

SOLAR-C/A案による日震学観測

関井 隆

国立天文台

今日のお話

- 戴いたタイトルは「Solar OrbiterとSDO、日震学の観点から」
- SOLAR-C/A案による日震学観測
 - SDO、Solar Orbiterとの比較
 - L5 mission?

結論

□ SOLAR-C/A案による日震学

太陽内部の様々な流れの局所的日震学による観測を行なって、ダイナモ機構の観測的研究の中心とする

□ SDOが打ち上がっても、やる価値はあるか？

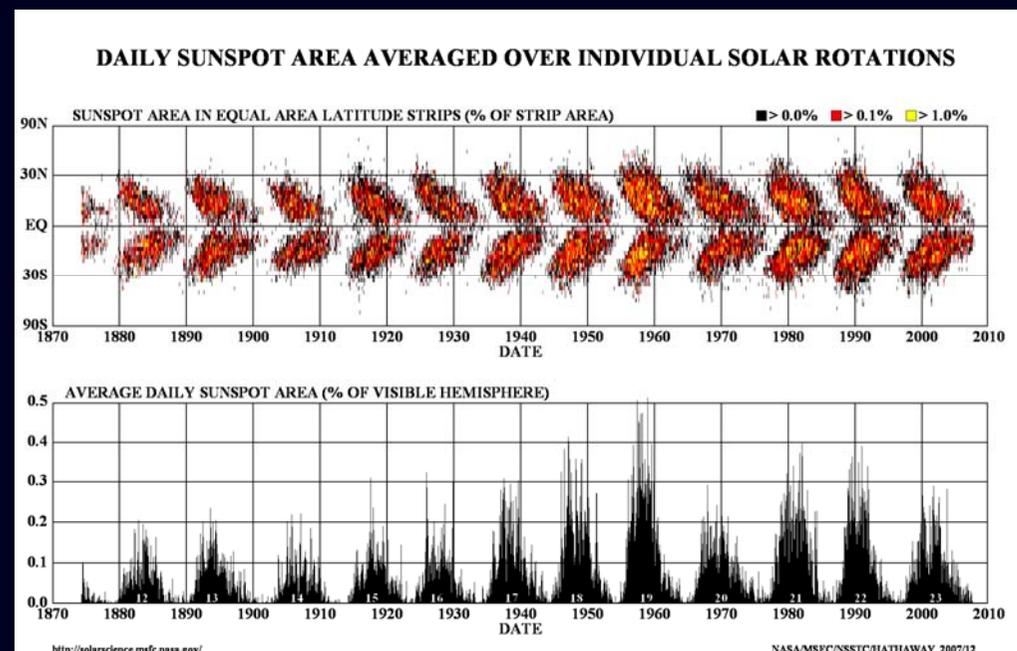
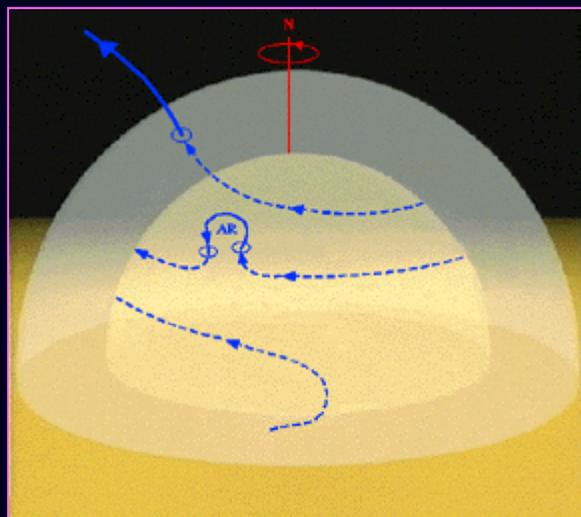
YES

□ Solar Orbiterが打ち上がることになっても、やる価値はあるか？

Most likely YES

ダイナモ機構

- 周期的変動を駆動しているのはダイナモ機構？
- 太陽内部のflowと磁場との相互作用
- 実際のメカニズムの詳細は未解決



ダイナモ理論

□ Kinematic theory

$$\vec{v}(r, \theta, \varphi) \Rightarrow \vec{B}(r, \theta, \varphi)$$

- 計算は比較的ラク
- 太陽内部のflowをinputとする

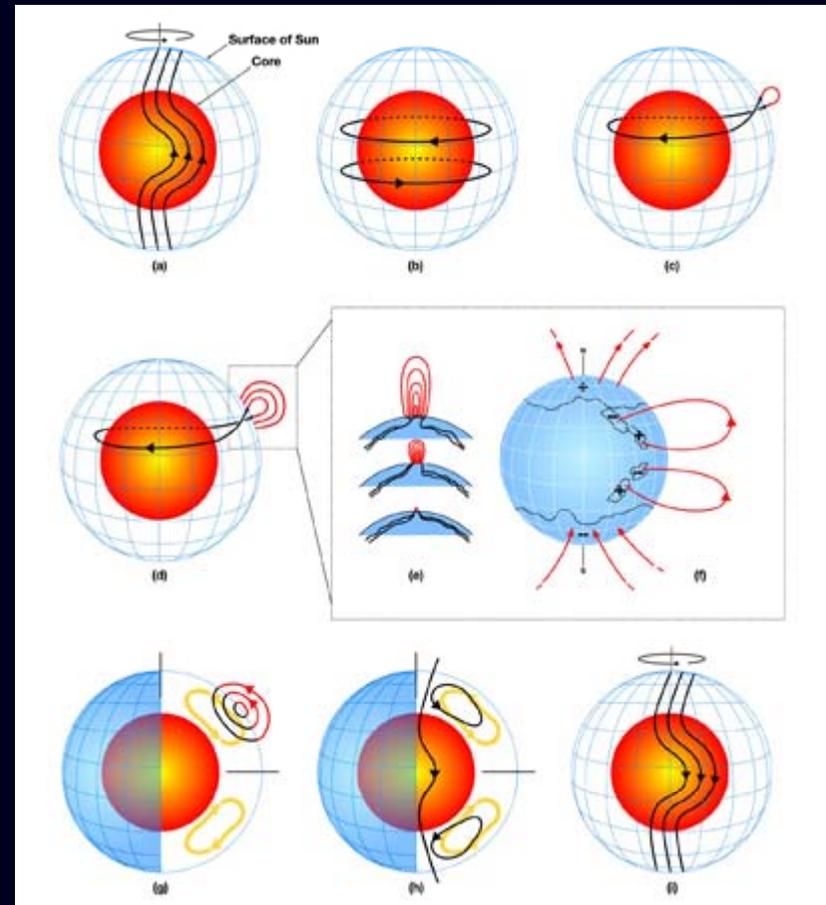
□ Dynamical theory

$$\vec{v}(r, \theta, \varphi) \Leftrightarrow \vec{B}(r, \theta, \varphi)$$

- 計算が大変
- Consistentな計算

Dikpati–Gilman model

- A flux–transport dynamo model
 - kinematic
 - Babcock–Leighton mechanism for poloidal component
 - Differential rotation and meridional flow taken from helioseismic results



Dikpati & Gilman (2006)

ダイナモ理論

- Kinematic theoryでは太陽内部のflowは直接的なinputになっている
 - Dikpati & Gilman (2006)はkinematic
- 完全なdynamical calculationはまだない
 - できれば、太陽内部のflowを併せて「予言」する
 - 定常状態？ 初期条件？

Solar internal flow

- ダイナモ機構の観測的研究：太陽内部の流れをどうやって調べるか？

日震学/Helioseismology
が唯一の手段

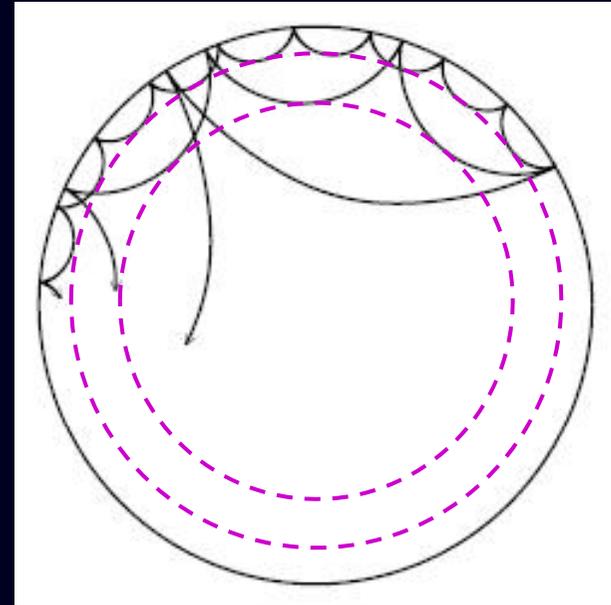
- しかし、数個のkey observationsでダイナモ機構がわかる程、われわれの理解は進んでいない
- 太陽内部の流れ：何を期待すべきなのかさえ、定量的にはわからない

日震学

- 1960年代初め: 5分振動の発見 (Doppler)
- 1970年代: 5分振動は固有pモード (音波モード)
- 1980年代: 日震学による太陽内部構造診断の進展 (固有値問題の逆摂動問題)
- 1990年代: 科学衛星SOHOなどによる「新世代」観測とそれに基づく内部構造診断 + 局所的日震学の誕生
- 2000年 ~ : 局所的日震学の進展

Ray theory

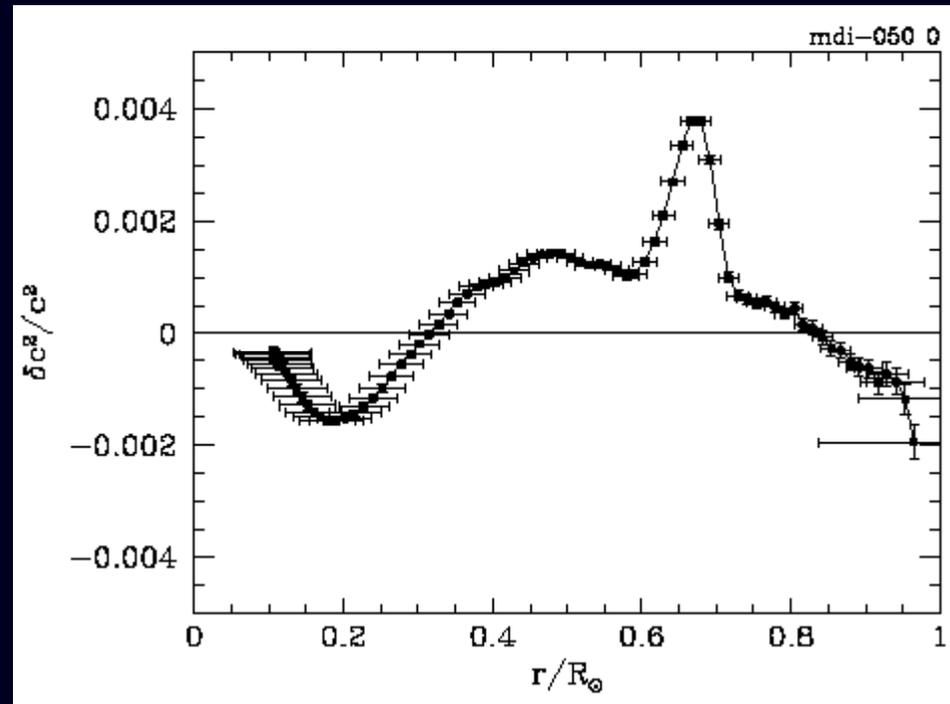
- 太陽内部の音波の伝播経路は、表面での入射角に依存
 - 入射角 \Leftrightarrow 波数の水平成分 k_h
 - \Leftrightarrow SH degree ℓ
- 色々なモードが太陽内部の色々な領域をサンプル



太陽内部：日震学

□ 音速分布(観測値-モデル値)

- モデルは日震学的发展とともに改良されて来たことには注意



Rotation inversion

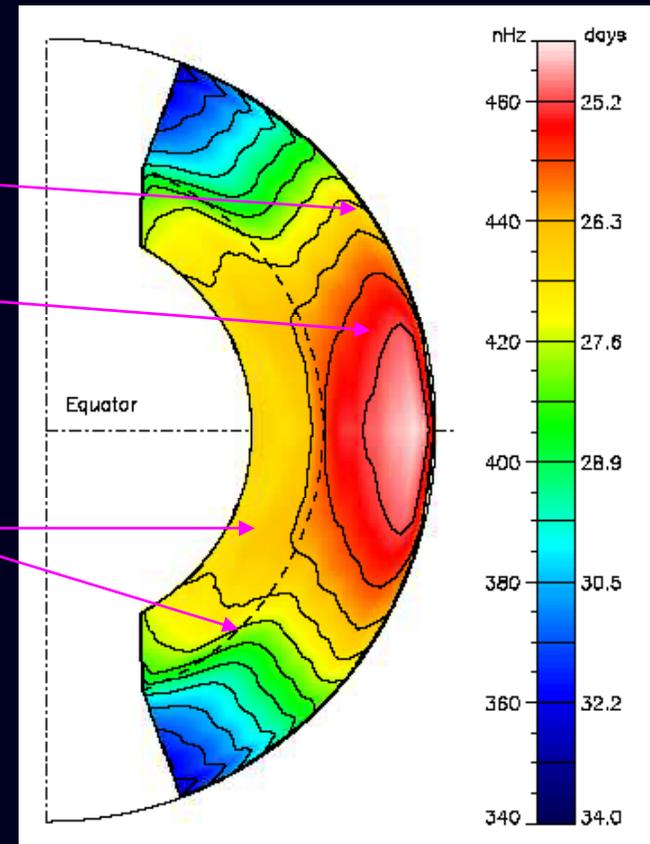
□ Solar differential rotation

Surface shear layer

Non-columnar rotation

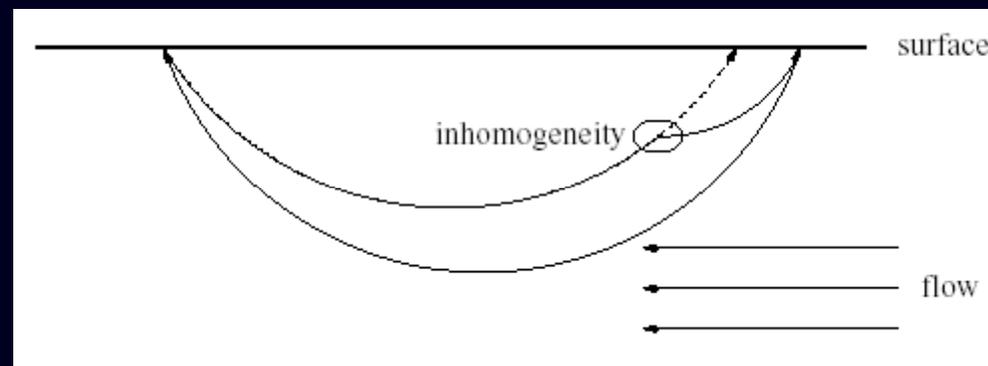
'Tachocline'

Rigid rotation?



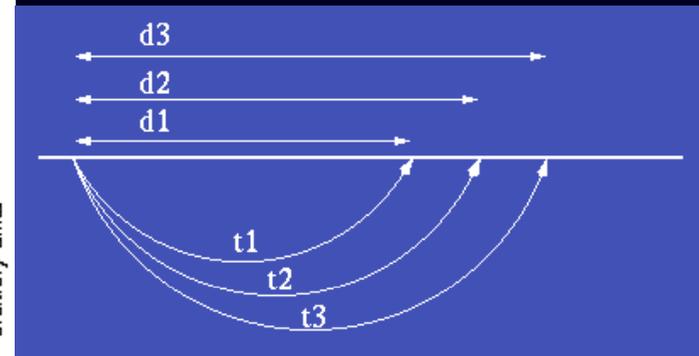
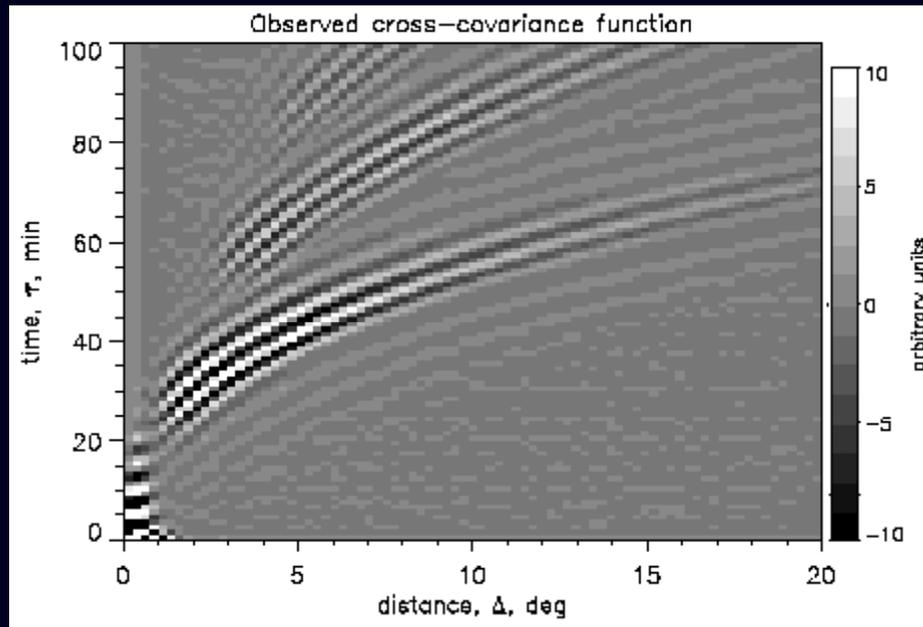
局所的日震学

- 日震学: 太陽表面の振動・波動現象をもとに太陽の内部構造を探る
- (グローバルな) 日震学: 固有振動数スペクトルのインバージョンが主な武器
- 局所的日震学: 固有振動に拘らず、局所的な波の伝播の観測から内部構造を探る



太陽内部：局所的日震学

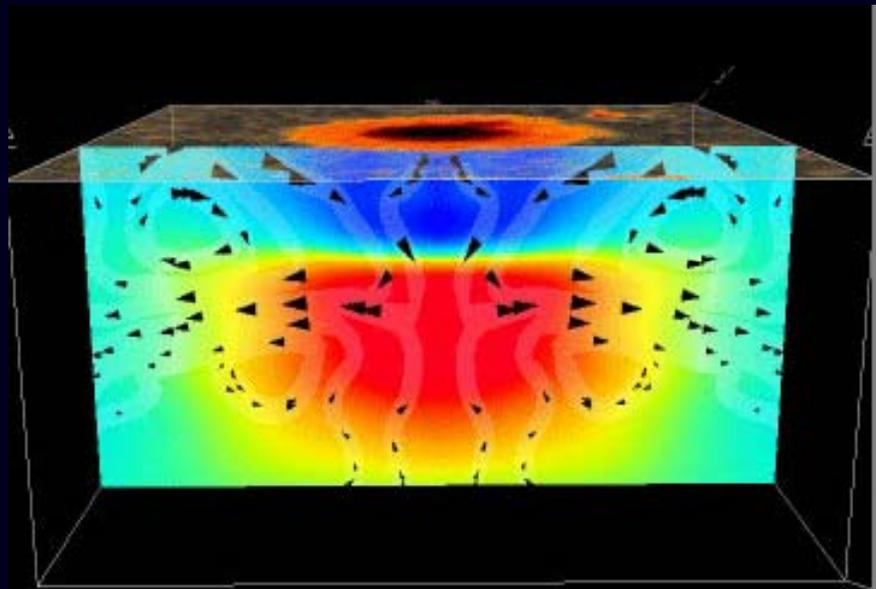
□ 主流は時間—距離法



(平均) 相互相関関数
$$C(\Delta, \tau) = \int_{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = \Delta} \psi^*(\vec{r}_1, t) \psi(\vec{r}_2, t + \tau) d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 dt$$

太陽内部：局所的日震学

□ 主流は時間一距離法



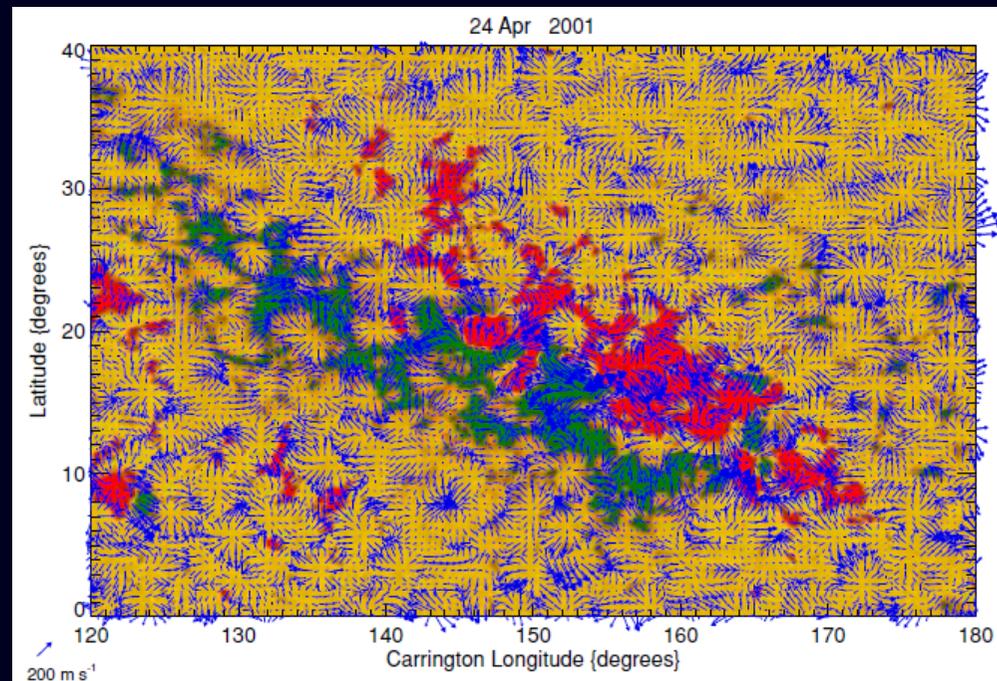
黒点下部の構造

Parker's spaghetti model?

太陽内部：局所的日震学

□ Ring-diagram法

■ ARまわりのsubsurface flow

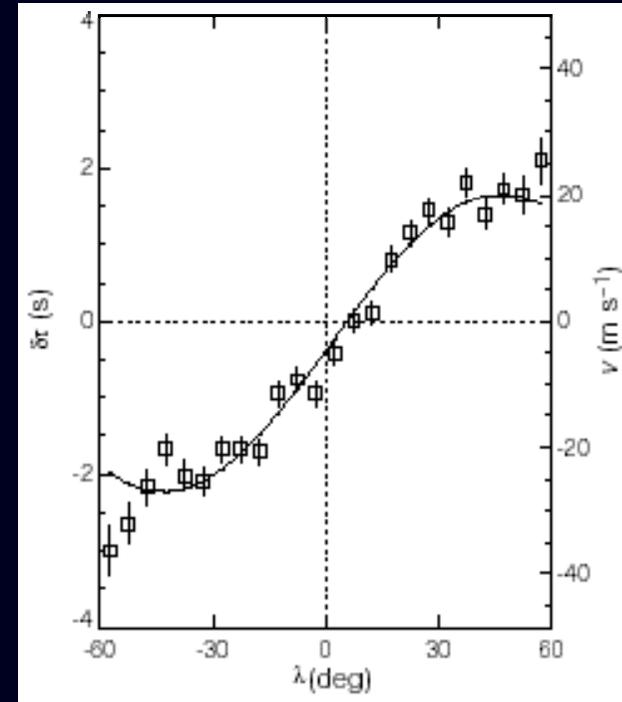
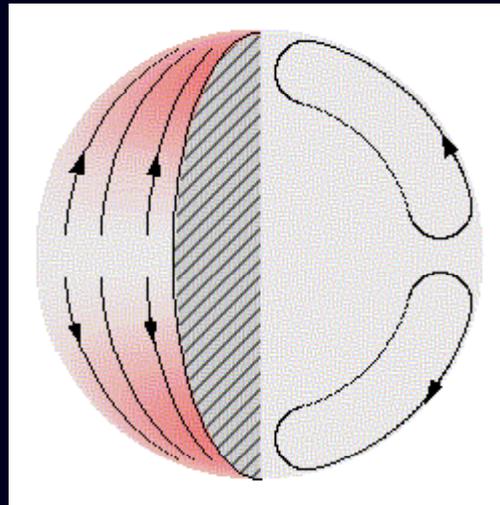


Hindman, Haber & Toomre (2009)

太陽内部：局所的日震学

□ Meridional flow

- Poleward, up to 20m/s



未踏の領域

□ 太陽の最深部

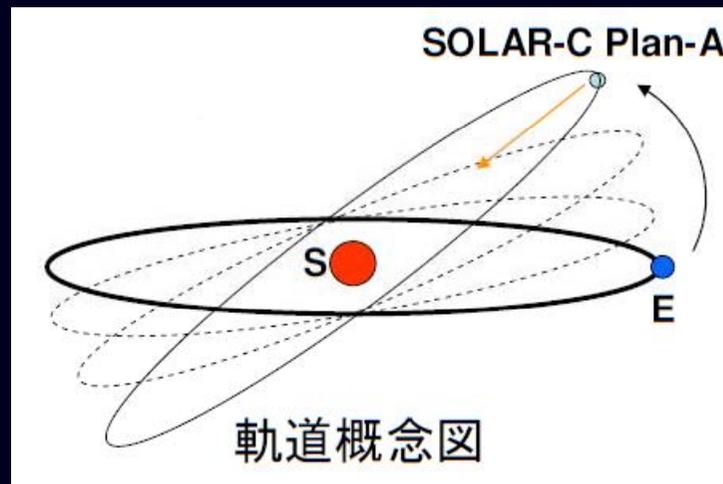
- 内部重力波モードが測定できるようにならないと難しい？
- 太陽ニュートリノ問題が(恐らく)解決した今、緊急性はない

□ 高緯度領域

- Meridional flowはどこで沈み込む？
- Rotation, meridional flow, convection...
 - 極域ダイナミクス

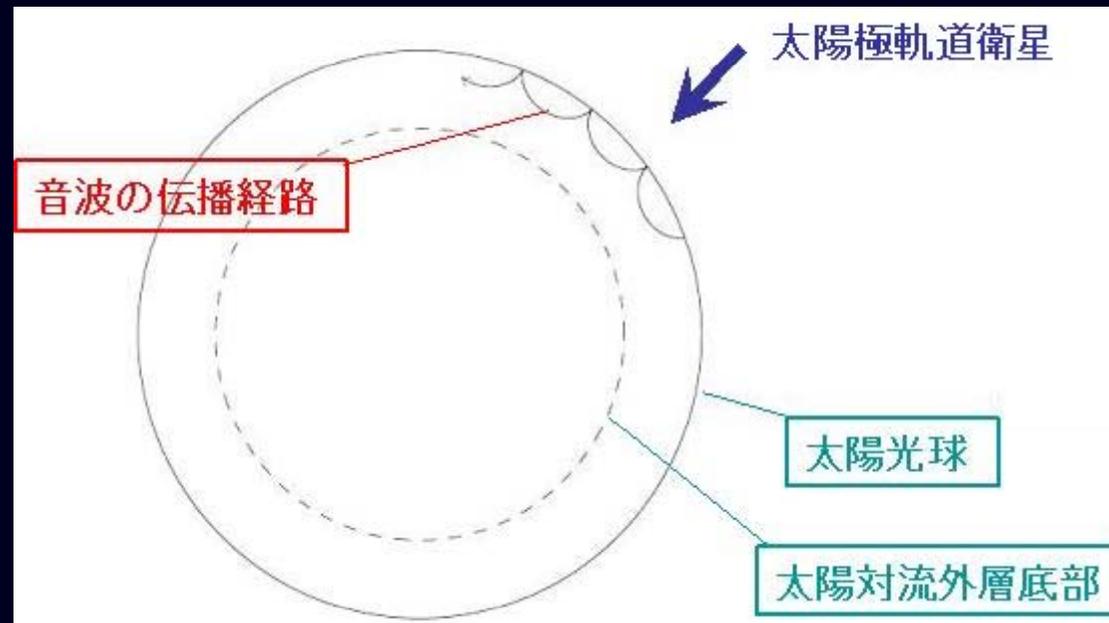
SOLAR-C (A案)

- 太陽極域観測のための黄道面脱出ミッション
 - 太陽を高緯度から観測
 - 高緯度のmid/upper convection zoneのflowの局所的日震学
 - Tachocline region?



太陽高緯度の局所的日震学

- 高緯度からprojection/foreshorteningによるdegradationなしに表面速度場を観測



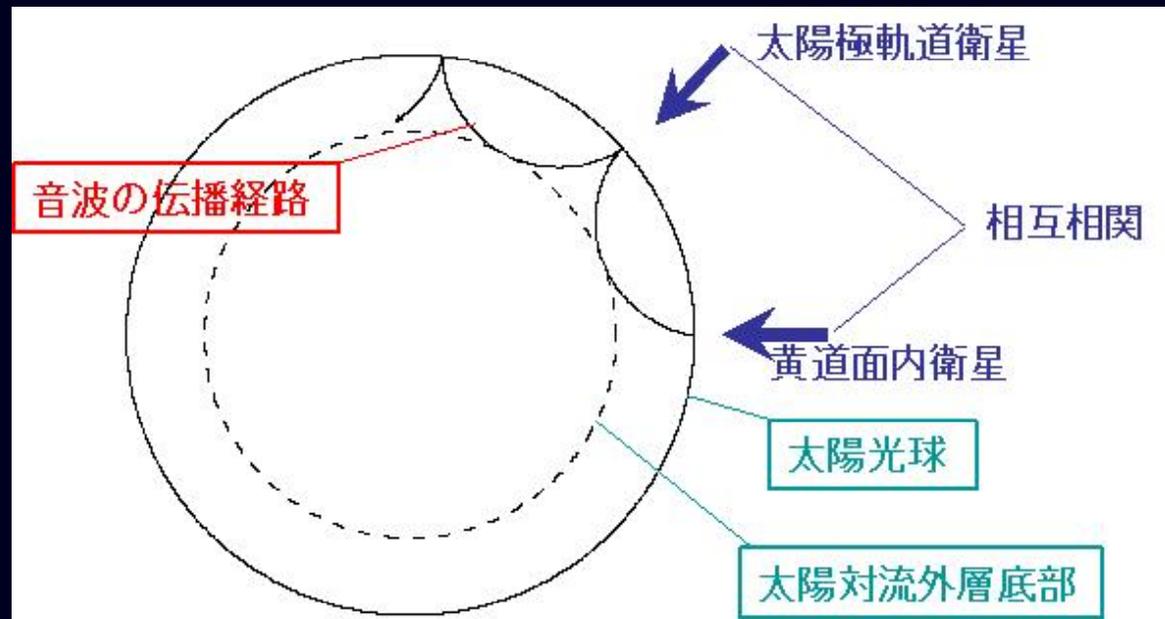
対流層深部の局所的日震学

□ 水平方向の波長の長い波の観測

■ The large-angle method

□ Or simply covering wider area

■ Tachoclineでの 10^5G 磁場は検出限界ギリギリ？



なぜ40度か

- なぜ30度で十分だと思ってしまうか
 - Meridional flow: 黄道面内から60度まで測れる
 - 30度からなら90度まで測れる
- なぜそれは間違いか
 - 詳細は結構ややこしいが、ひとつの側面を挙げると
 - Amount of longitudinal averaging = $\cos\phi$
 - $\cos 60^\circ = 0.5$
 - $\cos 80^\circ = 0.174$
 - $\cos 85^\circ = 0.09$

Time-Distance Method

- 特定の構造の検出可能性評価のステップ
 1. シグナルの大きさ: 構造が伝播時間に及ぼす影響
 - Ray approximation、Born approximation、direct numerical simulationなど
 2. 表面の測定点の幾何学的配置
 - ここでprojection & foreshorteningが決まる
 3. 平均化のプロセス(空間平均、角度平均)
 - ここでノイズレベルが決まる
- 例: tachocline flow signal \sim a few \times 0.1 s
 - With SOLAR-C plan A: something between possible and impossible

Solar Dynamics Observatory

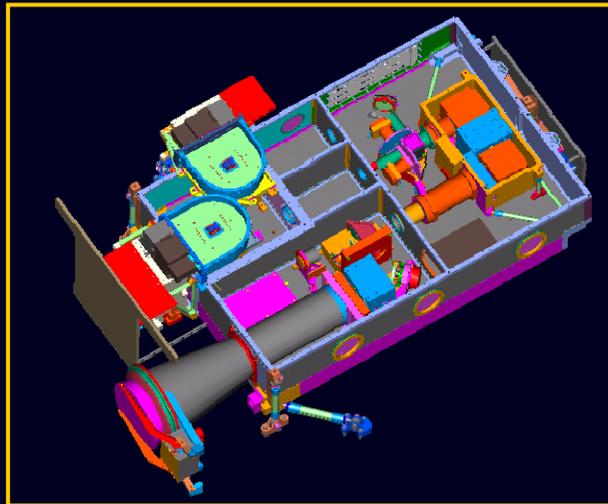
- 2010年2月8日打ち上げ予定
 - Geostationary orbit
- 搭載機器
 - 太陽全面の高分解能観測による日震学観測(HMI)
 - 日震学+ベクトル磁場測定
 - 多波長撮像+極端紫外irradiance(AIA)



Helioseismic and Magnetic Imager

□ HMI: MDIの広視野版

- MDIの高分解能モードはDC付近の狭い視野しか見られなかった
- HMIでは同じ高分解能で太陽全面を観測



Helioseismic and Magnetic Imager

Parameter	Requirement
Central wavelength	6173.3 Å \pm 0.1 Å (Fe I line)
Filter bandwidth	76 mÅ \pm 10 mÅ fwhm
Filter tuning range	680 mÅ \pm 68 mÅ
Central wavelength drift	< 10 mÅ during any 1 hour period
Field of view	> 2000 arc-seconds
Angular resolution	better than 1.5 arc-seconds
Detector resolution	0.50 \pm 0.01 arc-second / pixel
Focus adjustment range	\pm 4 depths of focus
Pointing jitter reduction factor	> 40 db with servo bandwidth > 30 Hz
Image stabilization offset range	> \pm 14 arc-seconds in pitch and yaw
Pointing adjustment range	> \pm 200 arc-seconds in pitch and yaw
Dopplergram cadence	< 50 seconds
Image cadence for each camera	< 4 seconds
Timing	< 1 μ s stability, < 100 ms absolute
Science telemetry allocation	< 55 Mbits/s
Instrument design lifetime	> 5.3 years

HMI vs. MDI

□ HMIはMDIと比較して

- 望遠鏡本来の分解能で太陽全面
 - よりたくさんのsunspots/ARsを捕捉可能
 - 高緯度も観測可能(ただしSOTには負ける)
- (45-sec cadenceが基本)
- (ベクトル磁場)
- 磁場によりsensitiveなラインを使用
 - Magnetized regionのDoppler観測でcontamination?

HMI vs. SOLAR-C Plan A

- SOLAR-C/A案は「高緯度に持って行ったHMI」
 - 従って、高緯度観測の黄道面内からの観測に対するアドバンテージはそのままダイレクトに現われる
- 高緯度領域の観測では
 - SOLAR-C/A 案 > HMI
- HMIの利点は広視野
 - AR: もっと多く、もっと長く(L5ミッションも同様)
 - 現在のサイエンスの自然な延長ではある
 - 高分解能観測装置との相補性
 - 黄道面外観測装置との相補性

HMI vs. SOLAR-C Plan A

□ ただし

■ 日震学ミッションが多過ぎる？

Solar Orbiter

- Cosmic Vision M-class mission
- 先週3つのミッションがfinal roundへ進むことが決定
 - Solar Orbiter
 - PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars)
 - Euclid
 - "Mapping the geometry of the dark Universe"
- 2012年夏:このうち2つを選択
- 2017年頃打ち上げ予定

Solar Orbiter

□ 軌道

- Perihelion 0.23AU: “co-rotation science”
- 7.5年のnominal missionで軌道傾斜角 25° まで
- その後のextended mission中に 34° まで

□ 搭載機器: 多数のin-situ instrumentsと多数のremote-sensing instruments

- Polarimetric and Helioseismic Imager (PHI)
 - High Resolution Telescope (HRT): 150km resolution at perihelion(0.23AU)
 - Full Disk Telescope (FDT) : 700km resolution (all orbital phases)

Solar Orbiter

Mission Description

Solar Orbiter Mission Summary																		
Top-level Science Questions	<ul style="list-style-type: none"> • How and where do the solar wind plasma and magnetic field originate in the corona? • How do solar transients drive heliospheric variability? • How do solar eruptions produce energetic particle radiation that fills the heliosphere? • How do solar transients drive heliospheric variability? 																	
Science Payload	<ul style="list-style-type: none"> • Helio • S • I • P • I • Solar • I • I • I • 2 • C • I 	<table border="1"> <tr> <td>Spacecraft</td> <td>3-axis stabilised platform, heat shield, two adjustable, 2-sided solar arrays, dimensions: 2.5 x 3.0 x 2.5 m³ (launch configuration)</td> </tr> <tr> <td>Orientation</td> <td>Sun-pointing</td> </tr> <tr> <td>TM band</td> <td>X/Ka</td> </tr> <tr> <td>Data downlink</td> <td>150 kbps (at 1 AU S/C-Earth distance)</td> </tr> <tr> <td>Launch date</td> <td>Jan-2017 (Jul-2018 back-up)</td> </tr> <tr> <td>Nominal Mission duration</td> <td>7.5 yr (incl. cruise phase)</td> </tr> <tr> <td>Extended Mission duration</td> <td>2.4 yr</td> </tr> <tr> <td>Post-ops & Archiving</td> <td>2.0 yr</td> </tr> </table>	Spacecraft	3-axis stabilised platform, heat shield, two adjustable, 2-sided solar arrays, dimensions: 2.5 x 3.0 x 2.5 m ³ (launch configuration)	Orientation	Sun-pointing	TM band	X/Ka	Data downlink	150 kbps (at 1 AU S/C-Earth distance)	Launch date	Jan-2017 (Jul-2018 back-up)	Nominal Mission duration	7.5 yr (incl. cruise phase)	Extended Mission duration	2.4 yr	Post-ops & Archiving	2.0 yr
	Spacecraft	3-axis stabilised platform, heat shield, two adjustable, 2-sided solar arrays, dimensions: 2.5 x 3.0 x 2.5 m ³ (launch configuration)																
	Orientation	Sun-pointing																
	TM band	X/Ka																
	Data downlink	150 kbps (at 1 AU S/C-Earth distance)																
	Launch date	Jan-2017 (Jul-2018 back-up)																
	Nominal Mission duration	7.5 yr (incl. cruise phase)																
	Extended Mission duration	2.4 yr																
Post-ops & Archiving	2.0 yr																	
Mission Profile	<ul style="list-style-type: none"> • Launch (Soyuz) • Interplanetary • Earth orbit • Operations • Gravity assist 	<table border="1"> <tr> <td>Programmatic</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> • ESA is responsible for the Solar Orbiter spacecraft, transfer to nominal science orbit, mission operations. • NASA is responsible for launch vehicle provision and launch operations. • Science payload provided by ESA Member States and NASA (already selected via competitive AO process in 2008/9) </td> </tr> </table>	Programmatic	<ul style="list-style-type: none"> • ESA is responsible for the Solar Orbiter spacecraft, transfer to nominal science orbit, mission operations. • NASA is responsible for launch vehicle provision and launch operations. • Science payload provided by ESA Member States and NASA (already selected via competitive AO process in 2008/9) 														
	Programmatic	<ul style="list-style-type: none"> • ESA is responsible for the Solar Orbiter spacecraft, transfer to nominal science orbit, mission operations. • NASA is responsible for launch vehicle provision and launch operations. • Science payload provided by ESA Member States and NASA (already selected via competitive AO process in 2008/9) 																

Solar Orbiter vs. SOLAR-C Plan A

□ 概念的にはお互いにもっとも似たライバル

■ SOLAR-C/A案の方が

□ より高緯度に到達(40度>25度)

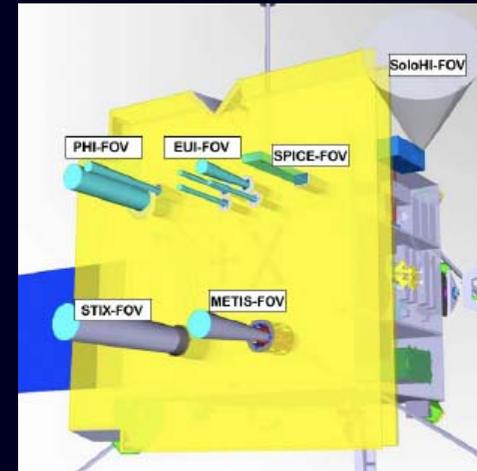
■ 30度+ α の重要性

□ より早く到達(2022年 vs. 2024年)

□ テレメトリも(300kbps>100kbps)

□ Remote-sensingミッションとして適切

■ SOLAR-C/A案>Solar Orbiter



Solar Orbiter vs. SOLAR-C Plan A

□ ただし

- SOLAR-Cが遅れれば軌道のアドバンテージは消える可能性も？
- その場合にアドバンテージを定量的に言うのは難しいかも
- SDO/HMIと違って似過ぎているので、直接比較される

結論(再掲)

□ SOLAR-C/A案による日震学

太陽内部の様々な流れの局所的日震学による観測を行なって、ダイナモ機構の観測的研究の中心とする

□ SDOが打ち上がっても、やる価値はあるか？

YES cf. L5 mission

□ Solar Orbiterが打ち上がることになっても、やる価値はあるか？

Most likely YES

最後に・・・A案 vs. B案

- このコミュニティはA案を本気でやれるか？
- 誰がA案の柱となるサイエンスをやるのか
- このコミュニティはB案を捨てられるか？
- 両方やれるか？ そうすると時間がかかるが、そんな先のことまでわれわれがロードマップを作ってしまうていいか？
- Solar OrbiterとA案はどう対決するのか？