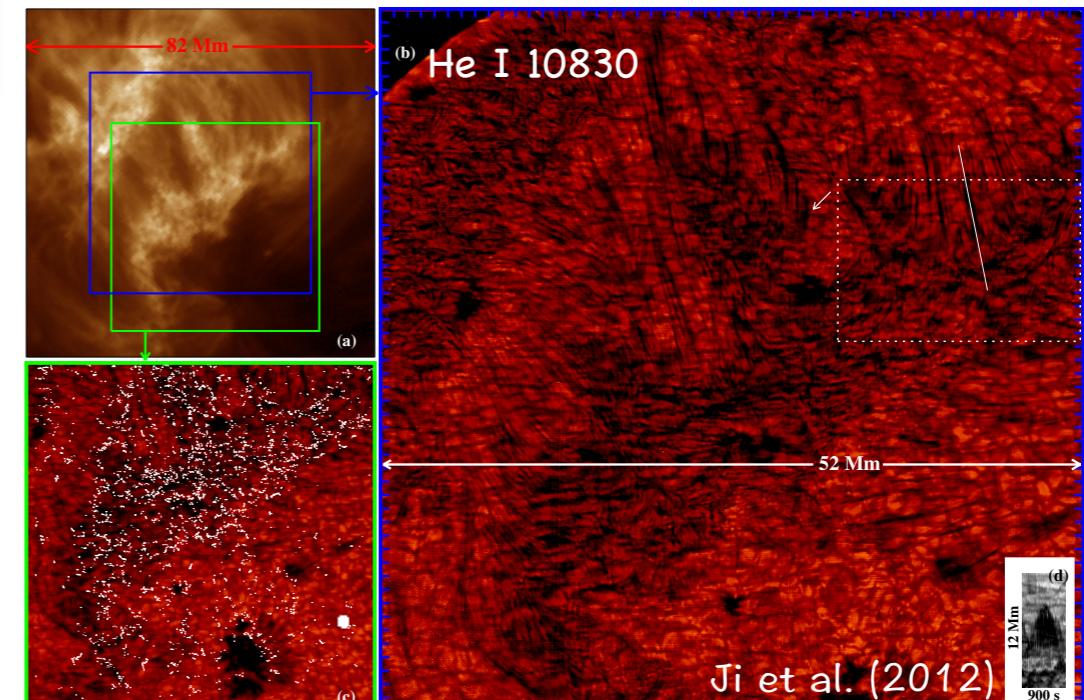
Schindler & Hesse (1988)

# 加热过程：非理想速度与加热率的关系



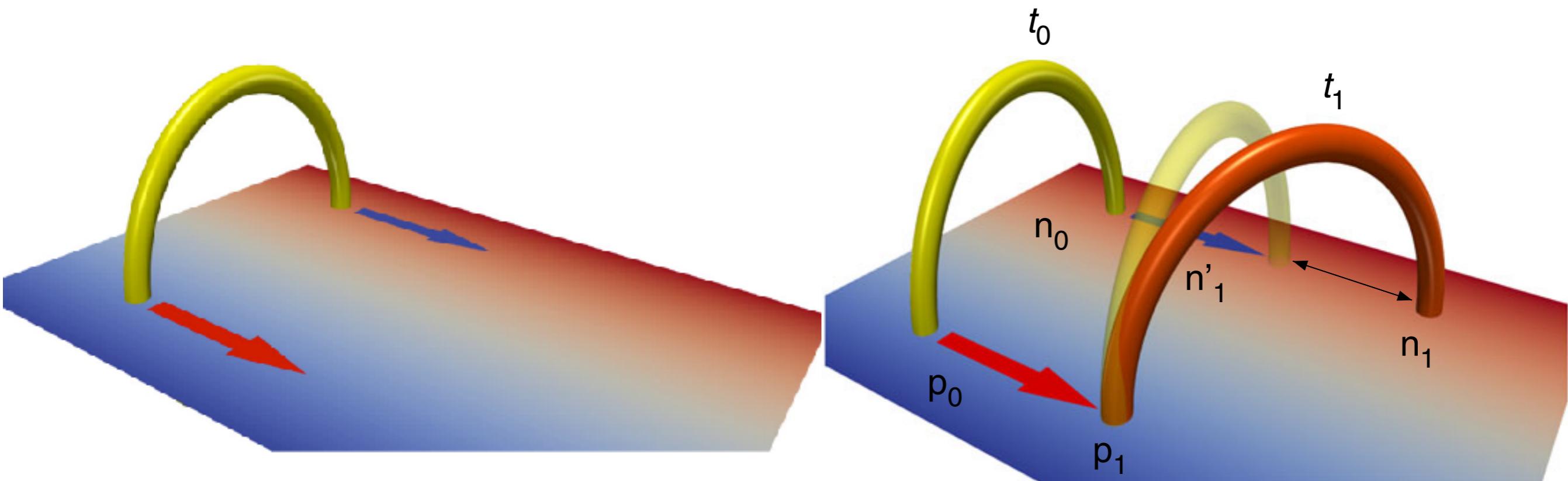
$$P = I \times \delta \phi / \tau_r$$

$$P_i = \alpha \delta \phi_i / \mu_0 \times \mathcal{L} \bar{B} V_s$$



$$F = \frac{\sum_i P_i}{A} = \frac{1}{\mu_0} \alpha \mathcal{L} V_s \bar{B}^2$$

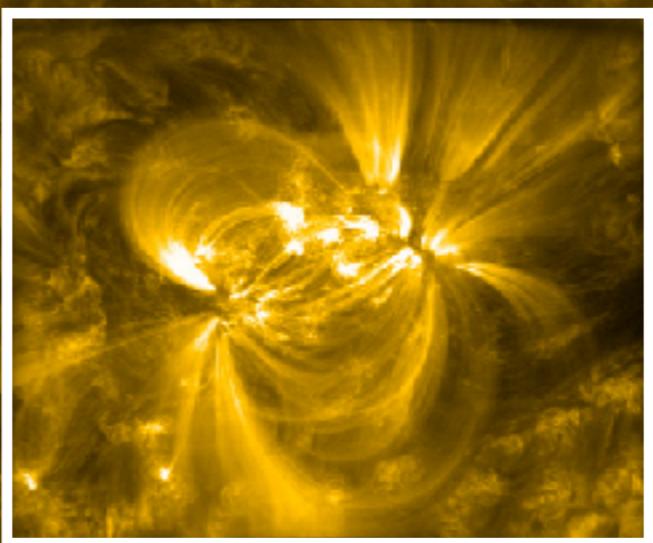
# 加热过程：非理想速度的测量



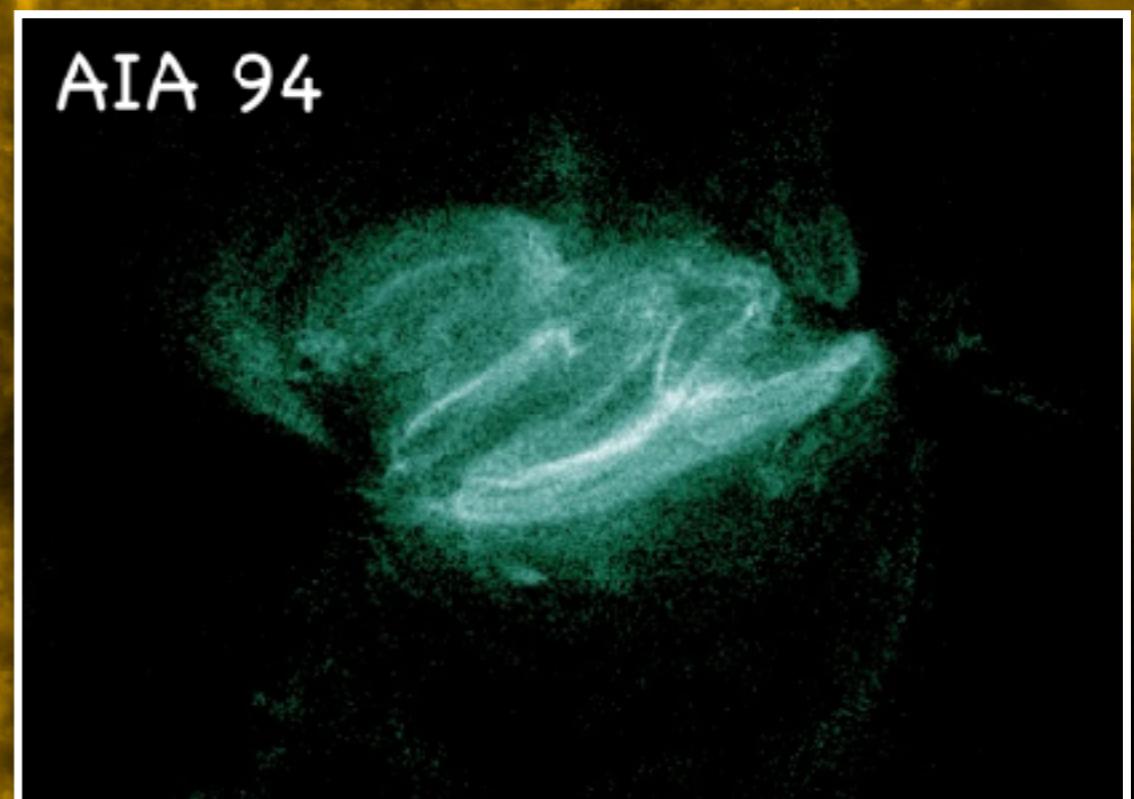
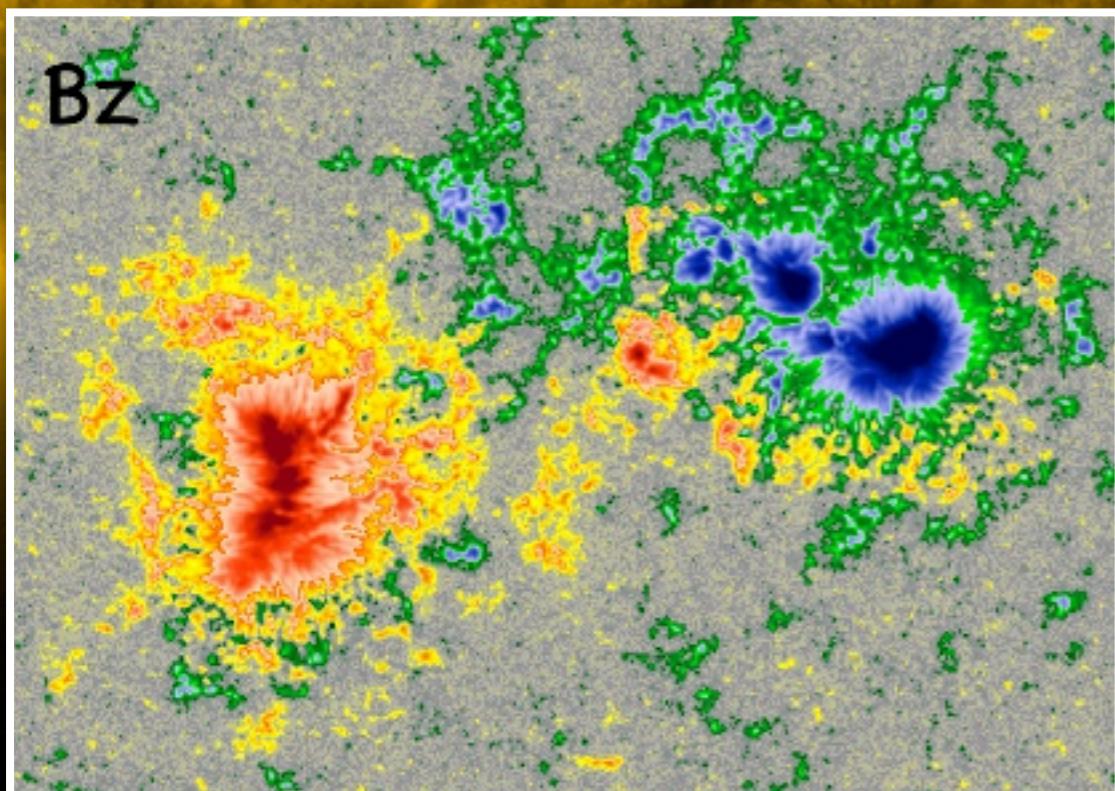
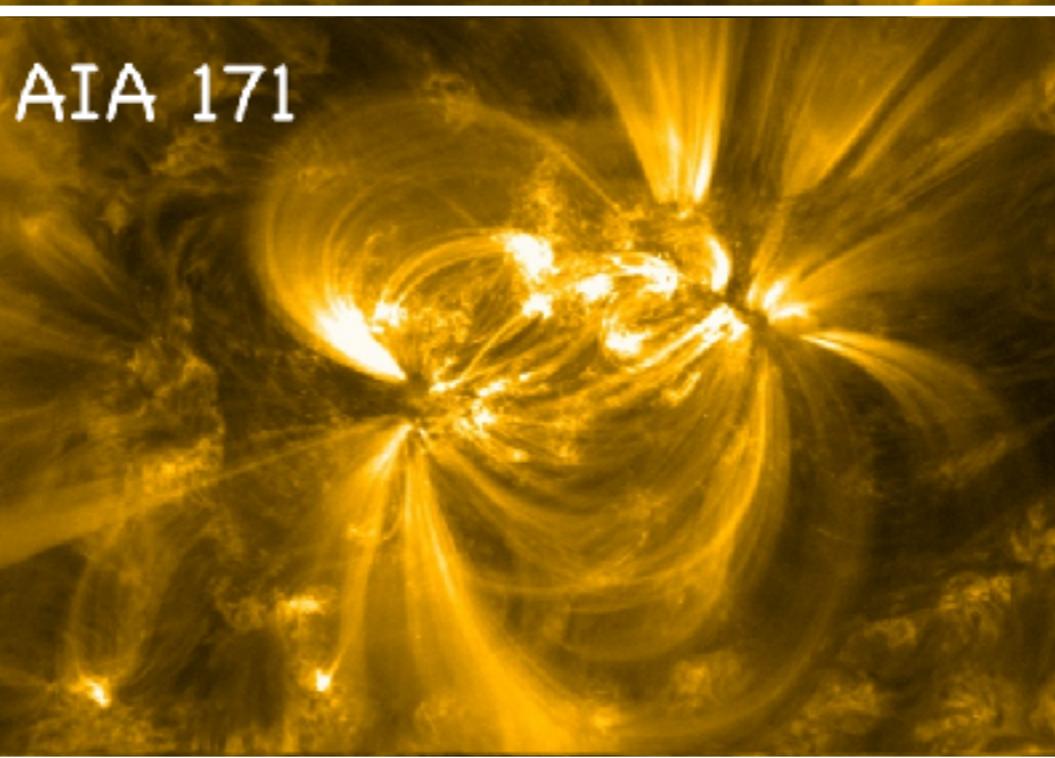
$$\mathbf{x}_{n0} \xrightarrow{\mathbf{B}_0} \mathbf{x}_{p0} \xrightarrow{\mathbf{V}} \mathbf{x}_{p1} \xrightarrow{\mathbf{B}_1} \mathbf{x}_{n1}$$

$$V_s(\mathbf{x}_{n1}) = \lim_{\delta t \rightarrow \infty} \frac{|\mathbf{x}_{n1} - \mathbf{x}_{n'1}|}{\delta t}$$

# 对活动区11416的测试

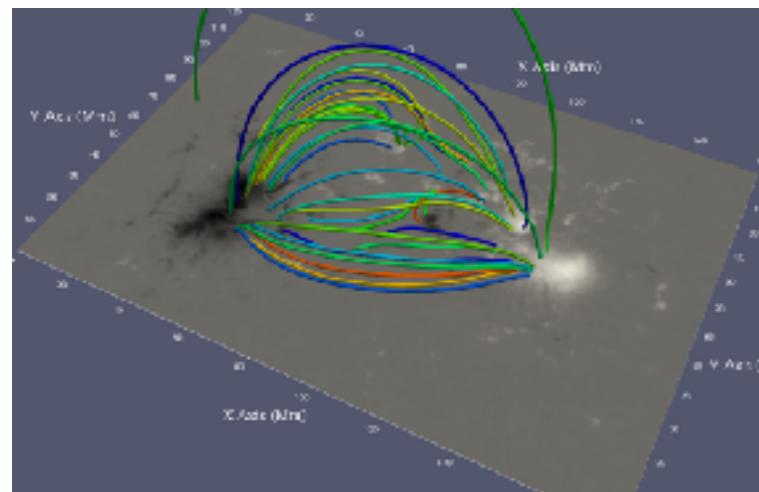


# 对活动区11416的测试

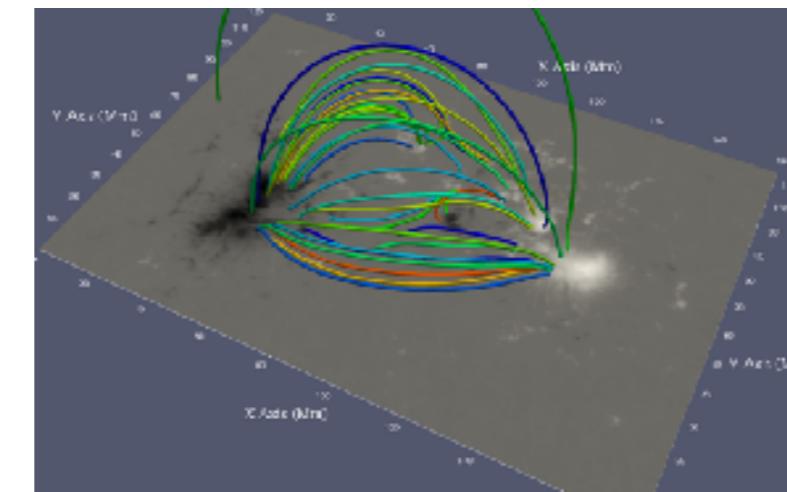


# 三维磁场的重构

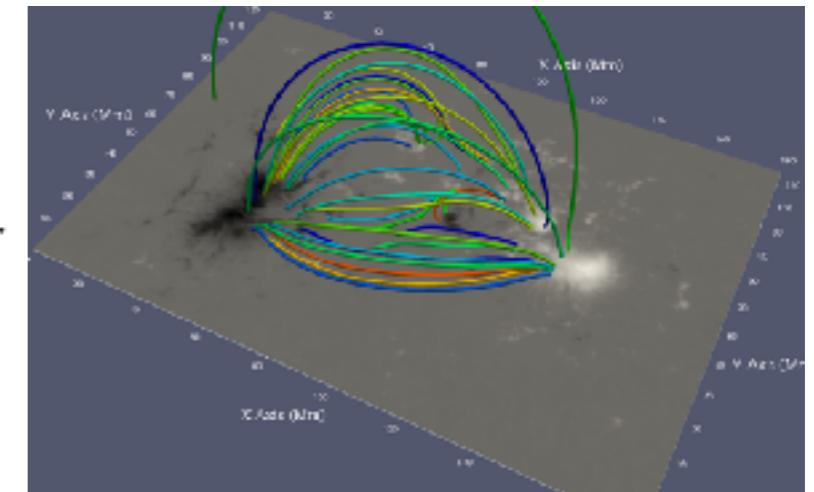
$B(t_1)$



$B(t_2)$

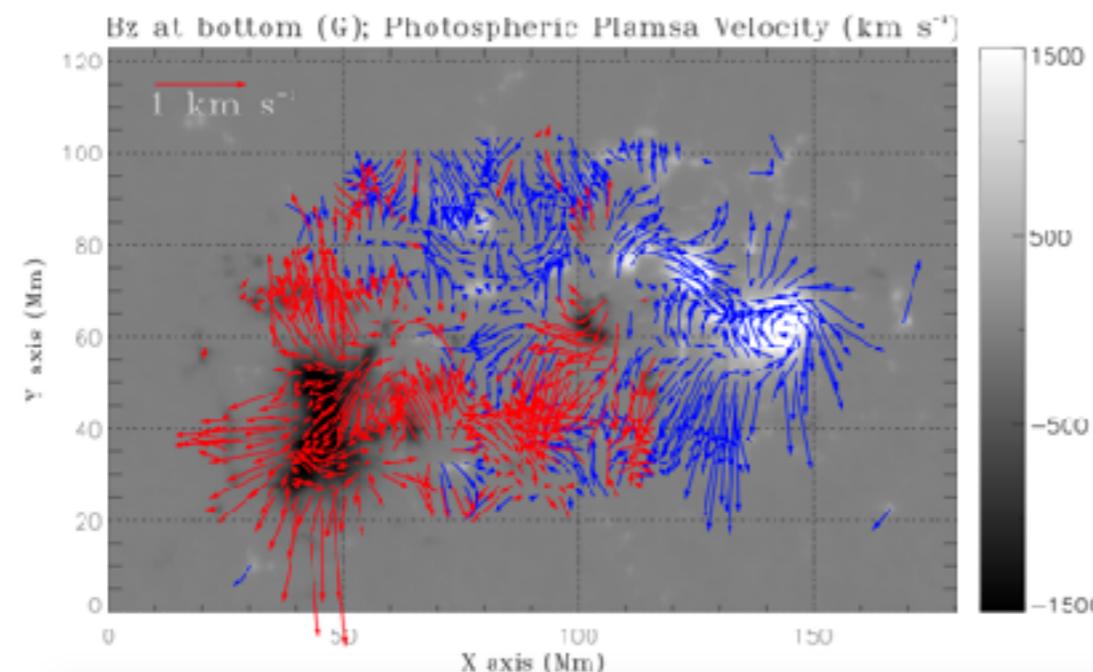


$B(t_3)$

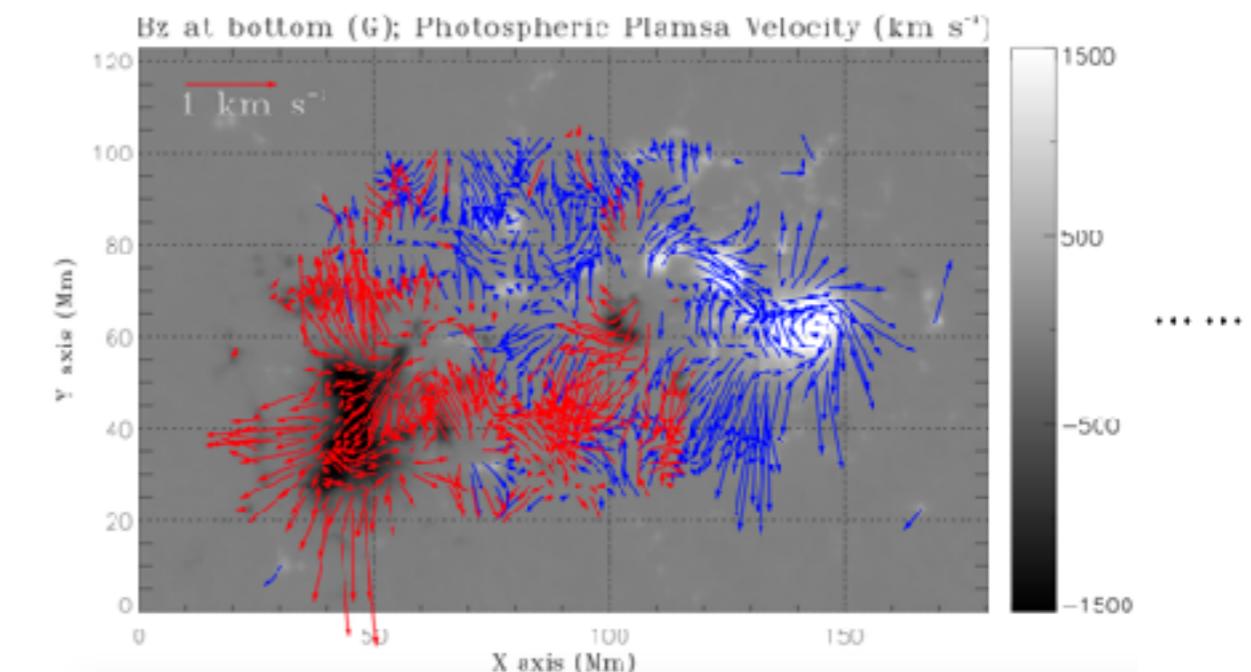


## 光球的速度的DAVE4VM场反演

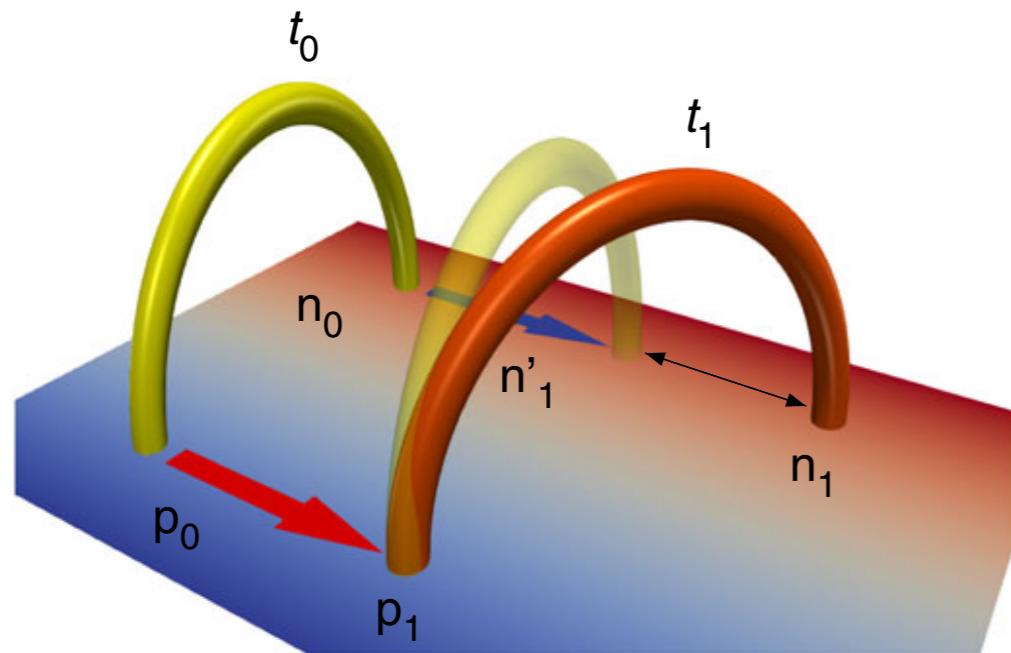
$V(t_{1.5})$



$V(t_{2.5})$

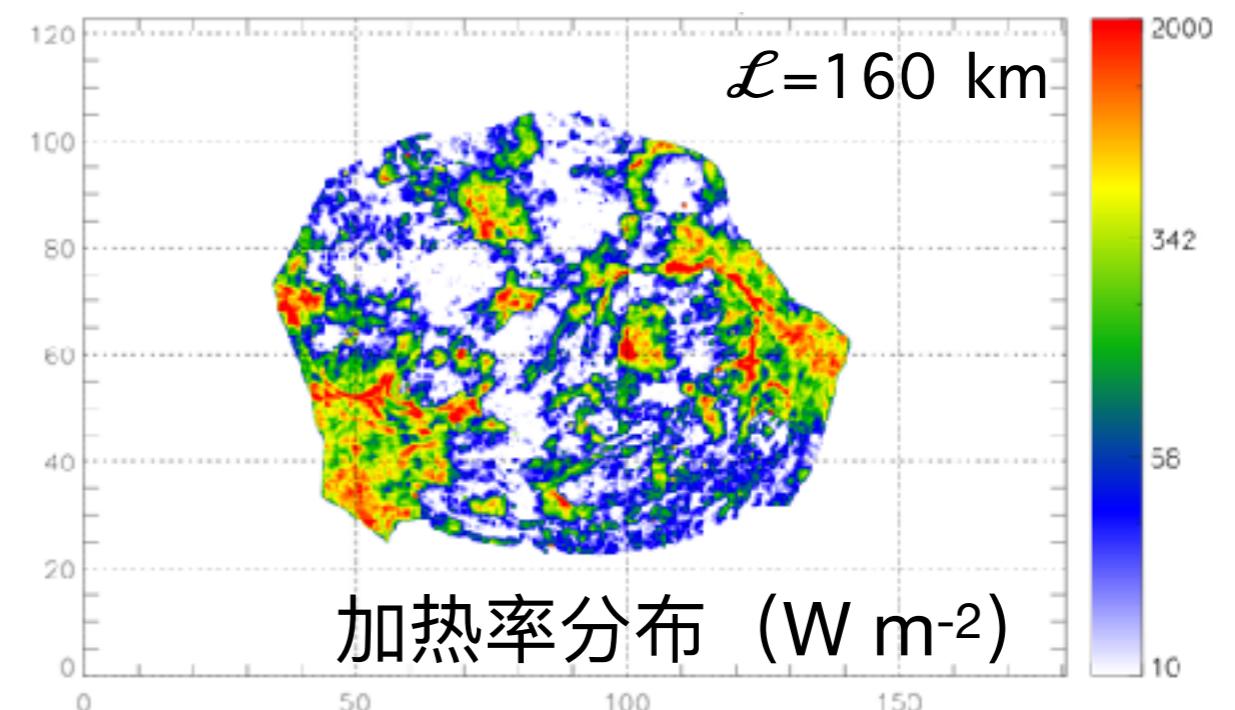
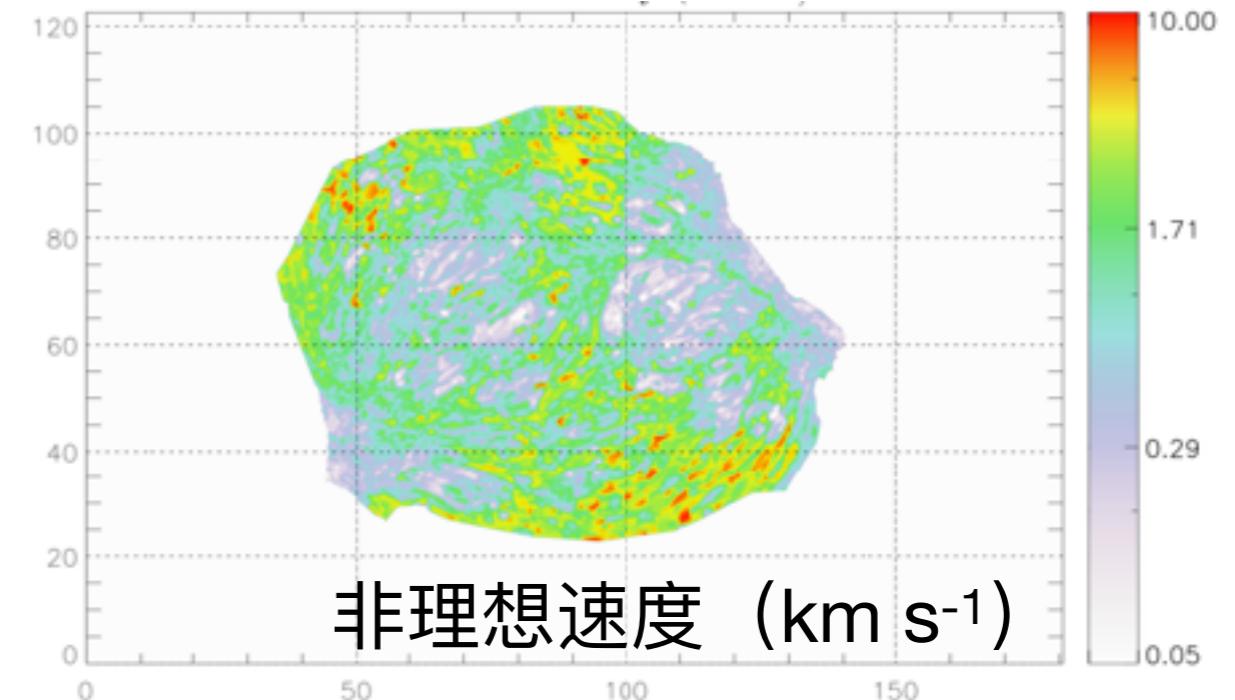
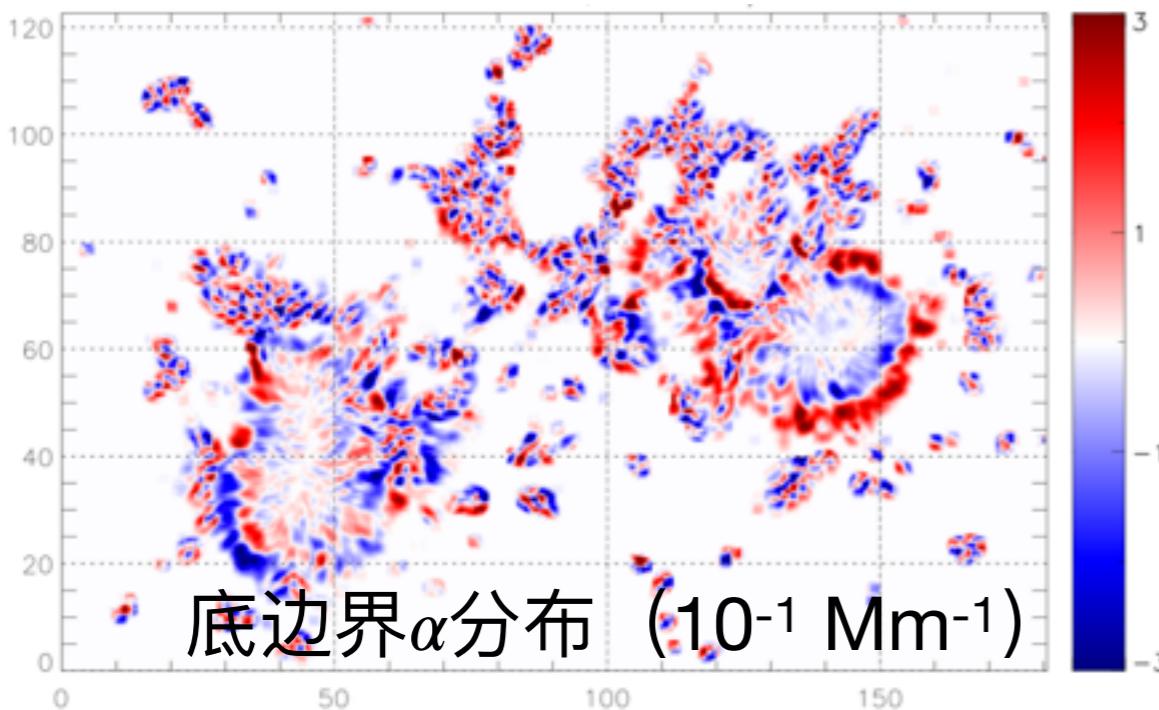


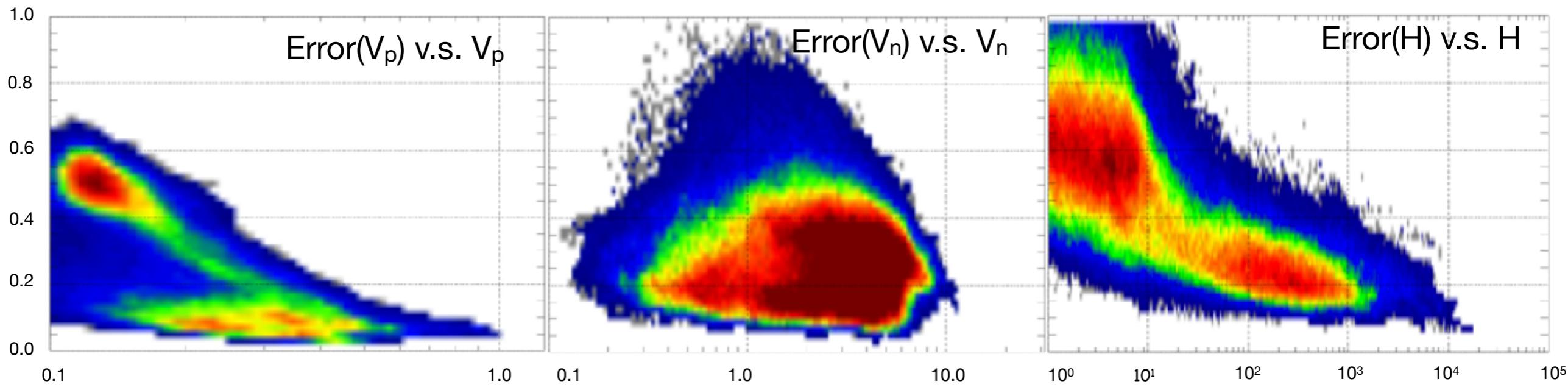
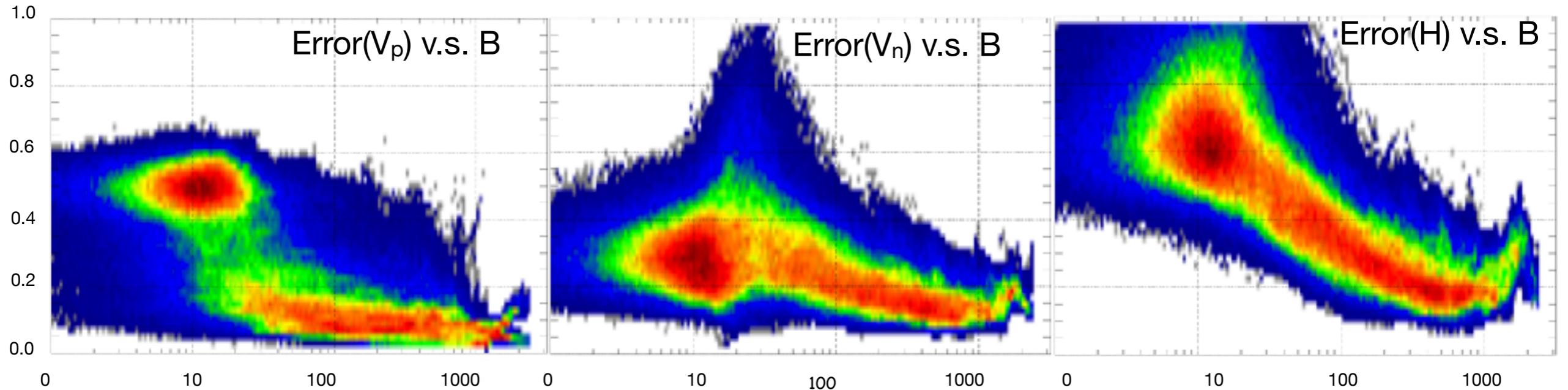
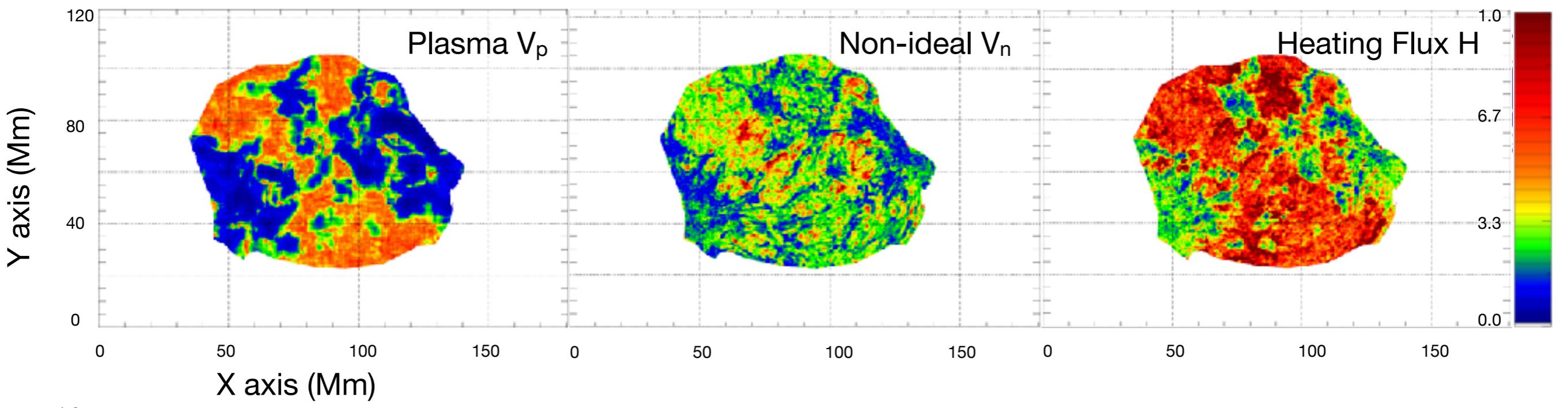
# 加热过程：非理想运动与加热率分布



$$V_s = \frac{|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}'_1|}{\delta t}$$

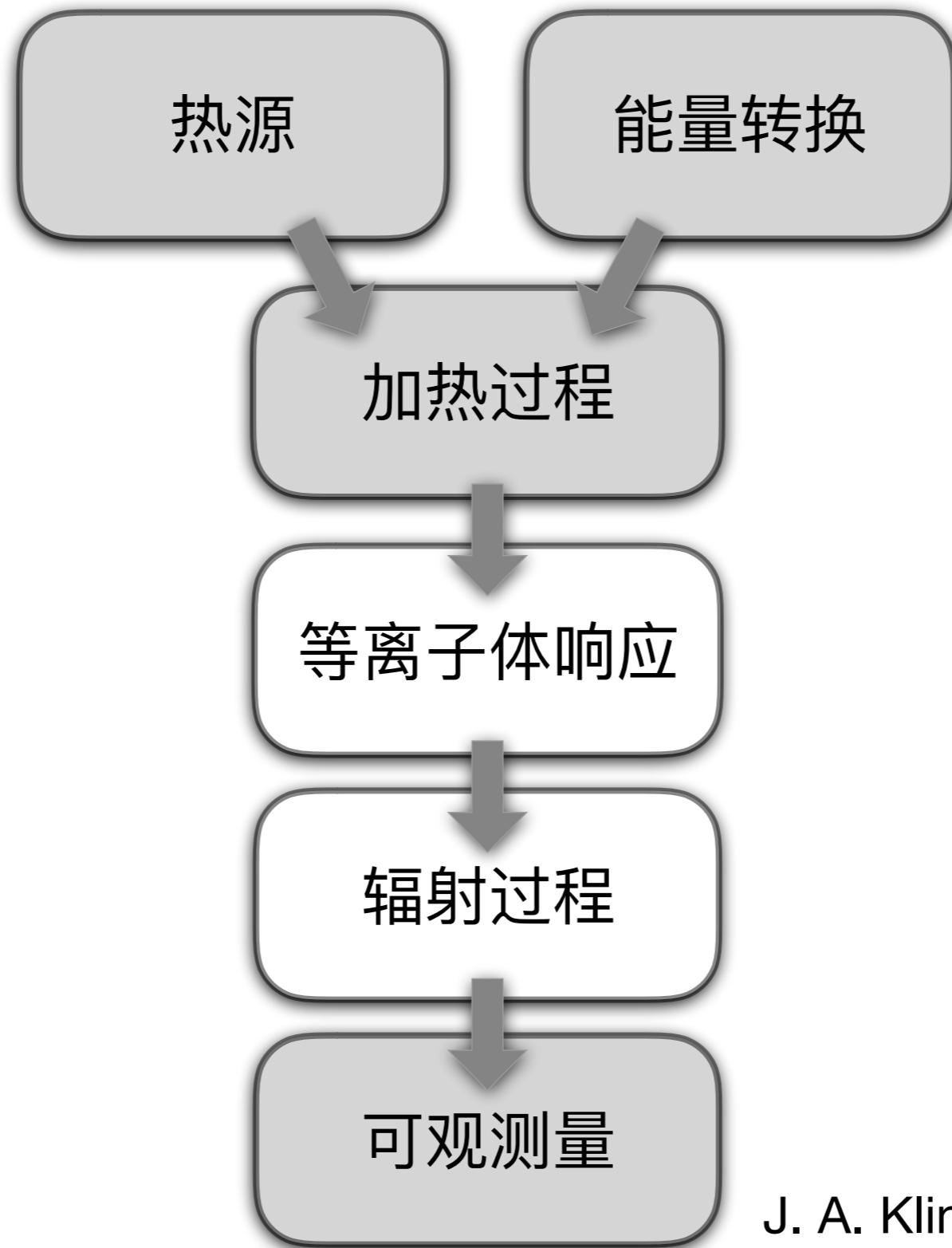
$$P = \frac{\sum_i P_i}{A} = \frac{1}{\mu_0} \alpha \mathcal{L} V_s \bar{B}^2$$





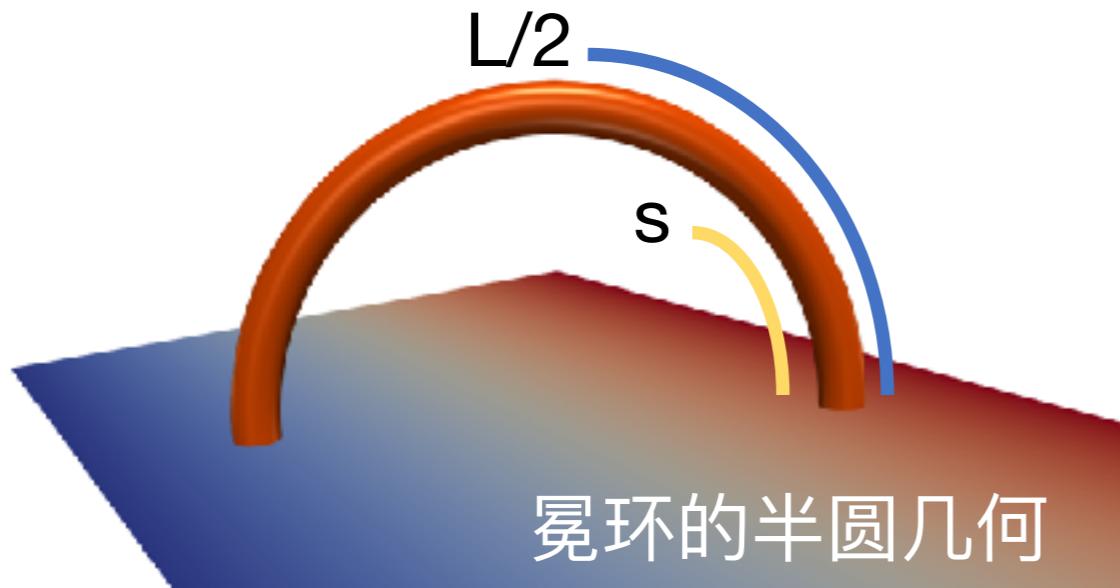


# 磁拓扑改变与日冕加热的研究



J. A. Klimchuk (2006)

# 光学薄的流体静力学日冕



热传导

$$\frac{d}{ds} \left( \kappa_0 T^{5/2} \frac{dT}{ds} \right) - \frac{p_0^2}{4k_B^2} \frac{\Lambda(T)}{T^2} + h = 0$$

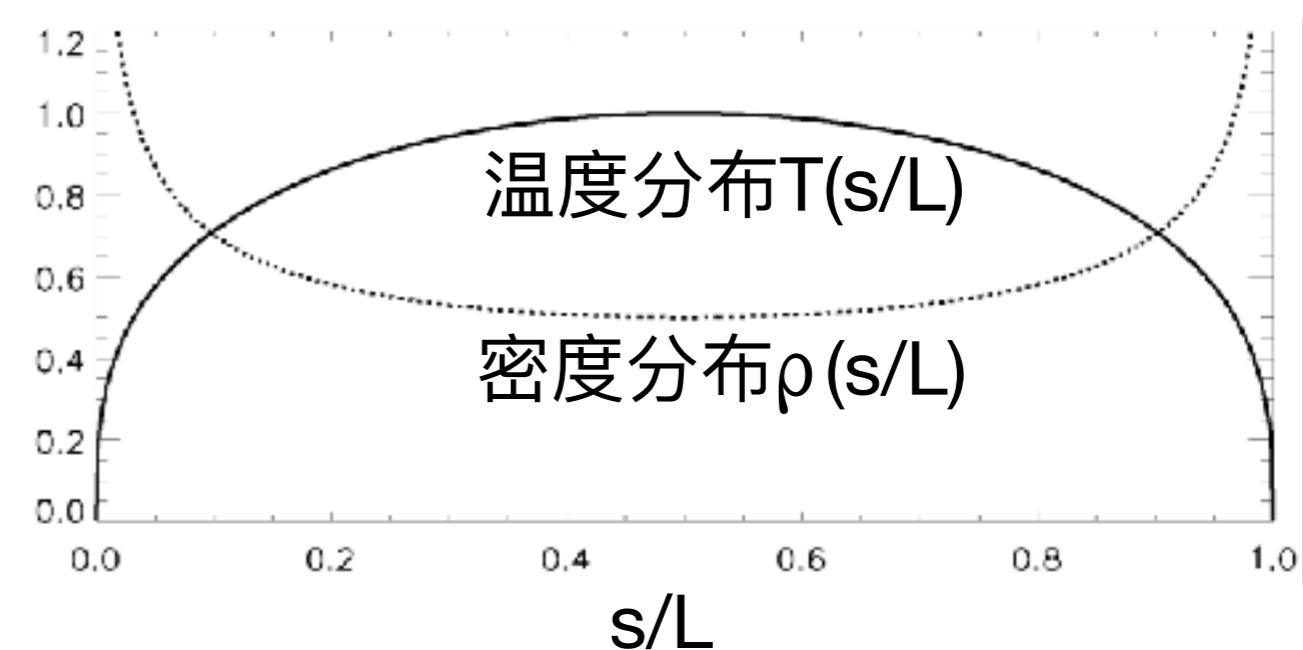
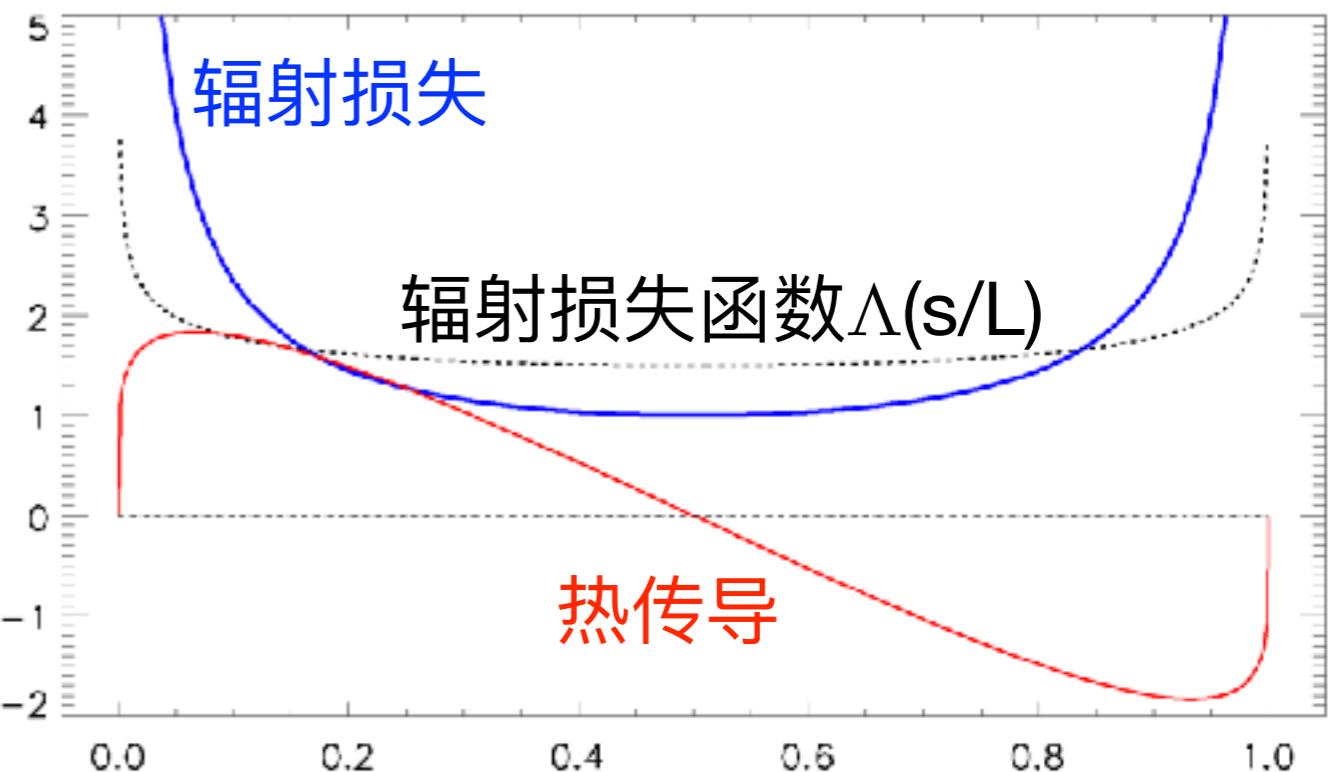
$$\Lambda(T) = \Lambda_0 T^{-1/2}$$

$$T_{max} \sim h^{2/7} L^{4/7}$$

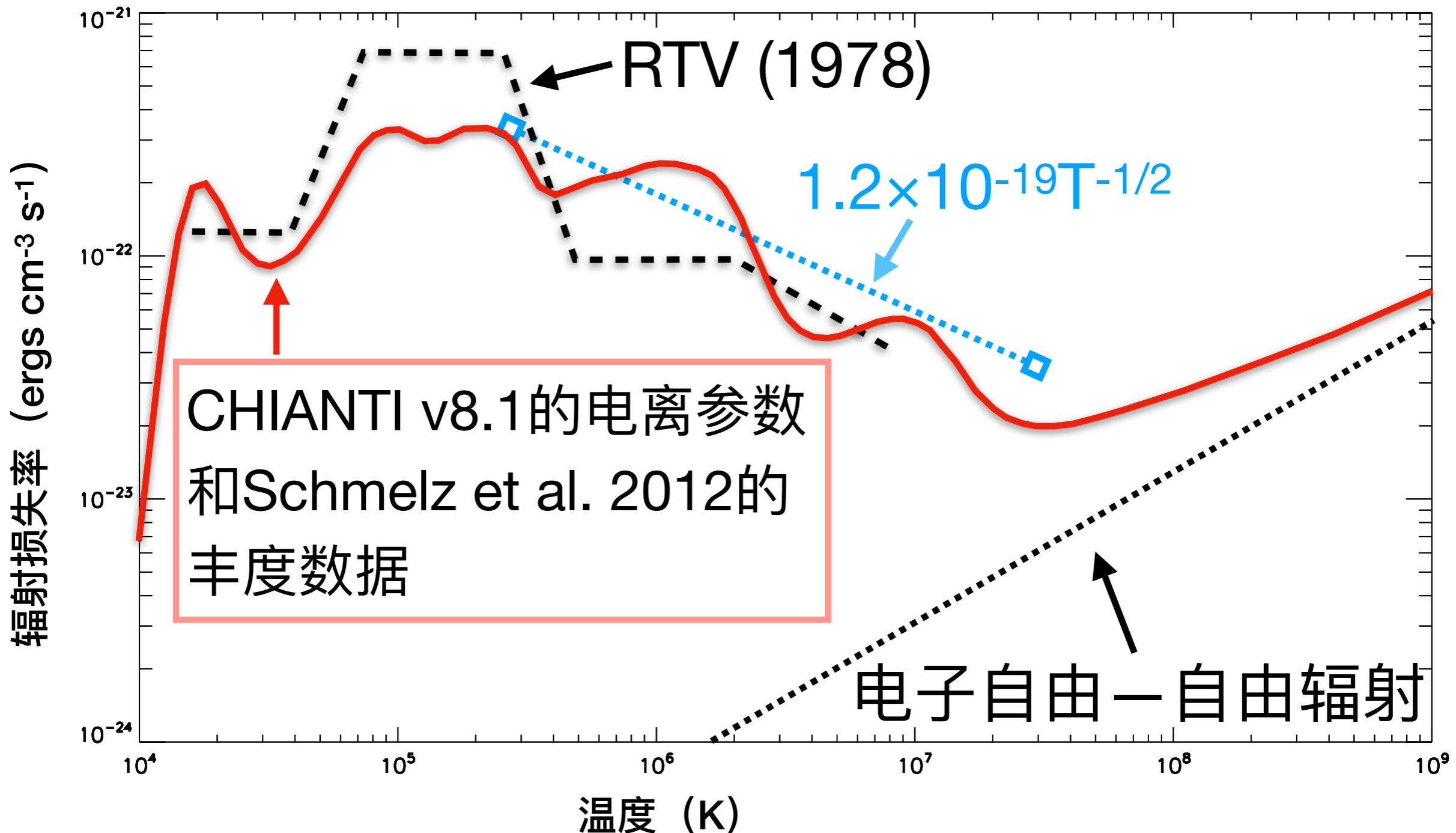
$$p_0 \sim h^{6/7} L^{5/7}$$

$$T(s) \sim T_{max} \sqrt[3]{4(s/L)(1-s/L)}$$

Rosner, Tucker & Vaiana (1978)

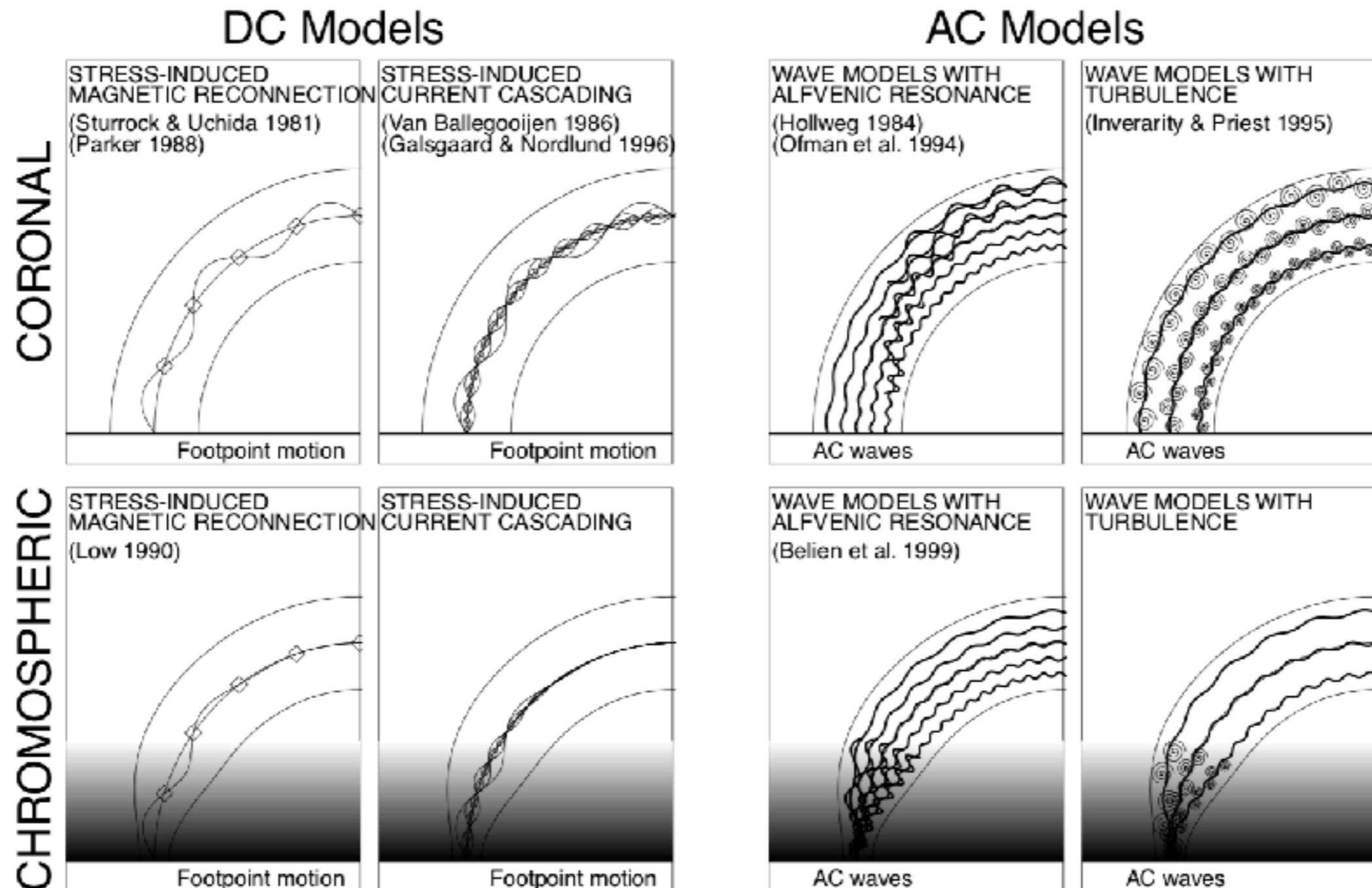


# 辐射损失函数

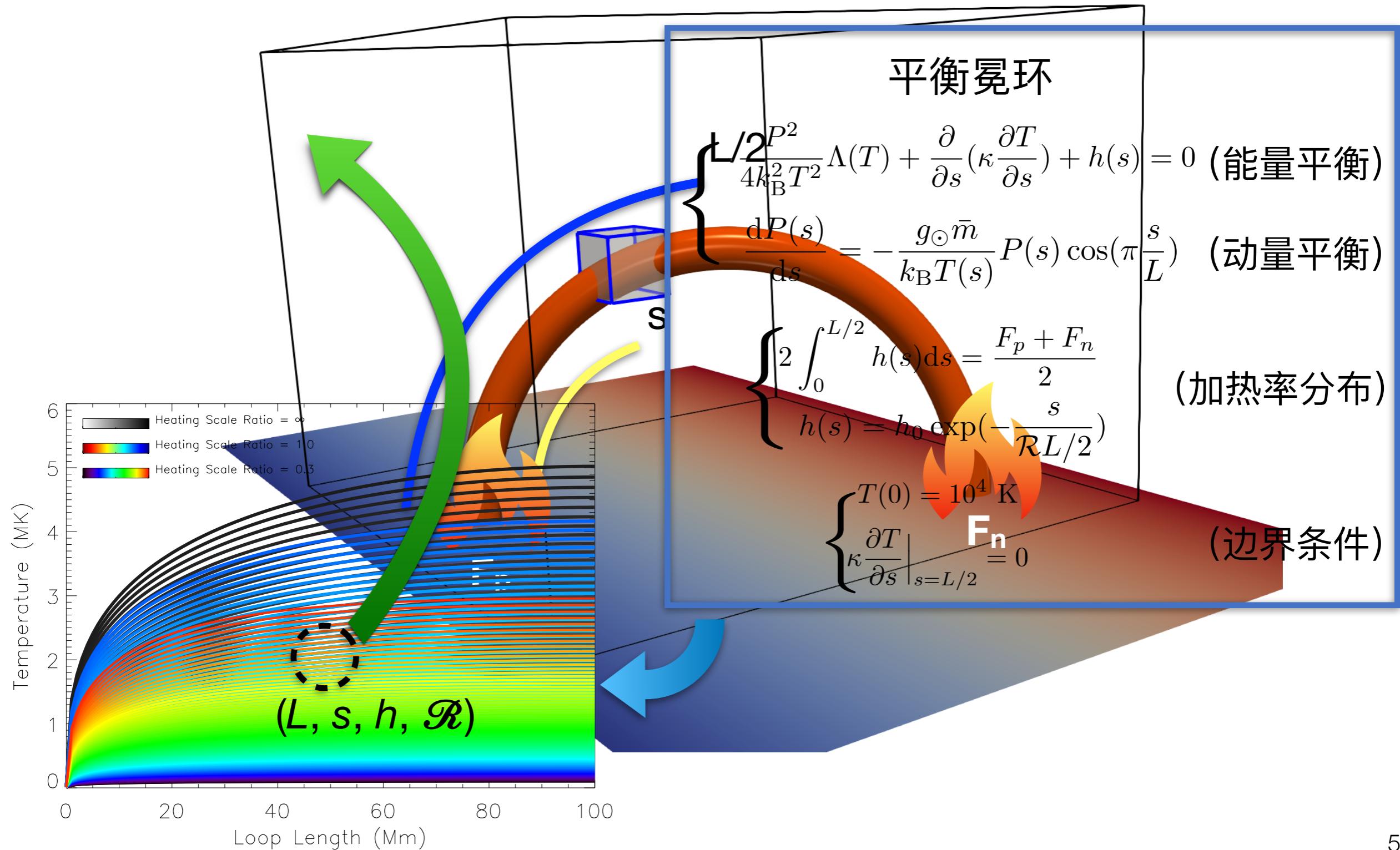


# 加热函数的空间分布

- 无论是哪种模型，从观测对比的角度上来看，加热都应该是集中于冕环的足部。

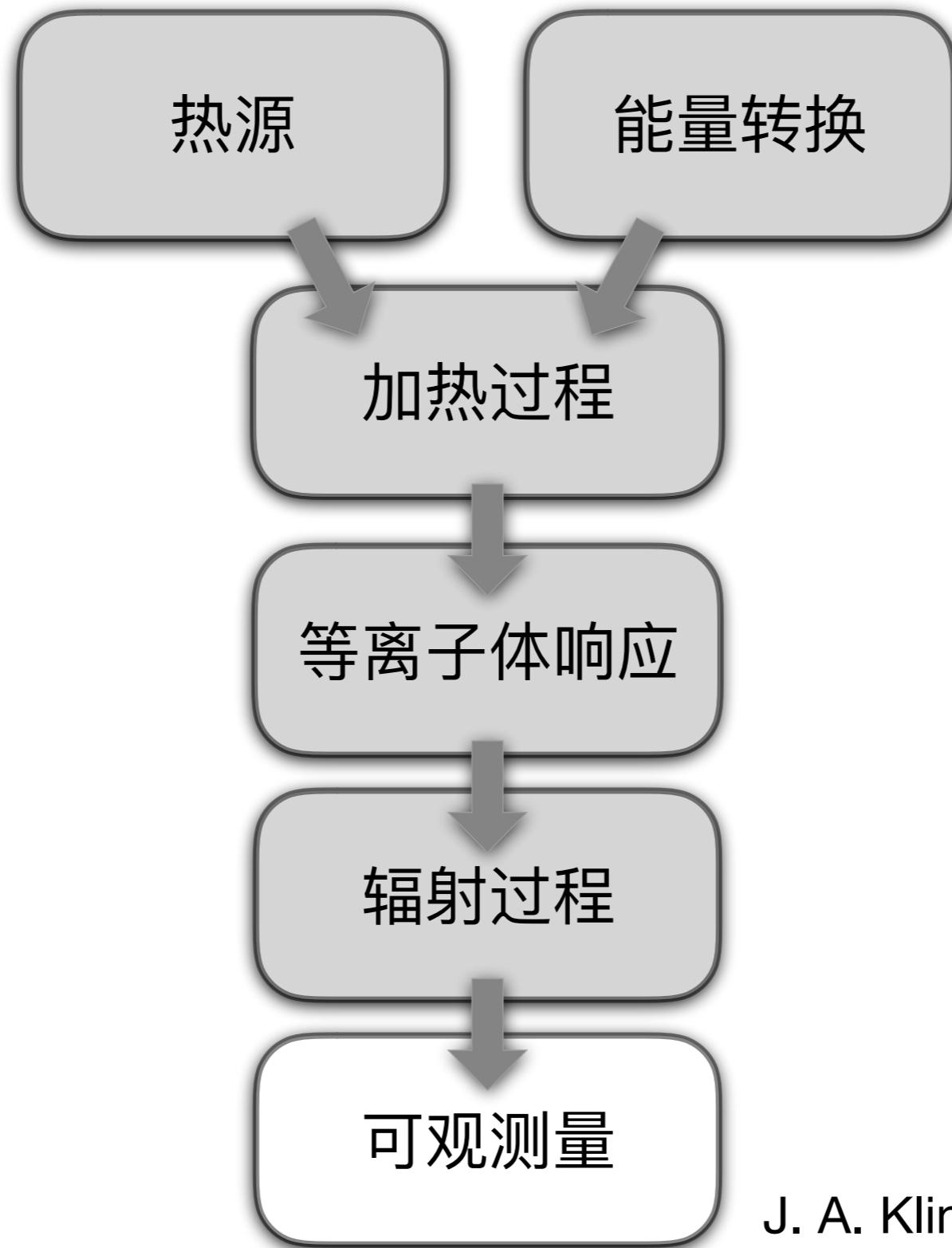


# 等离子体对加热函数的响应



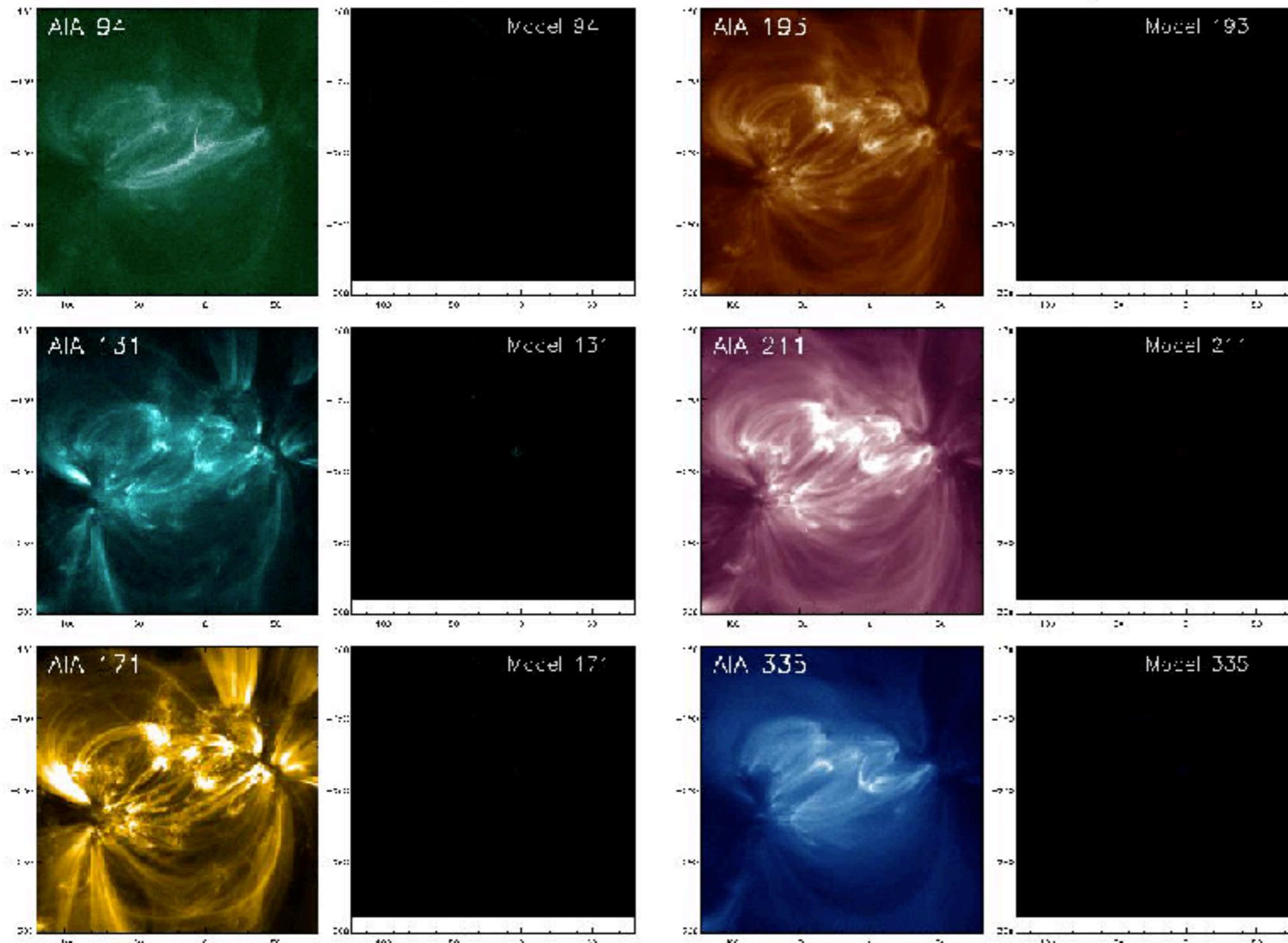


# 磁拓扑改变与日冕加热的研究



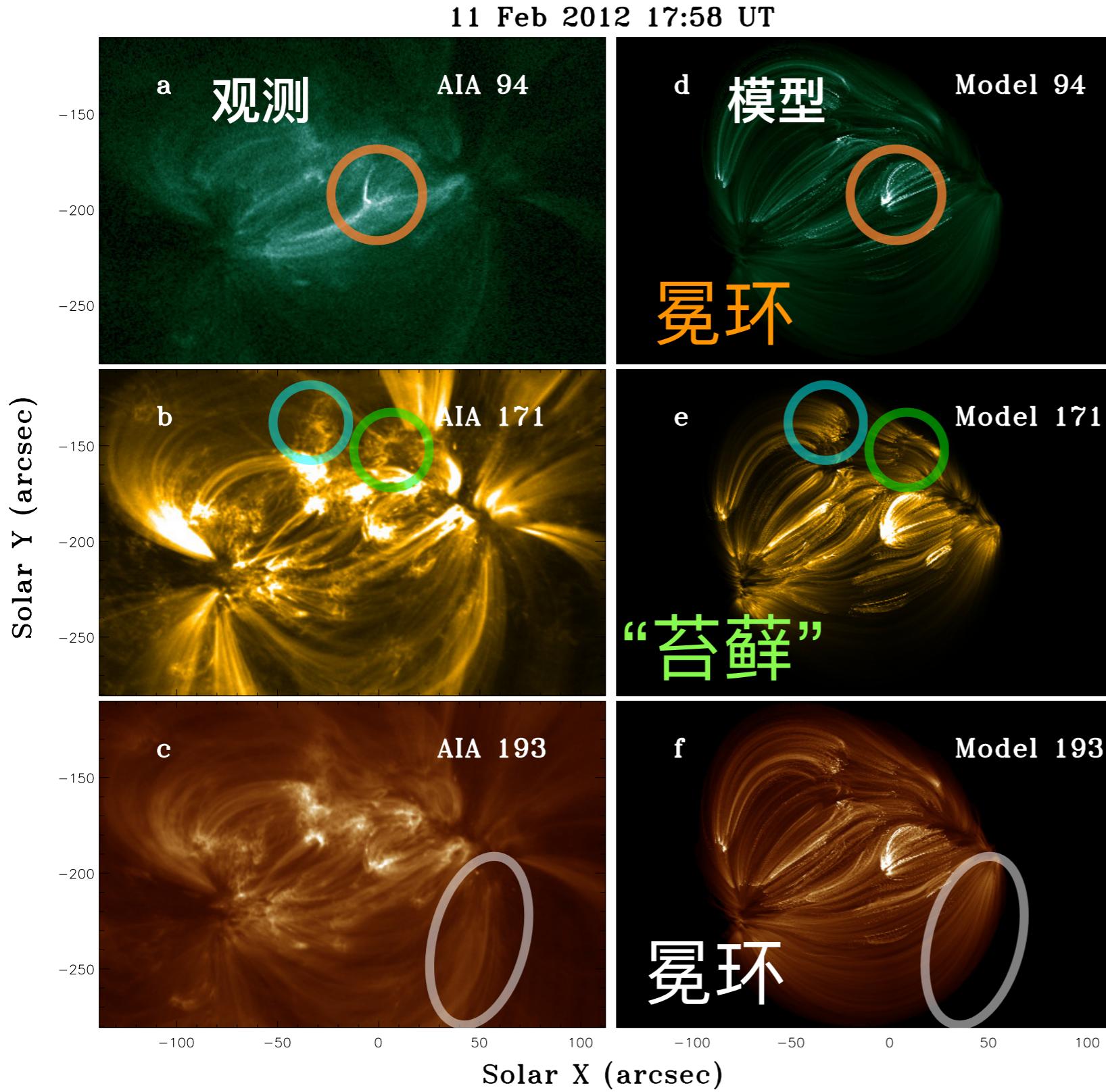
J. A. Klimchuk (2006)

# 可观测量：极紫外观测与模型对比



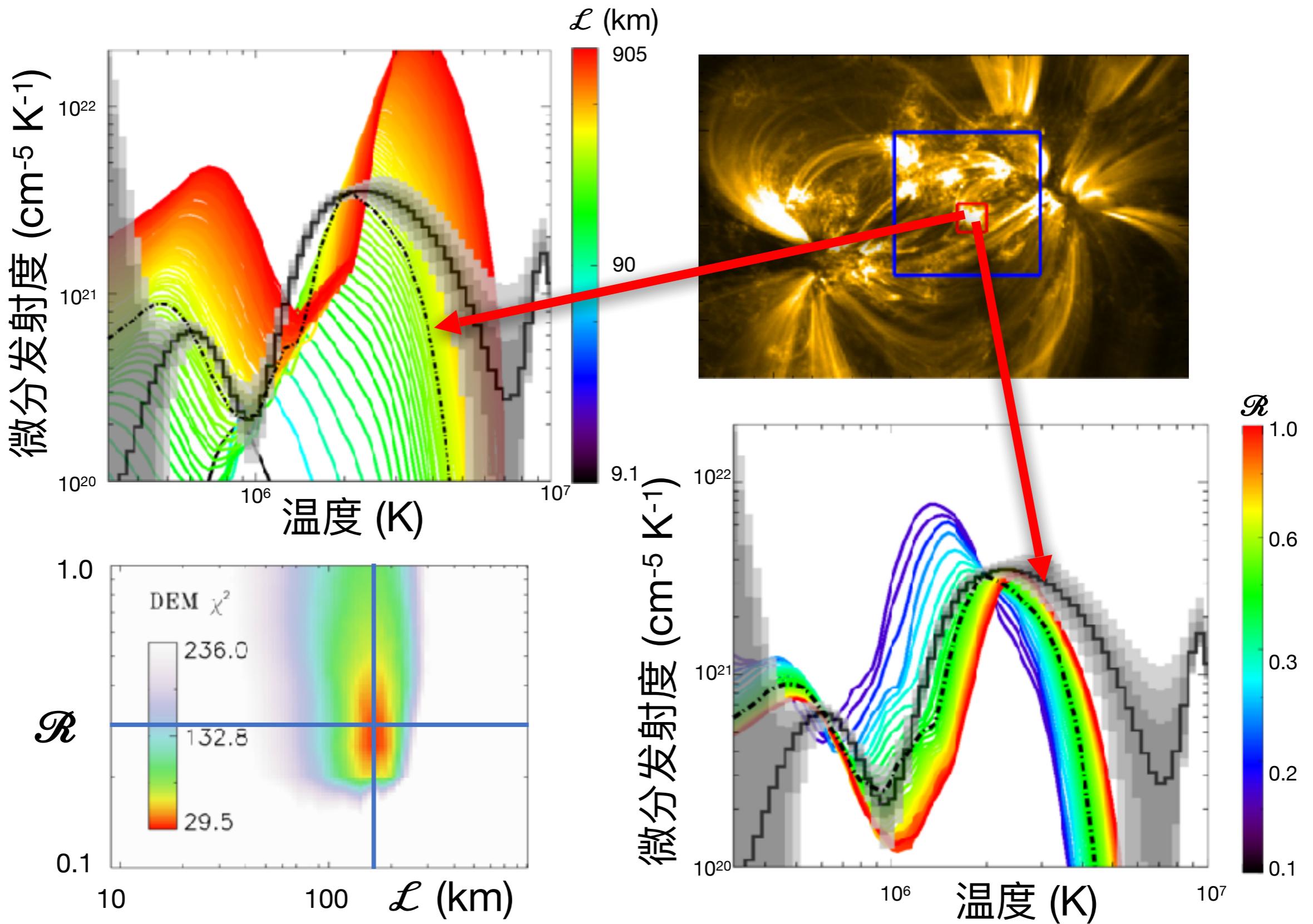
随着参数  
 $\mathcal{L}$ 增加而  
变化的合  
成极紫外  
图像。

# 可观测量：极紫外观测与模型对比



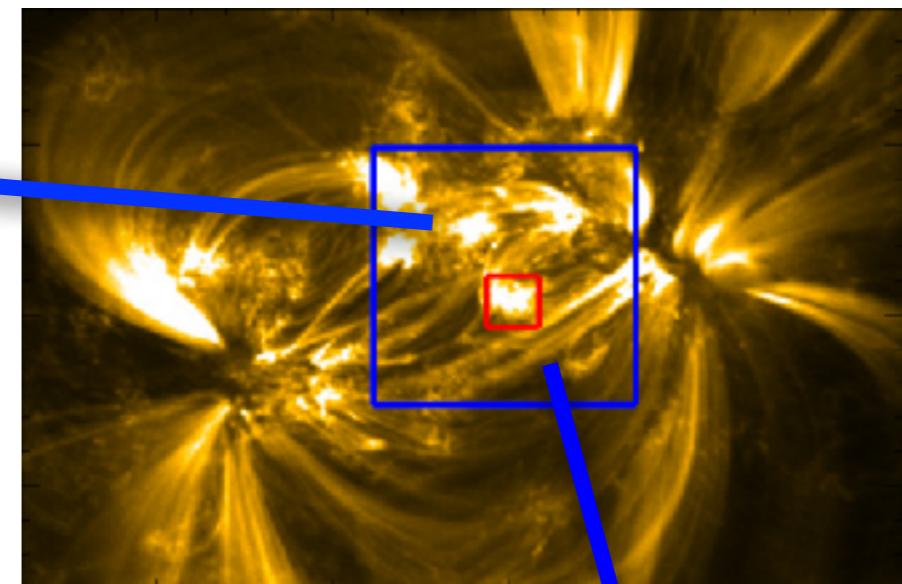
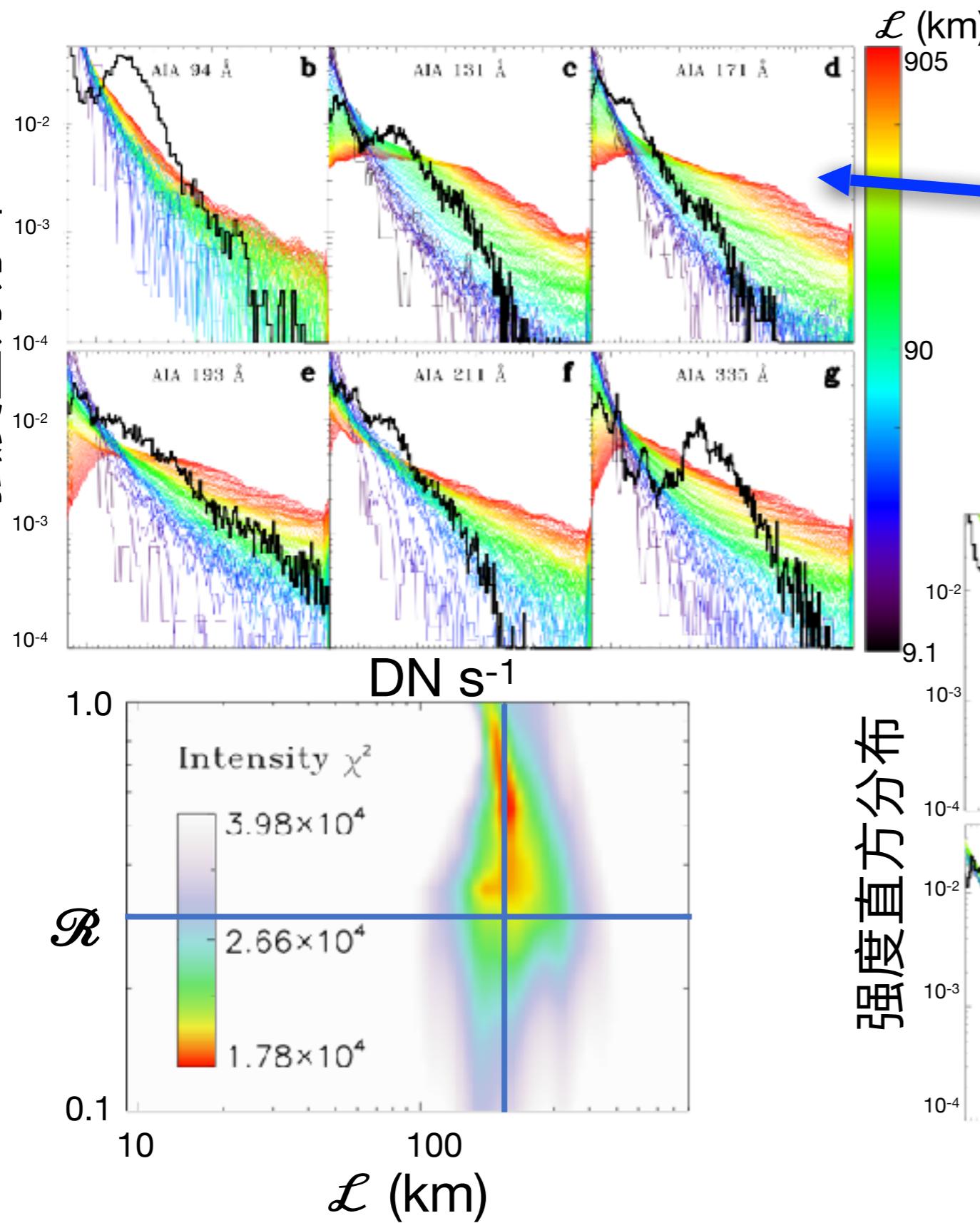
在最优化拟合参数  
 $(\mathcal{L}=160 \text{ km}, \mathcal{R}=0.3)$   
 下的极紫外合成图像。

# 可观测量：模型与观测微分发射度的对比

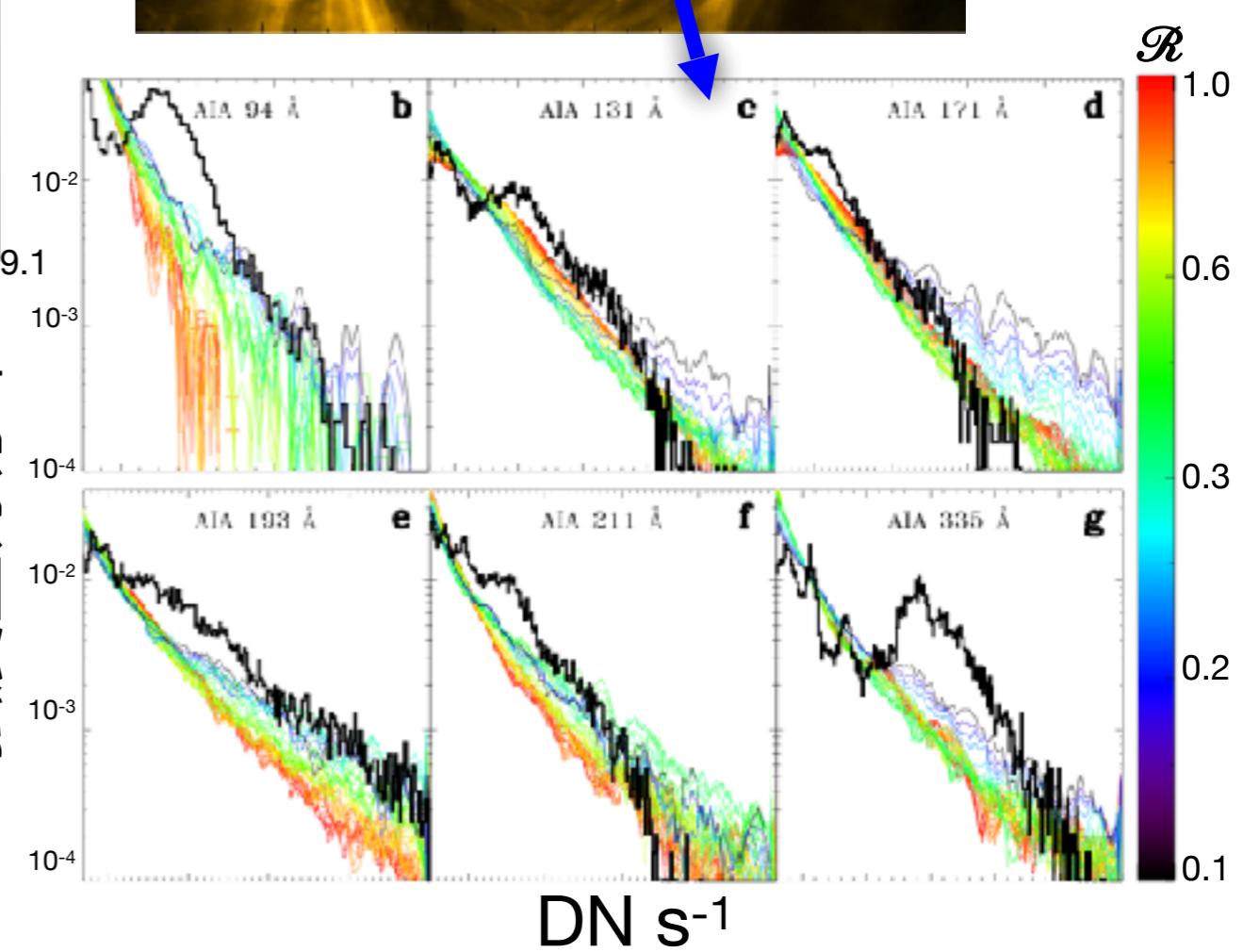


# 可观测量：模型与观测辐射强度的对比

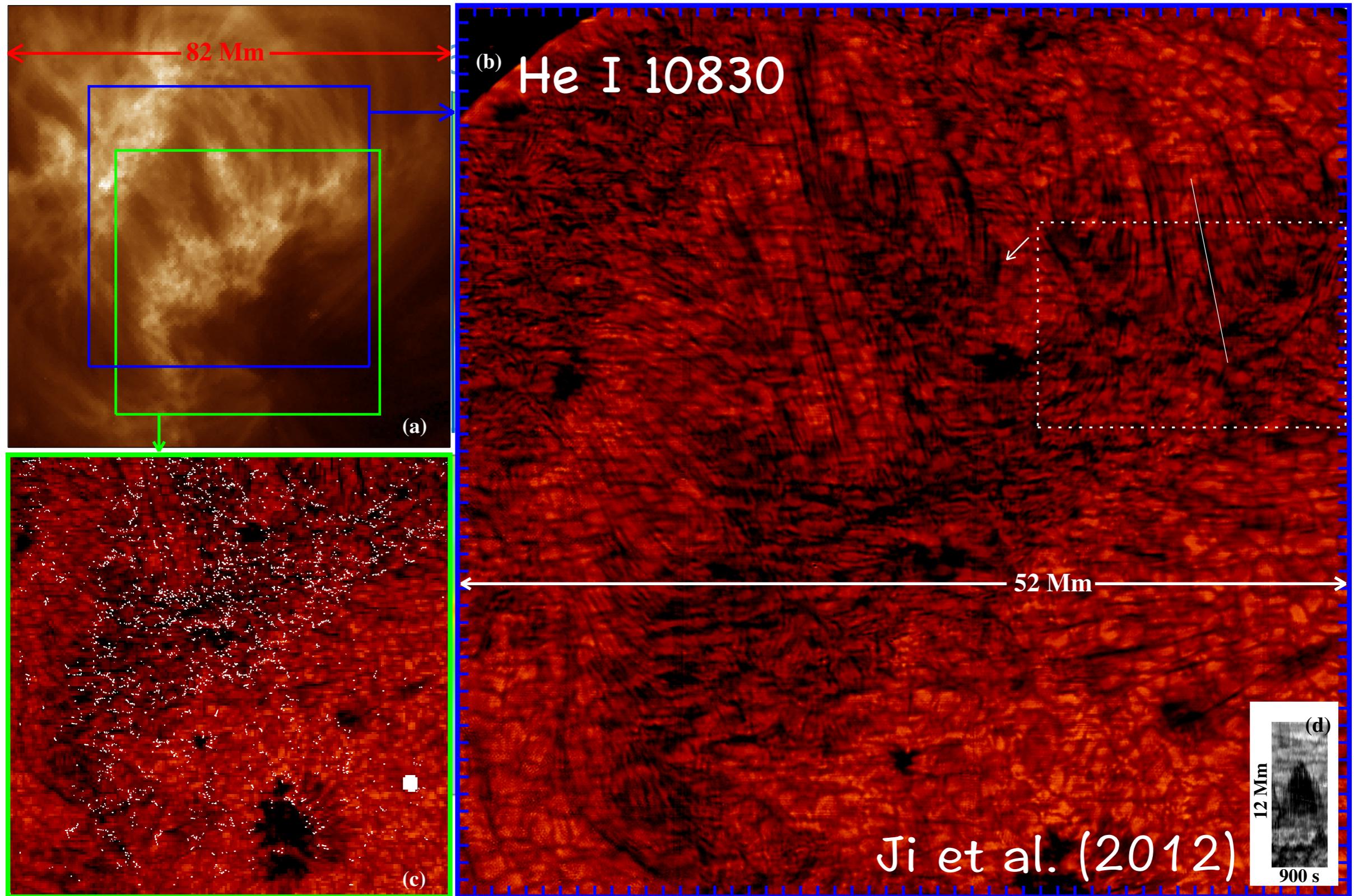
强度直方分布



强度直方分布



# 参数空间中的 $\chi^2$ 分布





# 小结

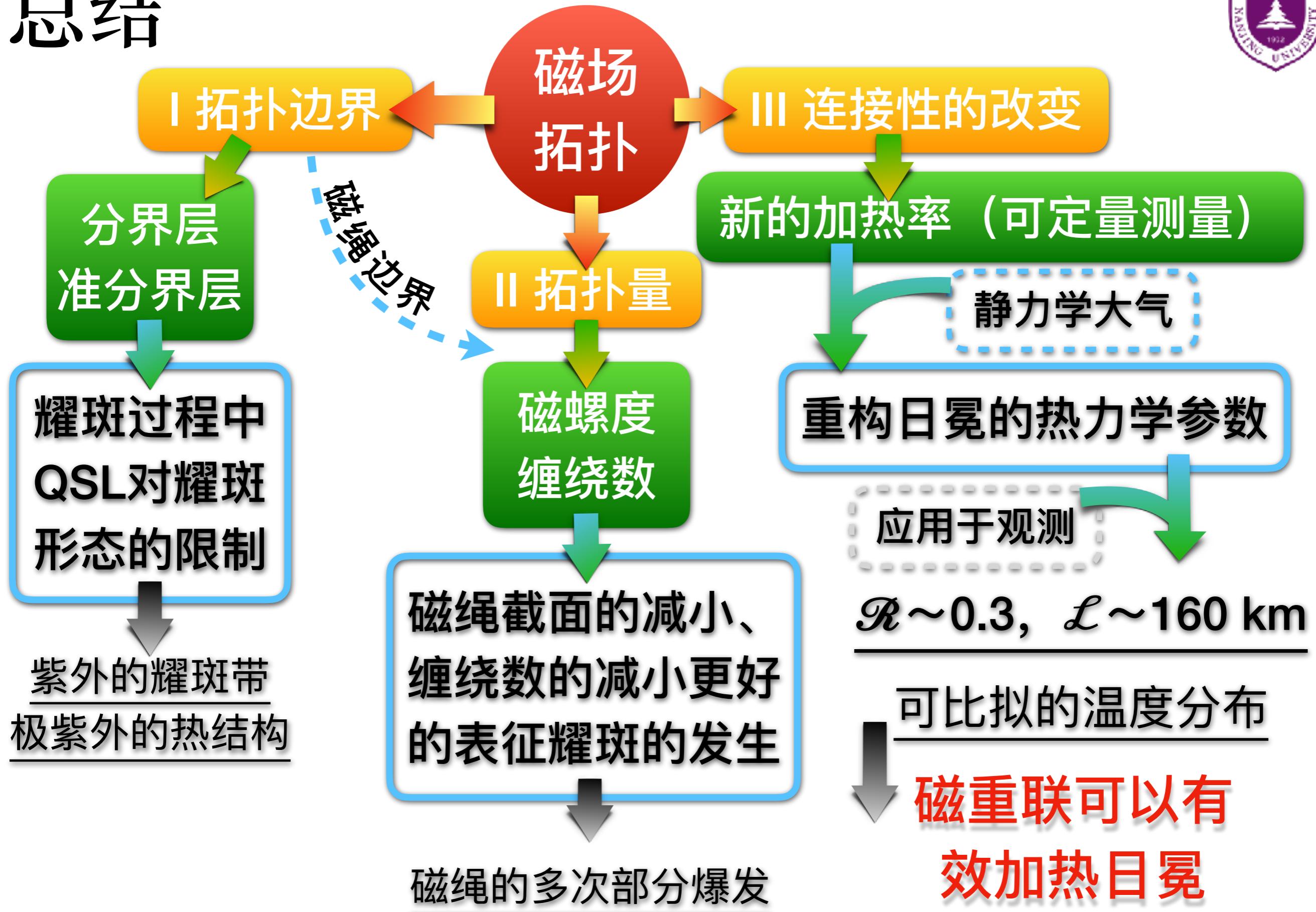
- 我们的模型中给出了一个新的日冕加热函数，它可以利用观测值作为输入参数，并避免使用人为的高电阻假设。
- 新的加热率表达式+流体静力学模型，可以很好的重构出日冕的结构。
- 重联磁流管横截面尺度约为160 km。
- 磁重联是一种日冕加热的合理机制。



# 提纲

- 简介
- 磁场拓扑分界层与爆发性事件的研究
- 磁场拓扑量与爆发性事件的研究
- 磁场连接性改变与日冕加热的研究
- 总结与展望

# 总结



# 展望



太阳  
爆发

日冕  
加热

新的磁拓扑参数

磁场可加自螺度

磁场相对缠绕数

磁场映射不动点

{ 对解析和模拟磁场的测试

应用到观测的日冕结构中

与旧有的物理量（拓扑量）比较，  
寻找不动点在MHD中的物理意义

对更多活动区、  
磁场方法和流场反  
演方法进行检验

结合谱线观测，对  
日冕温度结构限制

利用更好的大气模型对我  
们的加热函数进行响应

可能的话，与波动加  
热进行定量的对比

谢谢！



谢谢！