

# 利用日震波研究太阳 内部及太阳高层大气

赵俊伟

*W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory,  
Stanford University, Stanford, CA 94305-4085*

虎踞龙盘今胜昔，  
天翻地覆慨而慷。

玄都观里桃千树，  
尽是刘郎去后栽。

鐘山風雨缺蒼苔，  
神道大江流。  
翻地覆慨而慷，  
玄都觀里桃千樹，  
天若有情天亦老，  
人間正道是滄桑。



暮春三月，  
江南草长，  
杂花生树，  
群莺乱飞。  
见故国之旗  
鼓，感平生  
于畴日。



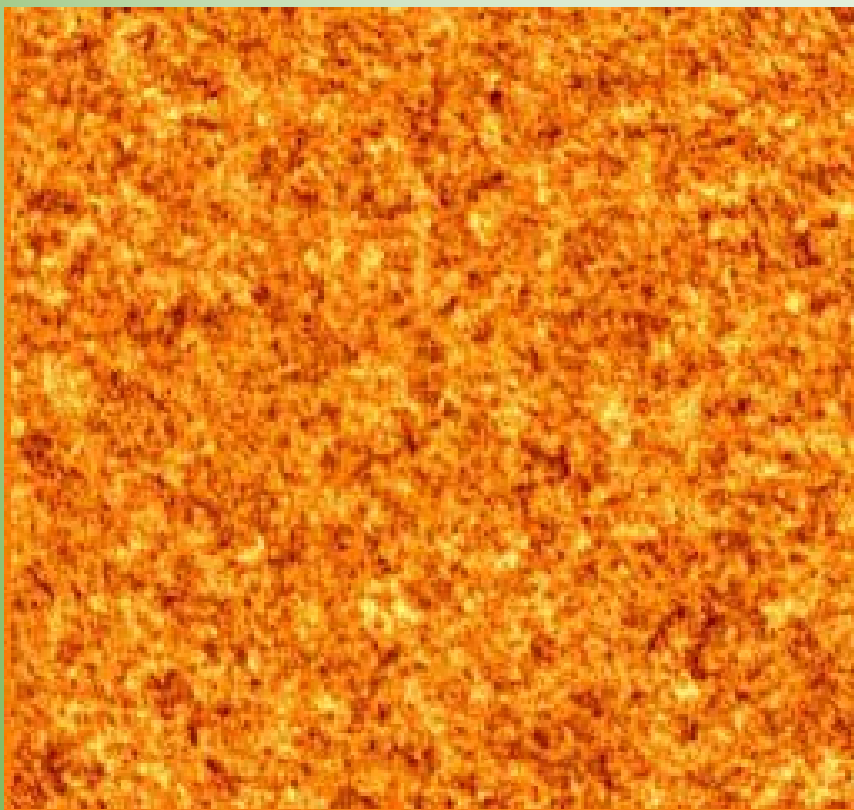
# 内容纲要

1. 日震学的基本知识及概况
  - a. 基本知识及概念
  - b. 取得的重要成就
  
2. 太阳内部子午流的研究及其意义
  - a. 太阳活动周期及发电机理论
  - b. 日震学中的center-to-limb效应
  - c. 双生子午流
  
3. 日震波在活动区上方的传播
  - a. 活动区上方色球层及日冕中的波
  - b. 日震波与高层大气的磁声波的联系
  - c. 数值模拟及解释

# 一、日震学的基本知识及概况



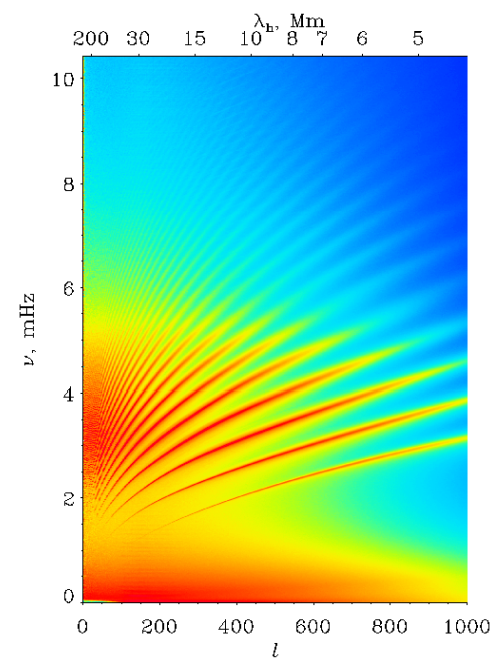
# 太阳震荡的观测



局部观测

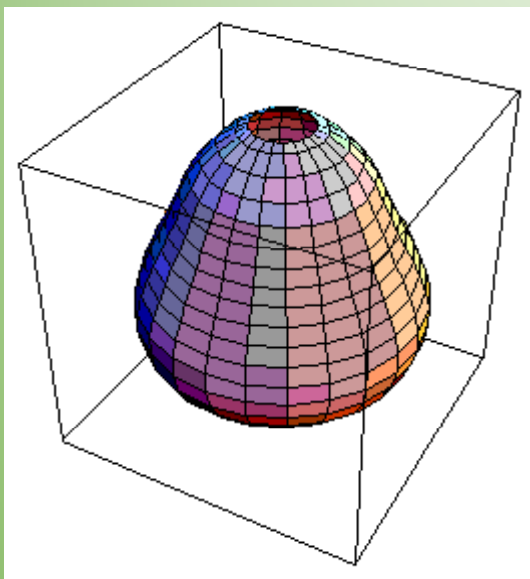


全球观测

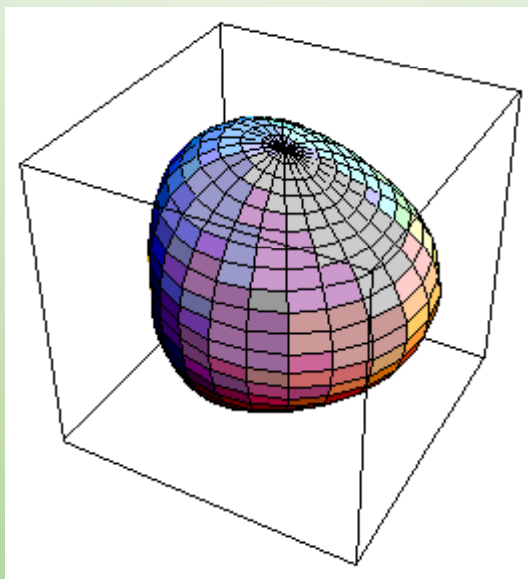


$k$ - $\omega$  能谱

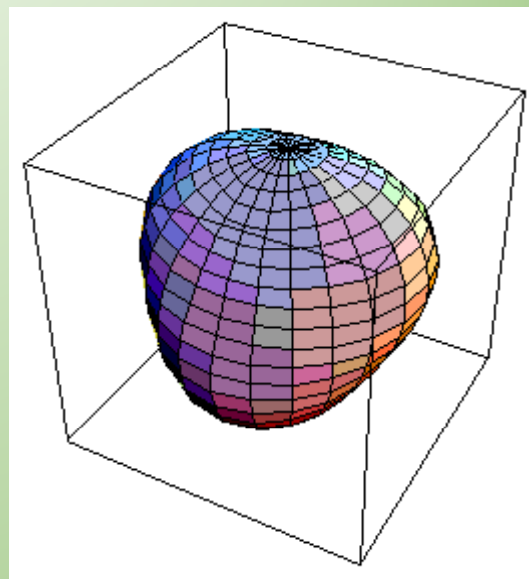
$l=3, m=0$



$l=3, m=1$

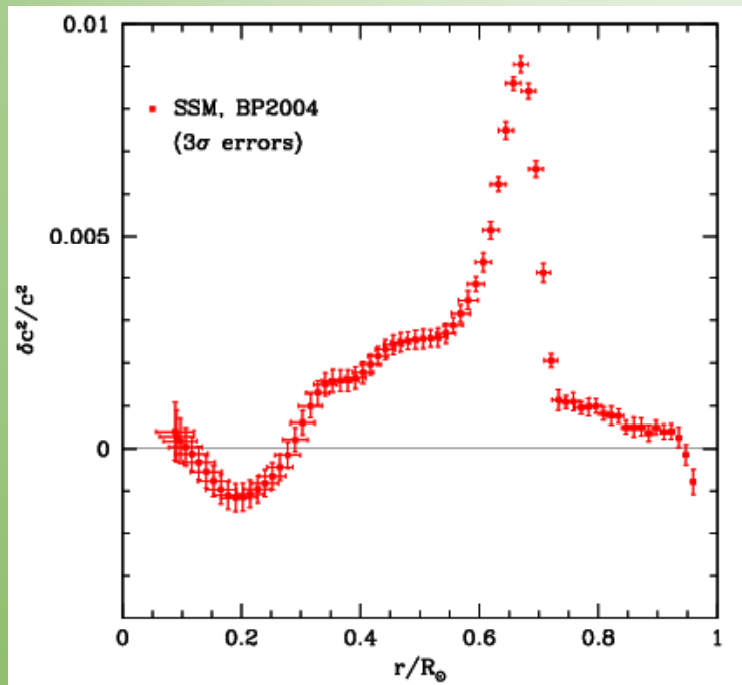


$l=3, m=2$

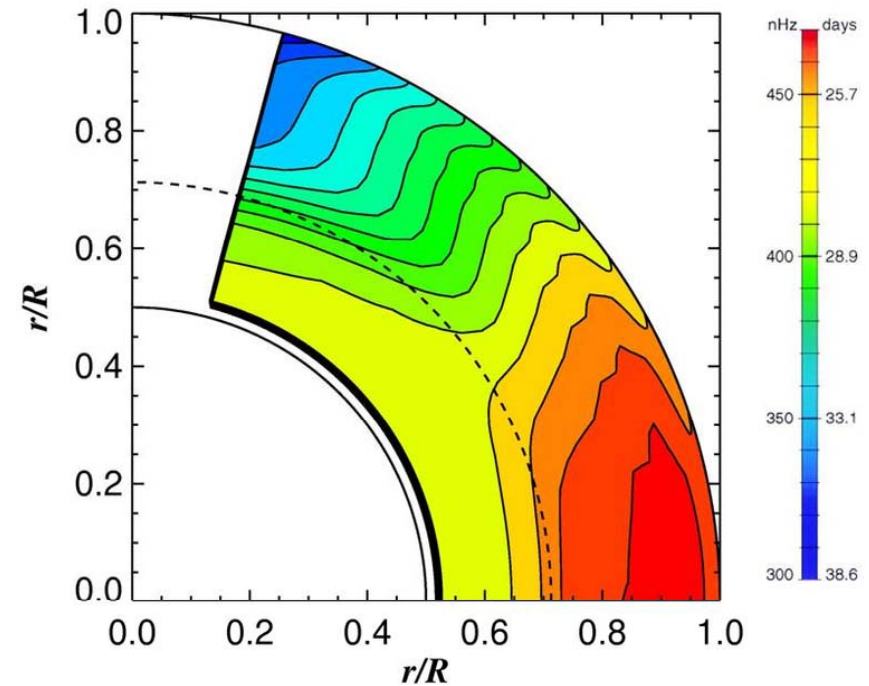


太阳的震荡，正如其它恒星的震荡一样，可以认为是成千上万种不同震荡模式的叠加。对于太阳而言， $l$ 可以到达3000多，而恒星目前的观测大都小于10。基于这种思路进行的研究，成为全球日震学 *global helioseismology*。

# 代表性结果



利用全球日震学所得到的声速与标准太阳模型的差异  
(courtesy: S. Basu)



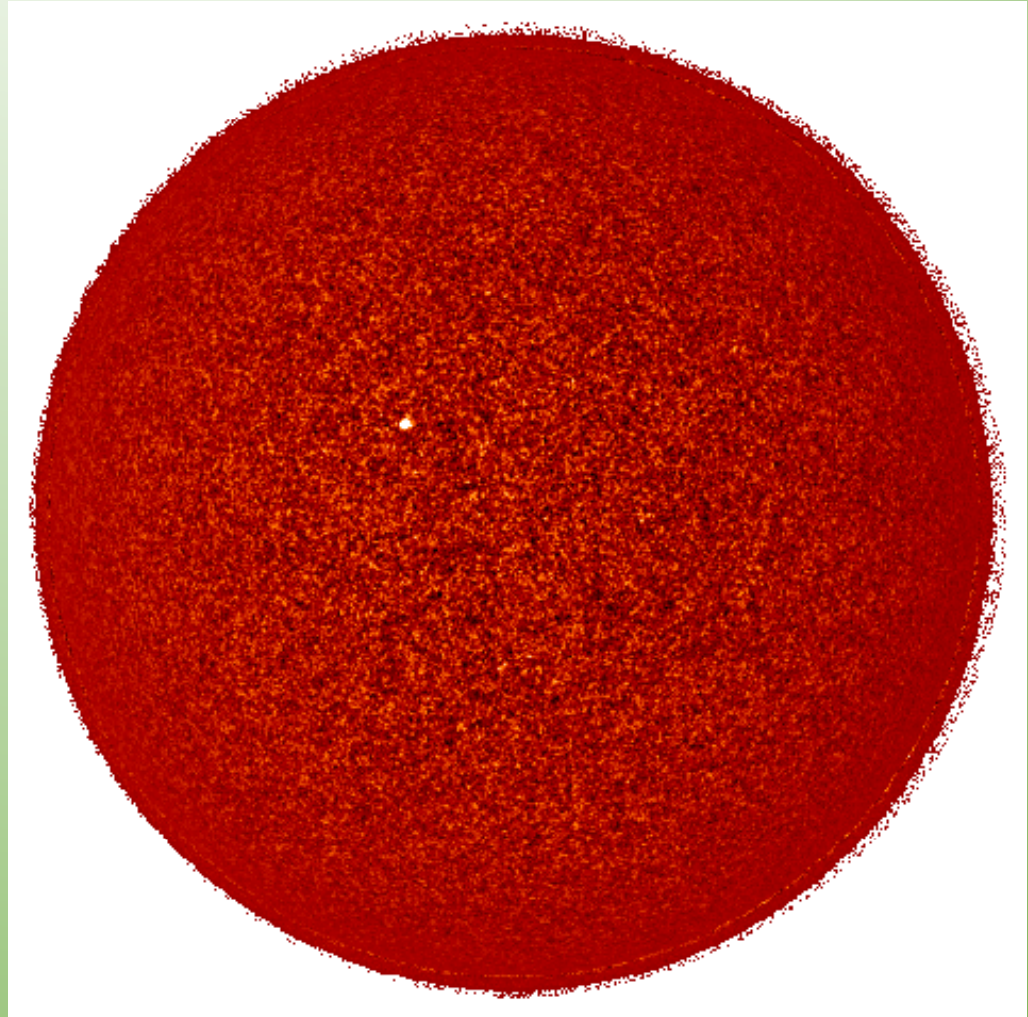
利用全球日震学所获得的太阳内部较差自转  
(courtesy: J. Schou)



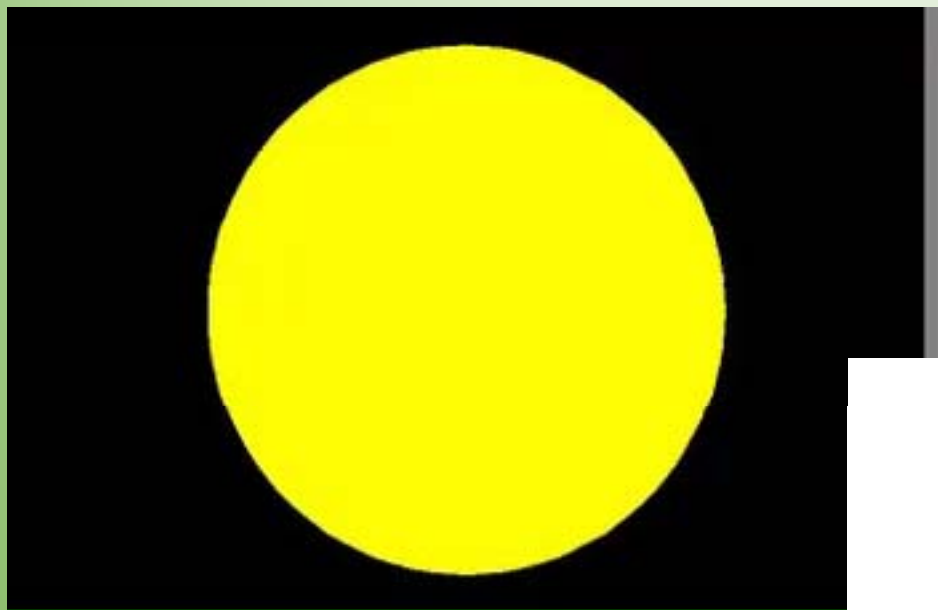
另外一种思路是，认为是声波以行波的方式在太阳内部及表面传播而成。这种思路其实与驻波思路并不矛盾，只是出发点与研究手段不同而已。

基于这种思路进行的研究成为局地日震学 local helioseismology。

右边小电影显示的是通过互相关计算所重新构建的日震波在太阳表面的传播。

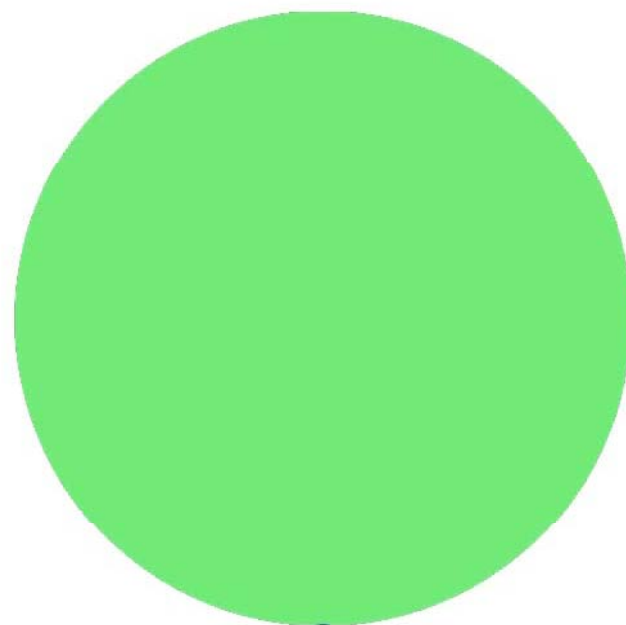


# 日震波（声波）不是表面波

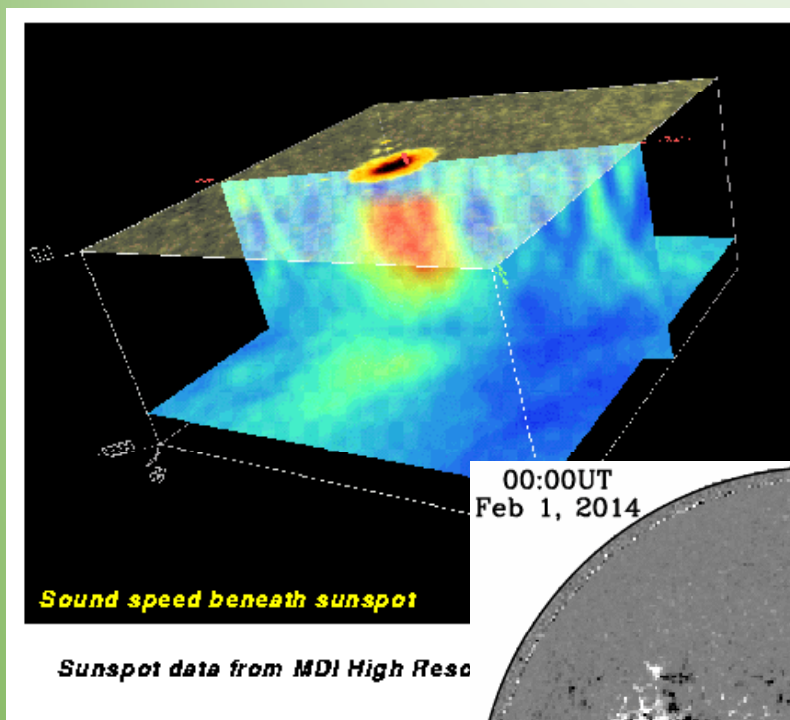


声波路径近似

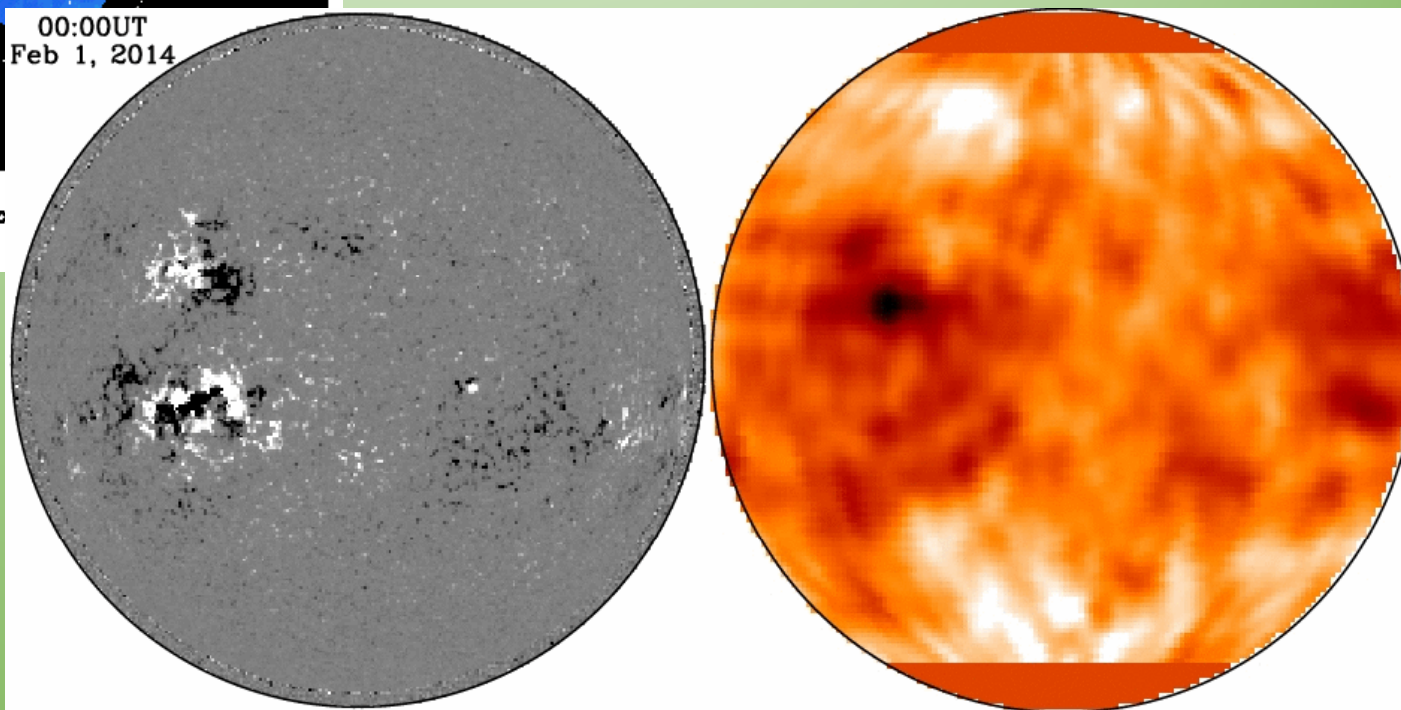
但路径近似是一种非常粗略的近似。



# 局地日震学的代表性结果

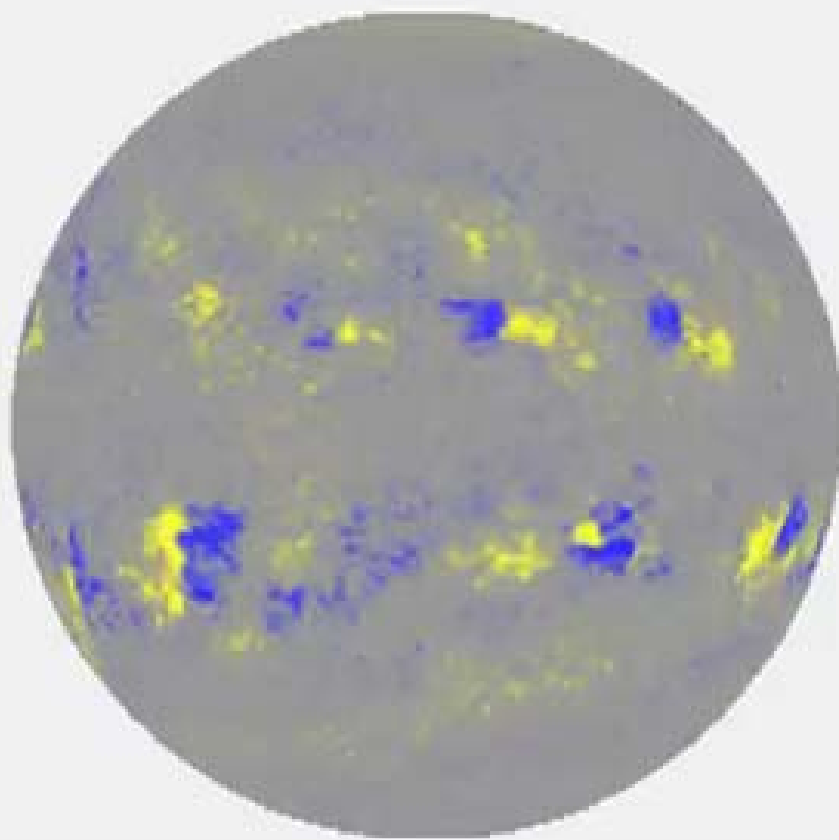


左图展示了太阳黑子下方的声速图。  
下图展示了通过局地声波所观测到的  
太阳背面的活动区。



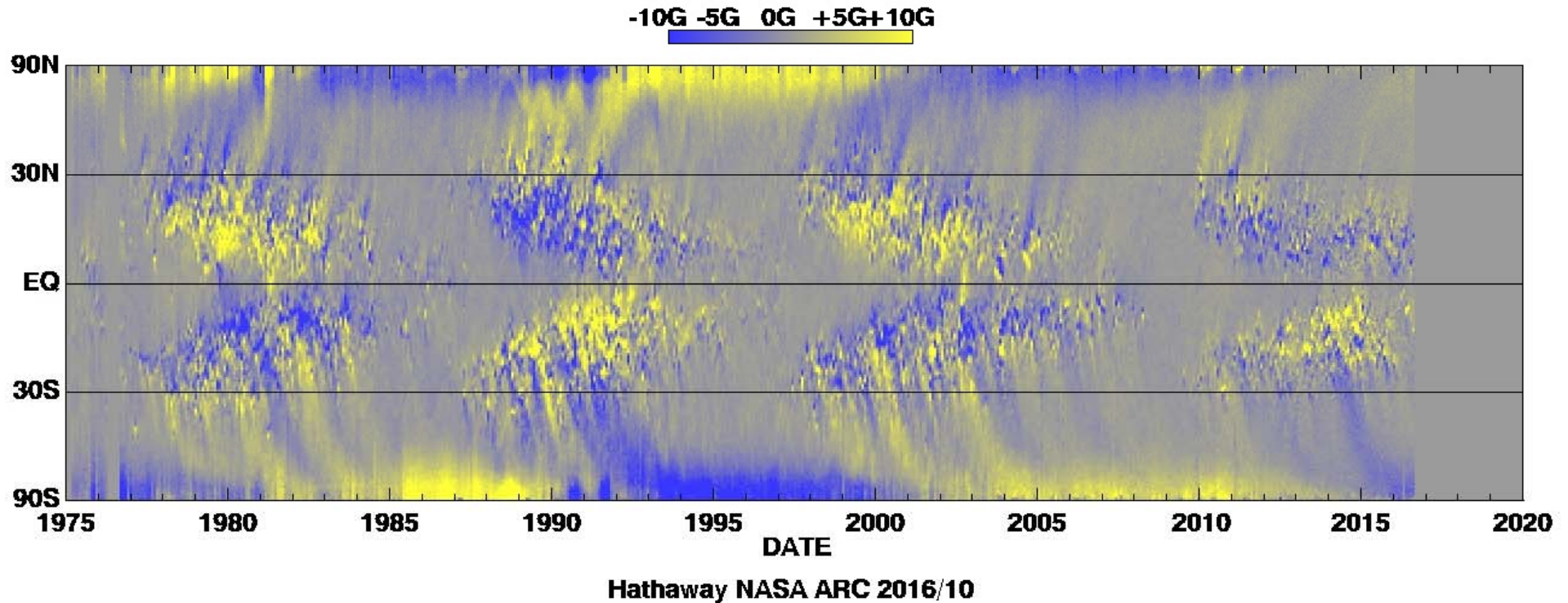
## 二、太阳子午流的研究及意义

# 太阳磁场活动的周期性



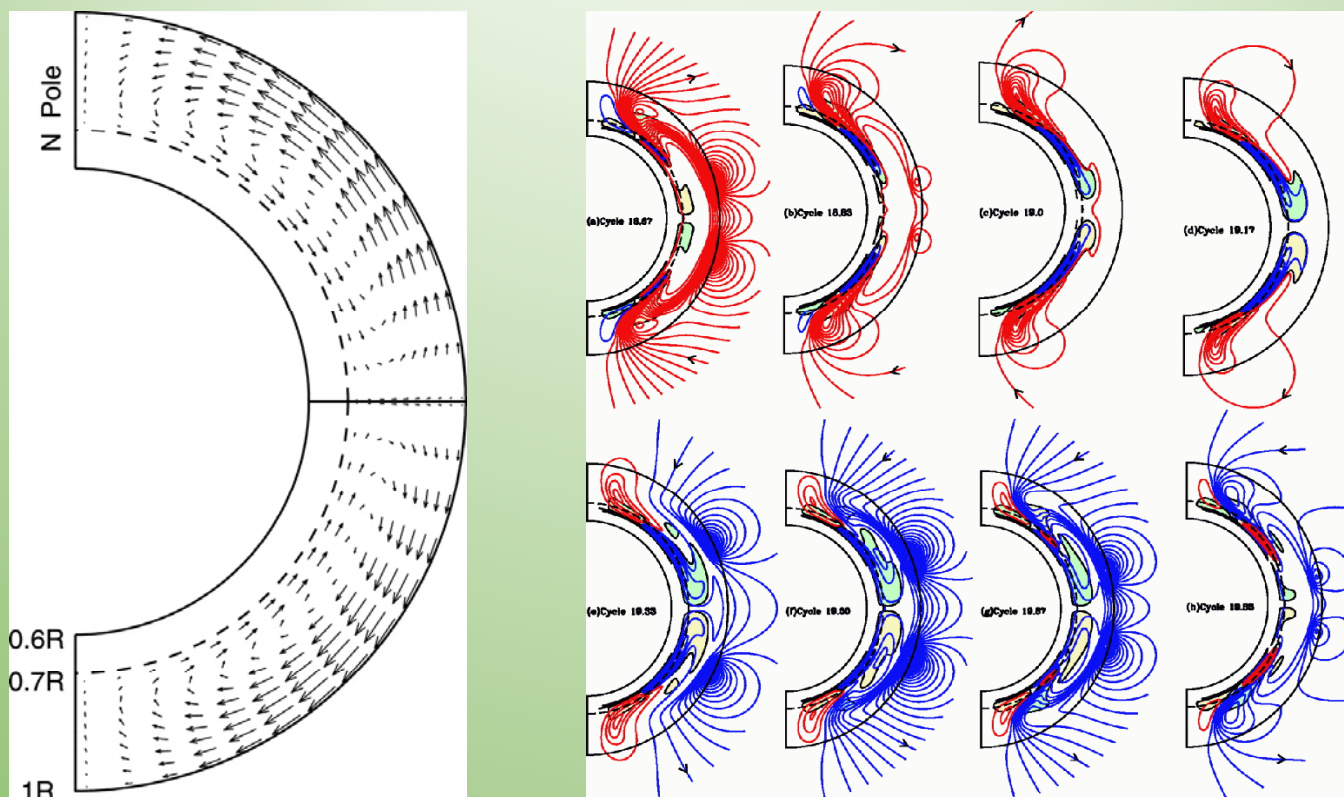


# 太阳磁活动蝴蝶图



太阳磁活动在第23周之后经历了一个长达两年的extended minimum, 第24周活动达到了100多年以来的最低水平。为什么会这样? 这些都是目前很有意义的研究课题。

# 子午流在发电机理论中具有重要作用



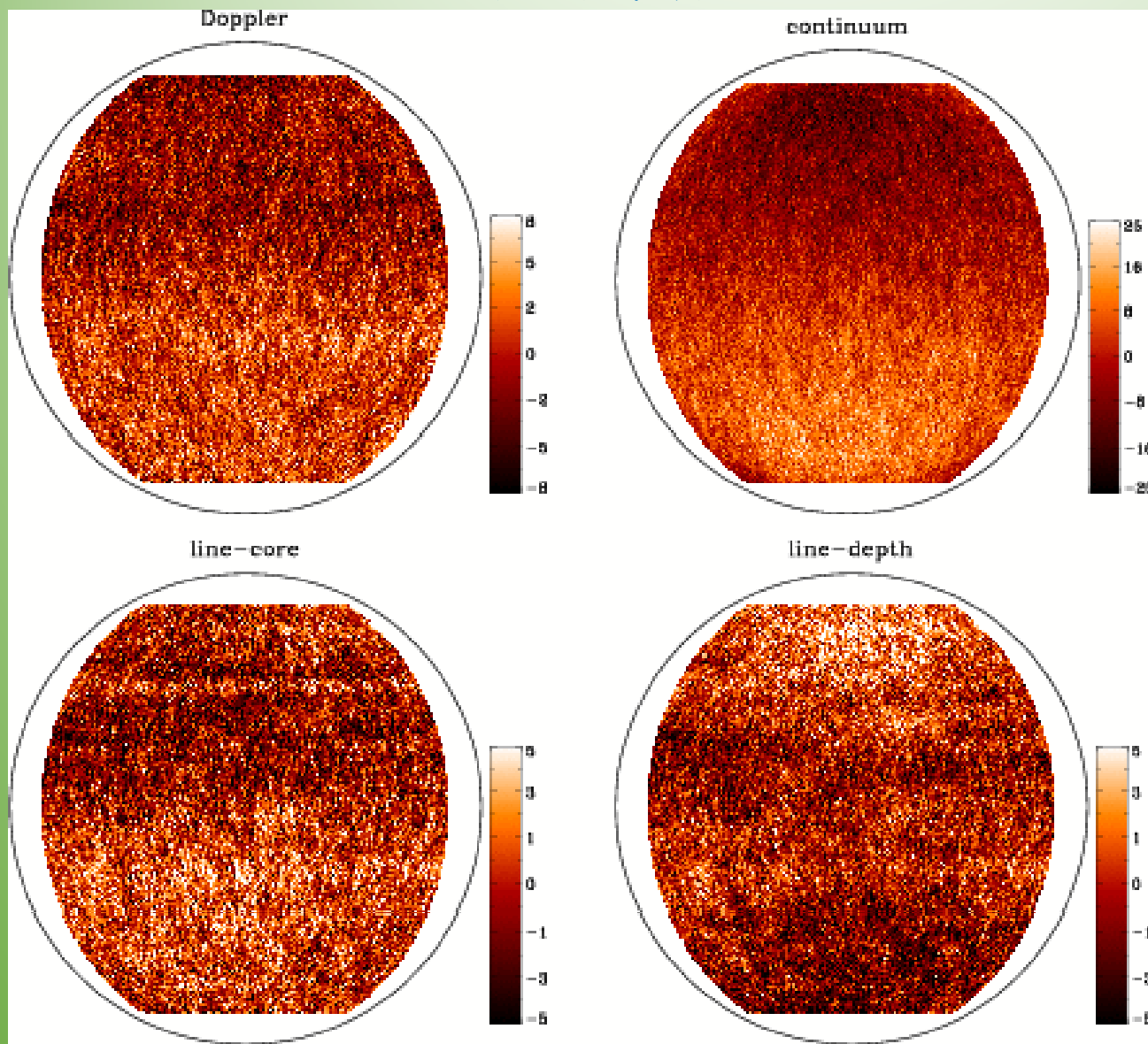
(Dikpati & Gilman, 2006, *ApJ*)

根据发电机理论，单胞子午环流中表面的极向流场把磁流带向极区，然后带入太阳内部对流层的底端，然后逐渐移向赤道方向，成为新的太阳磁活动周期的磁种。

# 太阳内部子午环流是否是单胞呢？

- 直到2013年之前，并没有观测事实支持单胞环流。
- 局地日震学(具体地，时距日震学[time – distance helioseismology])的观测结果一直困扰着我们，因为存在很多不自洽的因素。
- 2012年和2013年的两个研究解决了上述问题。

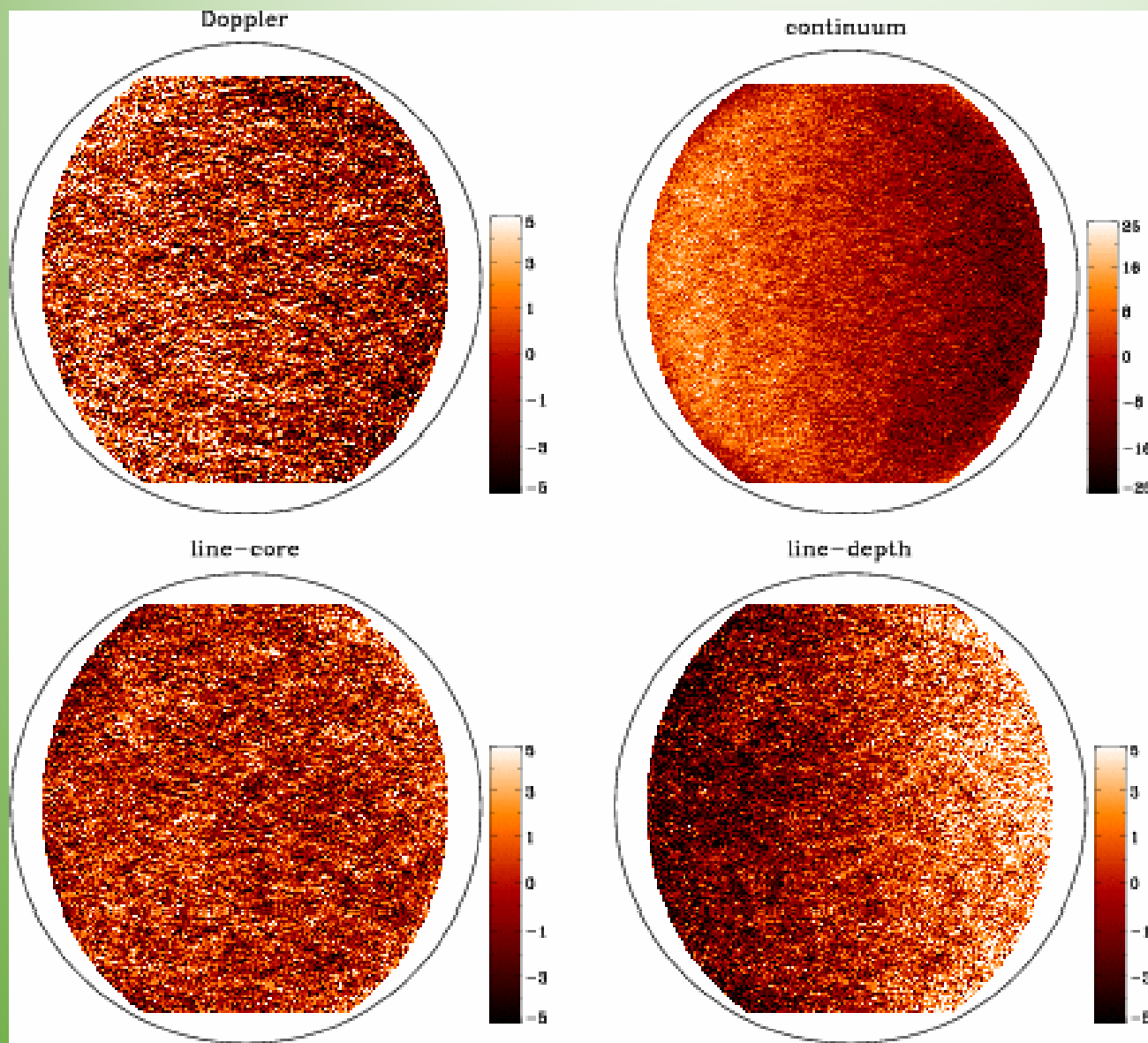
# 使用不同的观测量所测得的 南北方向声波传播时间图



南北向传播时间对应着太阳内部的子午流。理论上，使用不同的观测量进行测量，应该得到相同的结果。而事实远非如此。我们甚至发现它们不仅数值上有差异，甚至符号都有所不同。

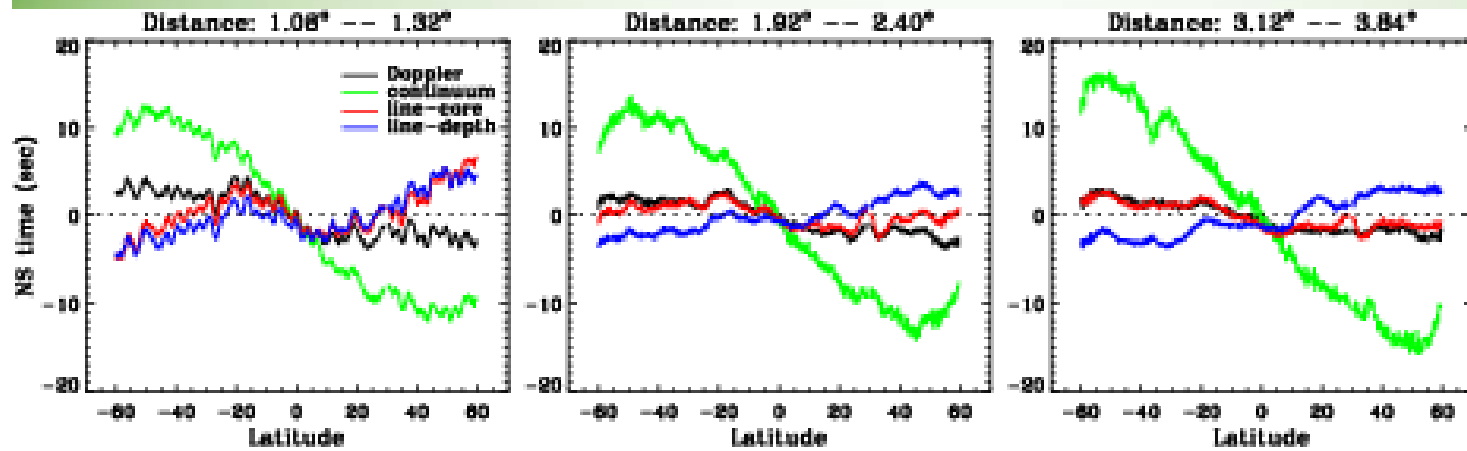


# 使用不同的观测量所测得的 东西方向声波传播时间图



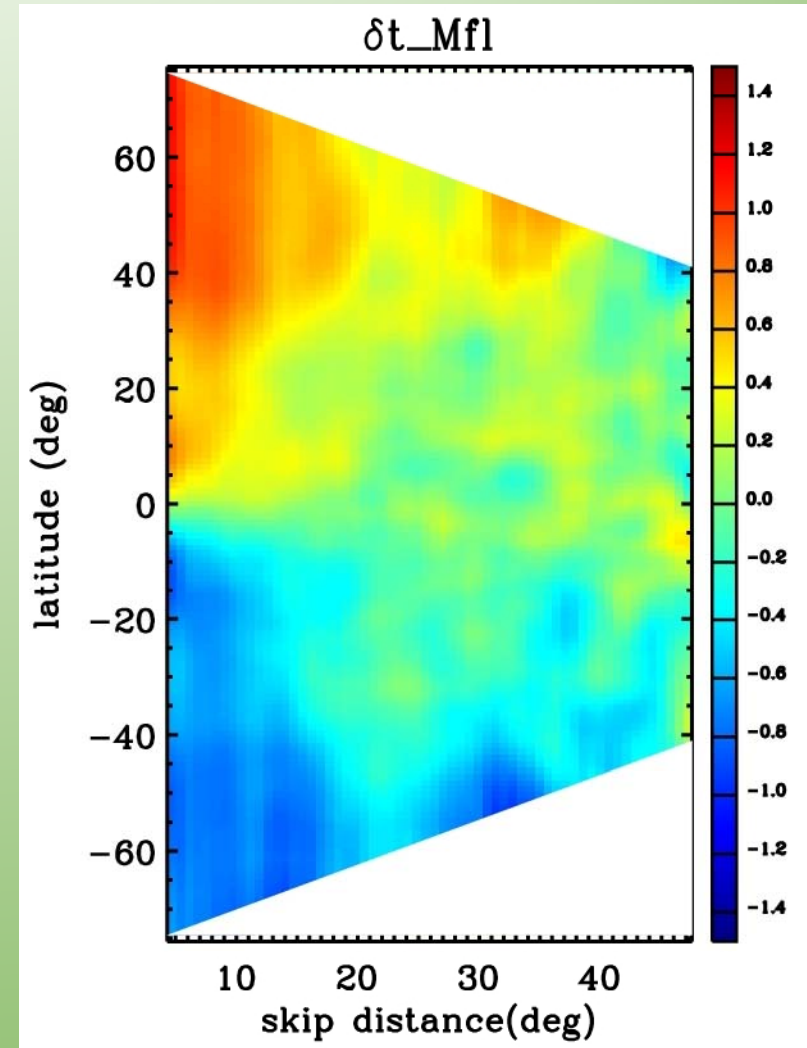
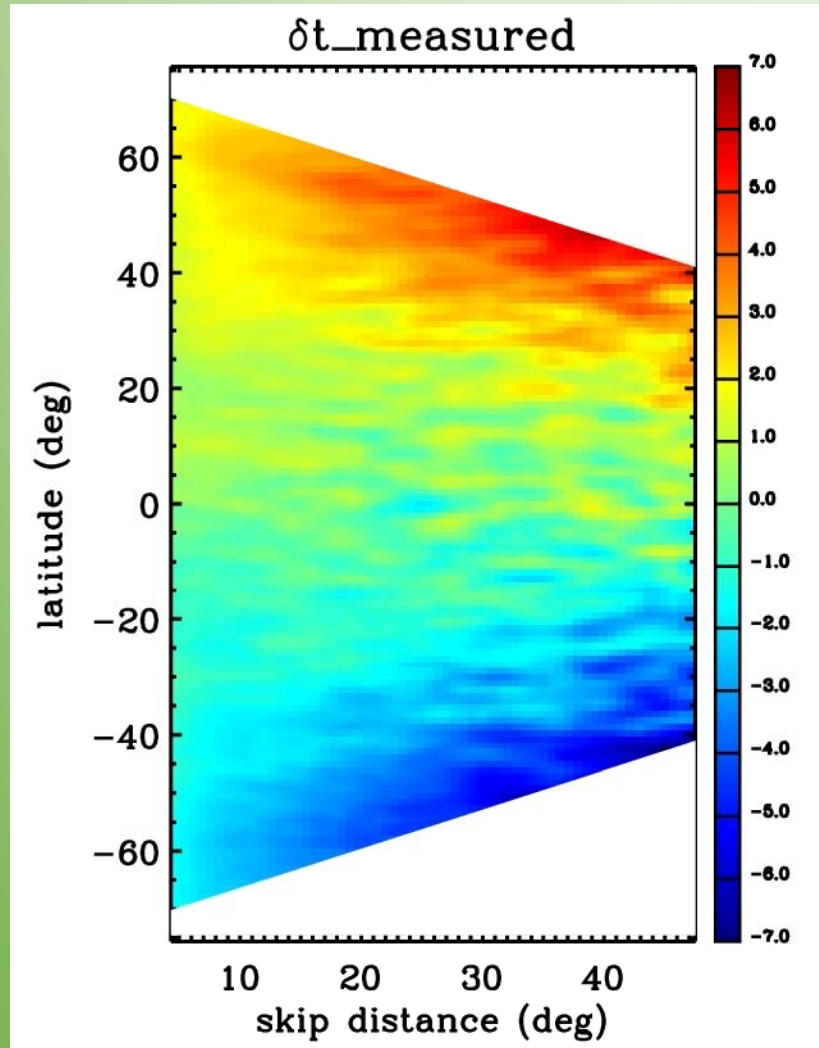
东西向的声波传播时间对应着太阳内部的转动。在同一纬度，我们应该期待数值是相同的。但事实远非如此。



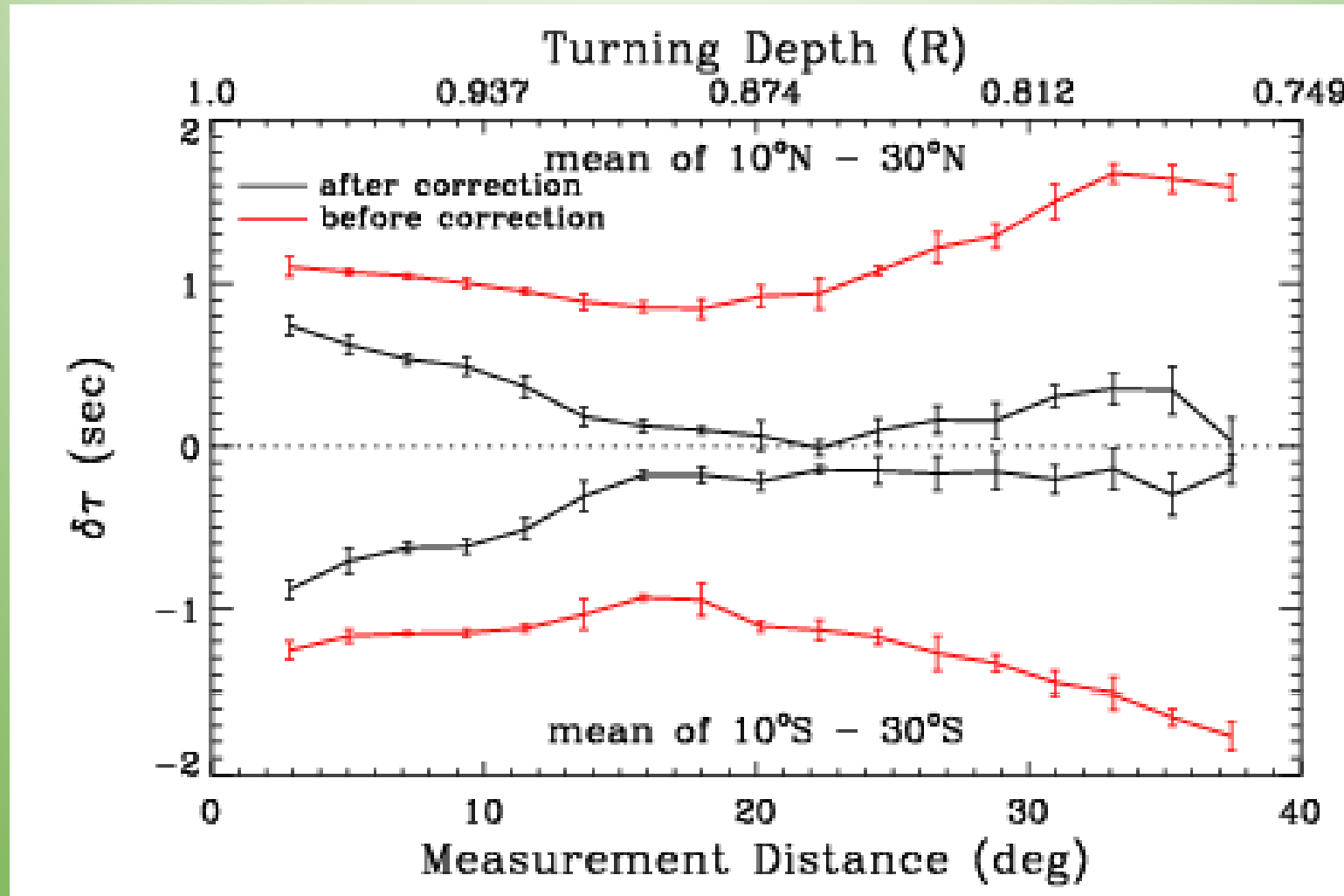


我们如果以沿赤道的东西向传播时间作为center-to-limb effect的代理，将其从南北向的测量中减去，则会发现，不同观测量之间的结果可以吻合。

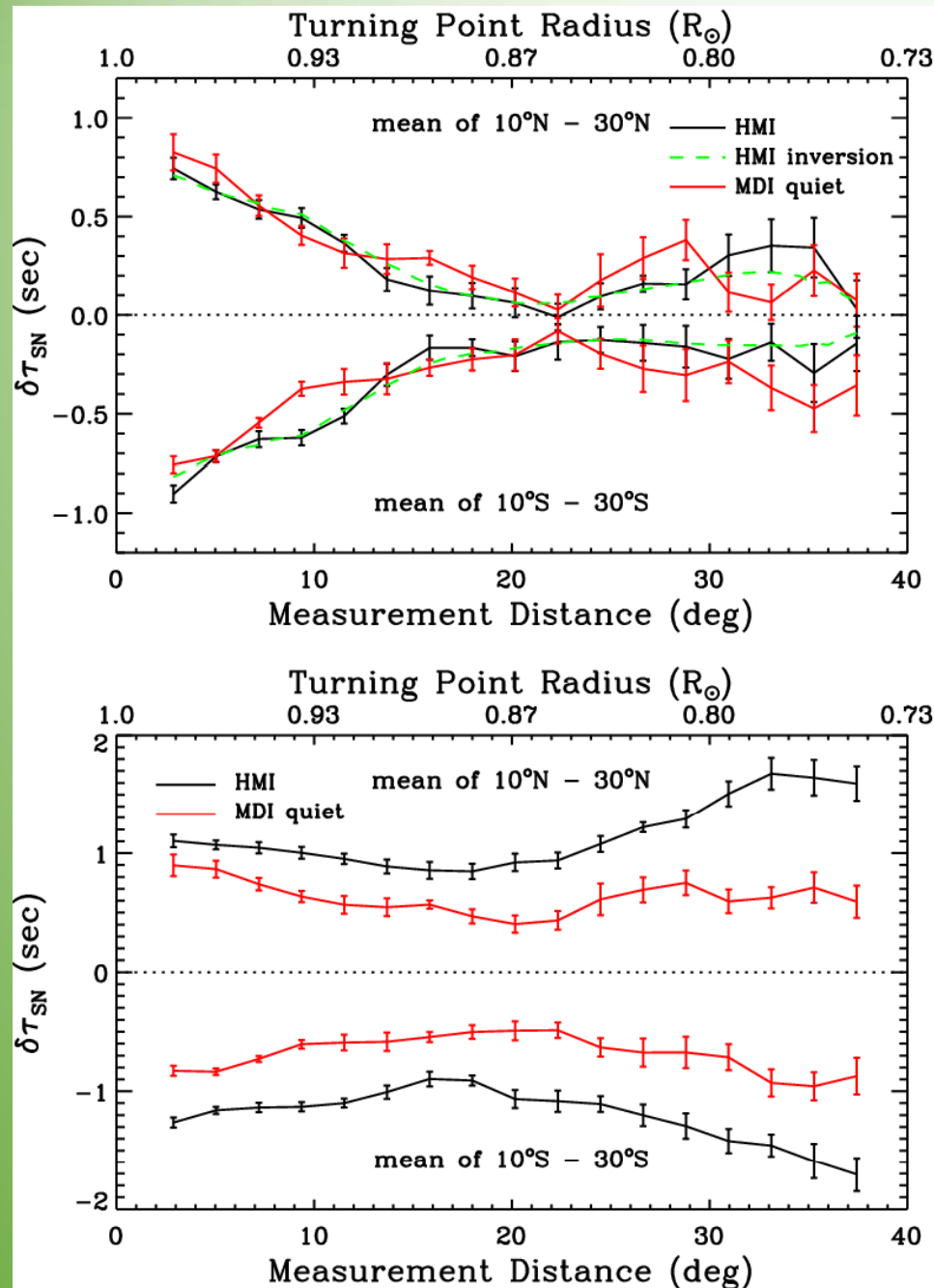
# 所测量的传播时间校正前后比较



# 南北向传播时间: center-to-limb effect 修正前后对比

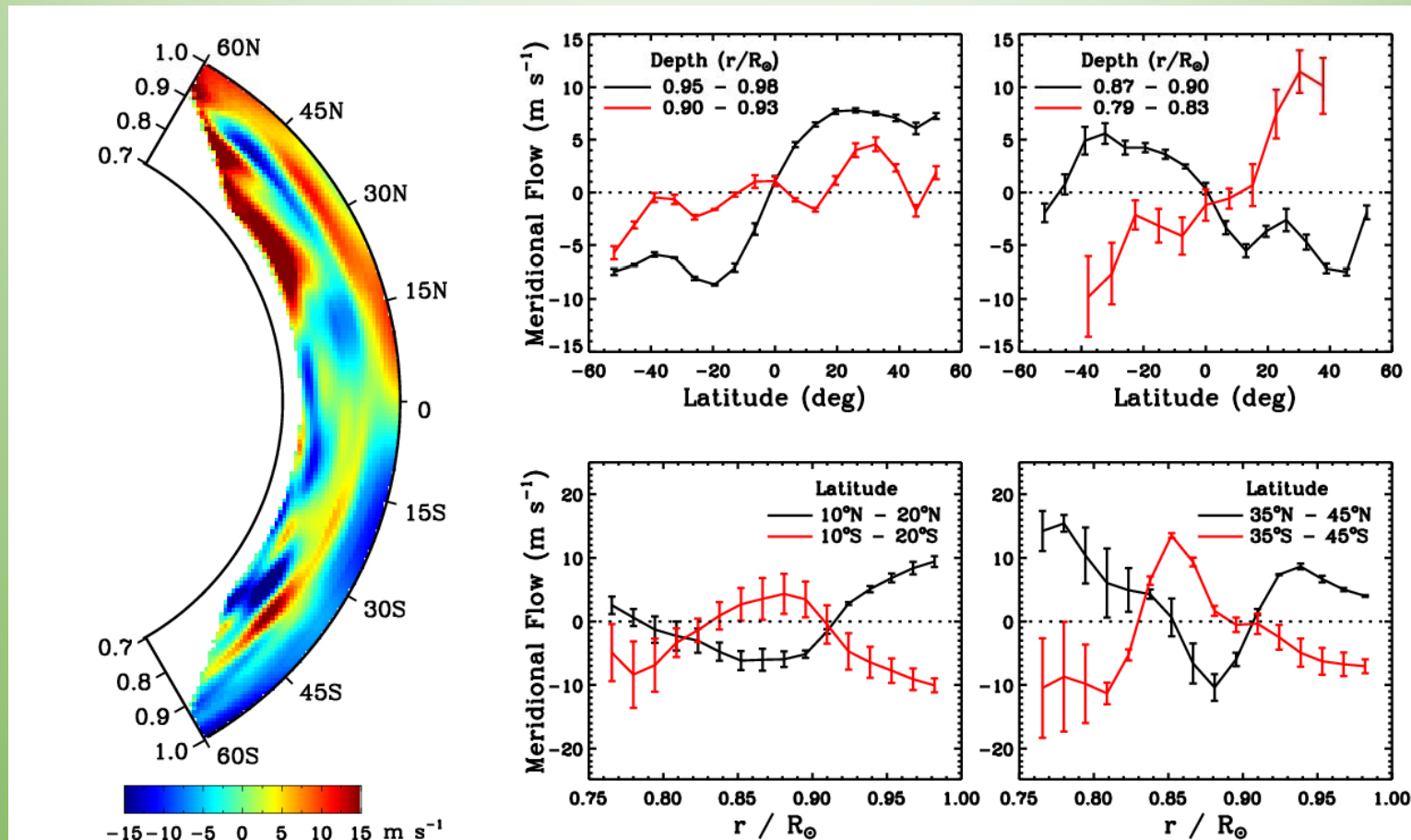


# Comparing with MDI Dynamic Campaign Data



It is remarkable that the original measurements from HMI and MDI are very different, but after the systematic effect correction, the results become similar.

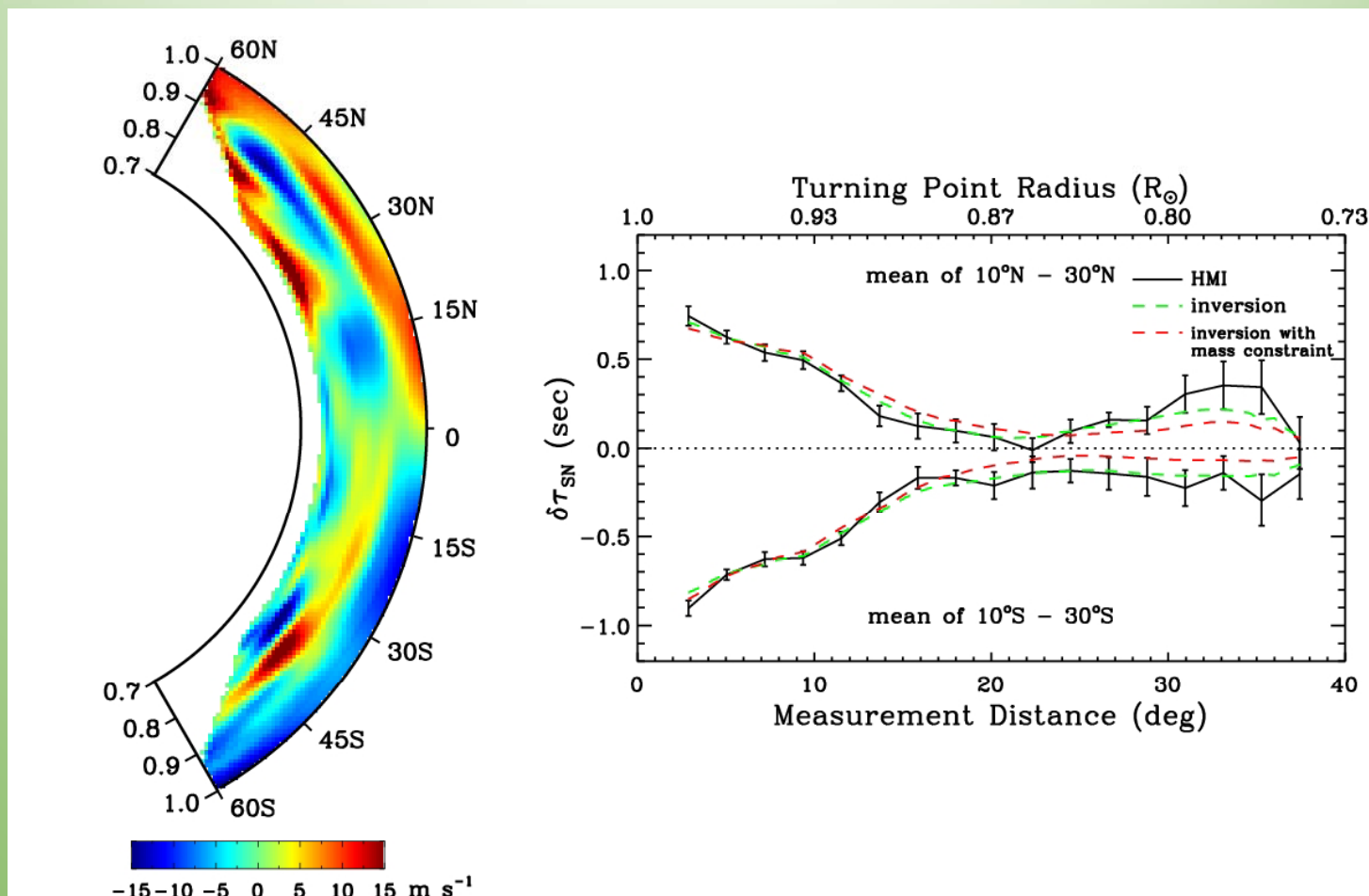
# 利用传播时间反演所获得的速度场结果



我们的结果表明，太阳内部子午流分成三层，顶部及底部为极向，中部为赤道向。这三层子午流形成双胞胎环流，或者多于双胞胎。

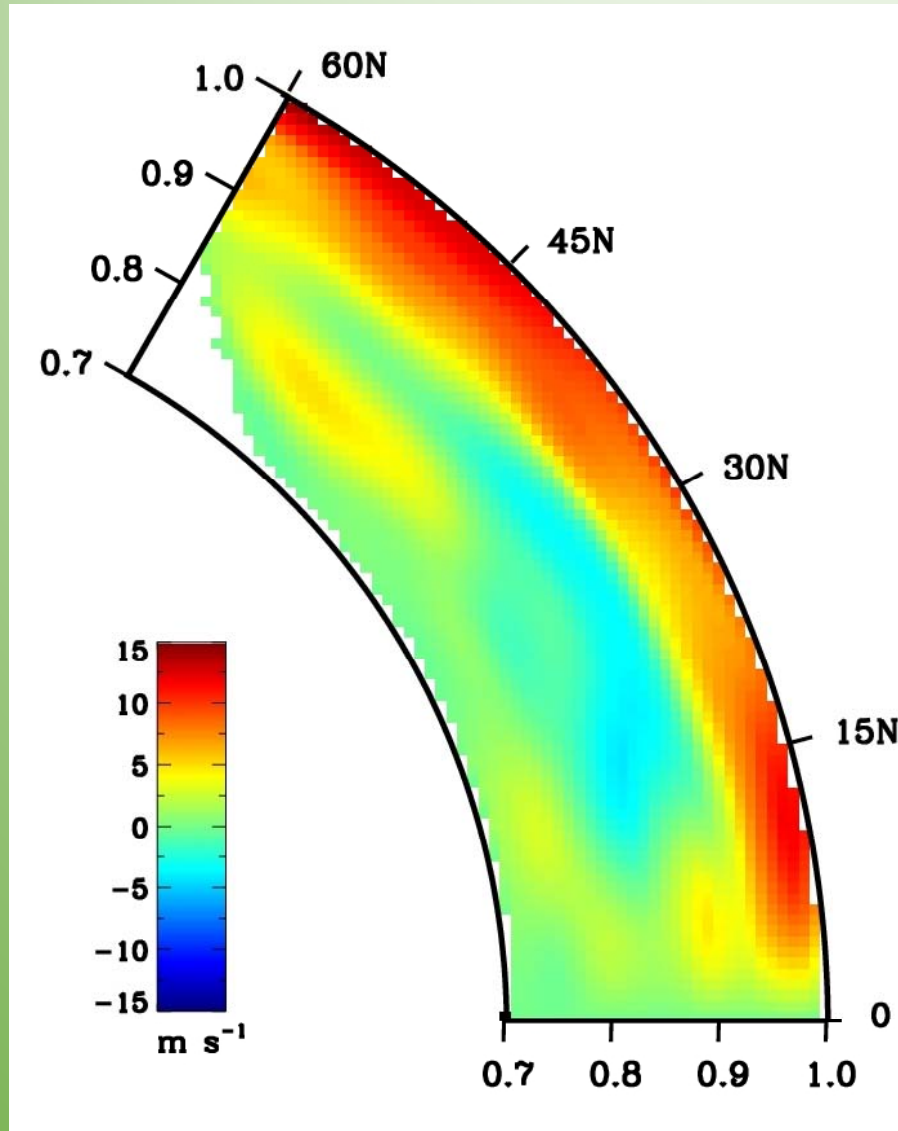


# 质量守恒问题



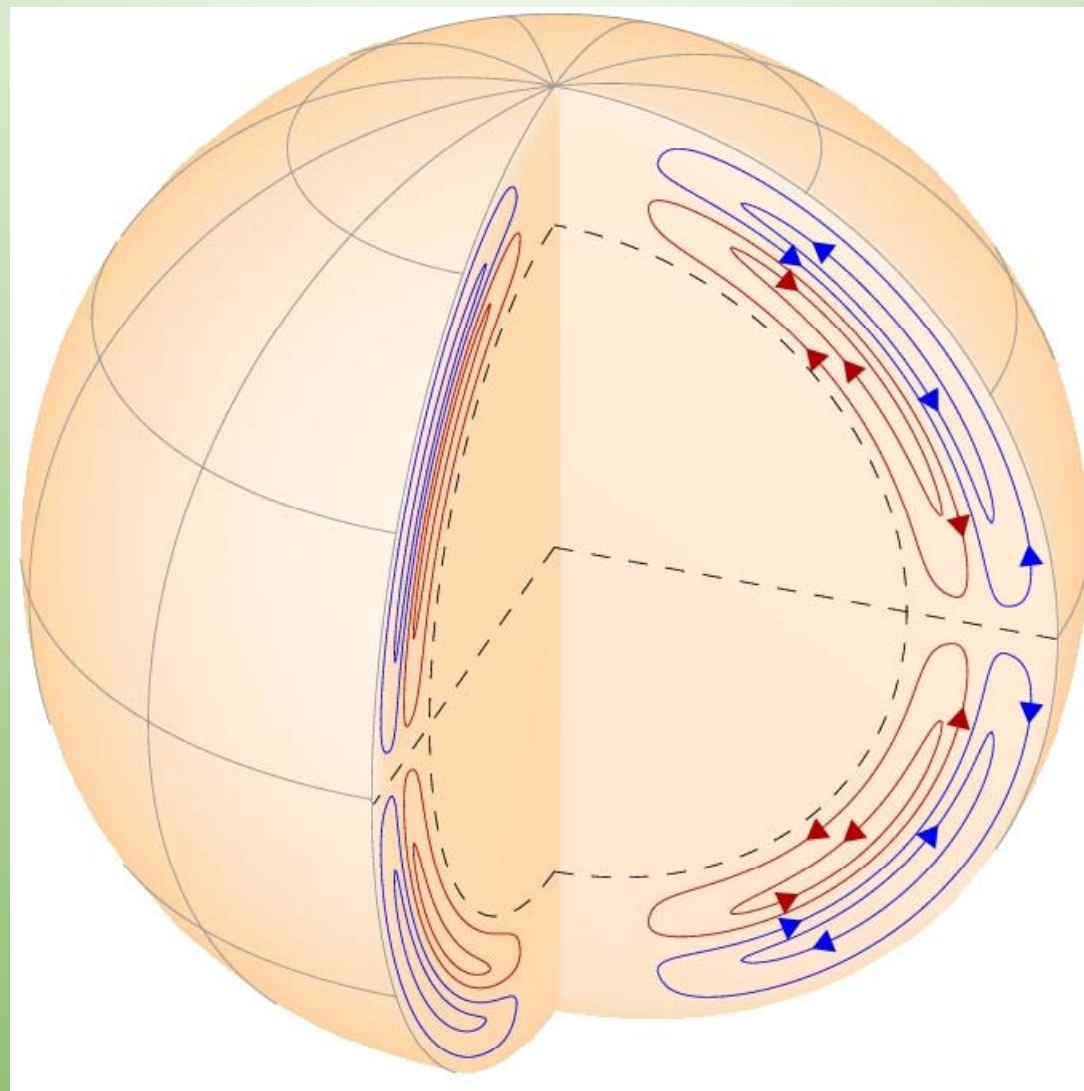
有人提出我们上述结果可能存在质量不守恒问题，我们把质量守恒方程作为一个限制条件重新做反演，得到上述结果。在完全符合质量守恒与完全符合日震学测得的传播时间之间，必须做出适当的取舍。

# 最新子午流结果



Chen & Zhao (2017, under preparation) 采用了更复杂的更完备的时距日震学测量, 综合HMI六年的观测, 得到了最新最可靠的结果。

# 太阳子午环流的双胞模型



# 双胞模型的影响深远：对 flux-transport dynamo model

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 782:93 (12pp), 2014 February 20  
© 2014. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

doi:10.1088/0004-637X/782/2/93

## IS A DEEP ONE-CELL MERIDIONAL CIRCULATION ESSENTIAL FOR THE FLUX TRANSPORT SOLAR DYNAMO?

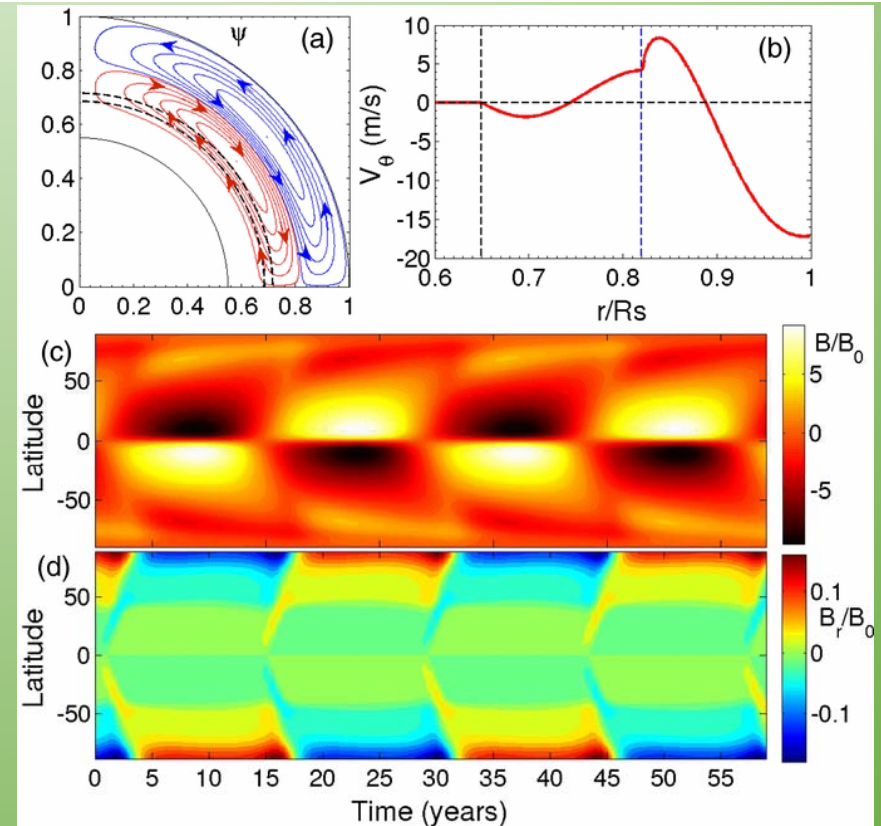
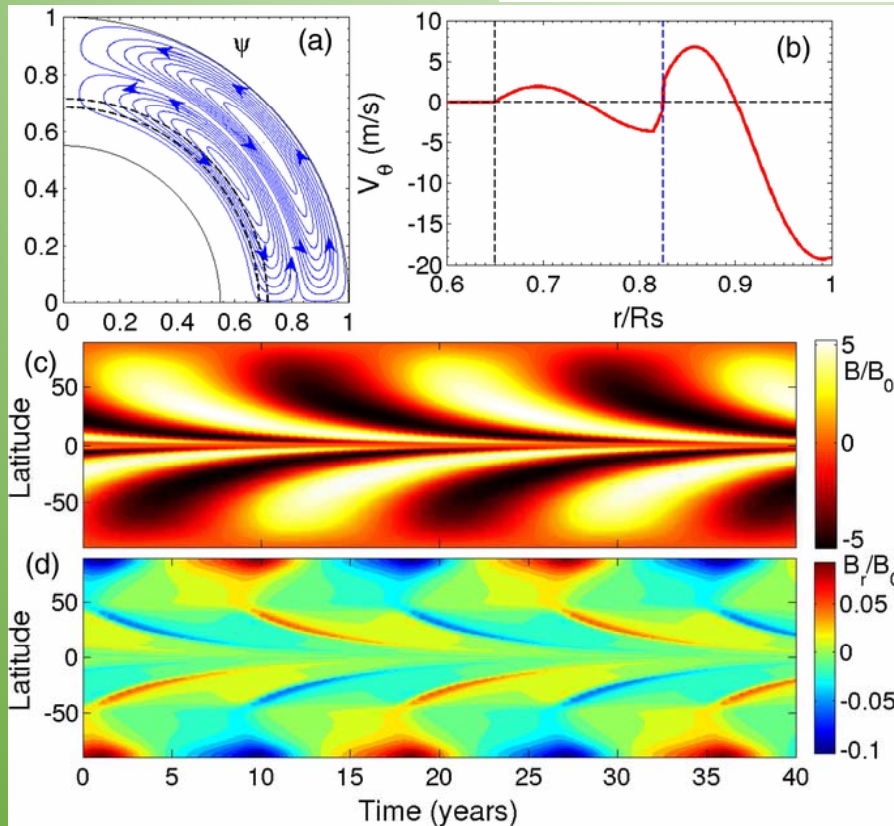
GOPAL HAZRA<sup>1,2</sup>, BIDYA BINAY KARAK<sup>1,3</sup>, AND ARNAB RAI CHOUDHURI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Indian Institute of Science, Bangalore 560012, India; [ghazra@physics.iisc.ernet.in](mailto:ghazra@physics.iisc.ernet.in)

<sup>2</sup> Indian Institute of Astrophysics, Bangalore 560034, India

<sup>3</sup> Nordita KTH Royal Institute of Technology and Stockholm University, Roslagstullsbacken 23, SE-106 91 Stockholm, Sweden

Received 2013 September 10; accepted 2013 December 17; published 2014 February 3



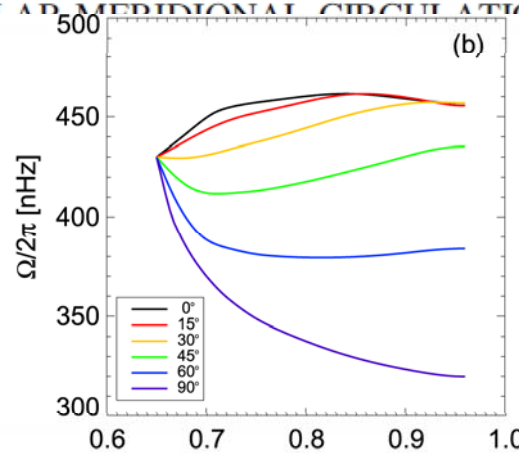
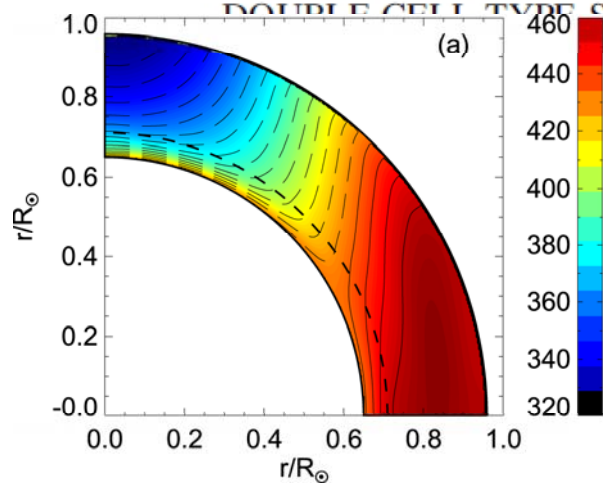


# 双胞模型的影响深远： 对全球对流模型

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 835:9 (14pp), 2017 January 20

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/1538-4357/835/1/9

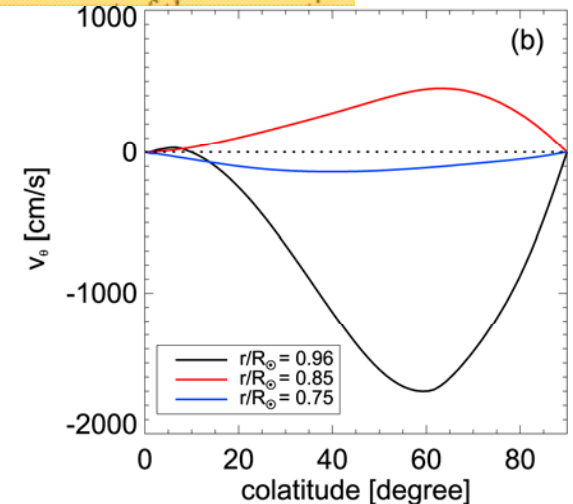
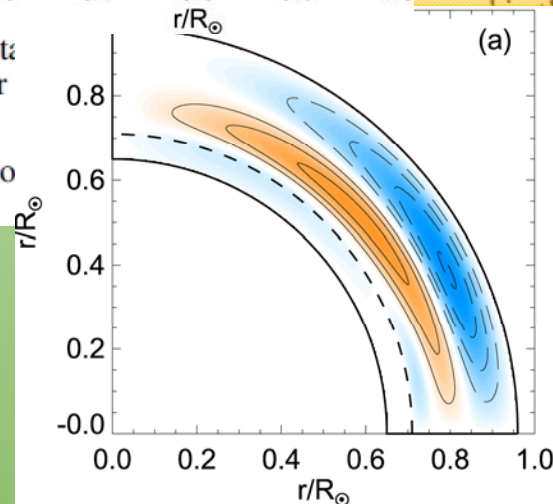


yo-ku, 113-0033, Japan; [bekki@eps.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:bekki@eps.s.u-tokyo.ac.jp)  
ember 29; published 2017 January 16

ve part of the Reynolds stress for driving  
s been revealed by recent helioseismic  
tions, we confirm for the first time that  
e differential rotation when the Reynolds

zone. It is concluded that in a stationary st  
middle layer is advected to both the upper  
circulation cells, respectively.

Key words: convection – Sun: helioseismo



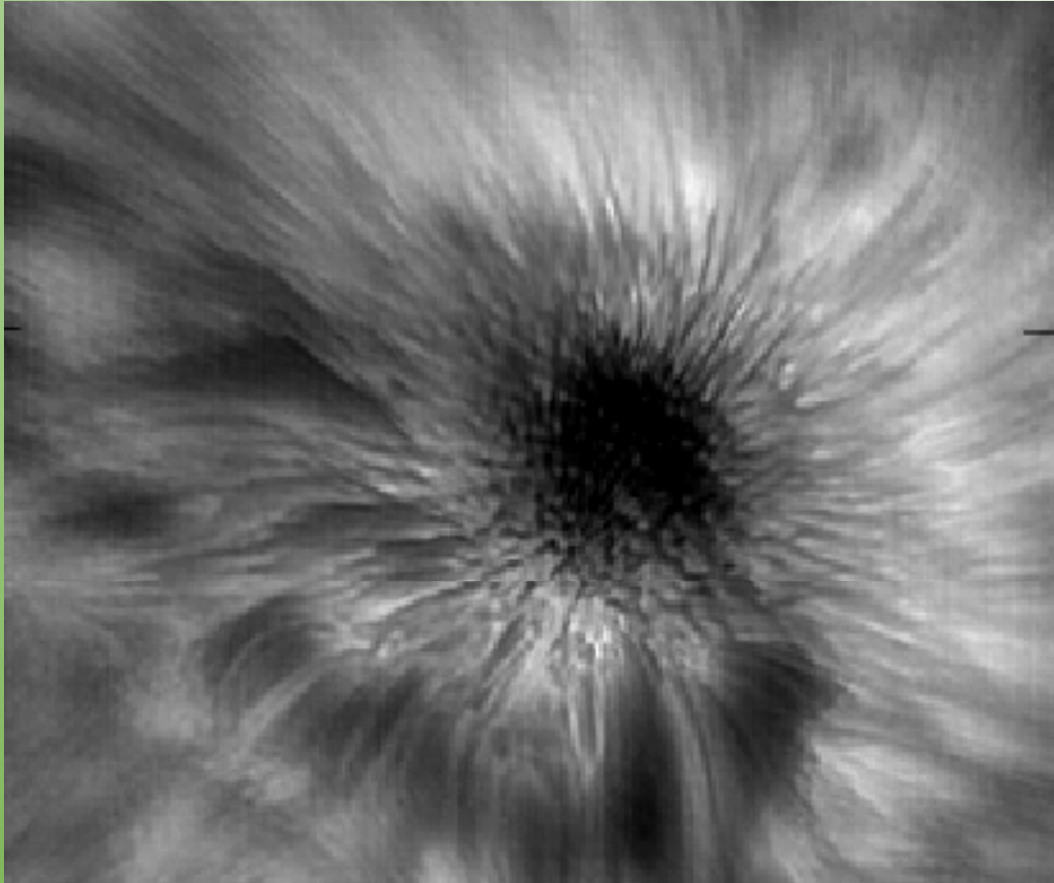


## 第二节小结

- 我们发现了一个日震学分析中的系统误差，并提出了一个经验校正方法。
- 在校正了我们的分析数据之后，我们获得了双胞的太阳子午环流，质疑长期存在的但从未有过观测证据支持的单胞环流模型。
- 这一结果对如何理解太阳发电机理论，理解内部的对流，以及太阳较差自转及子午流的形成原因形成了挑战。

### 三、光球层的日震波与高层大气中的磁声波的联系

# 黑子上方色球层中的Running Penumbral Waves

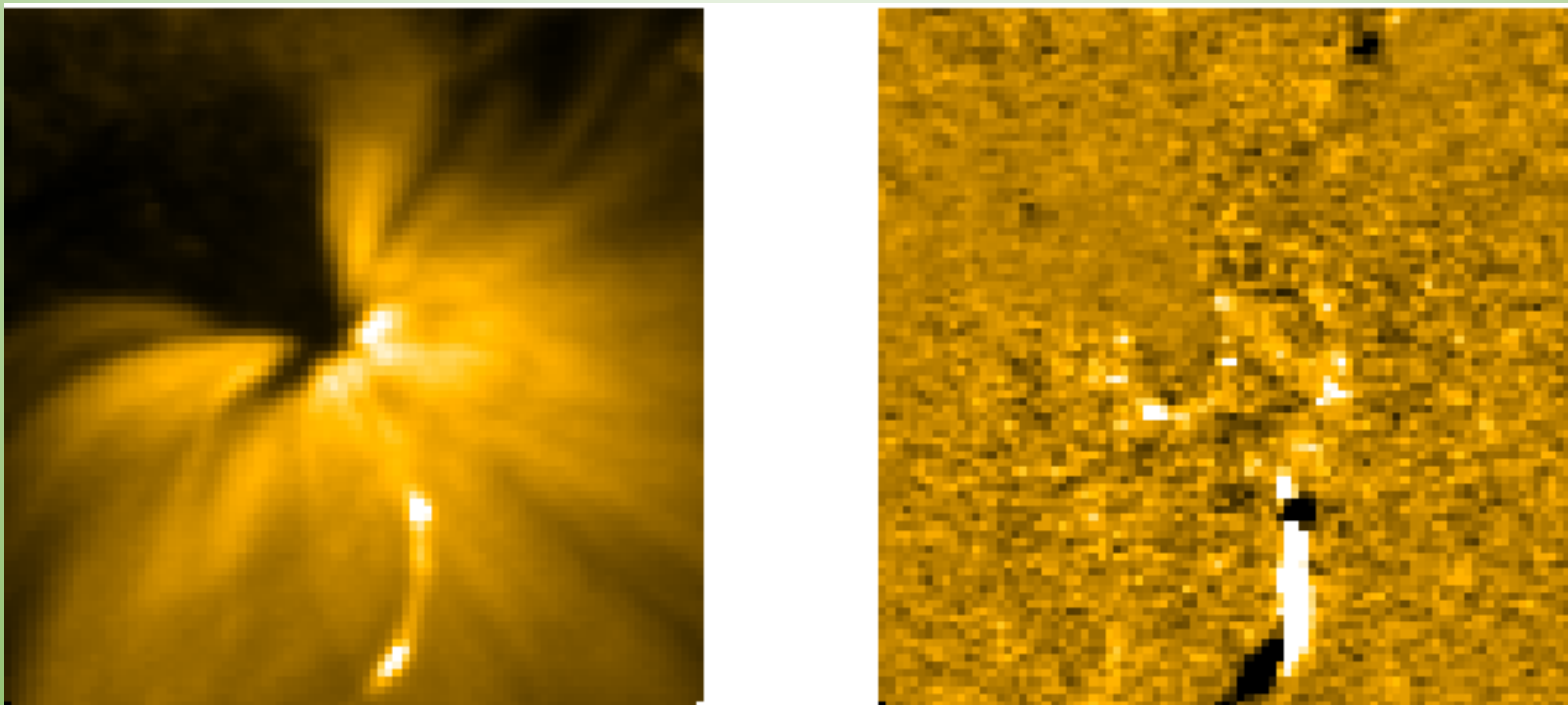


H $\alpha$  observation at BBSO

Running penumbral waves (RPWs) 是色球层中广为人知的现象(Giovaneli 1971; Zirin & Stein1972). 这种波的常见传播速度为10-25 km/s.

近年来, Bloomfield et al. (2007) and Jess et al. (2013)认为PRWs是磁声波沿着有倾角的磁力线向上传播时在横向上的投影。

# 低日冕中的磁声波

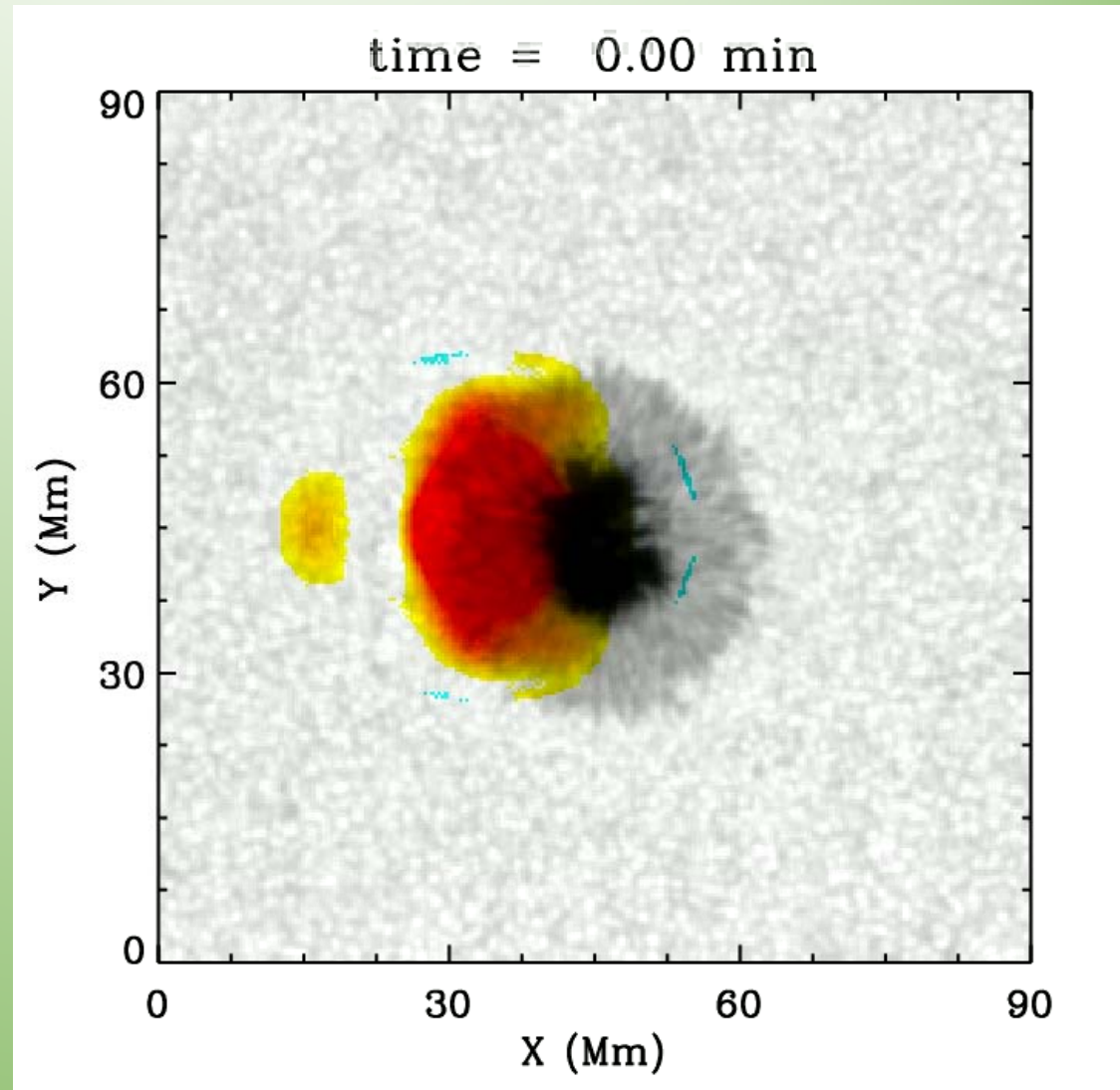


这些在日冕环中轻易可见的波通常被认为是磁声波，尽管有些人持反对意见。同色球层的波一样，很多人认为它们源自于光球层，但光球层却从未观测到对应的现象。

# 黑子区光球层的fast-moving waves

右图中可见两种不同的波，起初沿黑子径向的为fast-moving waves，后面向所有方向传播的为日震波。

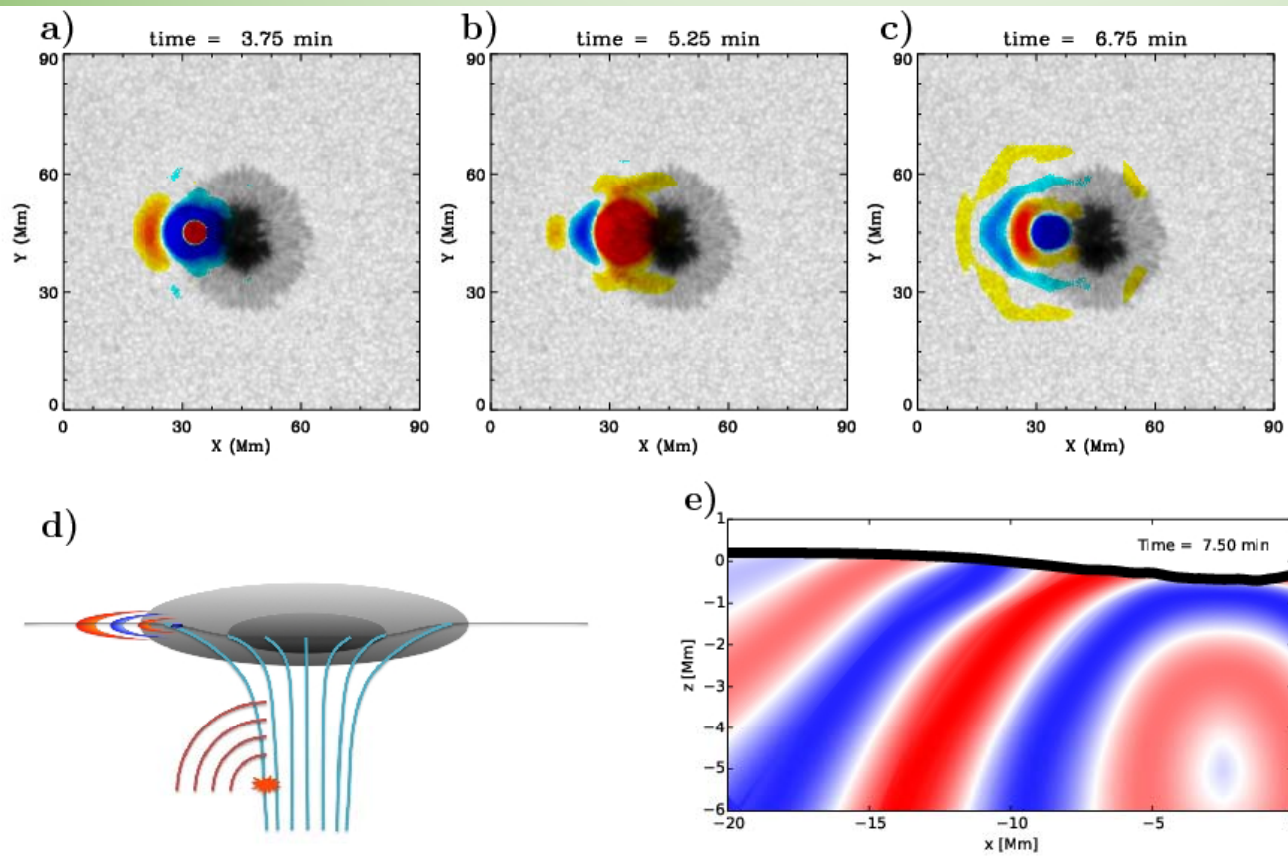
从本质上来讲，fast-moving waves也是日震波，只是它出现的较早，传播速度较快而已。



(Zhao, Chen, & Hartlep 2015, ApJ Lett)



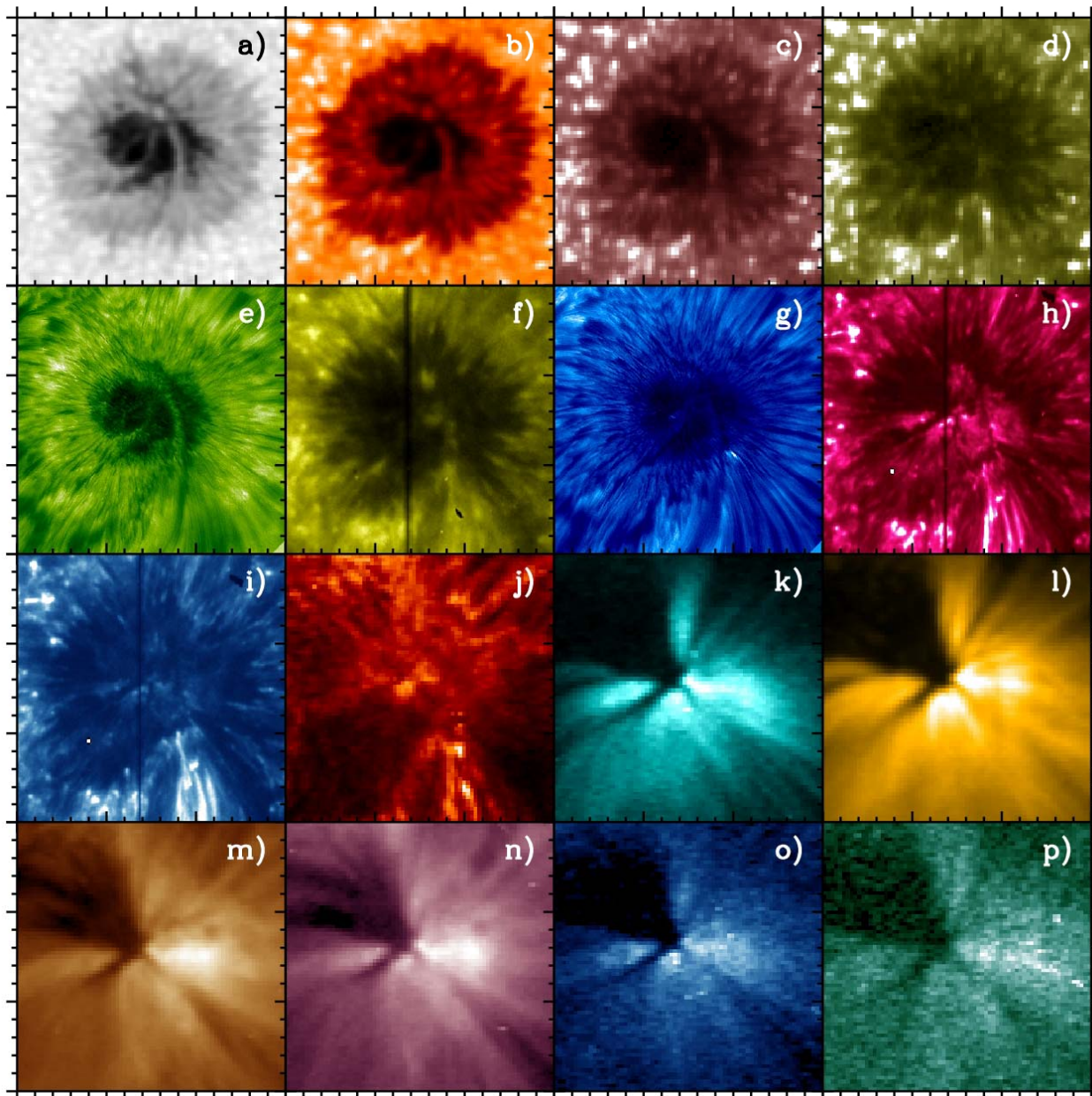
# 这种快速传播的波被解释为源自黑子下方



这种波不仅在HMI多普勒速度场中可以观测到，在HMI亮度数据以及AIA的 $1600\text{\AA}$ 亮度数据中也可以观测到。有些情况下，不需要特殊处理，仅看录像即可以看到。

我们把这种波解释为源自于黑子下方，但其本质上依然是日震波，或者声波，或者磁声波。这样可以完美地解释其在光球层的视速度。

# 一个黑子区的多波段观测



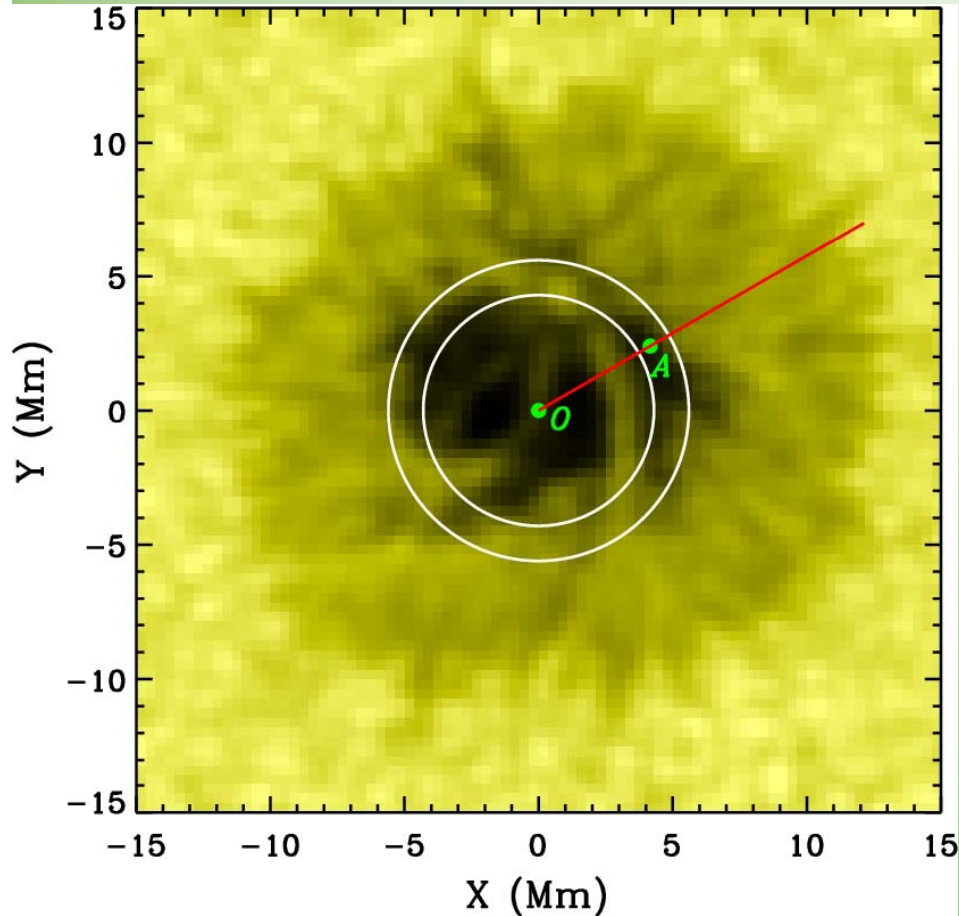
From lower atmosphere to higher:

- a) HMI continuum intensity;
- b) HMI line-core intensity;
- c) AIA 1700Å;
- d) AIA 1600Å;
- e) BBSO H $\alpha$  - 0.4Å;
- f) IRIS Mg II 2796Å;
- g) BBSO H $\alpha$  center;
- h) IRIS C II 1330Å;
- i) IRIS Si IV 1400Å;
- j) AIA 304Å;
- k) AIA 131Å;
- l) AIA 171Å;
- m) AIA 193Å;
- n) AIA 211Å;
- o) AIA 335Å;
- p) AIA 94Å.

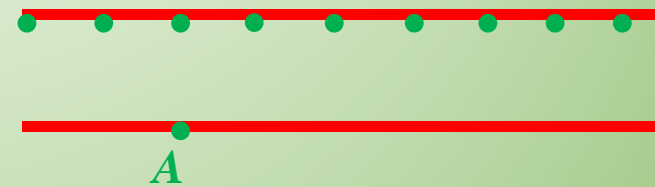
- 这个黑子位于活动区NOAA 11836，所分析的时间段为2013年9月2日17:22 UT – 18:06 UT。全部观测时间仅为45分钟。但是这已经是能找到的包含所有观测波段的最好数据了。
- 各个波段的空间分辨率不尽相同，因此需要把所有数据插值到同一分辨率，然后数据对齐。
- 各个波段的时间分辨率也不相同。我们以AIA 1600Å 数据的时间为准，其它观测全部插值到这个时间坐标上。时间间隔为24秒。



# 分析方法

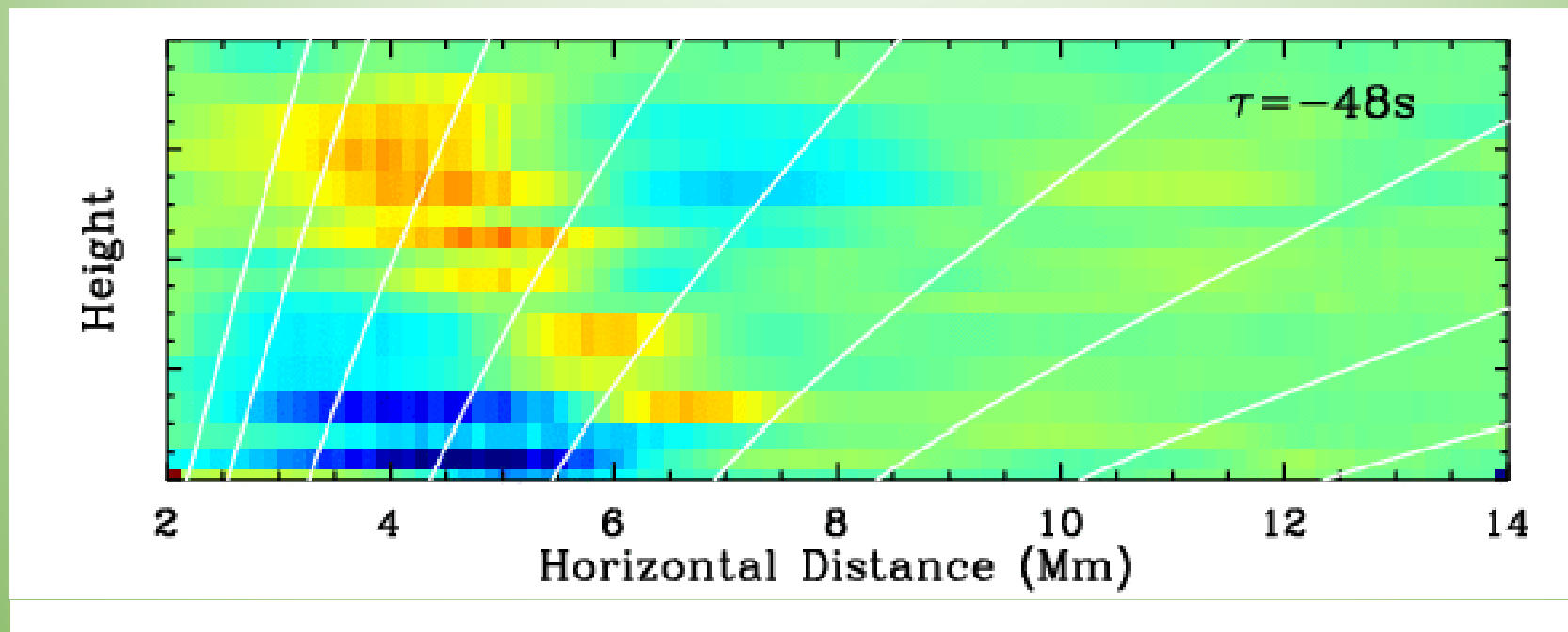


$$\text{Corr}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, d, \tau) = \int_0^T \psi(\mathbf{r}_1, 0, t) \psi(\mathbf{r}_2, d, t + \tau) dt,$$



我们采用时距日震学中常见的不同高度的互相关分析方法。这种方法可以重构波如何从低层大气传到高层大气。

# 高频磁声波的向上传播



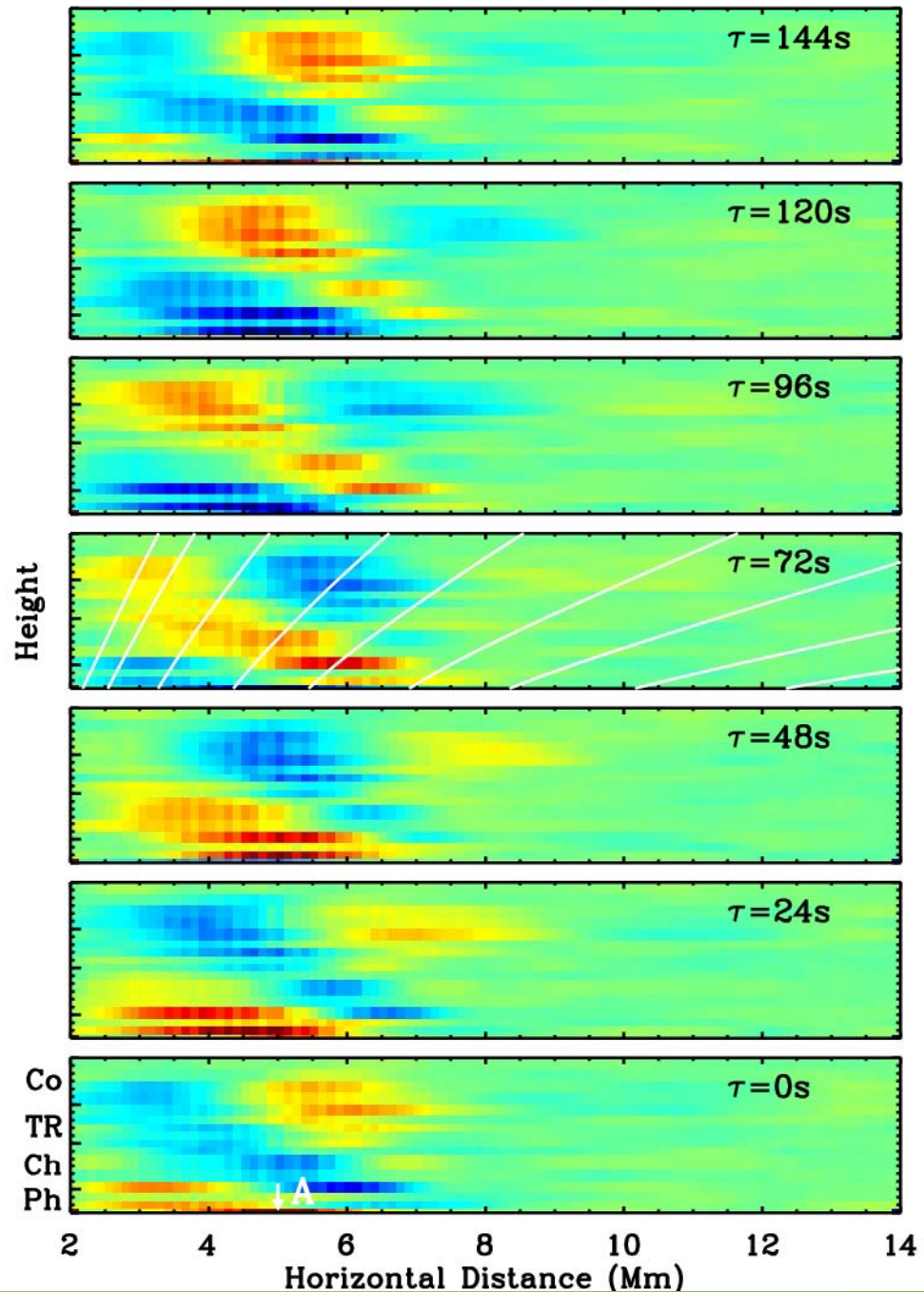
横坐标为相对于黑子中心的距离，参考点位于 (5Mm, 0Mm)。  
白线是利用活动区势场外推出的磁场结构。



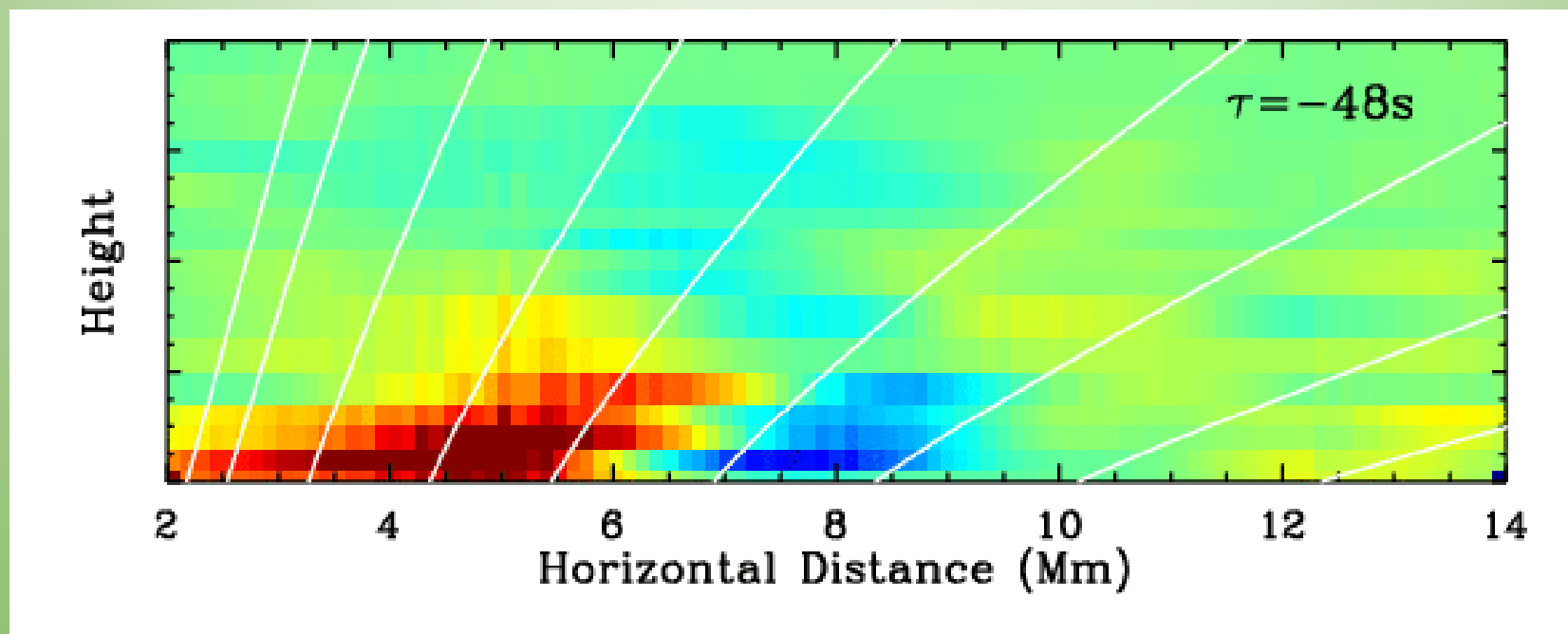
# 高频磁声波的向上传播

波前形成一个倾斜的锋面，斜着向上传播。

其传播方向是否沿着磁力线有待进一步确认分析。



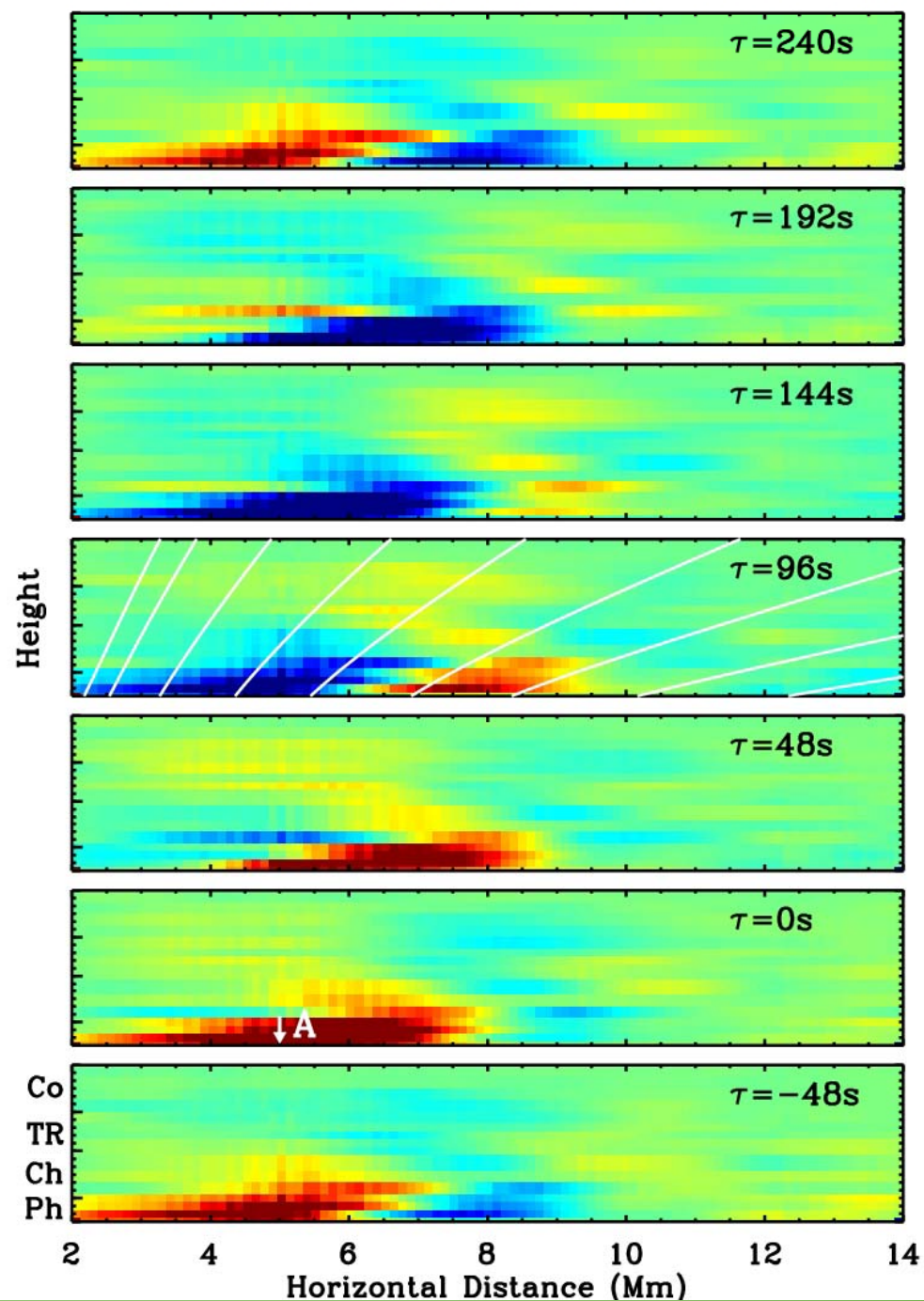
# 低频磁声波的向上传播



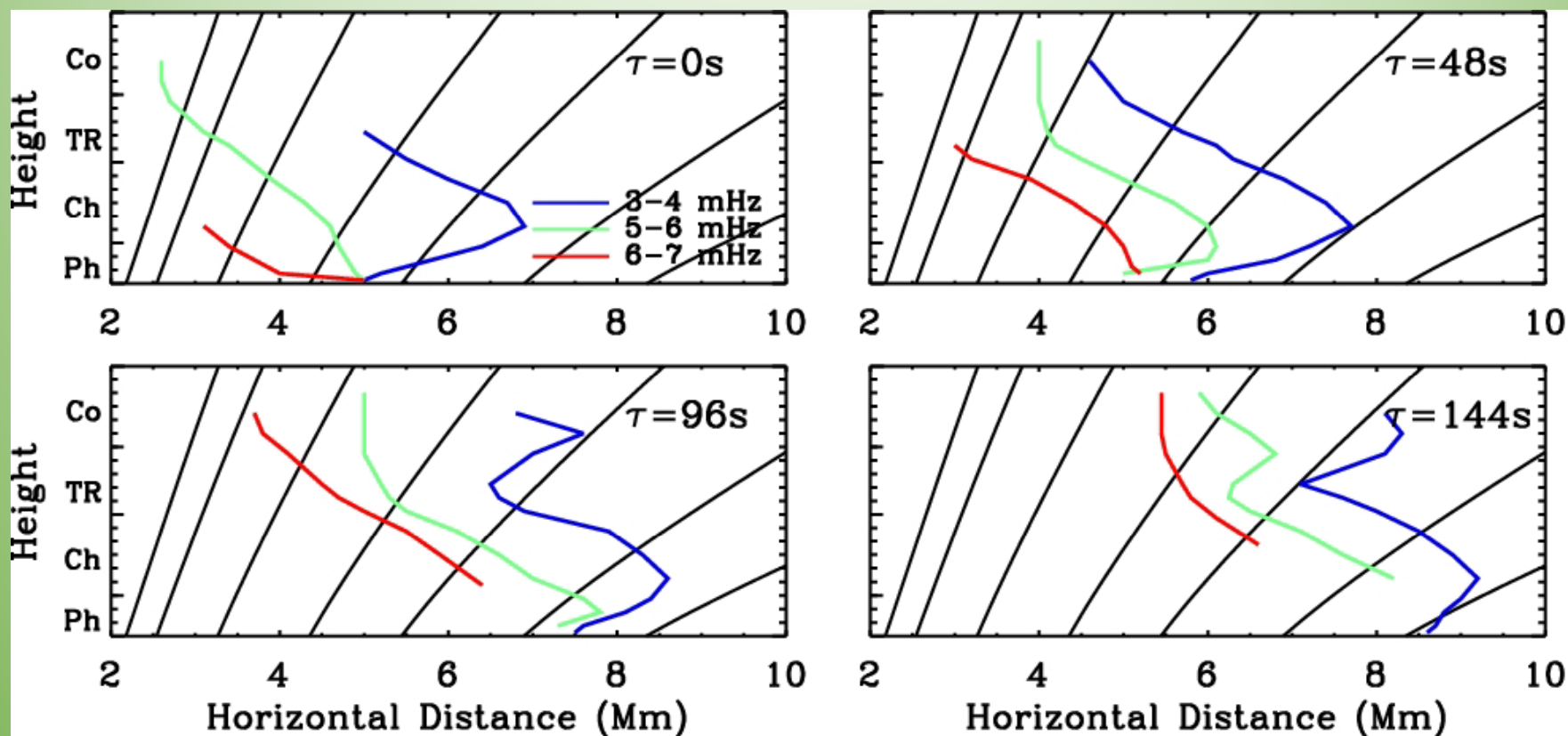
横坐标为相对于黑子中心的距离，参考点位于 (5Mm, 0Mm)。  
白线是利用活动区势场外推出的磁场结构。

# 低频磁声波的向上传播

1. 低频磁声波看起来主要沿着横向传播；
2. 起初，波前形成一个反C形状，而后来，则形成了一个S形，表面日冕层的横向速度比光球及色球层要快。
3. 这些图像表面，部分上传的声波在色球层被反射回来，部分渗透到色球层以上，形成渐逝波。



# 比较不同频率的波前形状

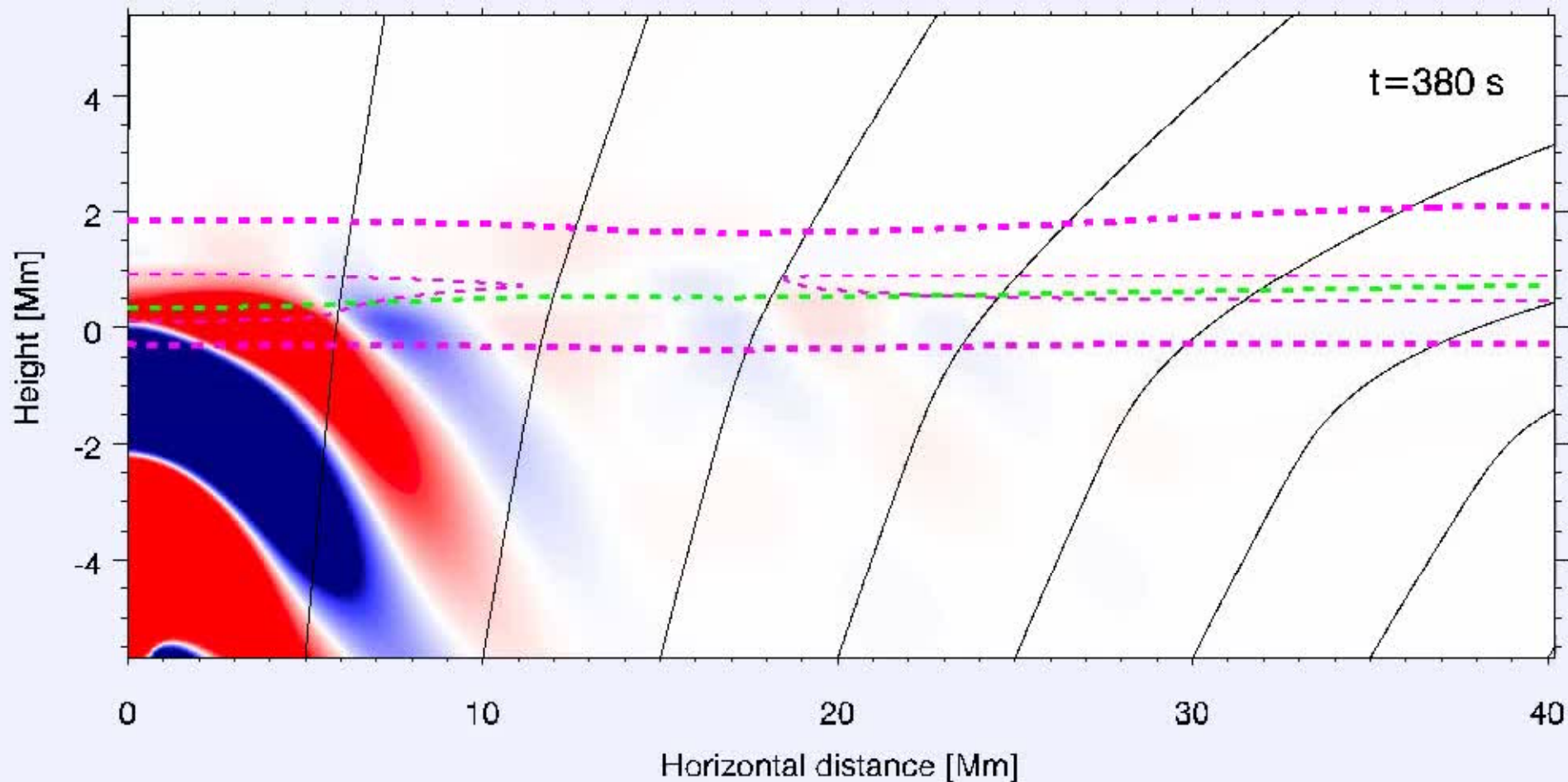




为了更好的理解观测现象，我们做了二维的磁声波的数值模拟。

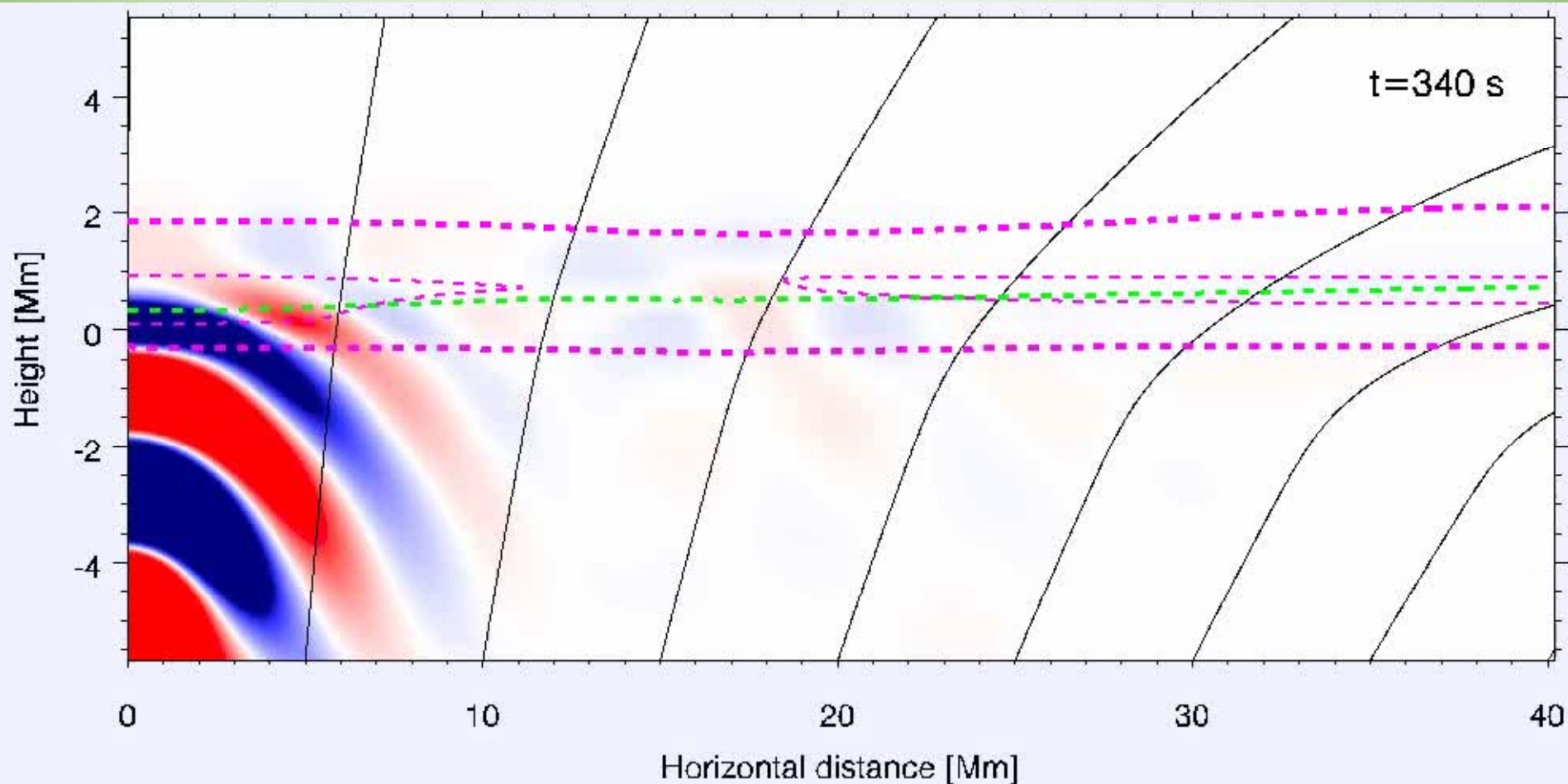


## 数值模拟：低频 3 – 5 mHz



在此模拟中，波源位于黑子下方7Mm处。绿色线段表明  $\beta=1$  层，紫色粗线（细线）表明3 mHz (5mHz)的cutoff 频率。

## 数值模拟：高频 5 – 7 mHz



在此模拟中，波源位于黑子下方7Mm处。绿色线段表明  $\beta=1$  层，紫色粗线（细线）表明3 mHz (5mHz)的 cutoff 频率。

# 第三节小结：

- 我们的观测分析表明，光球层，色球层，和日冕中黑子上方观测到的磁声波(或者日震波)其实是为同一种波在上传过程中不同层次的不同表象。
- 我们首次清晰展示了磁声波如何在黑子上方的大气中进行传播。我们还观测到低频波在色球层的反射，在日冕层变成渐逝波；高频波形成一个倾斜的锋面，似乎沿着磁力线传播，在日冕层中也变成渐逝波。
- 我们的观测清晰表明，色球和日冕中的某些波确实来源于光球层。而这些来自于光球层的日震波与无处不在的日震波并不完全相同，而是源于黑子下方。只有如此才可以跟所有观测现象相吻合。但是为什么在黑子下方有震波的波源，则需要进一步研究确定。
- 这个工作还开辟了日震学与冕震学的结合，使得两者结合起来研究黑子上方的大气结构以及磁场结构成为可能。