



金星探査機が見た太陽風加速

今村 剛

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

発表論文

タイトル: "Outflow structure of the quiet Sun corona probed by spacecraft radio scintillations in strong scattering" (探査機電波シンチレーションで観測された太陽静穏領域のコロナの吹き出し構造)

著者: T. Imamura, M. Tokumaru, [H. Isobe](#), [D. Shiota](#), H. Ando, M. Miyamoto, T. Toda, B. Häusler, M. Pätzold, A. Nabatov, [A. Asai](#), K. Yaji, M. Yamada, M. Nakamura

掲載号: The Astrophysical Journal, 2014年6月20日号

タイトル: "Radial distribution of compressive waves in the solar corona revealed by Akatsuki radio occultation observations" (あかつき電波掩蔽で明らかになった太陽コロナ中の圧縮性波動の分布)

著者: M. Miyamoto, T. Imamura, M. Tokumaru, H. Ando, [H. Isobe](#), [A. Asai](#), [D. Shiota](#), T. Toda, B. Häusler, M. Pätzold, A. Nabatov, M. Nakamura

掲載号: The Astrophysical Journal, 2014年12月10日号

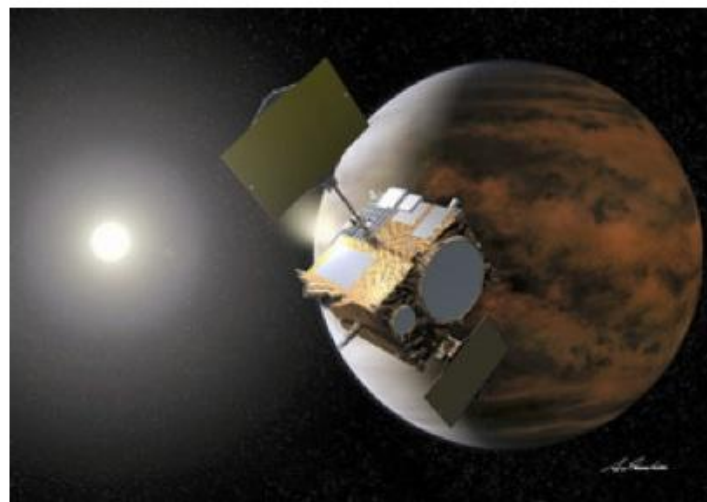
京大関係の皆様との成果

「あかつき」太陽風とらえた 金星軌道入れず周回中

神田明美 2014年12月20日14時59分

印刷

メール



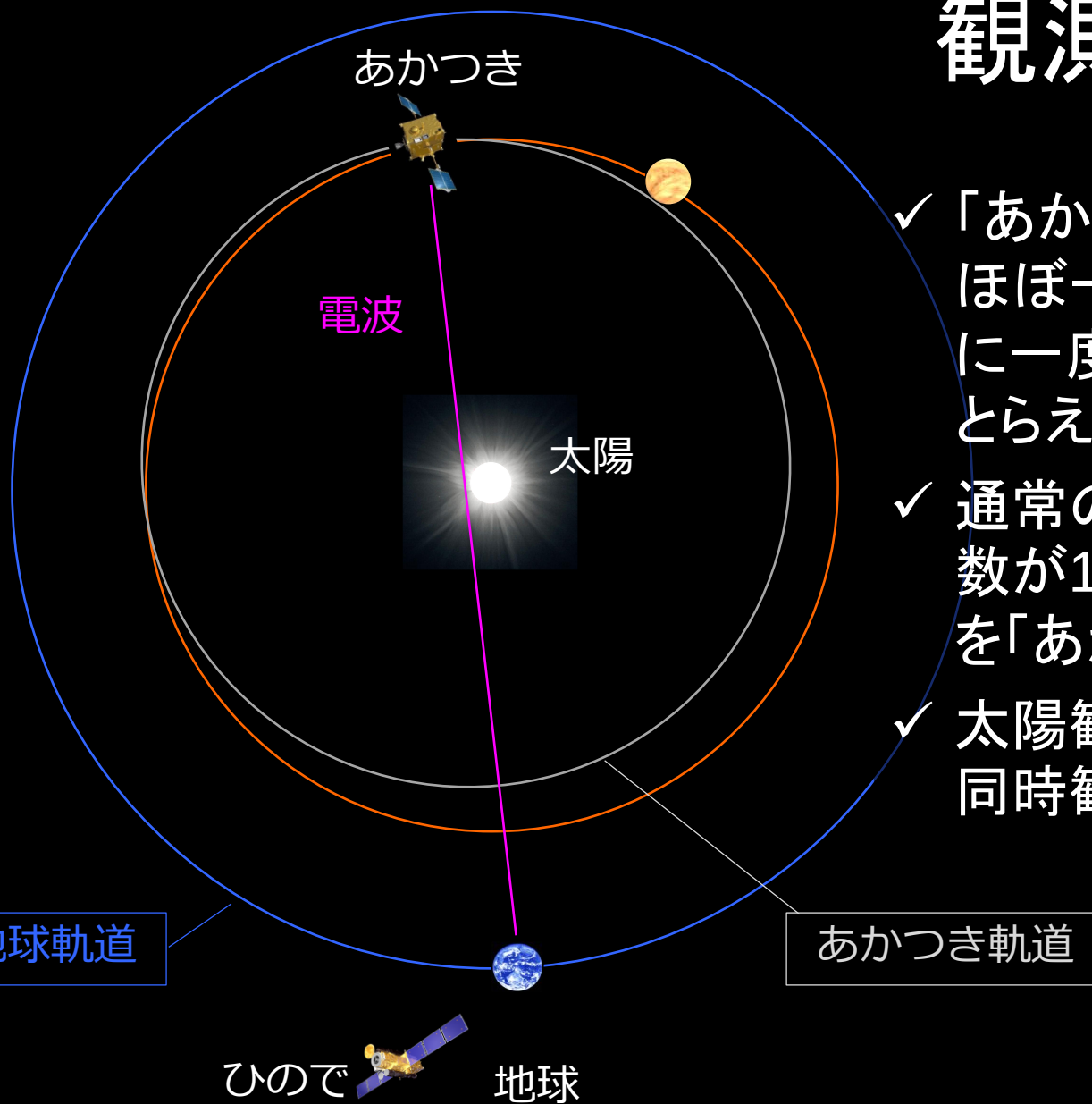
探査機「あかつき」のイメージ図。左奥が太陽。手

宇宙航空研究開発機構（JAXA）や
東京大学 などの研究チームは18日、金
星 探査機「あかつき」を使った観測で、
太陽から吹き出している「太陽風」は、太
陽半径（約70万キロ）の5倍ほどの距離
から急激に加速していることがわかったと
発表した。研究成果が米 専門紙 に掲載さ
れた。

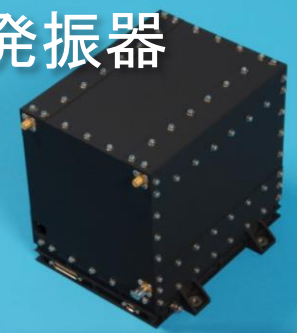
太陽風は、太陽から吹き出す電気を帯び

観測の特色

- ✓ 「あかつき」と太陽と地球がほぼ一直線に並ぶ、数年に一度の貴重なチャンスをとらえた
- ✓ 通常の衛星通信より周波数が1000倍安定した電波を「あかつき」から送信
- ✓ 太陽観測衛星「ひので」と同時観測

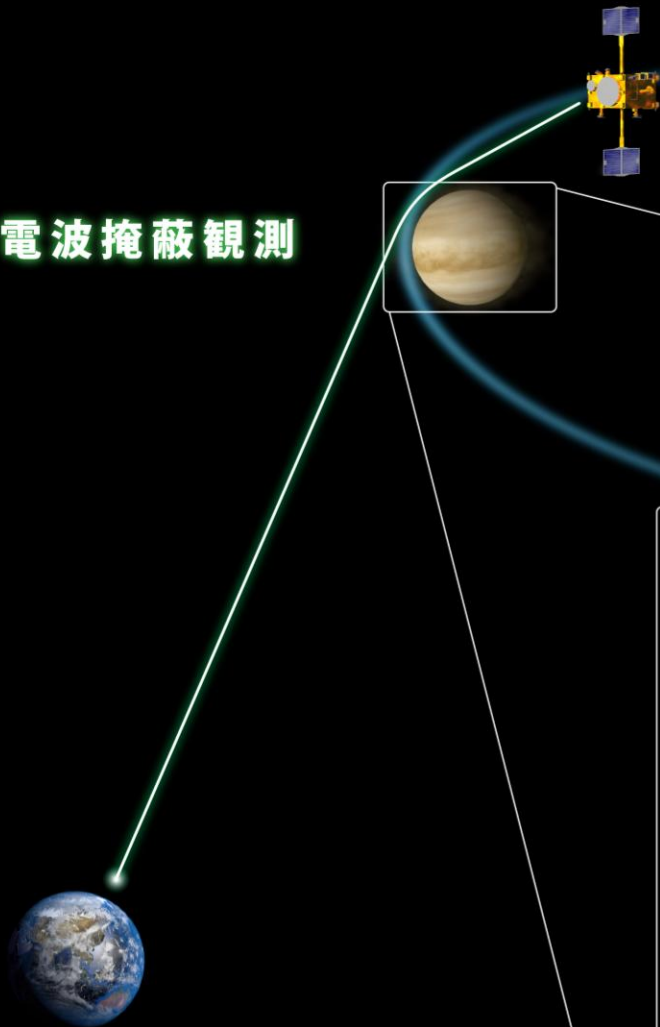


超高安定発振器

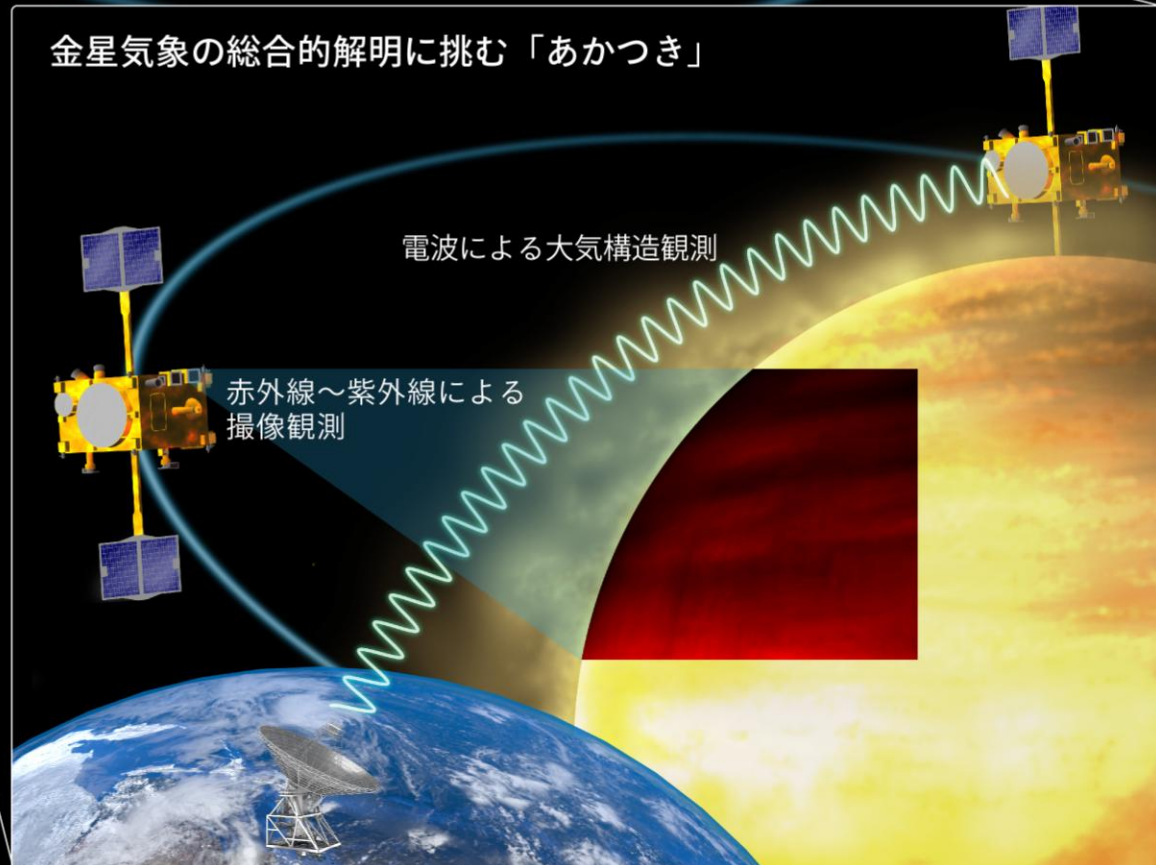


PLANET-C USO

電波掩蔽観測



金星気象の総合的解明に挑む「あかつき」



電波による大気構造観測

赤外線～紫外線による
撮像観測



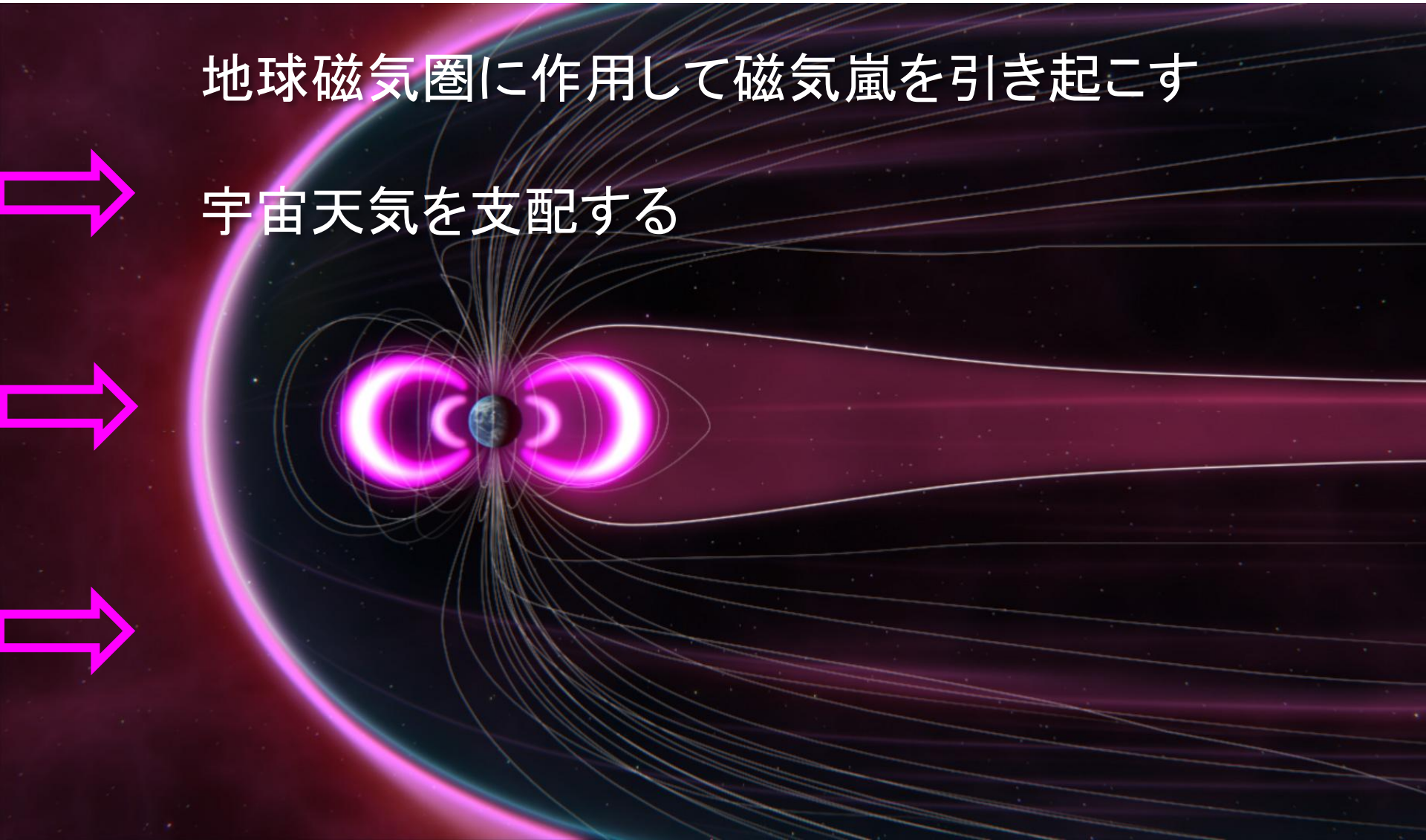
太陽風(コロナ)＝太陽から吹き出す
電気を帯びた希薄なガス(プラズマ)

口径 12.5cm 屈折望遠鏡 (BORG 125ED F4, f=500mm), 赤道儀:ピクセン GPガイドバック, カメラ:ペンタックス67, フィルム:フジクローム Velvia, コダック Technical Pan 6415
露出時間: Velvia 1/1000, 1/500, 1/125, 1/30, 1/8, 1/2, 1, 4, 8, 10秒, Technical Pan 12, 15, 8, 4秒 (フジ・アセテートフィルタ SC-60 使用),
画像処理:フィルム・スキャナを使用し画像化, 14コマそれぞれの画像をローテーション・グラディエント処理を施し, 露出時間の短い画像から順番にぼかしたマスクをかけながら合成,
画像範囲: 6.8×5.5°, 撮影時刻: 13h09m50s ~ 13h12m20s (UT), 観測場所: アフリカ, ザンビア, ルサカ, 空港の駐車場 (経度 E28° 27' 56", 緯度 -15° 18' 05", 標高 1150m)

太陽風

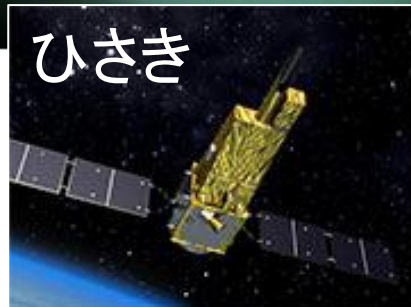
地球磁気圏に作用して磁気嵐を引き起こす

宇宙天気を支配する



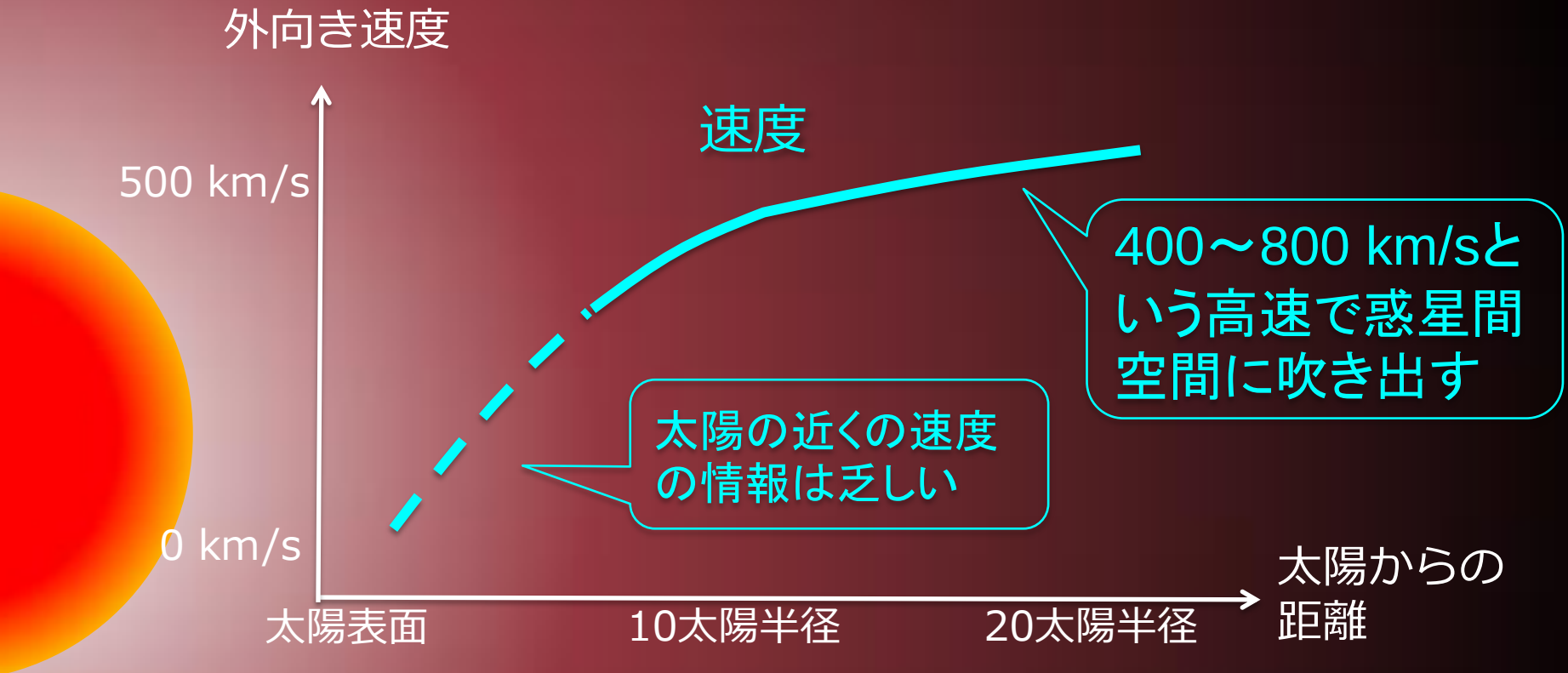
太陽風

惑星大気に作用して大気の流出を引き起こす

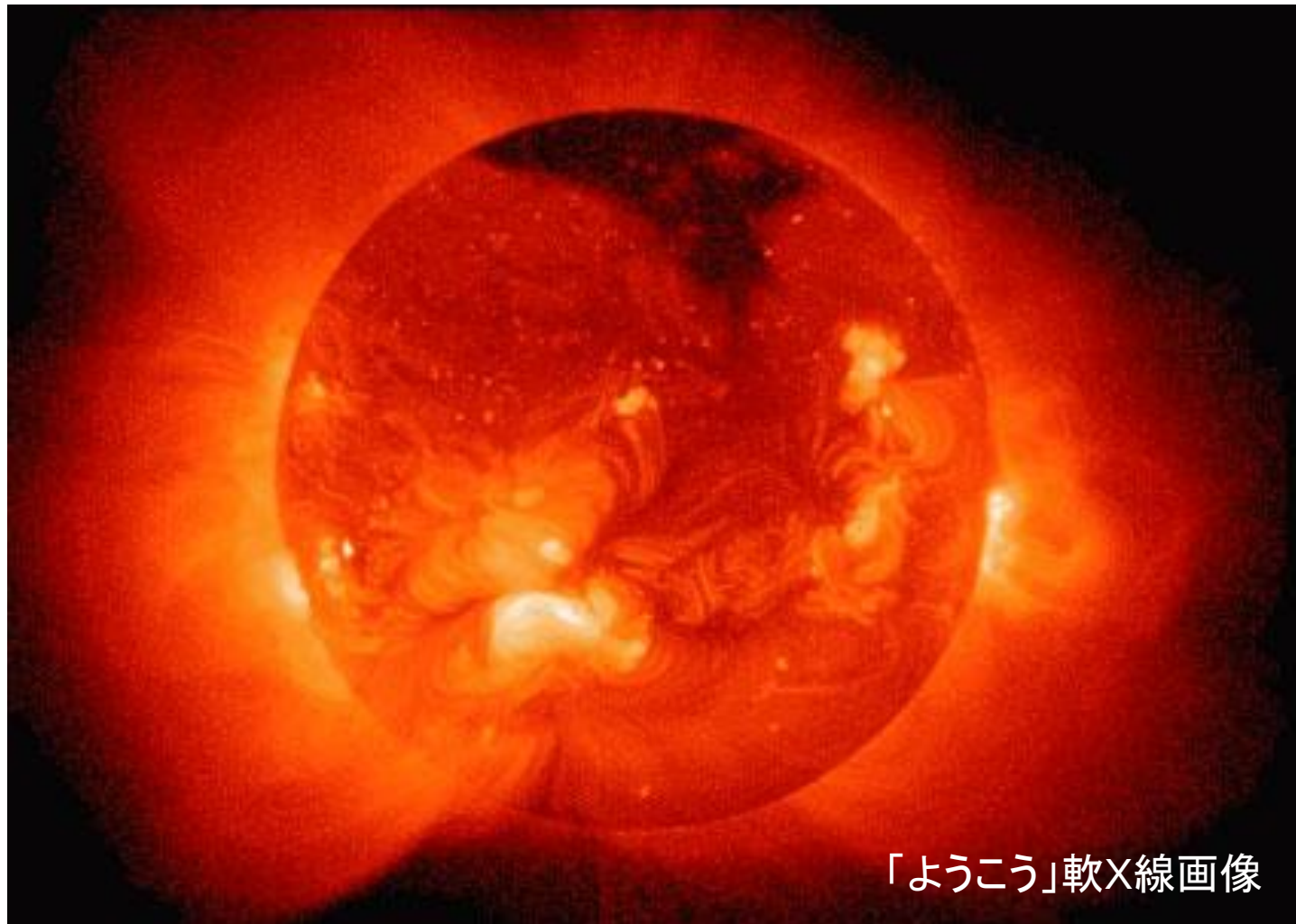


©NASA

太陽風(コロナ)の速度



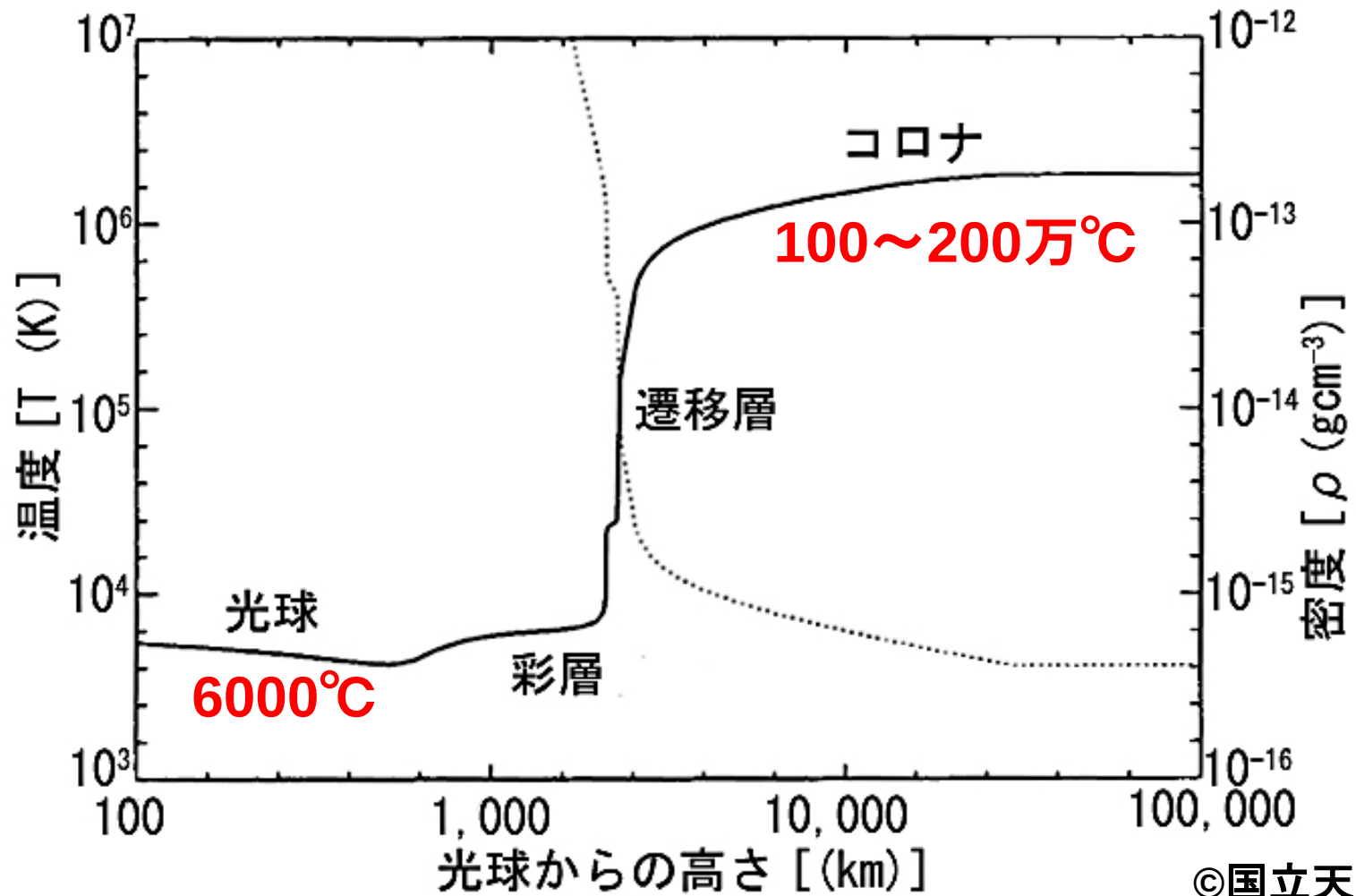
太陽風はなぜ吹くのか



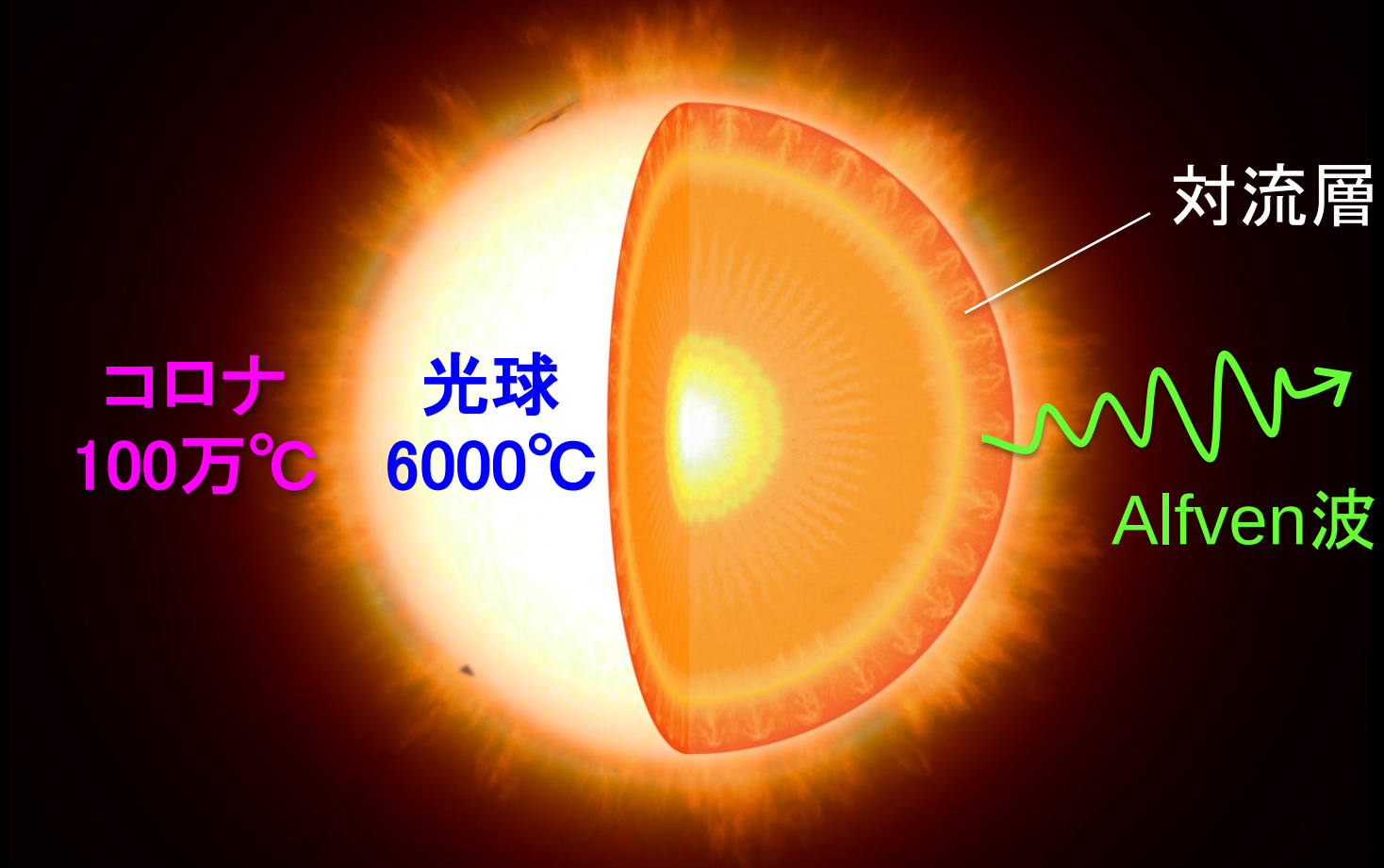
「ようこう」軟X線画像

高温の太陽コロナが鍵

コロナは100万度



6000°Cの光球の上になぜ100万°Cの コロナがあるのか（コロナ加熱問題）



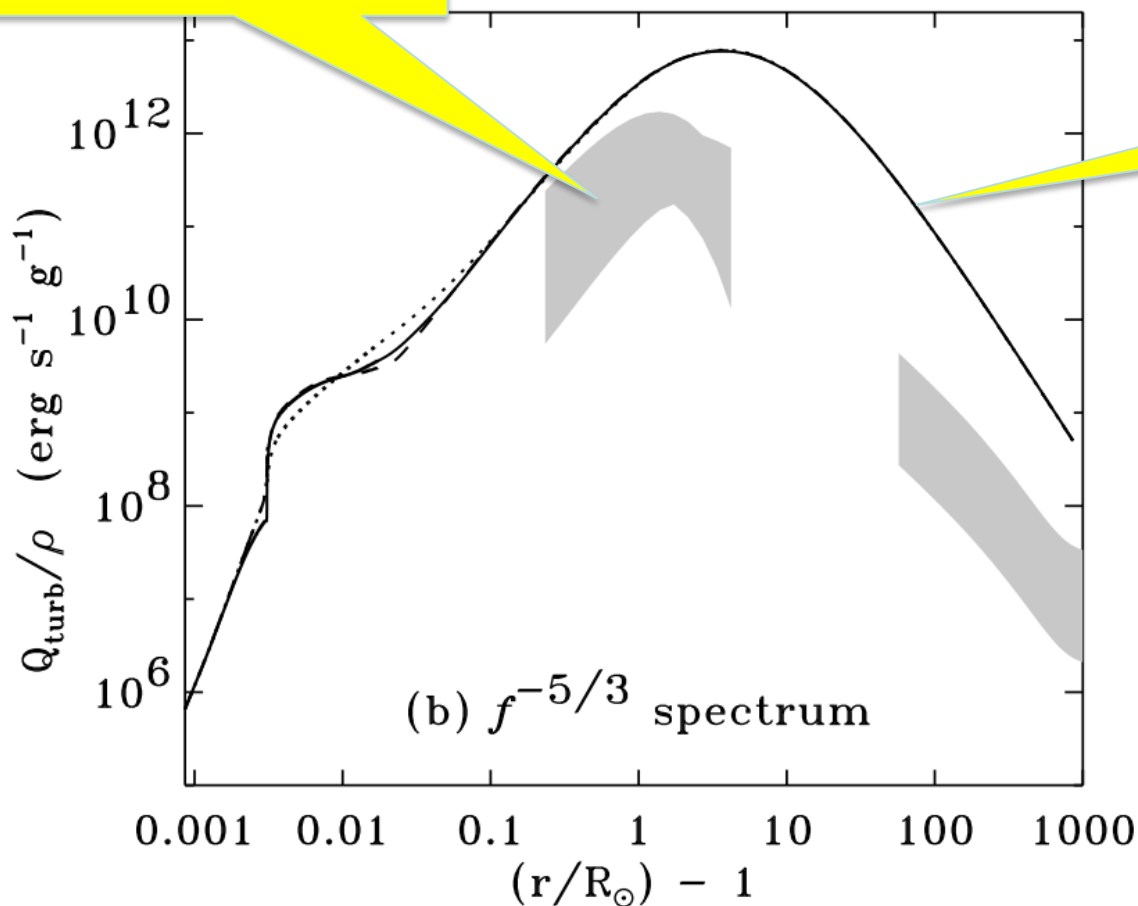
加熱するしくみとして、太陽表面で対流によって作られて
磁力線の振動として伝わる波（Alfven波）が有力

Heating rates required to produce fast streams

Cranmer et al. (2010)

観測からの制約

モデル



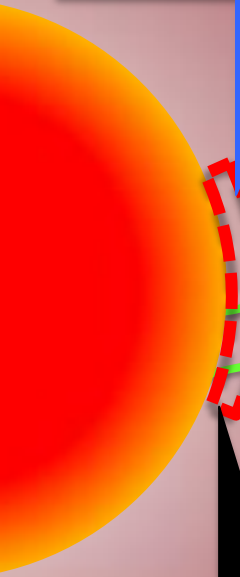
波による加熱？

表面での加熱：

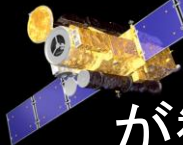
光球からコロナにかけての急激な温度上昇を引き起こす

遠方での加熱：

大きな加速をもたらして高速の太陽風を作る。観測がとぼしくほとんどわかっていない。



太陽観測衛星

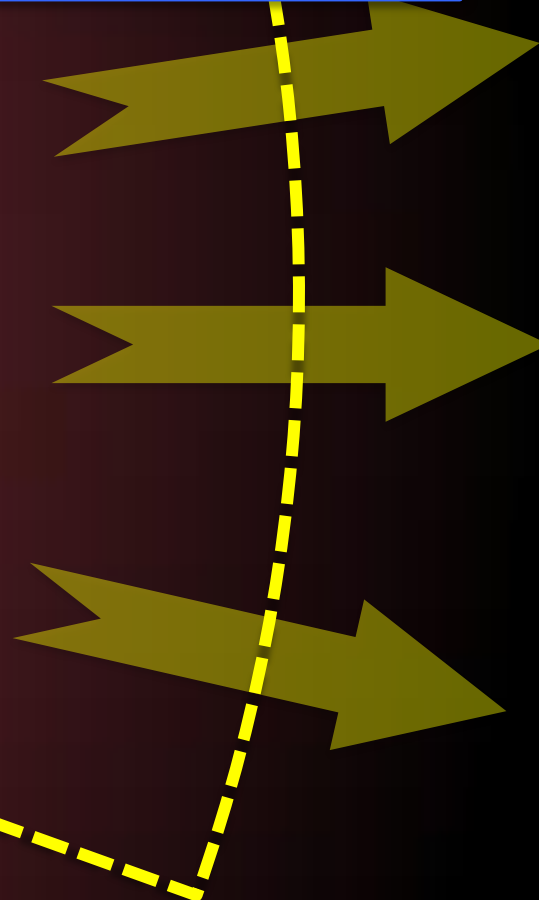


が観測

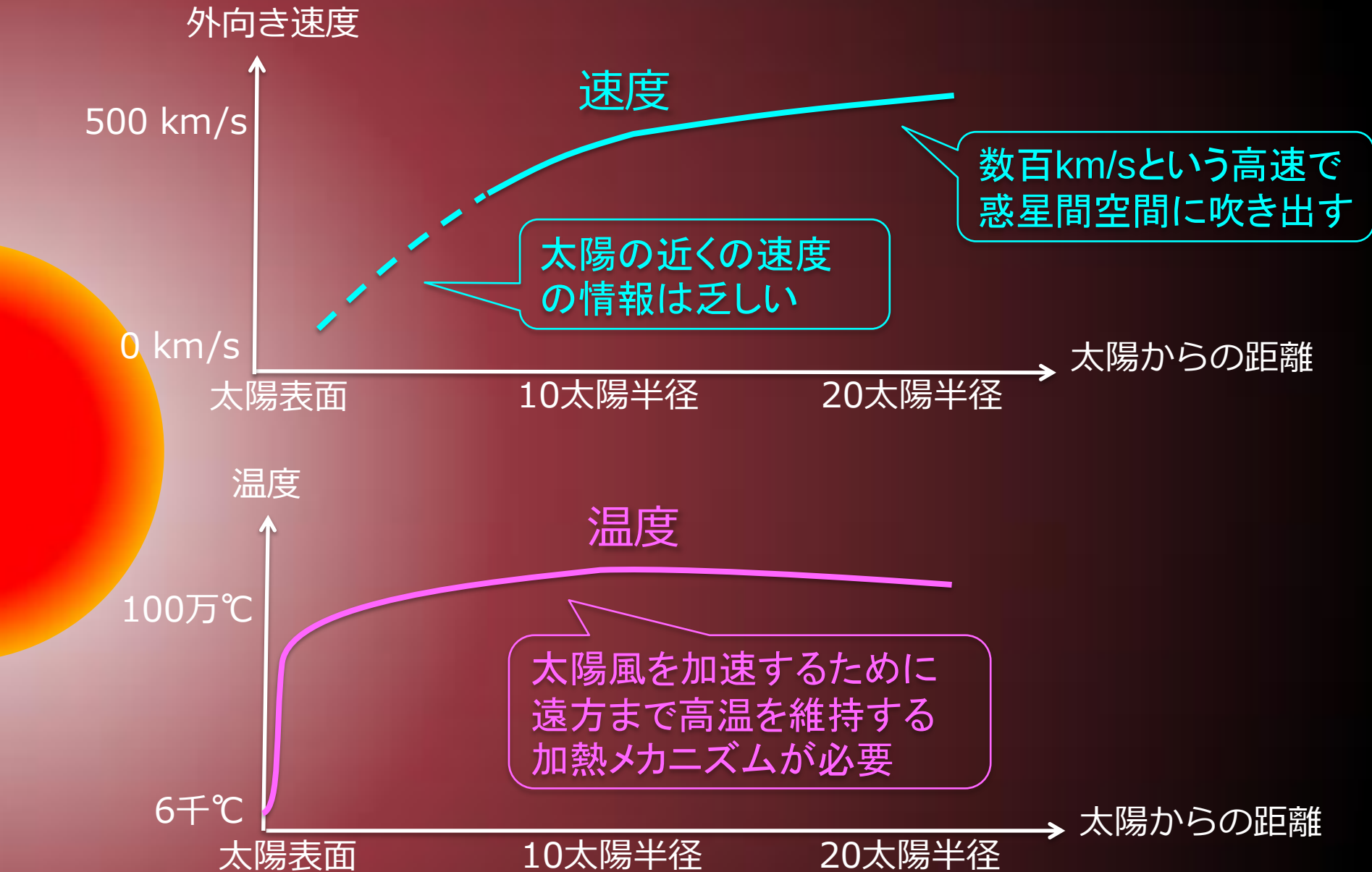
あかつき



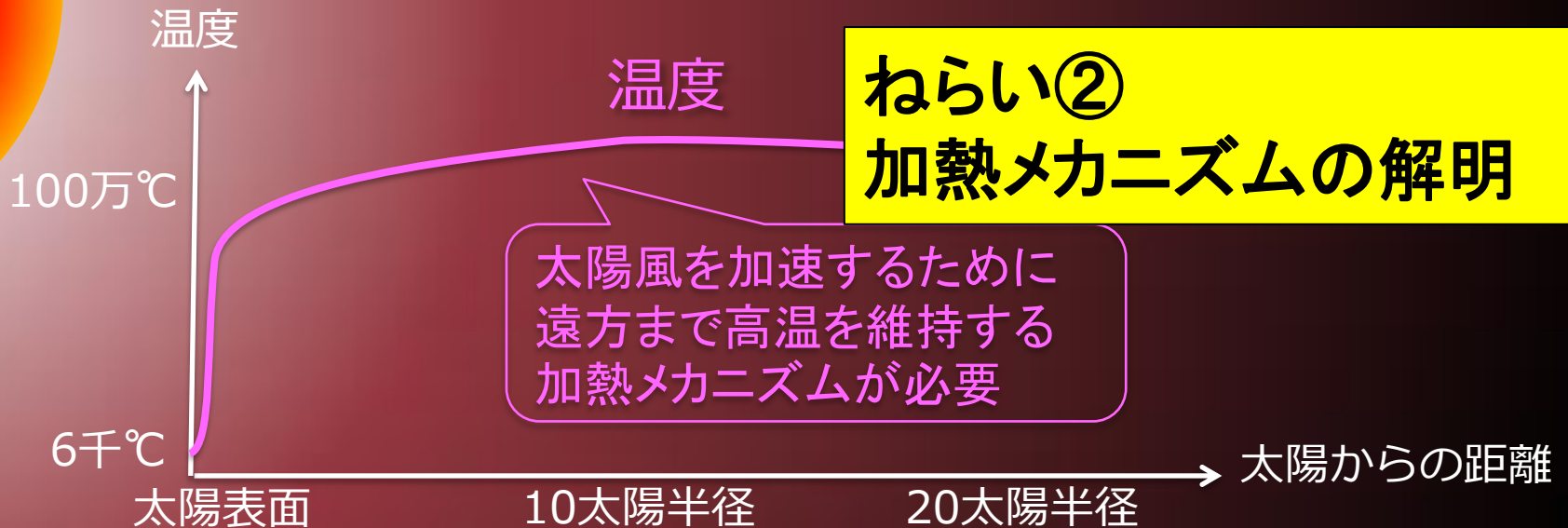
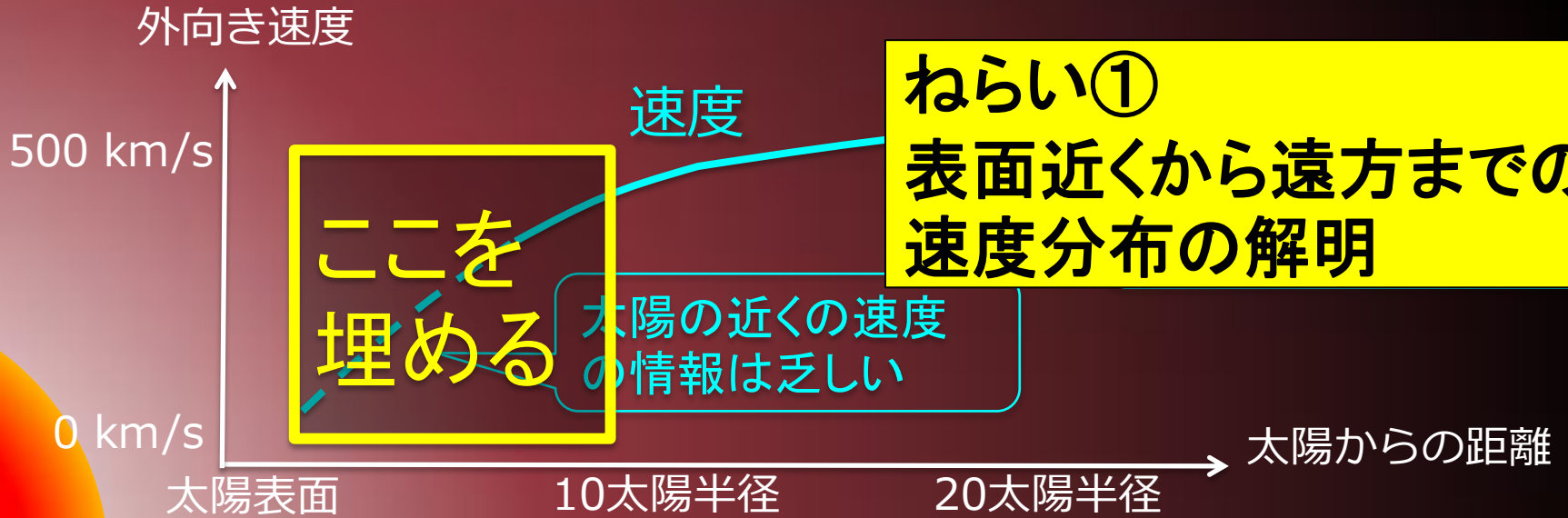
が観測



太陽風(コロナ)の速度と温度

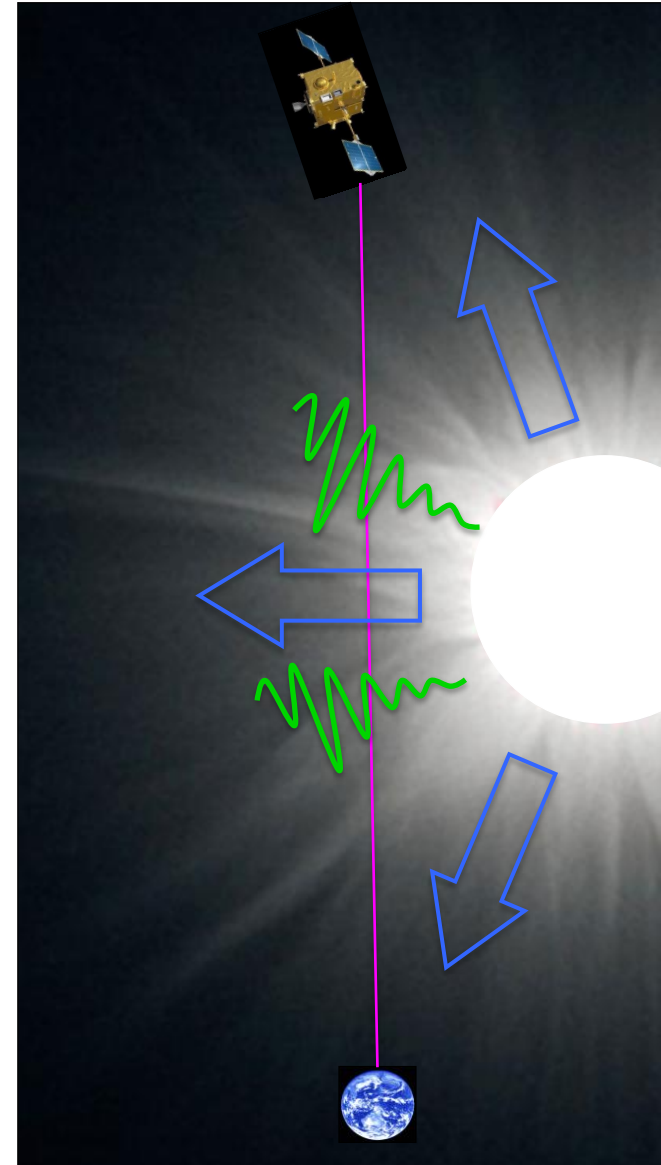


太陽風(コロナ)の速度と温度



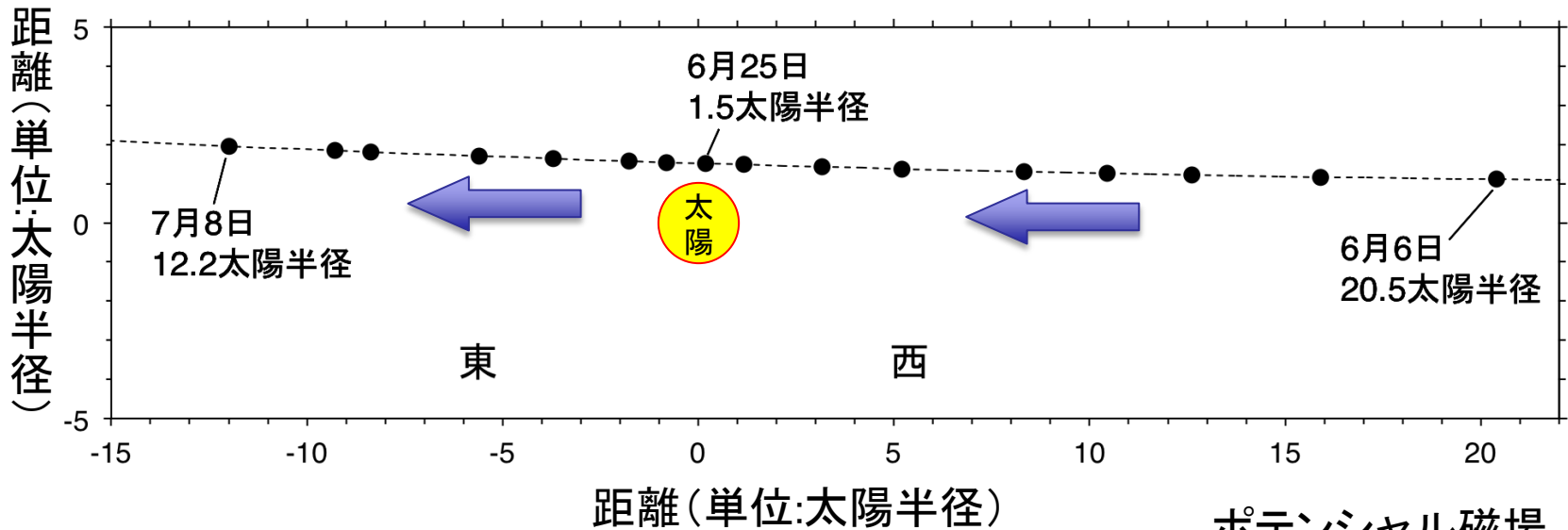
電波掩蔽^{えんぺい}で得られる情報

- ① 受信電波の強度の変化から
太陽風の速度がわかる。
- ② 受信電波の周波数の変化から
太陽風の中を伝わる波がわかる。



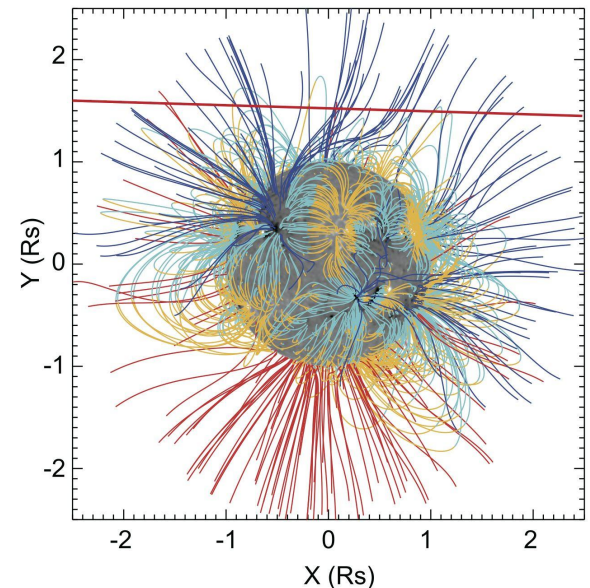
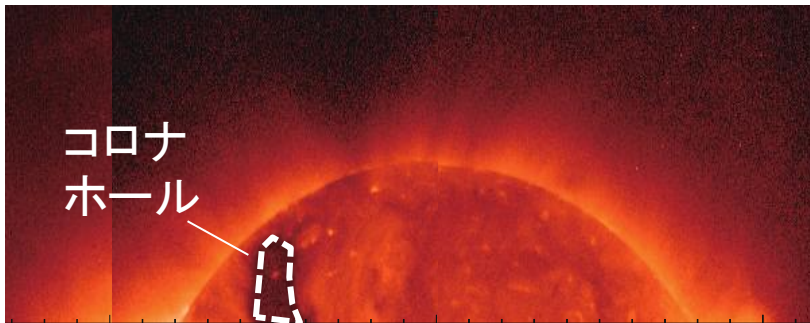
観測した場所

地球から見た「あかつき」の動き



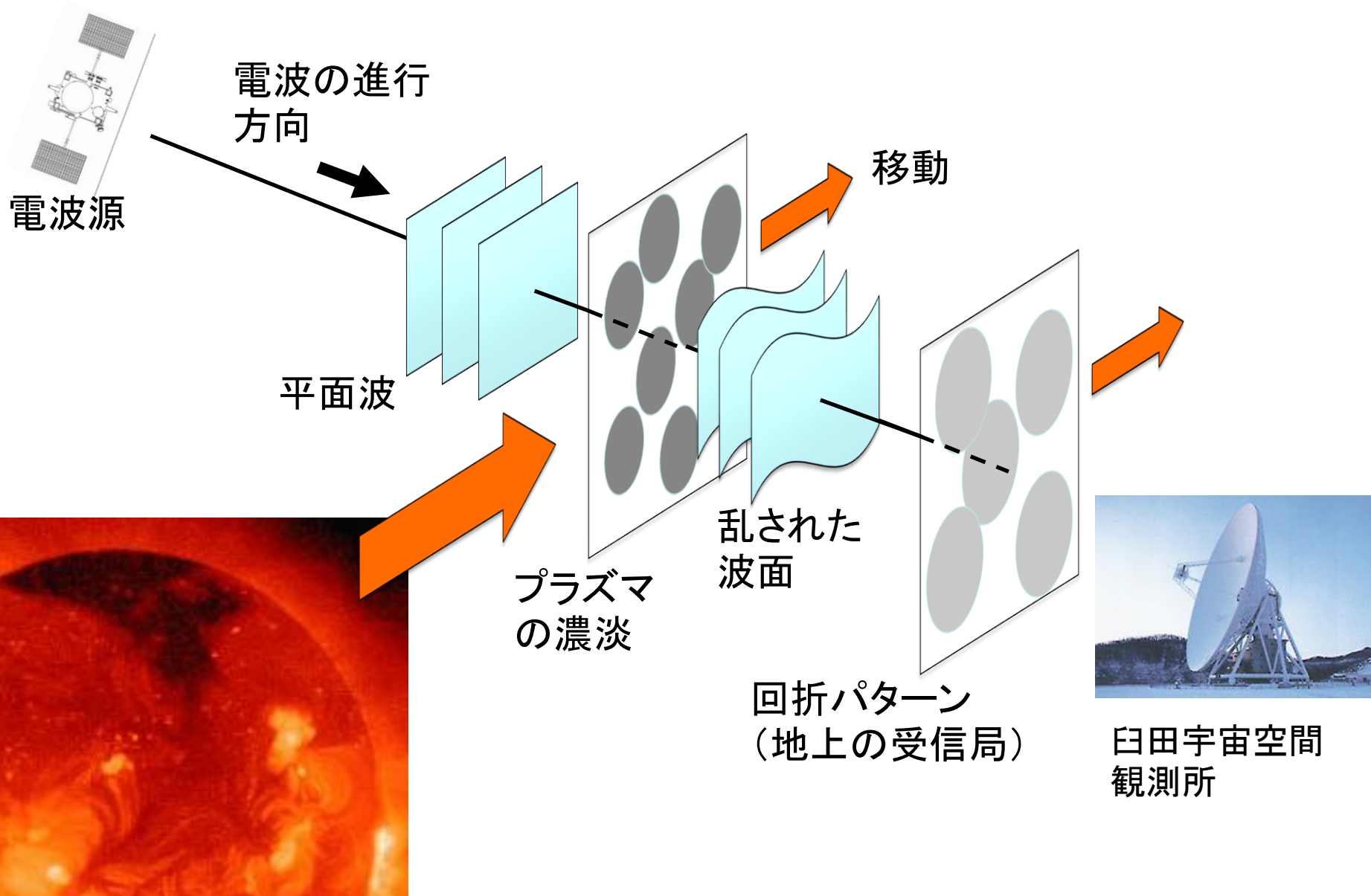
ポテンシャル磁場

「ひので」によるX線画像

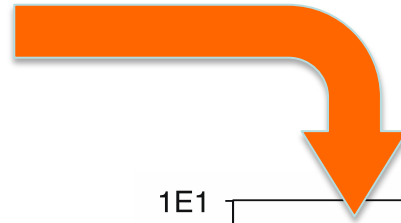
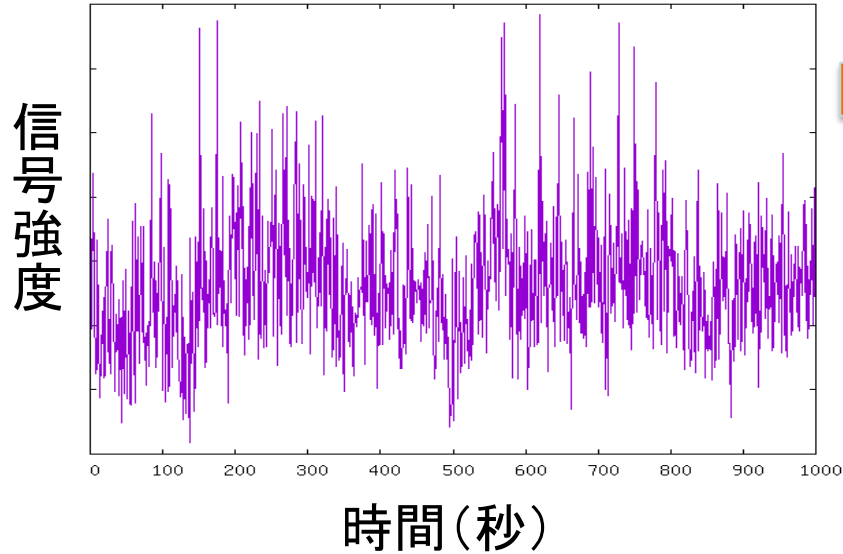


「静穏領域」の上空を主に観測

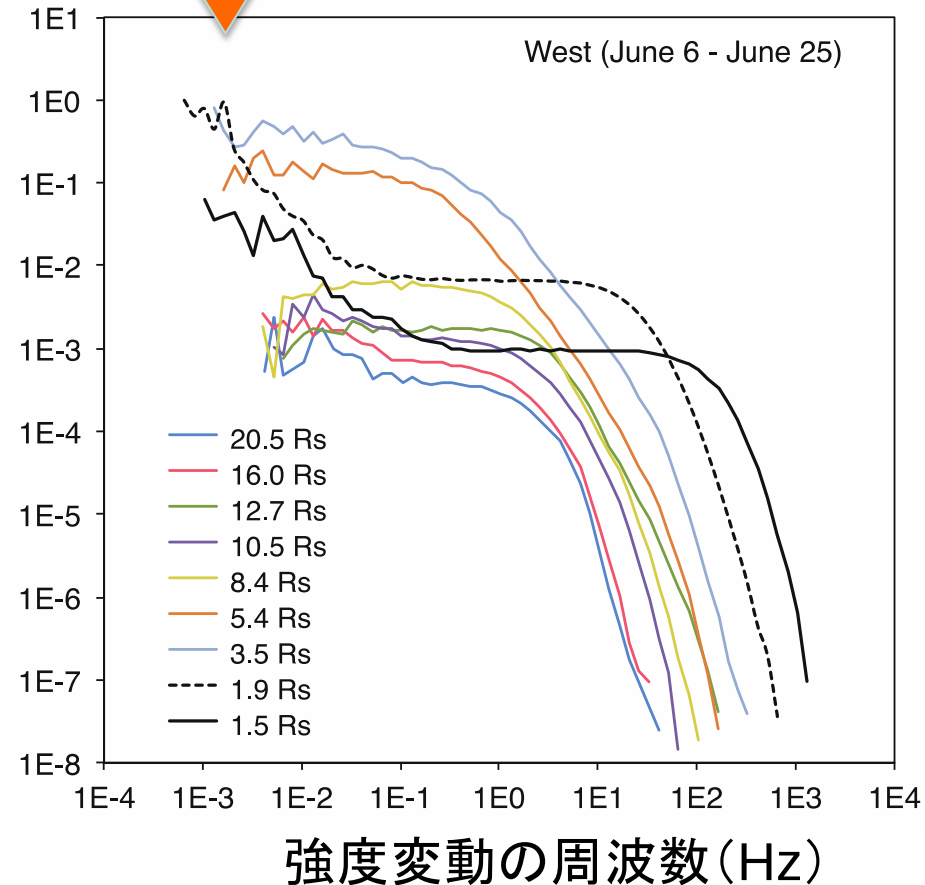
太陽風速度の観測



解析手順



スペクトル密度

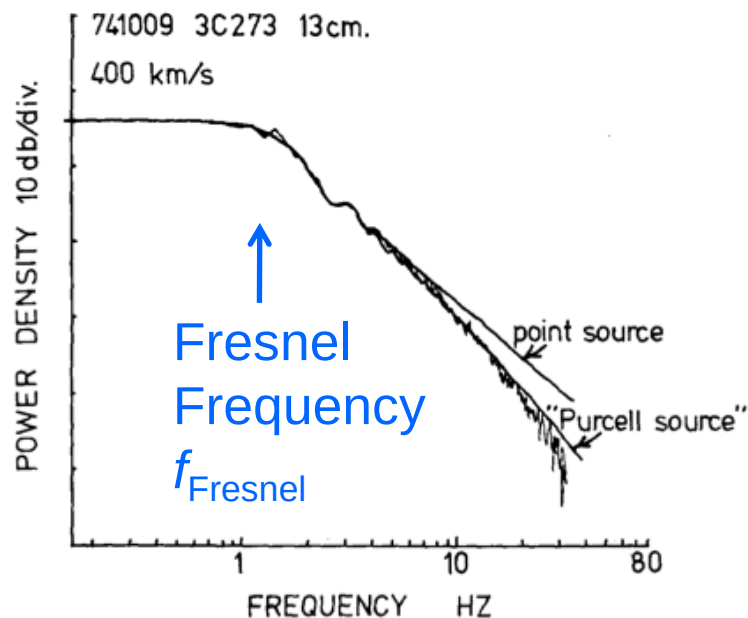


シンチレーションのスペクトル解析によって速度がわかる

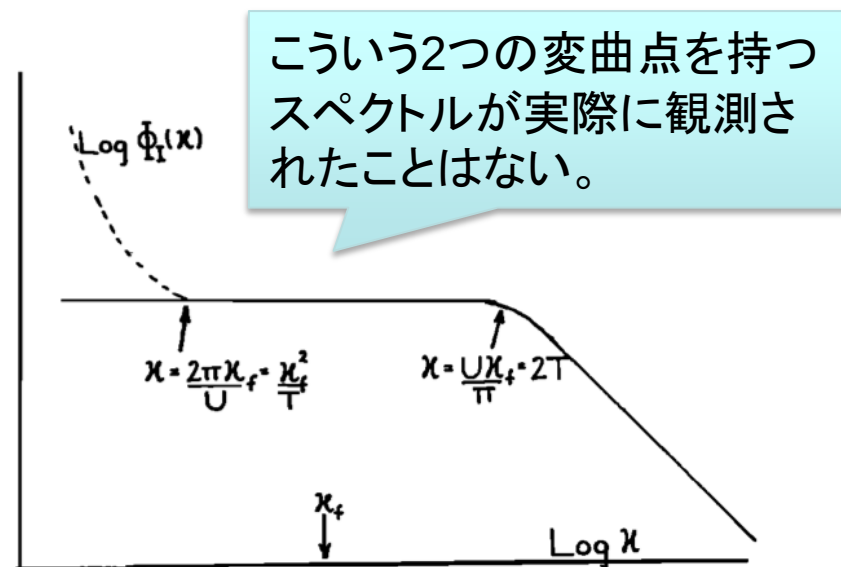
電波シンチレーションのスペクトル

弱散乱(太陽から遠方):このときの計測手法は確立されている。

強散乱(太陽近傍):このときはこれまでは計測不可。



Coles (1977)

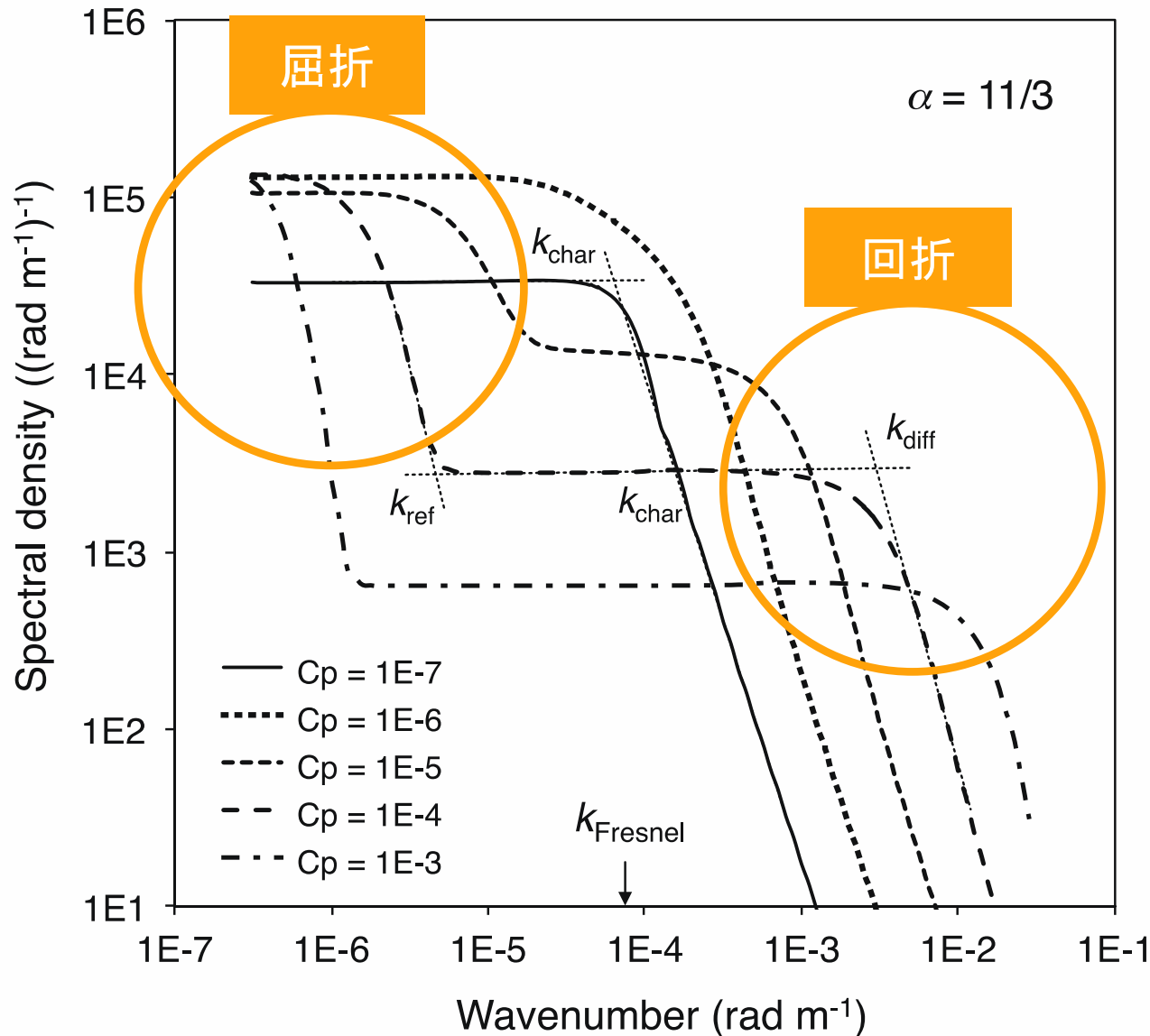


Rumsey (1975)

流速:
$$V = \frac{2\rho f_{\text{Fresnel}}}{k_{\text{Fresnel}}}$$

流速: ?

Theoretical spectrum using the formula by Rino (1979)



Assumption:
Power-law density
fluctuation spectrum
 $k^{-\alpha}$

Characteristic
wavenumber in weak
scattering:

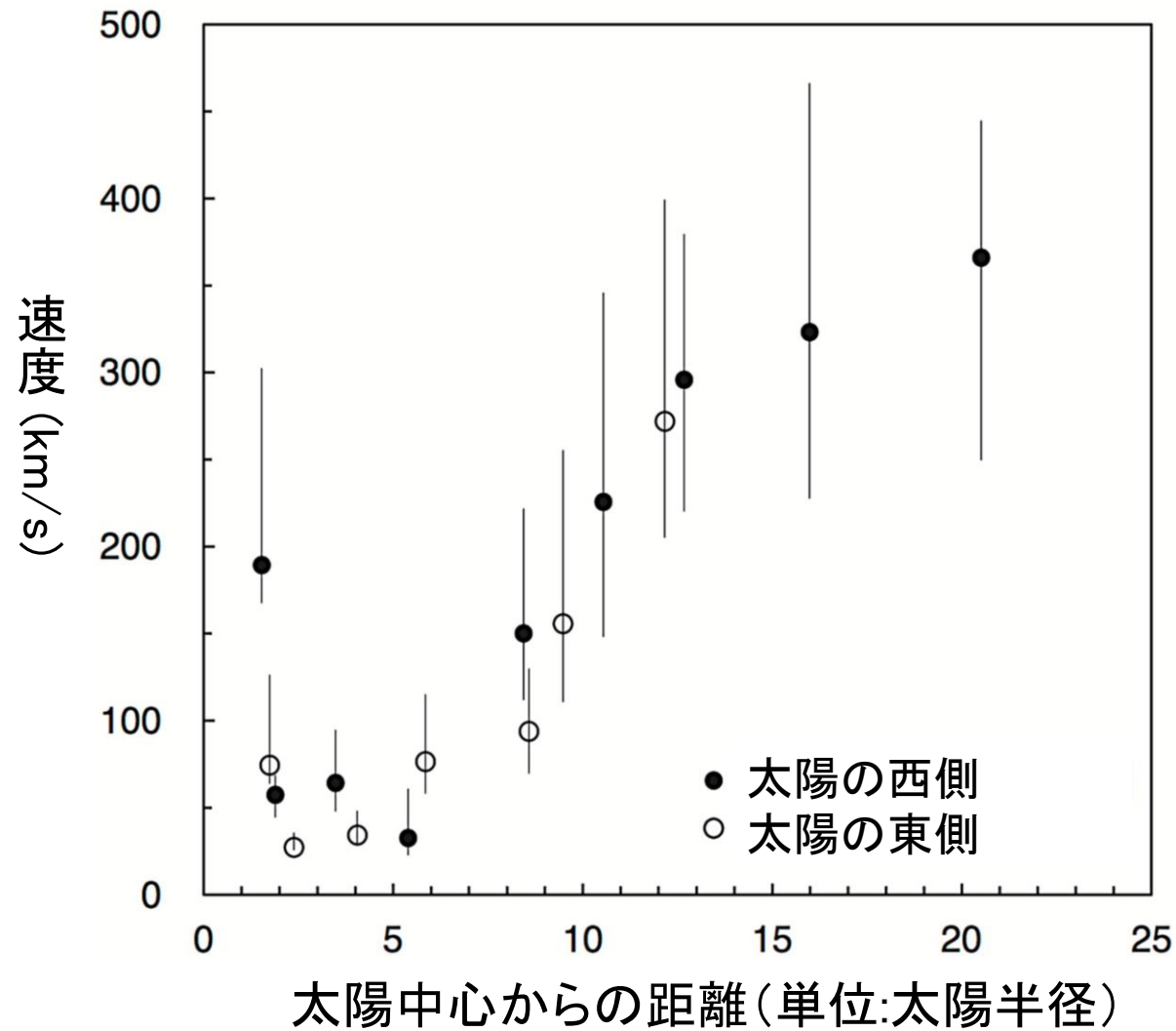
$$k_{\text{char}} = k_{\text{dif}}$$

in strong scattering:

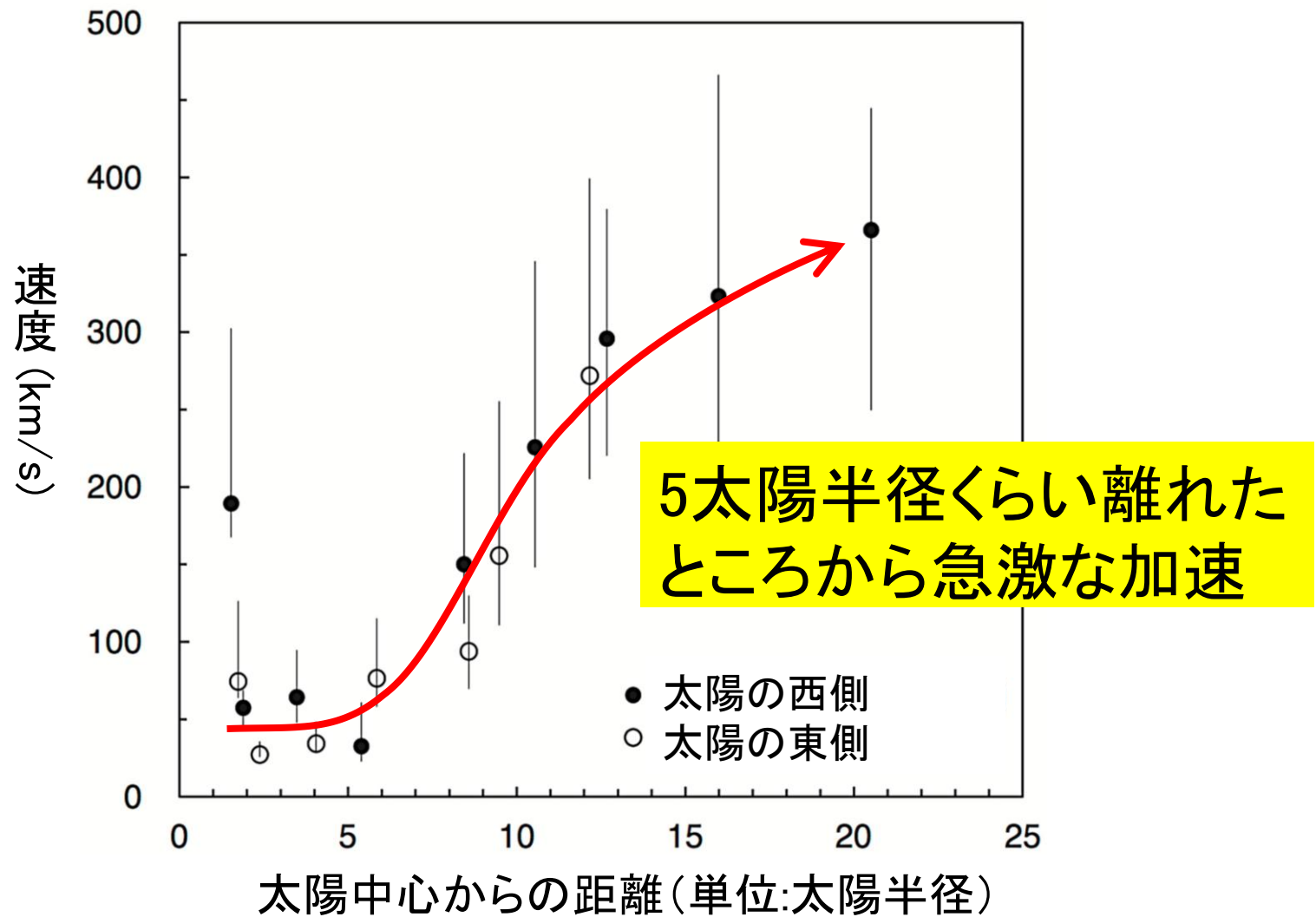
$$k_{\text{char}} = \sqrt{k_{\text{ref}} k_{\text{dif}}}$$

k_{char} does not depend
on the scattering
strength.

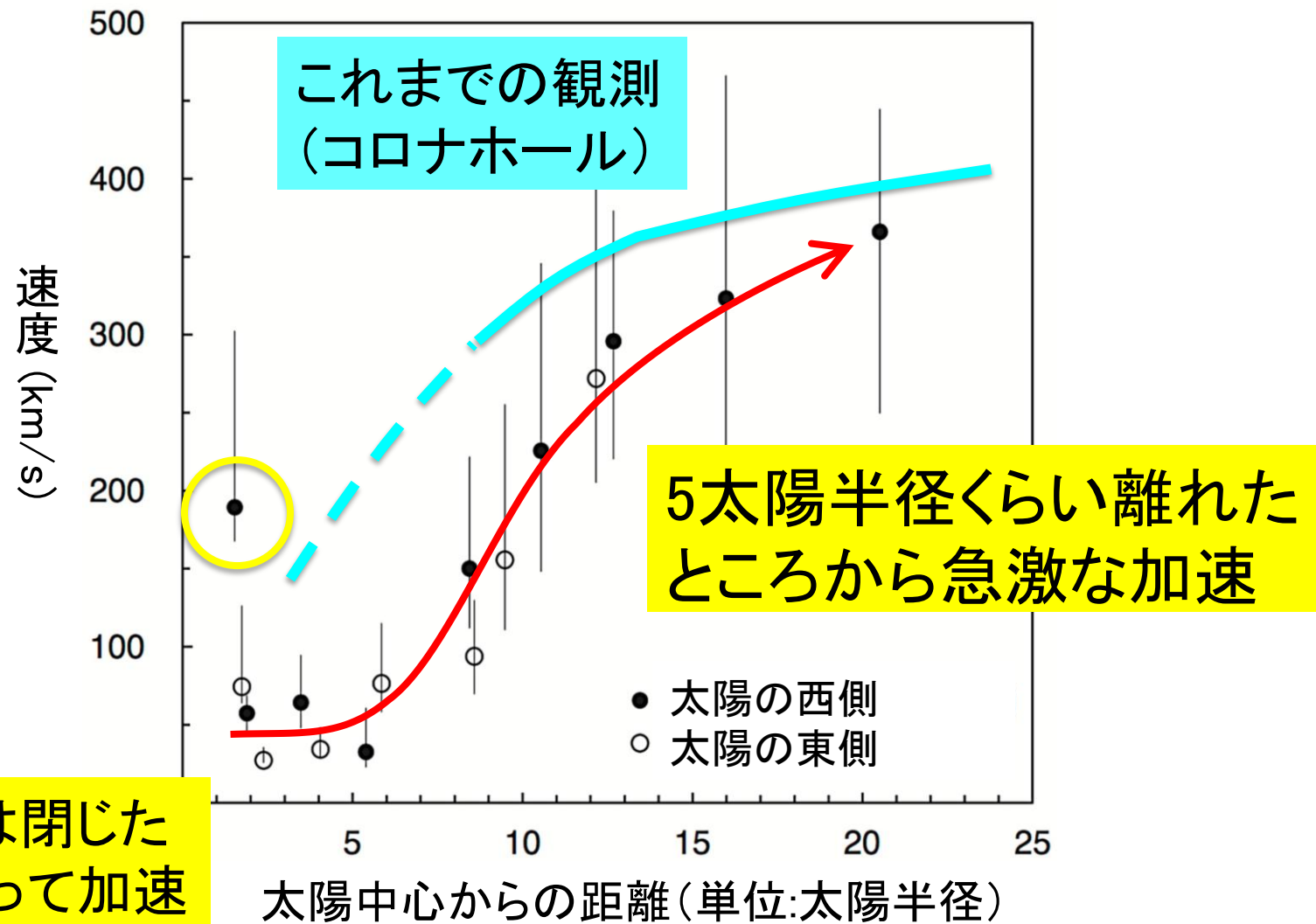
明らかにになった静穏領域上空の速度分布



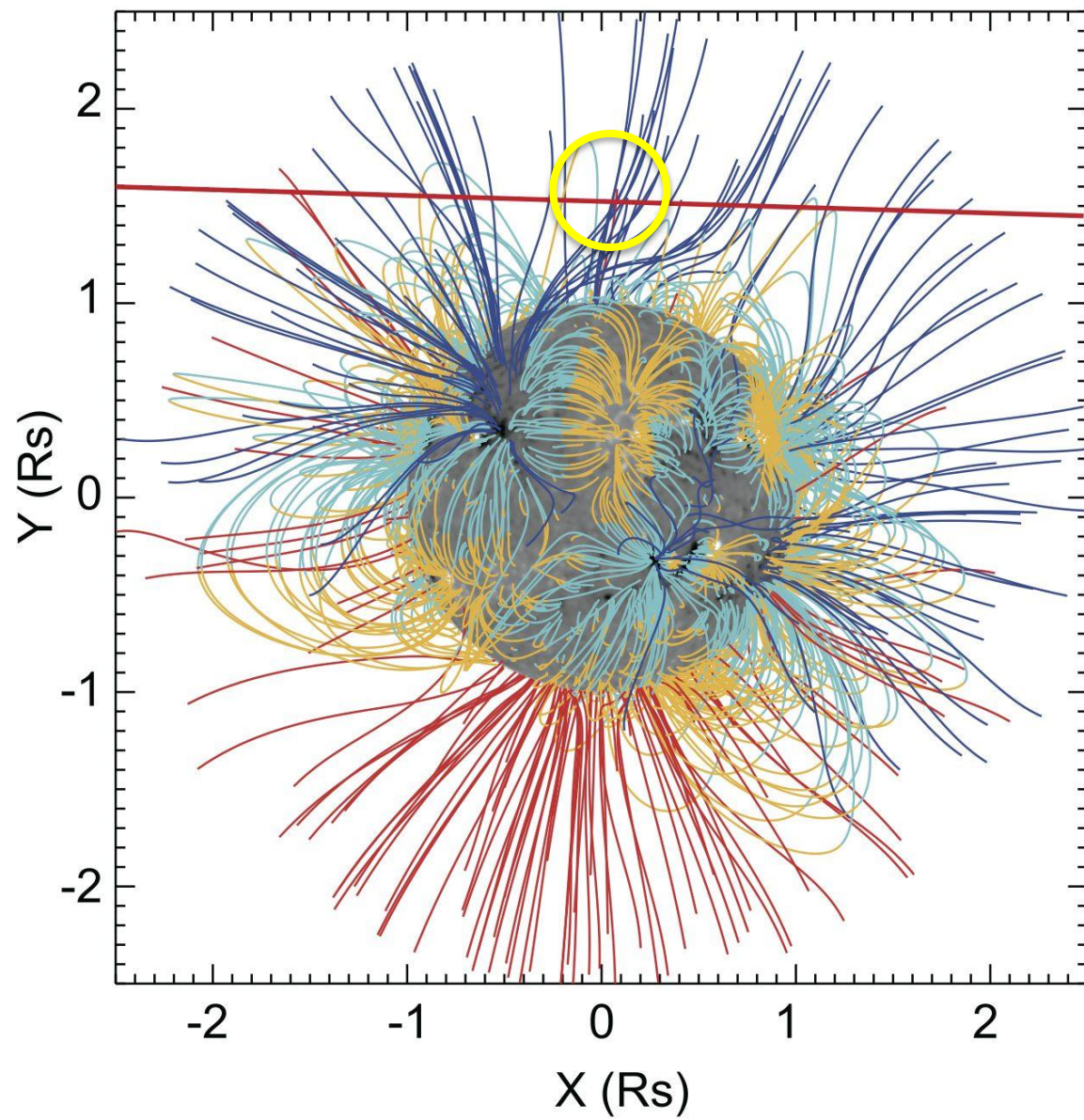
明らかにになった静穏領域上空の速度分布



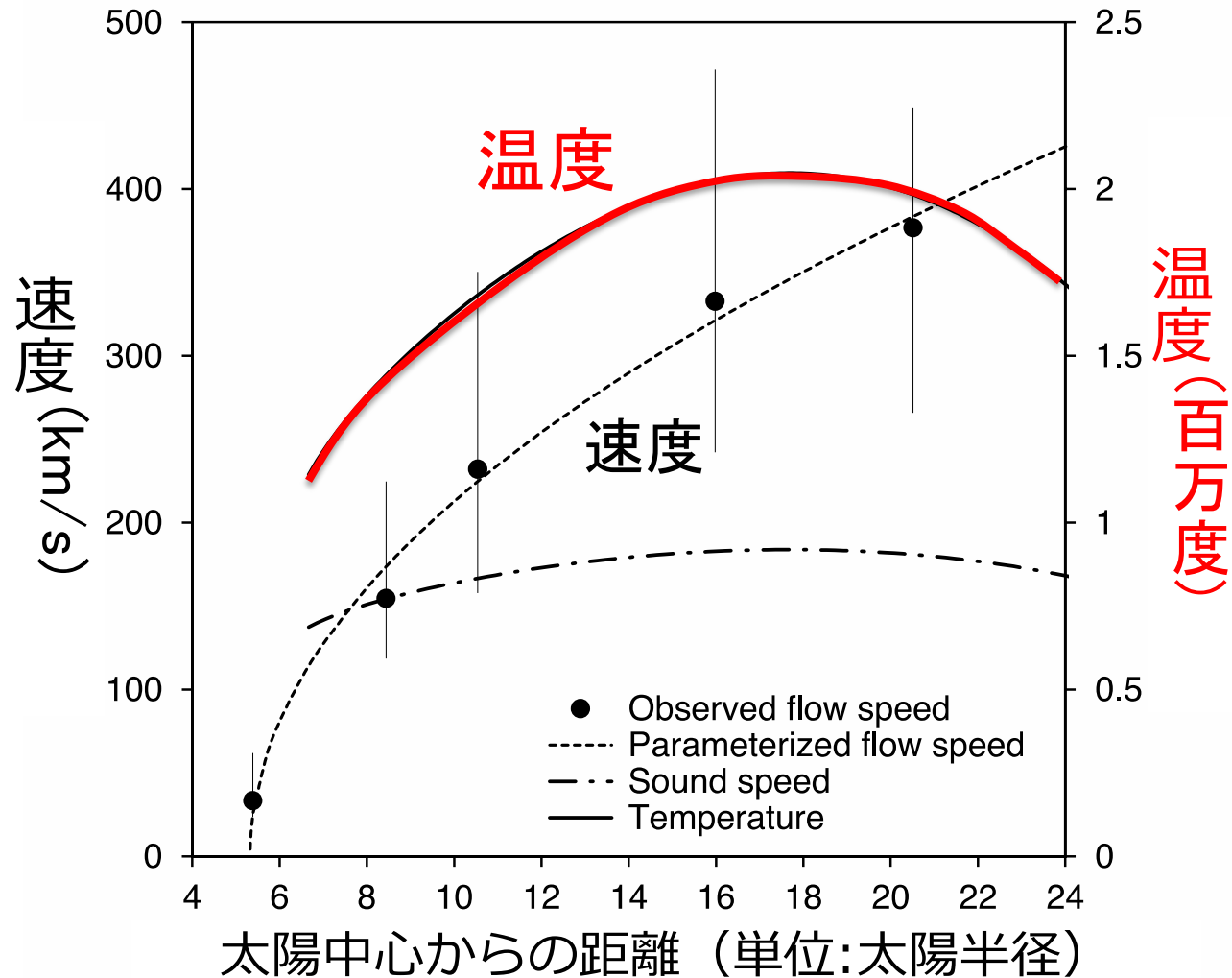
明らかにになった静穏領域上空の速度分布



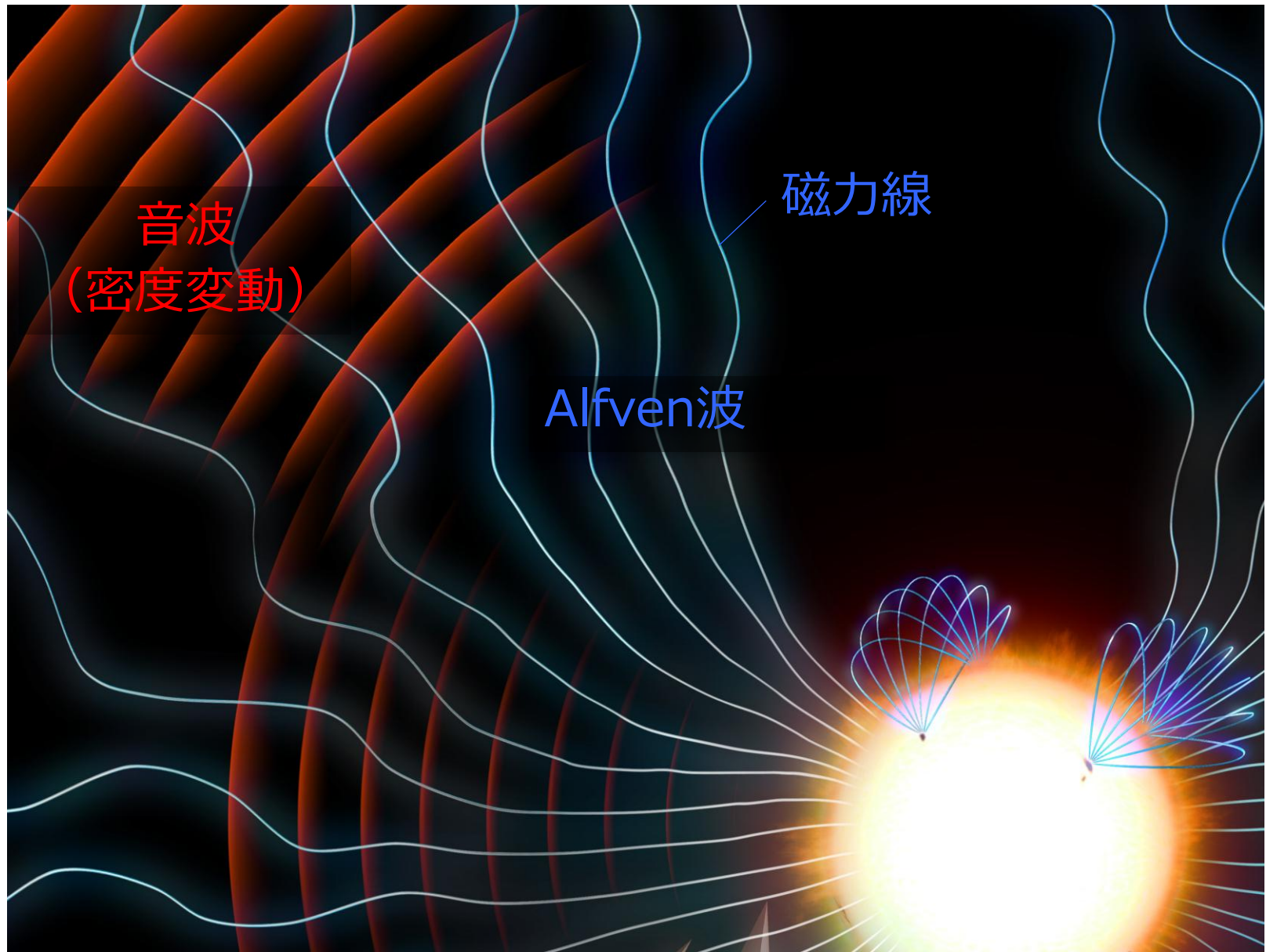
太陽近くでは閉じた磁力線によって加速が抑えられている？



速度分布から推定した温度分布



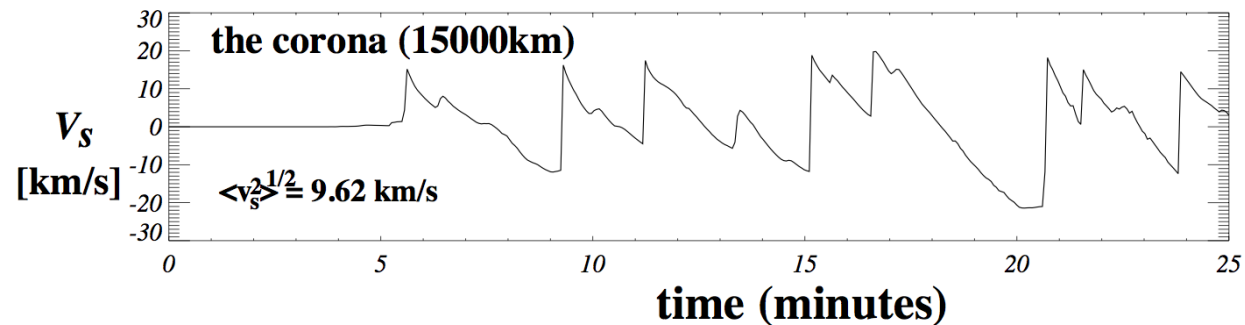
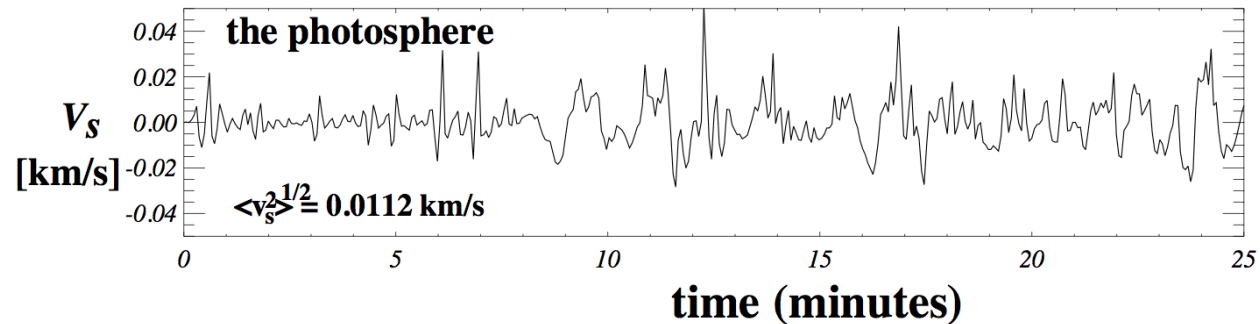
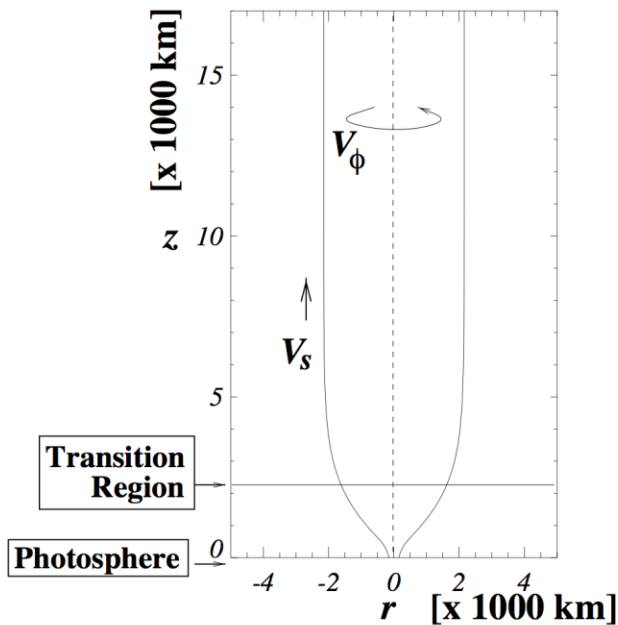
太陽風の中の音波(slow wave)



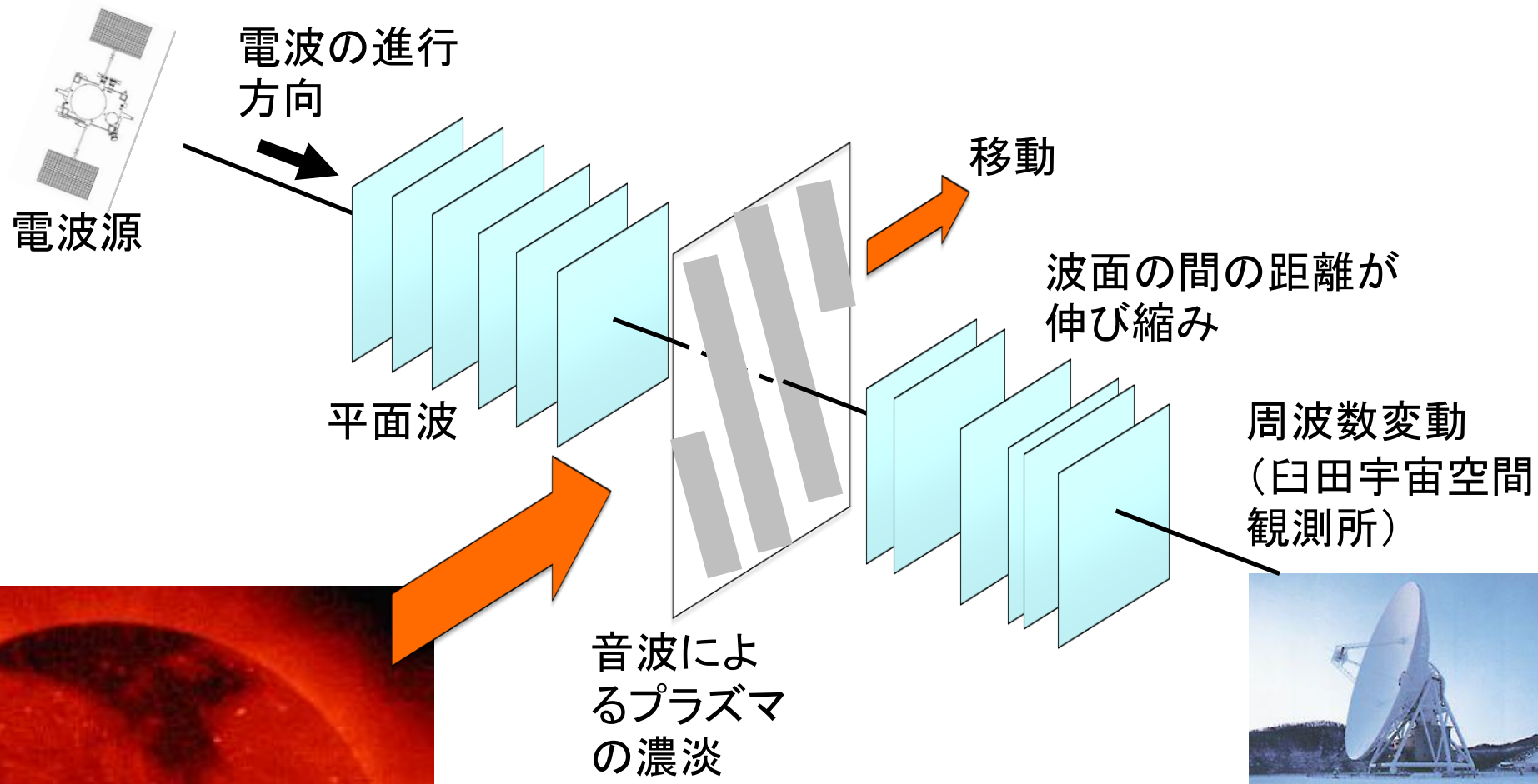
Longitudinal waves produced by the nonlinear effect of the torsional Alfvén wave in a 1.5-D MHD model

Kudoh & Shibata (1999)

a flux tube



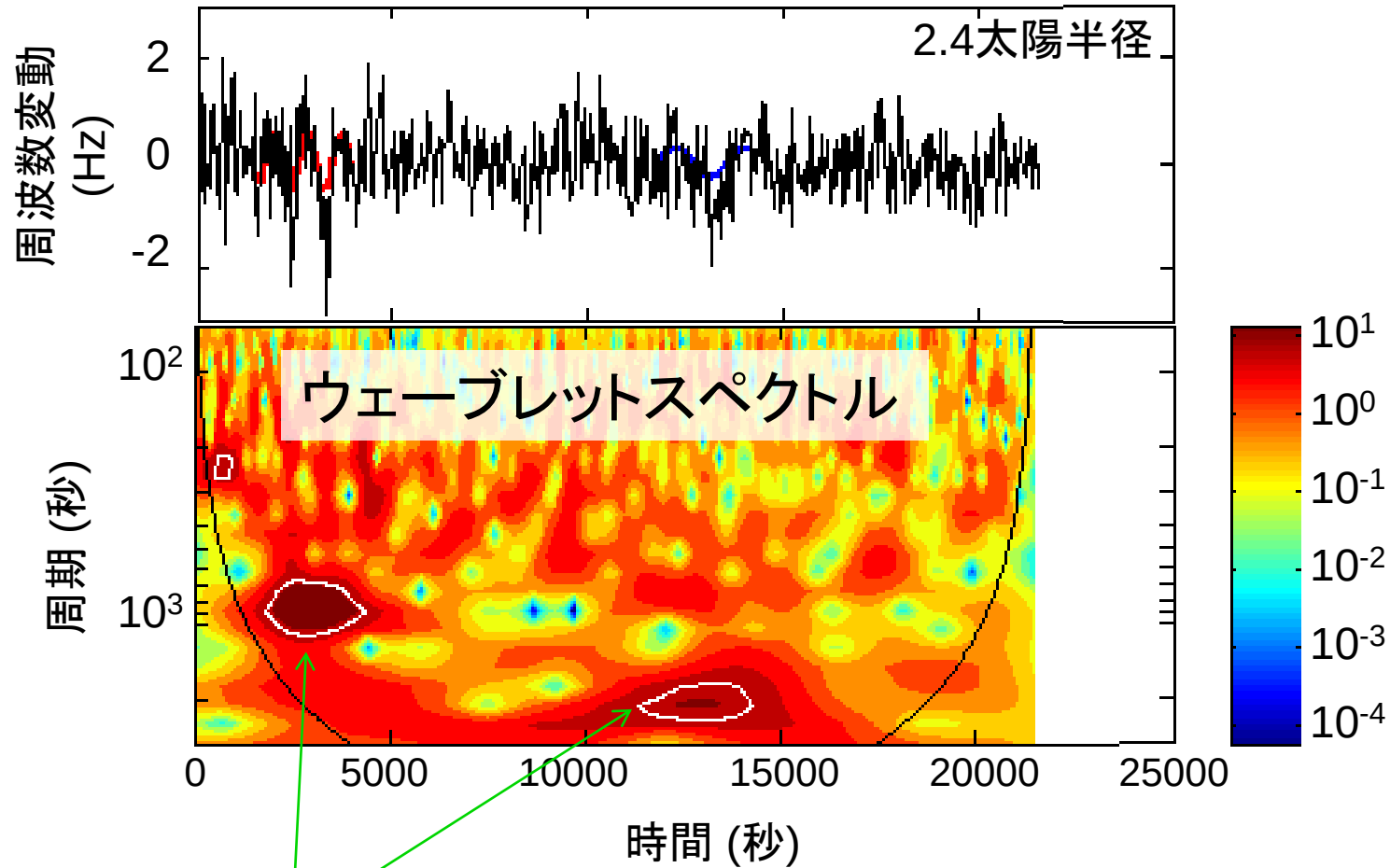
音波の観測



周期的な密度変化＝音波 と考えられる

スペクトル解析

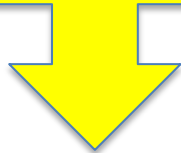
受信電波の変動から波のかたまり(波束)を抽出する。



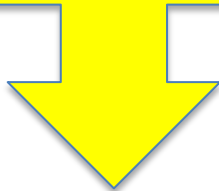
顕著な周期変動＝音波イベント（周期：数百秒）

波の振幅の推定

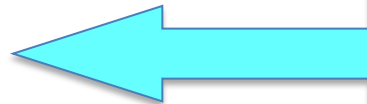
周波数変動の振幅と周期



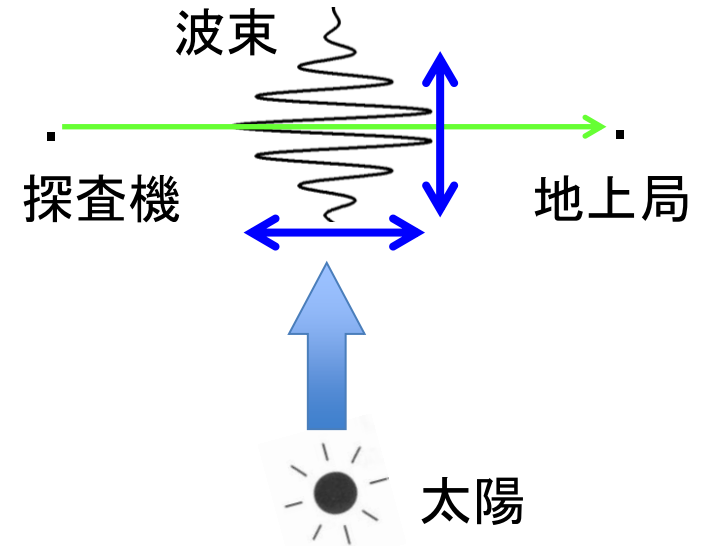
電波経路に沿ったプラズマ
密度のコラム積分量の振幅



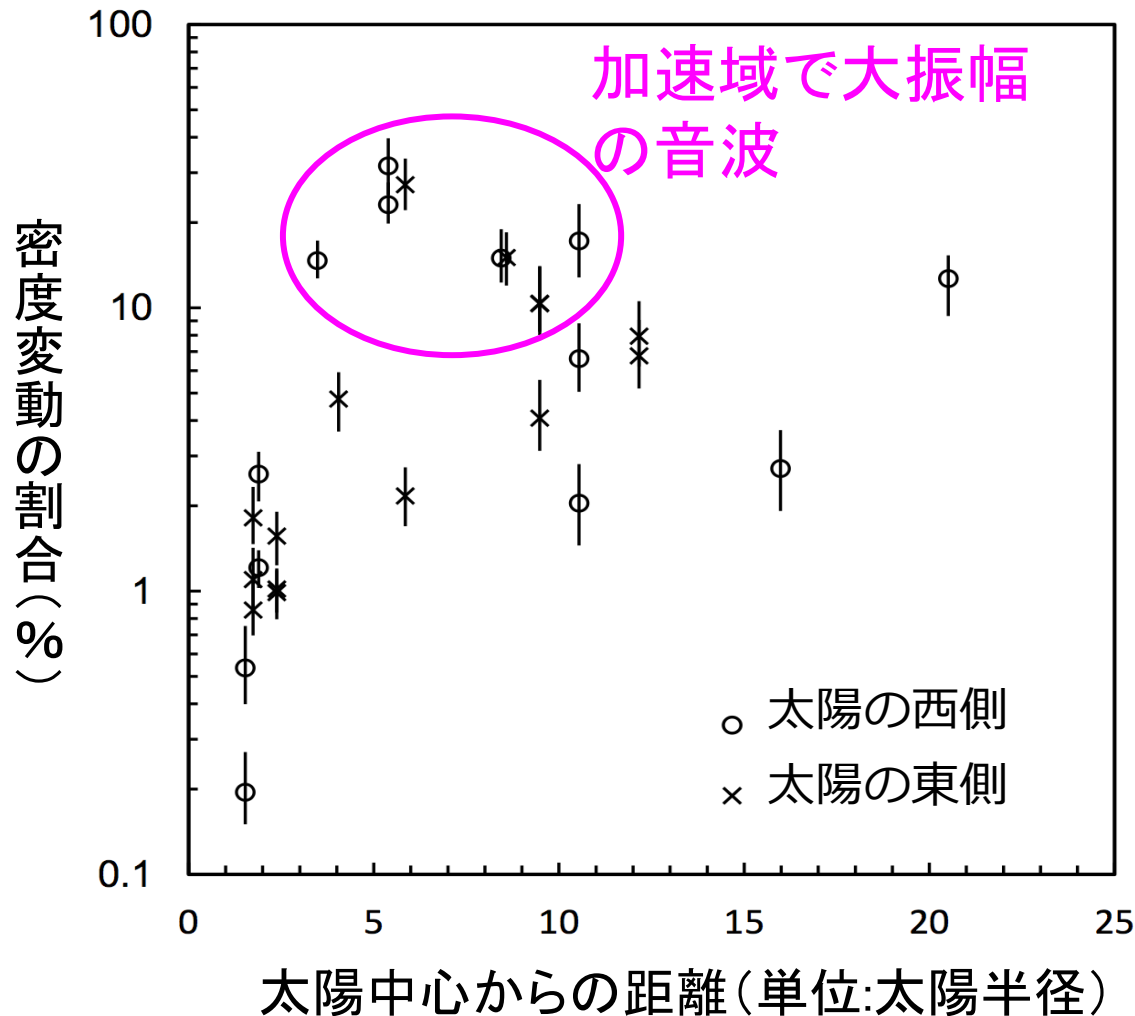
プラズマ密度の振幅



波束の空間スケールを
イベント継続時間 × 伝搬速度
から推定



音波の振幅の分布



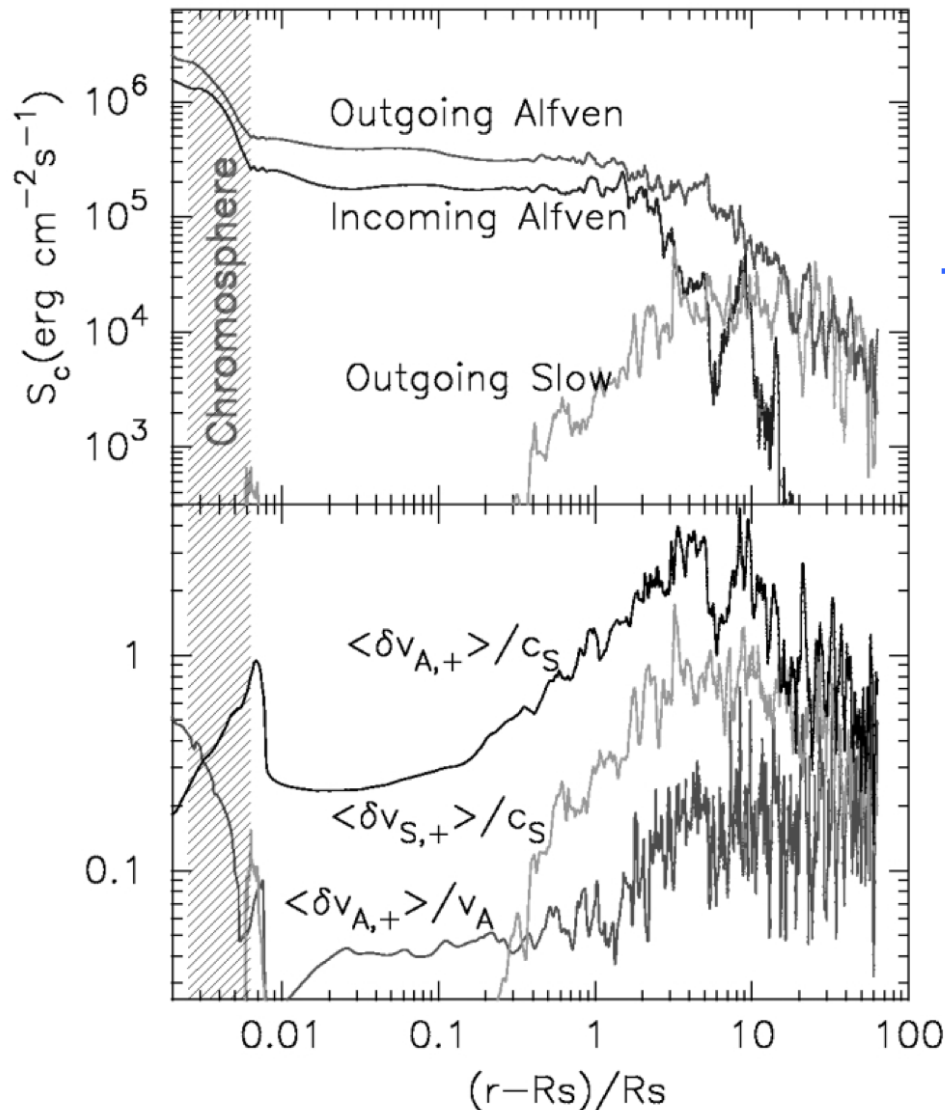
参考:

普通の会話では
密度変動の割合は
0.00001%くらい

電車のガード下で
密度変動の割合は
0.01%くらい

数十%もの密度変動 → 衝撃波を作ってガスを加熱

Wave energy fluxes and amplitudes in a 1.5-D MHD model

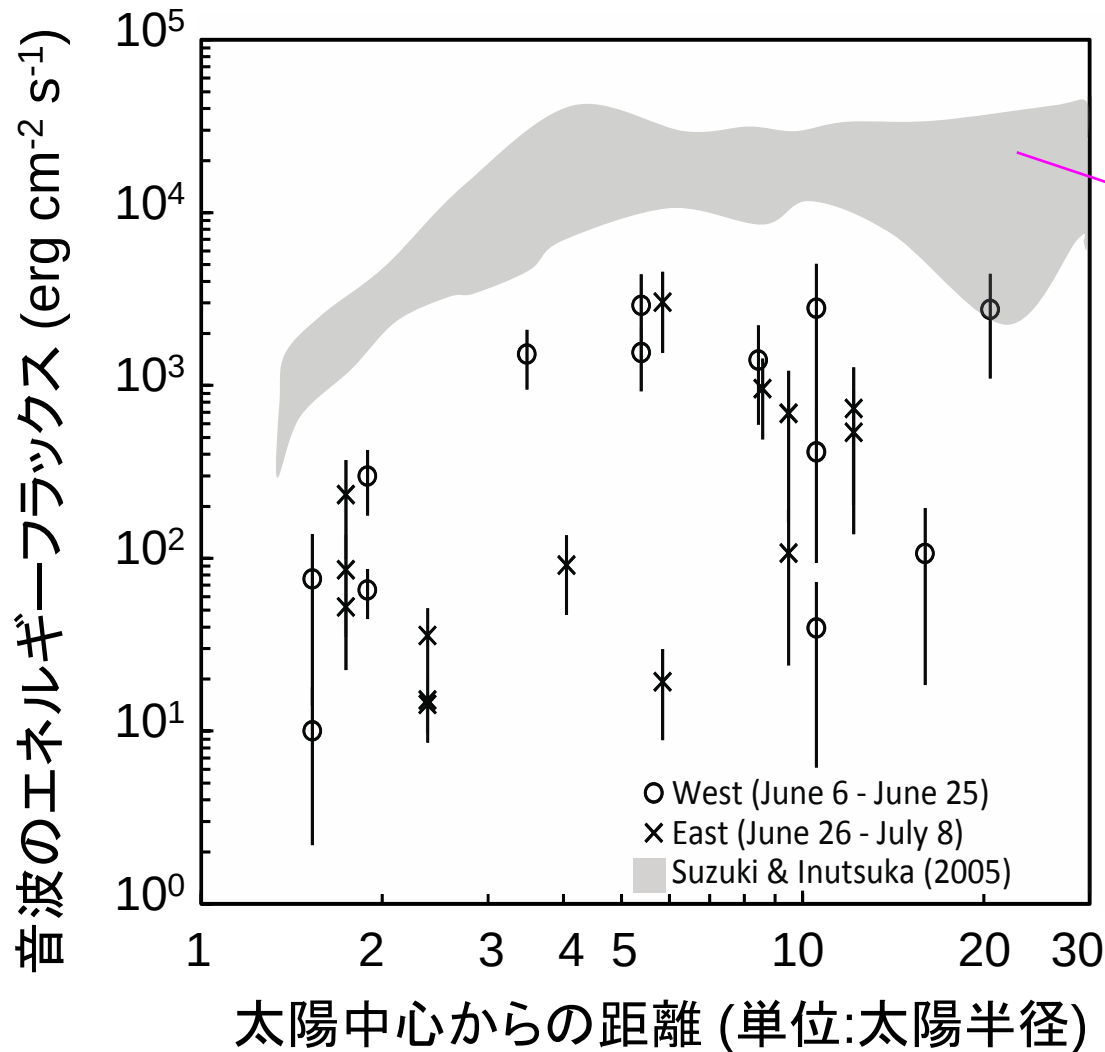


Suzuki & Inutsuka (2005)

エネルギーフラックス
(のようなもの)

速度振幅と伝搬速度の比

音波のエネルギーフラックス



Alfven波が音波を生成してコロナを加熱する数値シミュレーションの予想 (Suzuki & Inutsuka, 2005)

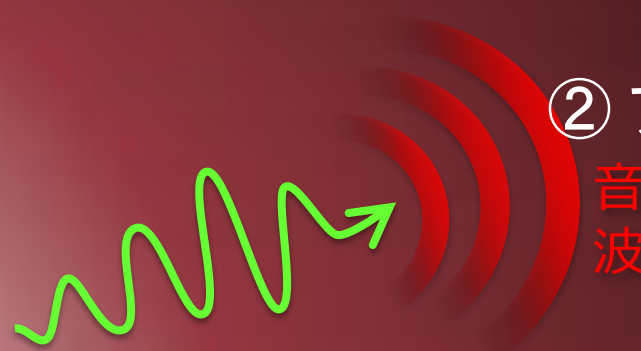
理論的予想と傾向が良く似ている

波による加熱？

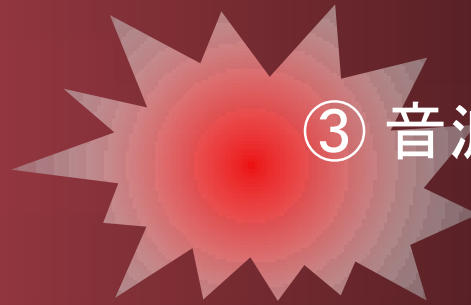
① 太陽表面の対流によってアルベーン波が作られて外側に伝わる



② アルベーン波が音波を作る



③ 音波が壊れて熱を生み出す

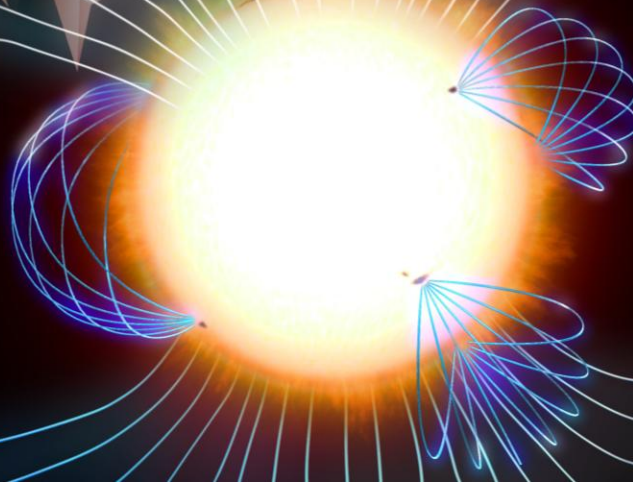


④ 太陽風が加速される



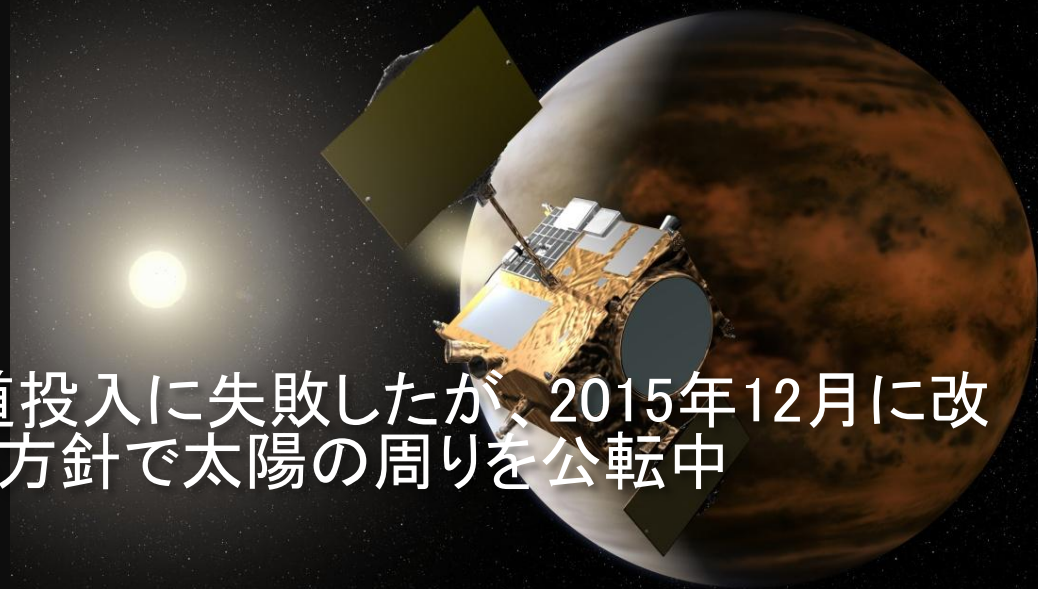
まとめ

- 金星探査機「あかつき」が地球から見て太陽コロナの背後を通る貴重な機会をとらえて電波による観測を行った。
- 太陽の近くから遠方までの太陽風速度と波の観測データを初めて取得した。
- 太陽半径の数倍以上離れたところで太陽風が急激に加速されていることが分かった。
- その加速は、発生した音波がガスを加熱することによって起こることが明らかになった。音波は光球から伝搬してきたAlfven波から非線形過程で生成されると考えられる。

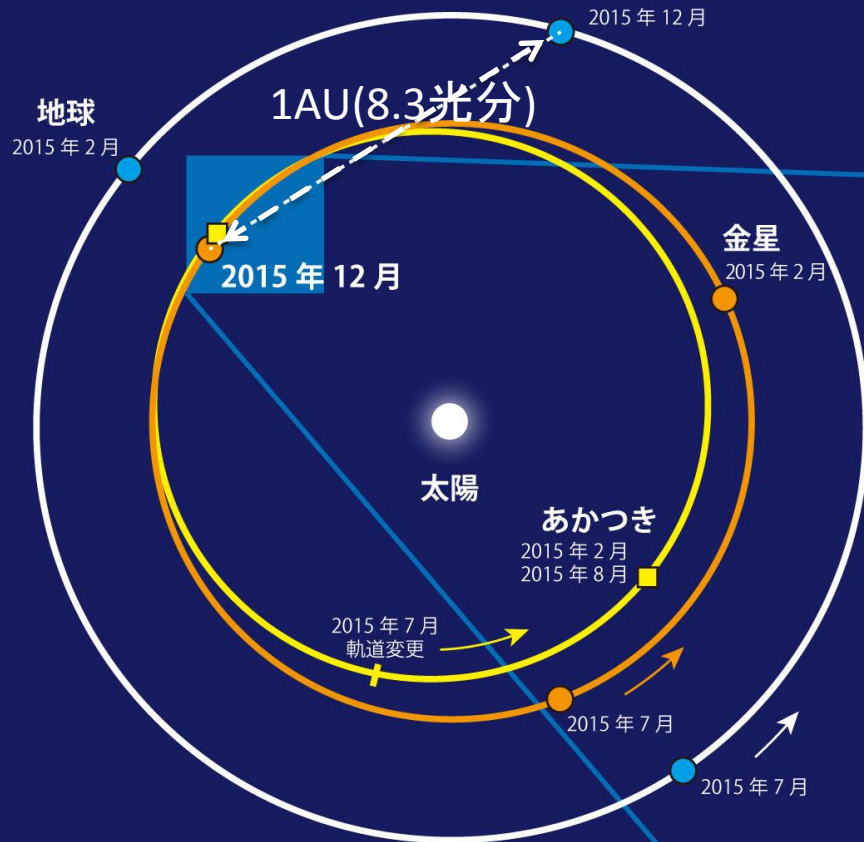


金星探査機あかつき

- 金星周回軌道から雲の下まで透視する3次元的なリモートセンシングによって地球の双子星の気候のしくみに迫る
 - 地球に無い高速大気循環「スーパーローテーション」はなぜ起こるのか
 - 子午面循環はどうなっているのか
 - 全球を隙間無くおおう雲はどう作られるのか
 - 氷晶の生じない大気に雷は起こるか
- 打上2010年5月(H2A)
- 2010年12月に金星周回軌道投入に失敗したが、2015年12月に改めて周回軌道投入を試みる方針で太陽の周りを公転中



金星周回軌道投入への道のり



太陽－金星の平均距離＝約0.7AU
近日点で太陽－あかつきの距離＝約0.6AU
探査機は厳しい熱環境に晒される

1AUは、太陽－地球間の平均距離で、
1億4959万7871キロメートル＝8.3光分。

投入の拡大図

あかつきは金星の外側から金星に接近

地球との距離は1AUあり、地上から投入
動作を制御できない

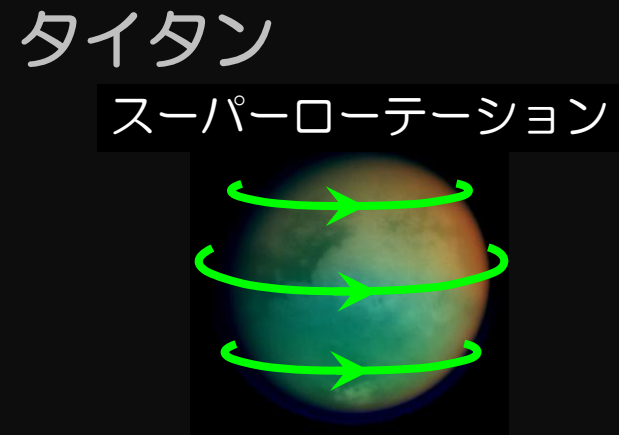
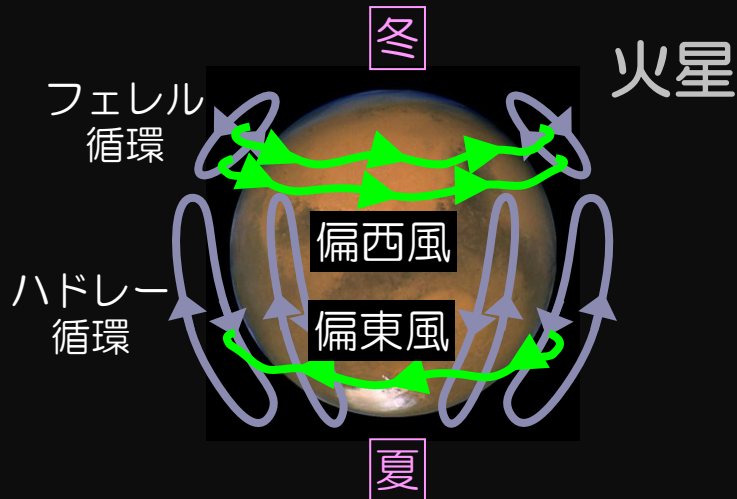
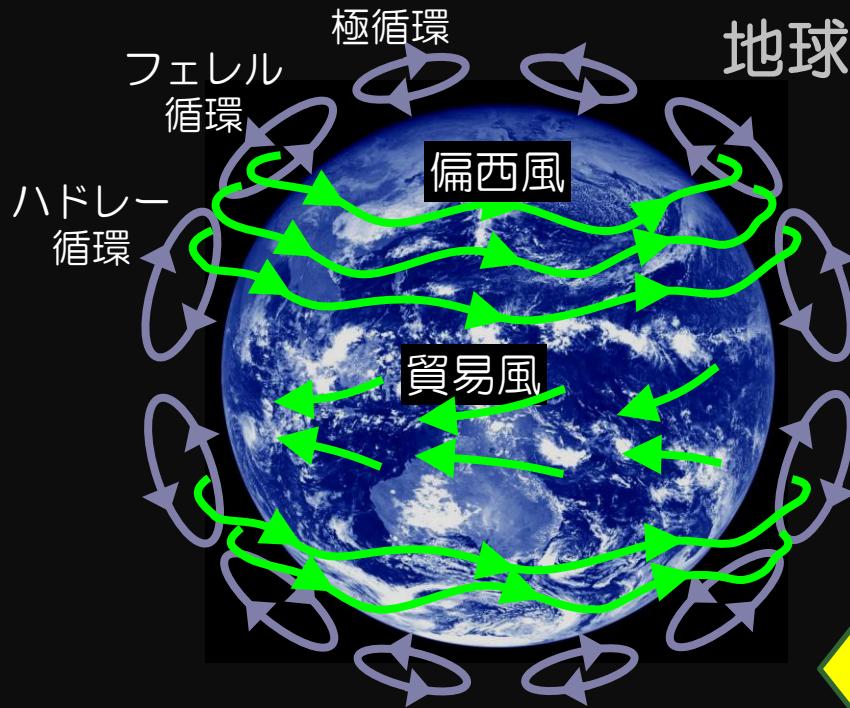
外側から接近

あかつき
金星

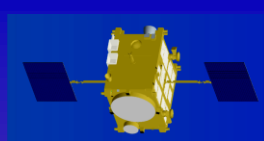
自動プログラムによる
コントロール

2015年12月

地球型惑星の大気大循環



あかつき



多波長リモセンで 迫る3次元循環

気温・硫酸蒸気の高度
分布 (電波掩蔽)

大気光
(雷・大気光カメラ)

二酸化硫黄
(紫外イメージャ)

雲の温度
(中間赤外カメラ)

下層の雲
(1 μ m/2 μ mカメラ)

風速ベクトル
(雲の動きから)

一酸化炭素
(2 μ mカメラ)

雷放電
(雷・大気光カメラ)

水蒸気(1 μ mカメラ)

地表物質・活火山
(1 μ mカメラ)

地表面

90 km

65 km

50 km

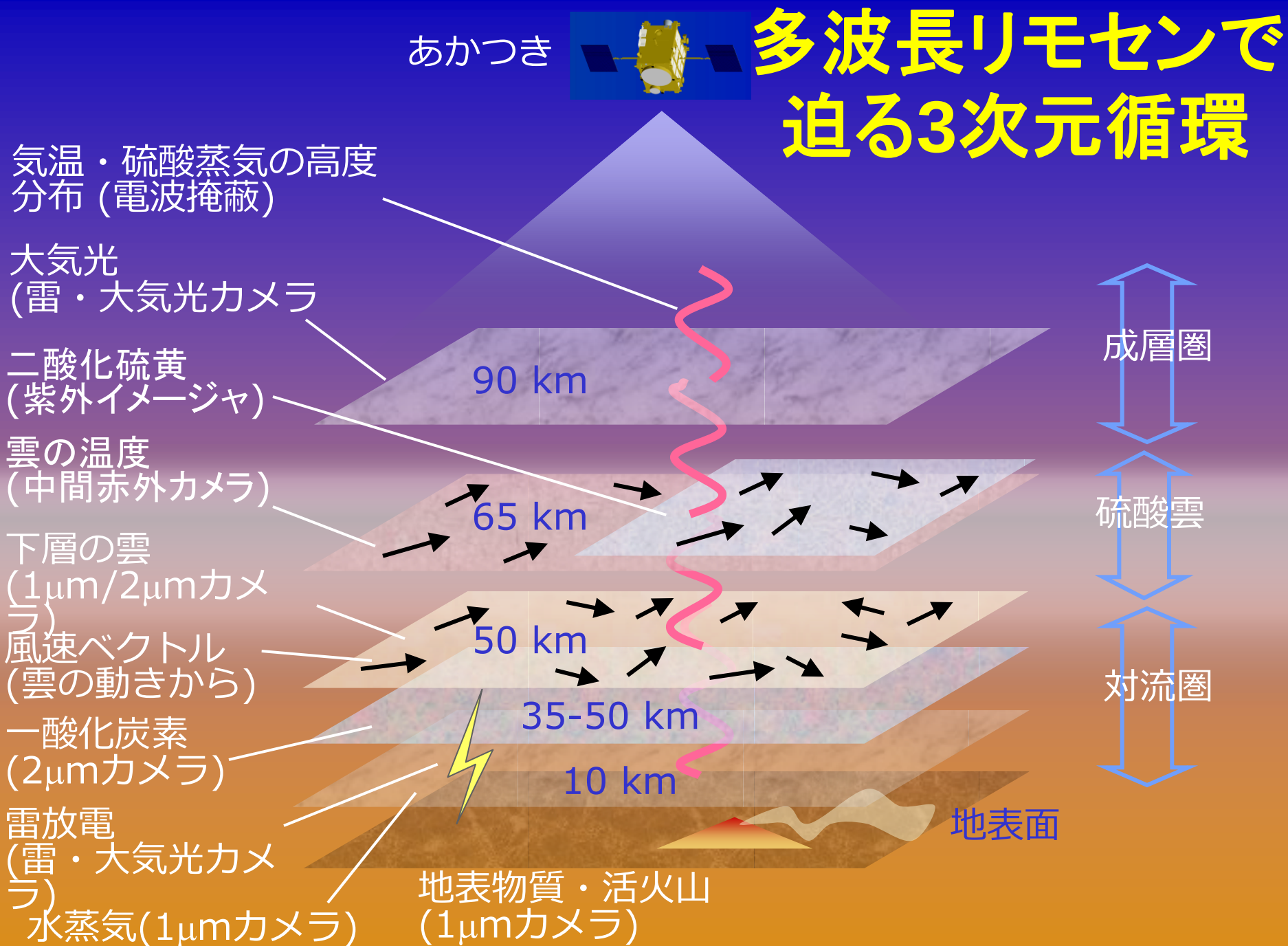
35-50 km

10 km

成層圏

硫酸雲

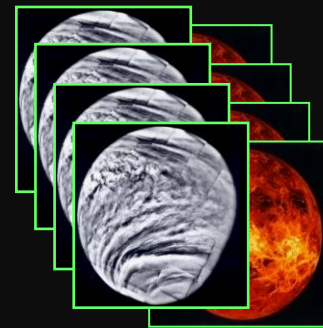
対流圏



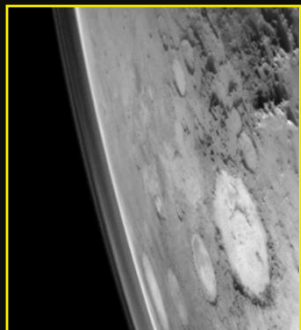
観測計画

グローバル撮像:

高速の気流に流される雲や微量ガスの変動を3次元・連続的に撮影して動画として可視化する。また地表面のモニターを行う。



雲の層構造を横から見る



軌道周期
1~2週間

地上局へ

電波掩蔽:
大気を水平に貫く電波
を地上で受信して大気
の層構造をとらえる



クローズアップ撮像:

微細構造モニター
雲の凸凹を立体視
夜側で雷発光を検出

