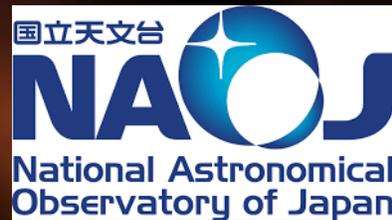


太陽フレアとの比較で解明する 恒星スーパーフレア

行方 宏介/Kosuke NAMEKATA

(1)京都大学/白眉センター 特定助教, (2)国立天文台/科学研究部



座長からのお題

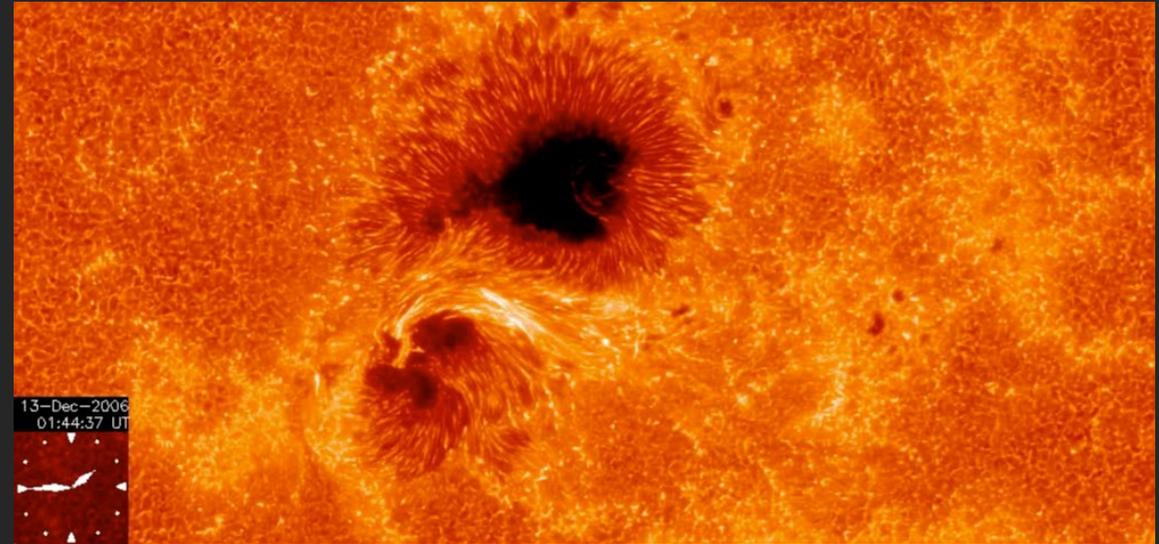
「太陽フレアと太陽型星スーパーフレアの比較研究」

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校, 2024年7月23日 17:45-18:45 (45 min+15 min)

太陽・恒星フレアが面白い！

- 太陽は動画で見れ、あらゆる天体プラズマの基礎を提供する実験室
- 天文学の主流である「**系外惑星・生命誕生**」の理解に不可欠
- 他の恒星の極限現象「**スーパーフレア**」の描像は未解明
- **社会的意義・学問的意義が高く近年盛り上がる**

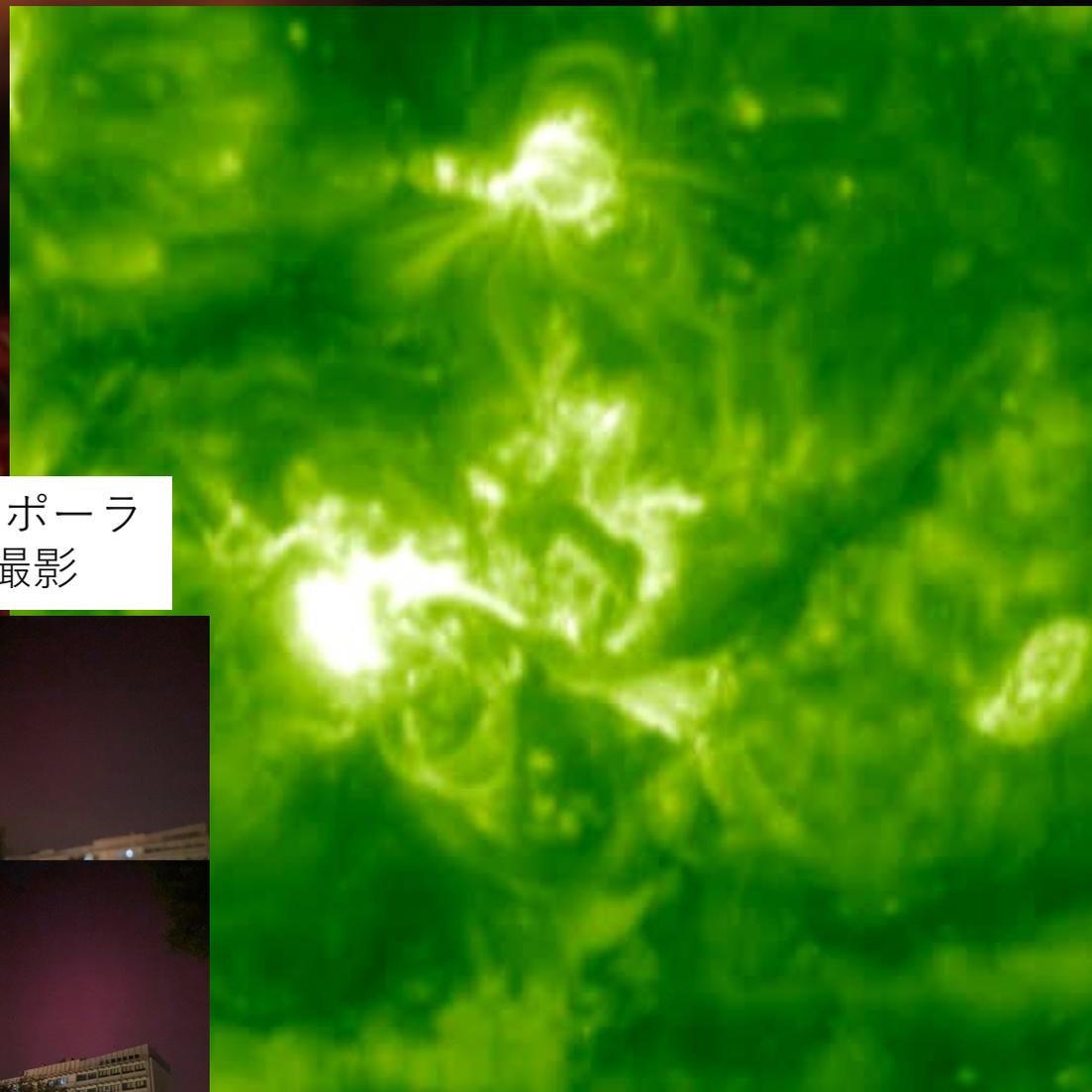
太陽フレア(カルシウムJAXA/ひので)



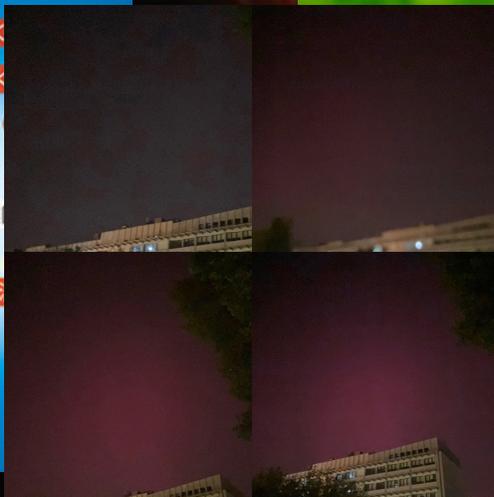
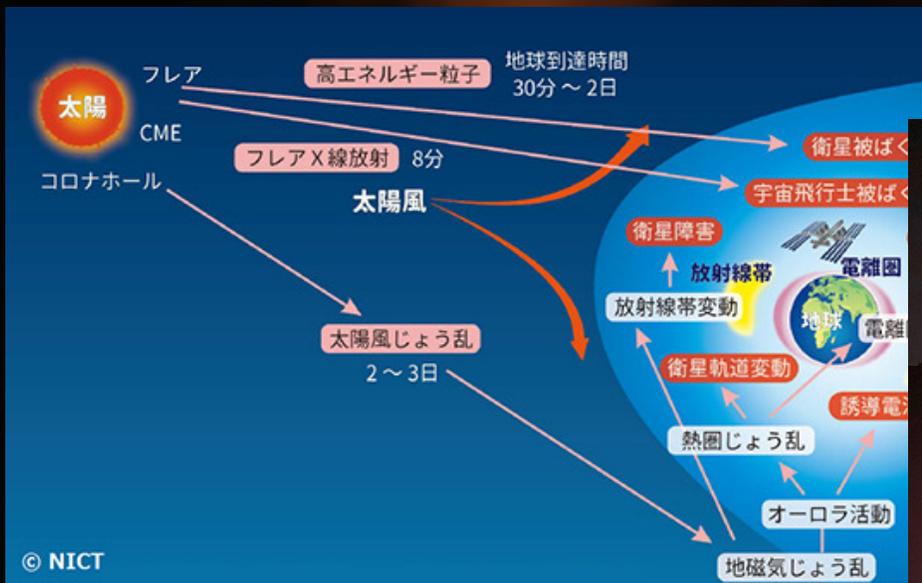
- 時間尺度：数分～数時間
- 黒点周辺の磁気エネルギーを磁気リコネクションを介して解放

恒星と惑星の深い関係

- 地球や人類文明に多大な影響
- 太陽では負の影響にフォーカス
- 他の恒星系ではどうか？

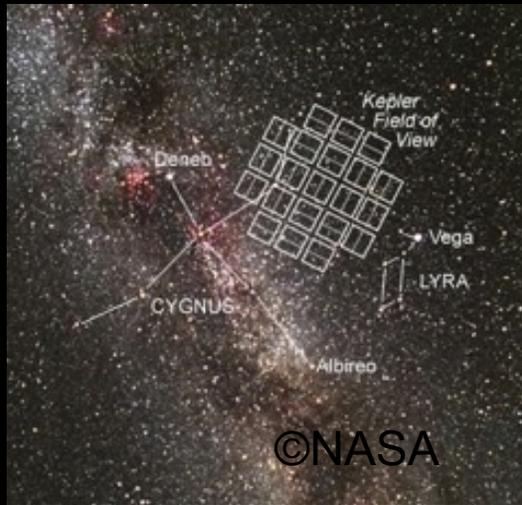


2024年5月ポーランドで撮影



宇宙には多くの恒星と系外惑星が存在

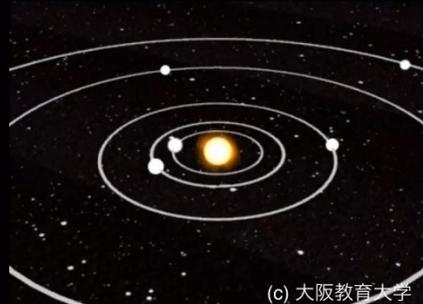
ケプラー宇宙望遠鏡(2008~)



太陽系外惑星：太陽以外の恒星の周りを回る惑星系



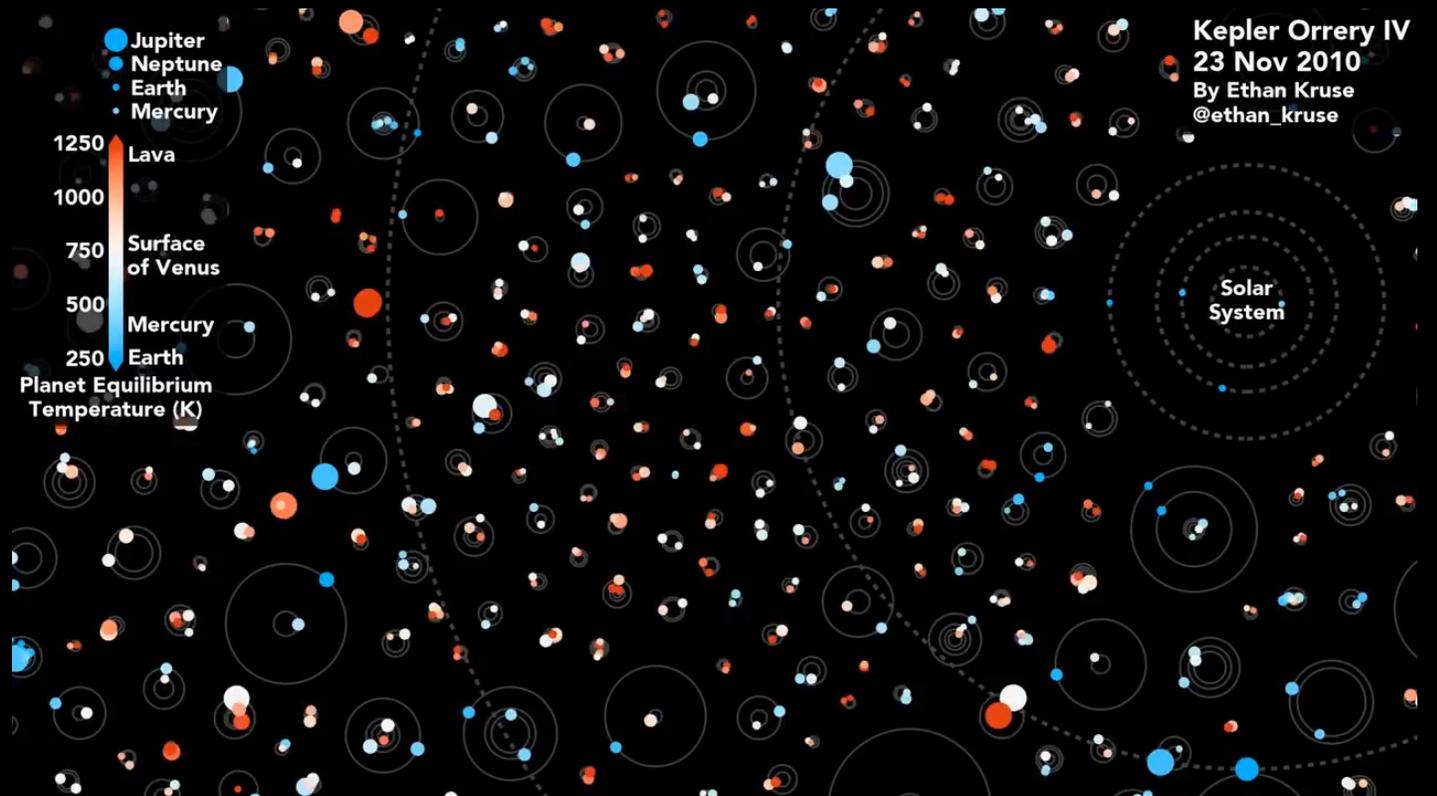
(c) NASA



(c) 大阪教育大学

- 系外惑星の発見を受け、ハビタブル惑星、宇宙生命探査が本格化

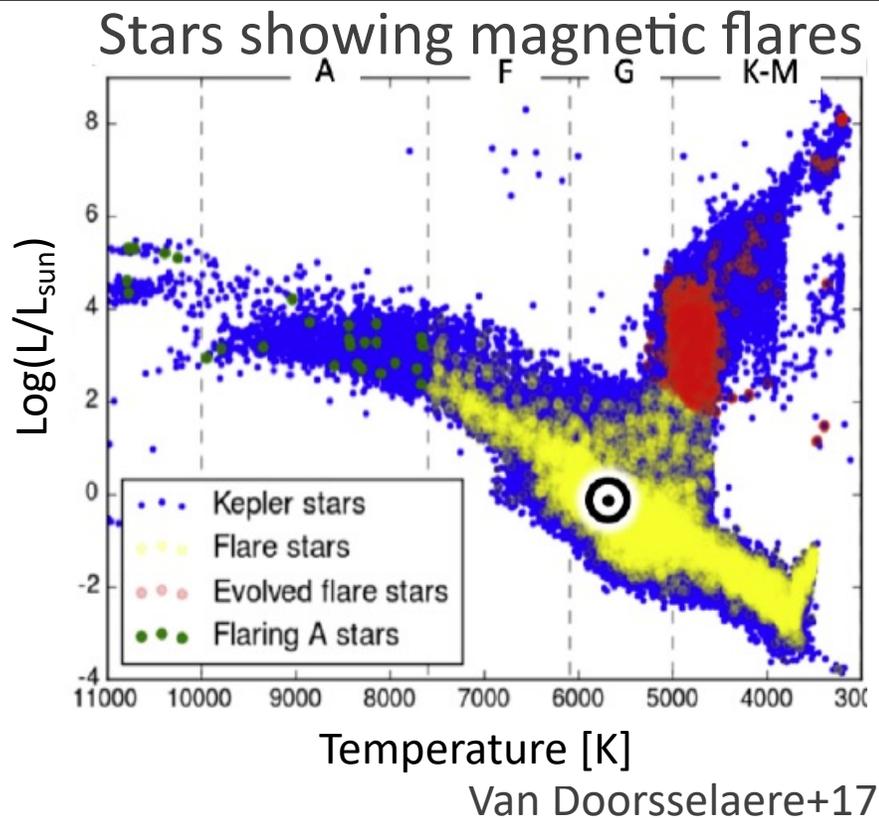
- そして、主星も注目されることに



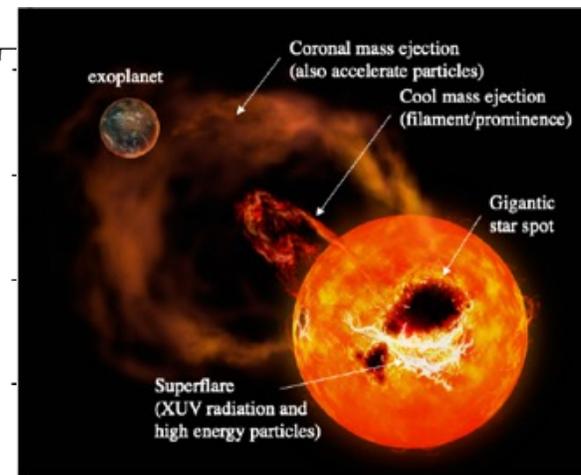
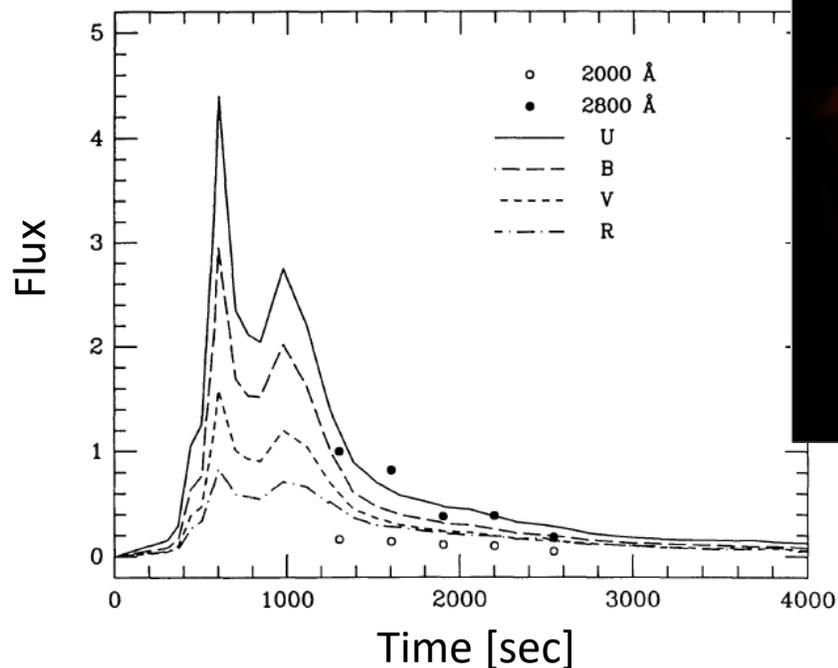
恒星フレア、スーパーフレア

- あらゆる星で恒星フレア(表面の増光)が発生していることがわかってきた。
 - 太陽型星、低温度星、近接連星系
 - 一部は「スーパーフレア」を起こす (太陽物理の範疇外の大爆発)

恒星(スーパー)フレアはどう起きる? 惑星ハビタビリティに影響?



A giant “superflares” on M-dwarf AD Leo
[Hawley & Pettersen 1991]



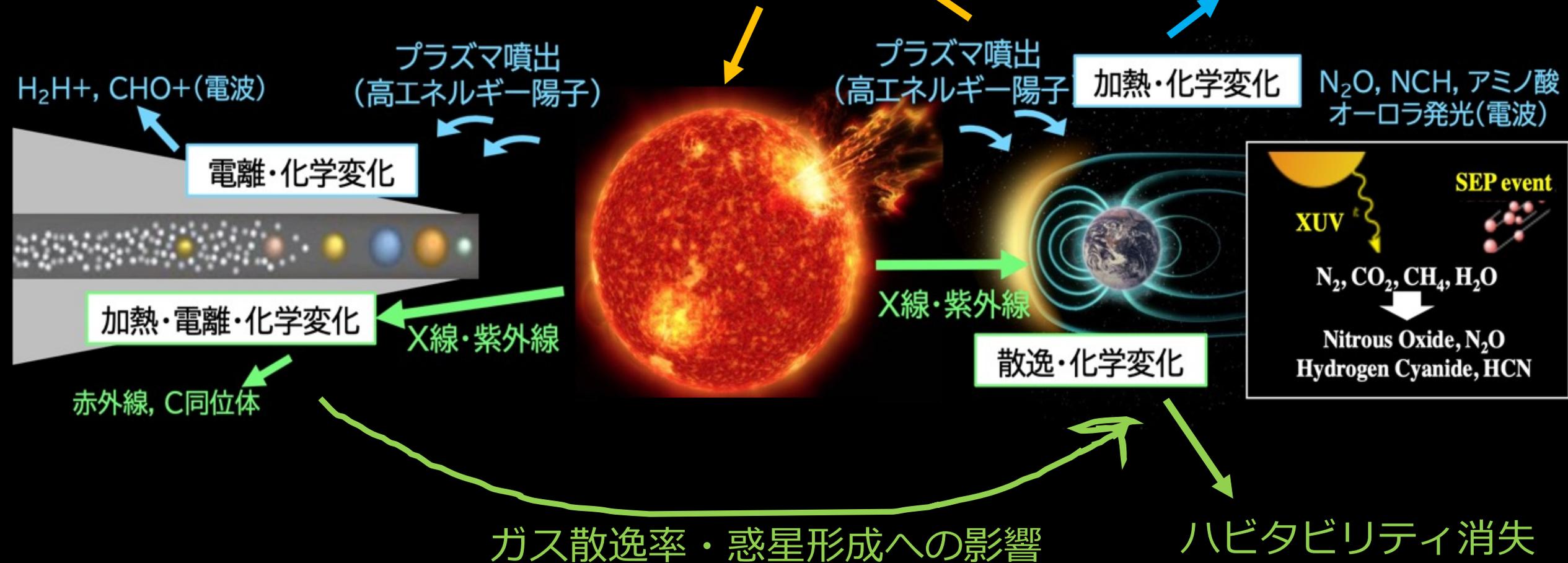
©NAOJ

[Maehara+12, Namekata+20]

多岐に渡るスーパーフレアの影響

恒星の角運動量・質量進化

ハビタビリティ形成



面白さ: 惑星・原始惑星系円盤・恒星進化・人類文明に関わる多側面
これら全てに関わる現象に取り組むのが「スーパーフレア研究」

Key Idea: “Solar and Stellar Connection”

お互いの利点で欠点を補う ⇒ より普遍的な物理理解
“Solar and Stellar Connection”がブーム

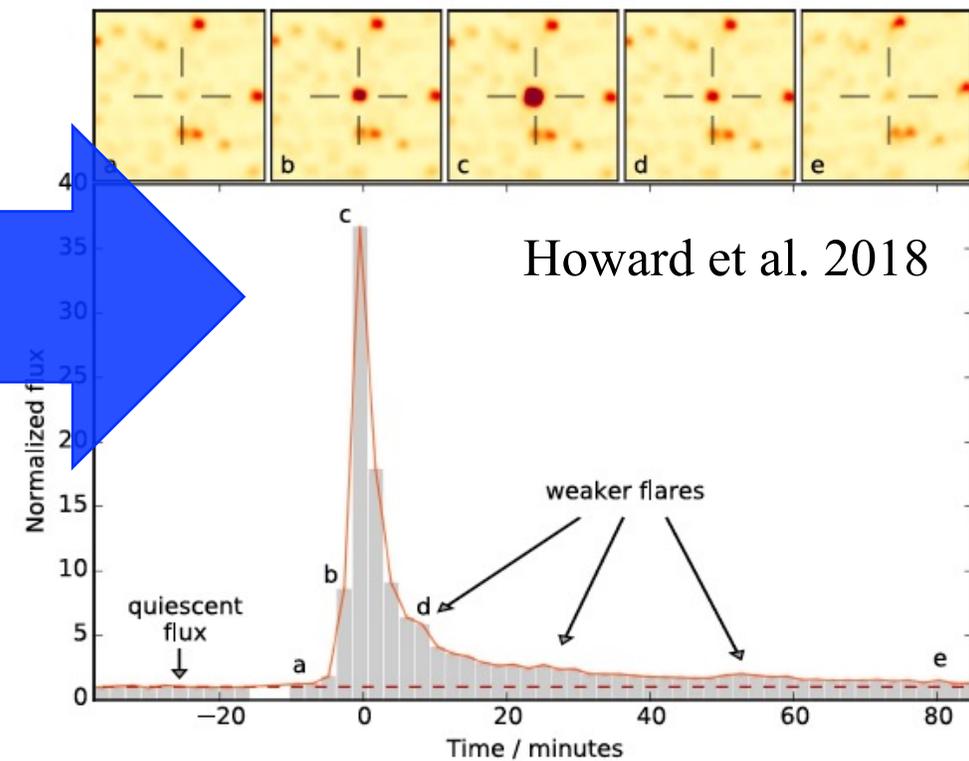
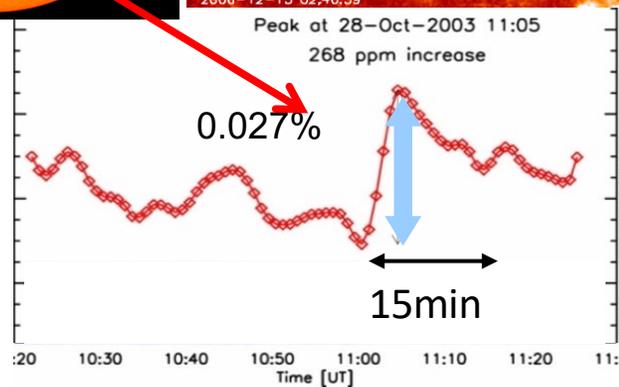
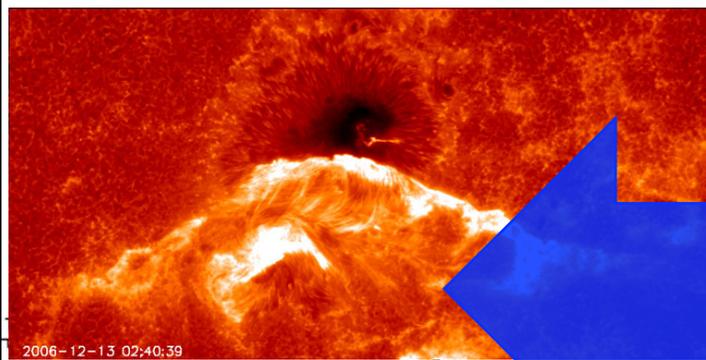
太陽フレア

- 利点: 空間分解できる
- 欠点: パラメータレンジ狭い

恒星フレア

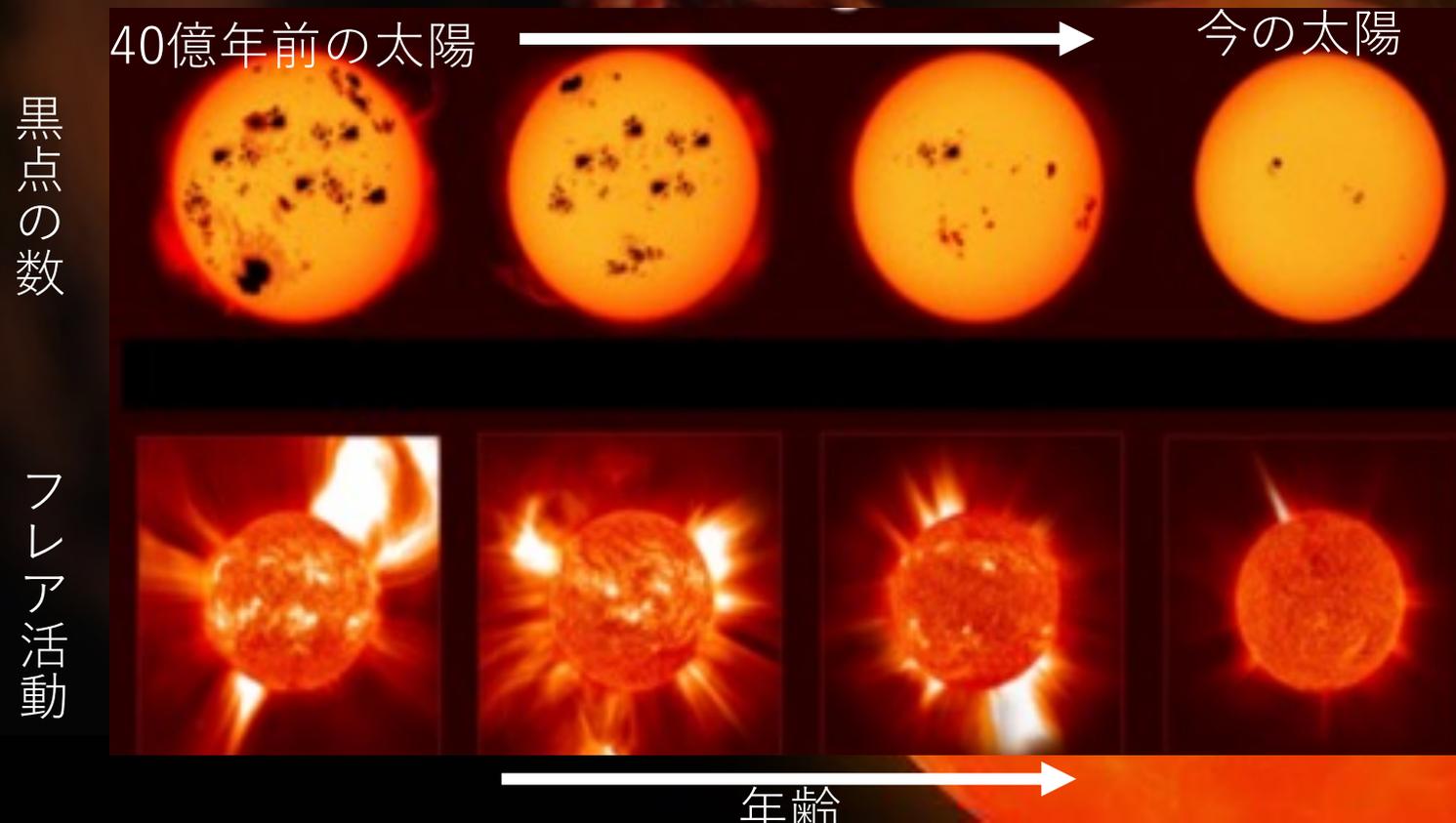
- 欠点: 空間分解できない
- 利点: パラメータレンジ広い

温度・質量・
エネルギー・
年齢, etc.



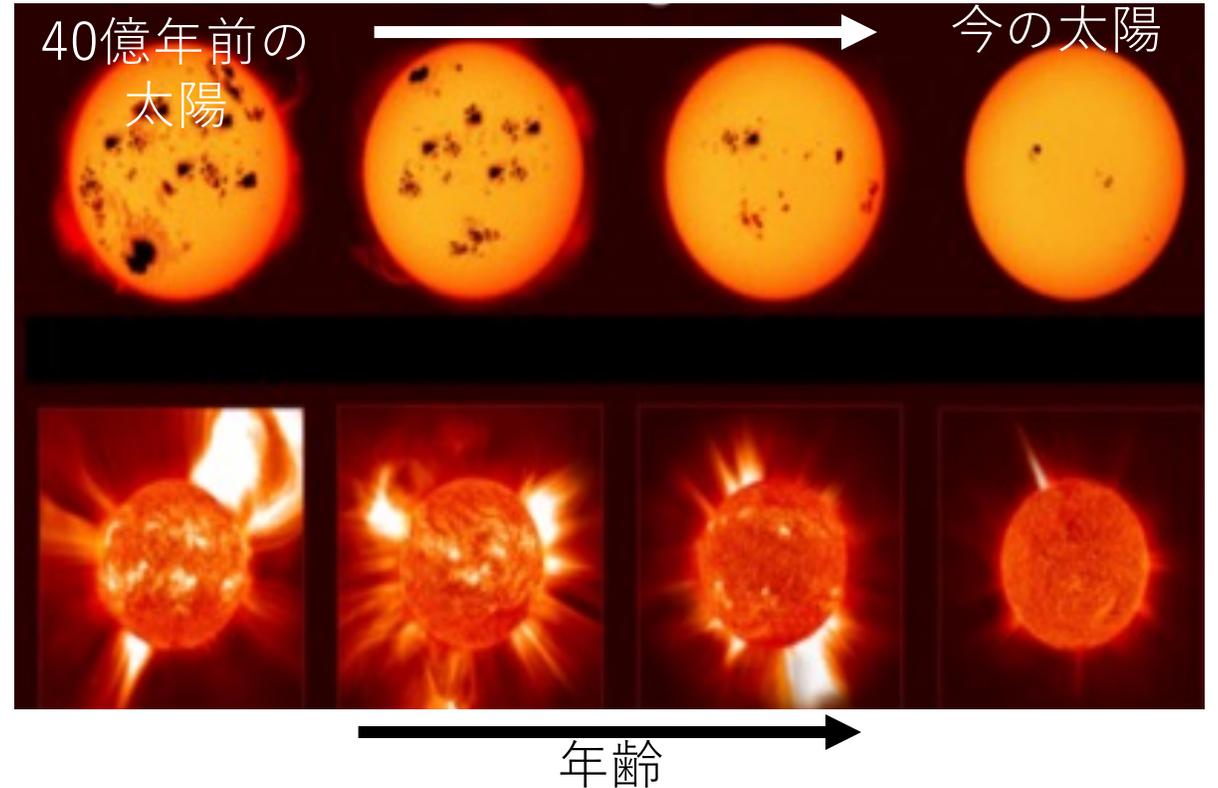
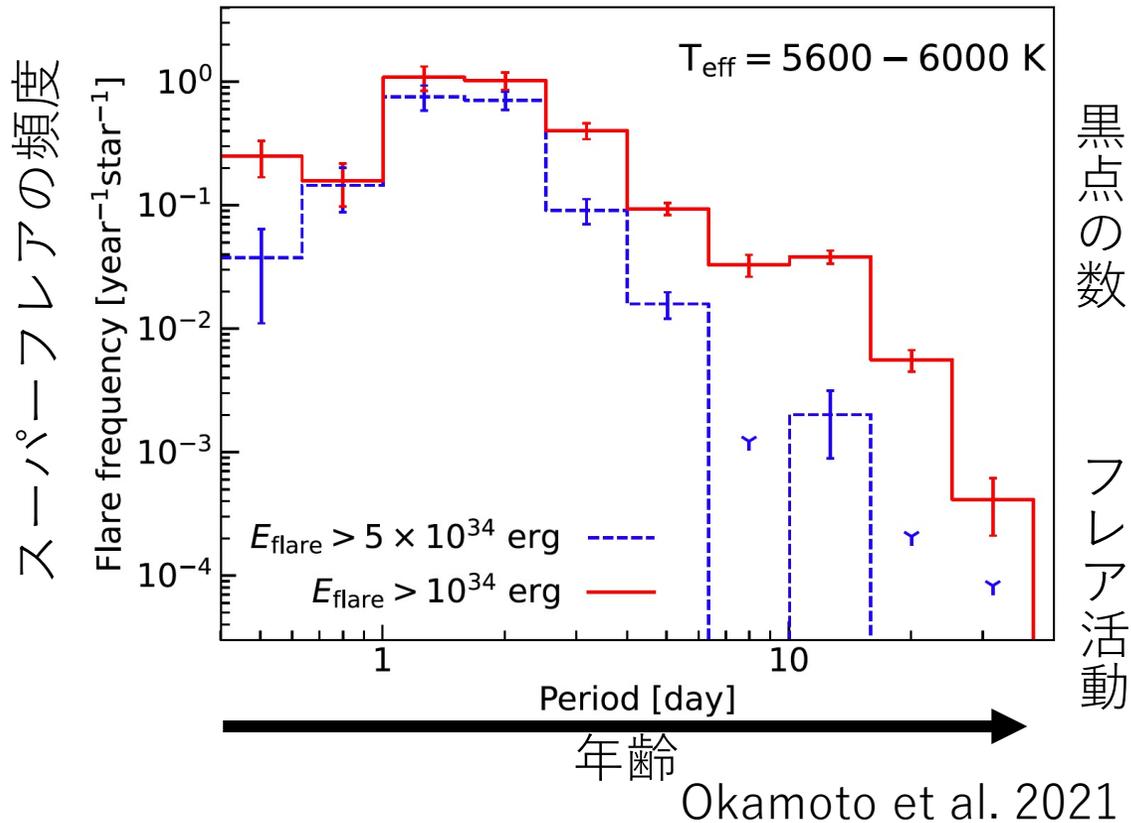
Knowledge Transfer from “Stars” to “the Sun”

- 太陽観測では46億年の「太陽のフレア活動の進化」は分からない
- 宇宙にある「様々な年齢の太陽型星」での恒星フレアを見れば、**太古の、将来の太陽の活動性**を調べることができる！



太陽のフレア活動の進化

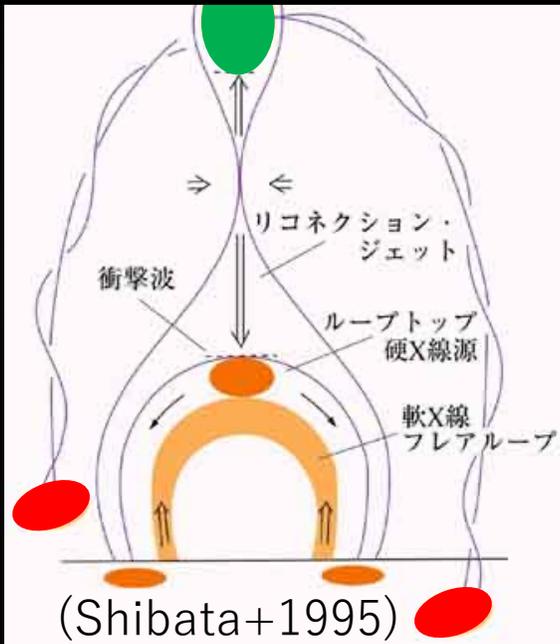
- 若い太陽は、約1日~1ヶ月に1回、スーパーフレアを起こす。
- 現在の太陽(Our Sun)も、低頻度でスーパーフレアを起こす？



Knowledge Transfer from “the Sun” to “Stars”

- 疑問：では、恒星(スーパー)フレアの描像は太陽と同じか？
⇒ 極端現象に、太陽フレアの物理が適応できる保証は全くない。

太陽フレアの知見



(1) エネルギー蓄積(黒点形成)

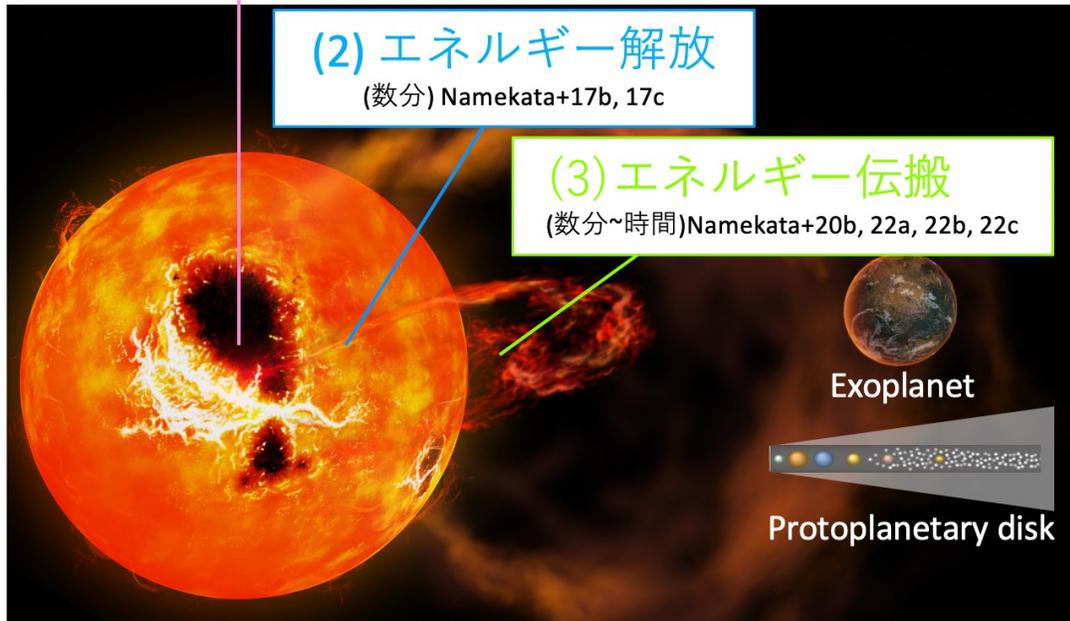
(数日~数ヵ月)Namekata+19, 20a, 23

(2) エネルギー解放

(数分) Namekata+17b, 17c

(3) エネルギー伝搬

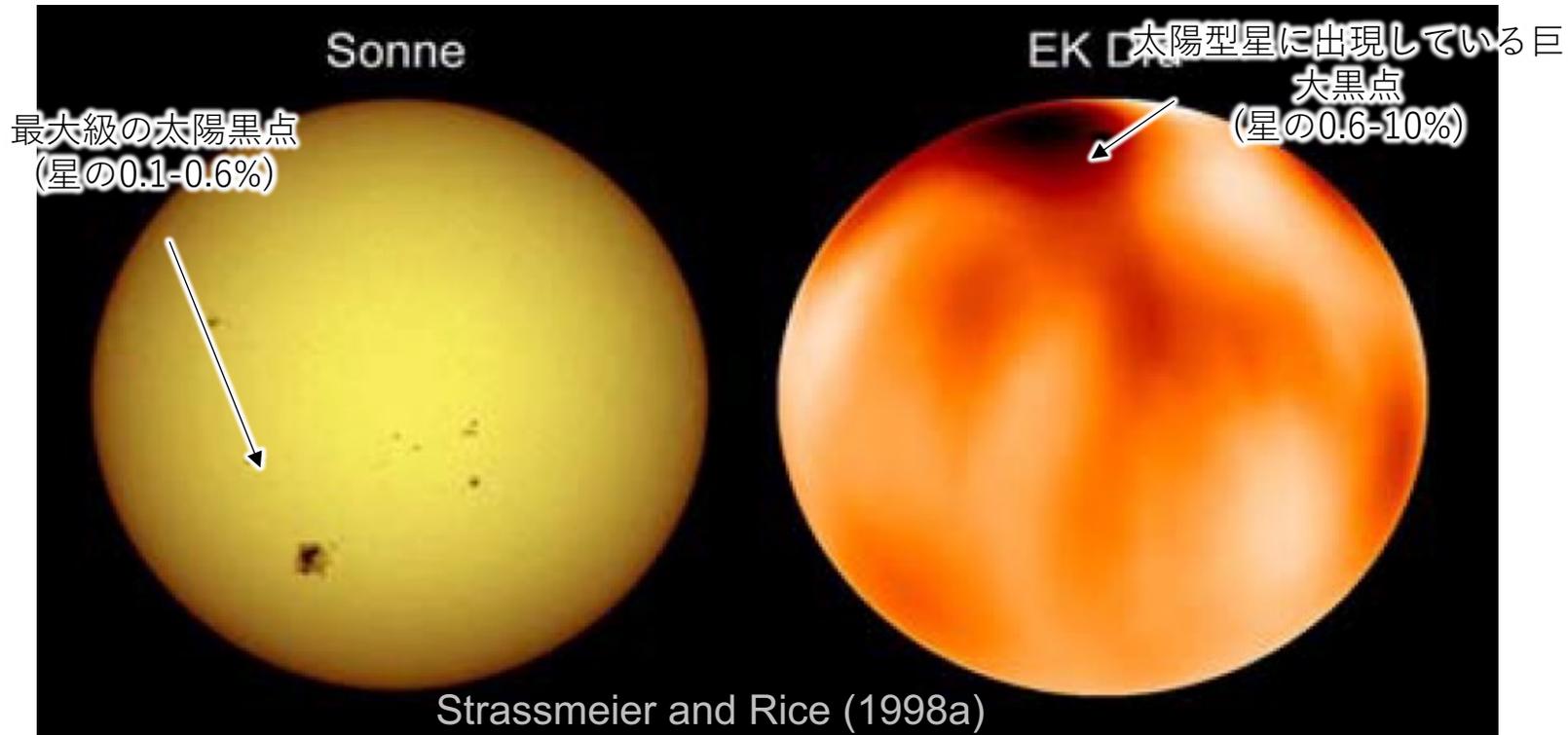
(数分~時間)Namekata+20b, 22a, 22b, 22c



**私の研究: スーパーフレアのエネルギー蓄積・解放・伝搬過程を
太陽・恒星フレアのデータ・モデルの比較で検証**

エネルギー蓄積: 巨大黒点の生成・消滅

(Namekata et al. 2019, ApJ, Namekata et al. 2020a, ApJ)



- 巨大黒点の磁場が、どこで生成され、どう散逸するのか？

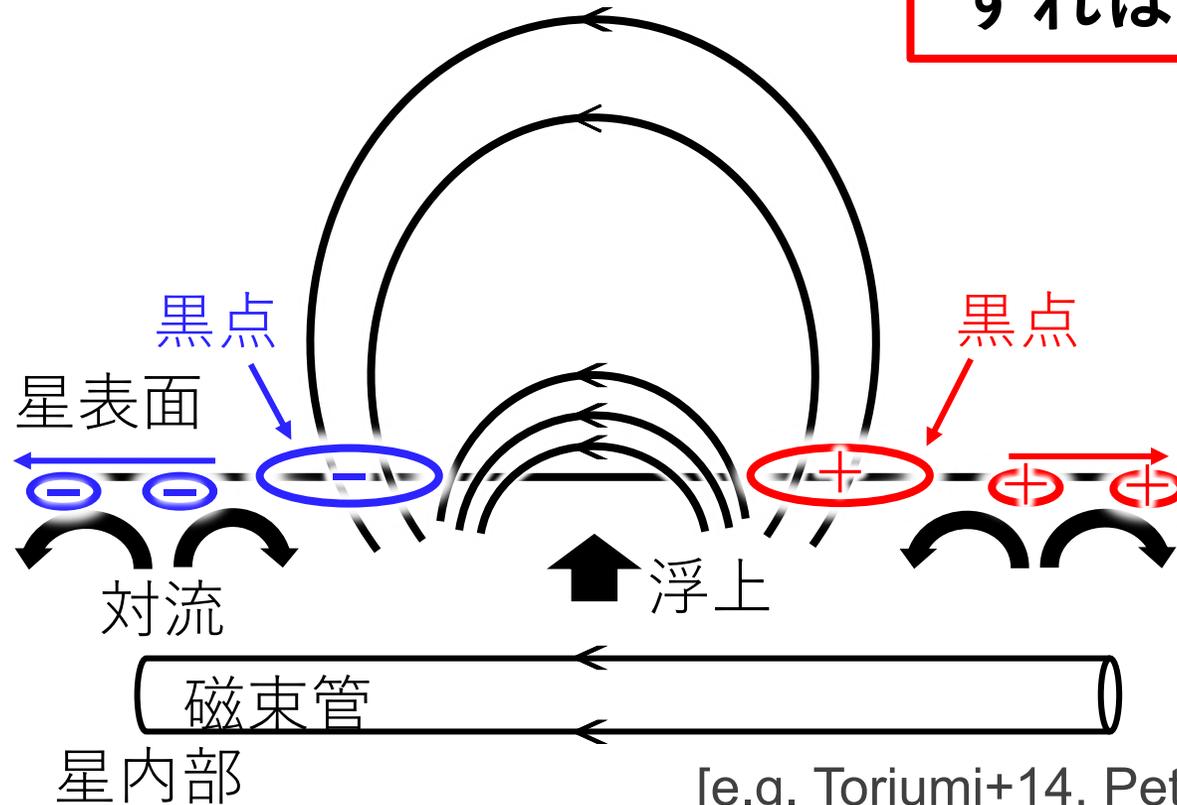
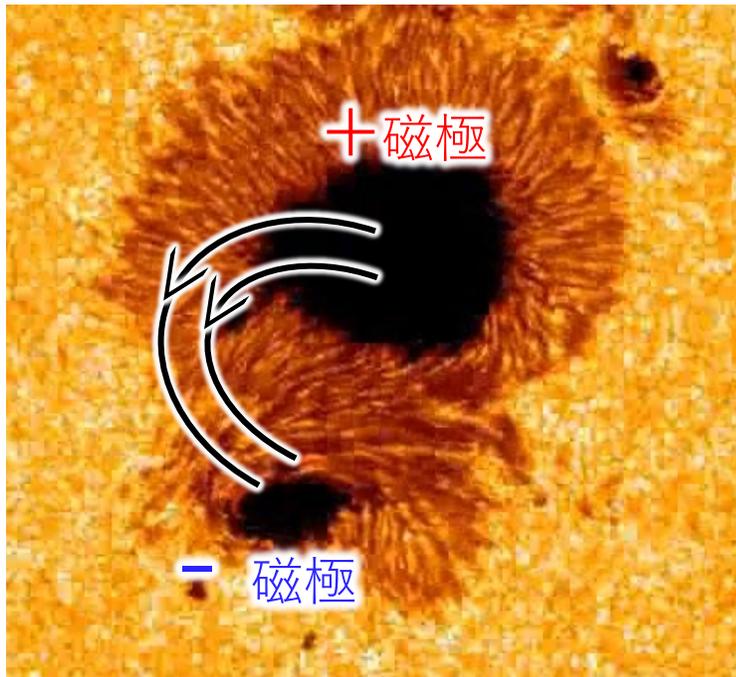
どのように比較すればいいのか？という一例として

Standard Mechanism of Sunspot (De-)Formation

- 星内部から磁束管の浮上 → 星表面の対流などで崩壊
- **未解明課題**：このモデルで、恒星の巨大黒点も説明できるか？
 - 磁場がどこでできているかもわからない
 - 掃き寄せ効果で、定常的な極に巨大黒点？

何をどう比較すればいい？

太陽黒点 (可視光, Hinode/SOT)



[e.g. Toriumi+14, Petrovey+97]

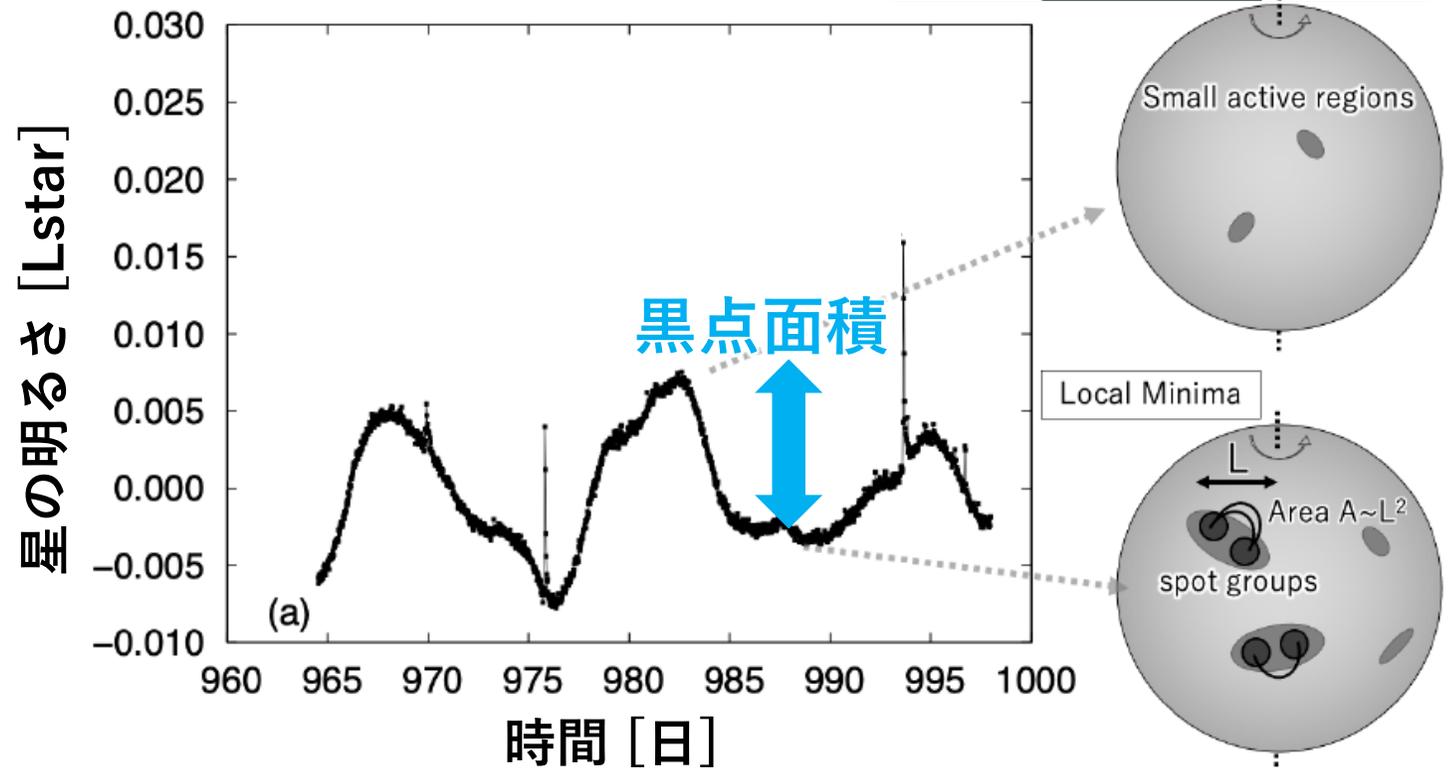
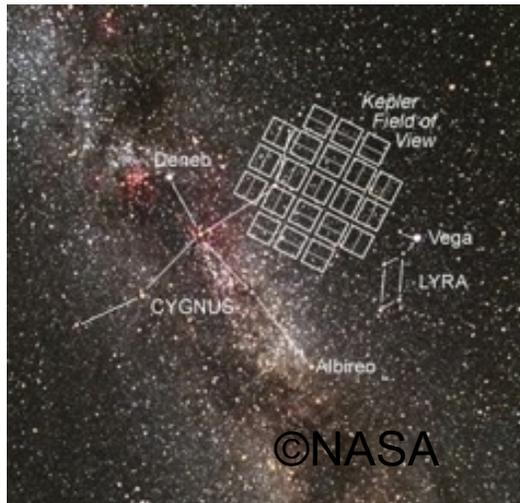
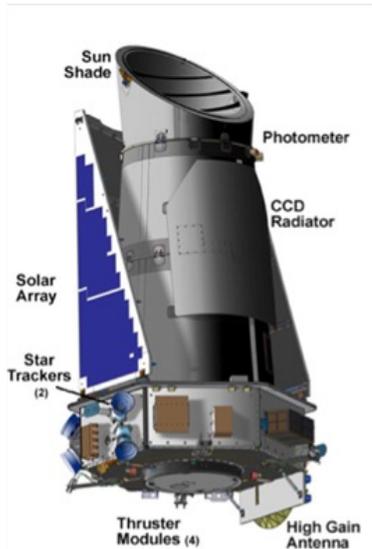
What Can We Measure about Starspots?

- 恒星の測光観測(e.g., Kepler衛星) → 恒星黒点の面積
- スナップショット的な観測が多く、時間変化はほとんど未調査

⇒ 生成・消滅過程の調査のためには、
時間変化に注目すべし

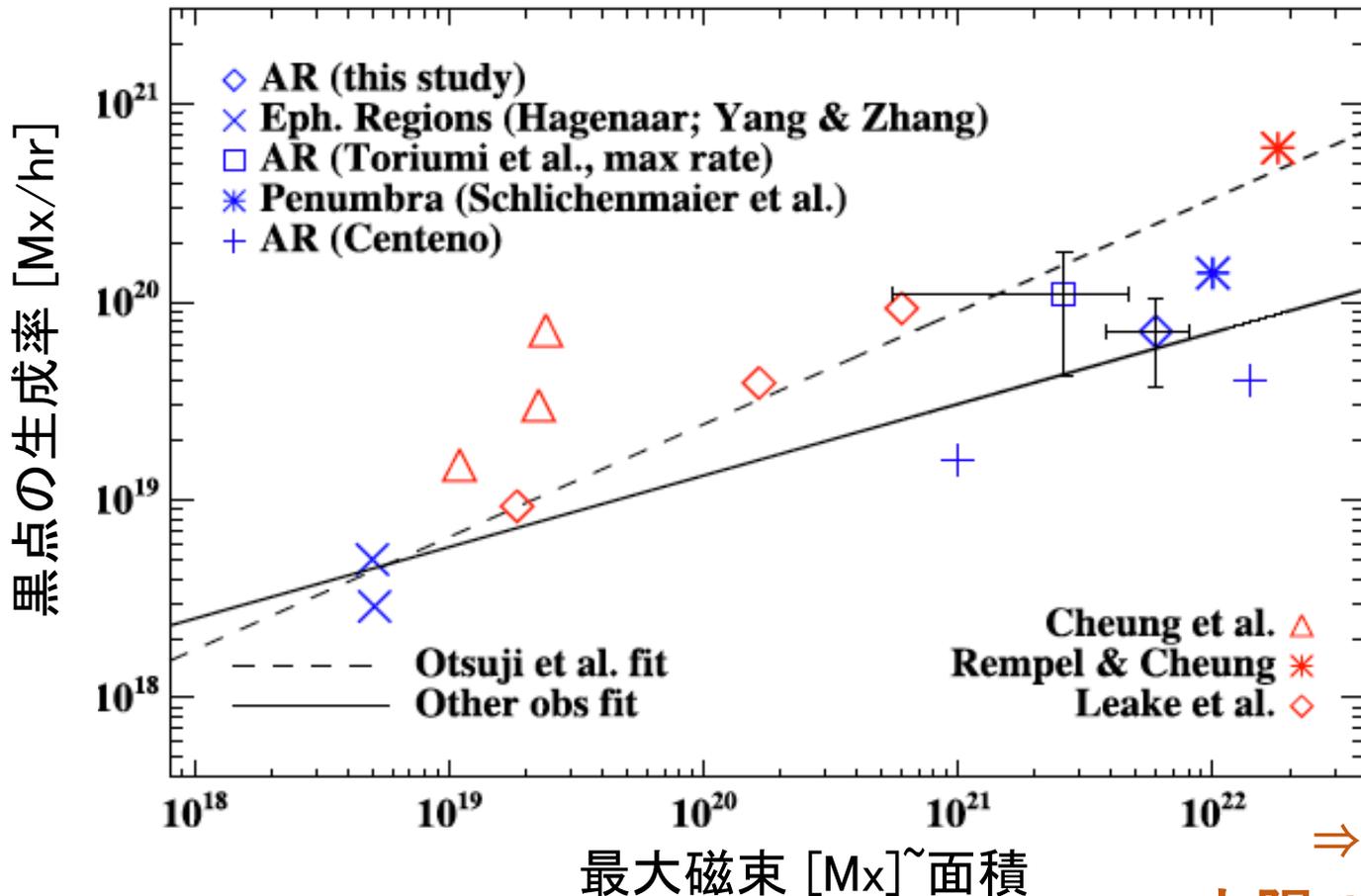
何をどう比較
すればいい？

ケプラー宇宙望遠鏡(2008~)

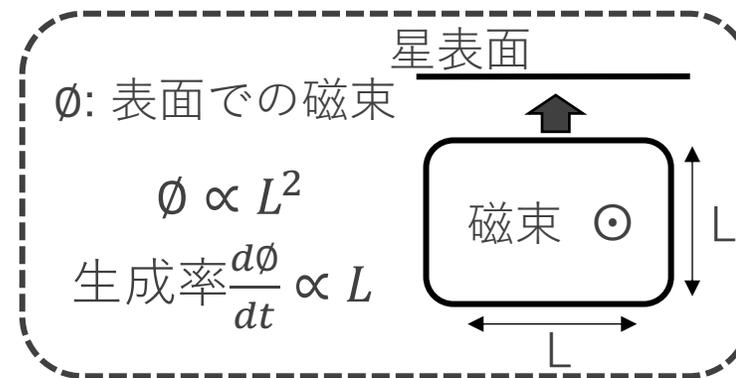


Learning From Solar Observations and Model

太陽研究: 磁束 v.s. 変化率



簡易な理論モデル: $\frac{d\phi}{dt} \propto \phi^{0.5}$
(Otsuji+11)



[Norton et al. 2017]

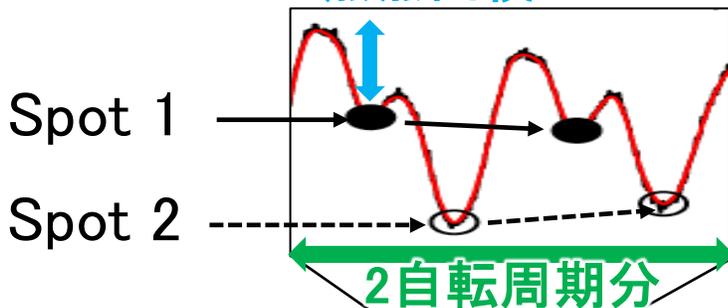
⇒ 磁束 v.s. 変化率を比較すれば、
太陽のモデルで説明できるかわかるはず!

恒星のデータを知り、太陽の研究を知ることが第一歩

どうすれば変化率を調べられるか？

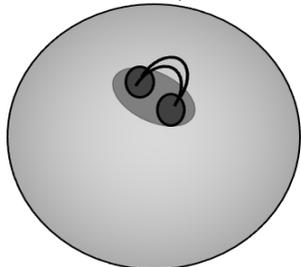
太陽と同じ条件にするには
工夫が必要

黒点面積

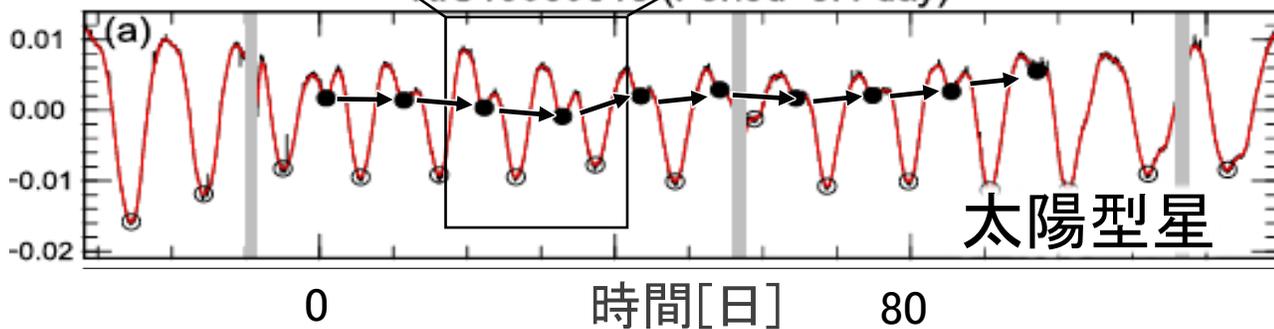


Local minimum

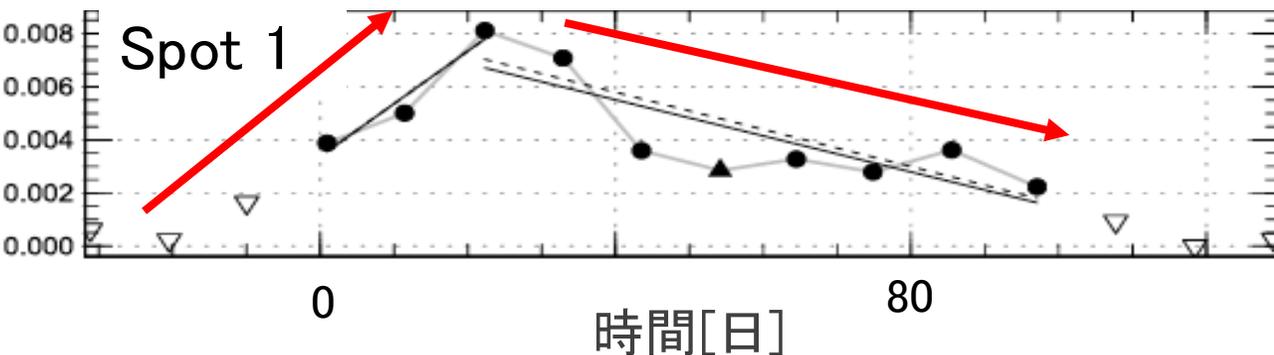
=巨大黒点



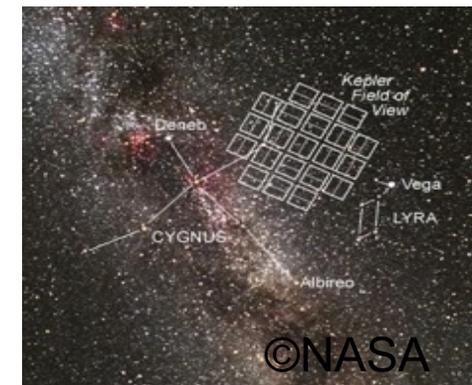
光度



黒点面積
[星半球]



データ：Kepler衛星の4年間のデータ
対象天体：太陽型星 5359星



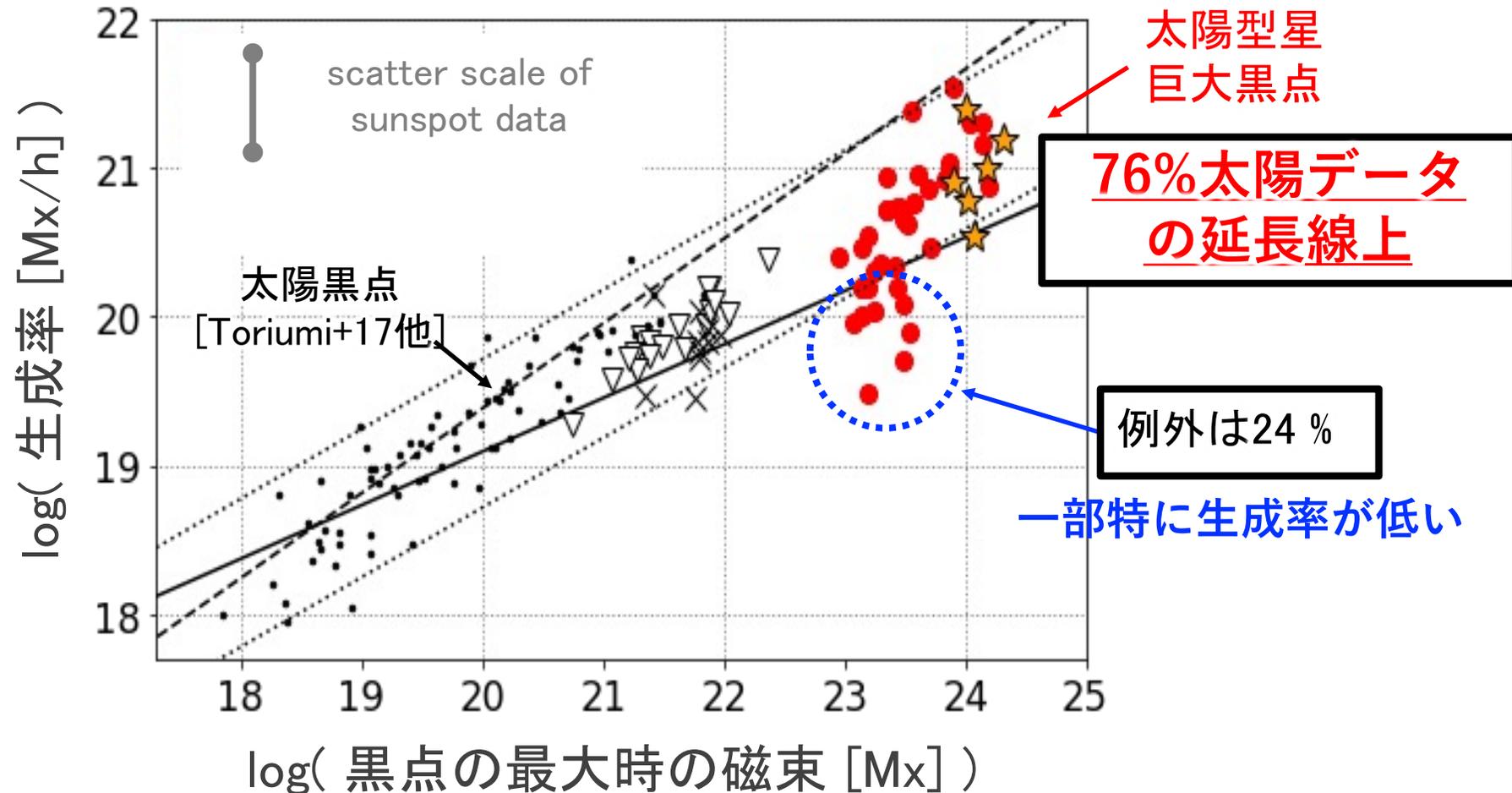
©NASA

Calculation

- **面積** ~ Local minimaの深さ
- **生成・消滅率**
~ 深さの変化率
(磁場は1500G仮定)

巨大黒点の生成

- 磁束量・変化率は大きいですが、**同様の物理機構(磁気浮上モデル)**で説明できる



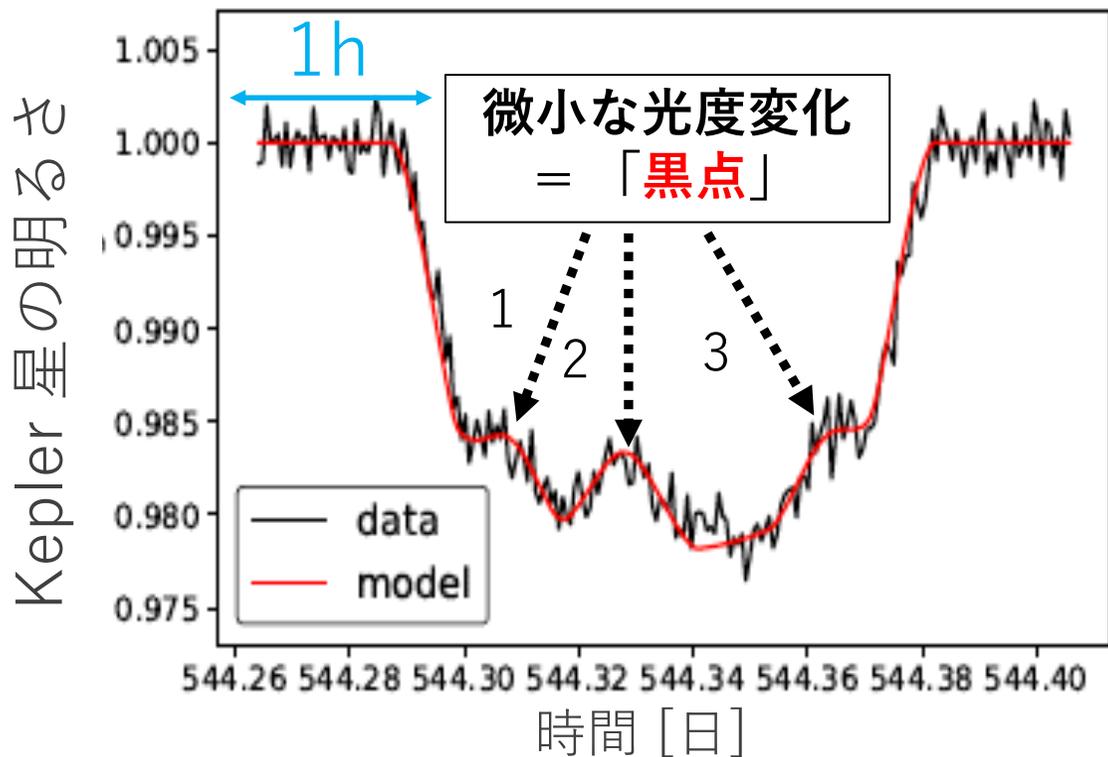
太陽「複数黒点の影響は？」



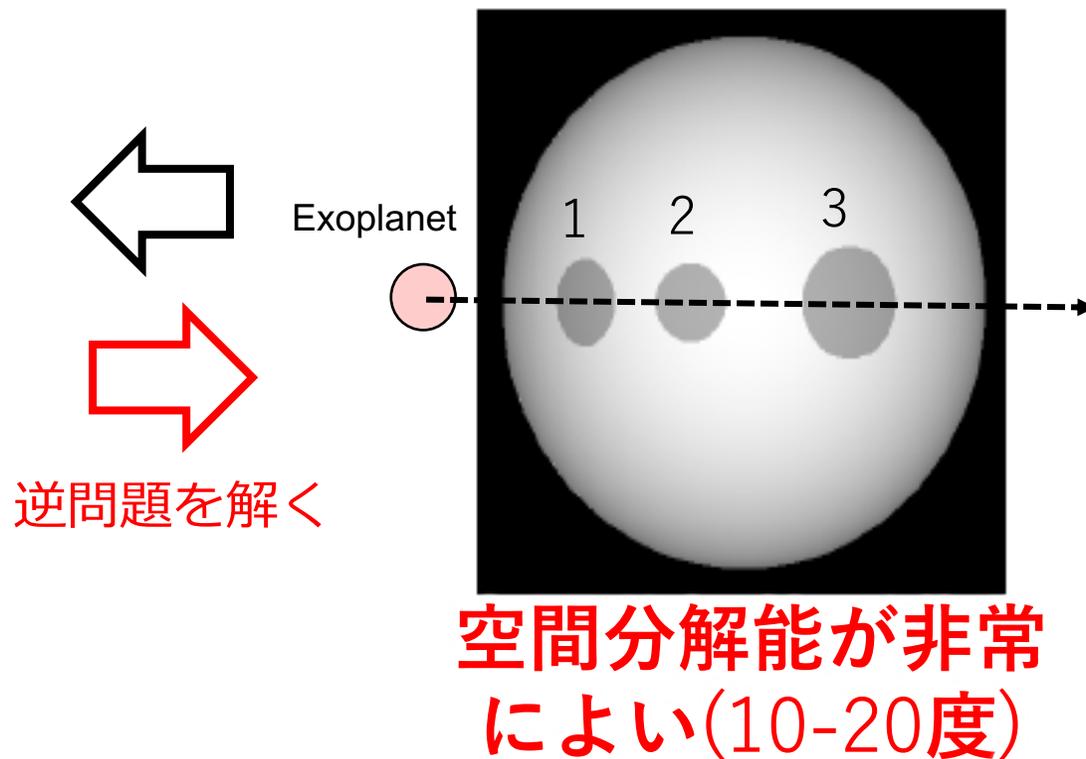
系外惑星トランジット法：恒星黒点を空間分解する

- 系外惑星のトランジット中の黒点上通過による光度変化を生かし、**黒点を空間分解して**時間変化を測定

Kepler-17：太陽型星(1分分解能)



推定される星表面分布

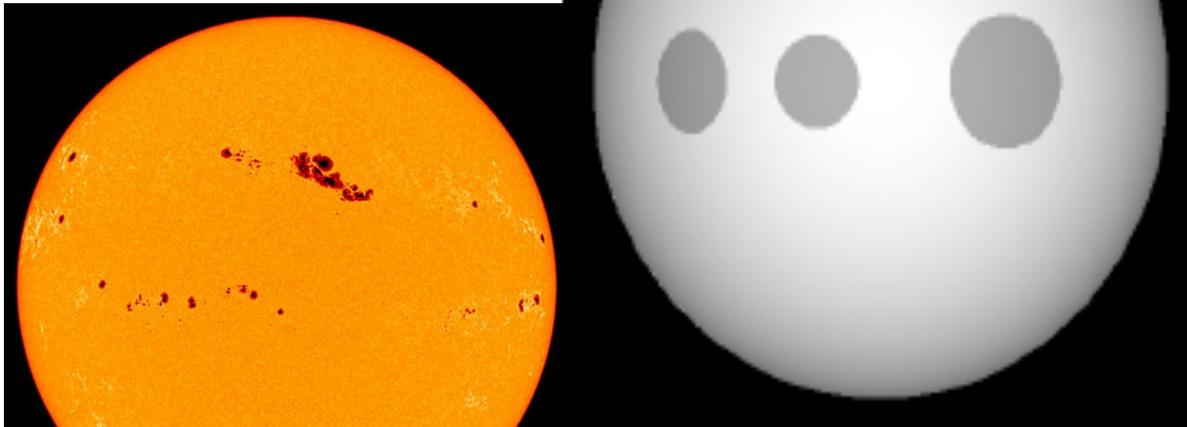


空間分解した巨大黒点

- 常に巨大黒点が星表面に最低5~6個程度存在
 - 断続的な黒点ポップ ⇒ 継続時間長く ⇒ **変化率小さく**
- ⇒ **一部の小さな生成・消滅率は、複数黒点で説明できる可能性**

恒星→

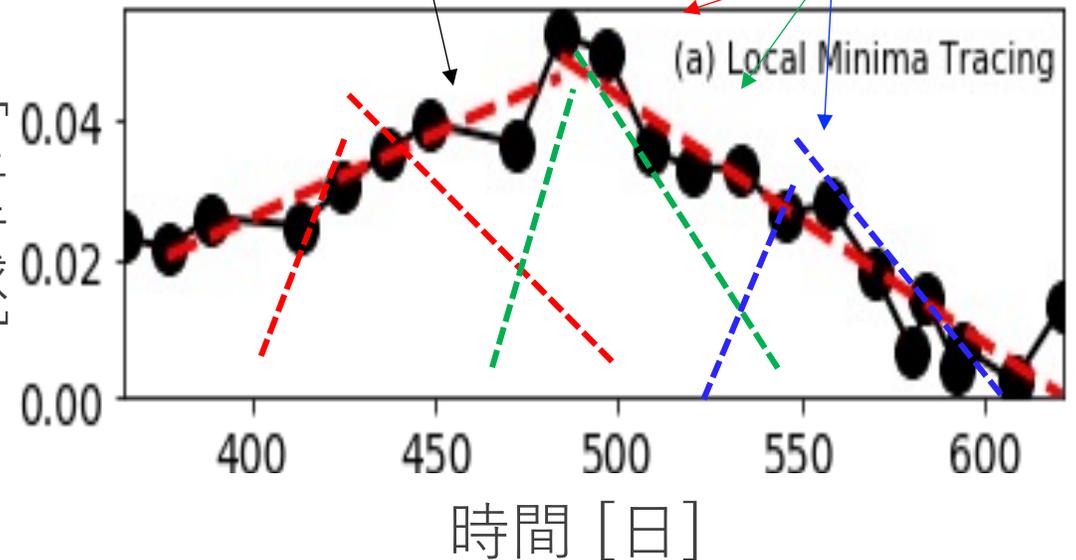
太陽↓



自転変動で見た時(黒)

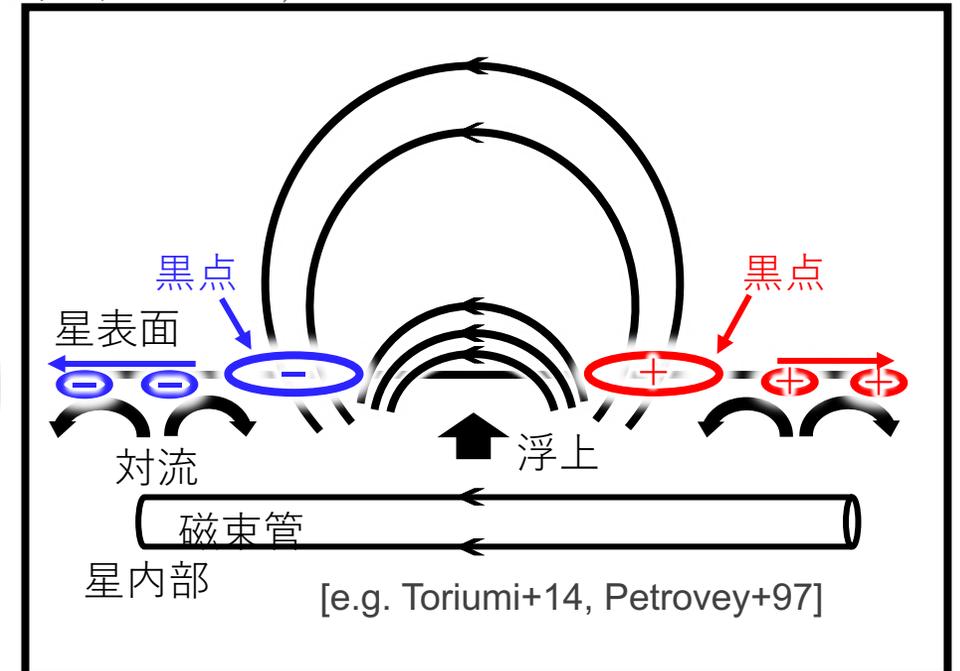
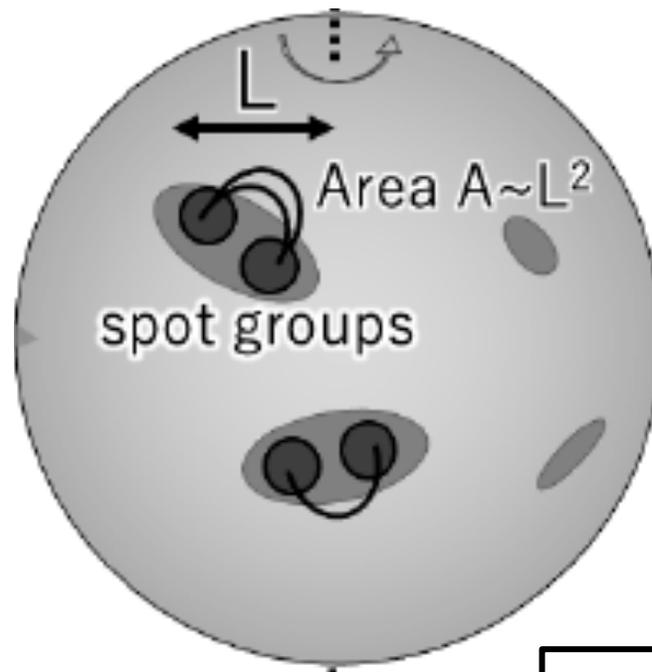
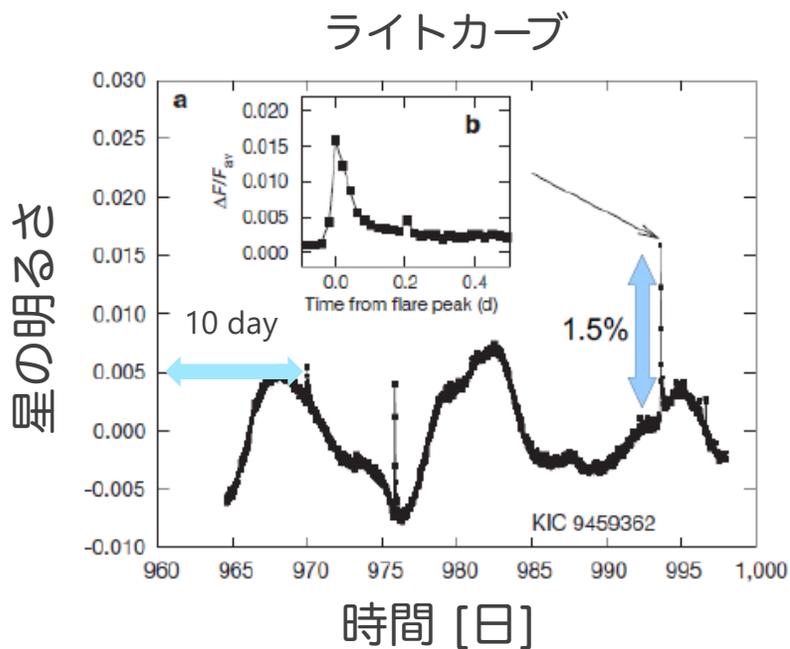
個々の黒点

黒点面積
[星半球]



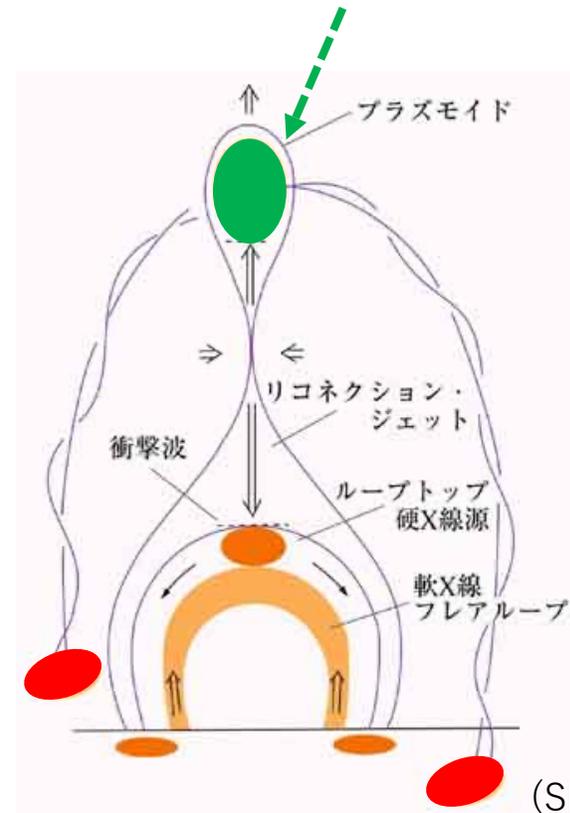
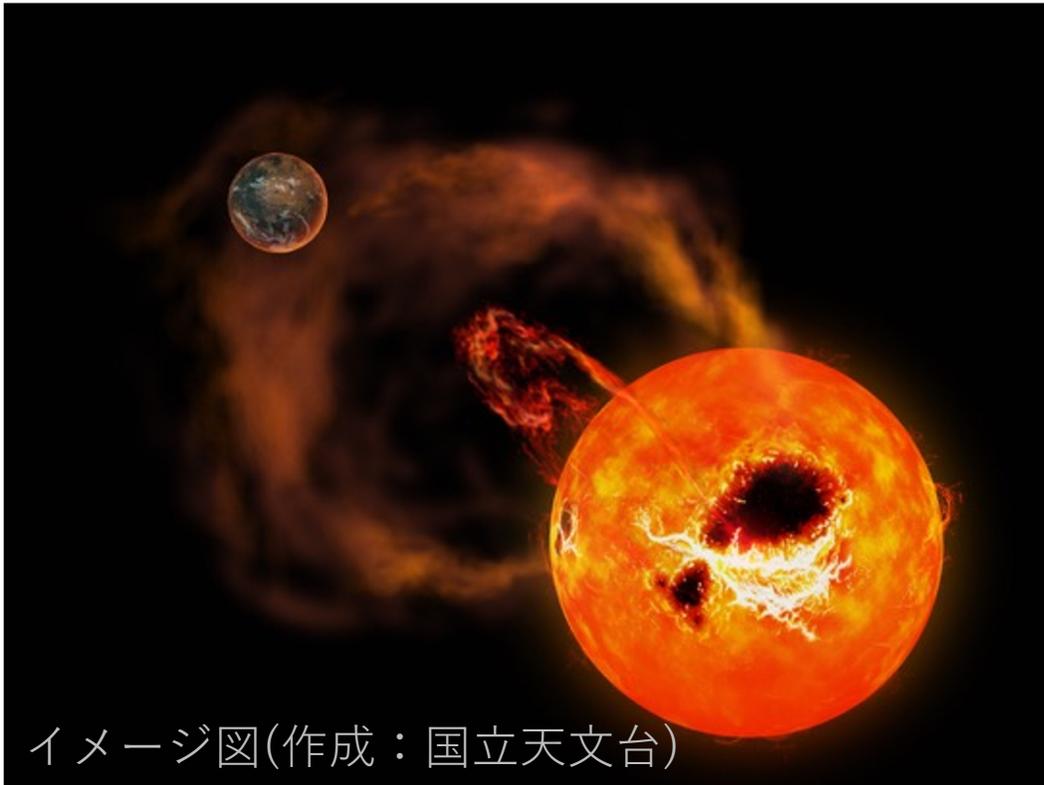
Short Summary: 巨大黒点の描像

- 活動的な恒星表面には、最低5~6個以上の**複数の巨大黒点が存在**
 - 自転変動には重ね合わせの効果によるファクターの不定性
- 巨大黒点磁場は**内部から浮上し、対流で崩壊**するモデルと合致
 - 高い拡散係数の仮定(Bradshaw+14)は必要ない
 - (ただし掃き寄せによって極に定常存在するモデルは棄却しない)



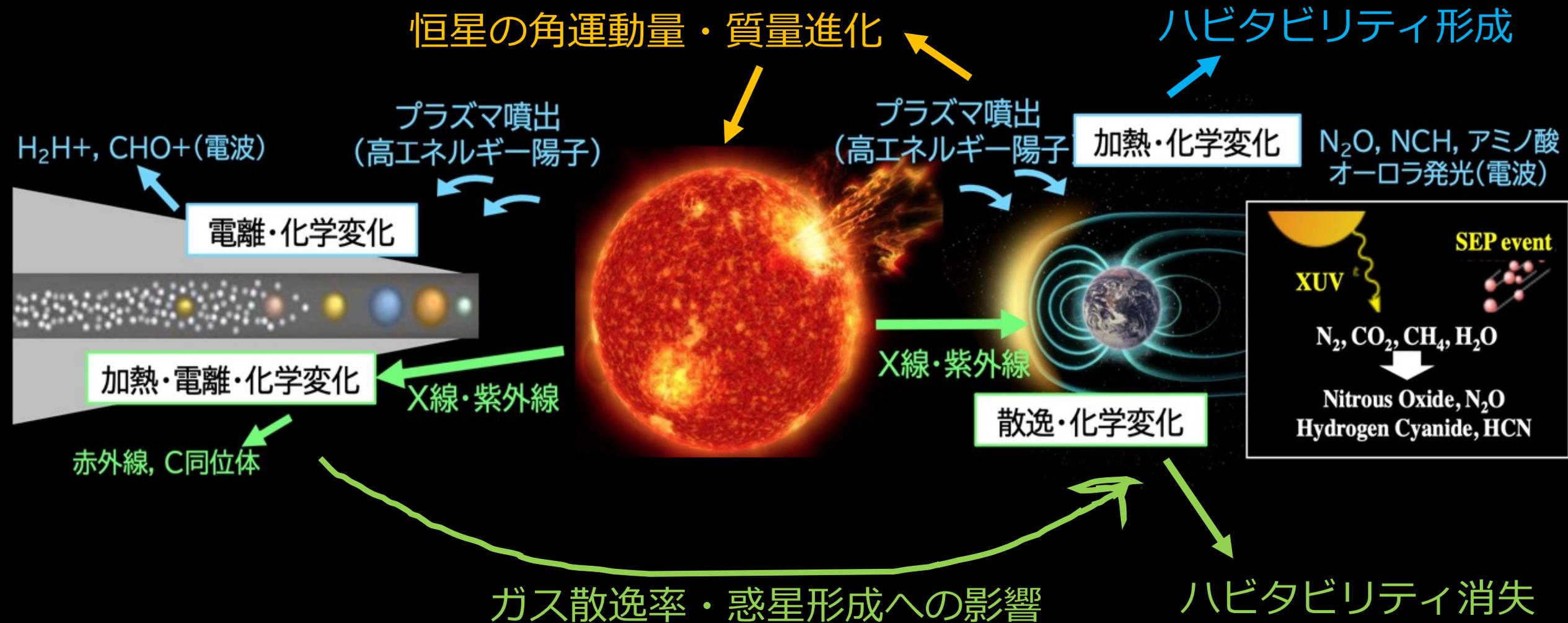
エネルギー伝搬: スーパーフレアの質量噴出

(Namekata et al. 2021 Nature Astronomy, 2024 ApJ)



- 解放されたエネルギーはどこへゆくのか? 惑星への影響は?

疑問: 「質量噴出現象」は、そもそも発生しているのか?

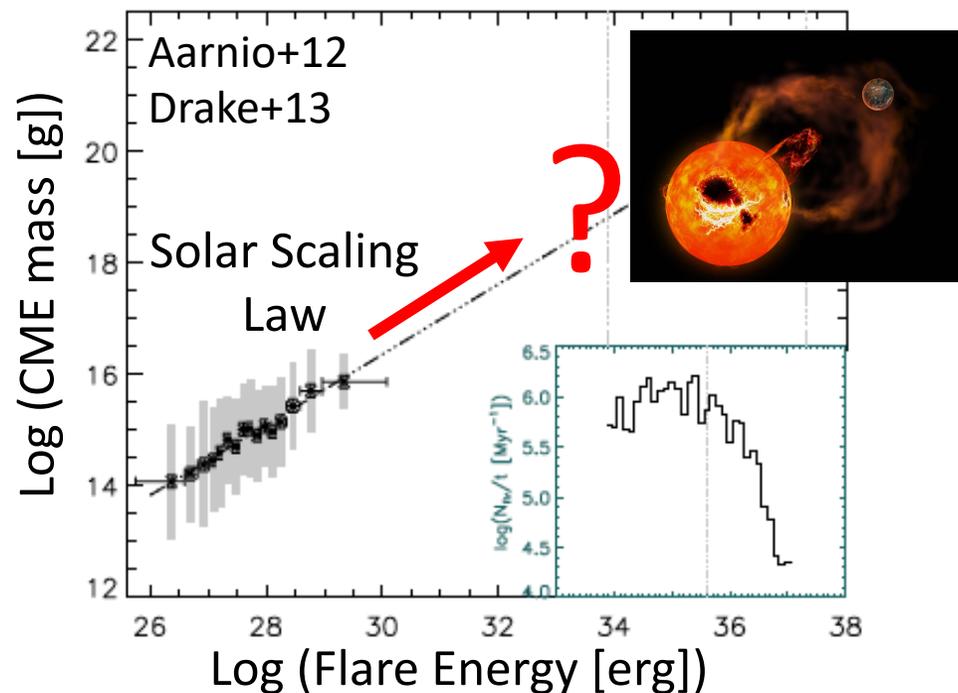


恒星圏進化・系外惑星の研究でも重要だが、発生自体謎。

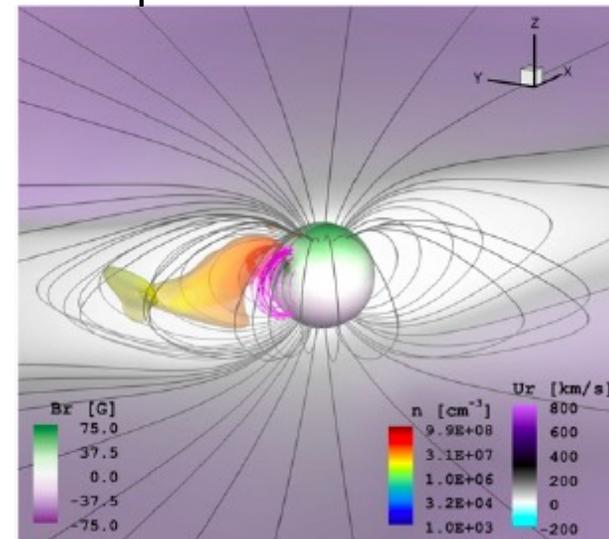
Puzzle: Do Stellar Superflares Associate Stellar CMEs??

- 太陽フレア・Coronal Mass Ejection (CME)の関係に基づく、CMEは高頻度でスーパーフレアに伴っていることが予想される [e.g., Aarnio+12, Yashiro & Gopalswamy 2009].
- 他方、観測例はほぼ無く、磁場環境の違いのせいで、起きていない or 見えない可能性が指摘されている [e.g., Alvarado-Gomez+2018, Sun+2022].

⇒ Can stellar observations answer this puzzle?



Strong magnetic field and/or dense coronal wind can change the eruptions and observational signature?

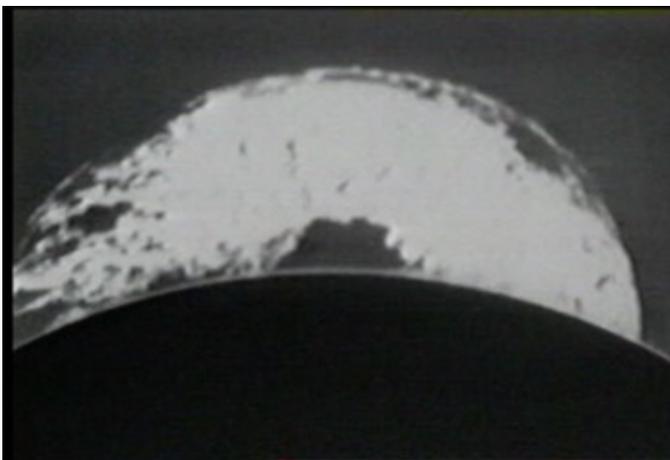


E.g. magnetic suppression (by Alvarado-Gómez+18)

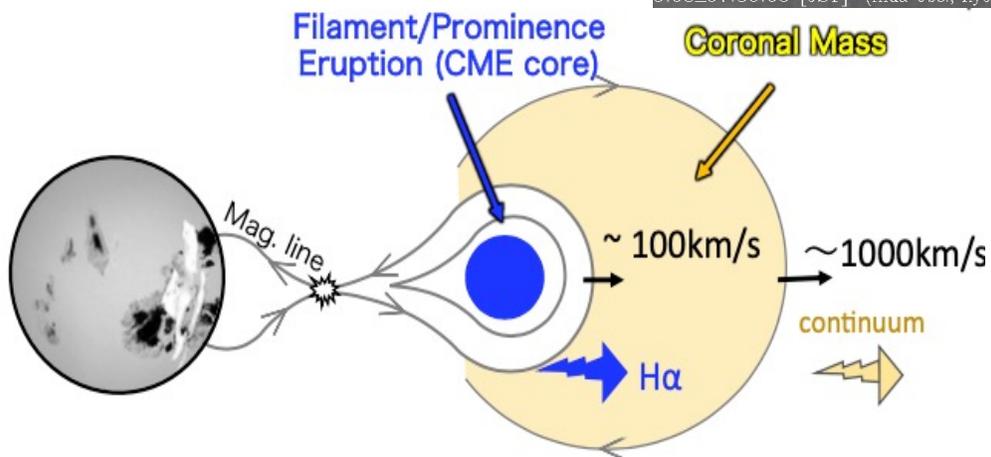
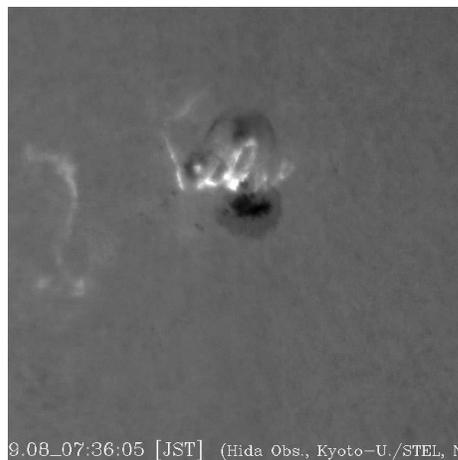
What Should We Observe?

- 太陽では、バルマー線($H\alpha$)ではフィラメント・プロミネンス (CMEのコア) 噴出が見える
 - $H\alpha$ 線の分光観測：ドップラーシフトにより、飛んでいるものそのものの運動がわかる

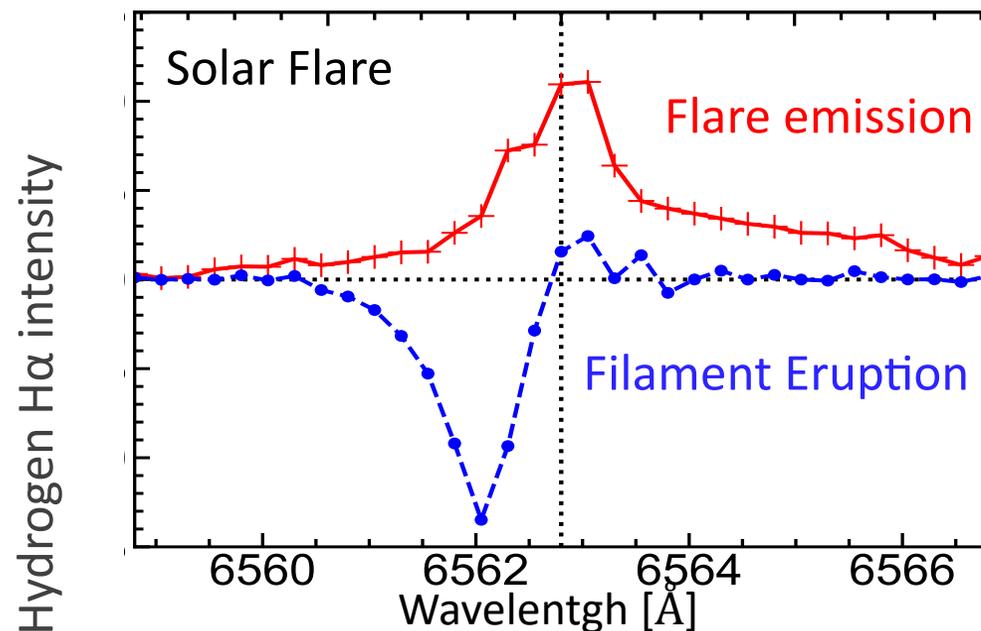
史上最大の太陽プロミネンス噴出
(横から見た動画)



フィラメント噴出
(上から見た動画)



Solar H-alpha line



京都大学3.8mせいめい望遠鏡計画

- 岡山県浅口市の岡山天文台に建設(2018年)された、**東アジア最大の光赤外望遠鏡**
Kurita et al. (2020, PASJ)
 - 国内最大の3.8mの大口径による**高精度観測**
 - 大学占有の柔軟かつ**潤沢な観測時間(50%)**
- ⇒ **せいめい望遠鏡の特徴を活かし、太陽型星でのスーパーフレアの分光観測に挑戦する計画に着手**



Aim and Observations

[Purpose of our project:] detecting H α spectra of superflares on Sun-like star and finding CME signature
⇒ We conducted time-resolved optical spectroscopic & photometric obs. of “young” Sun-like star

[Target star]

EK Dra (G2V) – “**代表的な若い太陽型星**”

(in main sequence; Age ~ 100 Myr; Teff ~ 5750K)

(G2V, Vmag=7.5, best target for flare monitor)

[Photometry]

TESS Sector 21-23 (2020 Jan-Apr): **2 min cadence**

[H α Spectroscopy]

Japan) Seimei 3.8m (R=2000), Nayuta 2m (R=10000),

- **S/N~100-200 & 1-5 min cadence**
- **[Our advantage] ~150 nights observations**

TESS



3.8m Seimei Telescope



nature
astronomy

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01532-8>

Check for updates

OPEN

Probable detection of an eruptive filament from a superflare on a solar-type star

Kosuke Namekata^{1,2,3}, Hiroyuki Maehara⁴, Satoshi Honda⁵, Yuta Notsu^{6,7,8}, Soshi Okamoto¹, Jun Takahashi⁵, Masaki Takayama⁵, Tomohito Ohshima⁵, Tomoki Saito⁵, Noriyuki Kato^{5,9}, Miyako Tozuka⁵, Katsuhiko L. Murata¹⁰, Futa Ogawa¹⁰, Masafumi Niwano¹⁰, Ryo Adachi¹⁰, Motoki Oeda¹⁰, Kazuki Shiraishi¹⁰, Keisuke Isogai^{2,11}, Daikichi Seki^{1,2,12}, Takako T. Ishii², Kiyoshi Ichimoto², Daisaku Nogami¹ and Kazunari Shibata^{13,14}

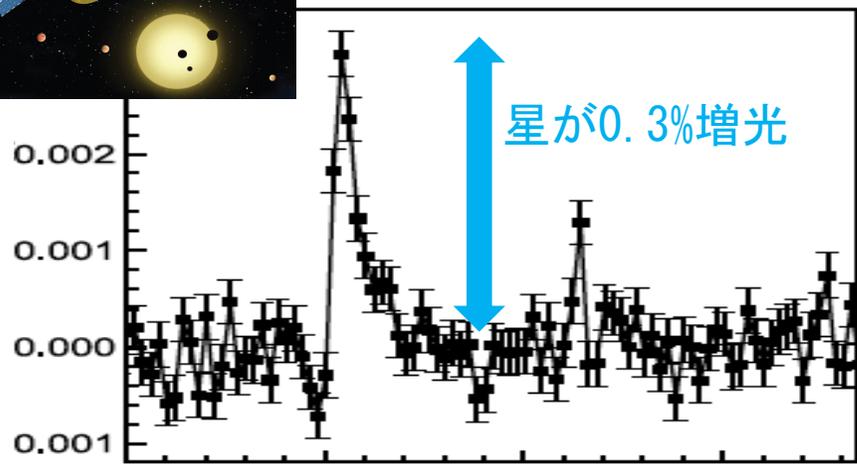
First detection of optical spectra of superflares on Sun-like star



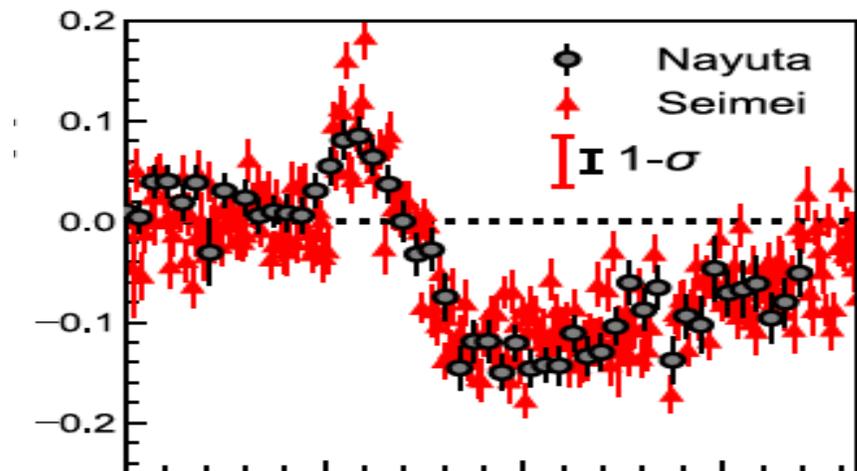
TESS衛星

白色光の明るさ

[星の明るさで規格化]



H α 線の差分等価幅 [Å]



フレア開始からの時間 [分]

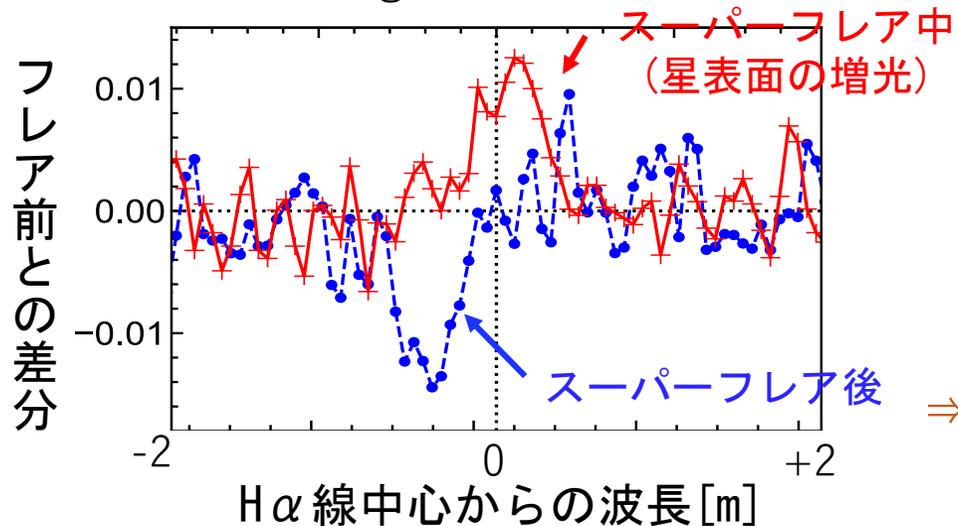
- 太陽型星スーパーフレア (10^{33} erg) の (可視光) 分光観測に世界初成功!
- 増光成分の検出だけでも重要だが、さらに面白いことに、スーパーフレア発生数10分後には H α 線の明るさが元の値より減少

せいめい望遠鏡となゆた望遠鏡で同時に検出



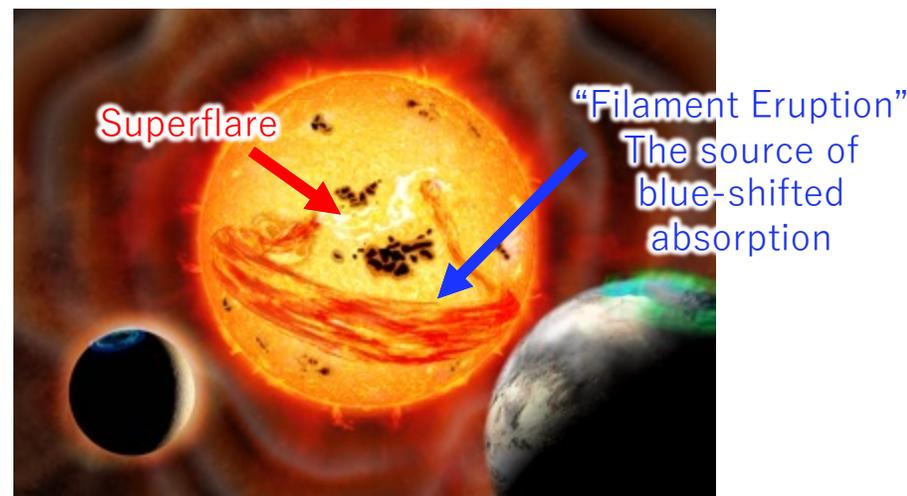
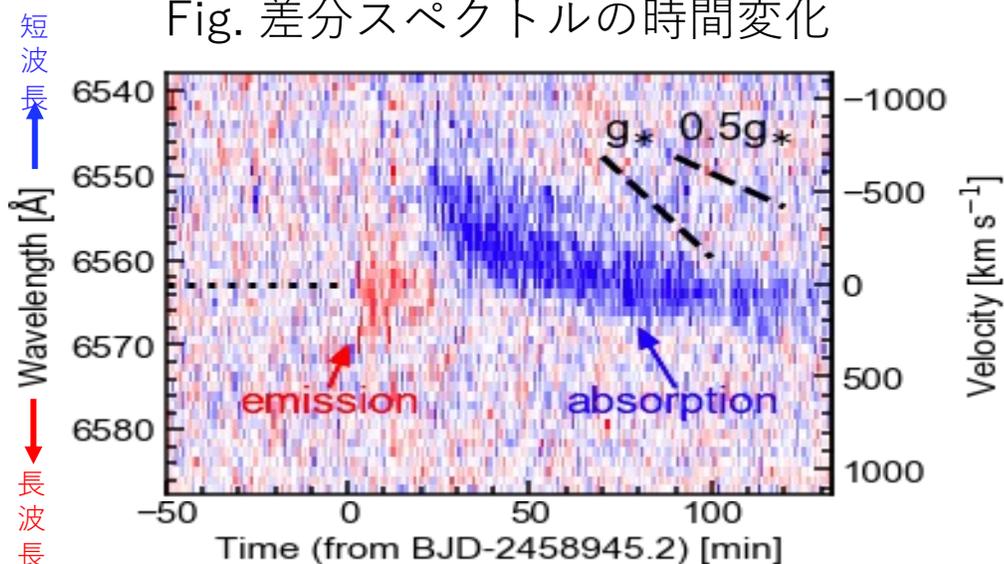
Evidence of Filament Eruptions (inside the disk)

Fig. 差分スペクトル



- H α 線で510 km/sで青方偏移する吸収成分を確認
⇒ 低温物質(10^4 K)がこちらに飛来
 - 徐々に減速：減速率 = EK Draの表面重力
 - 太陽フレアのスペクトル変化と非常に似ている
- ⇒ 星表面から噴出する「フィラメント噴出」(ディスク面内)を検出した証拠の(太陽型星では)初検出！

Fig. 差分スペクトルの時間変化

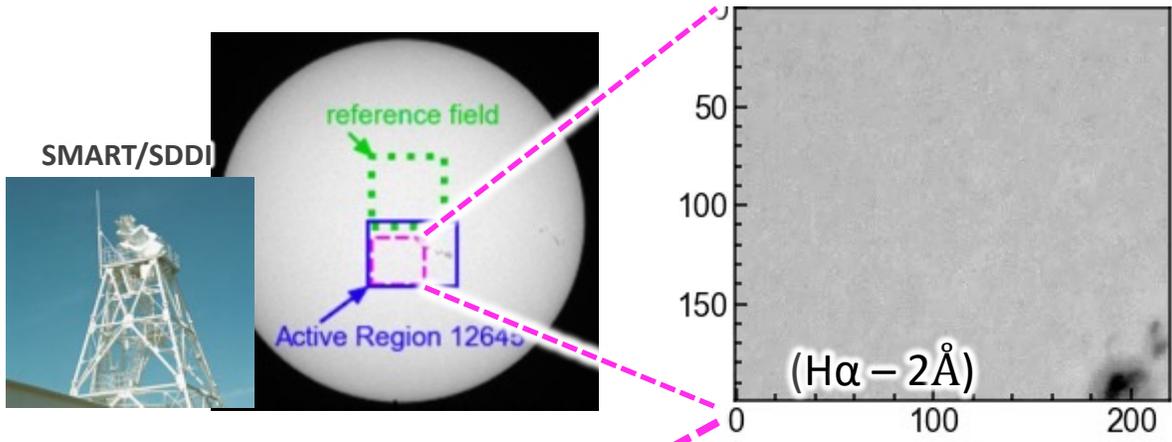


Imaginary picture of our findings (©NAOJ)

Our Sun Tells Us What the Stellar Eruption Looks Like

[Namekata et al. 2022 (2021 online/ADS), Nature Astronomy, 6, 241]

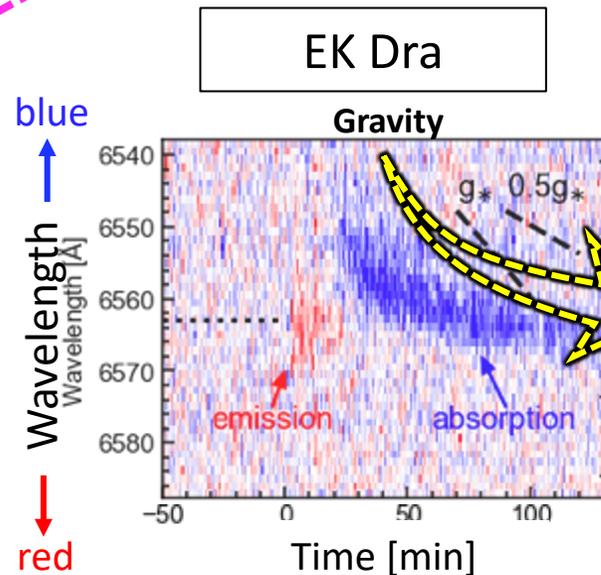
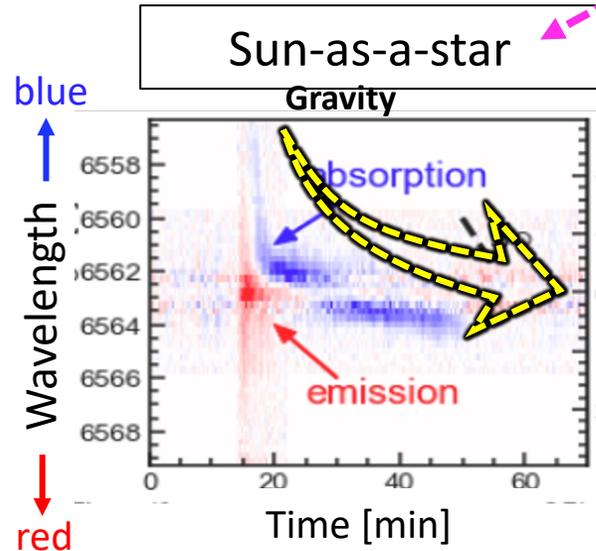
Sun-as-a-star analysis of flares/filament eruptions
C8.0 class solar flare on 2017/4/2 with SMART/SDDI



- What does the stellar eruption look like?
⇒ Sun-as-a-star analysis of H α line for solar eruptive events may give us a hint

- Spectral variation of Sun-as-a-star filament eruptions resembles those in EK Dra
 - ✓ Post-flare H α dimming
 - ✓ Blue-shift velocity change with gravity

[Although it is different in timescale & velocity scale]



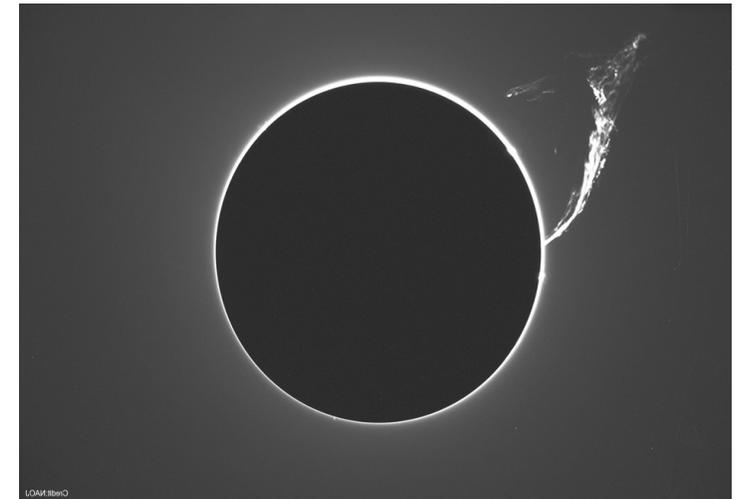
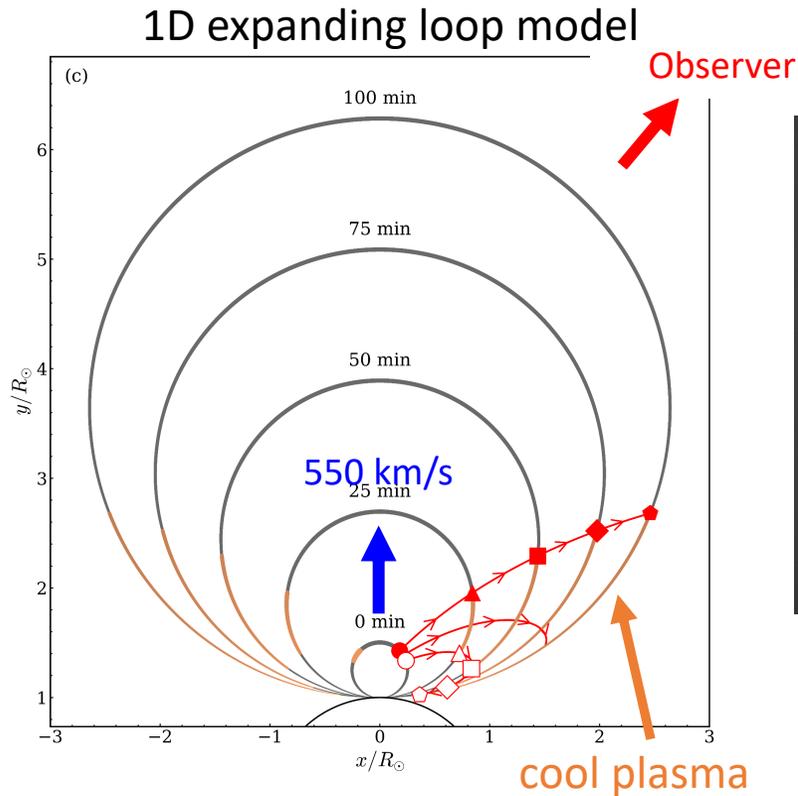
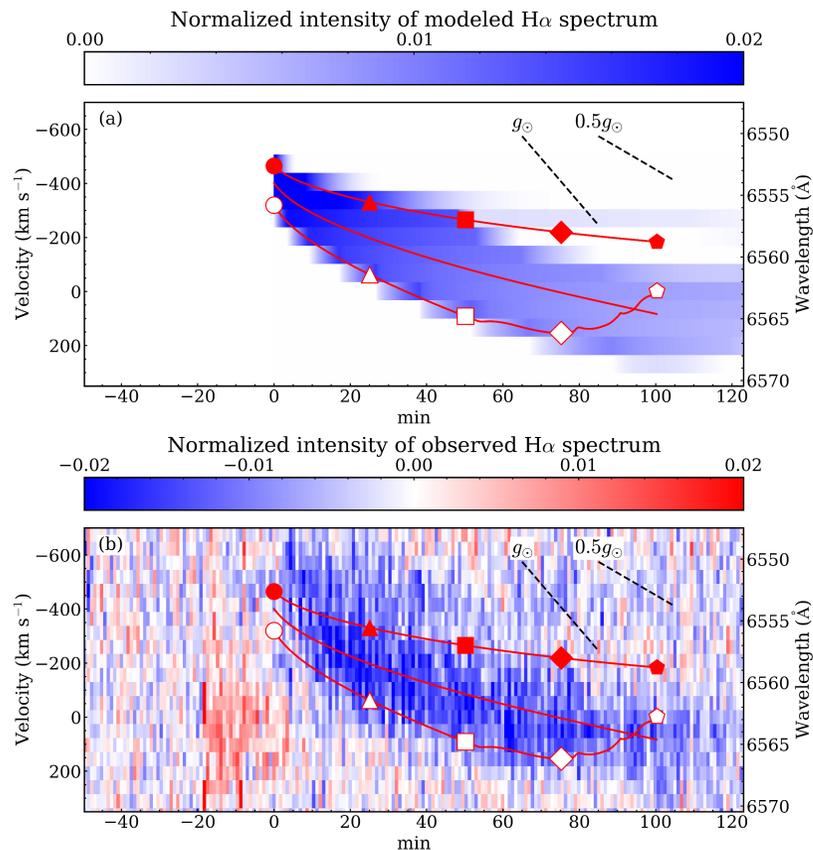
⇒ 検出された巨大恒星フィラメント噴出は、同様の描像で説明できる可能性

Then, did the filament eruptions lead to CME?

[Ikuta & Shibata 2024, ApJ & Namekata+in prep.]

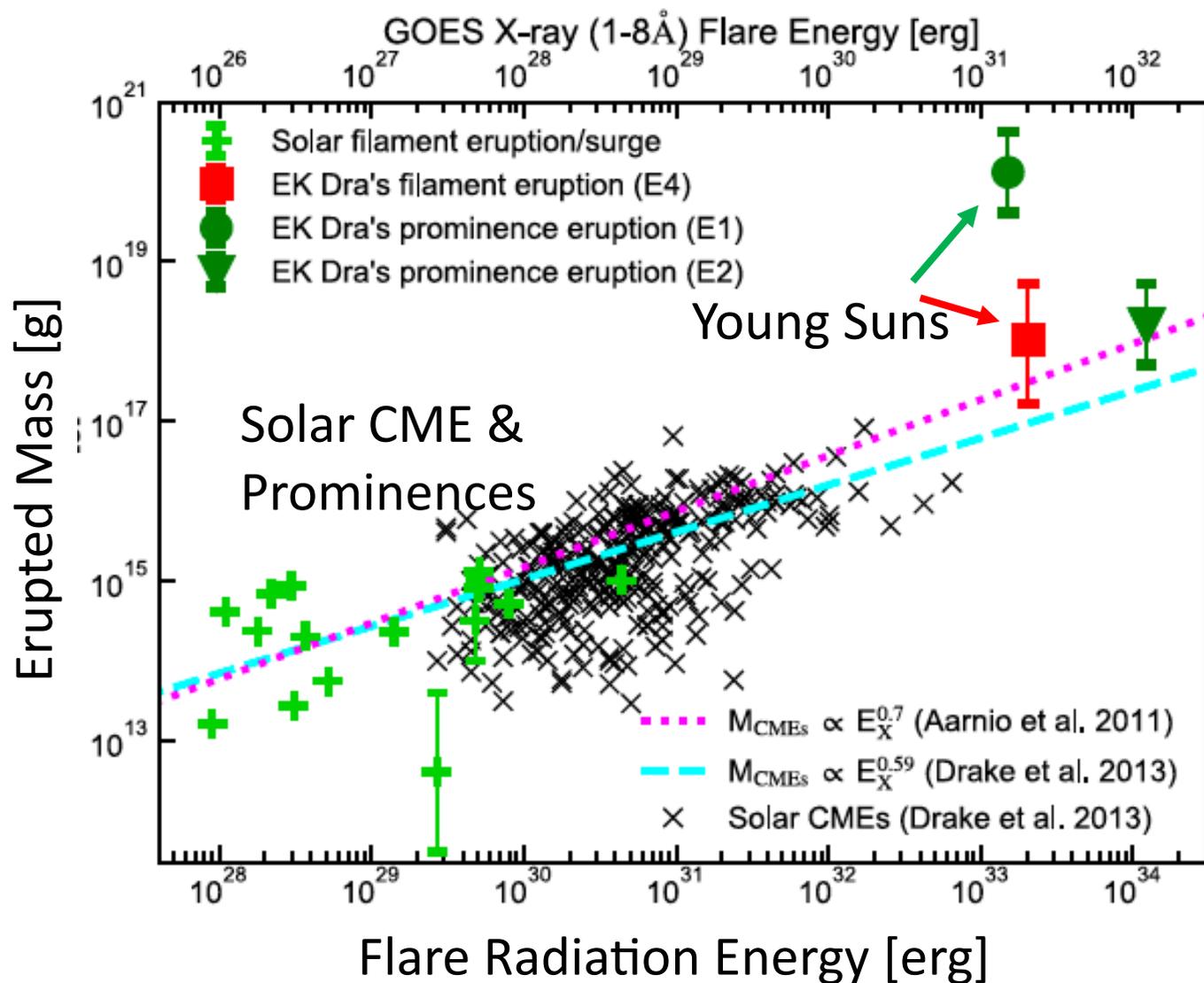
- One dimensional MHD simulation based on solar observations is applied to stellar eruption.
 - The loop top expand at the speed exceeding V_{esc} .

⇒ Suggest this filament eruption eventually become CME



Cf. prominence on the Sun
(©Norikura Observatory, Japan)

10-1000 Times More Massive Than Maximum Solar CMEs



- Solar CMEs = 10^{14-17} g
- CMEs on young Suns = 10^{18-20} g
- フレアエネルギー・CME質量の関係は、概ね恒星フレアまで伸ばすことができる
⇒ **同様の物理機構で説明できる可能性 [cf. Takahashi+16's scaling]**
- 不明点: 1イベントは例外的に質量が大きい - **原因不明**

Short Summary: 太陽型星スーパーフレアの描像

(1) エネルギー蓄積(黒点形成)

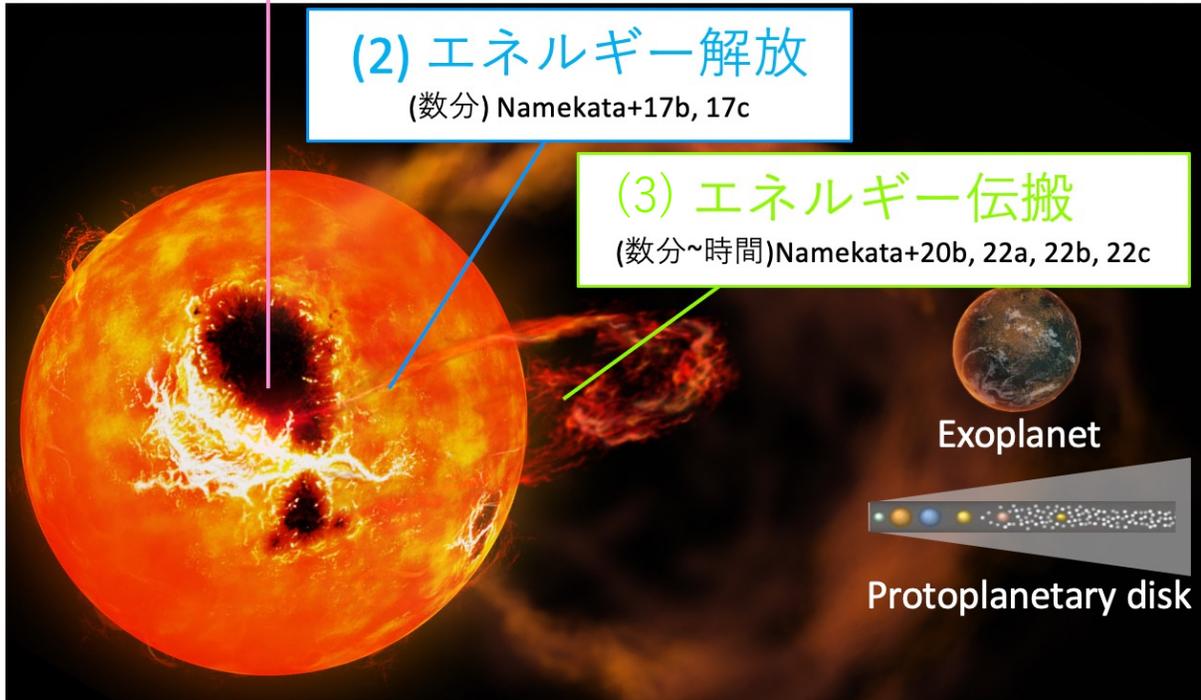
(数日~数ヵ月)Namekata+19, 20a, 23

(2) エネルギー解放

(数分) Namekata+17b, 17c

(3) エネルギー伝搬

(数分~時間)Namekata+20b, 22a, 22b, 22c



From “the Sun” to “Stars”

1. 巨大黒点は生成・消滅も早く内部で生成・対流崩壊する
2. エネルギー解放は磁気リコネクション。ただし強磁場環境
3. 巨大プロミネンス噴出発生。ただしエネルギー分配則には多様性があるかも

Knowledge Transfer from “Stars” to “the Sun”

- ・これらの知識は、将来的に太陽がスーパーアクティブになった時、**太陽での極端宇宙天気現象を予想する羅針盤**になる。

“Solar and Stellar Connection”のススメ

太陽・恒星を繋ぐだけでフロンティア研究になる。

- **ススメ 一： 「他分野のデータは怖くない！」と知る。**
太陽のデータ・恒星のデータも、解析は恐るるに足らず！特にSolar-Stellar Connectionと言った時、難しいことはしない。意外と簡単。
- **ススメ 二： 他分野と交流を増やす。**
「興味はあるが、余裕がない、アイデアがない」という人が多いと思う。まずは、他分野や専門家との雑談を増やす。(負担にならない範囲で)単一コミュニティに閉じこもらない(=特に太陽)。アイデアはいずれ降ってくる。
- **ススメ 三： 自分のバックグラウンドを活かす。**
(向いている人： 新しいデータを触るのが好きな人)

2年に1回 「Stellar magnetic activity workshop」 開催

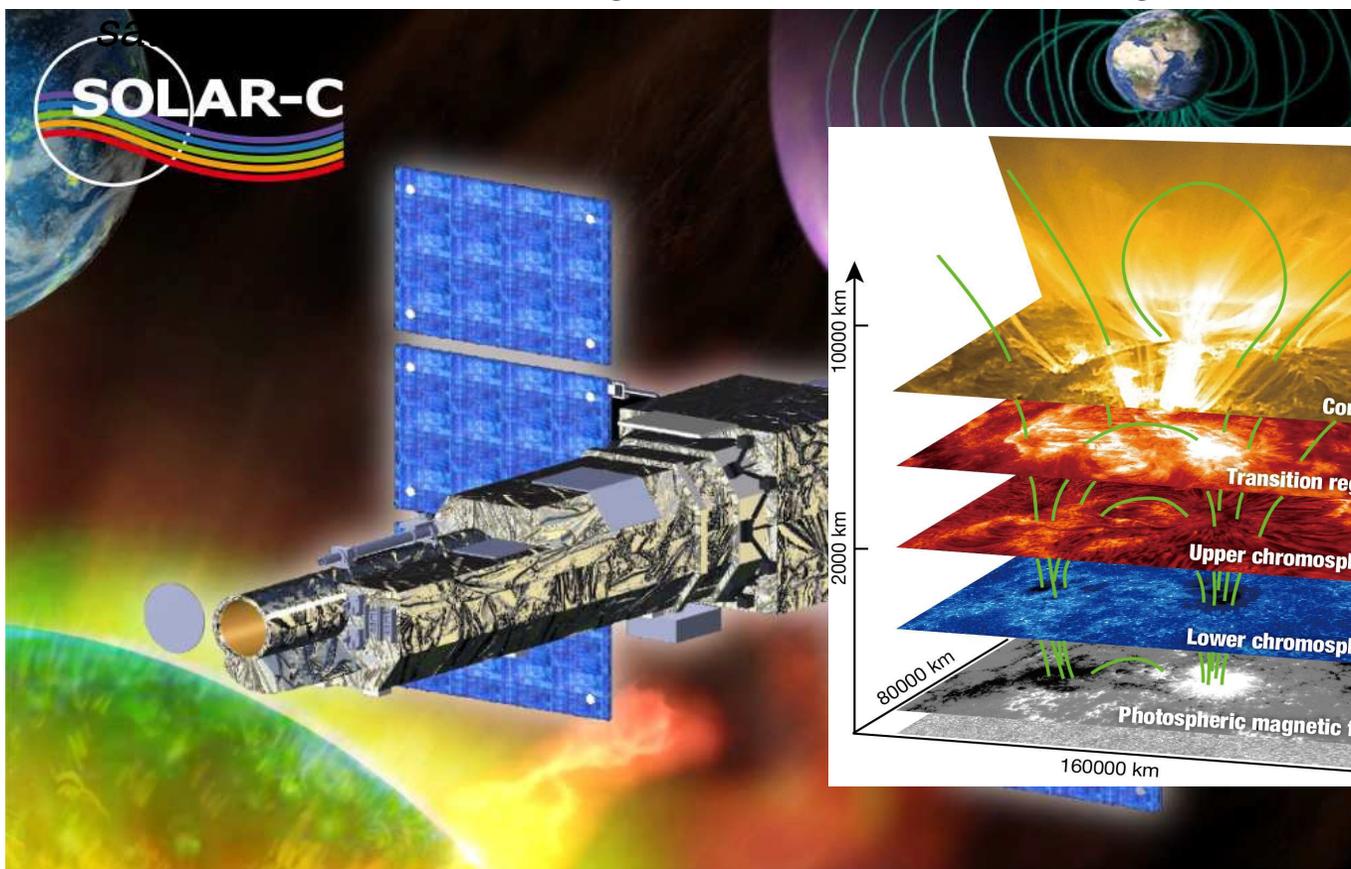


今年の研究会の報告は天文月報8月号に掲載 <https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/2024/entry958.html>

将来展望: 今後10-20年は紫外線がアツい!

- 太陽・恒星の両分野で**紫外線**衛星が日本から!
- 目的: (太陽)コロナ加熱の解明・(恒星)系外惑星の大気調査
⇒ データは共通、合わせたら面白い事できそう!

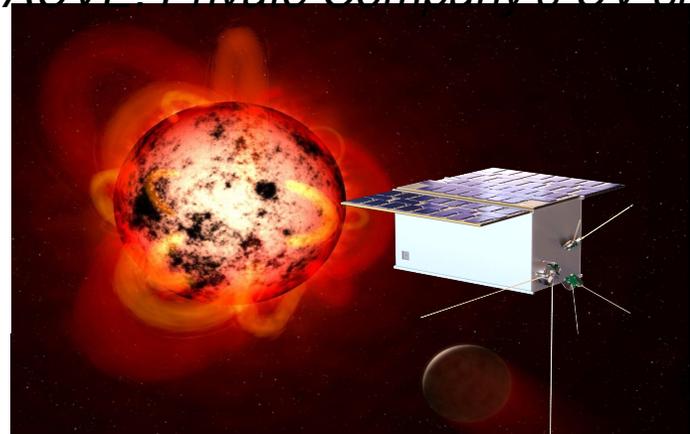
SOLAR-C: JAXA's next-generation solar-observing



LAPYUTA: JAXA's NG stellar satellite



MAUIVE: Private Company's UV smallsat



2030s 「LAPYUTA」: 恒星・系外惑星系の紫外線観測

LAPYUTA mission

(Life-environmentology, Astronomy,
and Planetary Ultraviolet Telescope)

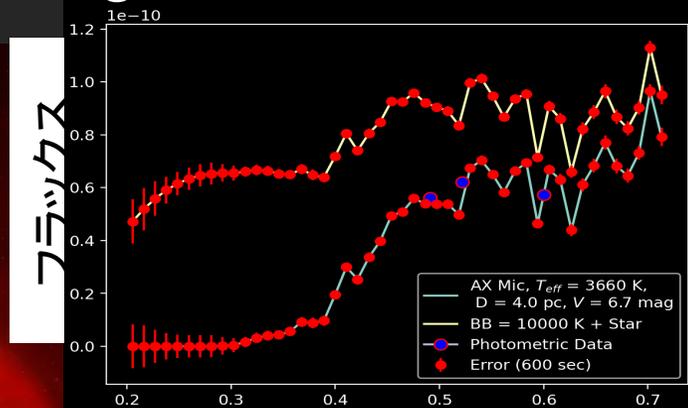
- Selected to JAXA M-class mission candidate
(Target launch year: ~2032)
- FUV spectroscopy with 60cm telescope
- Spectral range : 110-190 nm
- Spectral resolution : 0.02 nm & 0.003 nm
- Sensitivity equivalent to HST

2030年代のLAPYUTAで、FUVで恒星フレア、
CME、系外惑星大気の研究が同時にできる!



2025年 超小型紫外線衛星「MAUVE」

Fig. 恒星フレアスペクトル

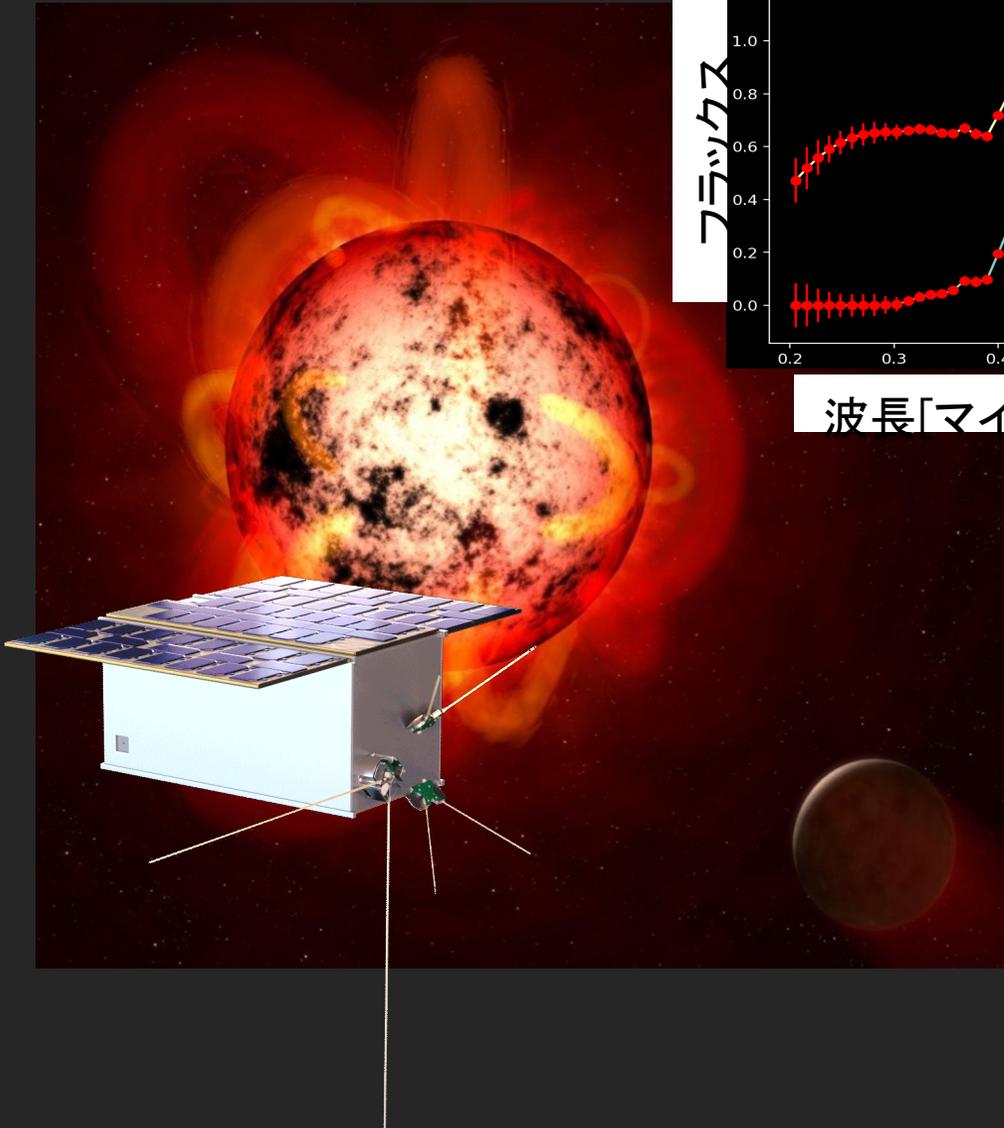


民間企業の超小型衛星

- 2025年4月打上
- 恒星の長期観測に特化した
- 200-700ナノメートルの分光
- 研究者単位が格安で参入可能

¹民間企業Blue Skies Space社:「天文学を営利事業」にするロンドンの宇宙関連スタートアップ

- 紫外線から可視光で恒星フレアを多数検出し、放射機構解明 & 「系外惑星の宇宙天気予報」を目指す
- 2030sのLAPYUTAに向け準備を!!



2040s...



Habitable Worlds
OBSERVATORY

Summary

- **研究背景: 太陽・恒星フレアが面白い!**

太陽は色々な分野の軸となり、恒星、系外惑星、原始惑星系円盤、生命誕生、人類社会にまで広がる。

- **恒星スーパーフレア研究: 太陽を理解し恒星を知る。恒星を理解し太陽を知る。**

太陽・恒星を繋げばフロンティア。興味あればやってみよう!!

- **将来展望: 今後10-20年は紫外線がアツい**

