



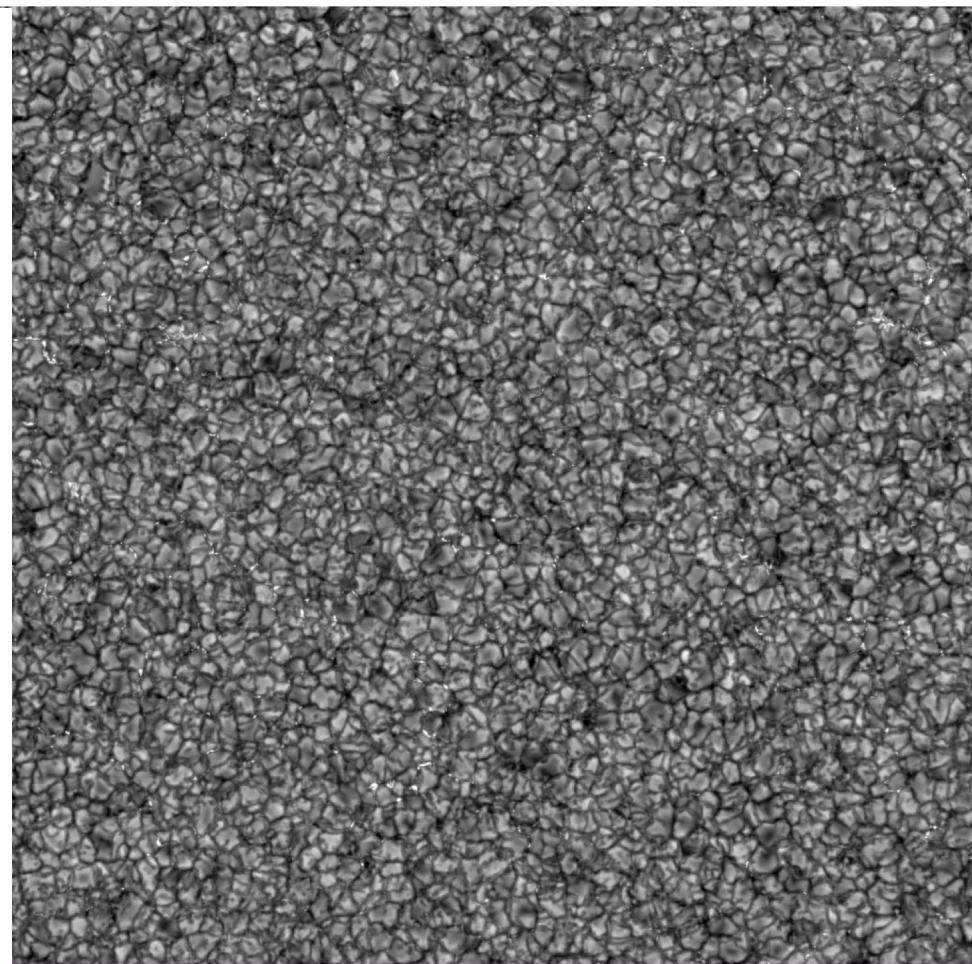
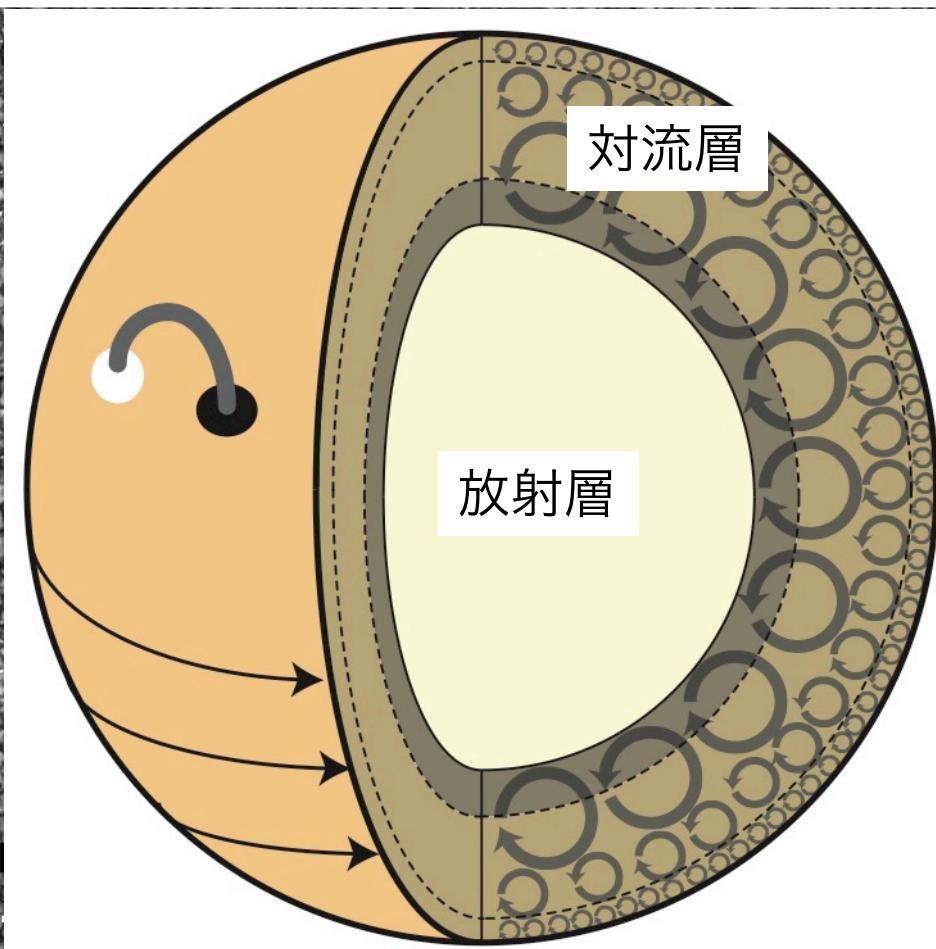
JpGU@幕張メッセ 2018年5月23日

太陽の対流層の底から 彩層下部までの一貫した初めての計算

千葉大学
堀田英之

共同研究者：飯島陽久、草野完也[名古屋大学]

太陽対流層



(Hinode)

太陽対流層計算の難しさ・取扱いに工夫が必要な点

	表面	対流層の底
対流速度	4 km/s	50 m/s
空間スケール	1 Mm	200 Mm
時間スケール	数分	数十日
温度	6000 K	1 MK
密度	$10^{-7} \text{ g cm}^{-3}$	$10^{-1} \text{ g/cm}^{-3}$
光学的厚さ	~1	大きい
擾乱の大きさ	0.1~1	10^{-6}

これまでに太陽対流層を一貫して
解いた数値計算はない

難しさ

1. 大きな密度比(10^6)・温度比(200)

2. 空間・時間スケールの差

$$v_c \propto \rho^{1/3} \quad H_p \propto T$$

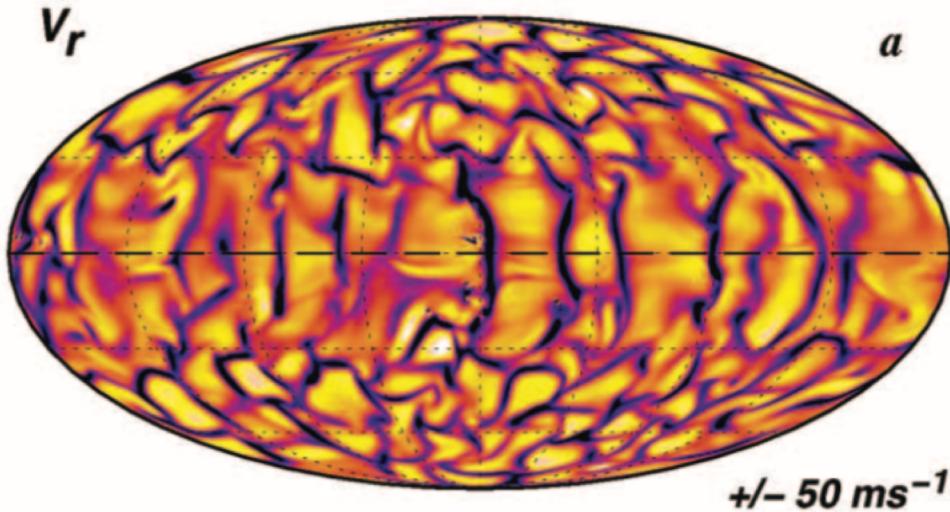
工夫が必要な点

3. 光学的厚さの違い

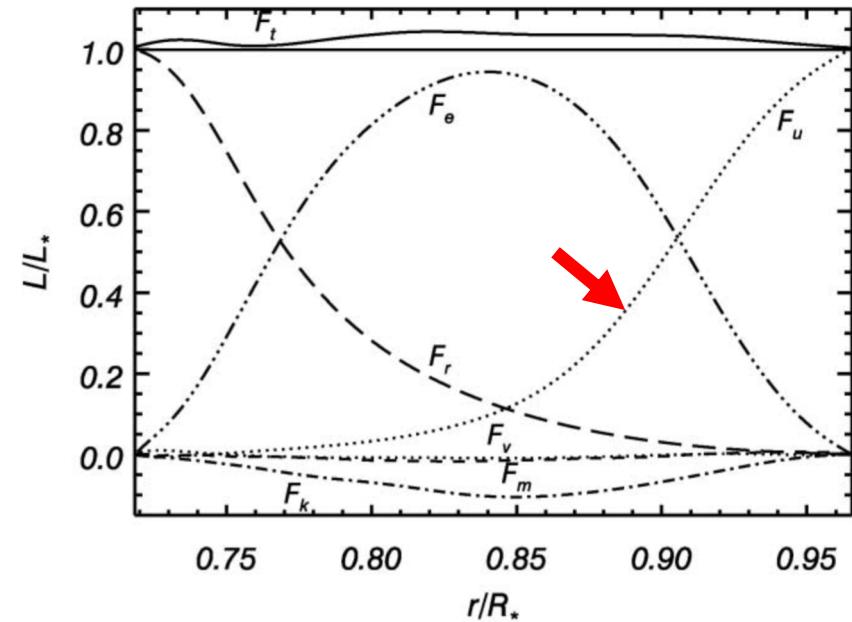
4. 熱対流が励起する擾乱
の大きさの違い

$$\delta \sim \frac{\rho_1}{\rho_0} \sim \frac{p_1}{p_0} \sim \frac{T_1}{T_0}$$

深部のみ計算



エネルギー・フラックス

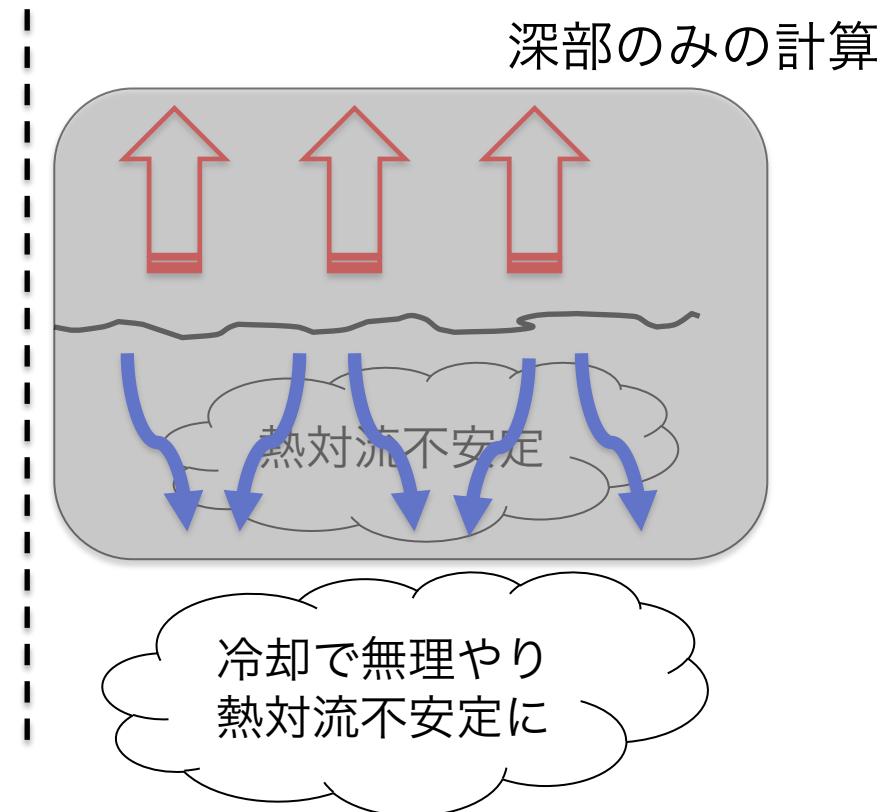
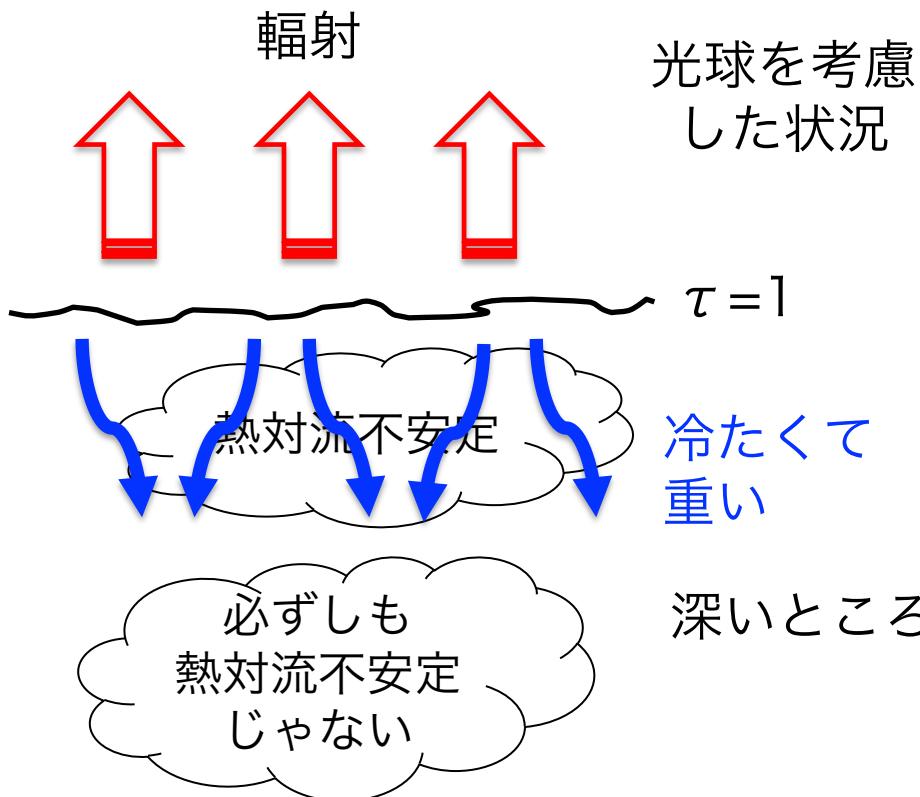


Brun+2004

時間・空間スケールがだいぶ違う表面は計算領域に取り入れないで、半径の97%くらいのところに、壁を設置。それだけだと熱対流が起きてないので、そこらへんに人工的な冷却層を取り入れて熱対流を励起。

冷却と熱対流不安定

熱対流不安定の条件 超断熱 $dS/dr < 0$



深部のみの計算では、深いところでの熱対流駆動が強すぎて、熱対流速度が速くなっているのではないかという疑い(Spruit, 1997)

研究目的

世界で初めての対流層の底から表面までの一貫した計算を実行する。

数値計算コードで注意するべき点は

- ✓ 方程式
- ✓ 辐射輸送
- ✓ 状態方程式

これらを対流層全体を解くために新しく実装したコードを開発。

R2D2

Radiation and RSST for Deep Dynamics

方程式

音速抑制法

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\frac{1}{\xi^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) - \nabla p_1 \\ &\quad - \rho_1 g \mathbf{e}_x + \mathbf{J} \times \mathbf{B}\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\rho T \frac{\partial s_1}{\partial t} = -\rho T (\mathbf{v} \cdot \nabla) s + Q$$

$$p_1 = p_1(\rho_1, s_1)$$

$$\left(\frac{d \log T}{d \log p} \right) - \left(\frac{d \log T}{d \log p} \right)_{\text{ad}} \sim 10^{-6}$$

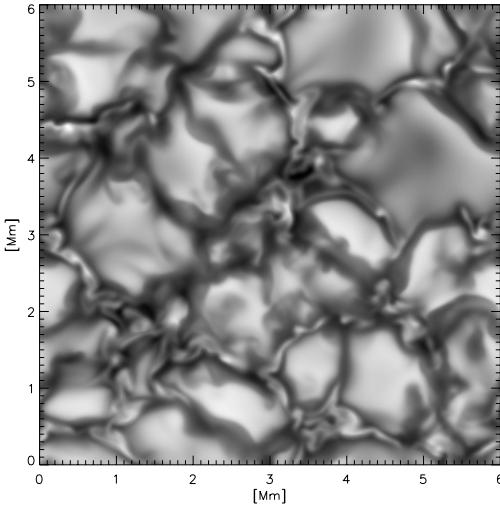
断熱成層からのほんのわずかの
ずれを正確に解くために
エントロピーを解いた。
衝撃波も解ける。

エントロピー
を解いた

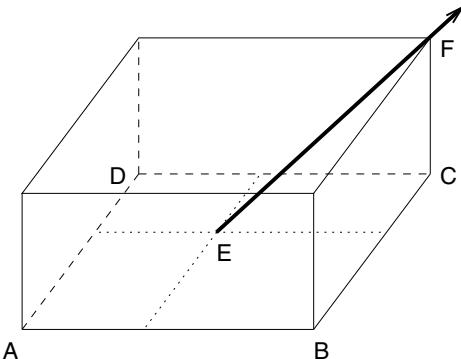
全エネルギー
を解いた

nstep=000

対流層深部計算のための軽減策



Vögler+2005
MURaM



輻射輸送は、基本的には局所的な問題でないが、できるだけ局所的にしたい

$$\frac{\partial I}{\partial \tau} = -I + S$$

1. 水平方向の輻射輸送は解かずに、光学的に厚いところのみ拡散近似で対応($\tau > 5$)
2. 輻射輸送のスタートを3 Mm程度の場所にする。この場所ですでに光学的に十分厚いので輻射強度は、ローカルな温度と opacity で決まる→どこから初めても良い
3. 対流層の底付近は拡散近似
輻射輸送のための通信は一切なし

状態方程式

擾乱の大きさに応じて、使う状態方程式を切り替える

対流層の深いところ
線形状態方程式($\delta \sim 10^{-6}$)

$$p_{1(L)} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \rho_1 + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_\rho s_1$$

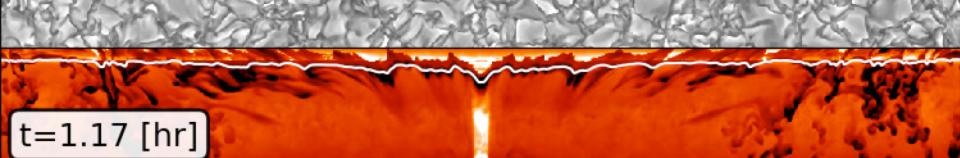
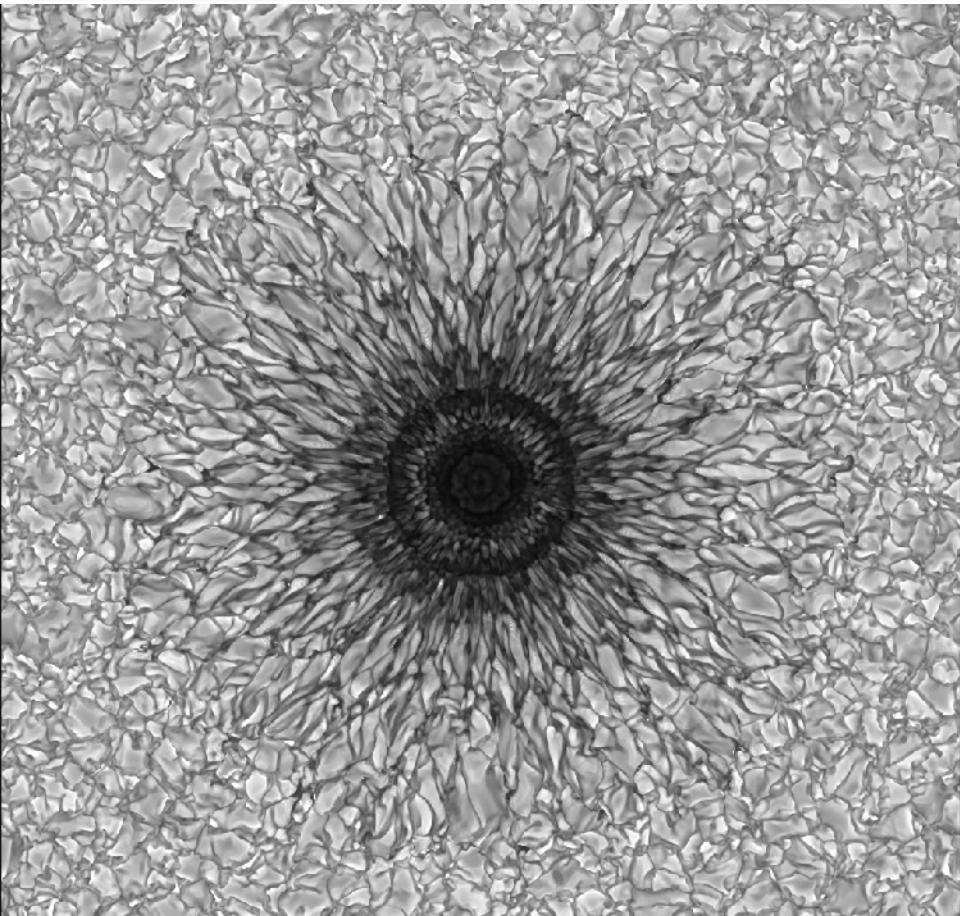
対流層の浅いところ
テーブル状態方程式($\delta \sim 0.1$)

$$p_{1(T)} = p(\rho, s) - p_0$$

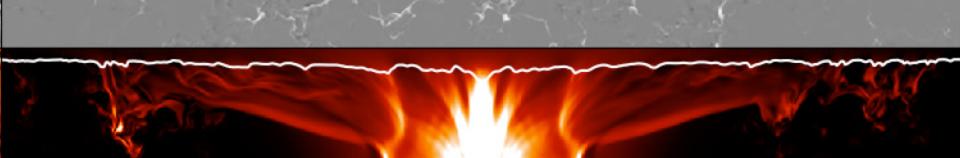
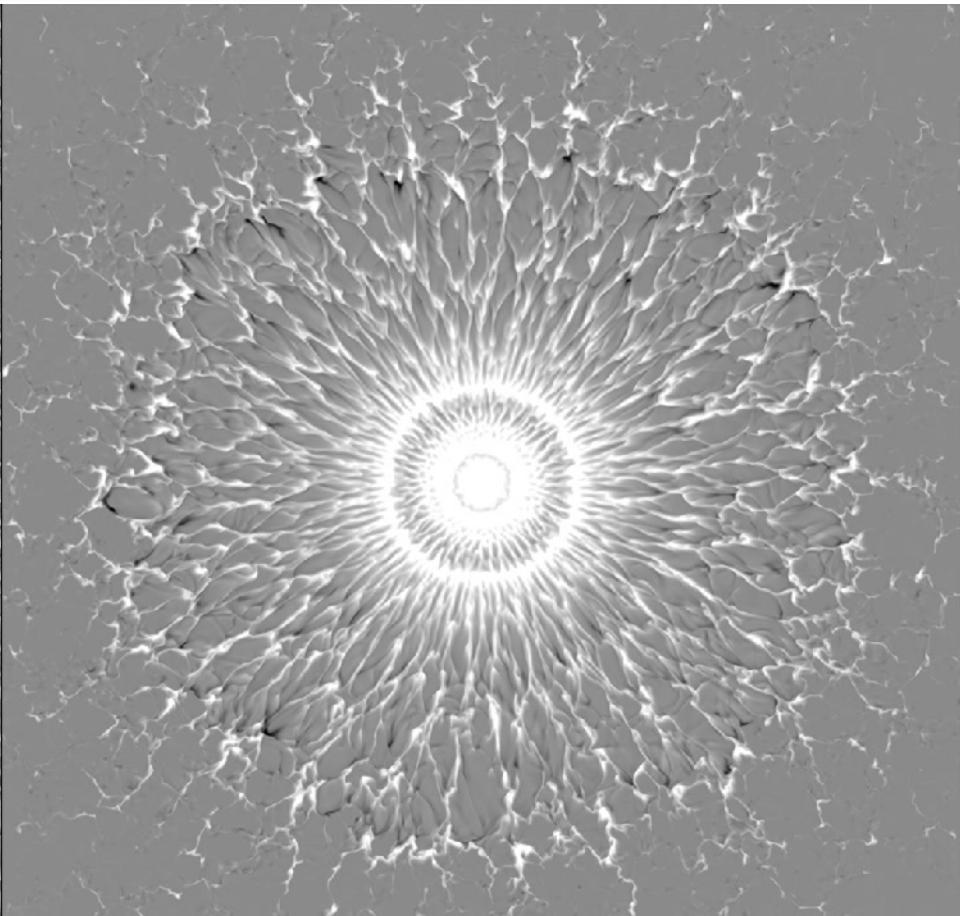
テーブルの状態方程式は、とても小さな擾乱に対して精度がでない。
線形の状態方程式は、大きな擾乱に対して、仮定が破綻。

組み合わせることで、太陽対流層全体を一貫して取り扱える。

黒点計算

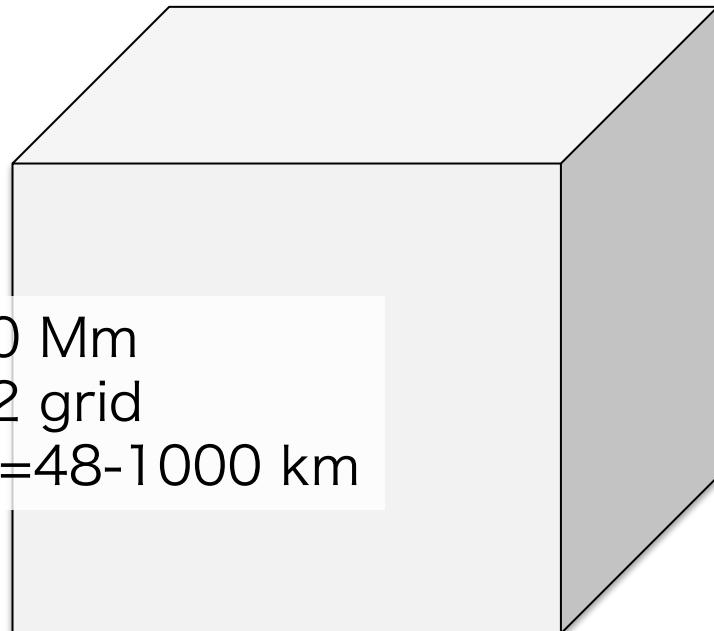


$t=1.17$ [hr]



計算設定

水平方向
200 Mm
1024 grid



上部境界は $\tau = 1$ の面から 700 km 上のところ。

音速抑制法を用いて、最大の音速を 20 km/s に制限。実際は対流層の底で 200 km/s

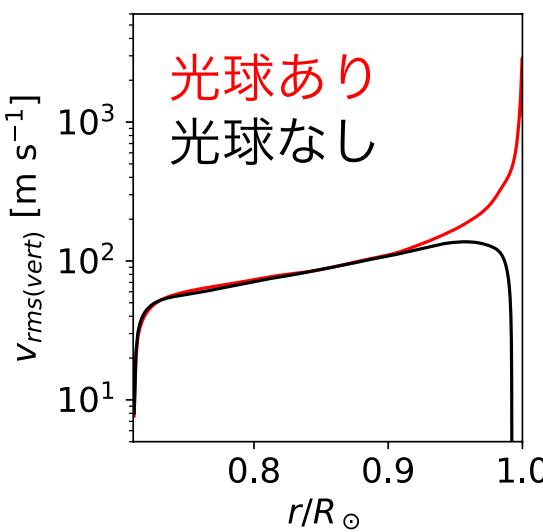
鉛直方向の解像度を鉛直方向に変えており、光球で 48 km、対流層の底で 1000 km 程度になっている。

磁場・回転なし

表面・深部を入れた影響

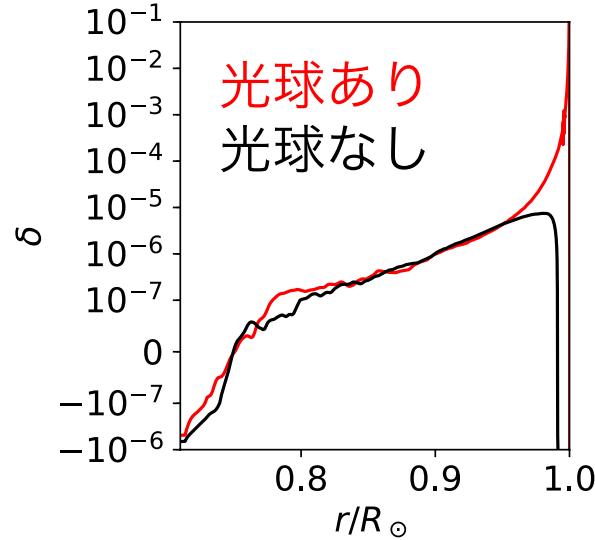
鉛直RMS速度

深いところ



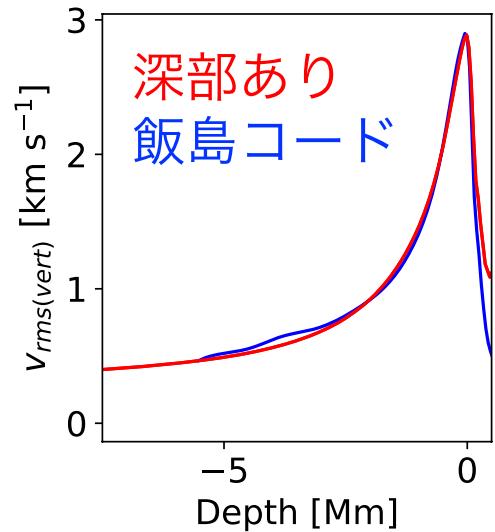
超断熱率

エントロピー勾配



鉛直RMS速度

浅いところ



表面付近の熱対流は、本研究の手法でもうまく再現できている。
これまでの深部計算に表面領域を入れても深部の熱対流構造は変わらない。
深部に人工的な冷却層がある場合も、深部の超断熱率は変わらない
→Spruitの予想とは違う

まとめ

世界で初めての、対流層の底から
彩層下部までの一貫した数値計算
を実行した。

輻射輸送・状態方程式・音速抑制法
について、取り扱いを工夫したこと
で一貫した計算が可能になった。

これまでの予想とは違い、少なく
とも磁場のない状況では、現実的な
光球を取り入れても深部の熱対流が
変わらないことが明らかになった。

今後、黒点形成など深部と表面の
連結が本質的な課題について
取り組む。

光球 \leftrightarrow 対流層の底のスキャン

