

# Stokes 光谱反演技术及针对 SDO/HMI 数据的应用

滕飞

怀柔太阳观测基地

May 10, 2011

- 1 Stokes 参量的辐射转移理论简介
- 2 针对 SDO/HMI 的磁场反演算法
- 3 针对 SDO/HMI 实测数据的反演计算结果
- 4 总结

- 1 Stokes 参量的辐射转移理论简介
- 2 针对 SDO/HMI 的磁场反演算法
- 3 针对 SDO/HMI 实测数据的反演计算结果
- 4 总结

# 理论基础: 辐射转移方程

首先给出描述 Stokes 参量随光深变化的辐射转移方程.

$$\begin{aligned}\mu \frac{dI}{d\tau} &= \eta_0 (I - B_T) + \eta_I (I - S) + \eta_Q Q + \eta_U U + \eta_V V \\ \mu \frac{dQ}{d\tau} &= \eta_Q (I - S) + (\eta_0 + \eta_I) Q + \rho_V U - \rho_U V \\ \mu \frac{dU}{d\tau} &= \eta_U (I - S) - \rho_V Q + (\eta_0 + \eta_I) U + \rho_Q V \\ \mu \frac{dV}{d\tau} &= \eta_V (I - S) + \rho_U Q - \rho_Q U + (\eta_0 + \eta_I) V\end{aligned}$$

# 各参数含义

其中,

- $\mu = \cos \gamma$ ,  $\gamma$  为视线方向与太阳表面法线方向的夹角.
- $\tau$  为对应参考波长  $\lambda_m$  (通常取  $5000\text{\AA}$ ) 的光学深度.
- $\eta_0 = \frac{k_{\lambda_0}^{(c)}}{k_{\lambda_m}^{(c)}}$  为谱线线心波长与参考波长的连续吸收系数之比.
- $B_T$  为 Planck 函数, 仅与温度  $T$  有关.
- $S$ , 对于局部热动平衡情形, 取  $S = B_T$ .

# 各参数含义

吸收系数

而  $\eta$  与  $\rho$  满足

$$\eta_I = \frac{1}{2} \left( \eta_p \sin^2 \psi + \frac{1}{2} (\eta_b + \eta_r) (1 + \cos^2 \psi) \right)$$

$$\eta_Q = \frac{1}{2} \left( \eta_p - \frac{1}{2} (\eta_b + \eta_r) \right) \sin^2 \psi \cos 2\phi$$

$$\eta_U = \frac{1}{2} \left( \eta_p - \frac{1}{2} (\eta_b + \eta_r) \right) \sin^2 \psi \sin 2\phi$$

$$\eta_V = \frac{1}{2} (\eta_r - \eta_b) \cos \psi$$

$$\rho_Q = \frac{1}{2} \left( \rho_p - \frac{1}{2} (\rho_b + \rho_r) \right) \sin^2 \psi \cos 2\phi$$

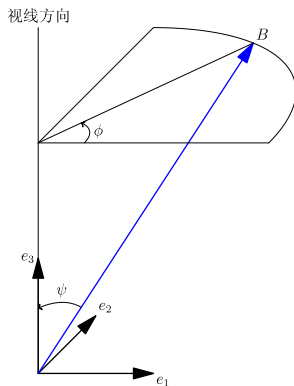
$$\rho_U = \frac{1}{2} \left( \rho_p - \frac{1}{2} (\rho_b + \rho_r) \right) \sin^2 \psi \sin 2\phi$$

$$\rho_V = \frac{1}{2} (\rho_r - \rho_b) \cos \psi$$

# 各参数含义

## 磁场方向

其中  $\psi$  与  $\phi$  用于描述磁场方向, 如下图.



# 各参数含义

吸收系数

$\eta_p, \eta_b, \eta_r, \rho_p, \rho_b, \rho_r$  满足

$$\eta_p = C \sum_M S_M^{(2)} H(a, \nu - \nu_M^2)$$

$$\eta_b = C \sum_M S_M^{(1)} H(a, \nu - \nu_M^1)$$

$$\eta_r = C \sum_M S_M^{(3)} H(a, \nu - \nu_M^3)$$

$$\rho_p = 2C \sum_M S_M^{(2)} F(a, \nu - \nu_M^2)$$

$$\rho_b = 2C \sum_M S_M^{(1)} F(a, \nu - \nu_M^1)$$

$$\rho_r = 2C \sum_M S_M^{(3)} F(a, \nu - \nu_M^3)$$



# 各参数含义

吸收系数

其中,  $M$  为磁量子数,  $H$  与  $F$  分别为 Voigt 和 Faraday-Voigt 函数, 即

$$H(a, \nu) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2}}{(\nu - y)^2 + a^2} dy$$
$$F(a, \nu) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2} (\nu - y)}{(\nu - y)^2 + a^2} dy$$

而

$$\nu = \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_D}$$

为观测波长位置  $\lambda$  距谱线线心  $\lambda_0$  的距离与 Doppler 宽度

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{c} \left( \xi^2 + \frac{2kT}{M_a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

的比值. 其中  $c$  为光速,  $k$  为 Boltzmann 常数.  $\xi$  为微湍动速度,  $M_a$  为形成吸收线的原子质量.

# 各参数含义

吸收系数

此处,

$$a = \frac{\Gamma \lambda_0^2}{4\pi c \Delta_D}$$

而  $\Gamma$  为阻尼常数. 另外,  $C$  可按

$$C = \frac{\pi e^2}{mc} g f \frac{\lambda_0^2 \beta_l N}{\sqrt{\pi} c \Delta \lambda_D k_{\lambda_m}^{(c)}} \left( 1 - e^{-\frac{c_1}{\lambda_0 T}} \right)$$

进行计算, 其中  $c_1$  为第一辐射常数,  $g$  为吸收线对应原子的低能级的简并度,  $f$  为吸收线的振子强度.  $N$  为对应低能级原子的数密度,  $e$  和  $m$  分别为电子的电量和质量.

# 各参数含义

吸收系数

最后, 强度因子  $S_M^{(i)}$  及 Zeeman 分裂距离  $\nu_M^{(i)}$  可按

	$\Delta J = -1$	$\Delta J = 0$	$\Delta J = 1$
$S_M^{(1)}$	$(J - M)(J - M - 1)$	$(J - M)(J + M + 1)$	$(J + M + 1)(J + M + 2)$
$S_M^{(2)}$	$J^2 - M^2$	$M^2$	$(J + 1)^2 - M^2$
$S_M^{(3)}$	$(J - M)(J + M - 1)$	$(J + M)(J - M + 1)$	$(J + M + 1)(J - M + 2)$

及

$$\nu_M^{(i)} = \frac{e\lambda_0^2 B}{4\pi mc^2 \Delta\lambda_D} ((G - G') M - G' (2 - i))$$

取值. 其中,  $B$  为磁场强度.  $J$  为原子低能级的合成量子数,  $\Delta J$  为原子跃迁时合成量子数  $J$  的增量.  $G$  和  $G'$  分别为低能级和高能级的 Landi 因子.

# 连续吸收系数与阻尼因子

连续吸收系数  $k_{\lambda}^{(c)}$  与阻尼因子  $\Gamma$  的计算依赖于温度, 电子密度, 氢原子, 离子, 分子以及氦分子的密度, 这些参数加上之前的磁场  $(B, \psi, \phi)$  及微湍动速度, 均可以是光深  $\tau$  的函数. 它们共同构成了对太阳大气模型参数化描述.

## 计算区域与初始条件

根据上述理论, 一旦给定足够的大气模型参数, 便能够通过求解辐射转移方程, 得到 Stokes 参数随波长变化的曲线, 即 Stokes 参数轮廓. 具体的, 本文采用的计算区域为  $\log \tau \in [-9.37, 3.16]$ . 在  $\tau > \tau_{\max}$  处, 假设  $\eta, \rho$  均为常数, 且  $B_T$  随  $\tau$  呈线性变化, 可以得到在  $\tau = \tau_{\max}$  处的如下初始条件

$$\begin{aligned} I(\tau_{\max}) &= B_T(\tau_{\max}) + \mu B'_T(\tau_{\max}) D^{-1} [\eta'_I (\eta_I'^2 + \rho_Q^2 + \rho_U^2 + \rho_V^2)] \\ Q(\tau_{\max}) &= -\mu B'_T(\tau_{\max}) D^{-1} [\eta_Q \eta_I'^2 + \eta'_I (\eta_V \rho_U - \eta_U \rho_V) + \rho_Q A] \\ U(\tau_{\max}) &= -\mu B'_T(\tau_{\max}) D^{-1} [\eta_U \eta_I'^2 + \eta'_I (\eta_Q \rho_V - \eta_V \rho_Q) + \rho_U A] \\ V(\tau_{\max}) &= -\mu B'_T(\tau_{\max}) D^{-1} [\eta_V \eta_I'^2 + \rho_V A]. \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} D &= \eta_I'^2 (\eta_I'^2 - \eta_Q^2 - \eta_U^2 - \eta_V^2 + \rho_Q^2 + \rho_U^2 + \rho_V^2) - A^2 \\ \eta'_I &= \eta_0 + \eta_I \\ A &= \eta_Q \rho_Q + \eta_U \rho_U + \eta_V \rho_V \end{aligned}$$

# 人工合成 Stokes 参数轮廓

从上述初始条件出发, 沿光深数值求解 Stokes 辐射转移方程, 最终得到在  $\tau = \tau_{\min}$  处对应于任意波长  $\lambda$  的  $I, Q, U, V$ , 即得到了人工合成的 Stokes 参数轮廓.

## 进一步调整

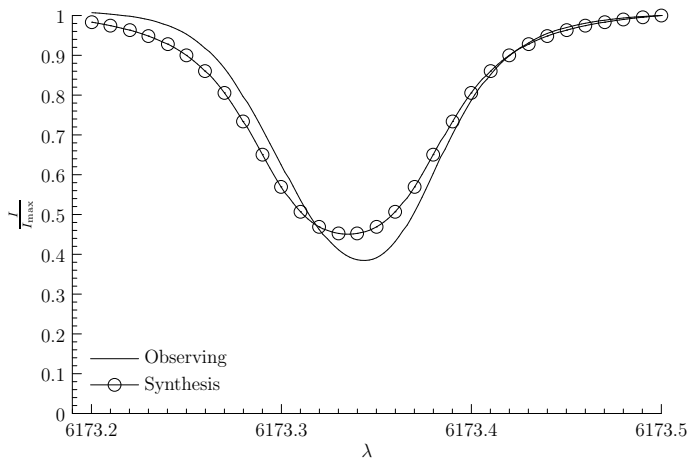
以下算例均针对 SDO/HMI 所采用的谱线 Fe I 6173.335 Å. 为了使合成的轮廓更符合观测, 针对无磁场情形, 采用 BASS2000 的轮廓做比对, 进一步调整方程中求解辐射阻尼系数所用到的参数  $Z$  和振子强度  $f$ , 得到

$$Z = 30$$

$$f = 4.19 \times 10^{-4}$$

## 进一步调整

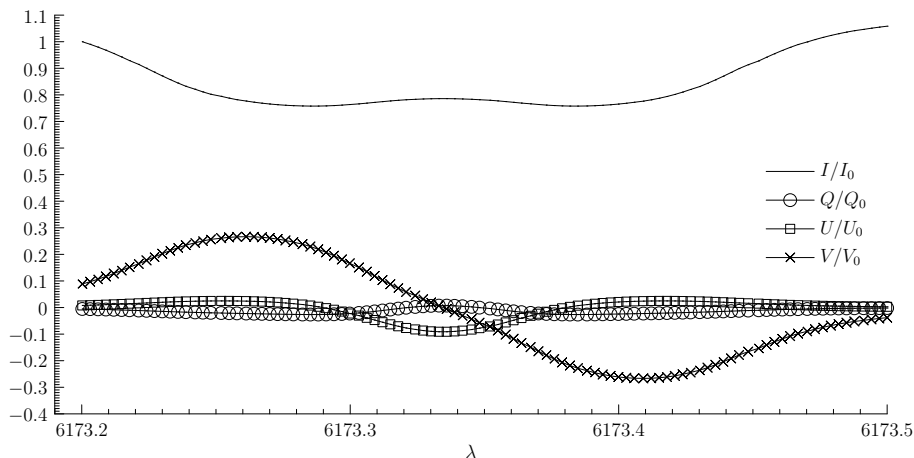
下图展示了合成的无磁场 I 轮廓与 BASS2000 观测结果的对比。





# 人工合成 Stokes 参数轮廓

下面给出有磁场情形的计算结果. 其中, 磁场取为  $B = 1000$ ,  $\psi = \frac{\pi}{6}$ ,  $\phi = \frac{\pi}{3}$ , 其余大气模型参数使用 Allen 提供的数据.



# 一种简化模型

另外, 考虑到计算效率的需要, 可以将针对初始条件给出的假设扩大到区域  $[\tau_{\min}, +\infty]$  上, 从而直接利用初始条件的公式 (将  $\tau_{\max}$  改为  $\tau_{\min}$ ) 给出  $\tau = \tau_{\min}$  处的解. 此时必须假定所有吸收系数  $(\eta, \rho)$  沿光深为常数.

- 1 Stokes 参量的辐射转移理论简介
- 2 针对 SDO/HMI 的磁场反演算法
- 3 针对 SDO/HMI 实测数据的反演计算结果
- 4 总结

# 反演问题

现考虑反演问题, 即已知在波长  $\{\lambda_n\}$  处的一组 Stokes 观测量  $\{O_{\lambda_k}\}$ , 其中,  $O = I, Q, U, V, k = 1, \dots, n, n$  为可观测的波长位置个数. 欲解出大气模型中的磁场参数. 而其余大气模型参数作为已知量给出, 该问题可以看作上述人工合成问题的反问题.

## SDO/HMI 的观测波长位置

下表给出了 SDO/HMI 的观测波长位置偏离线心位置的距离. 然而, 由于线心位置会随时间空间改变, 因此无法事先确定, 需要通过反演求解.

	偏离线心位置
$\lambda_0$	+0.172Å
$\lambda_1$	+0.103Å
$\lambda_2$	+0.034Å
$\lambda_3$	-0.034Å
$\lambda_4$	-0.103Å
$\lambda_5$	-0.172Å

# 两种基本方法

有两种基本方法可以求解磁场反演问题. 它们是

- 搜索法. 即事先建立一张不同磁场参数对应不同 Stokes 参量的数据表, 再利用观测得到的 Stokes 参量到表中搜索, 找到合适的磁场.
- 迭代法. 即首先猜测一磁场参数的初始值, 而后利用某种迭代优化算法, 逐渐使得某种误差接近极小值.

两种方法各有利弊, 当然也可将两种方法结合, 即将搜索法的解作为迭代法的初值, 本文采用的就是这种方法.

# 待反演未知量

未知量个数

首先, 总计有  $4n$  个观测量, 但经过无量纲化处理, 将最右端的  $I$  值归为一后, 还有  $4n - 1$  个约束方程. 因此, 待反演未知量的个数不得超过  $4n - 1$ . 事实上,

- 待反演未知量的个数越多, 问题变得不稳定的可能性越大.
- 待反演未知量的个数越少, 最后得到的误差余量可能越大.

# 待反演未知量

与磁场无关的未知量

针对 SDO/HMI 数据,  $n = 6$ , 即最多可反演 23 个未知量.

- 数据表明, 谱线线心位置会随不同像素点产生不同程度的偏移, 因此将线心偏移量作为其中一个未知量, 计为 **Shift**, 单位为  $10^{-4}\text{\AA}$ .
- 其次, HMI 数据中的谱线深度会普遍比之前人工合成的谱线深度要浅, 这可能是没有考虑滤光器轮廓的缘故, 也可能是因为之前确定的振子强度的偏差, 还可能是由于各种散射光的影响. 因此, 考虑对所有吸收系数增加一统一的比例因子, 计为 **Scale**, 并将其作为一个未知量.  $\text{Scale} = 1$  时, 即回到第一节中的模型.



# 待反演未知量

## 与磁场相关的未知量

下面考虑与磁场相关的未知量. 目前考虑两种情形:

- 最简单的情形, 即磁场沿光深方向为常数, 三个方向共计 3 个未知量:  
 $B_x, B_y, B_z$ .
- 磁场为  $\log \tau$  的线性函数, 三个方向共计 6 个未知量:

$$B_x, B_y, B_z, \frac{dB_x}{d(\log \tau)}, \frac{dB_y}{d(\log \tau)}, \frac{dB_z}{d(\log \tau)}$$

# 搜索数据库的建立

由于每增加一个未知量, 搜索数据库就要多一个维度, 使计算量大幅增加. 因此, 我们只针对  $B_x, B_y, B_z, \text{Shift}$  四个变量建立搜索数据库, 其余变量只好在事先人工指定一初值的基础上进行迭代, 在针对实测数据的计算中, 取

$$\frac{dB_x}{d(\log \tau)} = \frac{dB_y}{d(\log \tau)} = \frac{dB_z}{d(\log \tau)} = 0,$$

而对于  $\text{Scale}$ , 则根据某一宁静区假设无磁场的反演计算结果, 得到一空间平均值, 而以后每次反演均将此值作为反演初值. 本文得到的值为 0.286. 下表给出了构建数据库时  $B_x, B_y, B_z, \text{Shift}$  的取值区间与取值间隔.

	最小值	最大值	取值间隔
$B_x$	-1600	1600	400
$B_y$	100	1700	400
$B_z$	-3800	3800	100
Shift	-800	800	50

# 用迭代法求解最小二乘问题

设

$$\begin{aligned} f: \mathbb{R}^p &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ x &\longmapsto f(x) \end{aligned}$$

其中,  $p < n$ ,  $x \in \mathbb{R}^p$  表示待求解参数,  $f(x) \in \mathbb{R}^n$  表示  $n$  个观测值对应的理论值. 进一步, 设

$$g(x) = \sum_{k=1}^n (f_k(x) - y_k)^2$$

其中,  $\{y_k\}$  代表一组观测值. 于是, 最小二乘问题是指寻找  $x_*$ , 使得

$$g(x_*) = \min_{x \in \mathbb{R}^p} g(x)$$

而  $g(x_*)$  则被称为拟合误差.

若使用迭代法求解该问题, 则需要提供初值  $x_0$ , 而迭代法是否收敛到最优解及收敛速度均依赖于初值的选取. 本文使用 GSL (GNU Scientific Library) 求解该问题, 内部使用的是经典的 Levenberg-Marquardt 算法.

# 算法过程

综上, 算法过程可大致总结如下.

- 1 利用第一节的合成算法, 建立 SDO/HMI 特定观测波长位置 ( $\lambda_i, i = 0, \dots, 5$ ) 的  $I, Q, U, V$  参量关于  $B_x, B_y, B_z, \text{Shift}$  的搜索数据表.
- 2 选择一宁静区域, 取  $B_x = B_y = B_z = 0$ , 以  $\text{Shift}$  和  $\text{Scale}$  作为最小二乘问题的待求解参数. 求解最小二乘问题, 取得到的  $\text{Scale}$  在该区域内的平均, 作为后续反演中的初值.
- 3 对每一像素
  - 1 利用观测得到的  $I, Q, U, V$  参数, 在第一步建立的数据表中查找距离 ( $l^1$  范数) 最小的点, 将该点的  $B_x, B_y, B_z, \text{Shift}$  值及第二步得到的  $\text{Scale}$  值作为迭代初值. (对于线性磁场模型, 还需设定  $\frac{dB_x}{d(\log \tau)} = \frac{dB_y}{d(\log \tau)} = \frac{dB_z}{d(\log \tau)} = 0$ .)
  - 2 求解最小二乘问题
  - 3 执行  $180^\circ$  不确定性, 投影改正等后处理过程.

# 反演测试

常数磁场情形

这里给出一个反演计算测试, 精确解为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (300, -500, 950) \\ \text{Shift} &= 670 \\ \text{Scale} &= 0.6.\end{aligned}$$

搜索过程给出的初值为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (0, 100, 1000) \\ \text{Shift} &= 650\end{aligned}$$

并假设初始  $\text{Scale} = 0.8$ . 则迭代得到的余量误差为  $8.58 \times 10^{-8}$ , 解为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (-300.00, 500.42, 950.17) \\ \text{Shift} &= 669.86 \\ \text{Scale} &= 0.59958\end{aligned}$$

# 反演测试

## 线性磁场情形

下面给出针对线性磁场情形的测试. 精确解为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (-800, 600, 950) \\ \left( \frac{dB_x}{d(\log \tau)}, \frac{dB_y}{d(\log \tau)}, \frac{dB_z}{d(\log \tau)} \right) &= (-100, 50, 150) \\ \text{Shift} &= 670 \\ \text{Scale} &= 0.7.\end{aligned}$$

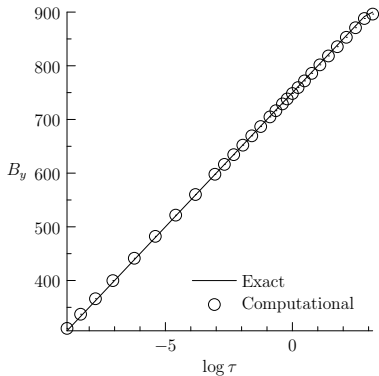
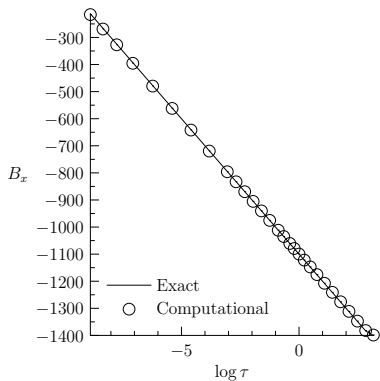
搜索过程给出的初值为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (-400, 500, 1100) \\ \text{Shift} &= 650\end{aligned}$$

并假设初始  $\text{Scale} = 1.0$ . 取迭代得到的余量误差为  $2.56 \times 10^{-7}$ . 迭代得到的解如下图.

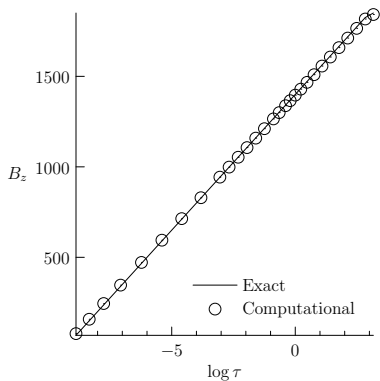
# 反演测试

线性磁场情形



# 反演测试

线性磁场情形



Shift = 669.96  
Scale = 0.69979



# 反演测试

## 线性磁场情形

最后给出磁场沿光深会出现变号情形的测试. 精确解为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (400, 0, -200) \\ \left( \frac{dB_x}{d(\log \tau)}, \frac{dB_y}{d(\log \tau)}, \frac{dB_z}{d(\log \tau)} \right) &= (100, -50, -150) \\ \text{Shift} &= 670 \\ \text{Scale} &= 0.7.\end{aligned}$$

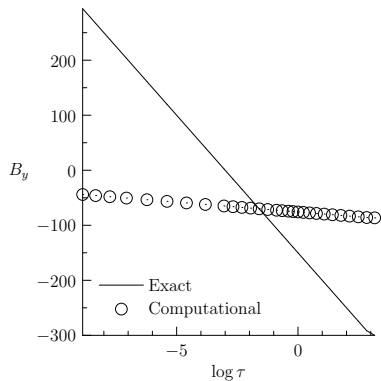
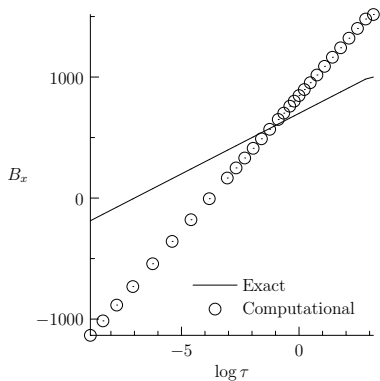
搜索过程给出的初值为

$$\begin{aligned}(B_x, B_y, B_z) &= (-800, 100, -100) \\ \text{Shift} &= 650\end{aligned}$$

并假设初始  $\text{Scale} = 0.8$ . 则迭代得到的余量误差为  $4.52 \times 10^{-6}$ , 迭代得到的解如下图.

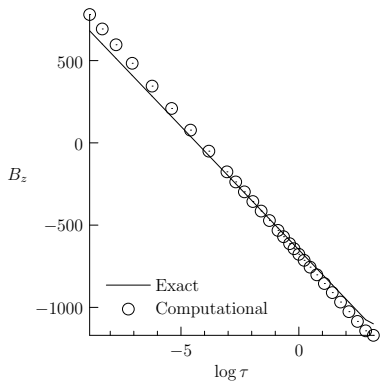
# 反演测试

线性磁场情形



# 反演测试

线性磁场情形



Shift = 669.34

Scale = 0.7123

- 1 Stokes 参量的辐射转移理论简介
- 2 针对 SDO/HMI 的磁场反演算法
- 3 针对 SDO/HMI 实测数据的反演计算结果
- 4 总结

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

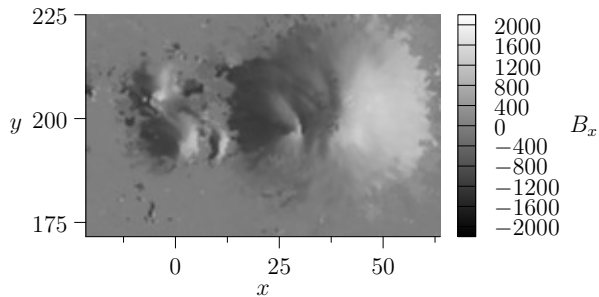


图:  $B_x$  灰度图像, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

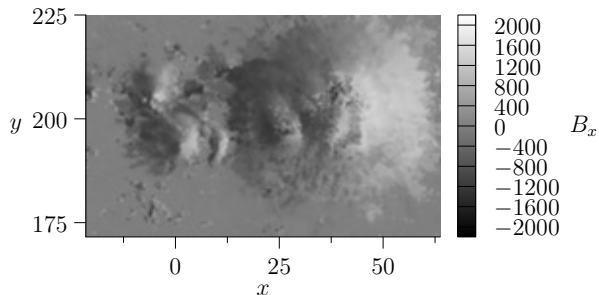


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_x$  灰度图像, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

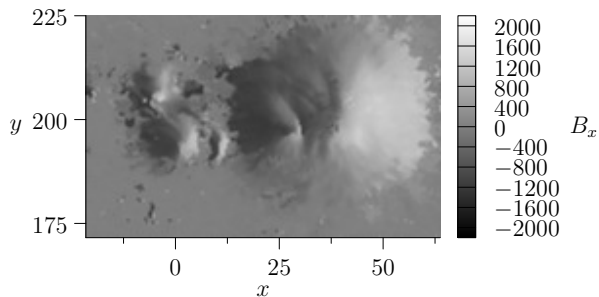


图:  $B_x$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

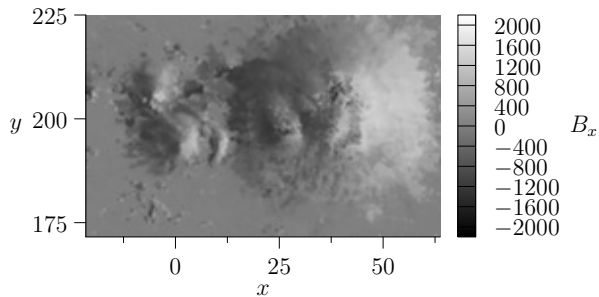


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_x$  灰度图像, 经过投影改正



# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

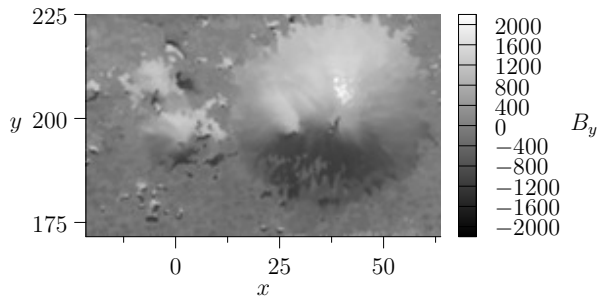


图:  $B_y$  灰度图像, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

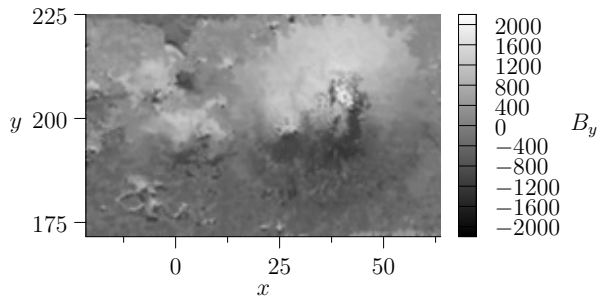


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_y$  灰度图像, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

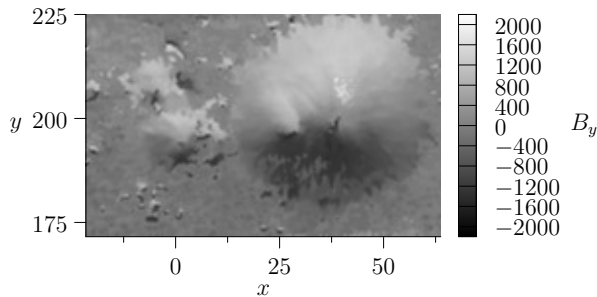


图:  $B_y$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

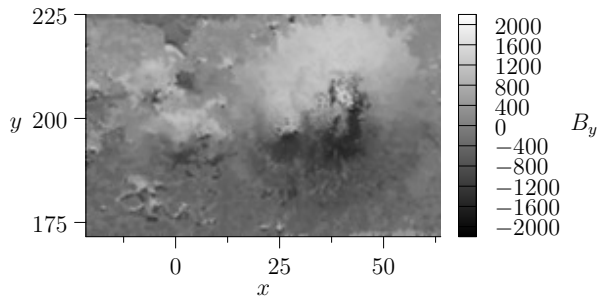


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_y$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

官方网站数据

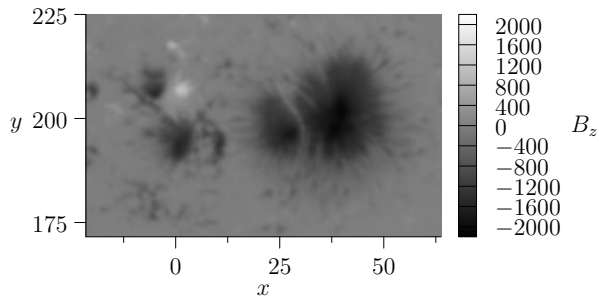


图: SDO/HMI 官方网站提供的  $B_z$  灰度图像

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

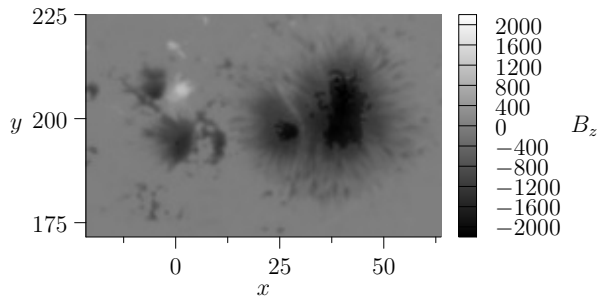


图:  $B_z$  灰度图, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

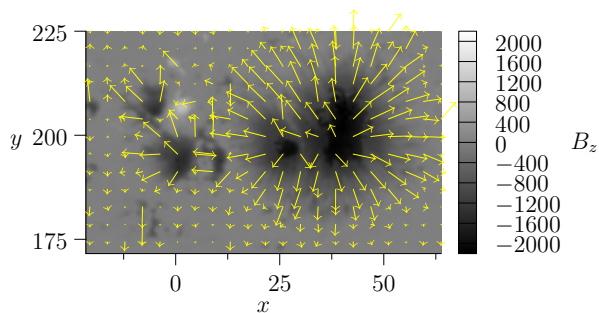


图:  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

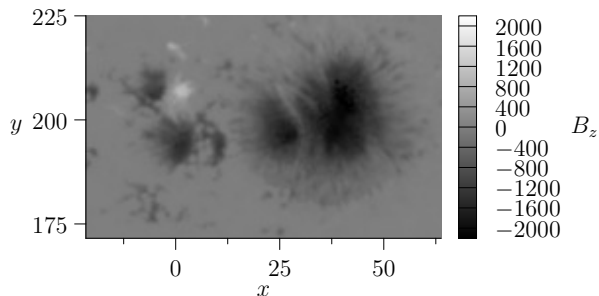


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图, 未做投影改正



# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

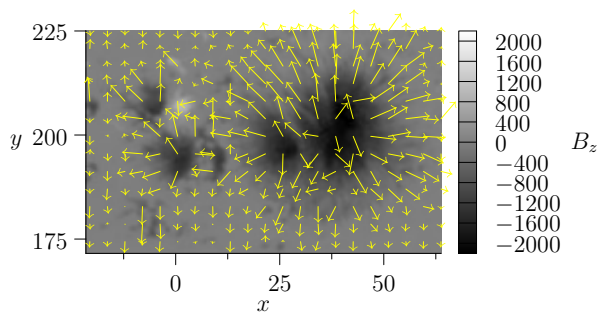


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图与  $B_x, B_y$  向量图, 未做投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

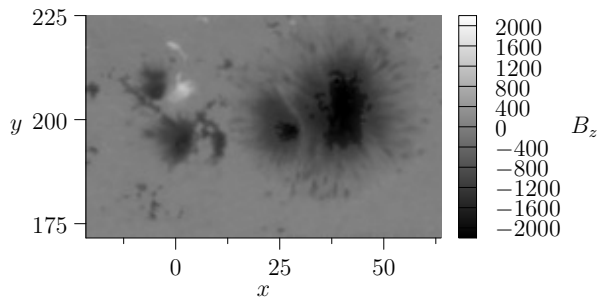


图:  $B_z$  灰度图, 经过投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

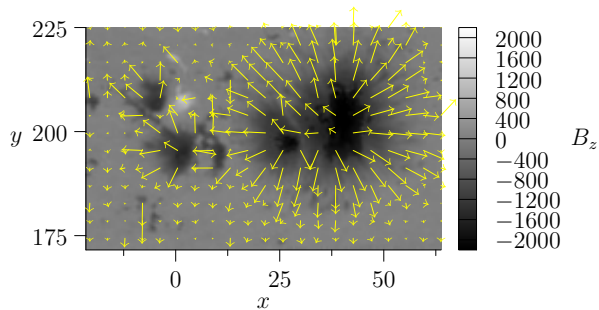


图:  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 经过投影改正

# 实测数据: 2010年9月28日, 活动区 11109

线性磁场模型

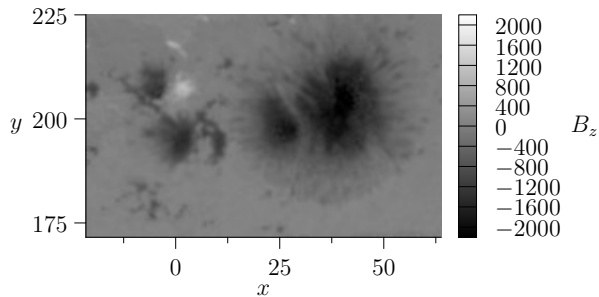


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图, 经过投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

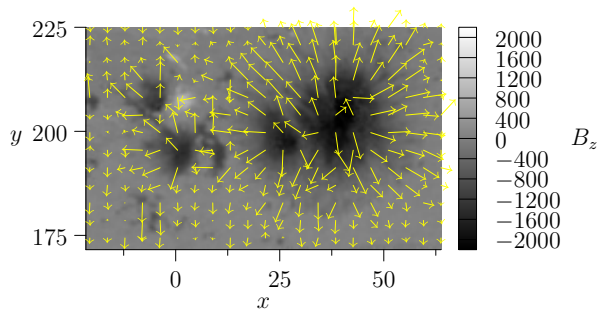


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 经过投影改正

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

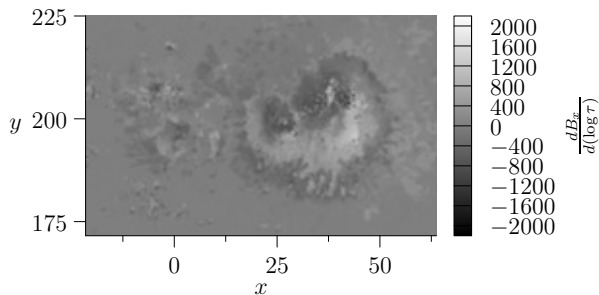


图:  $\frac{dB_x}{d(\log \tau)}$  灰度图

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

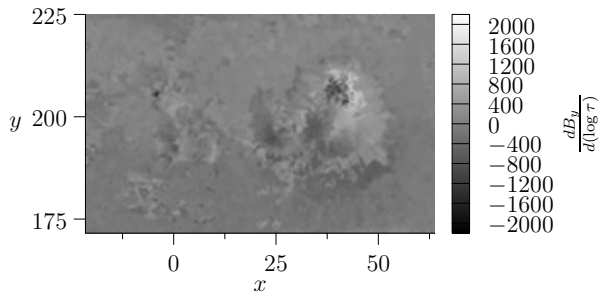


图:  $\frac{dB_y}{d(\log \tau)}$  灰度图

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

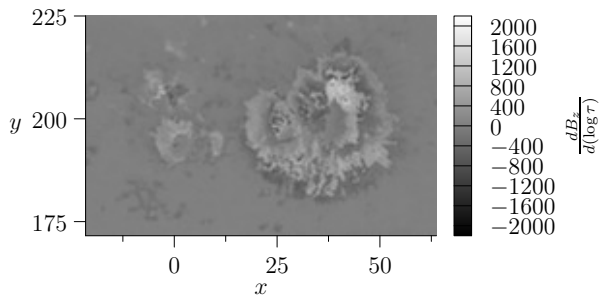


图:  $\frac{dB_z}{d(\log \tau)}$  灰度图



# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

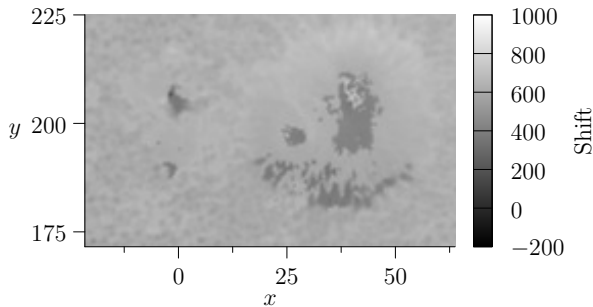


图: Shift 灰度图像

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

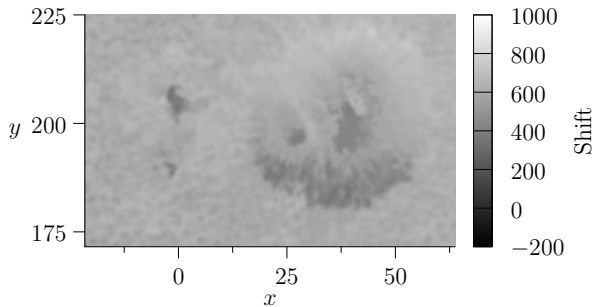


图: Shift 灰度图像

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

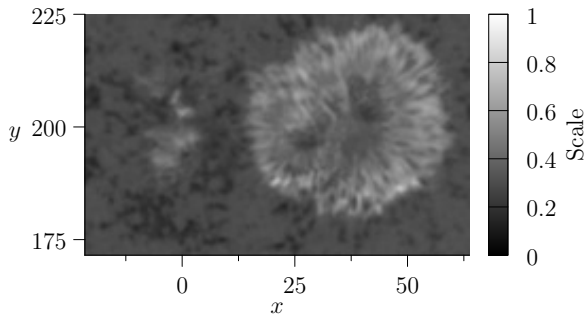


图: Scale 灰度图像

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

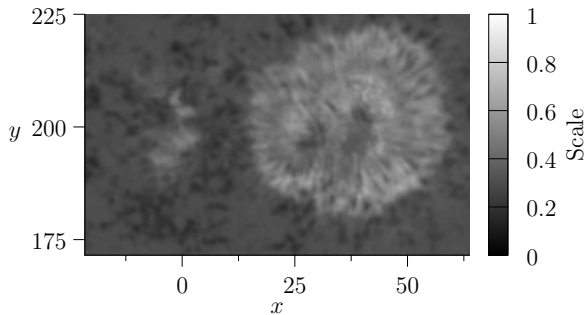


图: Scale 灰度图像

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

常数磁场模型

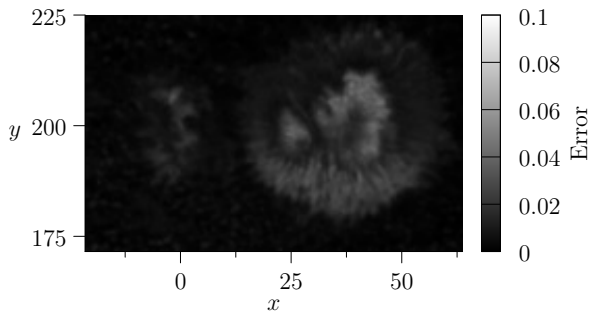


图: 拟合误差灰度图像

# 实测数据: 2010 年 9 月 28 日, 活动区 11109

线性磁场模型

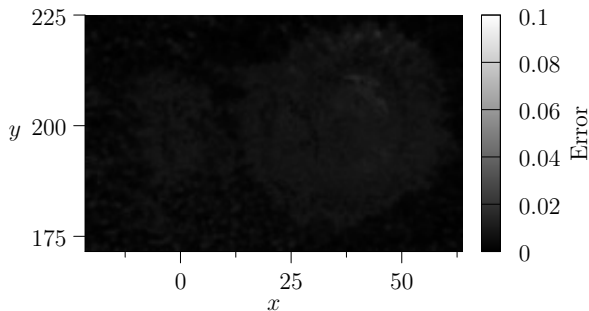


图: 拟合误差灰度图像

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

常数磁场模型

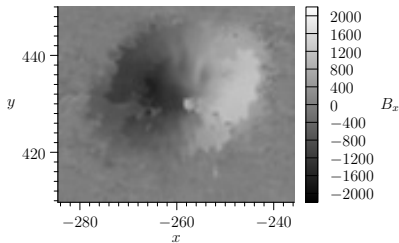


图:  $B_x$  灰度图像, 未做投影改正

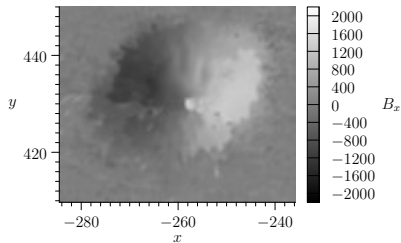


图:  $B_x$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型

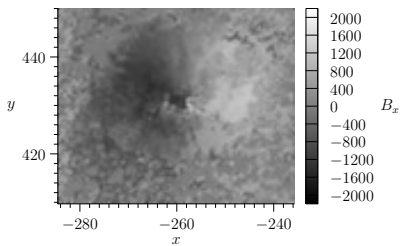


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_x$  灰度图像, 未做投影改正

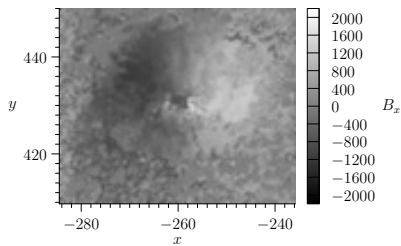


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_x$  灰度图像, 经过投影改正



# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

常数磁场模型

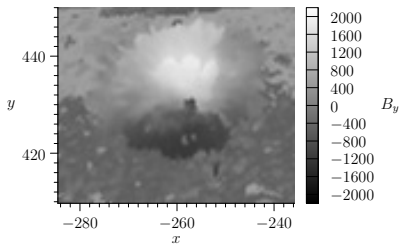


图:  $B_y$  灰度图像, 未做投影改正

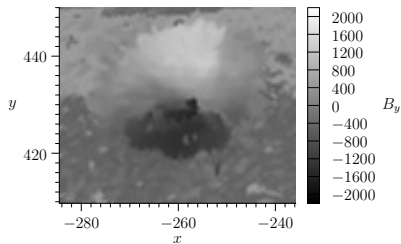


图:  $B_y$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型

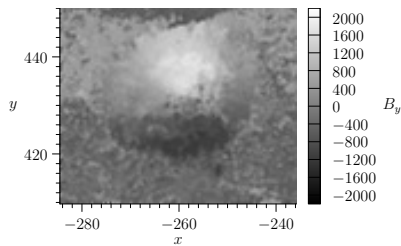


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_y$  灰度图像, 未做投影改正

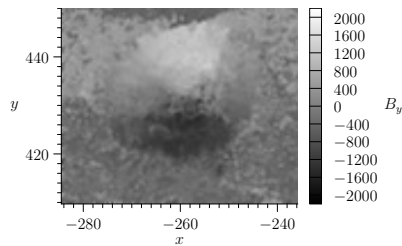


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_y$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

官方网站数据

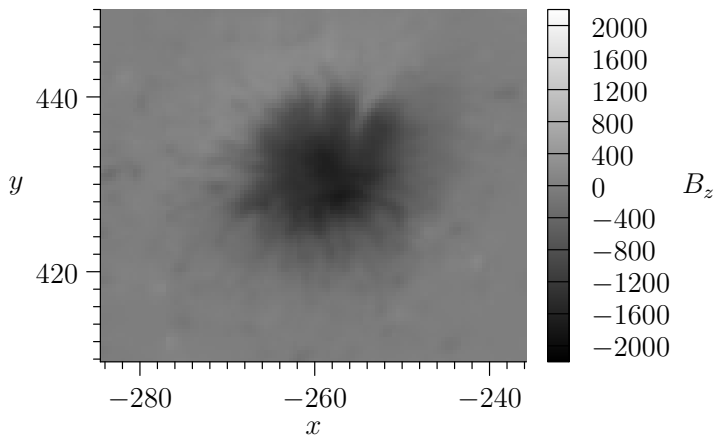


图: SDO/HMI 官方网站提供的  $B_z$  灰度图像

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

常数磁场模型

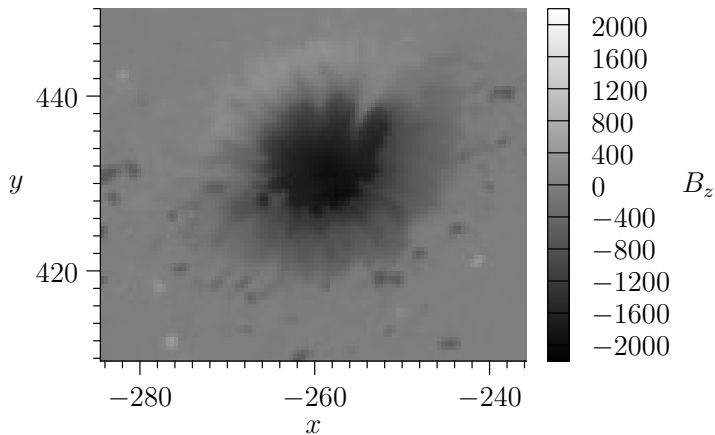


图:  $B_z$  灰度图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

常数磁场模型

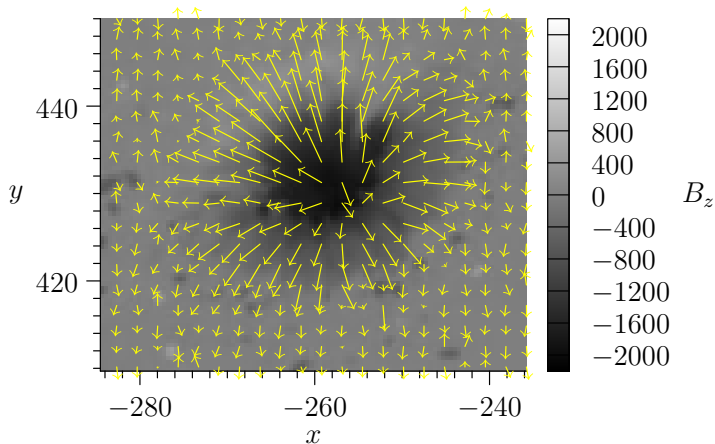


图:  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型

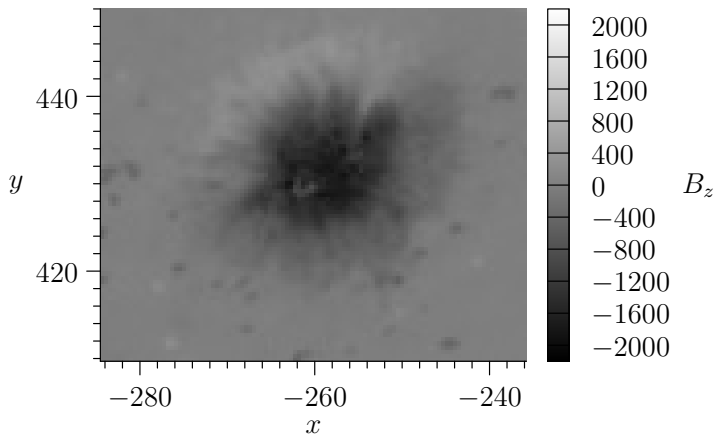


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型

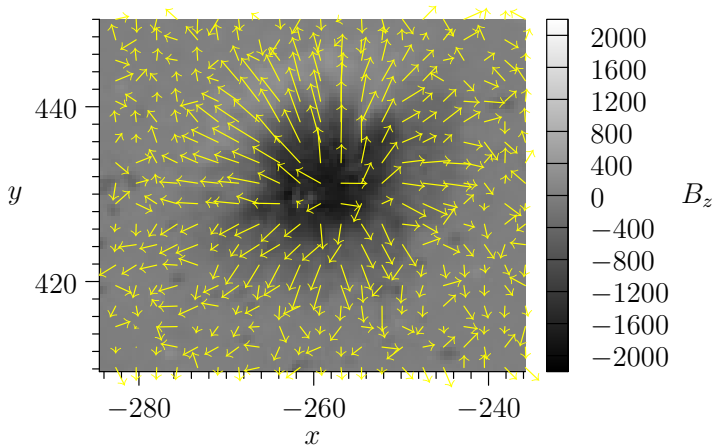


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

常数磁场模型

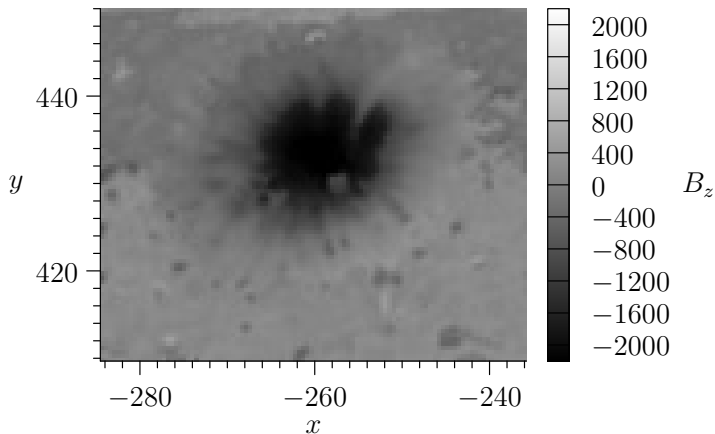


图:  $B_z$  灰度图, 经过投影改正



# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

常数磁场模型

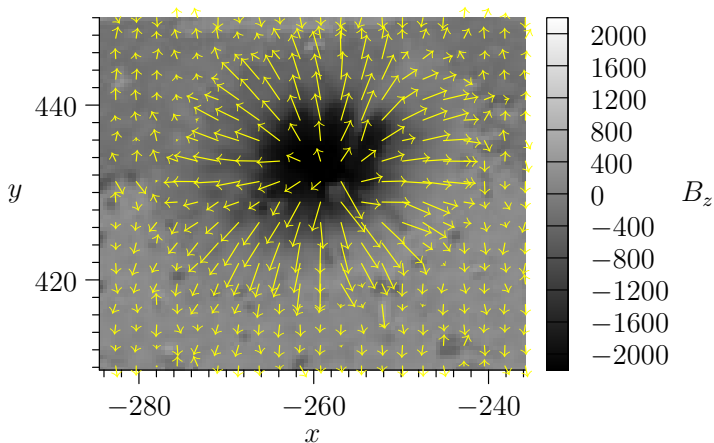


图:  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型

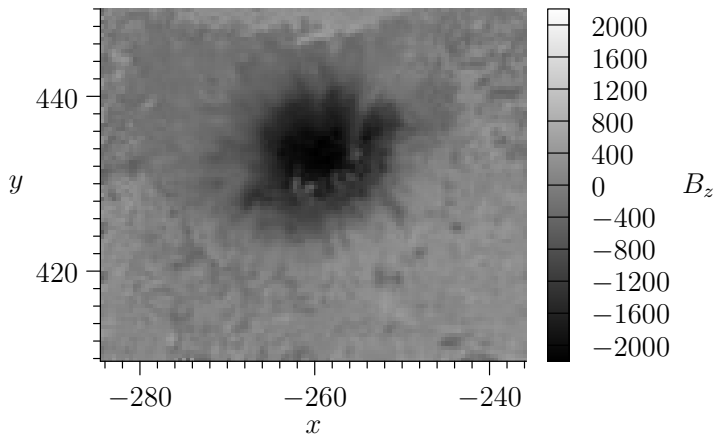


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型

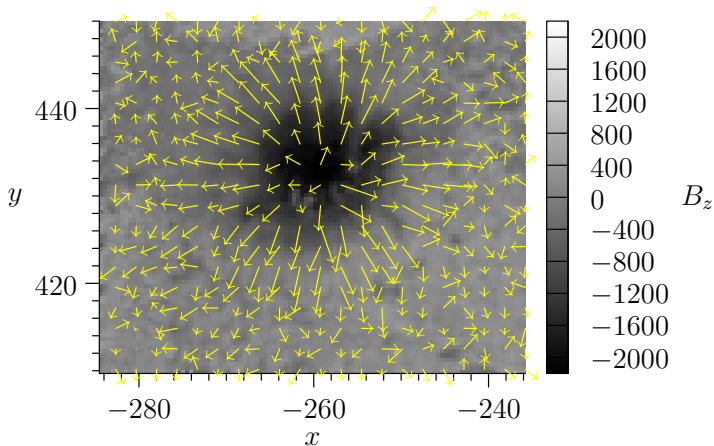
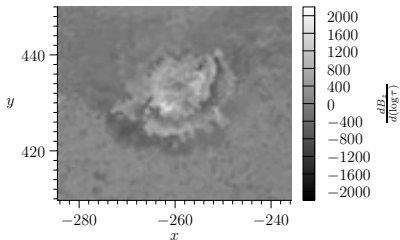
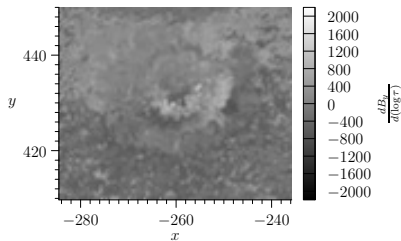
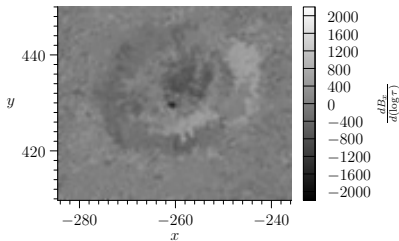


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

线性磁场模型: 磁场沿光深的导数



# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

Shift 灰度图像

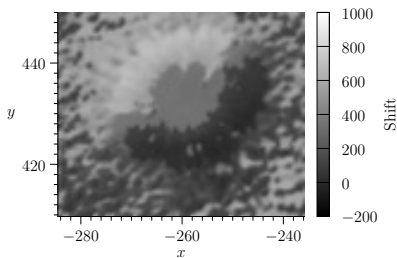


图: 常数磁场模型

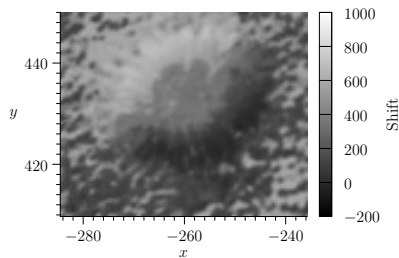


图: 线性磁场模型

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

Scale 灰度图像

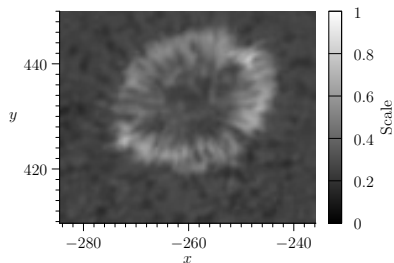


图: 常数磁场模型

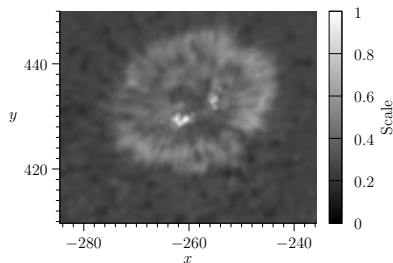


图: 线性磁场模型

# 实测数据: 2011 年 1 月 20 日, 活动区 11147

拟合误差灰度图像

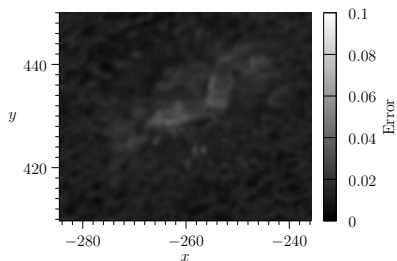


图: 常数磁场模型

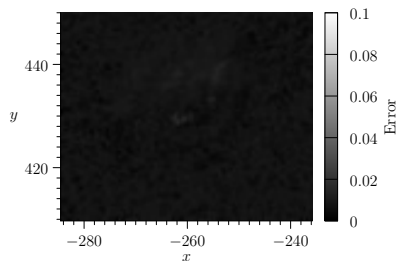


图: 线性磁场模型

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

常数磁场模型

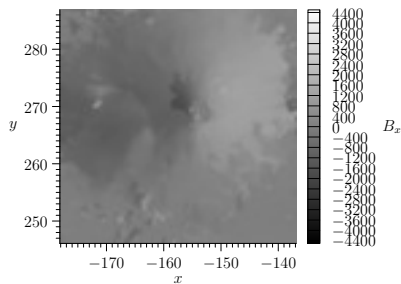


图:  $B_x$  灰度图像, 未做投影改正

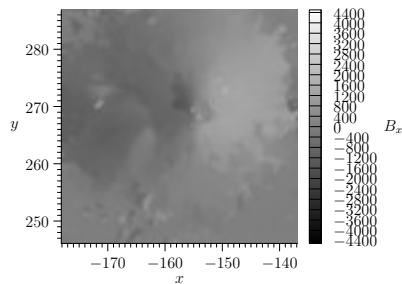


图:  $B_x$  灰度图像, 经过投影改正



# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型

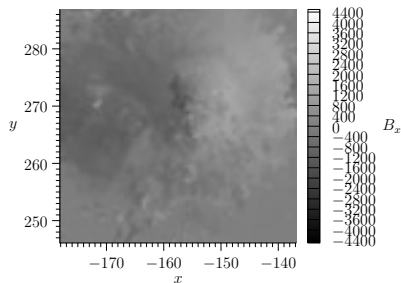


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_x$  灰度图像, 未做投影改正

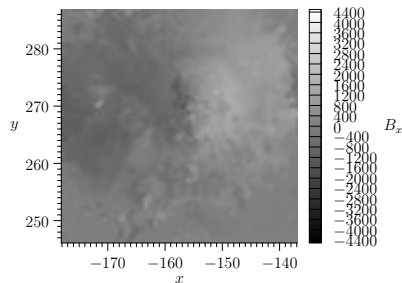


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_x$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

常数磁场模型

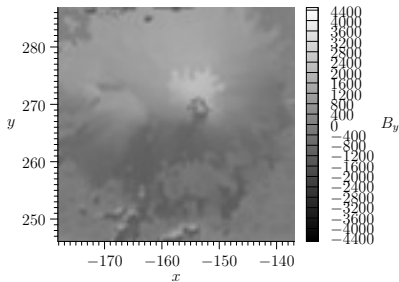


图:  $B_y$  灰度图像, 未做投影改正

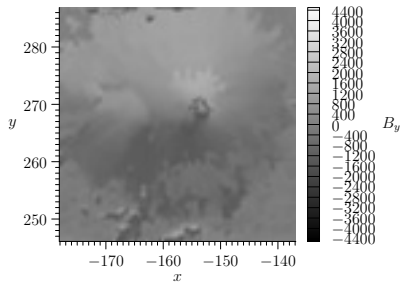


图:  $B_y$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型

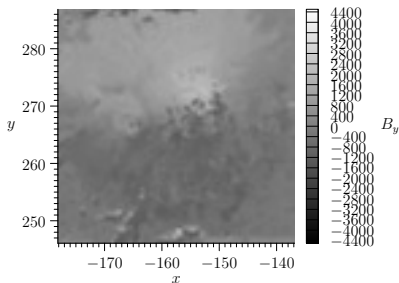


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_y$  灰度图像, 未做投影改正

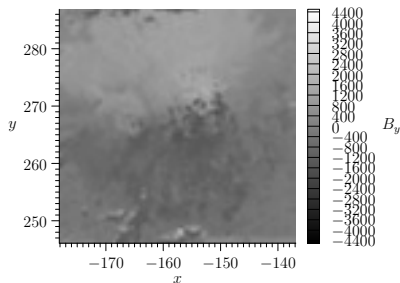


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_y$  灰度图像, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

官方网站数据

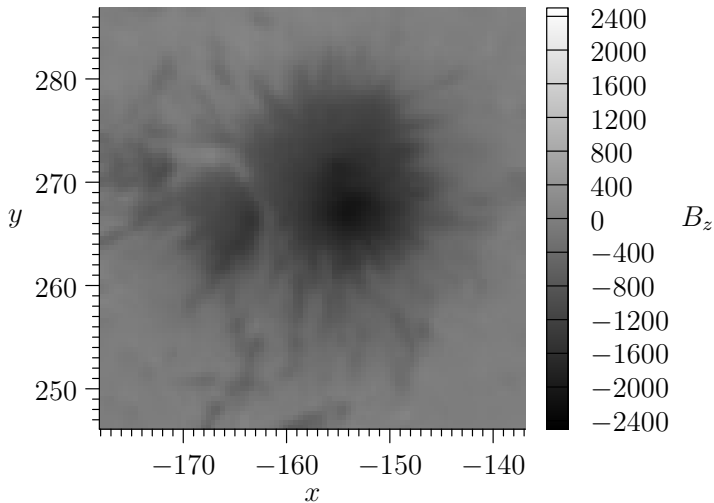


图: SDO/HMI 官方网站提供的  $B_z$  灰度图像

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

常数磁场模型

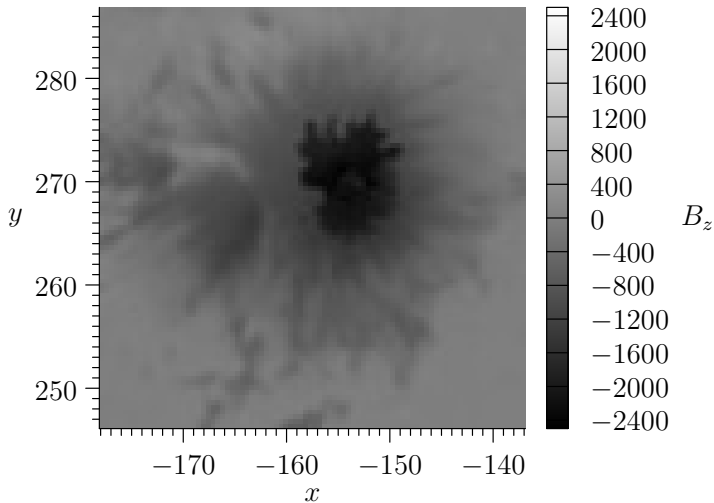


图:  $B_z$  灰度图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

常数磁场模型

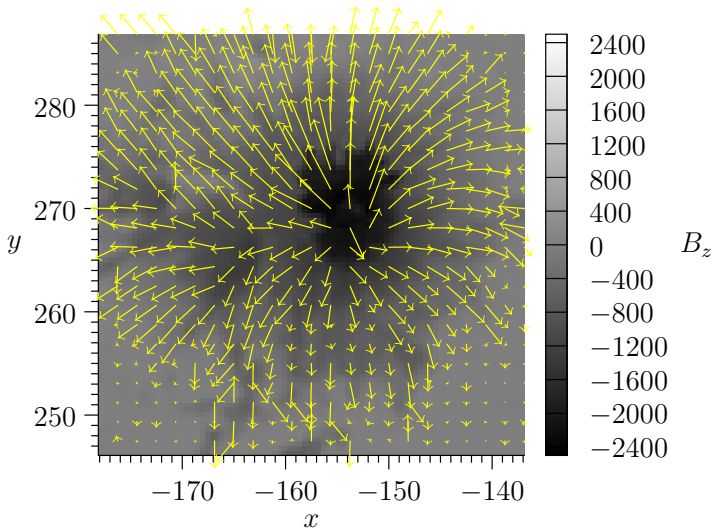


图:  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型

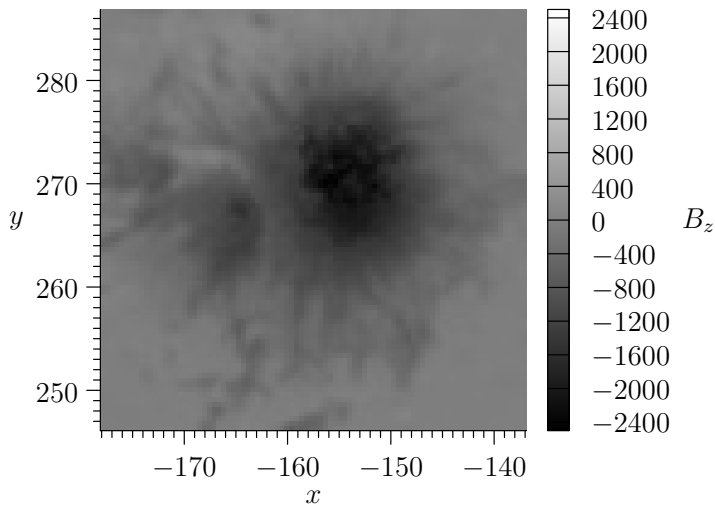


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图, 未做投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型

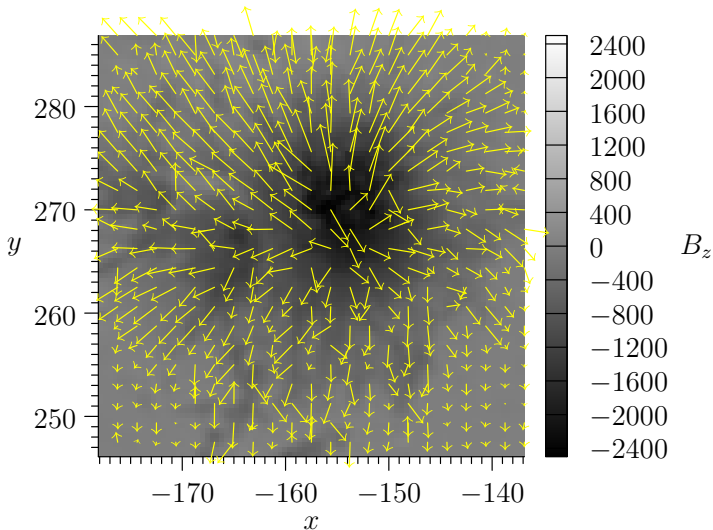


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图与  $B_x, B_y$  向量图, 未做投影改正



# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

常数磁场模型

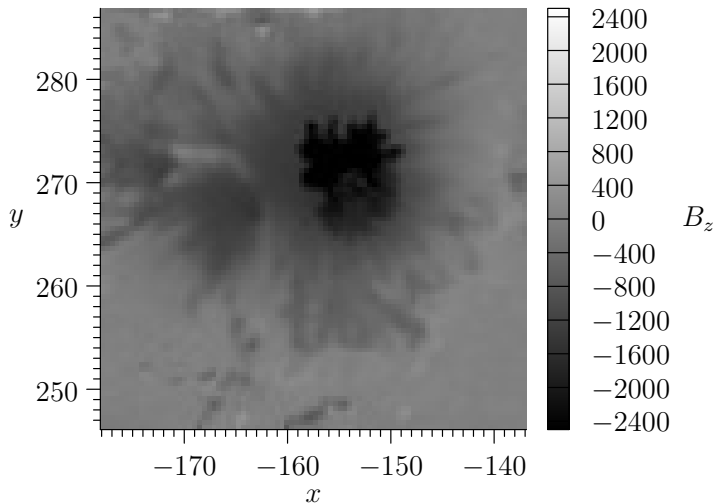


图:  $B_z$  灰度图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

常数磁场模型

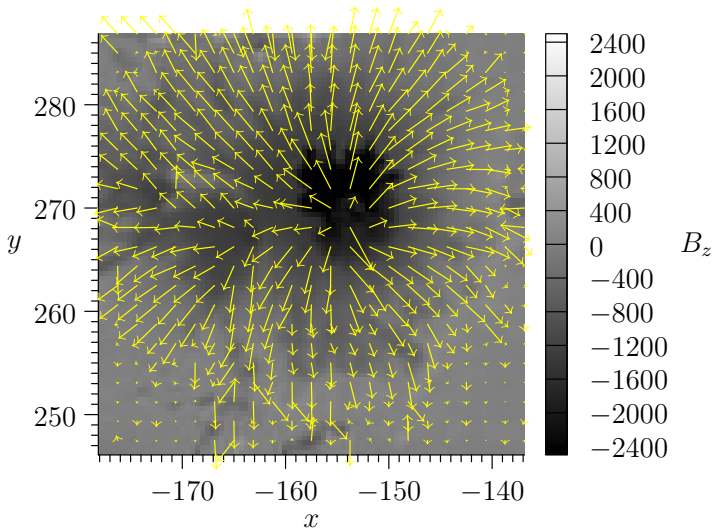


图:  $B_z$  灰度图与  $B_x$ ,  $B_y$  向量图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型

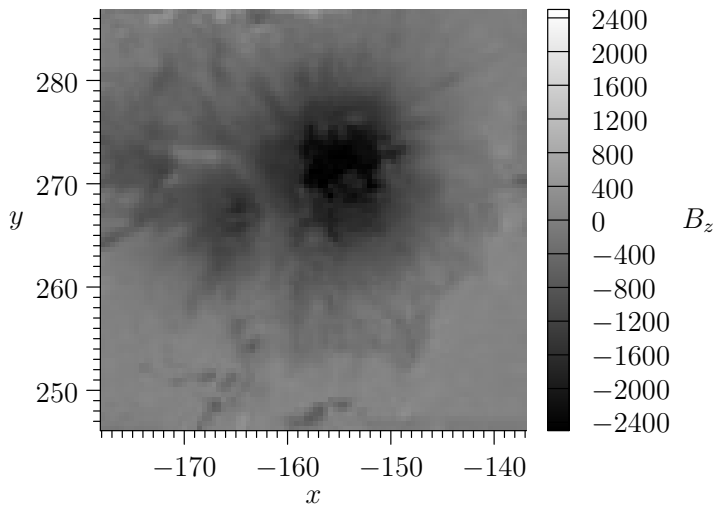


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型

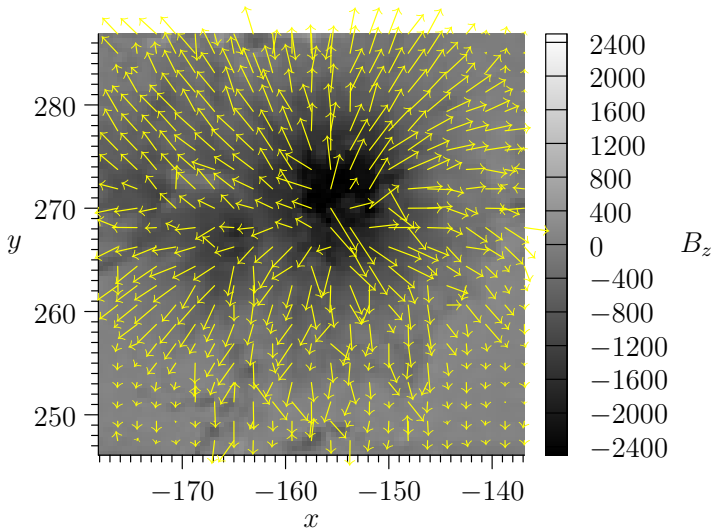
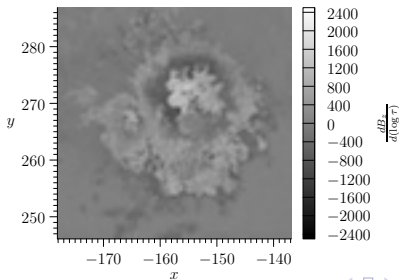
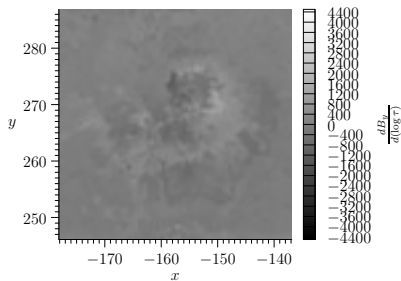
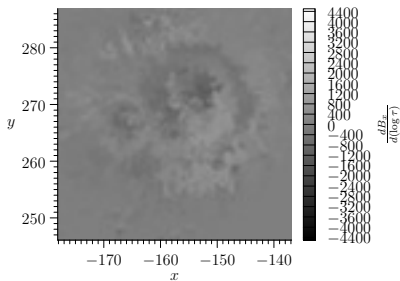


图: 光深  $\log \tau = 6$  处,  $B_z$  灰度图与  $B_x, B_y$  向量图, 经过投影改正

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

线性磁场模型: 磁场沿光深的导数



# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

Shift 灰度图像

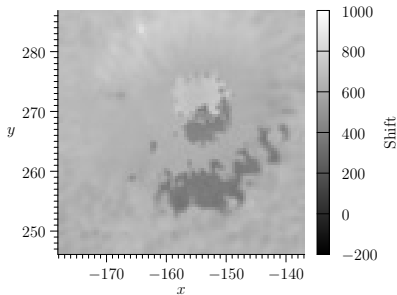


图: 常数磁场模型

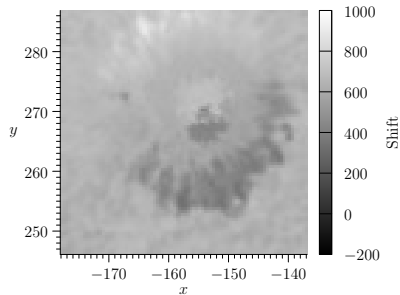


图: 线性磁场模型

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

Scale 灰度图像

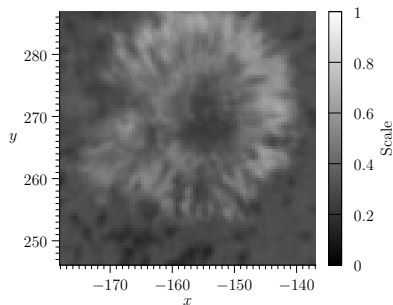


图: 常数磁场模型

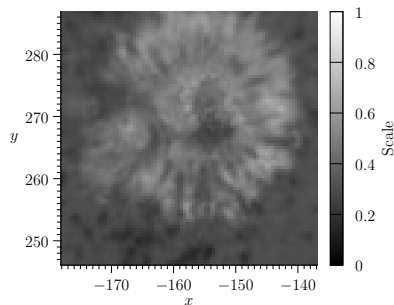


图: 线性磁场模型

# 实测数据: 2011 年 3 月 8 日, 活动区 11166

拟合误差灰度图像

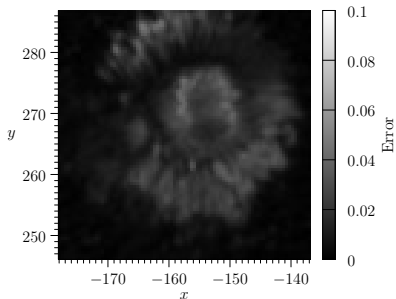


图: 常数磁场模型

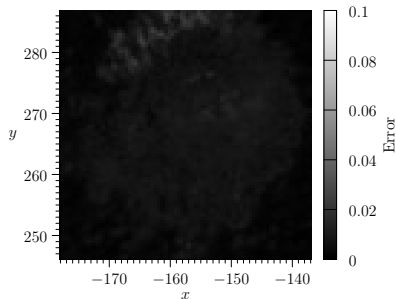


图: 线性磁场模型



- 1 Stokes 参量的辐射转移理论简介
- 2 针对 SDO/HMI 的磁场反演算法
- 3 针对 SDO/HMI 实测数据的反演计算结果
- 4 总结

# 总结

- 对于常数磁场模型, 测试结果良好, 实测结果与 SDO/HMI 提供的官方结果基本相符.
- 对于线性磁场模型, 当磁场的分量随光深变化不变号时, 测试结果较好, 否则, 结果变差. 实测结果在大范围内磁场分量随光深变化而变号, 因此结果稳定性不好. 尽管最后的拟合误差较常数模型更好, 但结果仍不可信.