

# 太陽恒星大規模数値シミュレーション の今後の展望

堀田英之  
名古屋大学 宇宙地球環境研究所

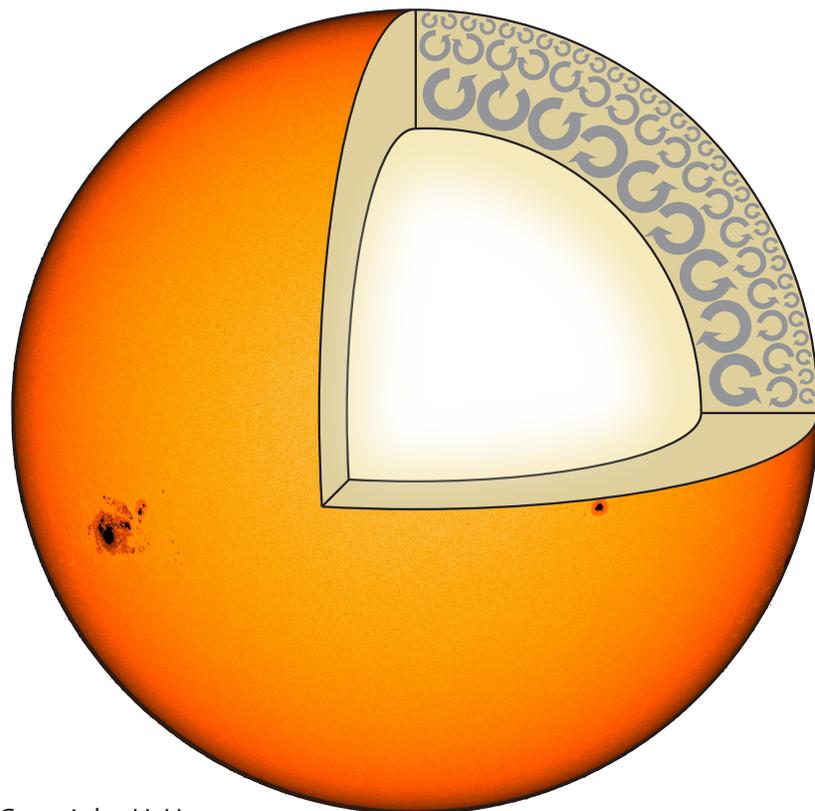
# 結論

富岳NEXTは、FP64の性能が5-10倍とのことなので、これまでと同様のHPC利用では、飛躍的な科学成果の向上は望めない

性能の高いFP16, FP32の性能をうまく活かし、成果を創出することが肝要  
(ピンチはチャンス)

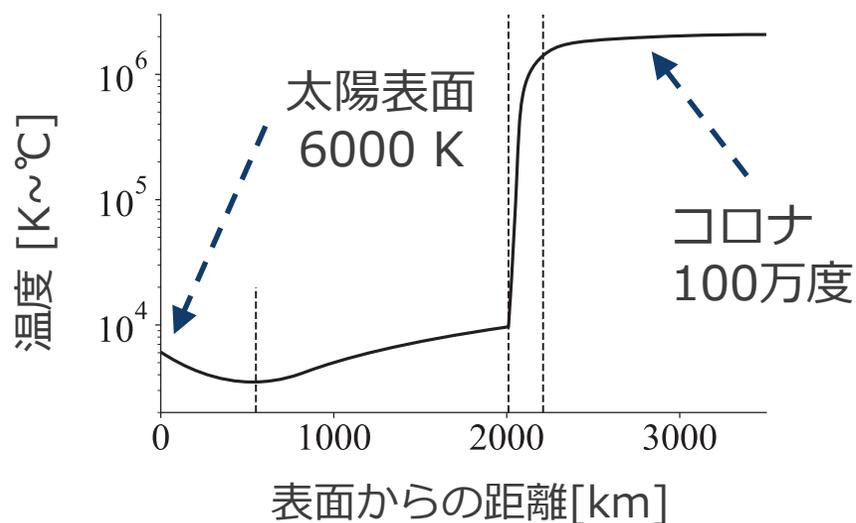
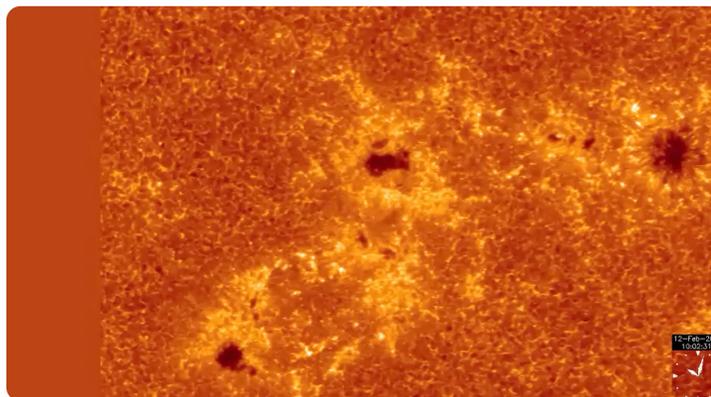
太陽物理学では、「スケールをつなぐ」、「領域をつなぐ」ことを機械学習などFP16, FP32の性能が重要なアプリケーションで実施することが富岳NEXT時代の重要な取り組みとなるであろう

# 太陽・恒星物理学とは？：科学的課題



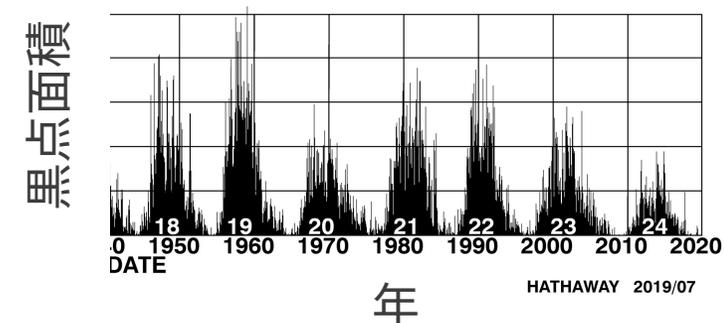
## 太陽フレア

- ✓ フレアを引き起こす要因は？
- ✓ 高エネルギー粒子の要因は？



## 11年周期

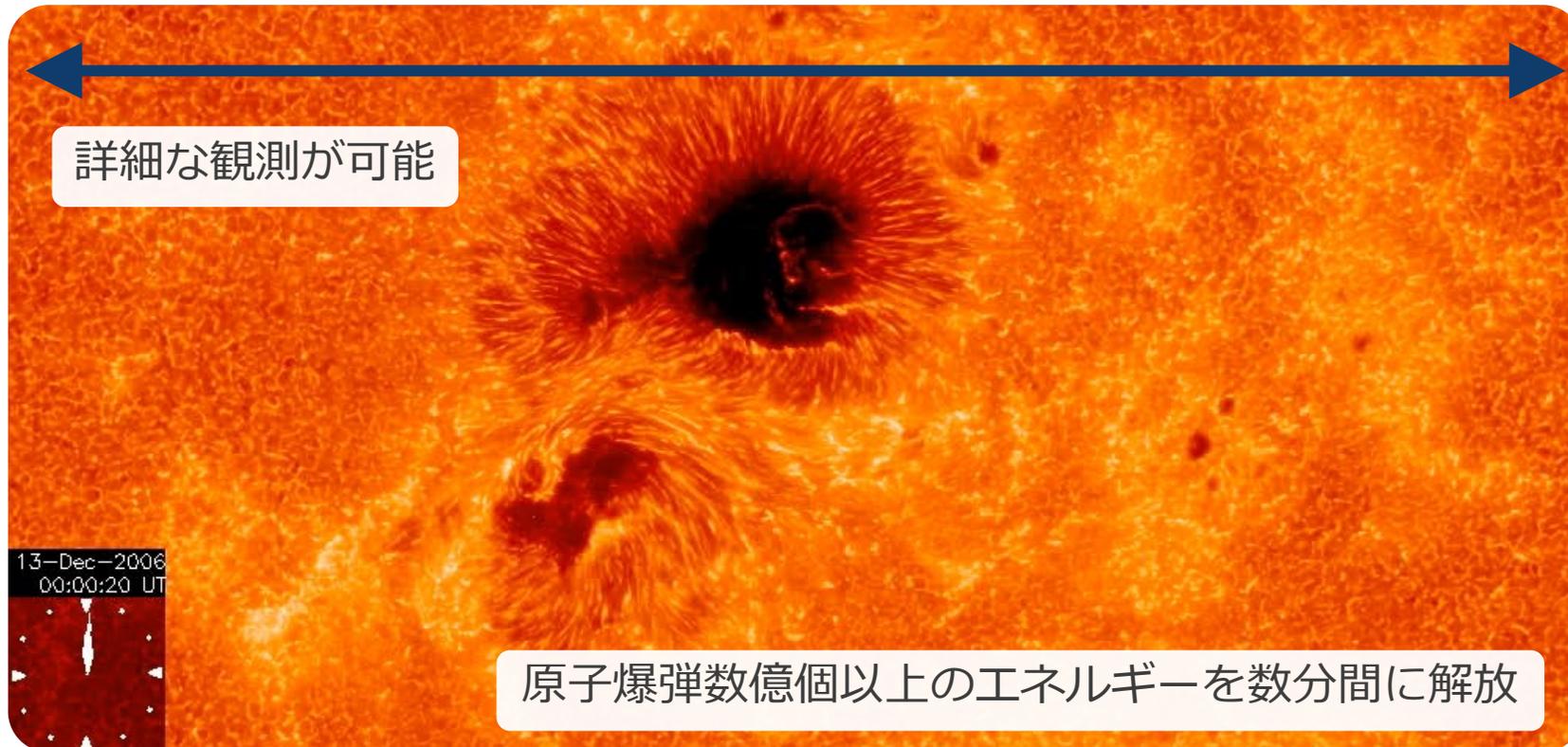
- ✓ 黒点は11年の周期の要因は？



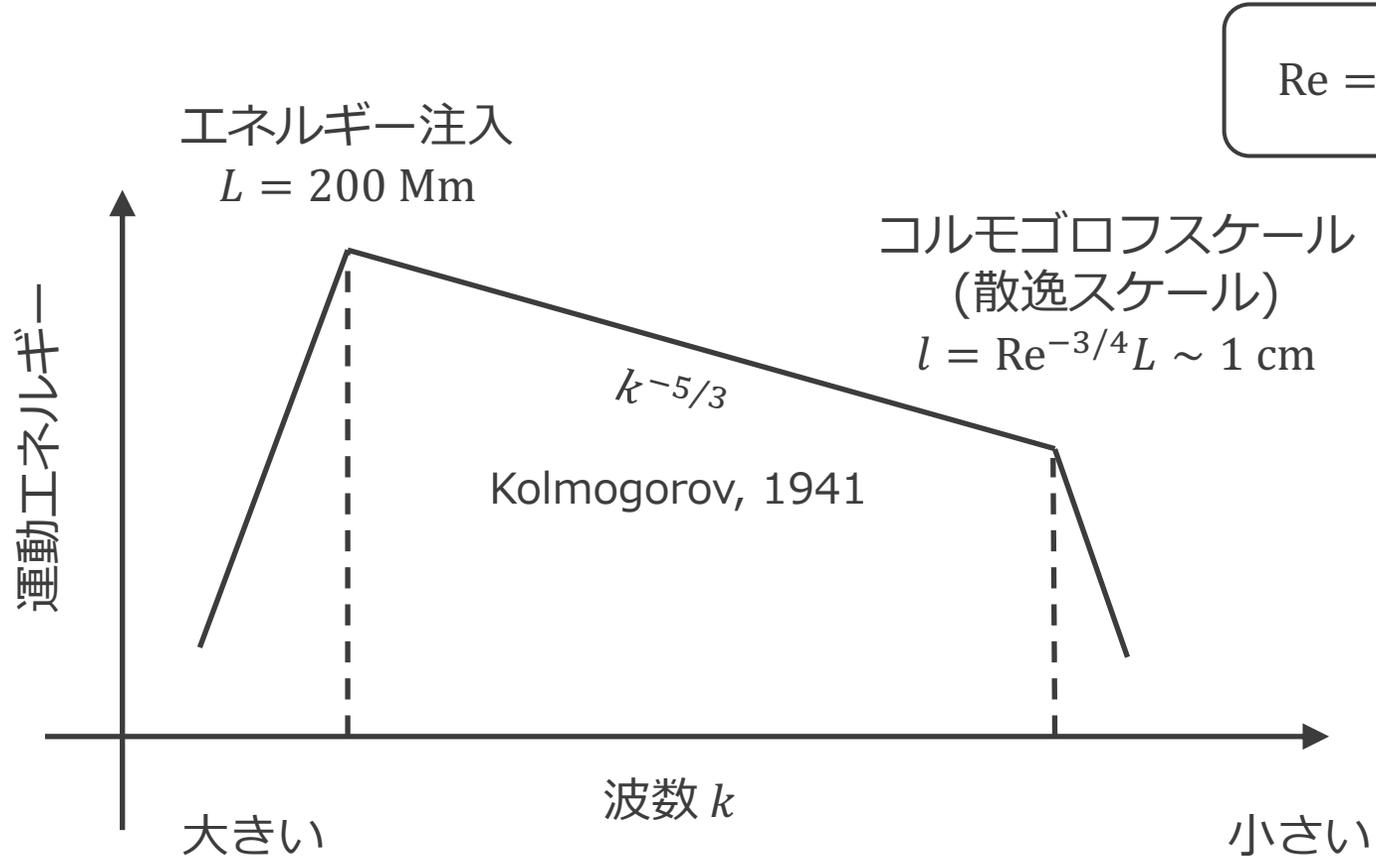
## コロナ加熱・太陽風加速

- ✓ 100万Kのコロナの要因は？
- ✓ 超音速のプラズマ流(太陽風)の起源は？

# 太陽物理学の意義：天文学と地球科学の境界領域



# 太陽物理学の意義：天文学と地球科学の境界領域



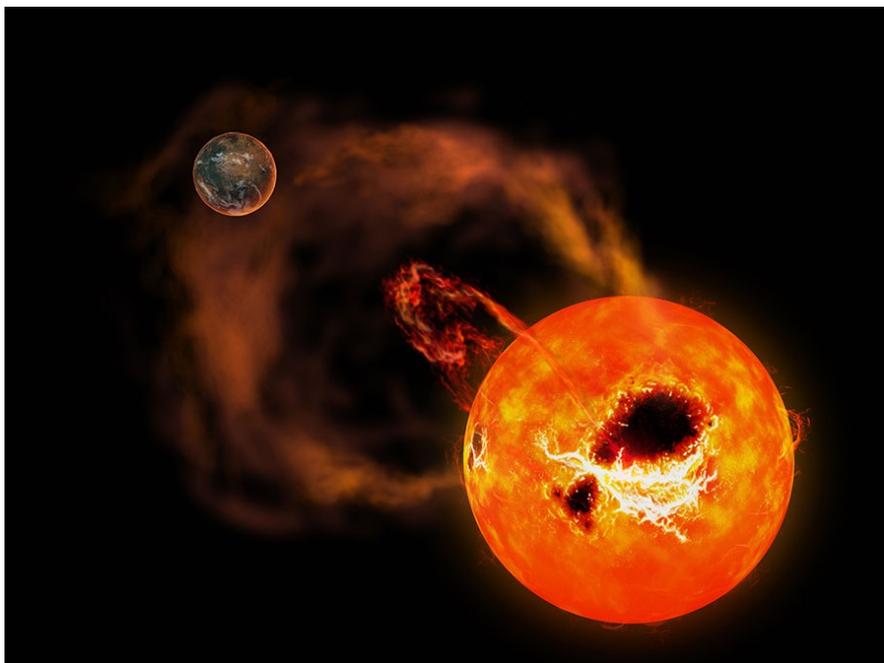
$$\text{Re} = \frac{\text{Inertia}}{\text{Viscosity}} = \frac{vL}{\nu} \sim 10^{14}$$

太陽(天体)の乱流のダイナミックレンジはとても広く、近い将来でも全てのスケールを一つの計算の中で解くことは不可能  
(天体シミュレーションの多くで共有されている困難)

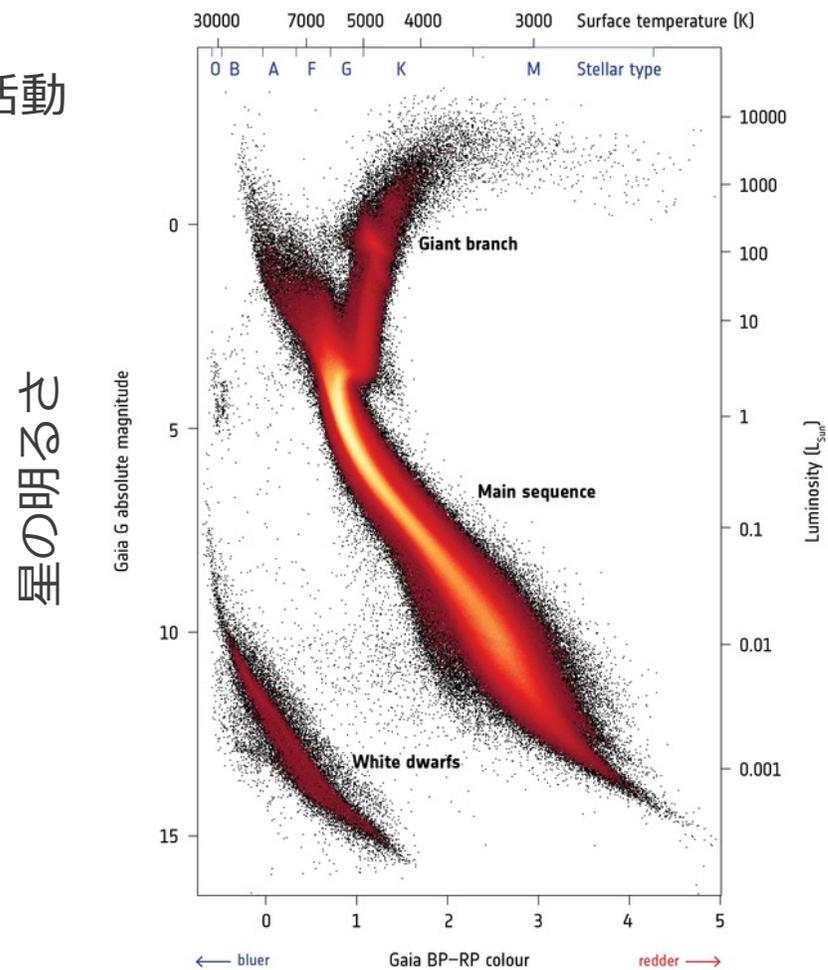
- ✓ 天体の巨大なパラメタ？
- ✓ 磁場の存在？

# 太陽物理学の意義：恒星物理学へのマイルストーン

- ✓ 多くの恒星(低質量星)で太陽と同じ、もしくはもっと活発な磁気活動
- ✓ 低質量星は生命の済む系外惑星探しに最適
- ✓ モデリングを通して、恒星の磁気活動を知りたい



NAOJ

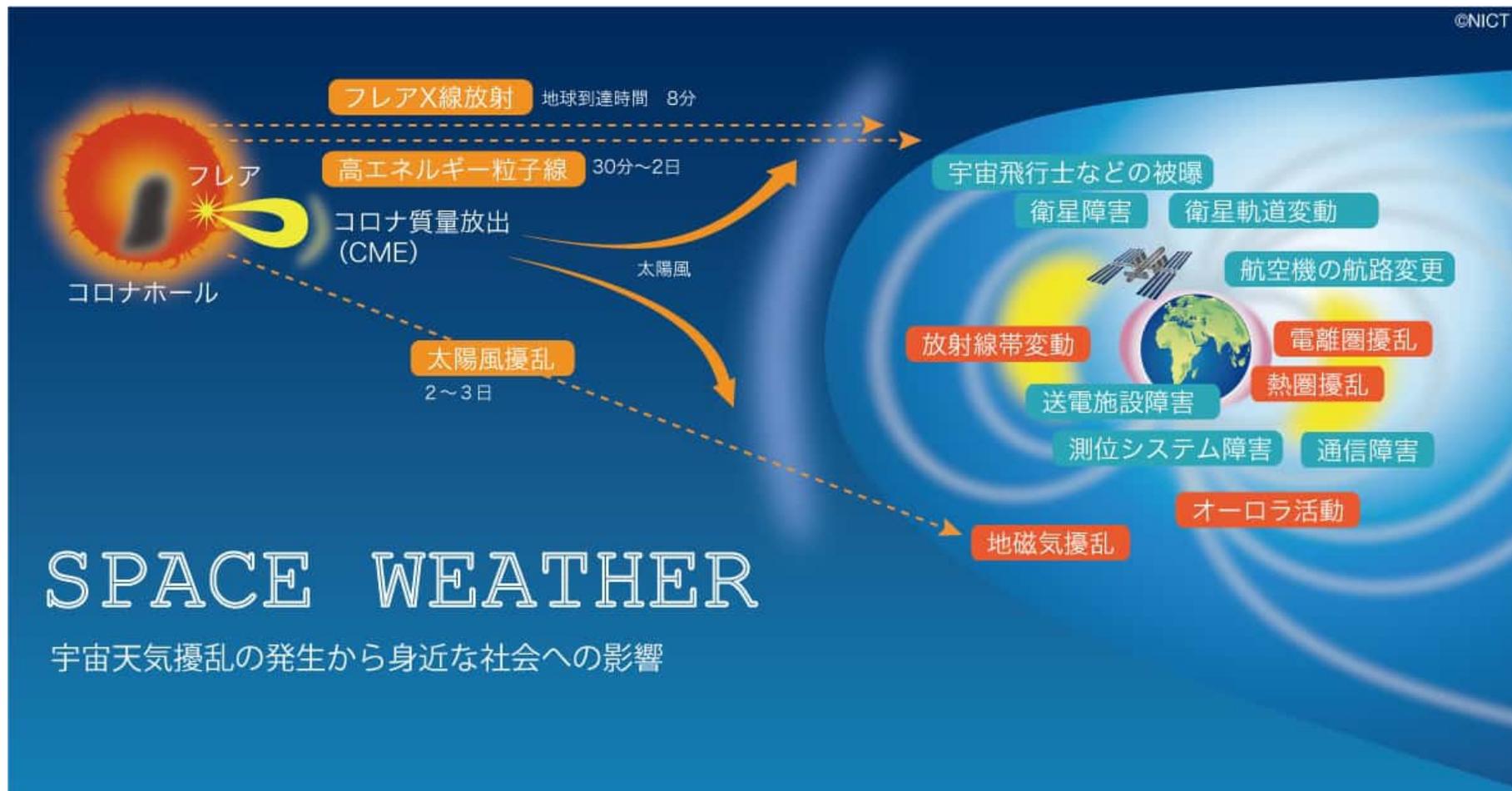


星の明るさ

星の色

GAIA web page

# 太陽物理学の意義：宇宙天気



NICT websiteより

太陽の爆発現象による擾乱は、現在の人類文明に多種多様な影響

# 太陽物理学の意義：宇宙天気

スペースXがスターリンク衛星40機を喪失 地磁気嵐の影響で運用高度へ移動できず大気圏再突入へ

秋山文野 エキスパート | サイエンスライター/翻訳者 (宇宙開発)  
2022/2/9(水) 17:52

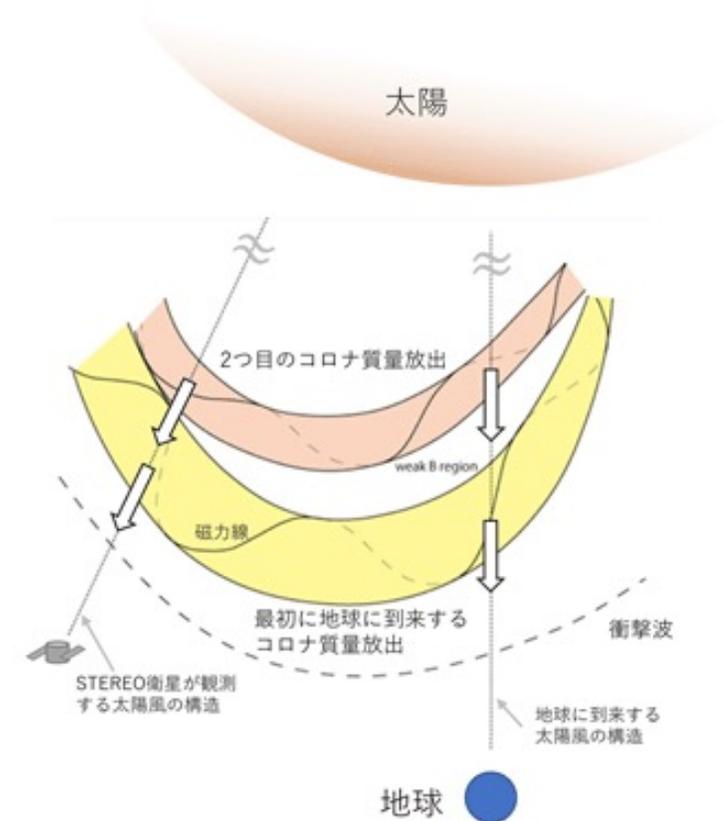


Credit : SpaceX

2022年2月8日、米スペースXは2月3日に打ち上げた通信衛星スターリンクの49機中、40機が地磁気嵐の影響で運用高度へ到達できず、大気圏に再突入すると発表した。スペースXは再突入は軌道の安全を守るための措置で、「衛星のスペースデブリ化を防ぐため」としている。

米国東部時間2月3日午後1時13分（日本時間4日午前3時13分）、スペースXはフロリダ州のケネディ宇宙センターから49機のスターリンク衛星を打ち上げた。衛星は近地点が高度210キロメートルの軌道に投入され、高度500キロメートルの運用高度まで移動する予定だった。

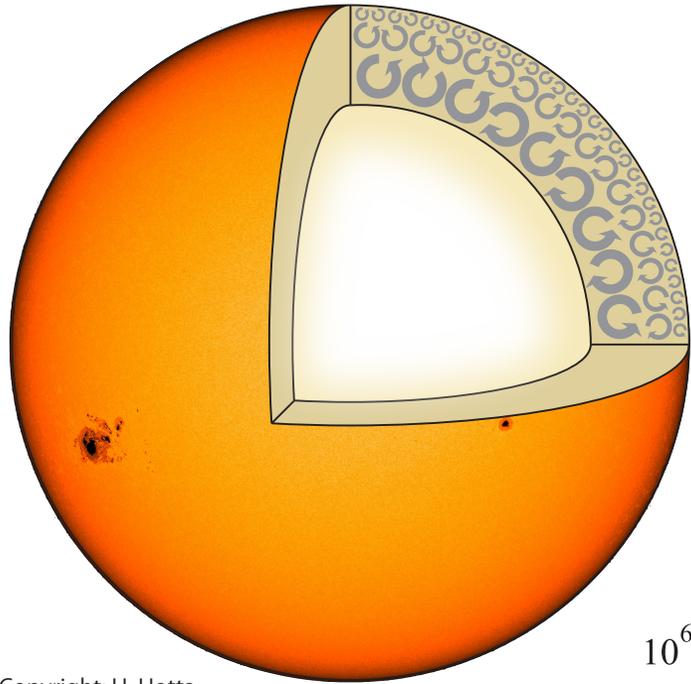
Yahoo Newsより



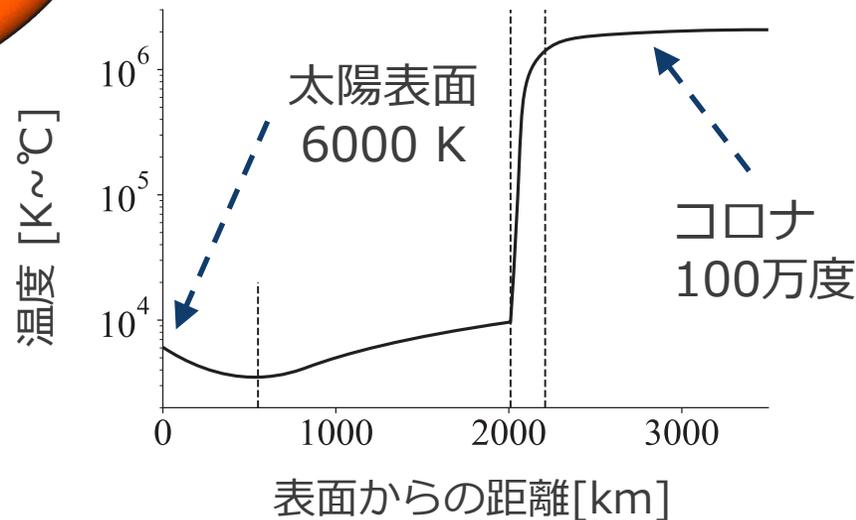
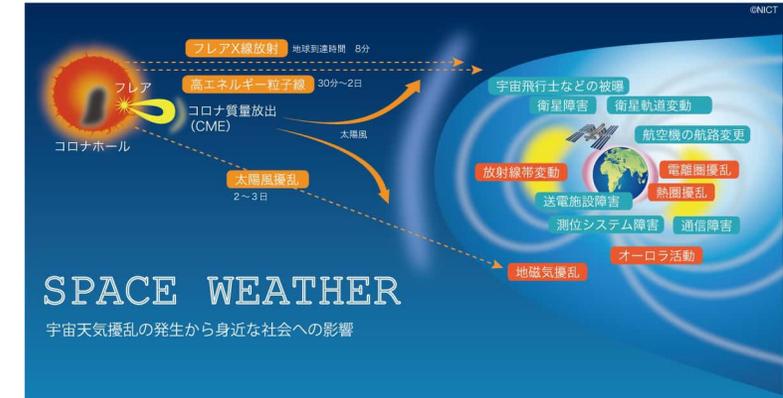
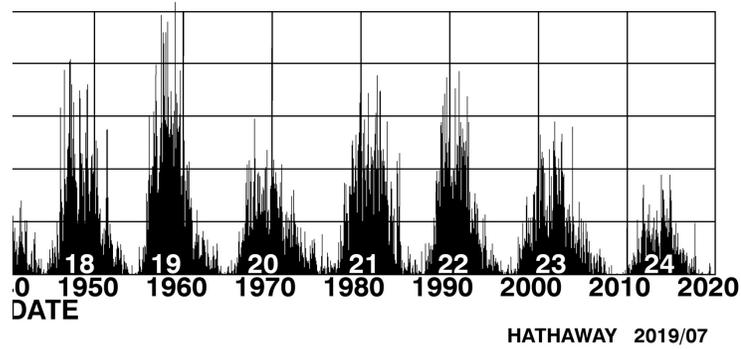
NICT websiteより

現代社会においては、太陽地球環境の理解は、非常に重要

# 今日の話の組み立て



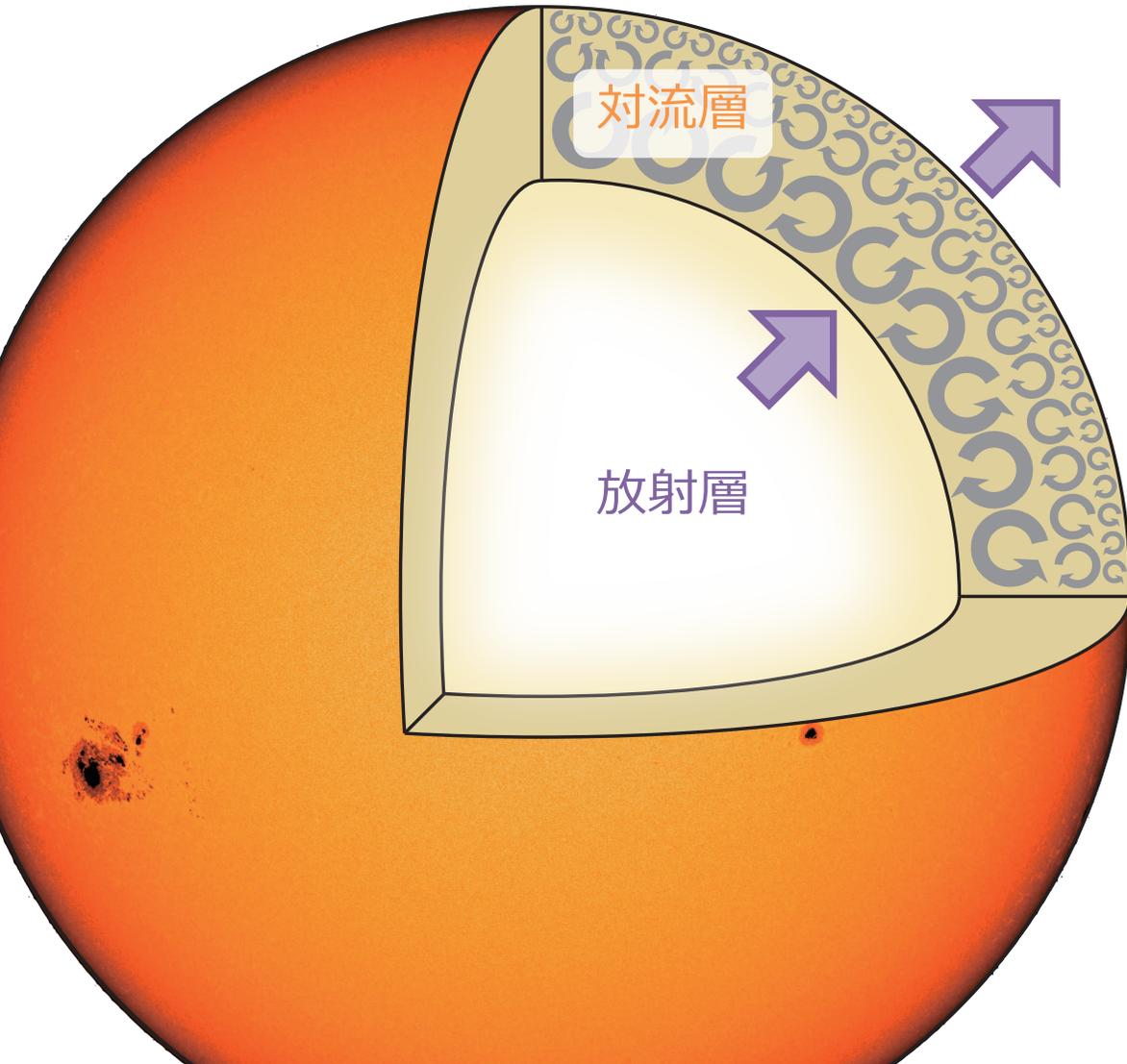
Copyright: H. Hotta



富岳での成果を混ぜながら、富岳NEXTで実施可能な課題を議論

- ✓ 科学的課題(特に太陽内部)
- ✓ 宇宙天気・太陽圏の包括的シミュレーション

# パート1：太陽対流層編



太陽の中心付近で核融合によって生成されたエネルギーは以下のように輸送される

- ✓ 光の輻射 (内側 70%)
- ✓ プラズマの熱対流 (外側 30%)

この熱対流は、非常に高度な乱流となっており広いダイナミックレンジを持っている

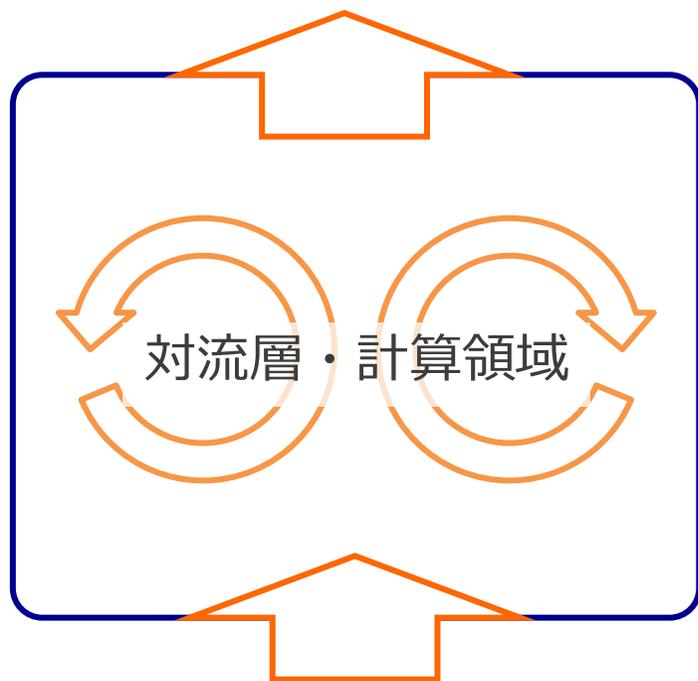
しかし、この複雑な流れ場を理解することは重要：

- エネルギー輸送→星の進化
- 角運動量輸送  
→大きなスケールの流れ場の生成・維持
- 磁場生成→太陽活動11年周期(未解決問題)

# 太陽対流層

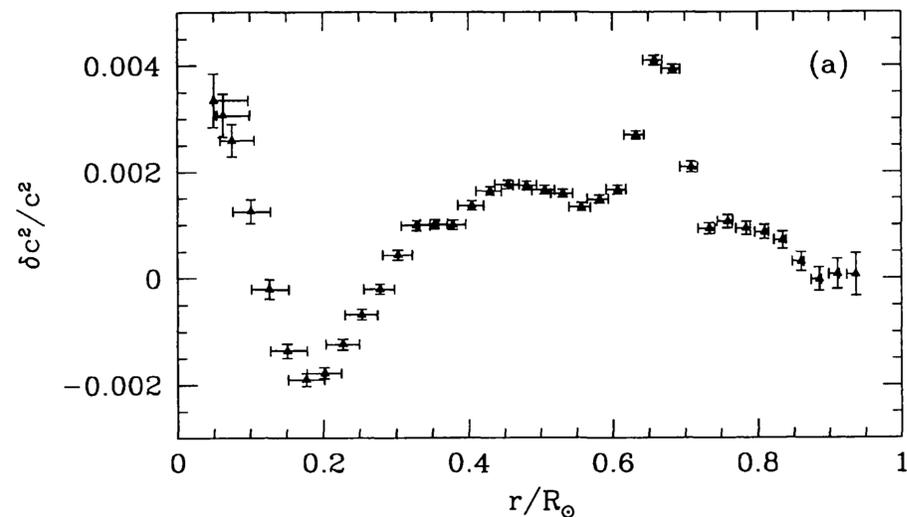
$$L_{\odot} = 3.84 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$$

輻射エネルギーフラックス



輻射エネルギーフラックス

モデルと観測の差(Basu+1997)



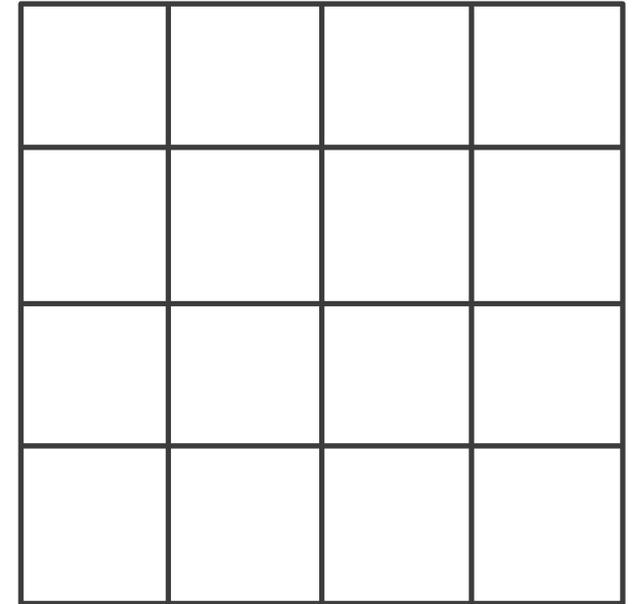
太陽表面から出てくる光の輻射によるエネルギー放出は精密に測定  
密度・圧力・温度などの成層の値も星の進化理論・日震学でよく確認されている。

入力パラメータにほとんど任意性はなく、「正しい」計算が実行できれば、正しい結果を得られると考えられる。  
→数値シミュレーションの良いターゲット

# 太陽内部のシミュレーション手法：磁気流体力学+a

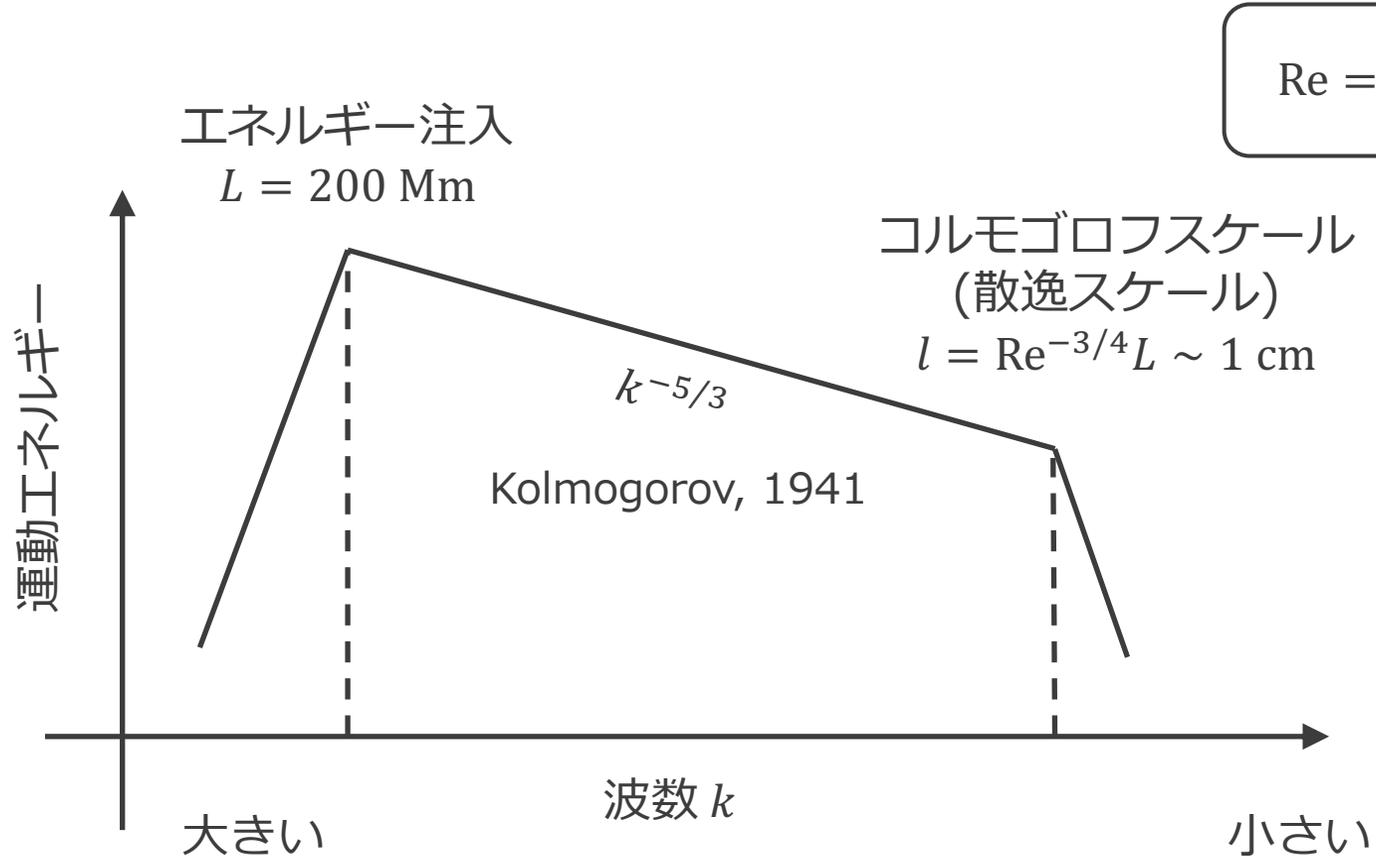
磁気流体力学+輻射+状態方程式

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) &= -\nabla \cdot \left( \rho \mathbf{v} \mathbf{v} - p_{\text{tot}} + \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right) + 2\rho \mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega} - \rho \mathbf{g} \\ \frac{\partial}{\partial t}(E_{\text{tot}}) &= -\nabla \cdot \left[ (E_{\text{tot}} + p_{\text{tot}}) \mathbf{v} - (\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}) \frac{\mathbf{B}}{4\pi} \right] - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} + Q_{\text{rad}} \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ p &= p(\rho, e_{\text{in}})\end{aligned}$$



(一般的な意味で)格子法で磁気流体力学の方程式を解く  
大スケールから小スケールまで包括するためには、多量の格子点が必要

# 太陽物理学の意義：天文学と地球科学の境界領域



太陽(天体)の乱流のダイナミックレンジはとても広く、近い将来でも全てのスケールを一つの計算の中で解くことは不可能  
(天体シミュレーションの多くで共有されている困難)

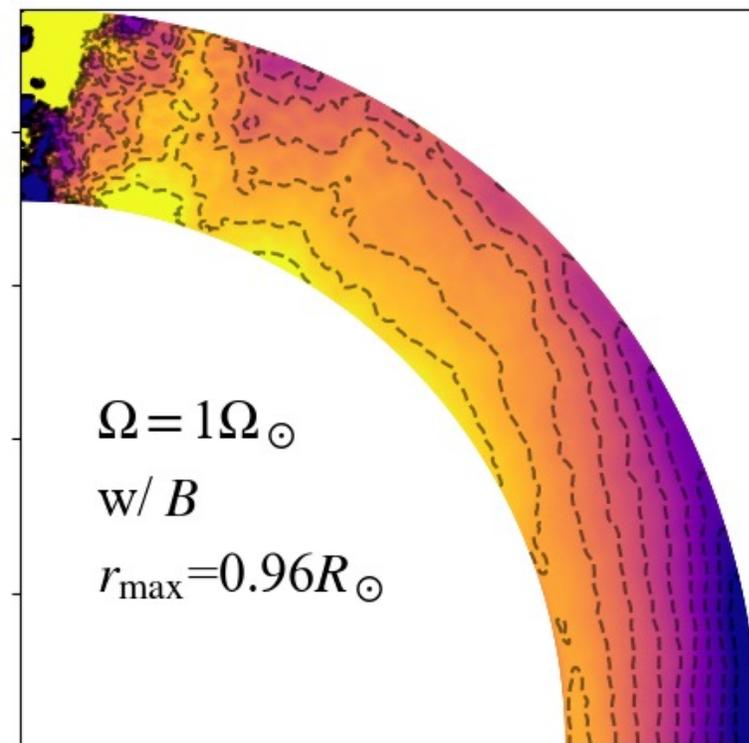
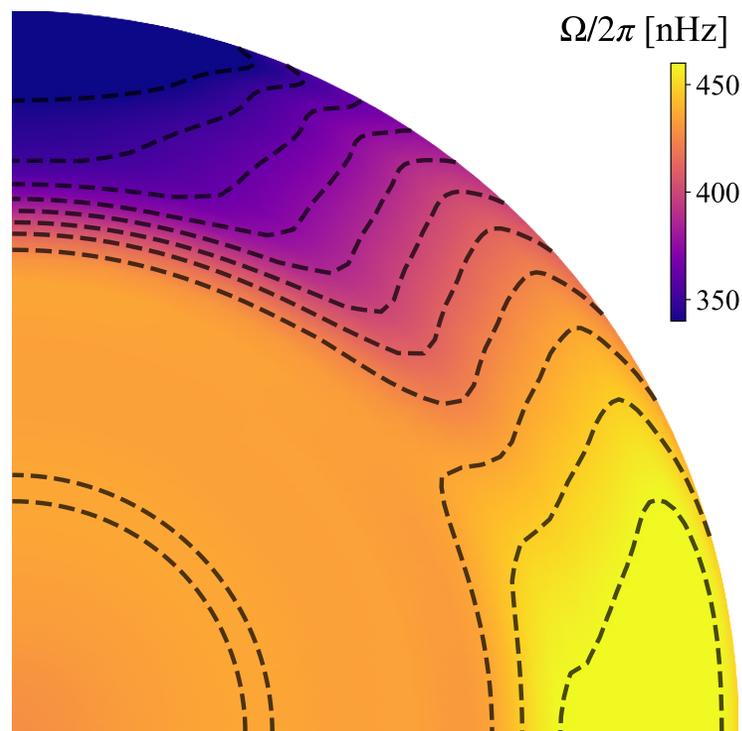
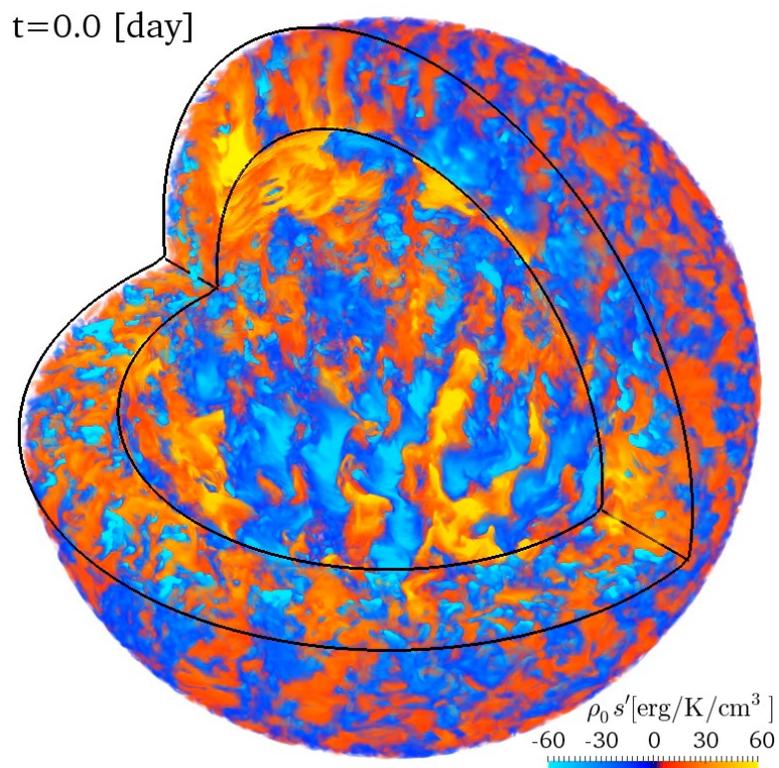
- ✓ 天体の巨大なパラメタ？
- ✓ 磁場の存在？

# 熱対流の難問：

実際の太陽

富岳以前の高解像度  
シミュレーション

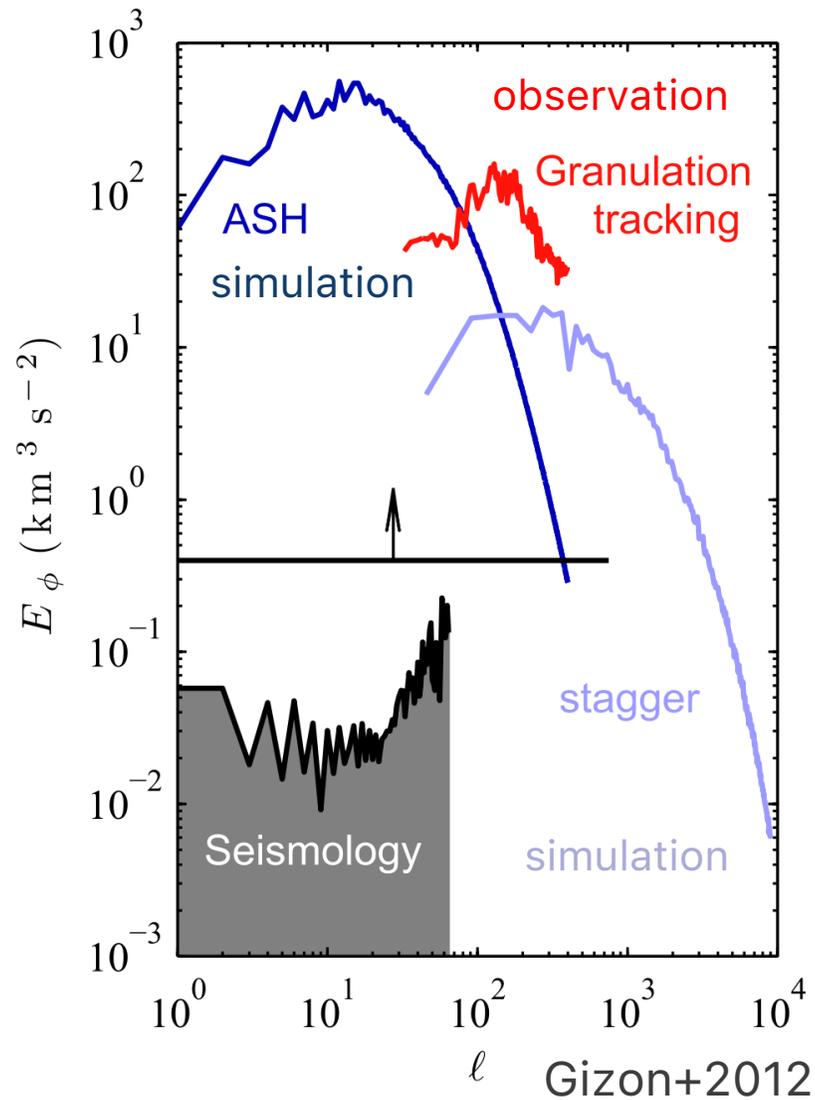
256×512×1024



Hotta+2018

なぜか極地方の自転が速くなってしまう→何かがおかしい  
熱対流の難問(Convective conundrum)

# 熱対流の難問：熱対流の速度



シミュレーションと観測(日震学)の間に太陽深部の熱対流速度で大きな隔りがある。

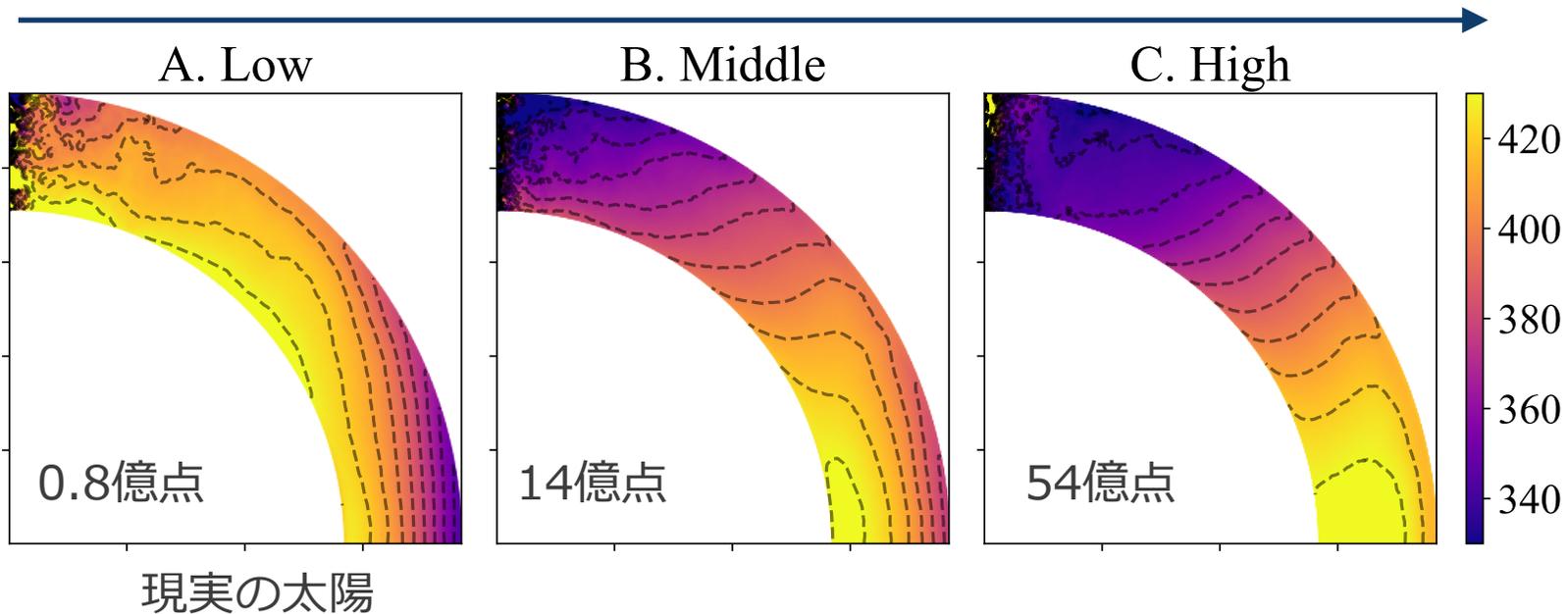
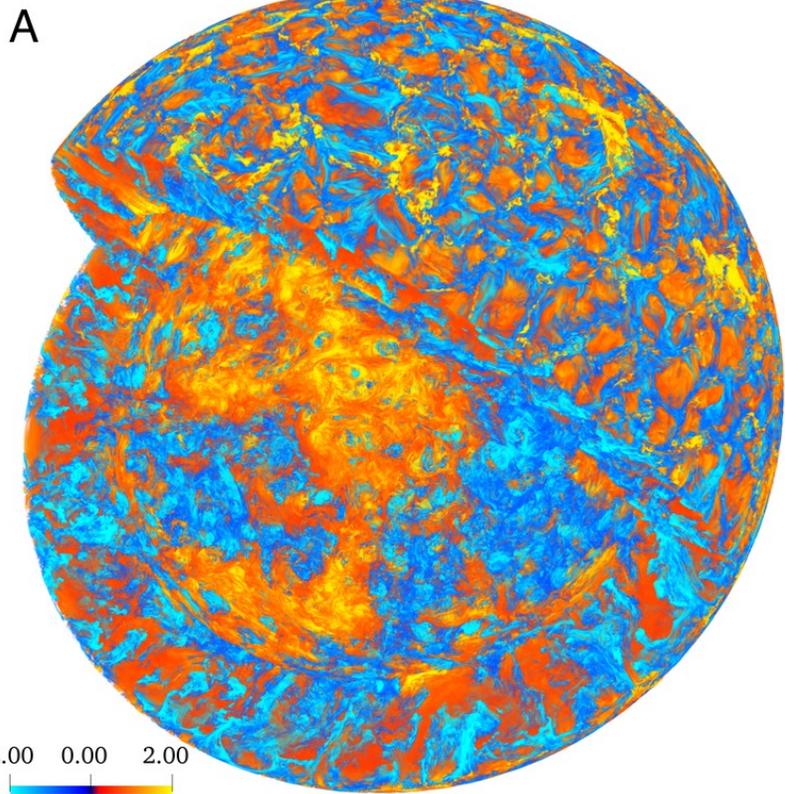
シミュレーションが大きなスケールで3桁ほどエネルギーが大きい

シミュレーション、日震学ともに妥当性は十分には確認されていない(議論に決着はついていない)

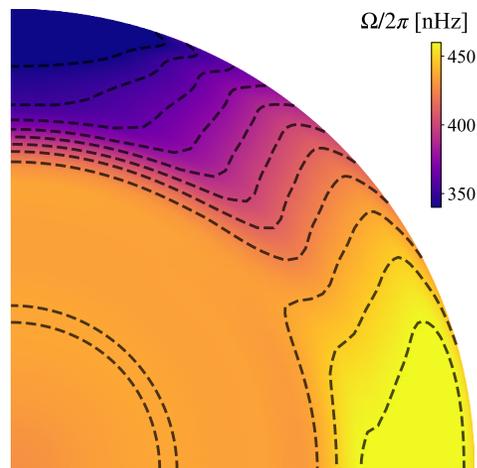


# 熱対流の難問(差動回転編)を解決

高解像度化



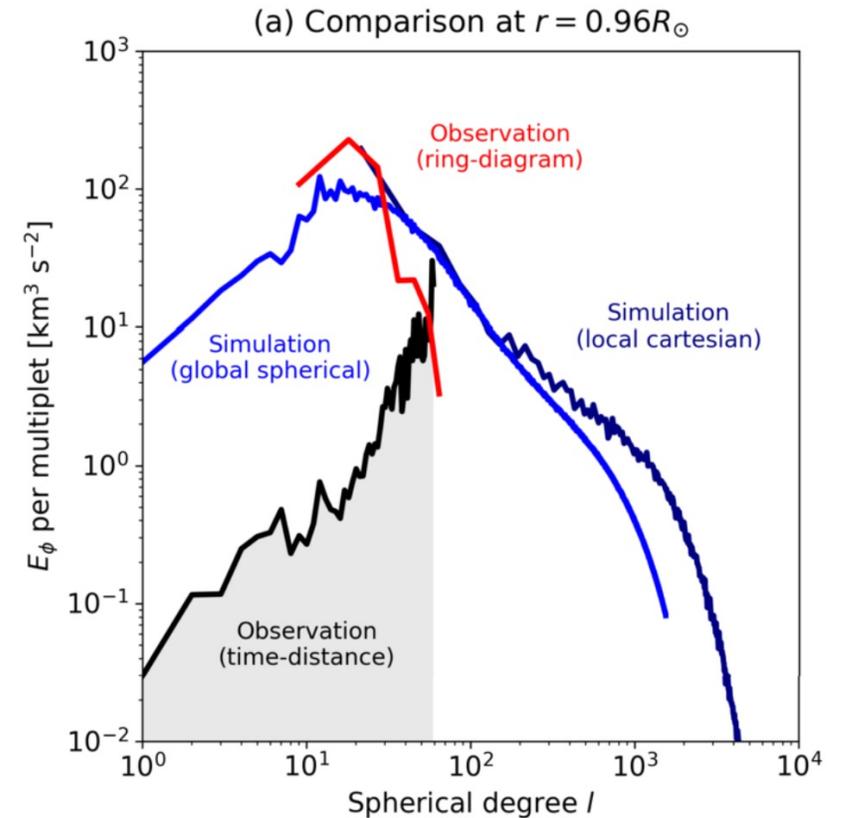
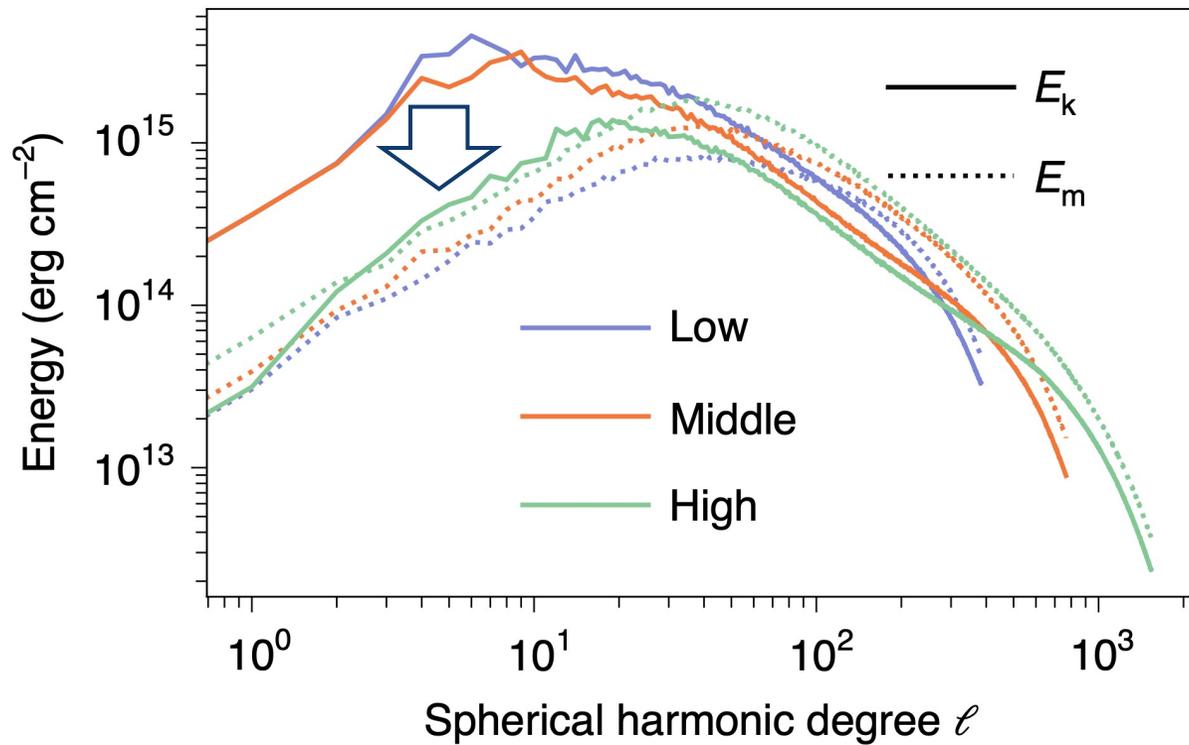
現実の太陽



現実の太陽を再現するような分布を  
富岳でしか達成できない超高解像度計算で実現  
→熱対流の難問(差動回転編)の解決

Hotta & Kusano, 2021, Nature Astronomy

# エネルギースペクトル



Hotta+2023

解像度を上げることによって、大スケールの熱対流速度が下がる  
 Time-distance日震学とはまだ大きな差  
 →解像度を上げて結果が変わらない(数値的収束)を少なくとも目指したい

# 富岳で達成できたこと・できなかったこと

- ✓ 「絶対に間違っている」という数値シミュレーションを誰もが実施していたが、「間違っているとは言い切れない」というところまで辿り着いた  
「多分合っている」には辿り着けなかった
- ✓ 差動回転
  - 差動回転を再現できる人は世界の誰もいなかったが、富岳で初成功
  - ほとんど数値的収束にも達しており、解明した物理課程は「多分合っている」
- ✓ 大スケールの熱対流速度
  - 10年前は、数値シミュレーションと観測のギャップが3桁合った
  - シミュレーションと観測ともに改善されたことにより、ほぼ合っているものもあれば、2桁違うものもあるという状態にきた
  - 数値的収束には達することはできなかった
  - 「間違っているとは言い切れない」という状況

富岳NEXTで「多分合っている」に到達するには？

# 富岳NEXTで目指すべき方向性

結局、乱流をどこまで分解すれば良いのか？

## 困難：

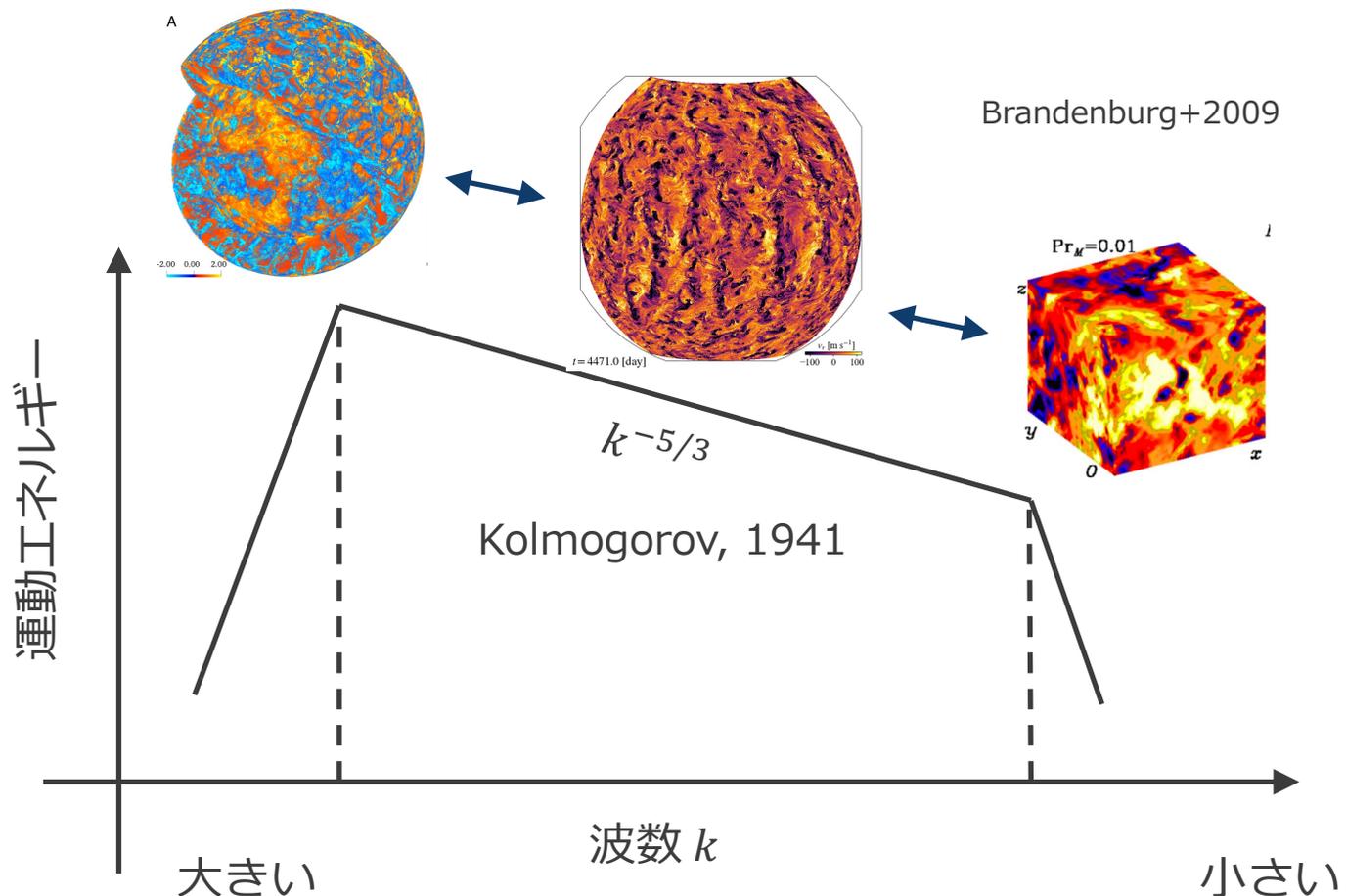
陽的な流体のシミュレーションでは、格子点数を一方向に2倍にすると、計算負荷は16倍

FP64が5-10倍の富岳NEXTでは、質的な計算量向上は望めない

## 対策：

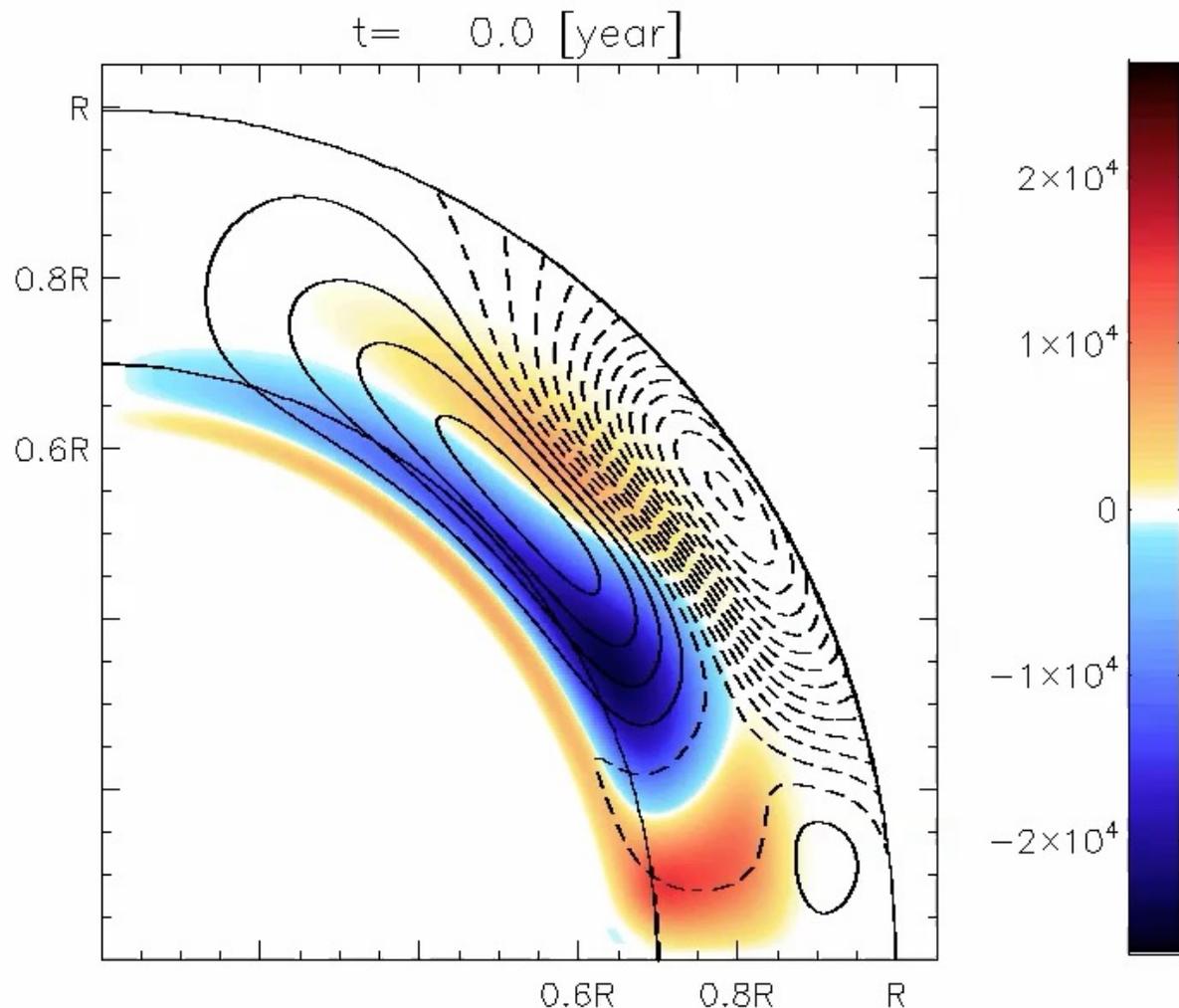
各スケールの数値シミュレーションを実行し、その間を信頼性の高い方法で繋ぐことが肝要  
→高いFP16, FP32性能を有効に利用する

太陽では、妥当性のチェックが観測との比較を通して可能  
天文学全体にも大きなインパクト



# 富岳NEXT(もしくはその次)で目指すべき方向性

## 平均場理論の精緻化



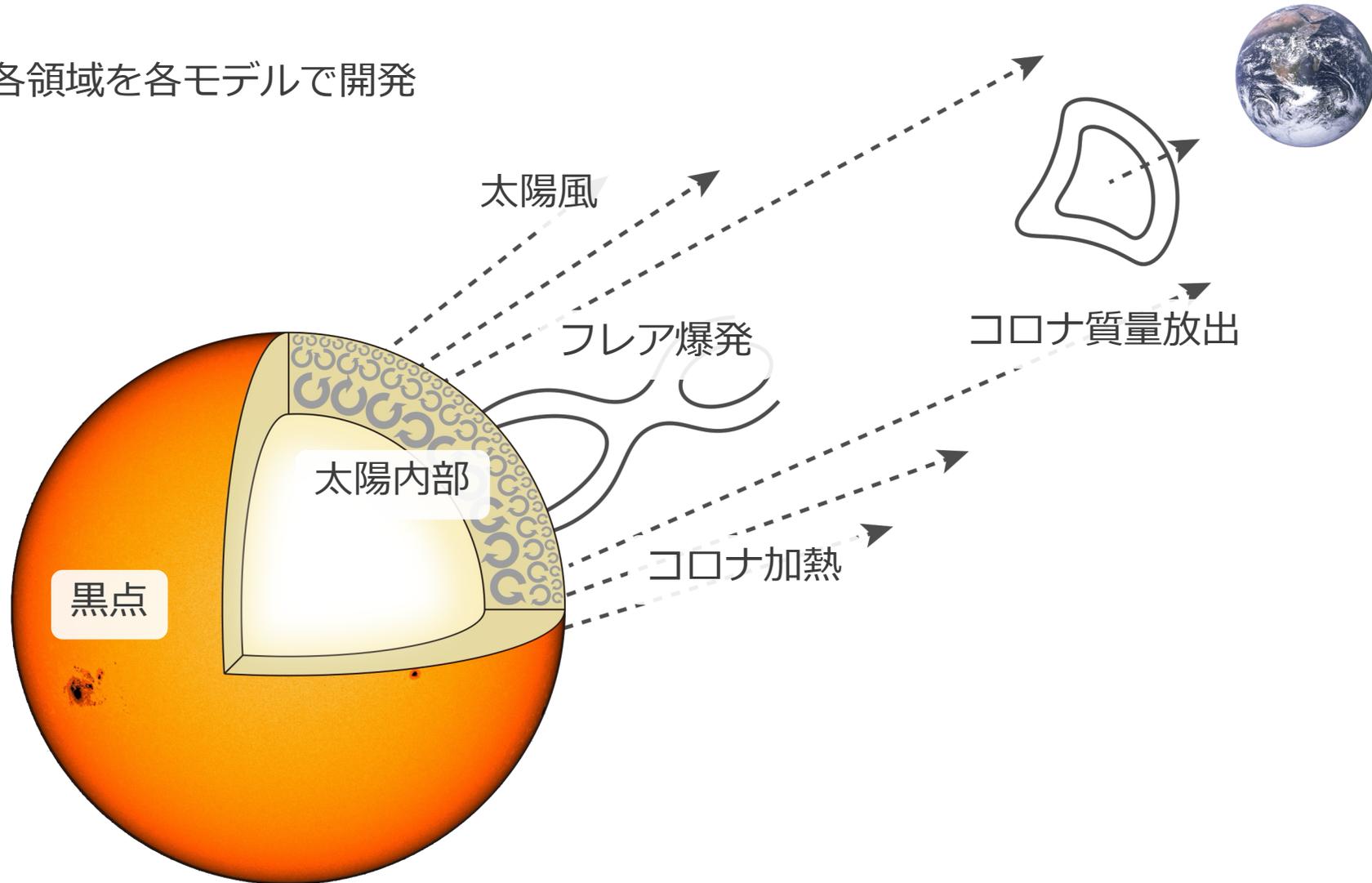
「太陽内部の乱流をしっかりと理解できた」となれば  
応用の幅は大きく広がる

$$\frac{\partial \langle \mathbf{B} \rangle}{\partial t} = \nabla \times (\langle \mathbf{v} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle) + \nabla \times (\alpha \langle \mathbf{B} \rangle - \eta \nabla \times \langle \mathbf{B} \rangle)$$

- ✓ データ同化的な手法も可能に
- ✓ 1万年の計算も可能(3次元計算ならばせいぜい100年)
- ✓ 富岳・富岳NEXTを利用できる研究者以外でも可能
- ✓ 他の星への適用も視野に
- ✓ 大規模計算で得られた結果を、平均場係数にどのように取り入れるか

# 太陽圏包括シミュレーション・宇宙天気研究に向けて

富岳・京以前：各領域を各モデルで開発



# 太陽地球シミュレーションの目指す先

各領域で典型的な空間スケールが極端に違うために包括的な太陽圏シミュレーションは困難

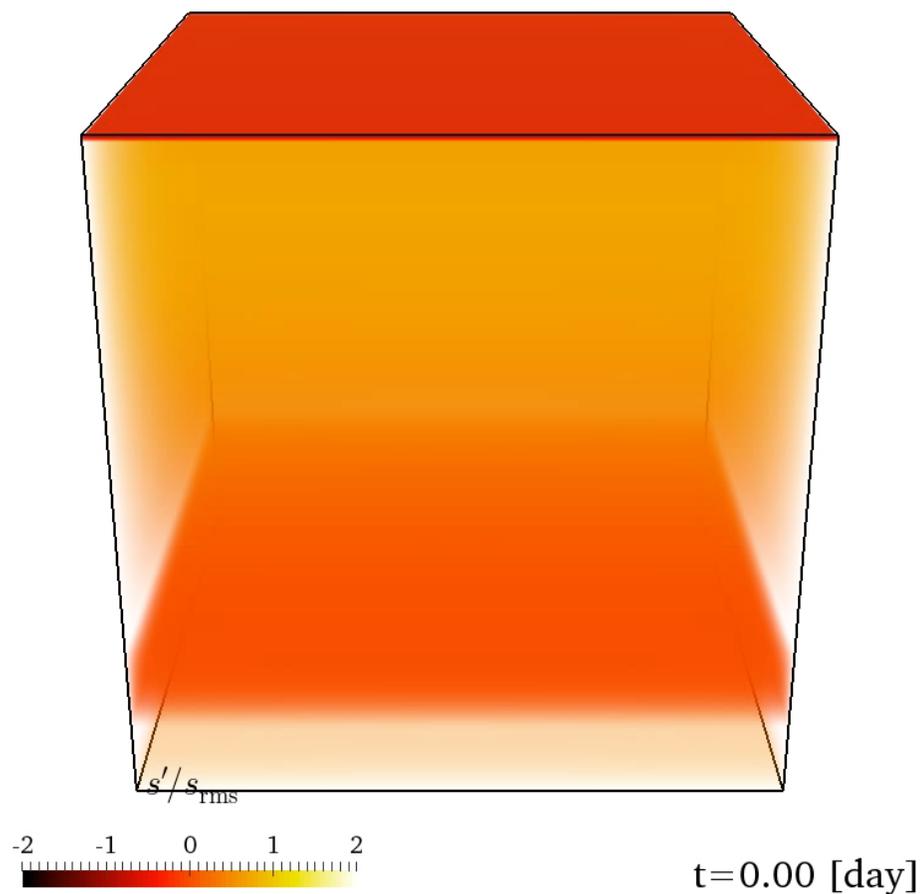


領域	空間スケール	許容できる格子間隔	計算時間
太陽内部	200 Mm	数Mm	数十年
光球	数Mm	200 km	数時間-1日
彩層	数Mm	50 km	数時間
コロナ	数十Mm	数百km	数時間
太陽風	10 Gm	数百km	数日
CME	300 Gm	数十Mm	一ヶ月

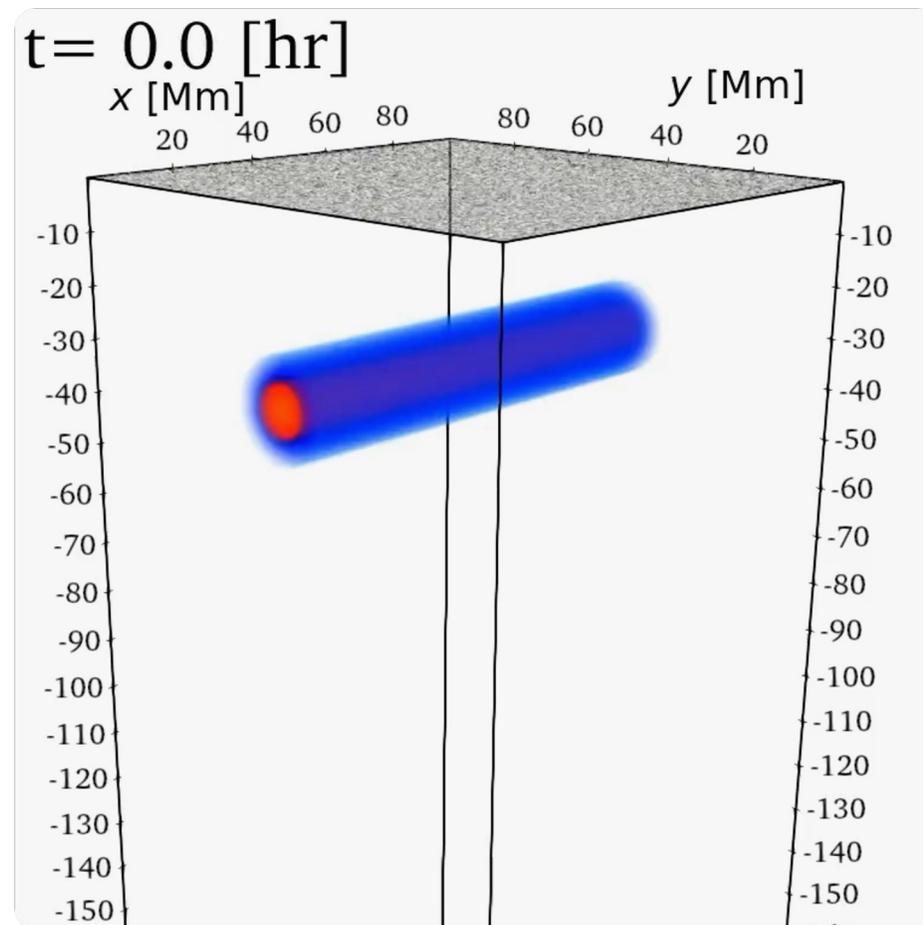
協力：飯島さん(名古屋大)、庄田さん(東大)、塩田さん(NICT)

# 富岳・京で達成できたところ：太陽深部→太陽表面

太陽深部から太陽表面までを一貫して解くことには、成功。



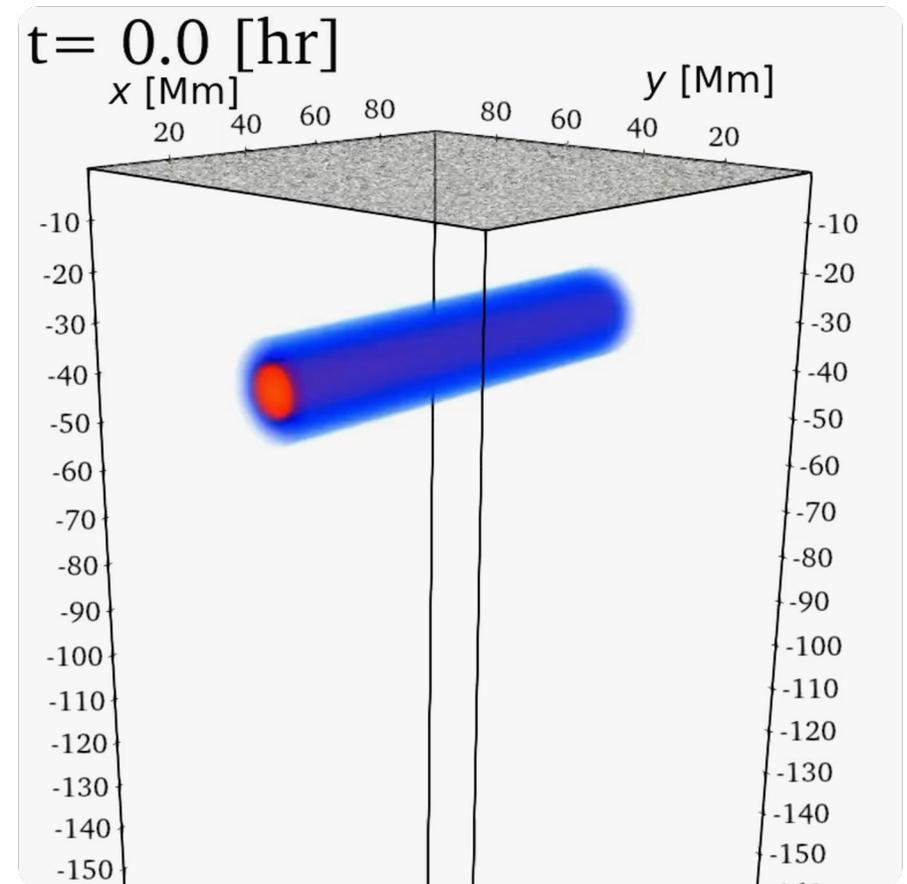
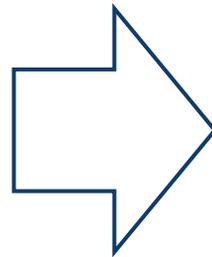
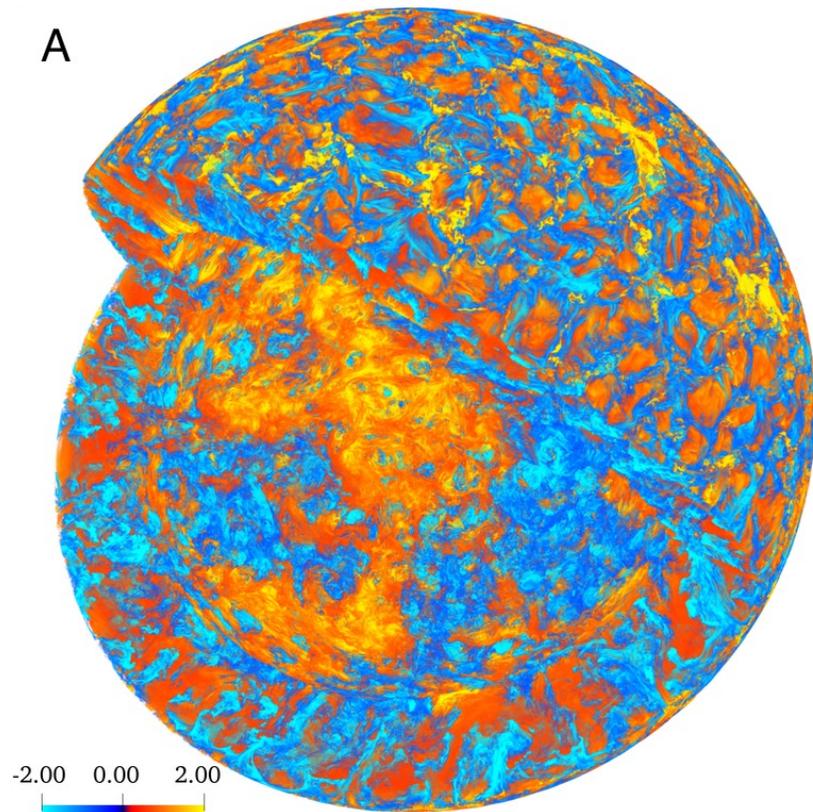
Hotta+2019, Science Advances



Hotta & Iijima, 2020

# 富岳NEXTで目指すところ：太陽深部 $\leftrightarrow$ 太陽表面

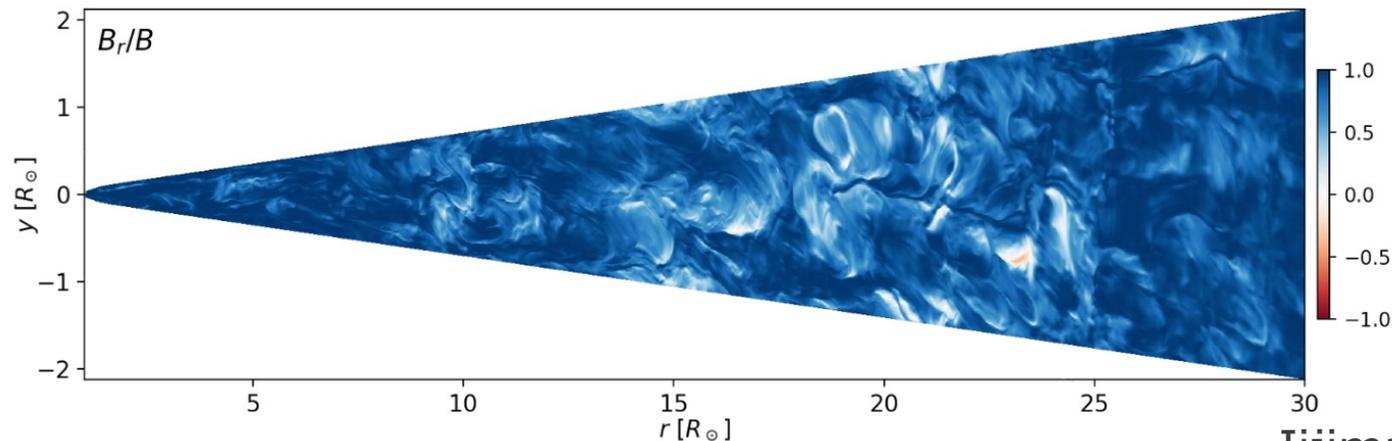
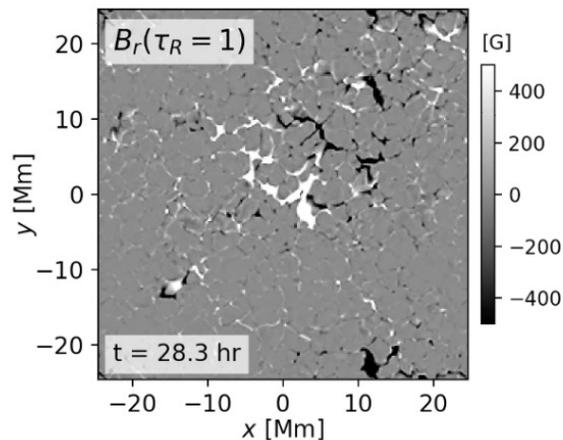
太陽表面を取り入れながら、太陽全球を解くことは富岳では不可能、富岳NEXTでもかなり厳しい  
→それぞれの計算は可能なので境界条件として取り入れる適切な方法を考えるのが富岳NEXTの課題  
(領域をつなぐ)



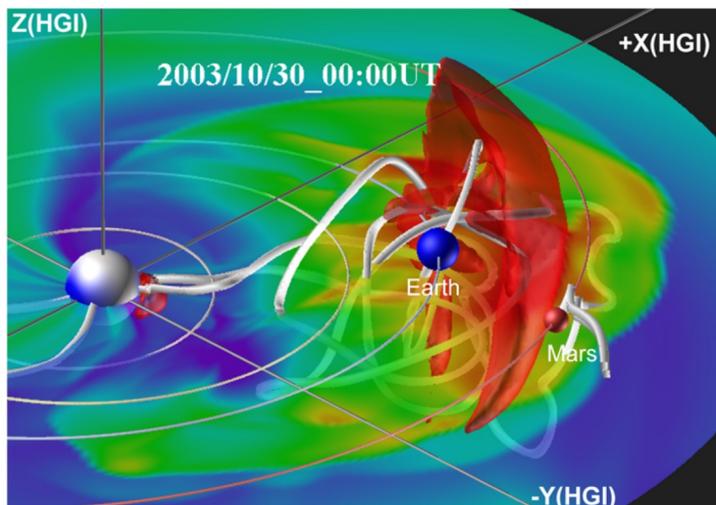
# 富岳・京で達成できたところ

## 富岳NEXTで目指すところ：太陽表面→太陽風

局所領域では、太陽表面から太陽風まで一貫して解くことに成功



Iijima+2023



Shiota+2016

- ✓ 全球スケールの磁場も太陽風構造に重要
- ✓ 第一原理的に解きながら、全球スケールを解くことは不可能
- ✓ 第一原理的富岳NEXTシミュレーションと実務的予報シミュレーションを如何に繋ぐかが鍵

# まとめ

- ✓ 太陽物理学には大きく二つの意義
  - 科学的意義  
いまだに未解決問題：太陽フレア、コロナ加熱、太陽風、
  - 宇宙天気の意義  
文明進化型：宇宙に進出を広げている人類の脅威
- ✓ 京・富岳と大規模なシミュレーションを継続
  - 大規模流れ場、領域包括計算、太陽風
- ✓ 富岳NEXTへの方向性

富岳NEXTは、FP64の性能が5-10倍とのことなので、これまでと同様のHPC利用では、飛躍的な科学成果の向上は望めない

性能の高いFP16, FP32の性能をうまく活かし、成果を創出することが肝要  
(ピンチはチャンス)

太陽物理学では、「スケールをつなぐ」、「領域をつなぐ」ことを機械学習などFP16, FP32の性能が重要なアプリケーションで実施することが富岳NEXT時代の重要な取り組みとなるであろう