

2018/2/6 10:00-10:25@京都大
「KOOLS-IFU研究会」

3.8m望遠鏡・KOOLS-IFUを用いた 恒星フレア研究

野津 湧太

(京都大学 宇宙物理学教室 D2)

前原裕之, 行方宏介, 幾田佳, 野津翔太,
野上大作, 柴田一成 (京都大学), 本田敏志(兵庫県立大学)

Outline

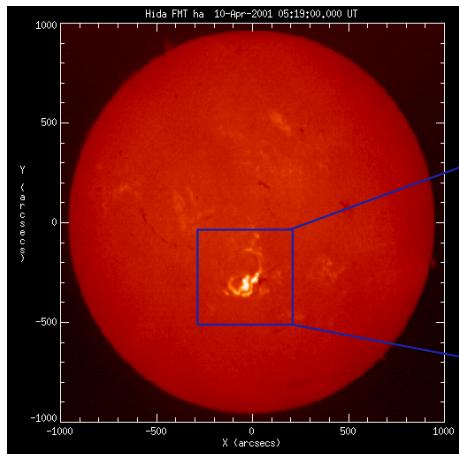
～3.8m望遠鏡・KOOLS-IFUを用いた 恒星フレア研究～

- **これまでのスーパーフレア研究**
- 京大3.8m望遠鏡で目指しているサイエンス(全体像)
- KOOL-IFUで取り組むサイエンス(詳細)

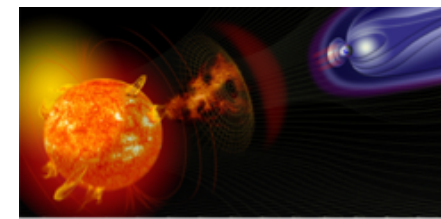
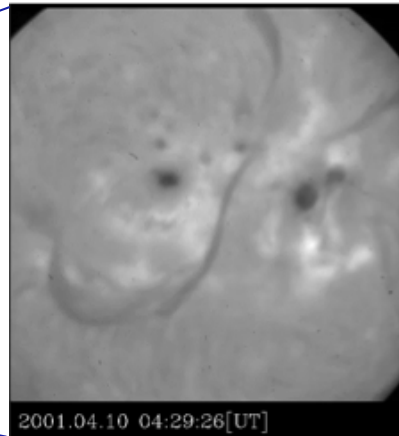
太陽フレア

○太陽大気(コロナ)中で起こる爆発現象

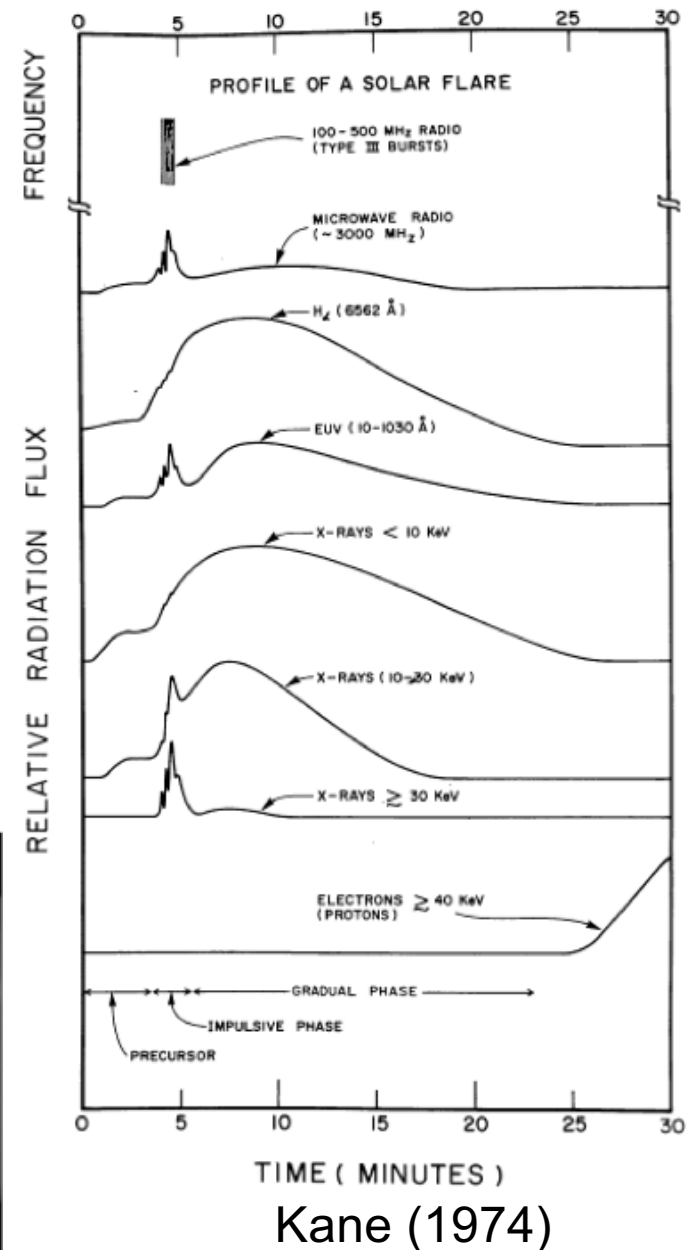
- 黒点付近に蓄えられた磁場のエネルギーが、熱や運動、放射のエネルギーへ突発的に変換される過程
- 様々な波長での増光
(電波、可視、紫外線、X線)
- 数分～数時間
- フレアに伴う放射線・プラズマ噴出
⇒地球・社会へも大きな影響
(磁気嵐・通信障害・宇宙飛行士被曝など)



飛騨天文台
Ha観測→



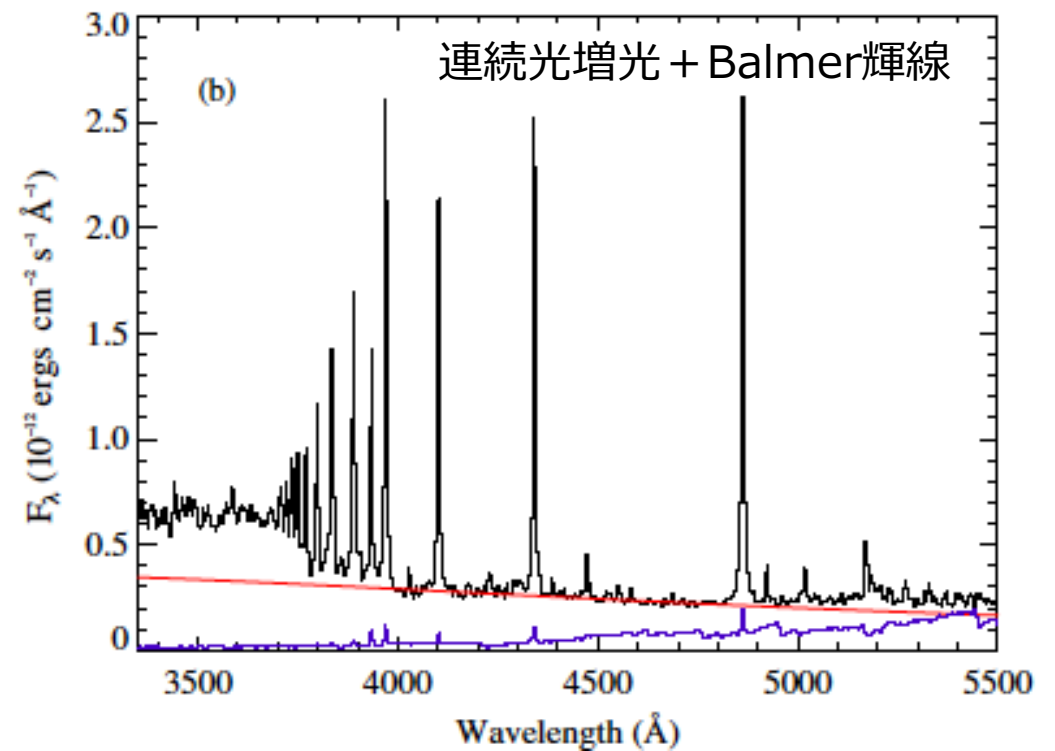
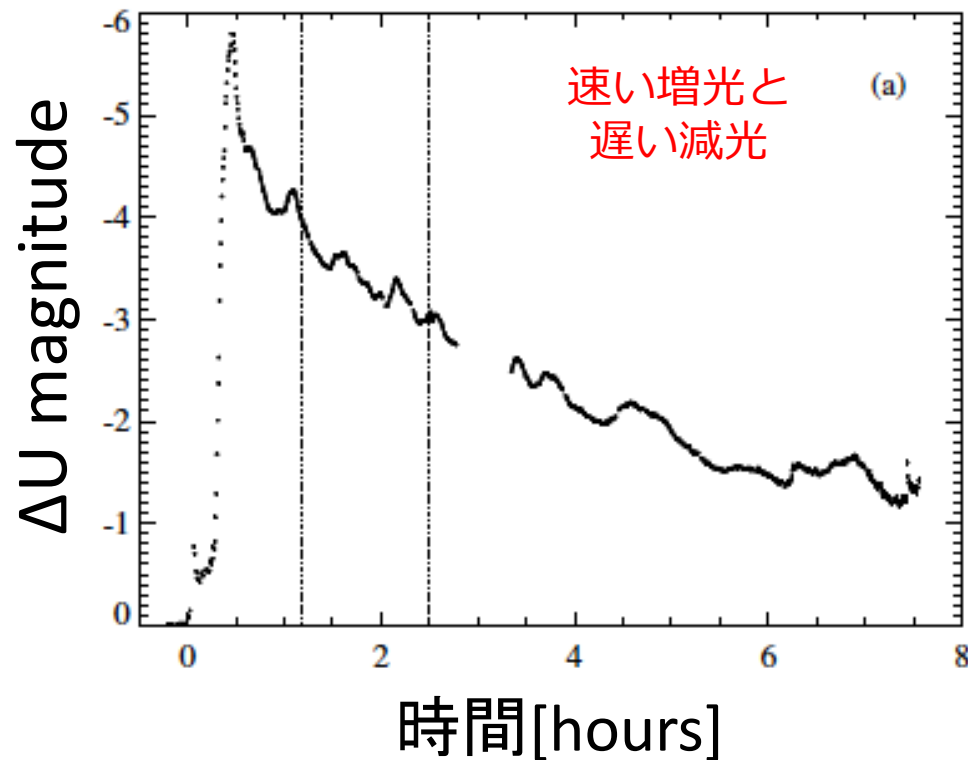
©NASA



恒星フレア

○星の明るさが短時間だけ突発的に増光する現象

- 可視連続光やH α 輝線、UV・X線などでも、増光
- 従来はM型星(増光割合が大きい)や原始星(フレア発生頻度高い)がよく研究されてきた

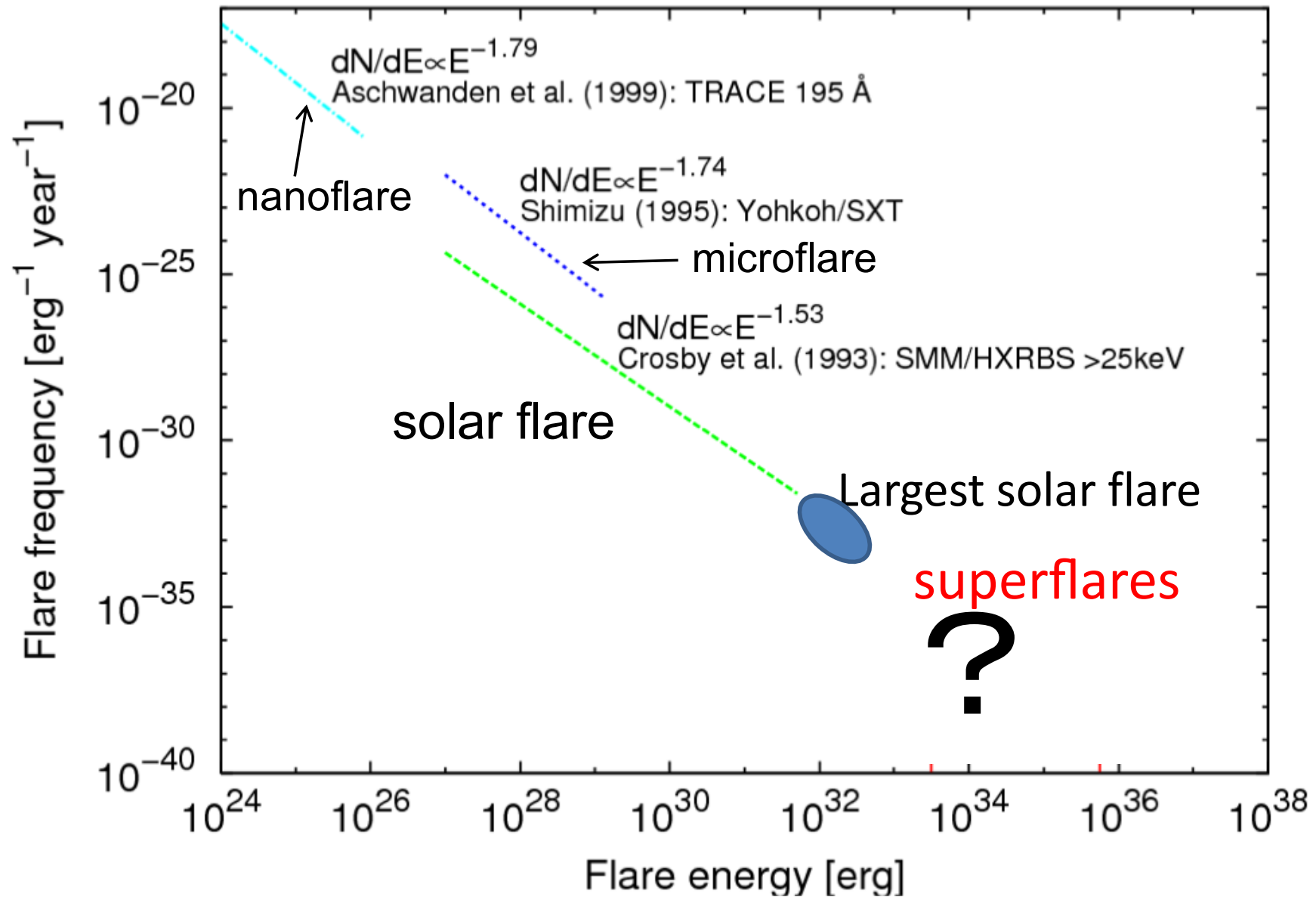


赤線: 10,000K黒体放射

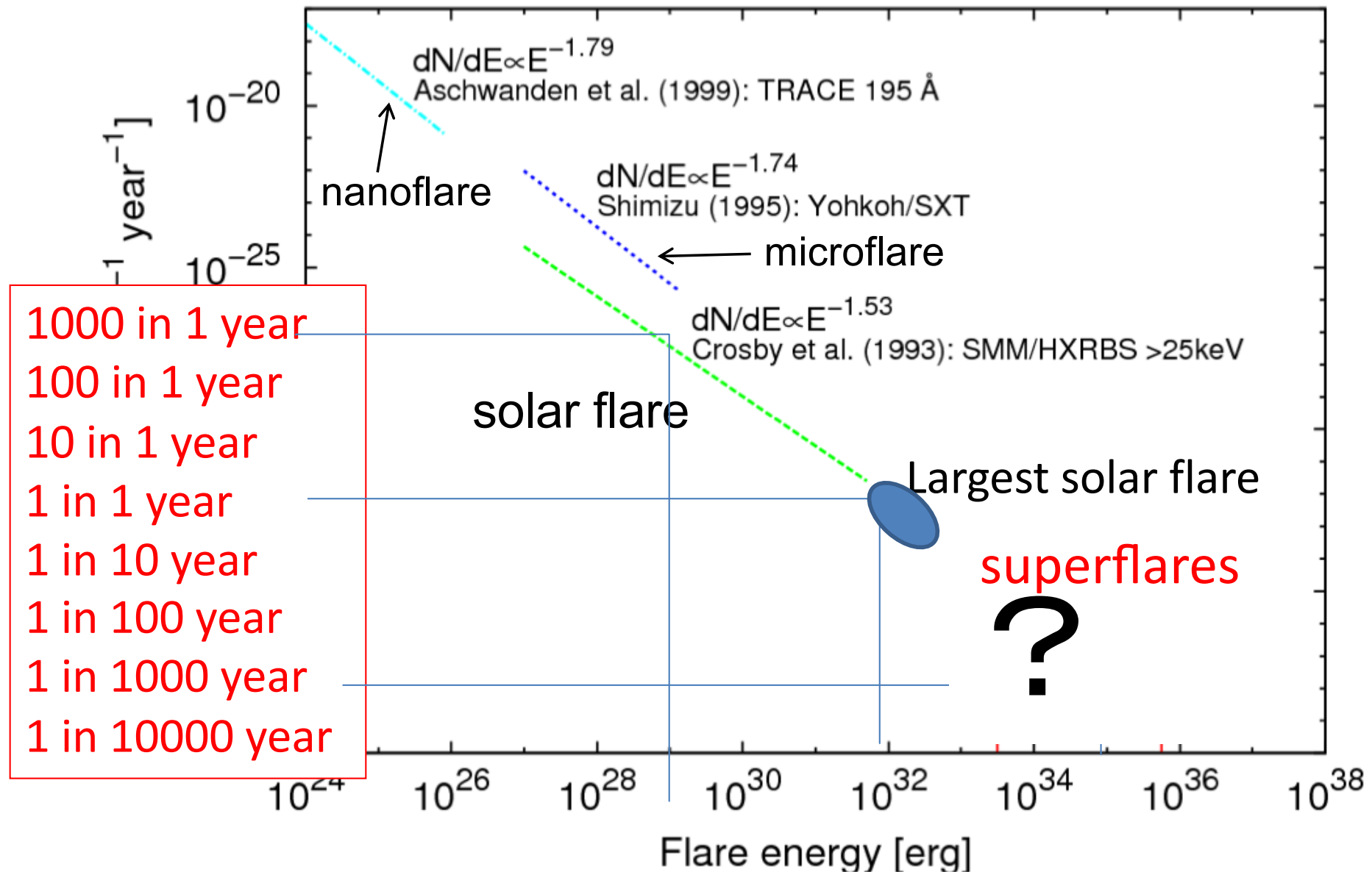
紫線: 静穏期スペクトル

図: dM4.5e星YZ CMiでのフレア(Kowalski+2010)

太陽フレアは、大きなエネルギーを持つフレアほど、発生頻度が低い（ベキ分布）



太陽フレアは、大きなエネルギーを持つフレアほど、発生頻度が低い（ベキ分布）



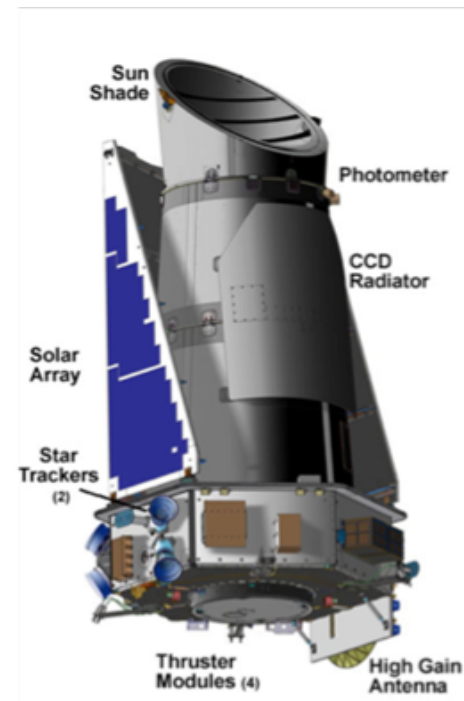
ケプラー衛星

- ・ 太陽系外惑星を観測するためにNASAが開発・運用
 - ・ 2009年～2013年：4年間の継続観測
 - ・ 口径95cmの望遠鏡で約16万個の星の明るさを精密に測定

フレアによって星がわずかに
明るくなる現象を、
ケプラー衛星データから探索

太陽型星(G型主系列星)9万星
時間分解能30分(long cadence)

太陽型星1400星
時間分解能1分(short cadence)

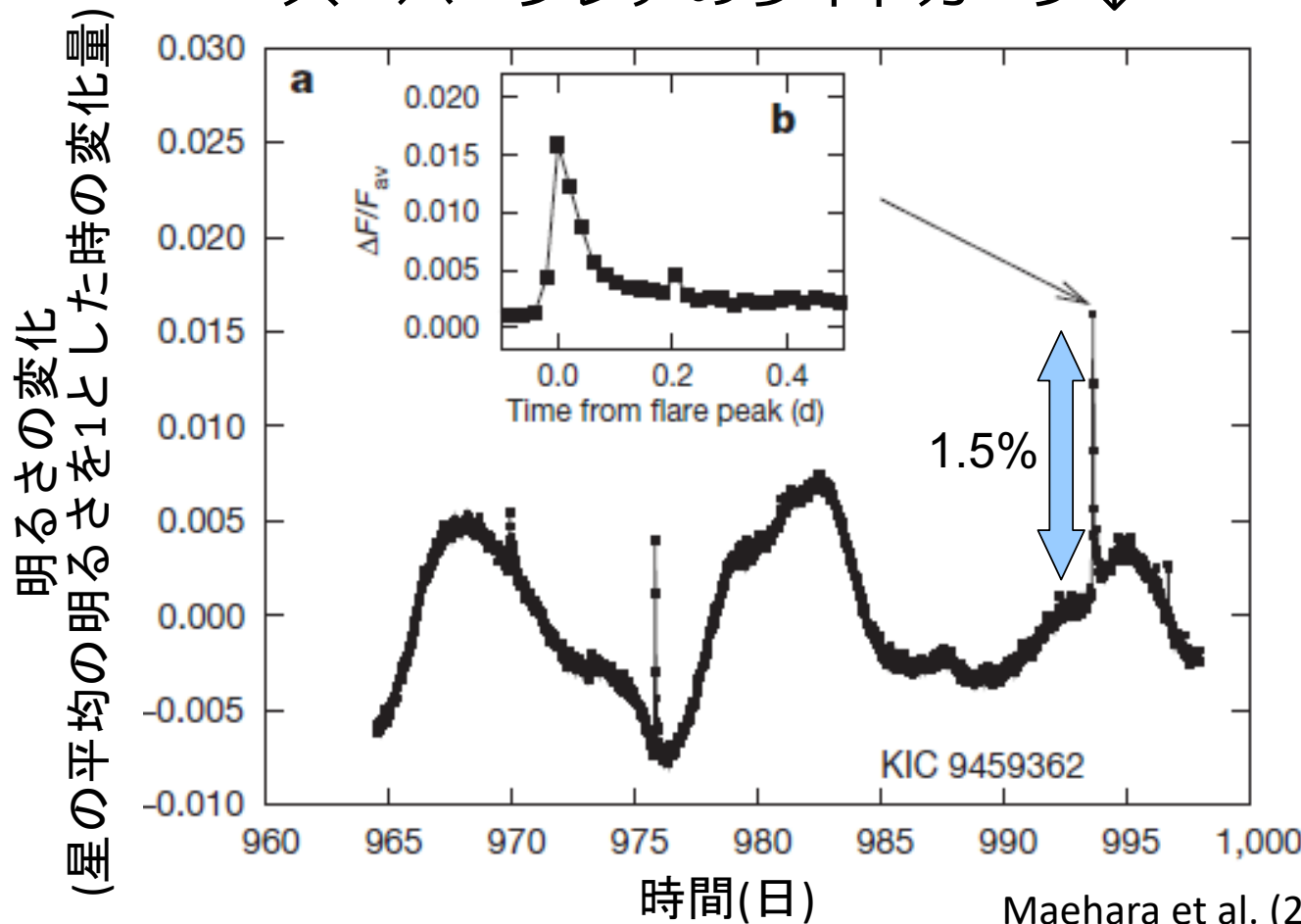


太陽型星におけるスーパーフレアの発見

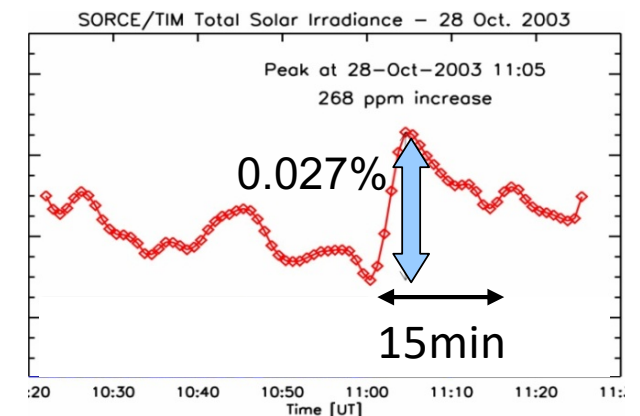
太陽型星(G型主系列星)において、
スーパーフレア($10^{33} - 10^{36}$ erg : 最大級の太陽フレアの
10~1万倍)を多数(1000例以上)発見。

(Maehara et al. 2012 Nature,
Shibayama et al. 2013 ApJS
Maehara et al. 2015 EPS)

スーパーフレアのライトカーブ↓

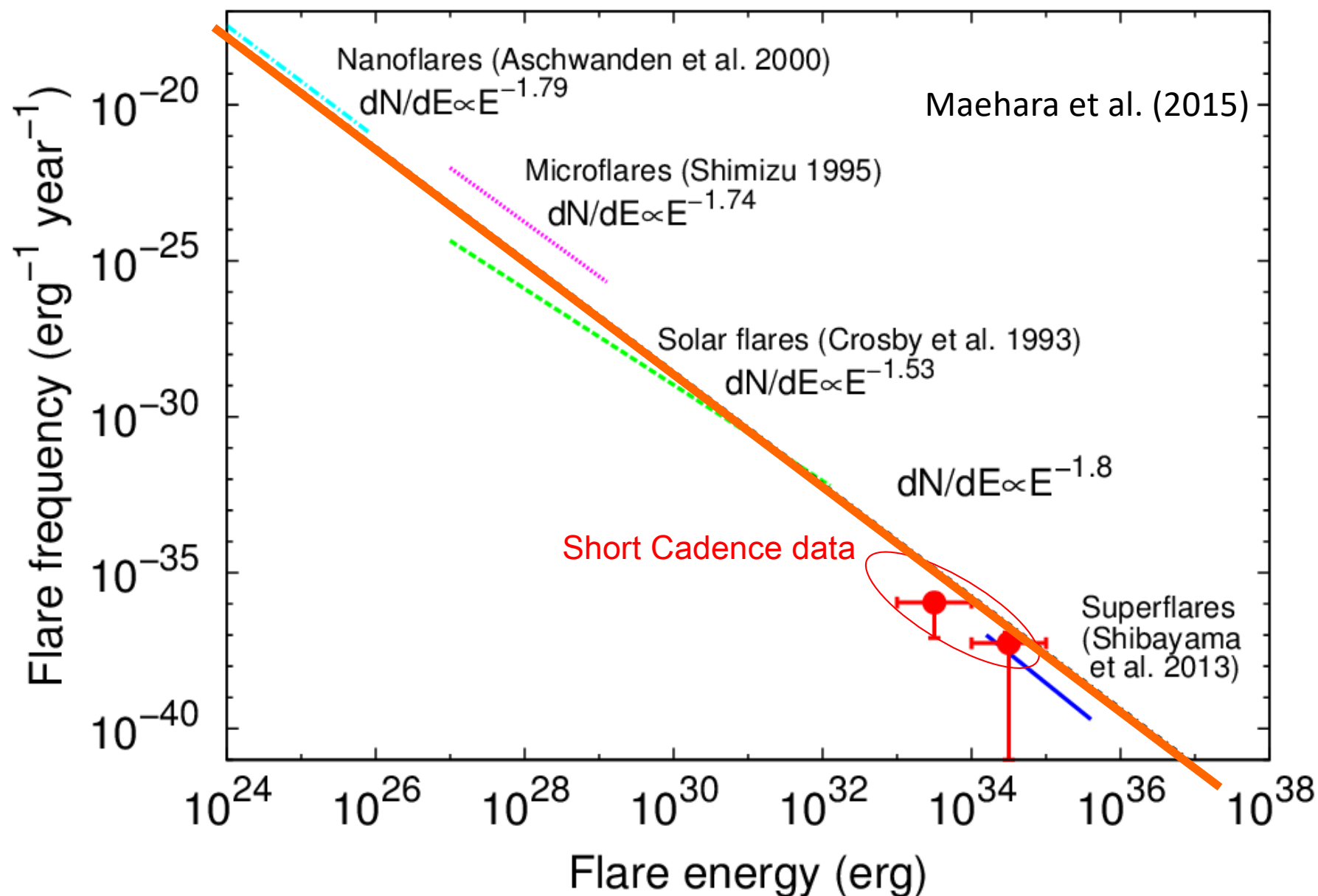


比較的大きな太陽フレア
による太陽全体の明るさ
変化の例 (可視光) ↓

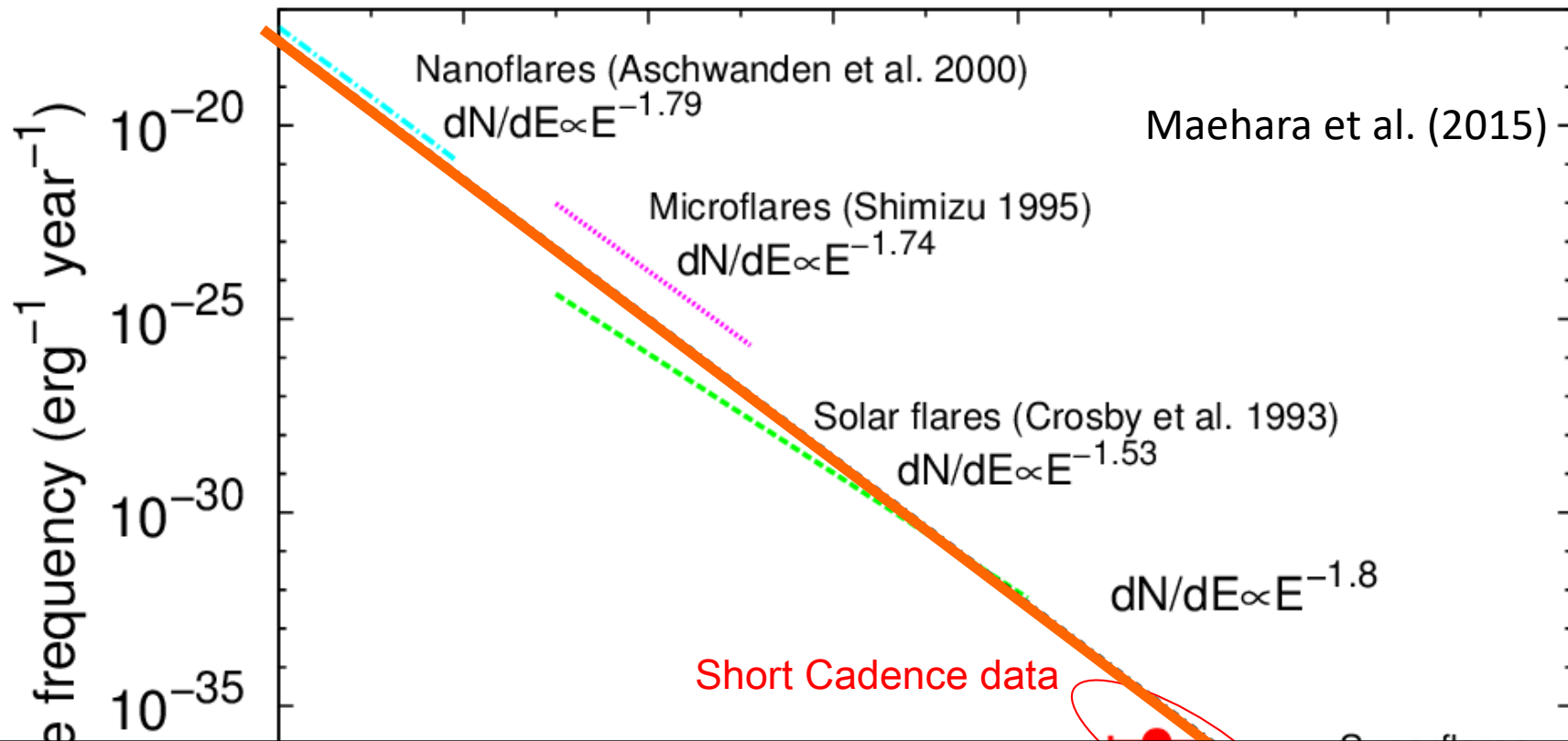


Kopp et al. (2005)

スーパーフレア発生頻度分布は、 太陽フレアの分布とconsistent



スーパーフレア発生頻度分布は、 太陽フレアの分布とconsistent



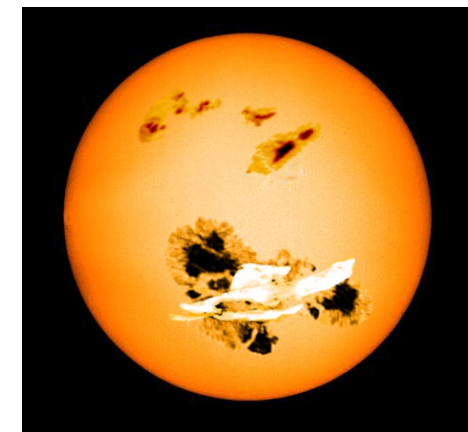
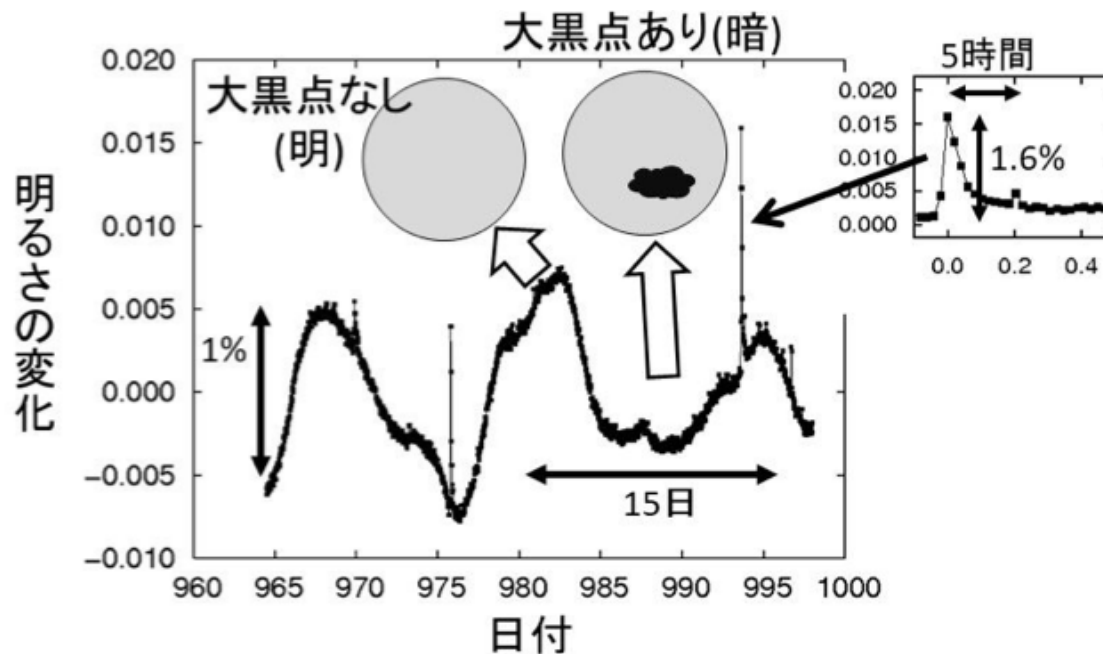
太陽でも数千年に1回の頻度で、
スーパーフレア発生！？

Flare energy (erg)

スーパーフレアと巨大黒点

- ・ 準周期的な明るさ変動
 - 自転周期と黒点サイズの間接的推定
 - すばる望遠鏡HDS等での分光観測で概ね確認(Notsu+2015a&b 他)
- ⇒ **スーパーフレア星が巨大黒点を持つ**ことが確かになってきた。

自転が遅くても、巨大黒点を持ち
スーパーフレアを起こす星が多数存在！！



スーパーフレア星想像図

これまでの研究まとめ：スーパーフレアの発見



若い星	太陽(誕生後46億年)
自転が速い (周期 2～3 日)	自転が遅い (周期約25日)
スーパーフレア が頻発	スーパーフレアは 起こらない (はず)

*スーパーフレア…太陽で起きる最大級フレアの
10～1万倍のエネルギーを持つフレア

フレア噴出現象により**地球に影響**

Maehara et al. (2012), Nature 他 (京大グループから論文13編)
太陽型星におけるスーパーフレアを大量発見(1000例以上)

常識を覆す発見

スーパーフレアは太陽でも起こり得るのでは？

Outline

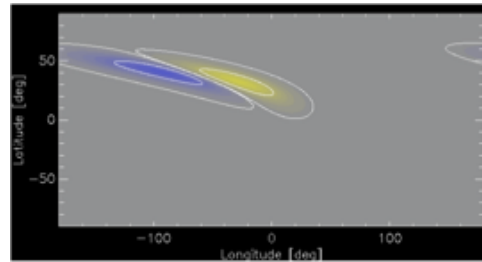
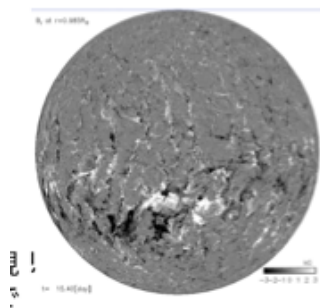
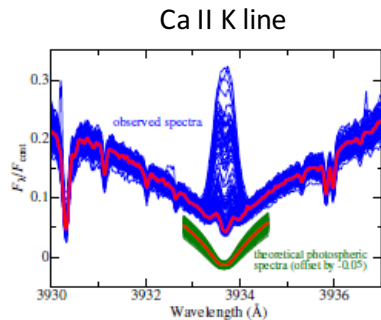
～3.8m望遠鏡・KOOLS-IFUを用いた 恒星フレア研究～

- これまでのスーパーフレア研究
- **京大3.8m望遠鏡で目指すサイエンス(全体像)**
- KOOLS-IFUで取り組むサイエンス(詳細)

スーパーフレア研究の残された課題

①スーパーフレア発生のメカニズム

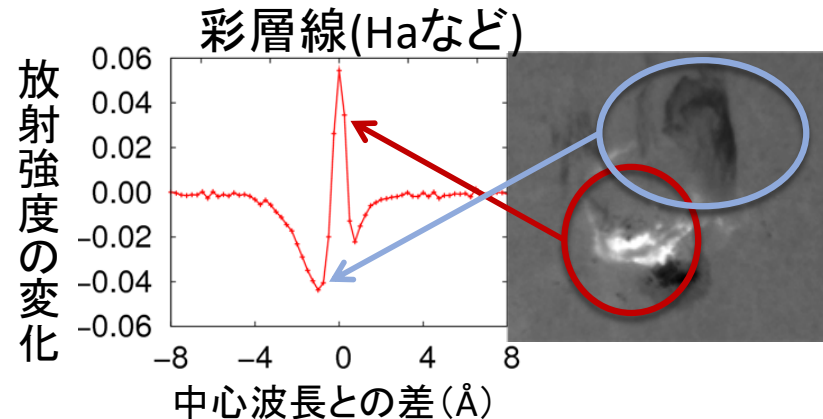
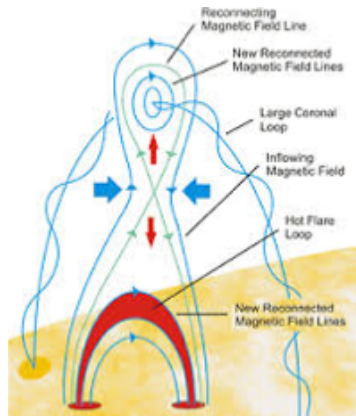
(特に**黒点の生成・消滅過程**)の解明 (高分散分光)



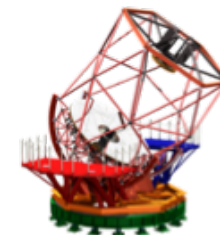
彩層線(Ca II 線, H α 線など)の
高分散モニタ観測

→ 黒点の生成・消滅過程を追跡
理論計算と比較

②スーパーフレアに伴う**彩層放射**・**噴出現象**の観測(KOOLS, 高分散分光)



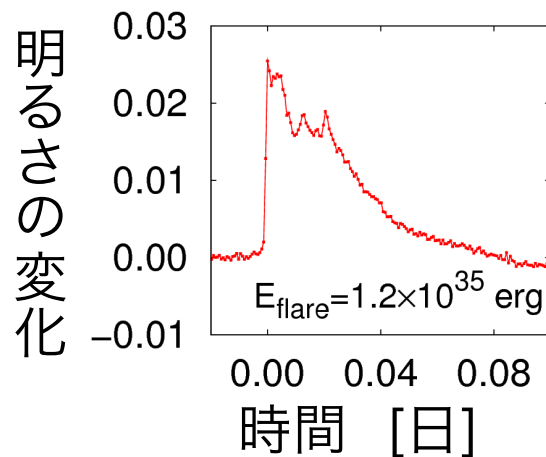
3.8m望遠鏡+分光観測での**モニター観測**で、
この2点に迫りたい。



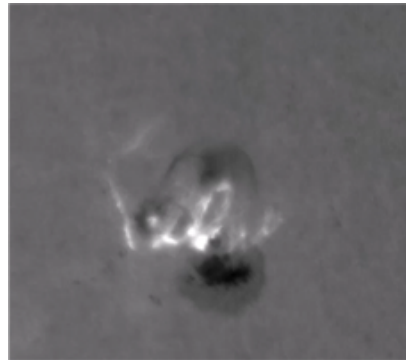
スーパーフレアに伴う彩層放射・噴出現象の観測

太陽フレア(1859年発見)においては、20世紀前半に分光観測が行われ、初めて物理的特性が明らかに

フレアの光度曲線

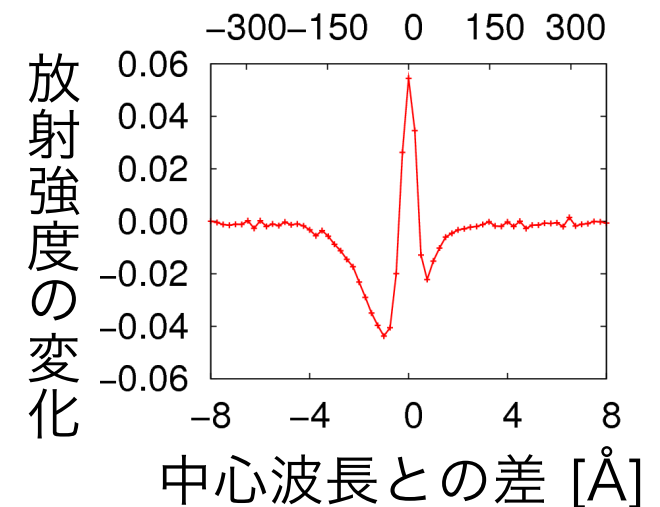


プラズマ噴出



太陽フレアの例

分光データ 速度 [km/s]



スーパーフレアそのものの分光データを取得
(太陽型星では世界初)

➡ **太陽フレアと同様の物理的特性を持つのかどうか**
を明らかにする

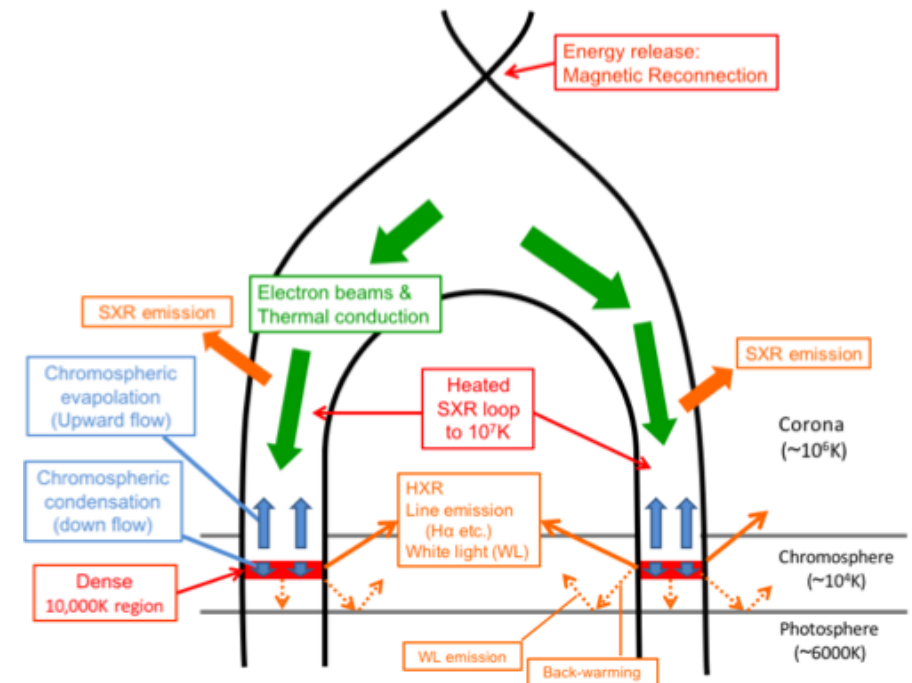
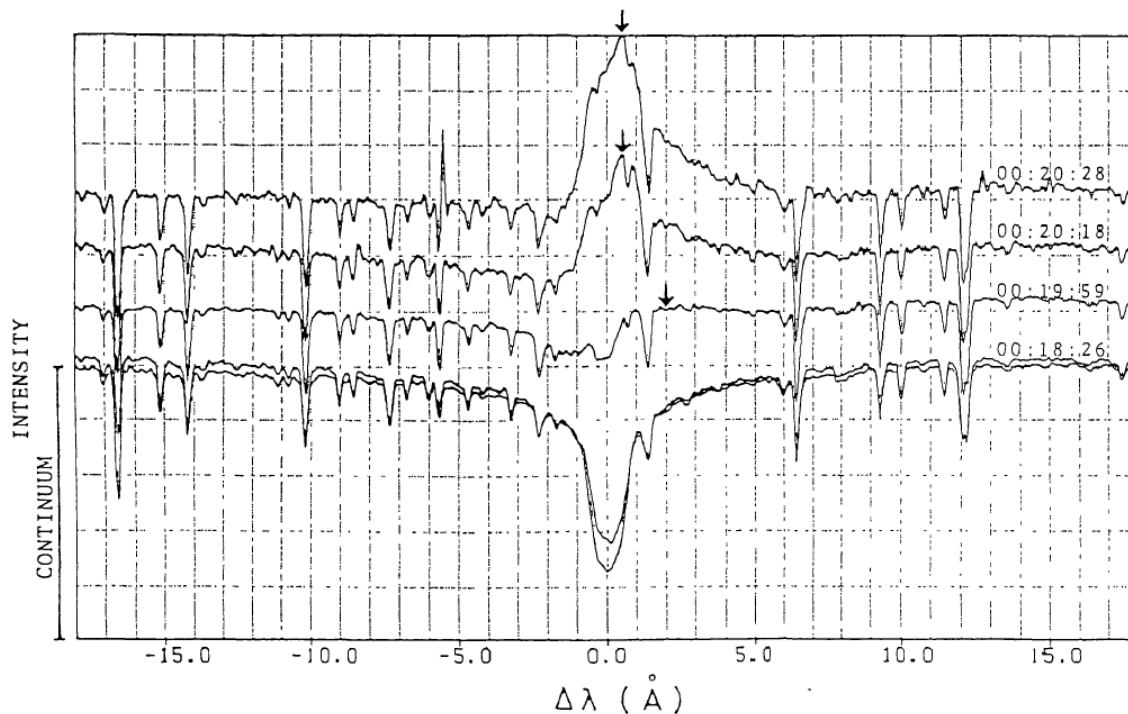
スーパーフレアに伴う彩層放射・噴出現象の観測

彩層輝線(主に水素Balmer線)の時間変化
ー下降流(上昇流?)
ープラズマ噴出



- ・スーパーフレアは、太陽フレアと同じ物理的特性を持つのか？
- ・質量放出-->系外惑星への影響

太陽フレアのH α 線観測例: Ichimoto & Kurokawa (1984)
フレア中のprofileにRedshiftが見られる



スーパーフレアに伴う彩層放射・噴出現象の観測

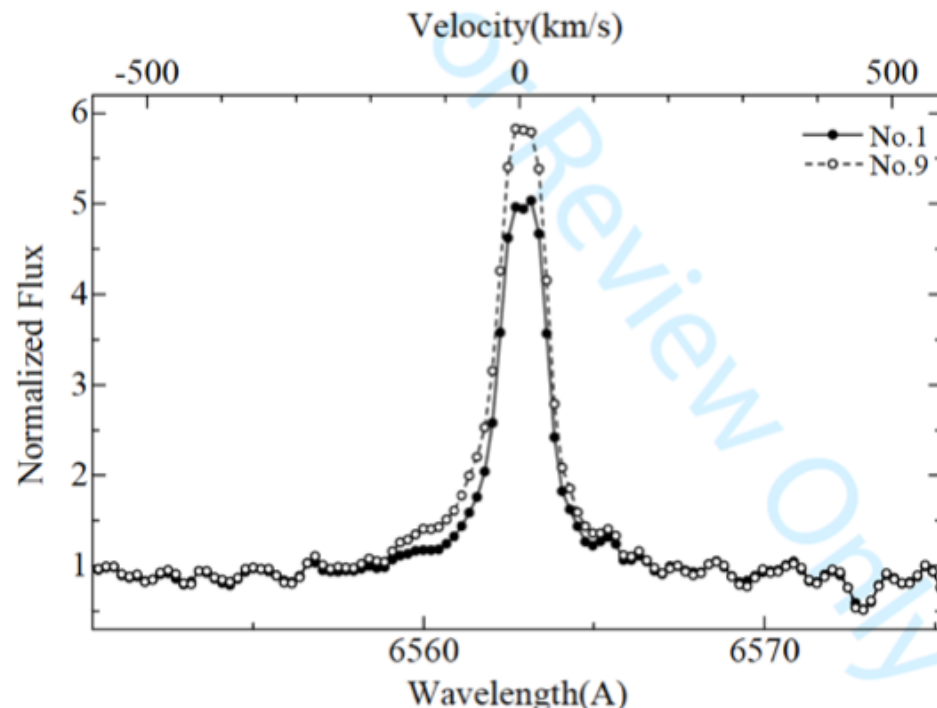
M型星スーパーフレアのH α 線観測例 ($R=\lambda/\Delta\lambda\sim 10,000$)
at 西はりま天文台(Honda+2018 submitted to PASJ)

フレア中のprofileにBlue shiftが見られる

→ 一般的な太陽フレアとは逆だが、
普遍的な現象なのかどうか？

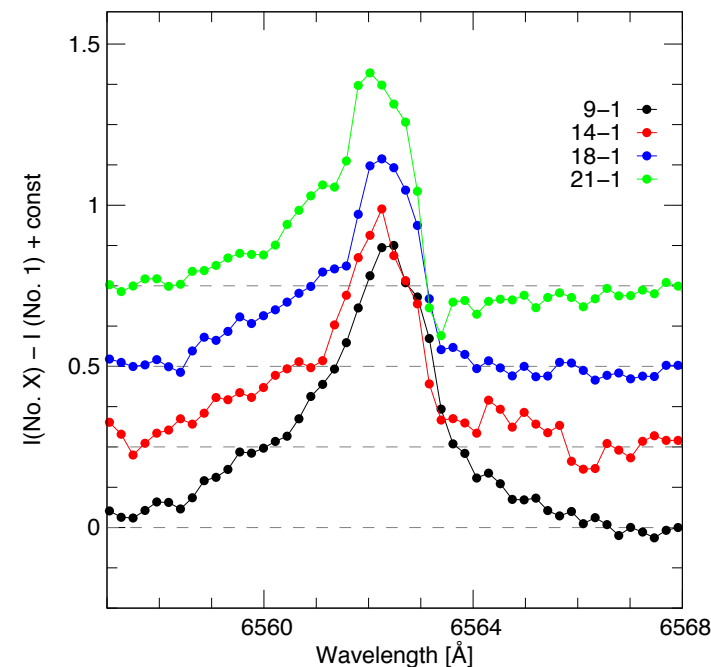
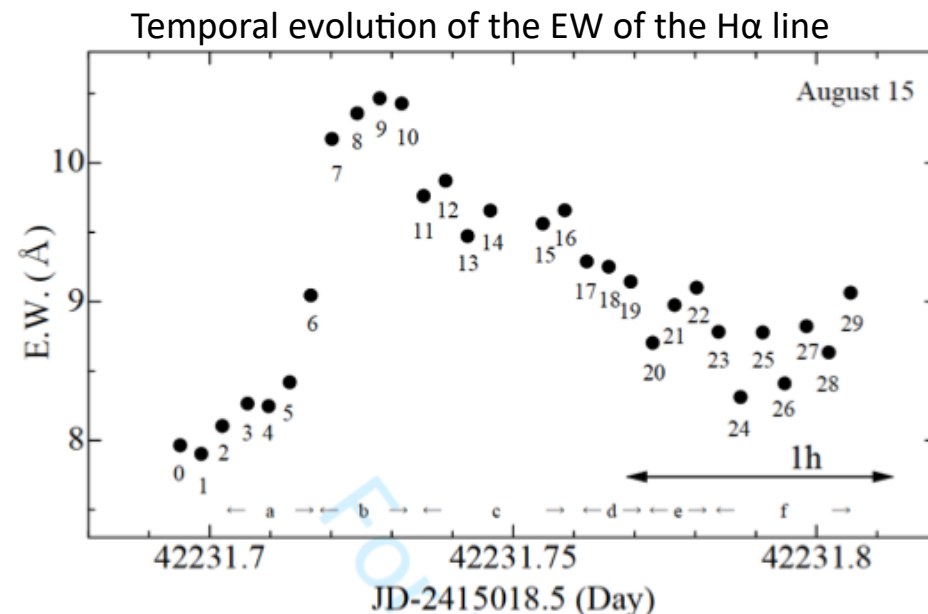
G,K型星のスーパーフレアでは？

→ 星のフレア分光観測例は非常に少ないので、
検証が必須



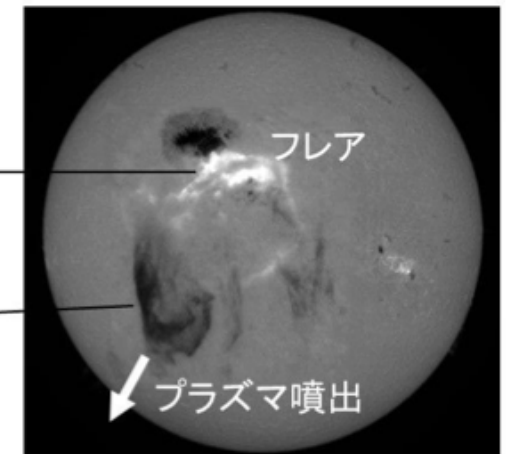
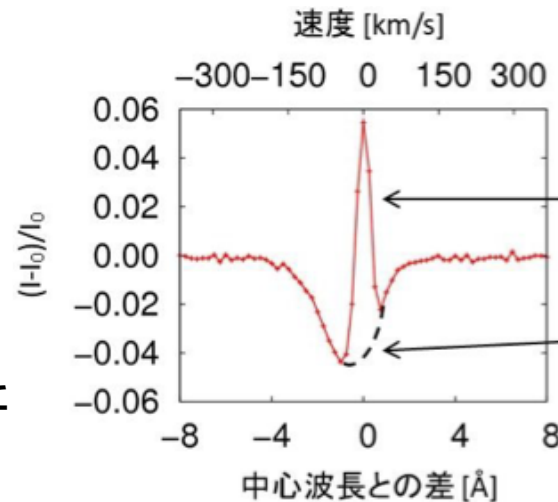
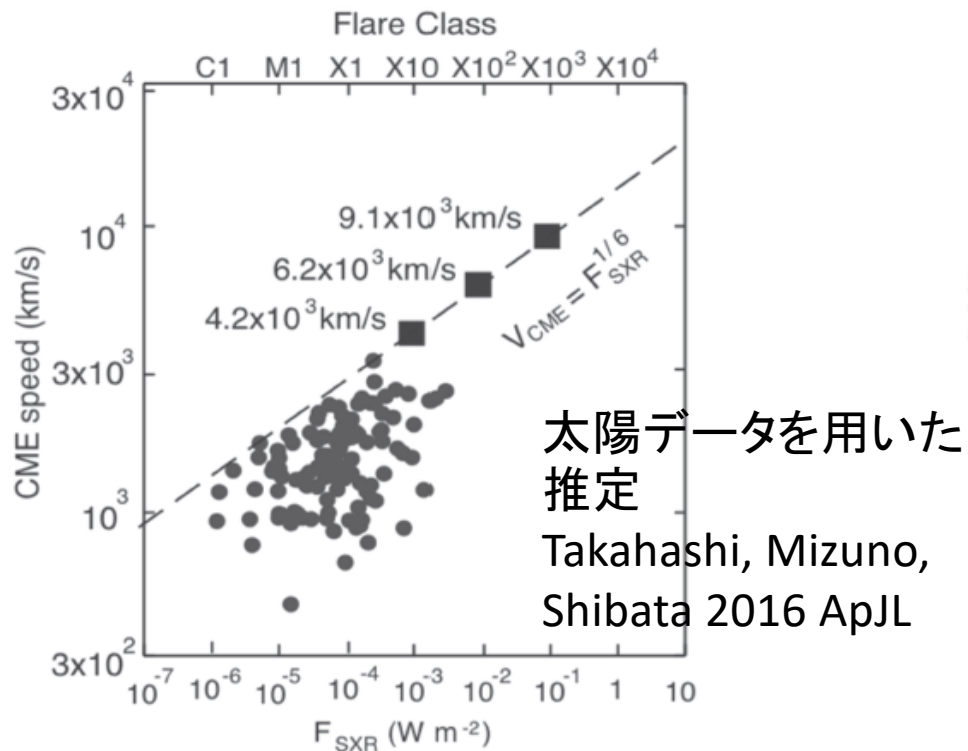
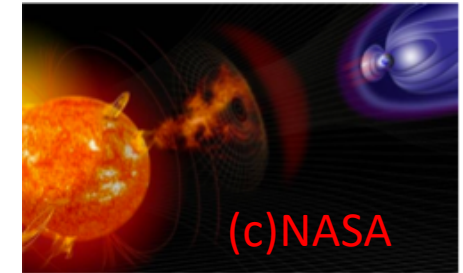
(左図) フレア中の
H α 線スペクトル

(右図) H α 線
差分スペクトル



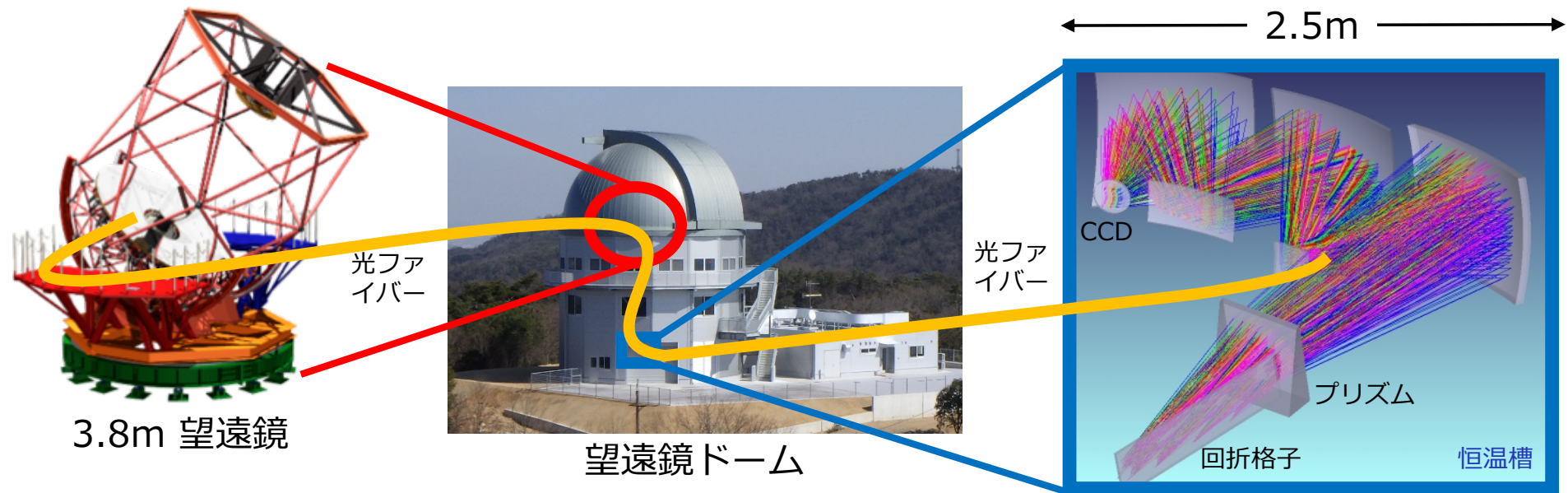
スーパーフレアに伴う彩層放射・噴出現象の観測

- 磁場エネルギー $\longrightarrow$ 熱エネルギー(可視、X線放射)
 $\downarrow$
運動エネルギー(filament eruption, CME, etc.)
- どの程度が運動エネルギーに分配されるか？
 - CME mass, velocity などがスーパーフレアの場合はどうなるか？
 - 地球や系外惑星への影響評価



プラズマ噴出に伴うHa profile予想図
(太陽の極所的な観測を外挿した推定)

“スーパーフレア研究に最適”な高分散分光器を開発



広い波長域を高分散で一度に
取得可能

←スーパーフレアの物理を解明
するのに必要な
紫外域～近赤外域のラインの
詳細データ

波長分解能 ($\lambda / \Delta \lambda$)	100,000
観測波長	360-1,050 nm
システム効率	20%
温度安定性	0.1 °C
限界等級 (1 時間積分)	13 等 (S/N=50)
ファイバー数と直径	0".45 × 12 本

スーパーフレアに伴う彩層放射・噴出現象の観測

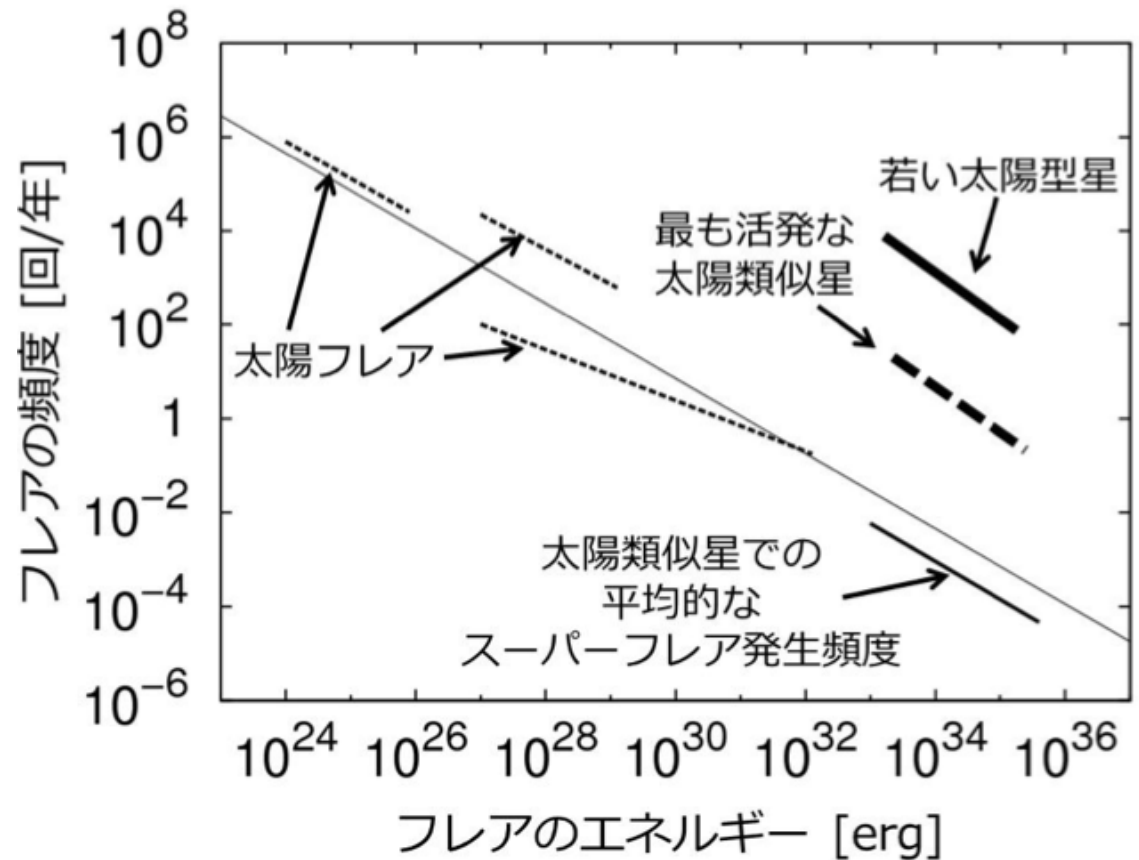
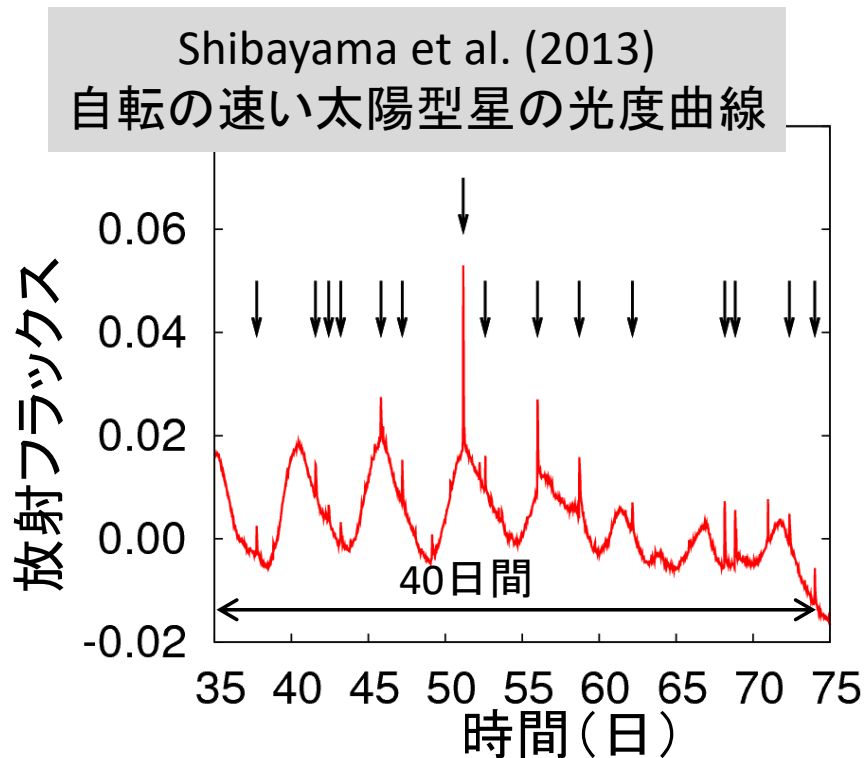
- ・フレア観測の容易な、(自転の速い)若い太陽型星及び特に活動的なM, K 型星計数天体を数週間にわたり、連続観測

10^{34}erg フレア--> 1年に1000回 --> 1日に数回

10^{35}erg フレア--> 1年に100回 --> 3-4日に1回

→(天候等考慮して)数日～数週間の連続モニタ観測でフレア検出可能

別途、50cm測光望遠鏡も導入し、同時観測



Outline

～3.8m望遠鏡・KOOLS-IFUを用いた 恒星フレア研究～

- これまでのスーパーフレア研究
- 京大3.8m望遠鏡で目指すサイエンス(全体像)
- **KOOLS-IFUで取り組むサイエンス(詳細)**

KOOLS-IFUで取り組む、スーパーフレアの分光観測

波長域

○Balmer

(H α 6563, H β 4861, H γ 4340, H δ 4102Å)

○He I 5876Å

×Ca II H&K (3934, 3968Å)

×Ca II triplet (8498, 8542, 8662Å)

×Balmer jump (~3646Å)

波長分解能 600 or 1000 (800?)

line profileの詳細な分解は困難

プラズマ噴出等の詳細研究は高分散へ

(3.8mHDS & 188cmHIDES)

高分散へ向けた準備観測？

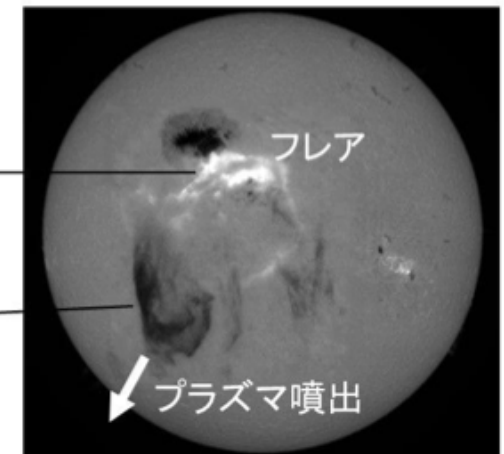
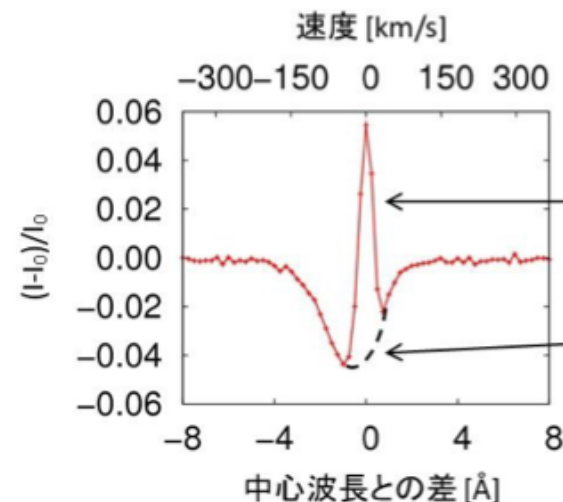
短い読み出し&露出時間(高分散と比べて)

時間分解能を高めたサイエンス？

3.8m搭載時の (予想) パラメータ

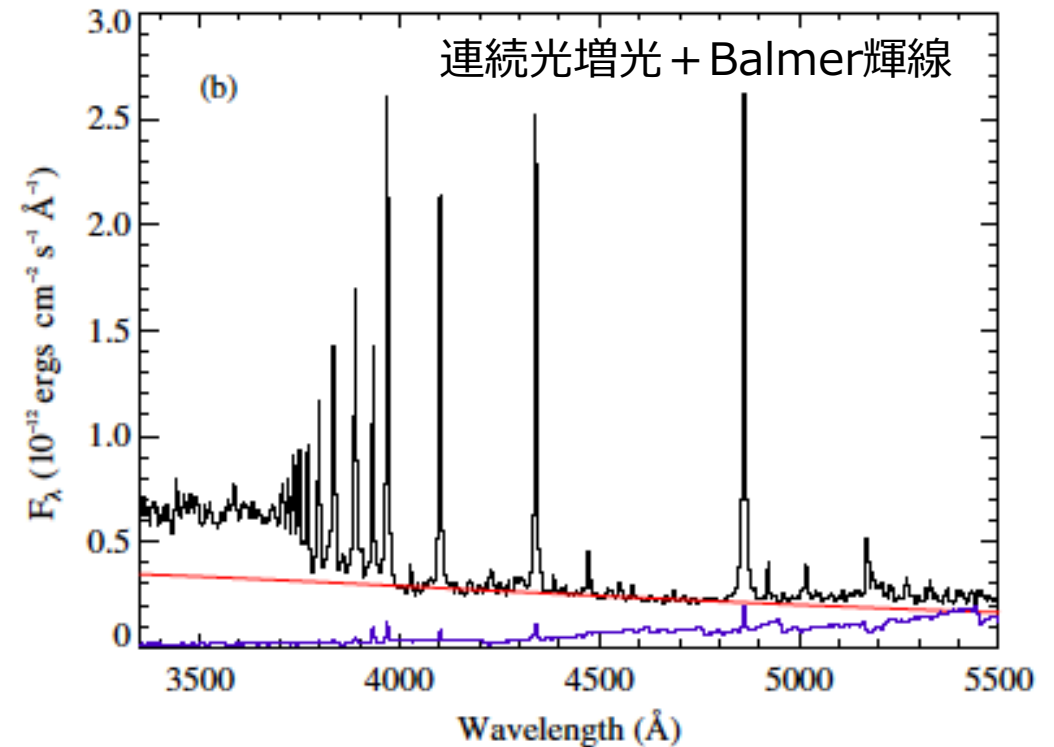
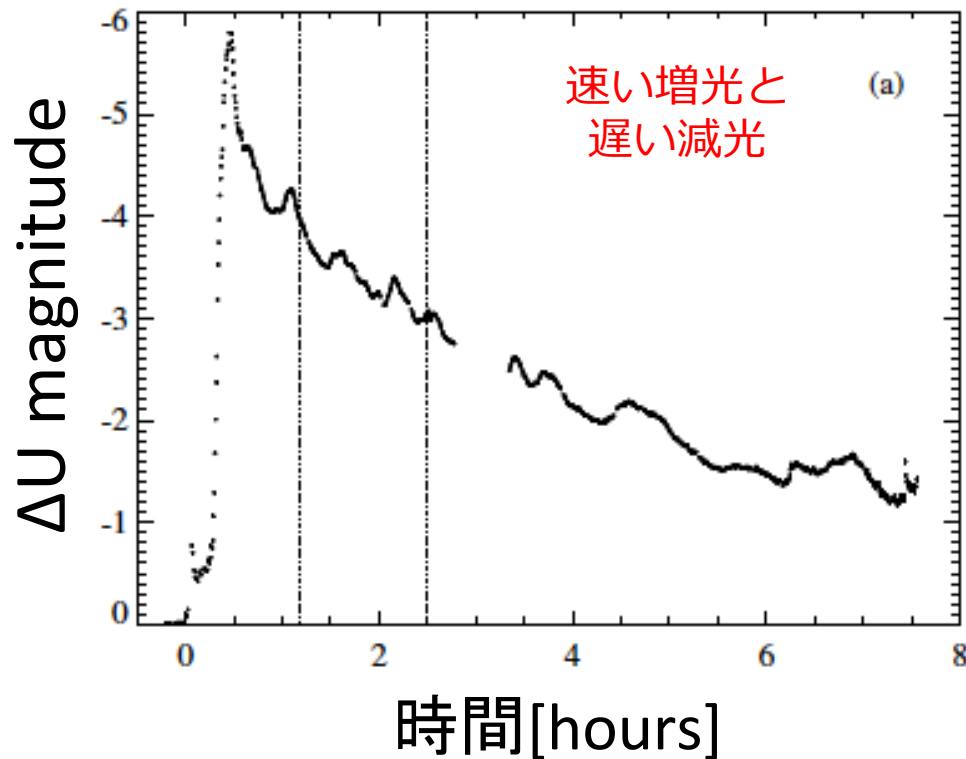
グリズム	No. 5	No. 2	VPH495	VPH683
ファイバー本数	127本			
1ファイバーの視野	0.91'' (直径)			
全ファイバーでの視野	14.8'' (直径)(filling factor~0.58)			
観測可能波長	(4000—7000 Å)	(6000—10000 Å)	4160—6000 Å	6150—7930 Å
波長分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$)	(~600)	(~1000)	N/A	1900—2300
最大スループット	5.3%	8.1%	N/A	8.2%

(※ 1ファイバーに全ての天体光が入った場合)



フレア中の彩層line強度変化(低分散分光観測)

連続光増光 + Balmer輝線

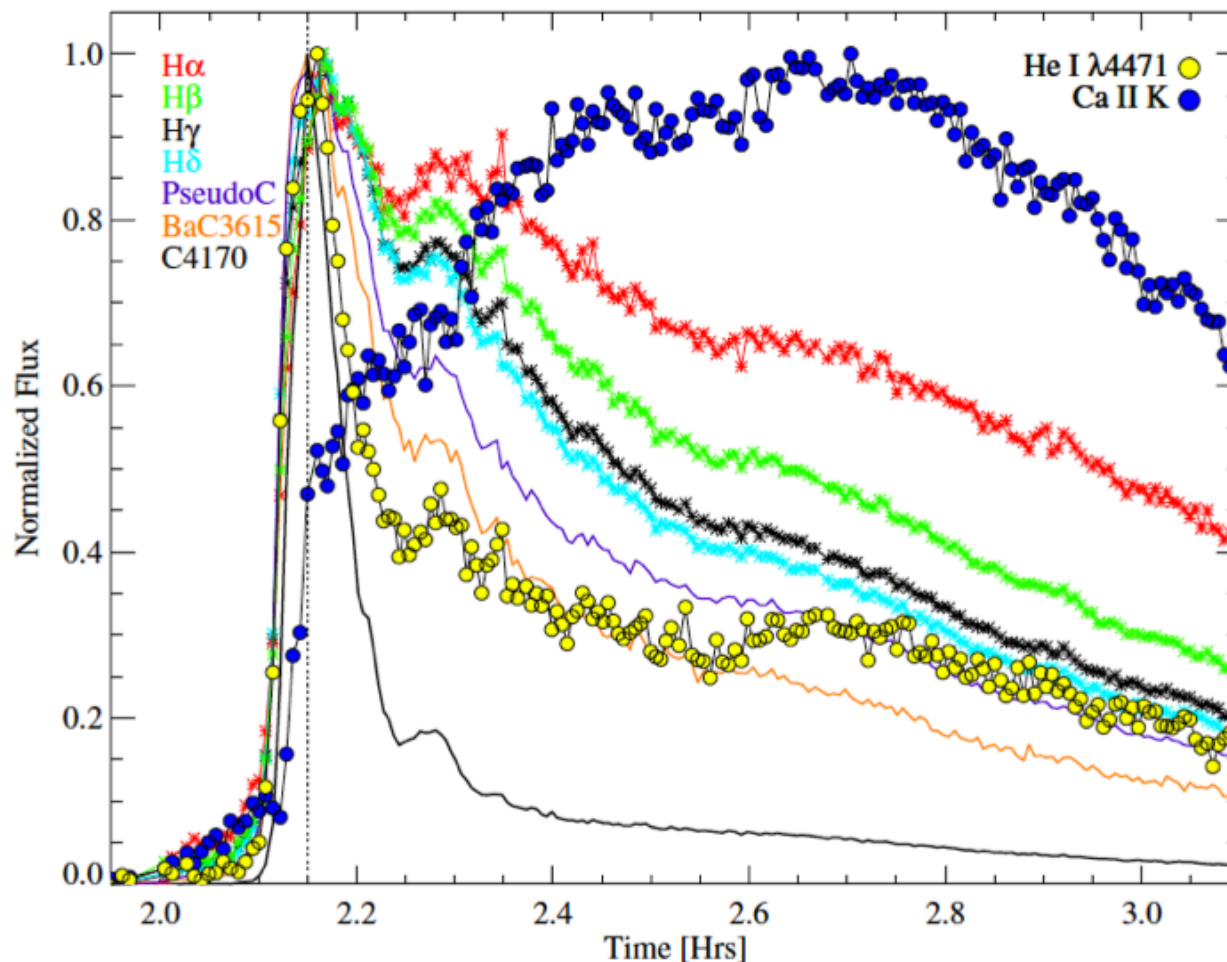


赤線: 10,000K黒体放射
紫線: 静穏期スペクトル

M型星スーパーフレア(星全面積分)
(Kowalski+2010)

フレア中の彩層line強度変化(低分散分光観測)

M型星スーパーフレア(Kowalski+2013)
(APO3.5m望遠鏡,
波長分解能: B400/R300)

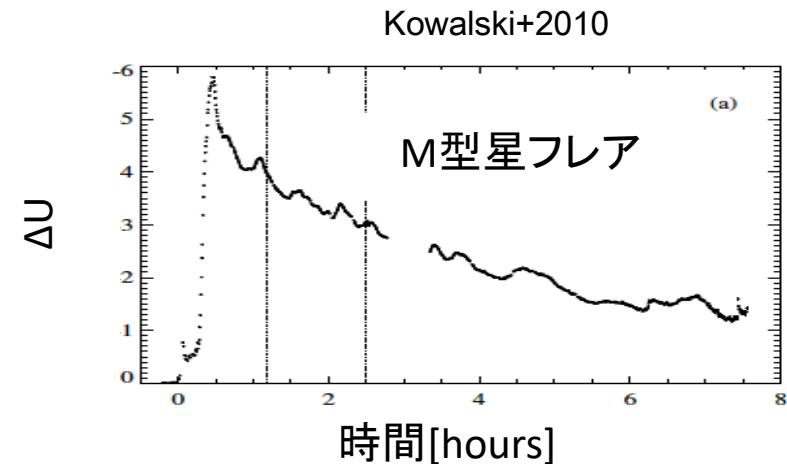
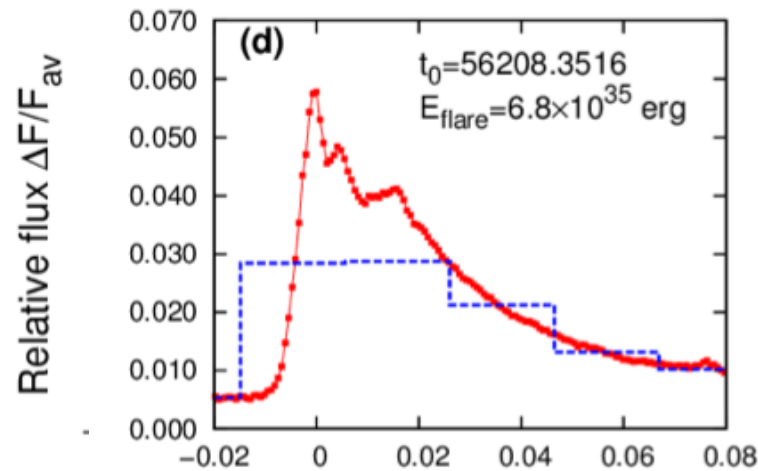
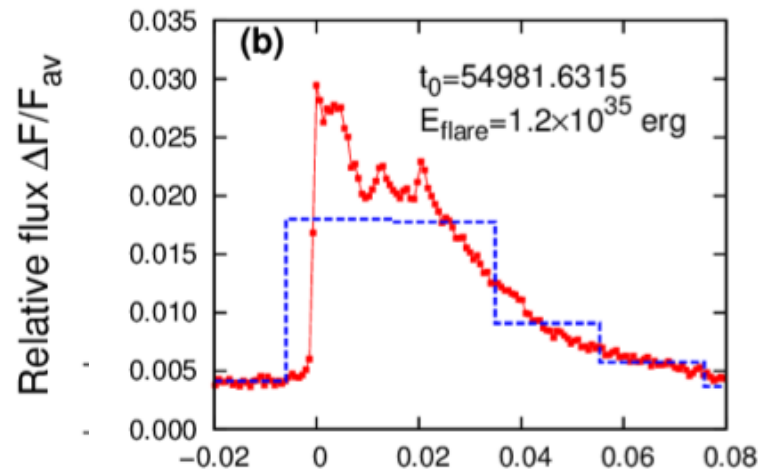


彩層line時間変化の違い
->彩層中での放射過程の
詳細を反映

M型星では数十例観測有
(フレアエネルギーによる
差など議論も)
しかし、K・G型星では皆無

M型星以外の
スーパーフレア
ではどうなっているか？

Flare oscillation



振動

-->フレアループの物理状態を反映

連続光＋分光観測 比較？

Keplerの太陽型星観測例($\Delta t=1\text{min}$ (赤), 30min (青))

Kepler(2009~): 最大 $\Delta t=1\text{min}$

TESS(2018~):最大 $\Delta t=2\text{min}$

PLATO(2024~):最大 $\Delta t=2.5\text{s}$

KOOLS-IFUで取り組む、スーパーフレアの分光観測

波長分解能 $R (= \lambda / \Delta \lambda) \sim 600$ (グリズムNo. 5) $\rightarrow R \sim 800$ with VPH blue

観測波長 4000-7000Å [4000-8500Å with VPH blue]

(主なline: Balmer (H α 6563, H β 4861, H γ 4340, H δ 4102Å), He I 5876Å)

観測

近傍($V < \sim 10$ mag) のフレアを頻発している、G型星, K型星 数天体

露出時間30秒程度で繰り返し連続観測: 数日～数週間の観測でフレア検出可能

$V=10$ mag, Exposure=30s, No.5 $\rightarrow S/N > 200$ (Exposure Time Calculatorにて)
@6000Å continuum

同時観測

50cm測光望遠鏡(高分散分光器予算で導入予定)

MITSUME: 多波長同時測光観測

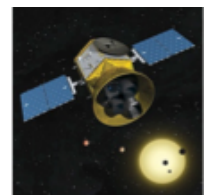
188cm-HIDES: Ha線profile(高分散)

西はりまMALLS: Ha線profile(中分散)

アメリカAPO3.5mとの
接続観測も
(共同研究実施中)



TESS(2018年3月打上): 観測期間被れば、spaceからの測光観測
南天:2018年夏～, 北天2019年夏～



まとめ： 3.8m望遠鏡とKOOLS-IFUを用いたスーパーフレア研究

フレア自体の分光観測

- ・ 彩層輝線の時間変化(down flowとプラズマ噴出)
- ・ スーパーフレアは、太陽フレアと同じ物理的特性を持つのか？
- ・ 長期モニタが可能という、占有望遠鏡の強みを生かす

特に、KOOLS-IFUでは

- 高分散分光の前段階として
- 高い時間分可能(~30s)で、line毎の時間変化の違いを探る
 - ー K, G型星では新たなサイエンス
 - ー 明るい近傍のフレア星に集中
- 測光(50cm測光望遠鏡, 岡山MITSUME, TESS衛星),
他の分光(188cm-HIDES, 西はりま?, アメリカAPO3.5m)との同時or接続観測
- 自転によるHa線変光 <-> 測光的な変動と比較
黒点分布へ示唆？