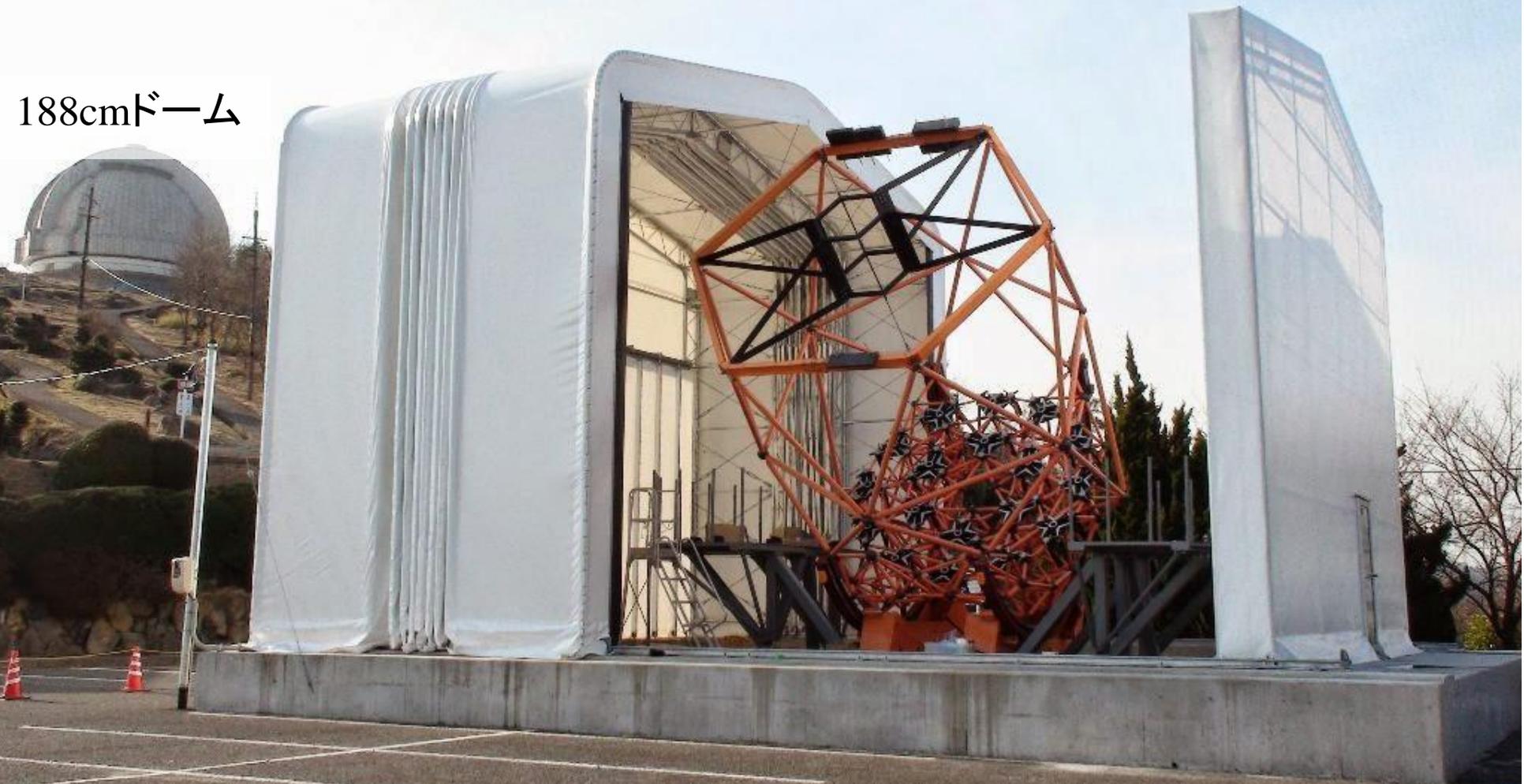


京都大学3.8m望遠鏡での観測計画

野上大作
(京大・理)

京都大学3.8m望遠鏡の現況

188cmドーム



望遠鏡が仮「ドーム」に納入される

2015.3.17撮影

ドームは竣工 2017年2月末
その後の定点カメラ像



ターンテーブルの塗装 (上部はバラしてドームの中)



2017.6.13撮影

そしてドームの中で

- 非公開動画

3. 8m望遠鏡運用案

定常状態では

- ・望遠鏡時間の半分は京大時間
- ・ 半分は共同利用時間(来年度8月からを予定)
- ・ただし、望遠鏡維持改善・社会貢献などの時間は両者から供出

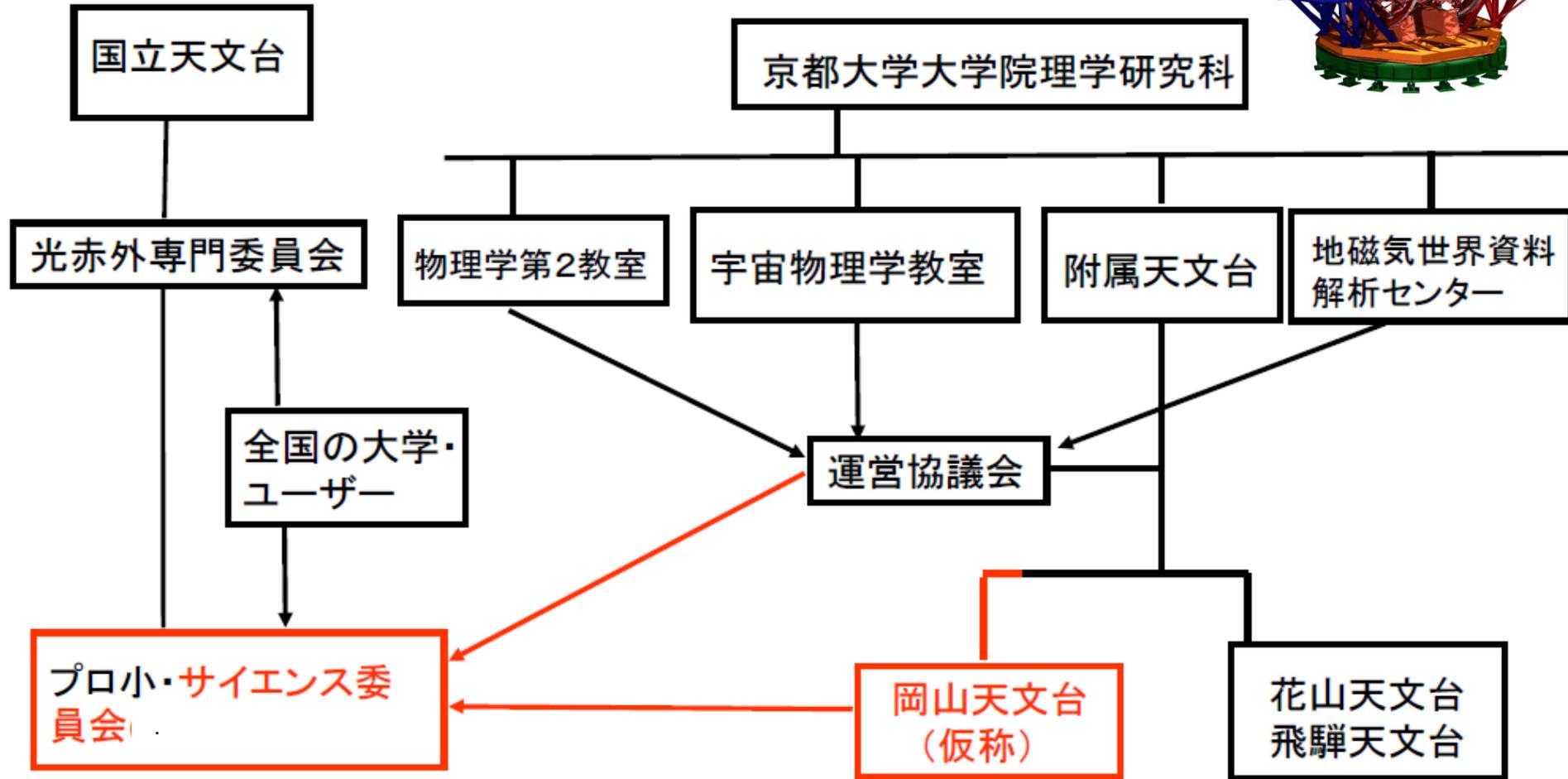
研究棟(仮眠室)、食堂などは利用できる

まだ何も公式に決まっていないものの、

- ・突発天体対応をうたっているので、
ToO重視は当然だろう。
- ・キュー観測を多用することが考えられる。



運営組織案



2016.10から準備、
設置・立ち上げ 2017.4。

赤が新設される運用体制

これからの動き 2017-

2017.1.31

「3.8m望遠鏡に搭載を計画している観測装置についての情報提供の
お願い」締め切り。

- S-01 ファイバー型可視光面分光装置KOOLS-IFU◎ GRB・重力波・SNe・銀河等
- S-02 可視高分散分光器 スーパーフレア・系外惑星等来年度以降の科研費などに期待
- S-03 近赤外相対測光分光器○ QSO進化等
- S-04 近赤外偏光撮像装置 原始惑星系円盤等 来年度以降の科研費などに期待
- S-05 可視光 2色同時撮像カメラ SNe等来年度以降の科研費などに期待
- S-06 視線速度精密測定装置 系外惑星等来年度以降の科研費などに期待
- S-07 SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao)○ 系外惑星
- S-08 高速測光分光装置◎ ブラックホールX線連星、激変星、恒星フレア等

◎◎はすでに(部分)予算がついて開発開始

◎は2018に(試験)観測可能なもの

スケジュール まとめ

2016(H28)年度

ドーム建設完了

2017(H29)年度

望遠鏡をドームに設置、トラッキング試験、鏡の調整等々

2018(H30)年度

前半：鏡の調整・制御試験、装置の試験、等々 call for proposal

後半：リスクシェア共同利用

(高速測光・分光器、可視面分光器？、可視撮像？)、鏡制御試験

2019(H31)年度

フル稼働望遠鏡？

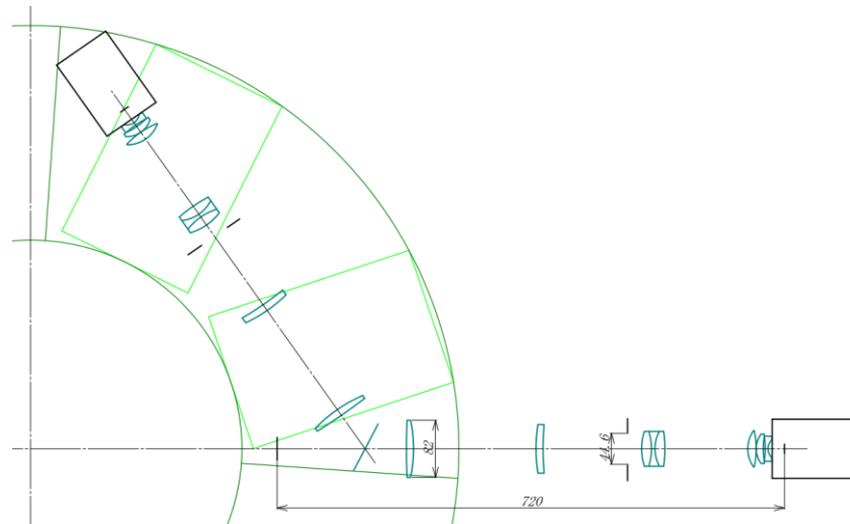
近赤外相対測光分光(リスクシェア)、

2020(H32)年度

高コントラストカメラ？、可視高分散分光？

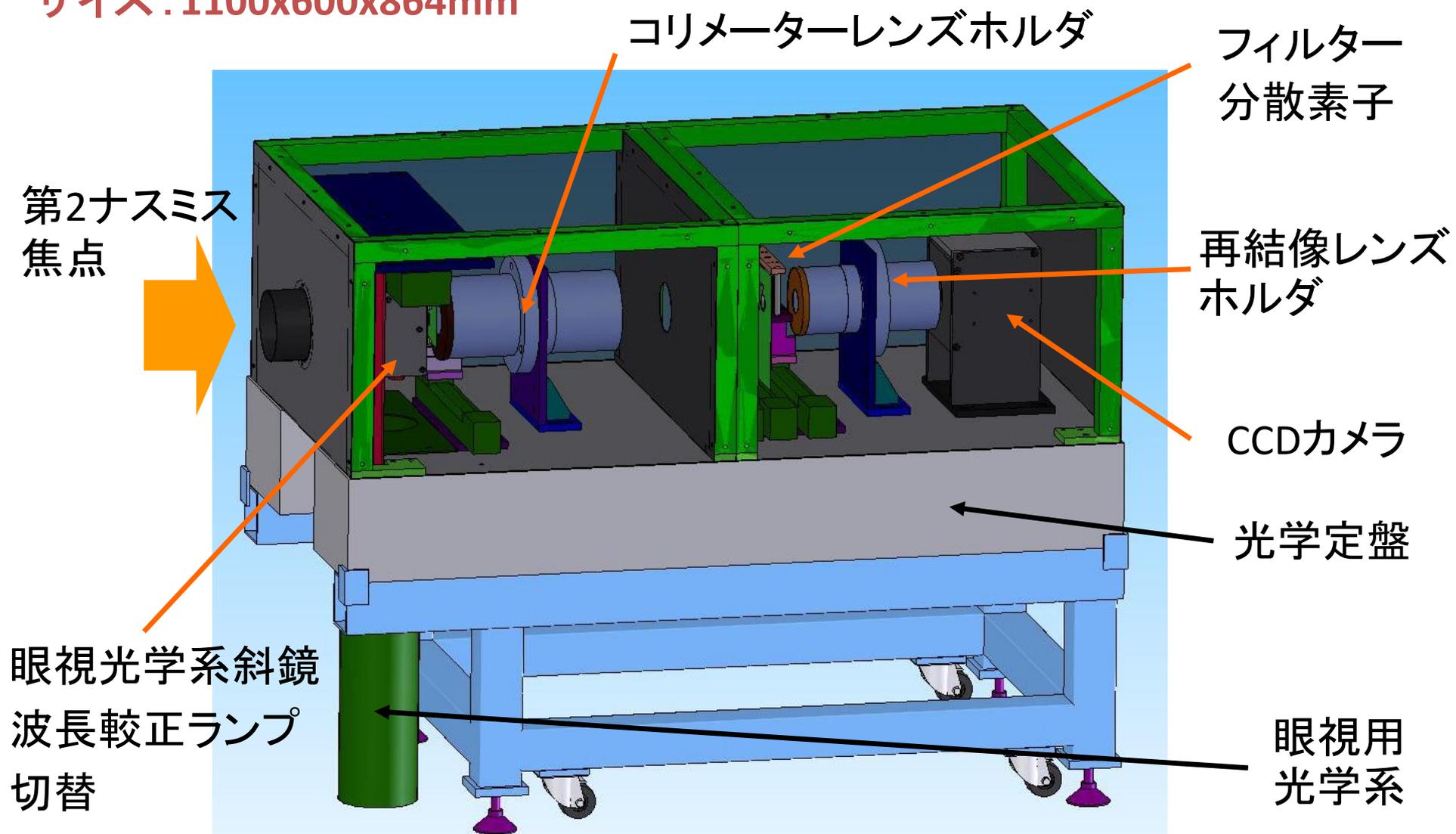
3.8m望遠鏡用高速測光 分光装置の概要と 狙うサイエンス

野上大作(京都大学)



○ 高速分光器@かなた望遠鏡 全体像

サイズ: 1100x600x864mm

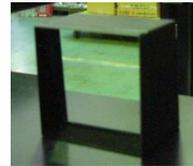


◎光学系：

H0WP01の(予備の)レンズ群を使用

◎分散素子

- ・超低分散用 ($R \sim 20$) \Rightarrow 2素子プリズム
- ・低分散用 ($R \sim 150$) \Rightarrow グリズム
- ・~~(低分散2 ($R \sim 1000$) も入れられないか検討中)~~



◎筐体

- ・フィルター5種類 (BVR, ロングパス2種類 (L38, GG495))
- ・波長較正用光路
- ・マスク/スリット
3種類 (丸穴 $\phi 0.9\text{mm}$ 、スリット2種類 (幅0.11, 0.20mm))

○高速CCDカメラ

e2v社の電子増倍(EM)・背面照射型 frame transfer CCD (CCD87) を使って浜松ホトニクスと共同で開発されたEM-CCD カメラ(C9100-12)



ピクセル数	512 × 512
ピクセルサイズ	16 μ m × 16 μ m
露光時間	27.1 msec ~ 10 sec
最速frame rate	35.8 frame/sec (No-bin)
電子増倍(EM)	4 ~ 2000 (可変)
カメラヘッド	真空封じ切り・ペルチエ冷却+空冷
冷却温度	-50°C (@0~30度)
読み出しノイズ	100 [e-]
A/Dコンバータ	14 bit
飽和電荷量	400,000 [e-]

測光観測での限界等級 20 mag @かなた望遠鏡(1.5m)→22mag@3.8m?
(±0.2mag, 最長の10秒露光, 電子増倍率:最小)

○装置のまとめ

積分時間: 27.1ms ~ 10 sec

観測視野: 2.6' x 2.6' (撮像モード) (0.31"/pix)@Kanata

→74.5" x 74.5" (0.15"/pix)@3.8m

2素子プリズム

グリズム

マスク

スリットレス(素通し)

0.2mmスリット

観測波長域

360~1000nm

430~690nm

波長分解能

6~80nm

4nm

系全体の効率

最大13%

最大9%

限界等級(※)

15.7mag

12.4mag

→それぞれ2等
くらい深くなる

※積分時間:10秒、電子増倍率:4倍(2000倍まで増倍可能)

3.8m望遠鏡用への改修へ向けて

○カメラ候補

浜松ホトORCA-Flash4.0 V3 CMOSカメラ(C13440-20CU)



ピクセル数	2k x 2k
ピクセルサイズ	6.5 μ m × 6.5 μ m
露光時間	1 msec ~ 10 sec
最速frame rate	100 frame/sec (No-bin)
冷却温度	-30°C (水冷)
暗電流	0.006 e-/pix/s
読み出しノイズ	1.0 [e-]
A/Dコンバータ	16 bit
飽和電荷量	30,000 [e-]
量子効率	>80%@560nm

若干量子効率は下がるが、チップサイズの拡大と読み出しノイズの低減効果あり

3.8m望遠鏡用への改修へ向けて

○要求仕様

波長分解能 20(プリズム), 150(グリズム)

波長帯域 400 - 800nm

視野 良像範囲 $\phi 5'$ 、ケラレ無し $\square 5'$

結像性能 1"

スリット 幅2" × 長さ10"以上

交換素子

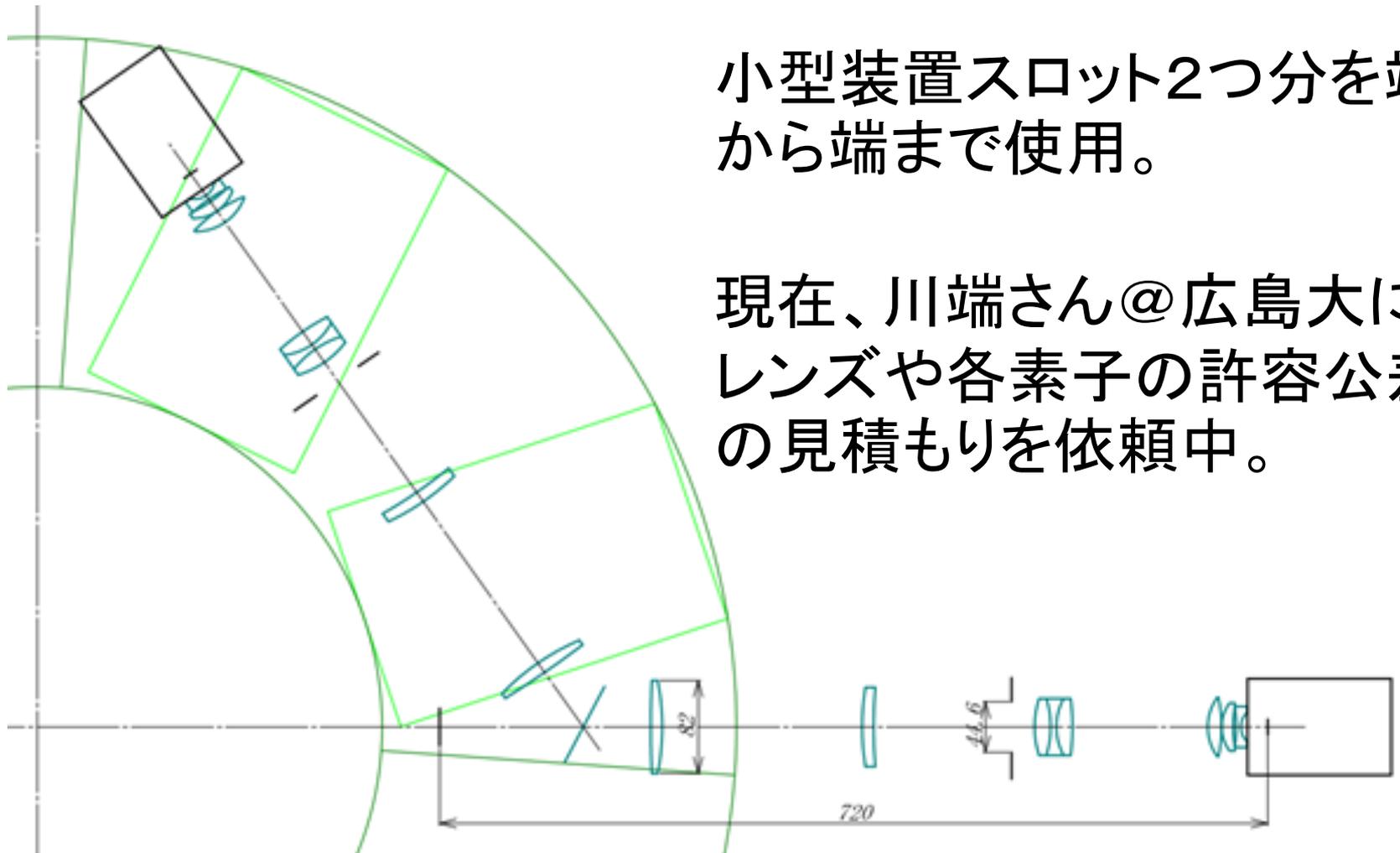
スリット スルー, 2"スリット

フィルタ V, R, I, 2次光カット
(干渉フィルタなので入射角に注意)

分散素子 スルー, R20, R150

3.8m望遠鏡用への改修へ向けて

○光学設計



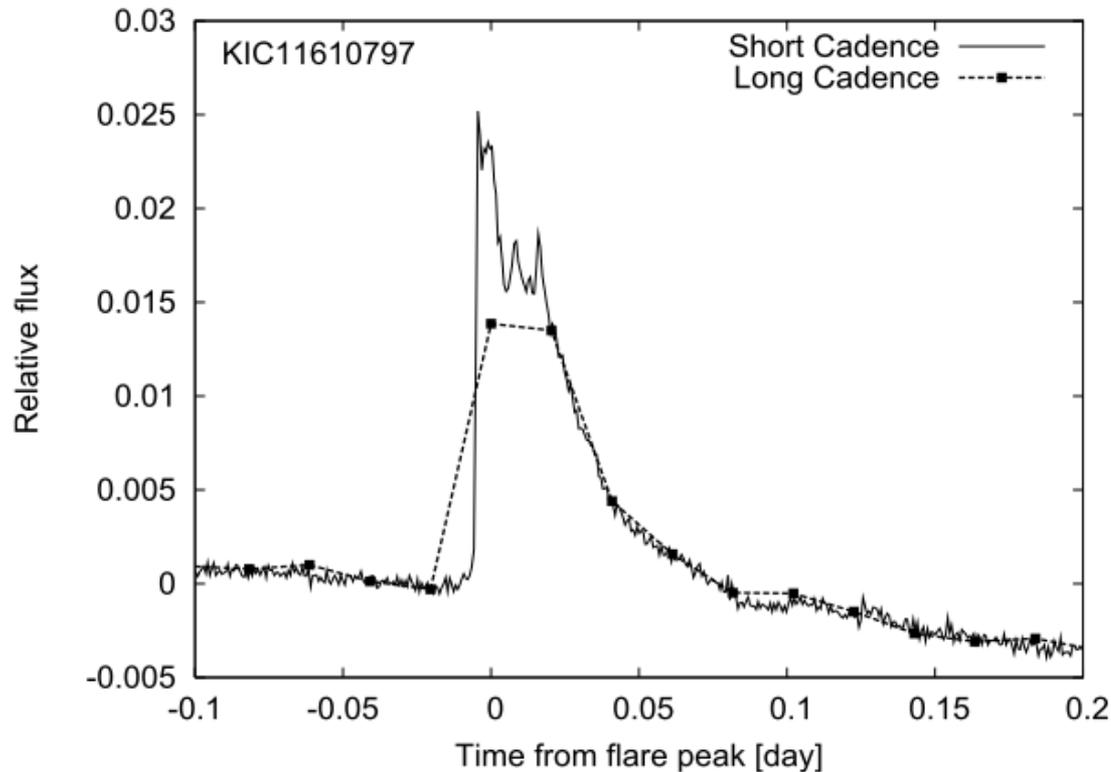
小型装置スロット2つ分を端から端まで使用。

現在、川端さん@広島大にレンズや各素子の許容公差の見積もりを依頼中。

どうも来年度後期の共同利用には
間に合わない雲行きです。申し訳
ありません。開発を手伝ってもいい
よ、という方は是非ご連絡下さい。

m(_ _)m

速いことはよいことだ！



Kepler衛星の1分 cadenceのデータと30分 cadenceのデータの比較。タイムスケールの短い現象の観測には、短時間でのデータ取得が必須。

高速観測で拓くサイエンス

- 恒星フレア
- コンパクト天体周囲での高速変動現象
(最短数10ms?)
- 重力波天体の光学観測？
- Fast Radio Burst対応天体？
- パルサー？
- 掩蔽観測？
- 系外惑星トランジット？
- 白色矮星の振動？
- 他に面白い現象をご存知の方は教えて下さい！

Science I: 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

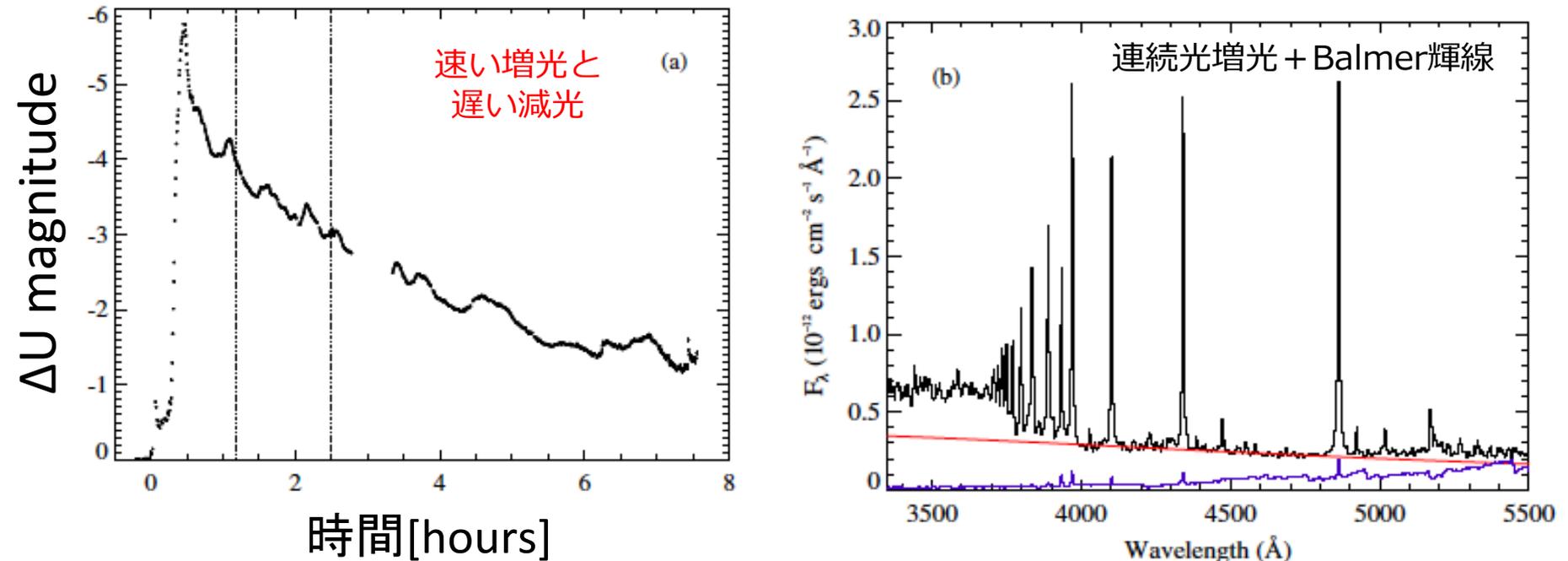
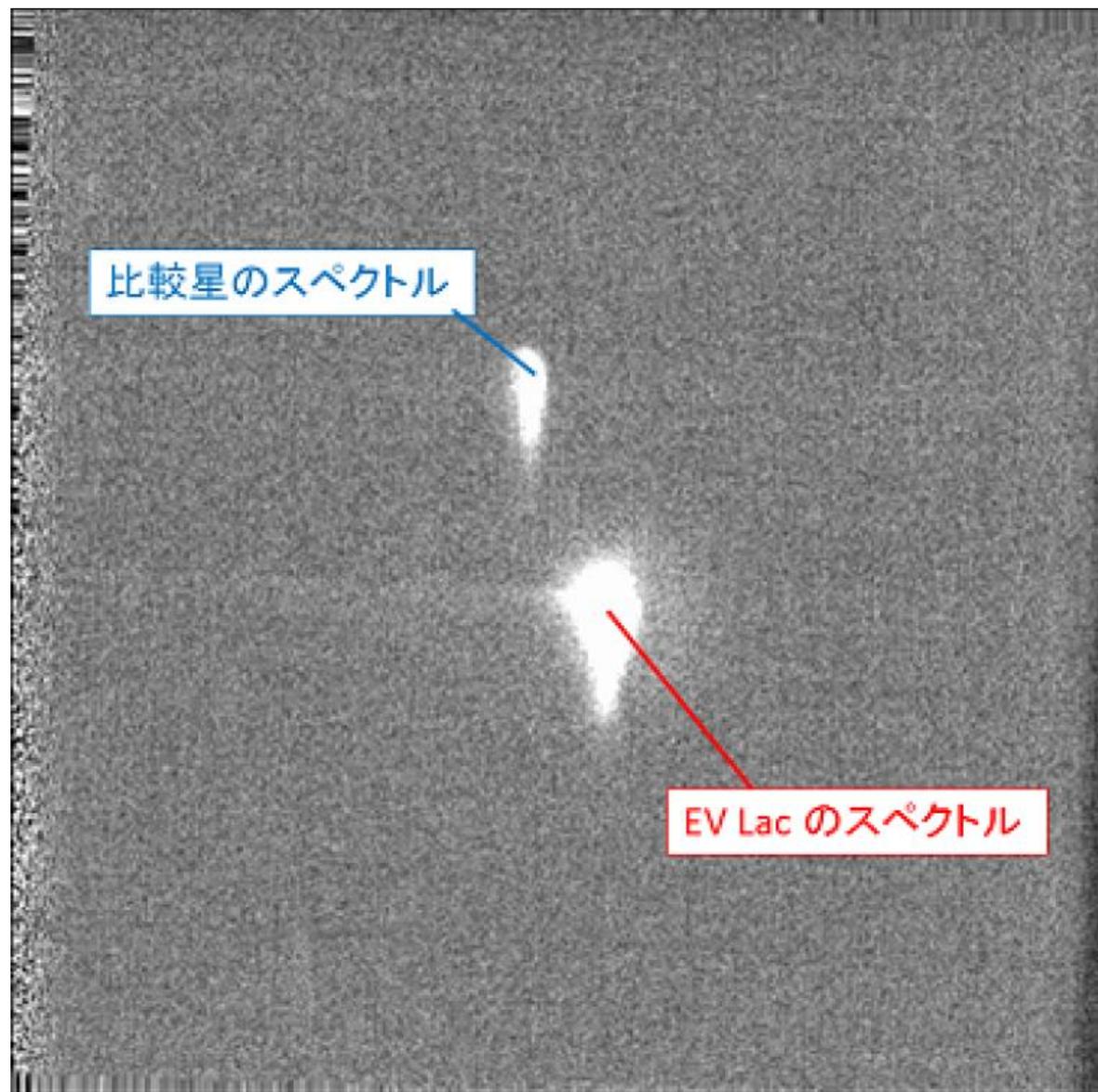
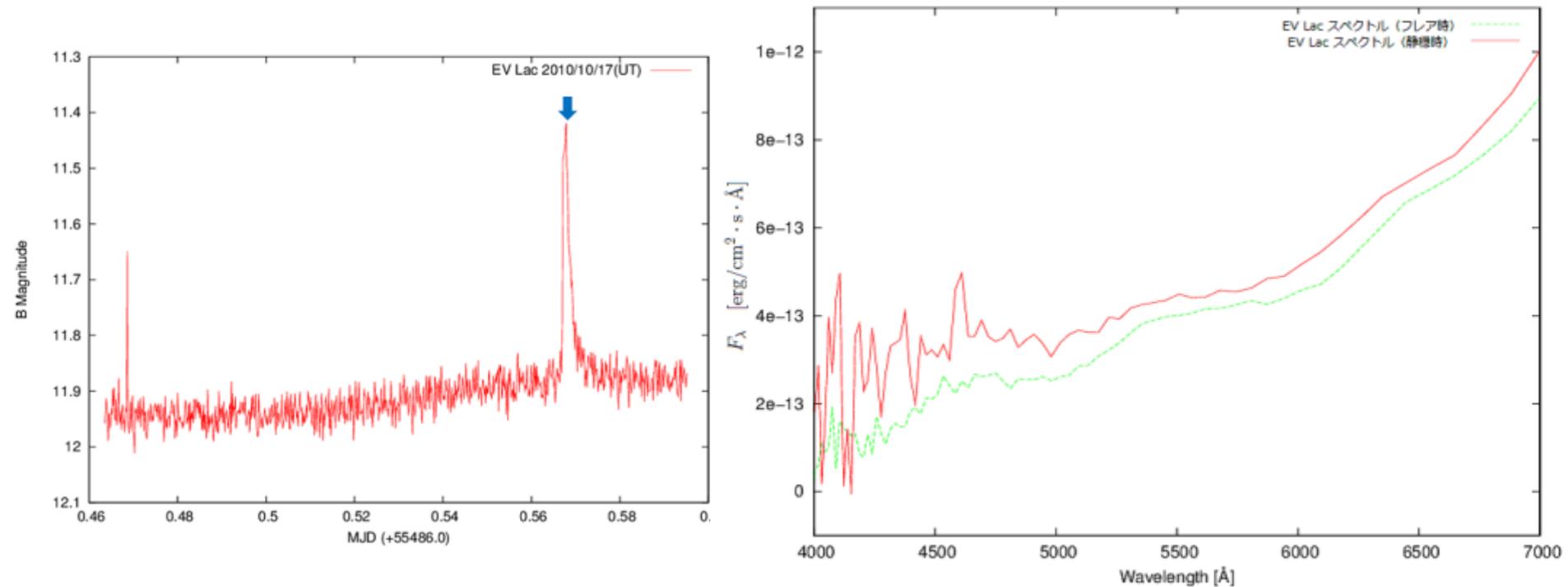


図: dM4.5e星YZ CMiでのフレア(Kowalski+2010)

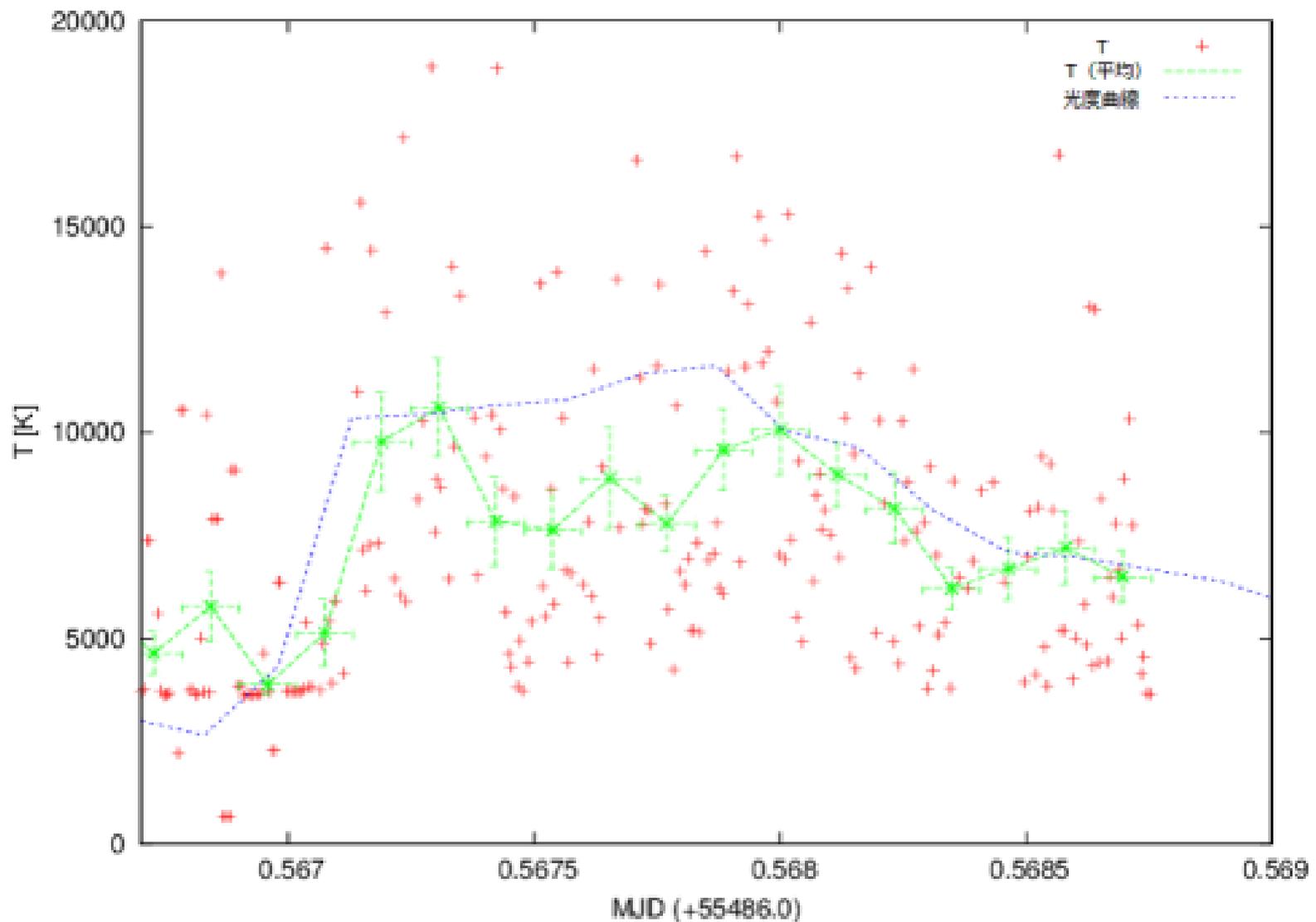
赤線: 10,000K黒体放射
紫線: 静穏期スペクトル

M型星EV Lacのフレアの高速分光(蔵本哲也2013年修論) かなた望遠鏡(R \sim 20; 1秒露出)





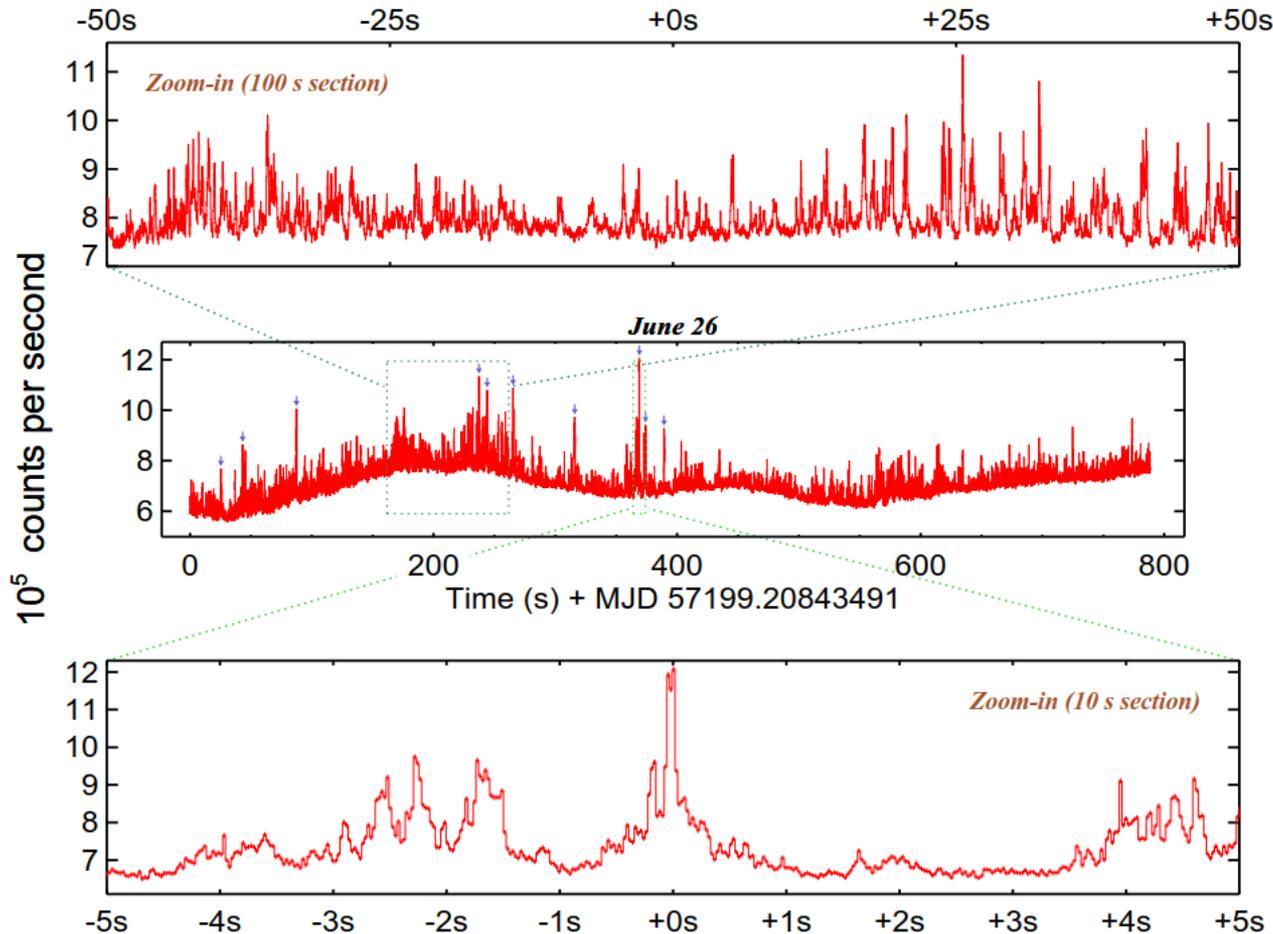
かなた望遠鏡に同架の25cm望遠鏡でのフレア星EV LacのBバンド観測(左)と高速分光で捉えられたスペクトルの変化(右)。フレアは振幅0.5等、継続時間~6分。スペクトルでは青側が主に増光していることがわかる。



増光分を黒体放射でfittingして求めた温度(左)と増光した部分の面積(右)。星表面の0.04%程度の面積が10000K程度まで温度が上がった！

Science II: ブラックホール近傍現象

V404 Cygの2015年のアウトバースト時のULTRACAM/WHTによる高速測光の結果 (Gandhi et al. 2016)



横軸の端から
端まで100秒

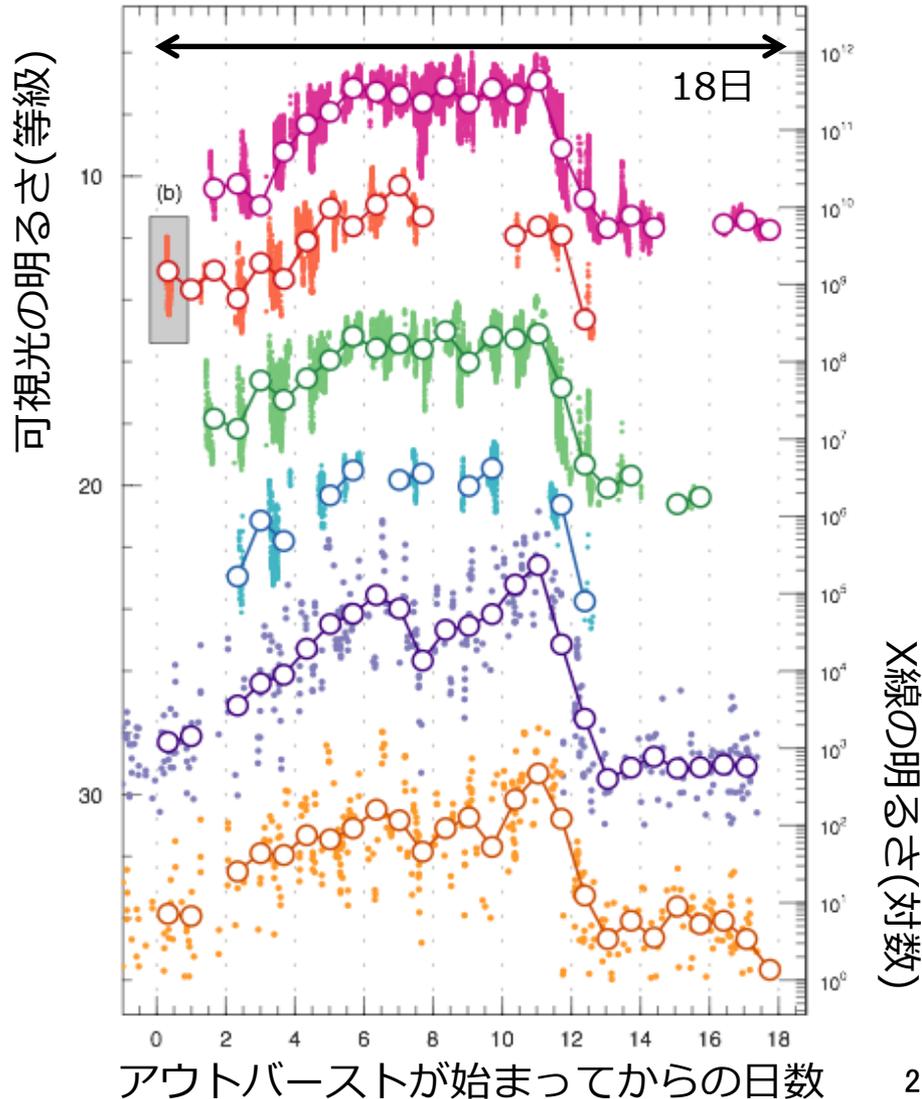
横軸の端から
端まで10秒

r' で24msec露出

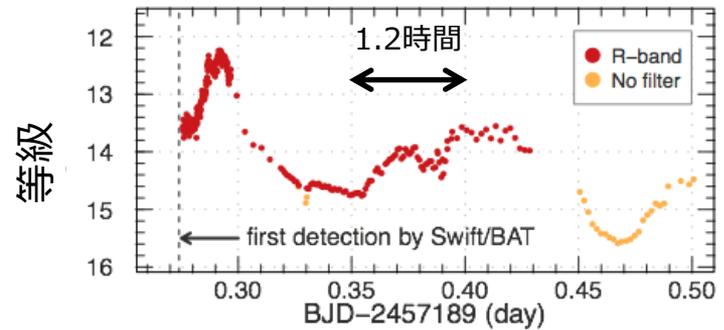
V404 Cyg の2015年のアウトバースト

Kimura et al. 2016, Nature

上の4つが可視光の光度曲線、
下の二つがX線の光度曲線



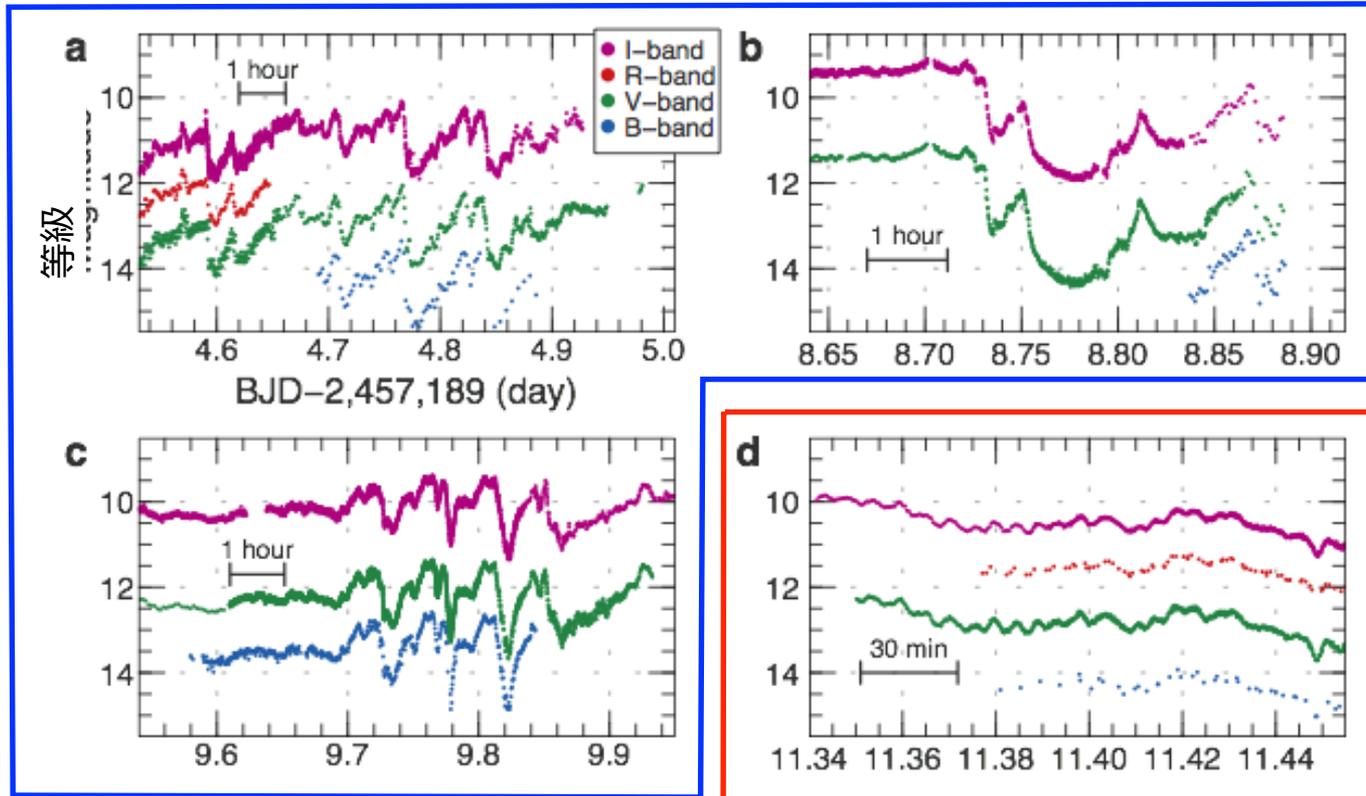
- 期間：およそ18日
- 可視光、X線の光度曲線が互いによく似ている。



↑台湾とロシアのチームの協力による、
開始3分後から数時間後までの可視光の
光度曲線

アウトバーストの最初から最後まで、
激しい短時間変動が見えた！

BHXB V404 Cygで見られた規則的な変動

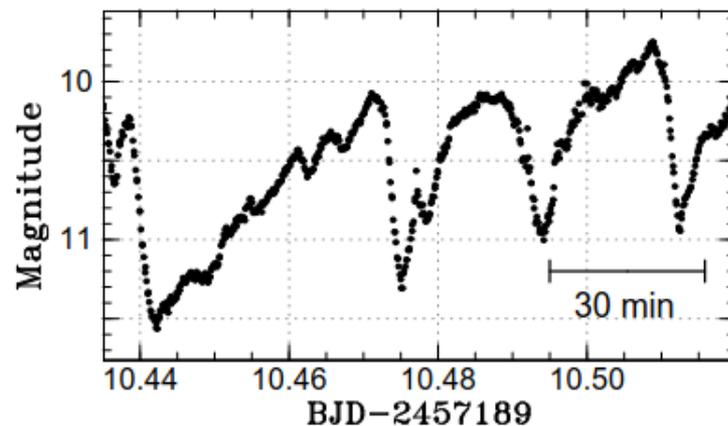
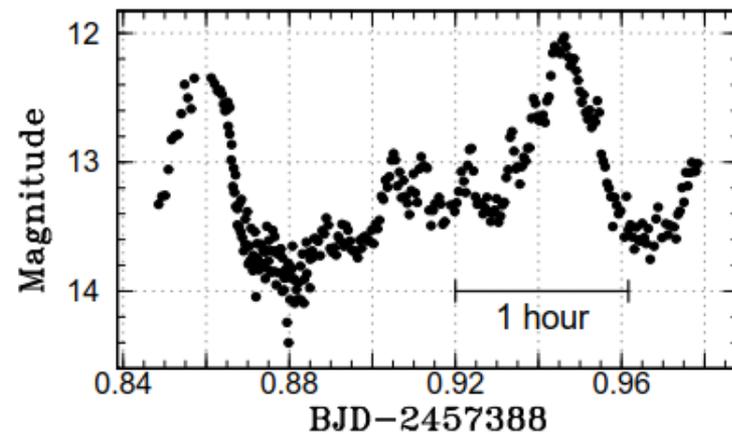
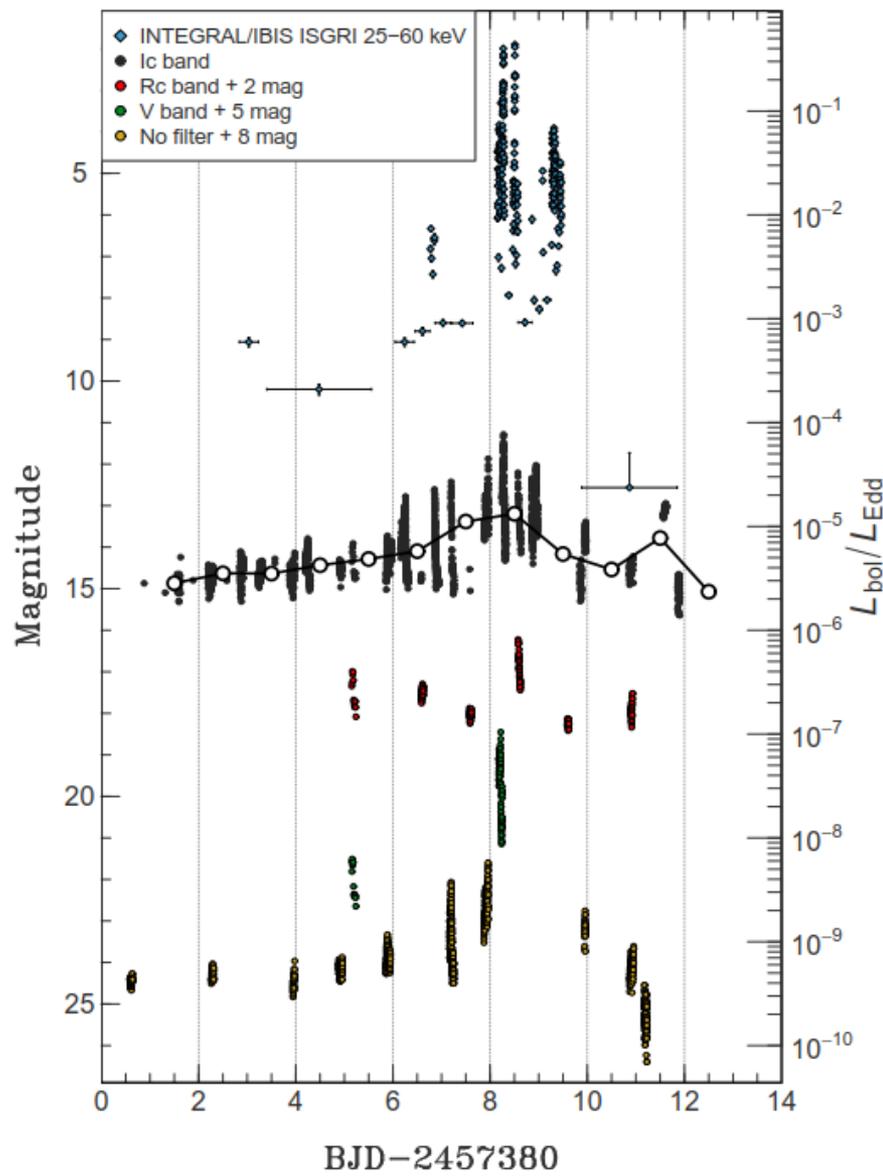


- ゆっくり増光したのち、急に光度が落ち込むという変動が続く。増光中は光度が変動する。
- タイムスケール：45分～2.5時間程度

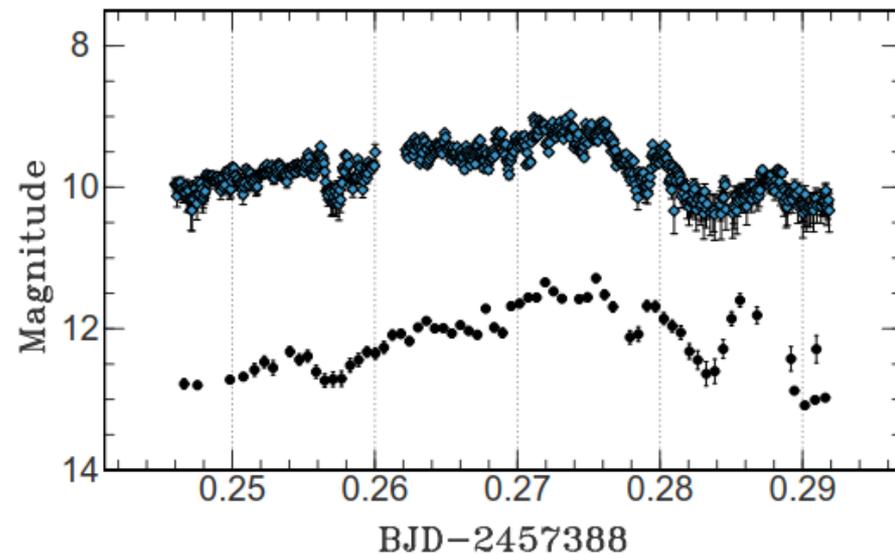
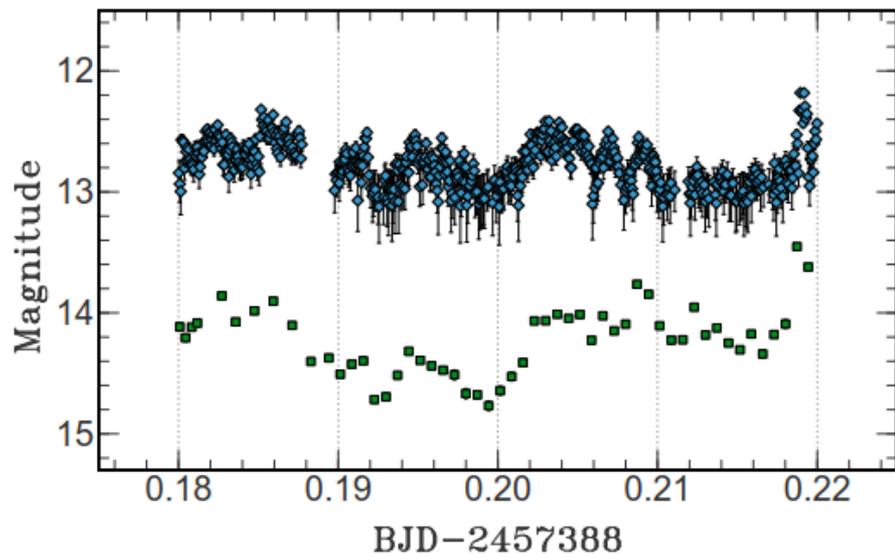
- 振幅の小さい短時間変動が続く。
- タイムスケール：5分程度

ブラックホールごく近傍での振動現象が初めて可視光で捉えられた！
X線変動に対して1分の可視光の遅れから、disk 外側でのreprocessか？

26年ぶりのアウトバーストの後、わずか6ヶ月で再度アウトバーストが！ (Kimura et al., submitted)



ややエネルギー的に小さいが、前回と似た光度曲線(左)と短時間変動(上)



30~50秒程度のX線変動の遅れ
 →disk内での変動+accretion flow?

高速分光のプロファイルの変化が鍵?

まとめ

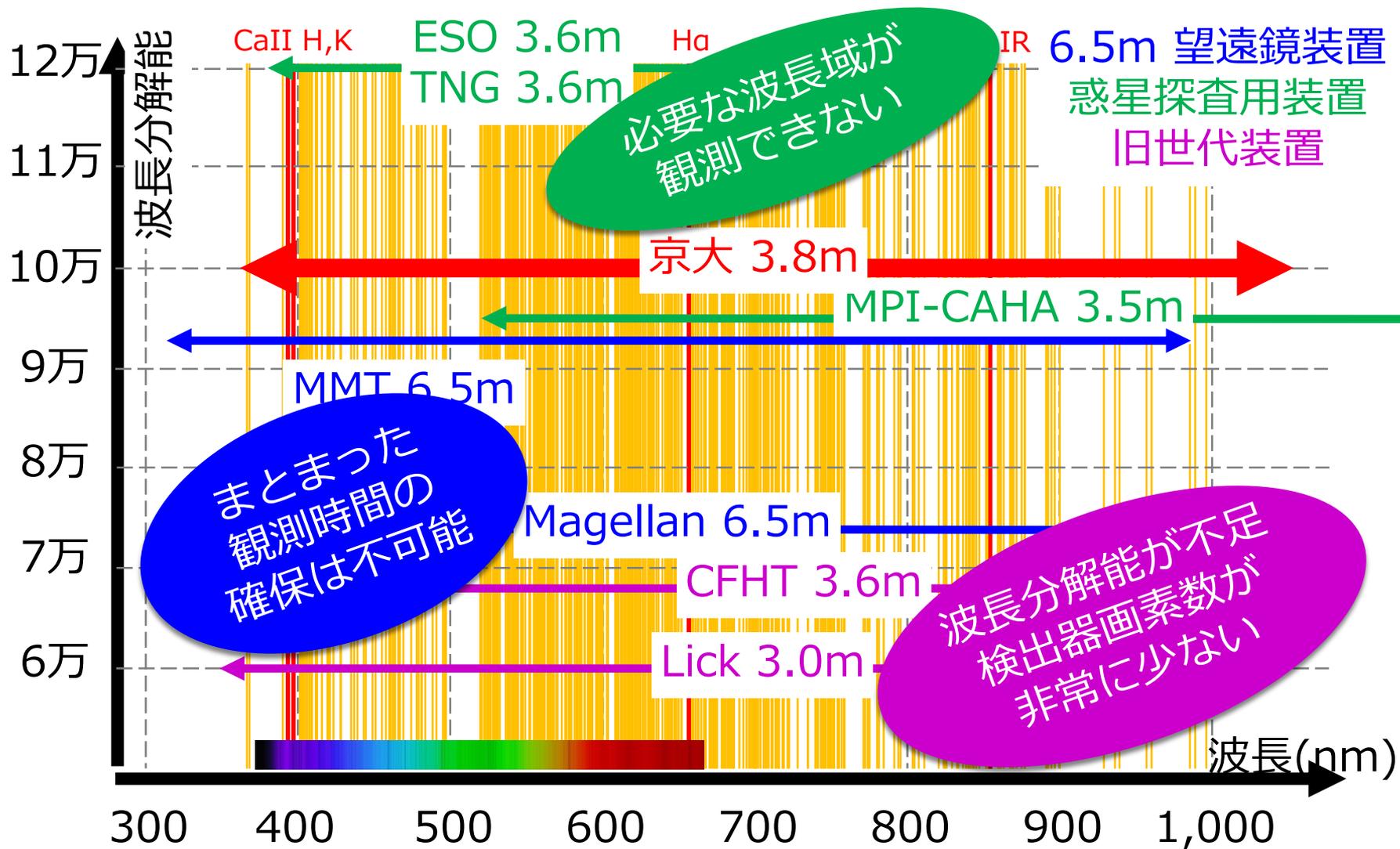
- 広島大学東広島天文台のかなた望遠鏡に取り付けられている高速測光分光器の分光素子を活かし、コンパクトにして3.8m望遠鏡の小型観測装置スロット2つ分に押し込む予定。
- 性能としてはほぼ踏襲する。
- 来年度後期の最初の共同利用に供することは難しそう。
- コンパクト天体周囲の超強重力場での変動現象が、可視光で捉えられる。X線との共同観測が鍵。Tomo-eサーベイでX線連星のアウトバーストの検出→3.8m即時高速測光／分光とか。
- 短いタイムスケール(秒～分程度のオーダー)の変動現象にはなんでも威力を発揮する。→恒星フレア、重力波天体？、FRB？、パルサー？、掩蔽観測、系外惑星transitなどなど？
- 単純な撮像装置、低分散分光器として普通に使えるように。

3.8m望遠鏡用高分散分光装置と スーパーフレア

スペック概要

波長分解能	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

既存の分光装置との性能比較



新規に開発する分光器の優位性

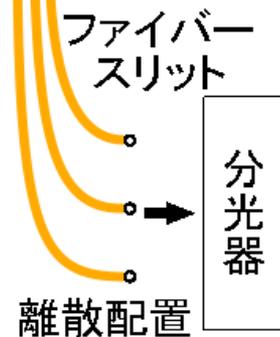
広帯域高分散分光器

回折格子
Richardson Gratings
53-*425E
溝密度 41.6本/mm
ブレイズ角 76°
20cm x 80cm

直交分散用プリズム
オハラ S-LAL7 頂角18°
(片面は高次非球面)

検出器
1億画素 CCD
9.5cm□ (最終 F/3.1)
真空入射窓
熔融水晶
直径 16cm
厚さ 1.2cm

分散ファイバー
スリットによる
新型分光器概念



検出器上の
スペクトル



ファイバー間の
隙間で次数分離

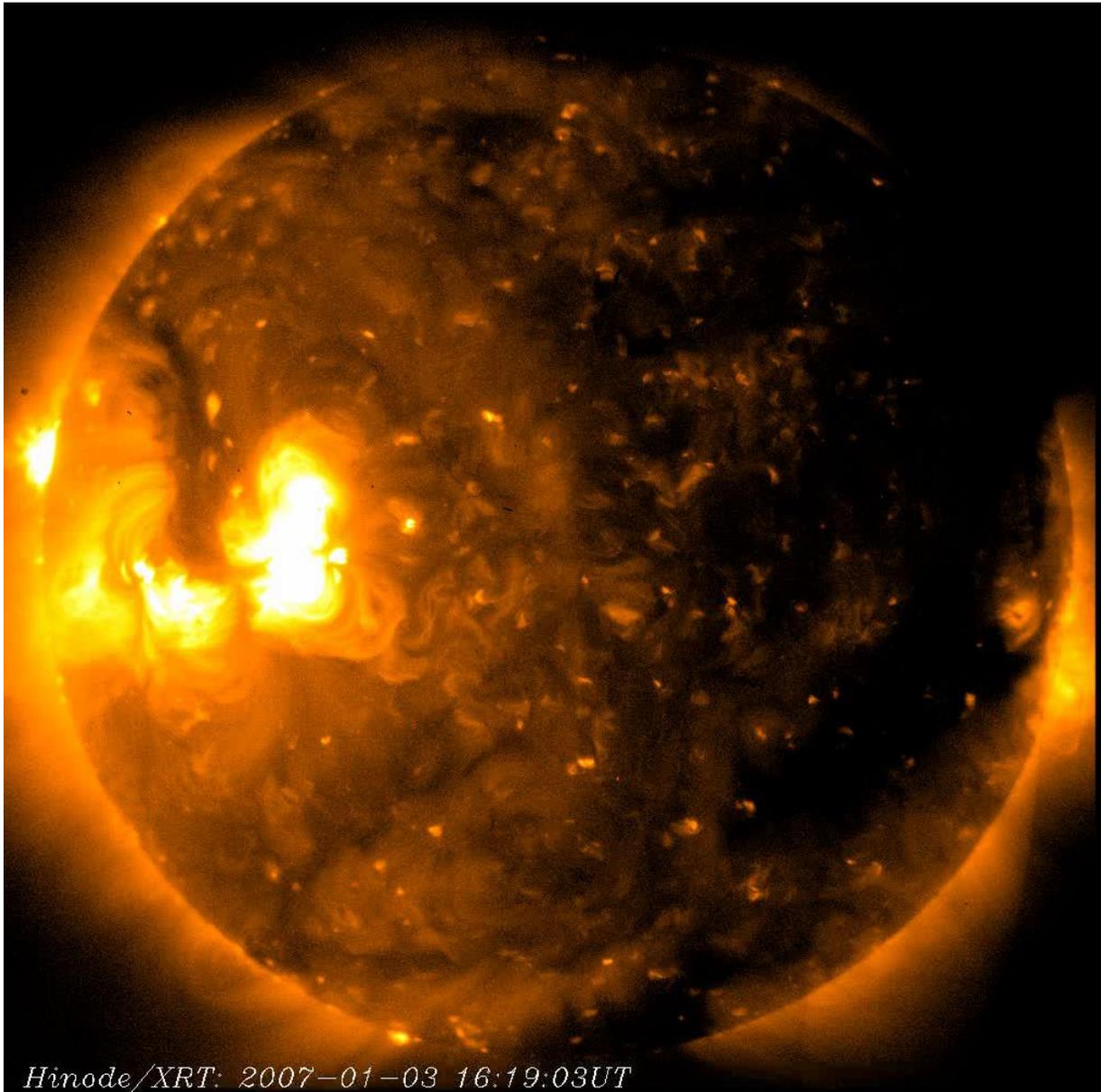
(望遠鏡
より)
ファイバー
スリット
長さ 12cm
(入射 F/5)

反射鏡
バイコニック
6面 (5枚)

観測波長域 0.36 μm (130次)
~ 1.05 μm (45次)
同時入射ファイバー 12本/6本
ファイバー径 50 μm /100 μm
波長分解能 10万/5万

2m

太陽では至る所で爆発が起こる！



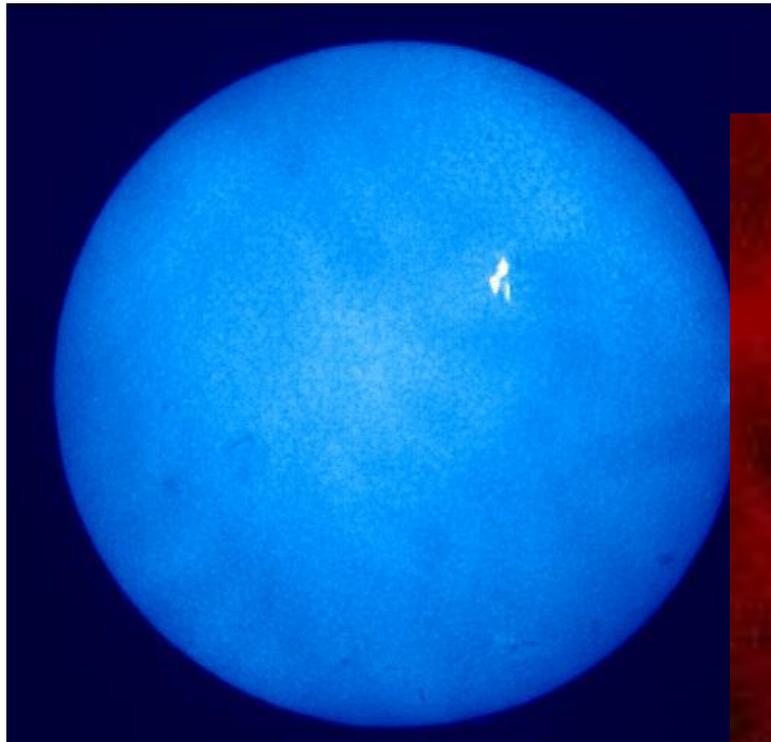
Hinode/XRT: 2007-01-03 16:19:03UT

太陽観測衛星「ひので」
で見た太陽

フレアの正体

黒点に蓄えられた磁気エネルギーによる爆発

磁気リコネクション
(磁力線つなぎかえ)

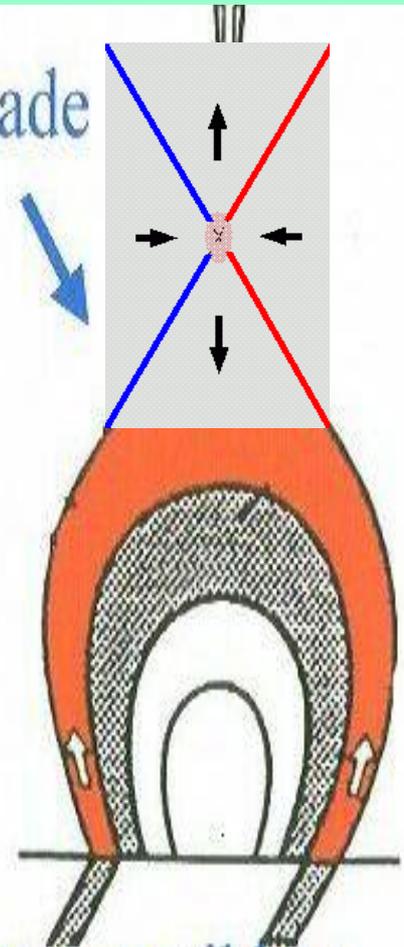


H α

X線

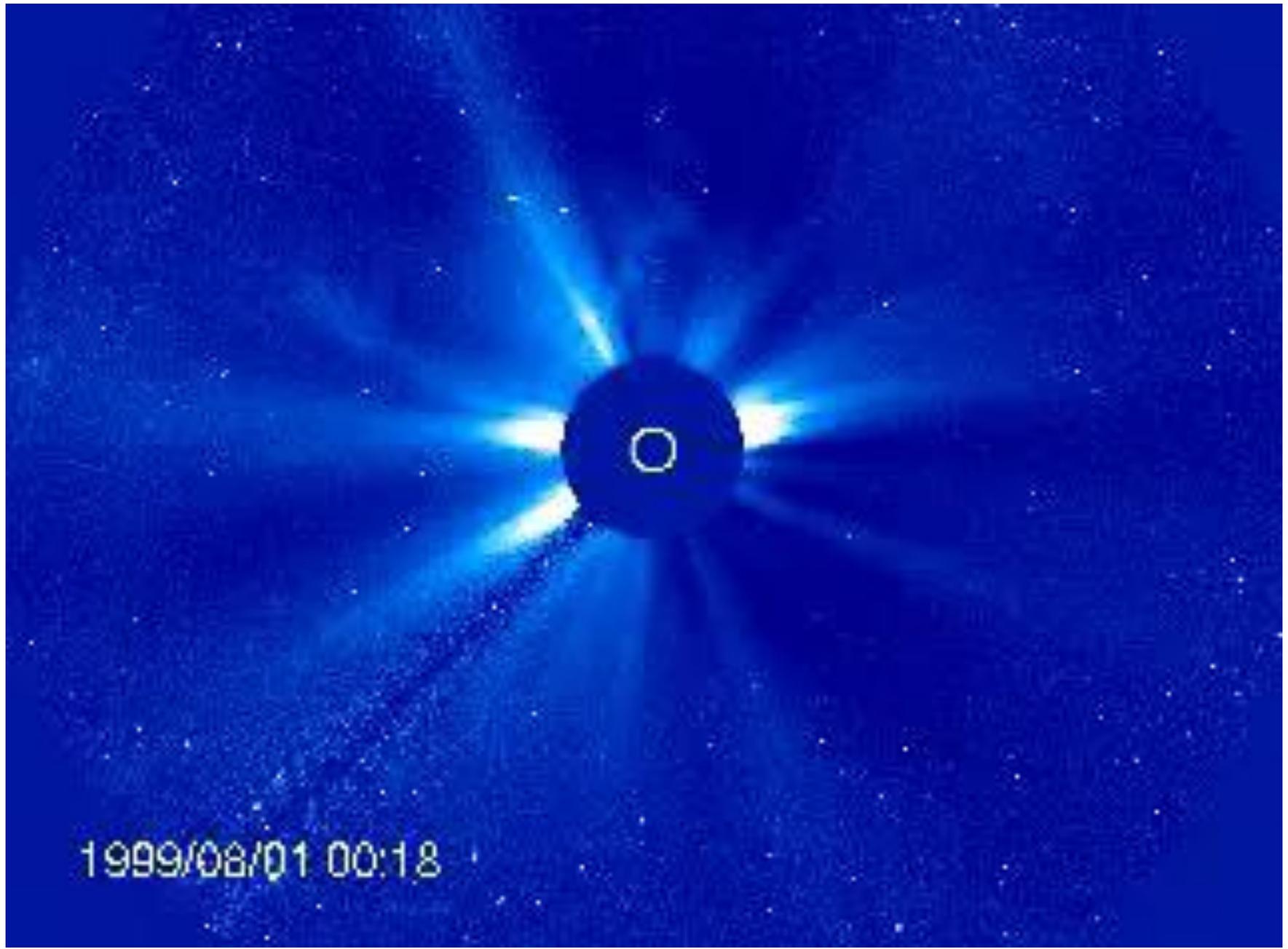


arcade



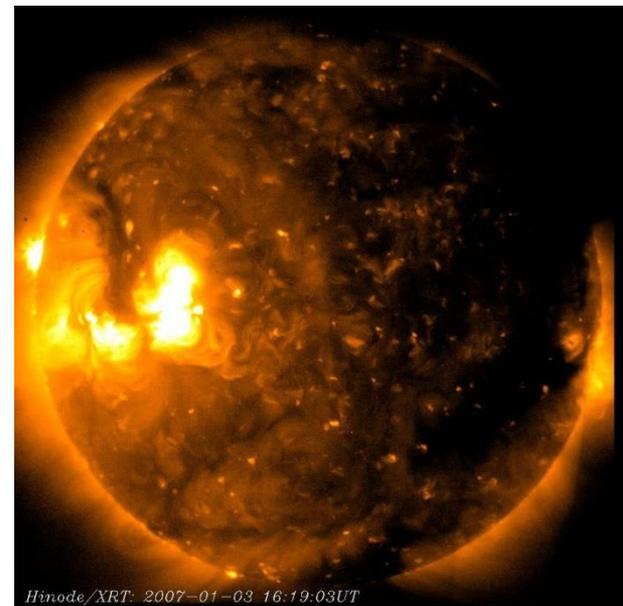
H α two ribbon

LASCO衛星で捉えられたコロナ質量放出

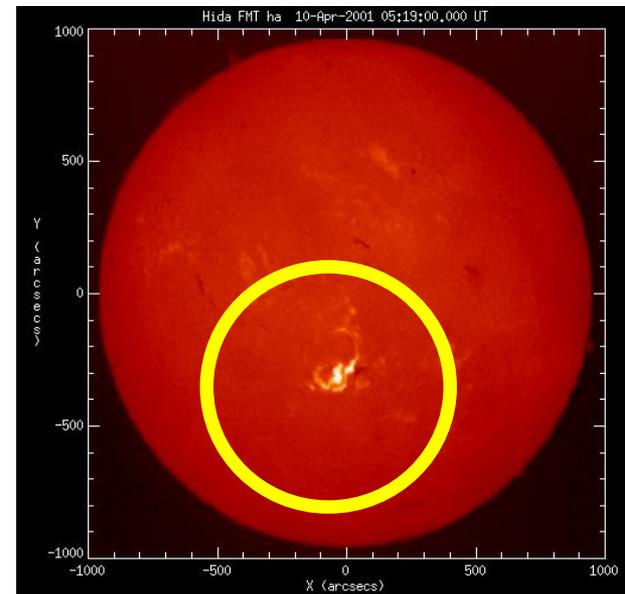


太陽でのフレア

- 太陽表面で起こる最もエネルギーの大きな爆発現象
- X線～可視光～電波まで全ての波長で観測される
- 時間尺度：分～時間
- 黒点周辺に蓄えられた「磁気」エネルギーの開放
- 全エネルギー： 10^{22} - 10^{25} ジュール



ひので衛星で見た軟X線
(1keV)での太陽(ISAS)

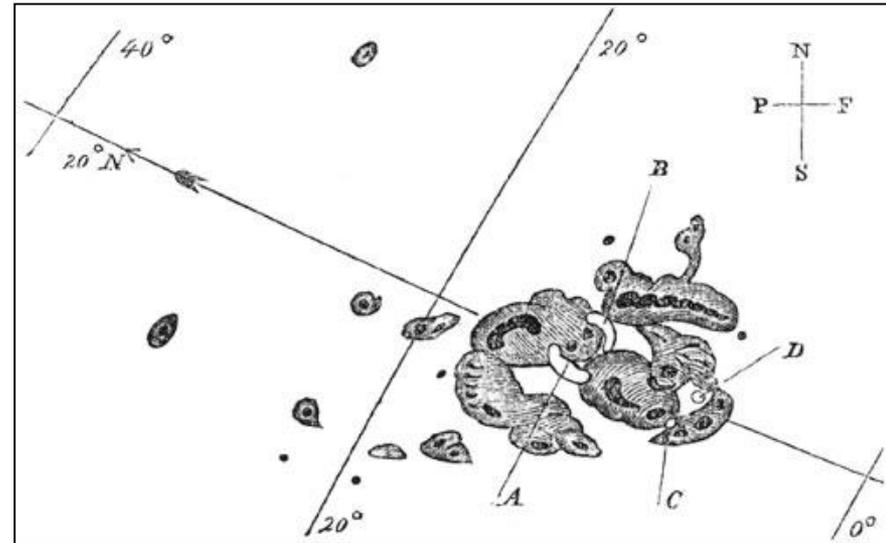


H α で見た太陽@京都
大学飛騨天文台

キャリントン・フレア

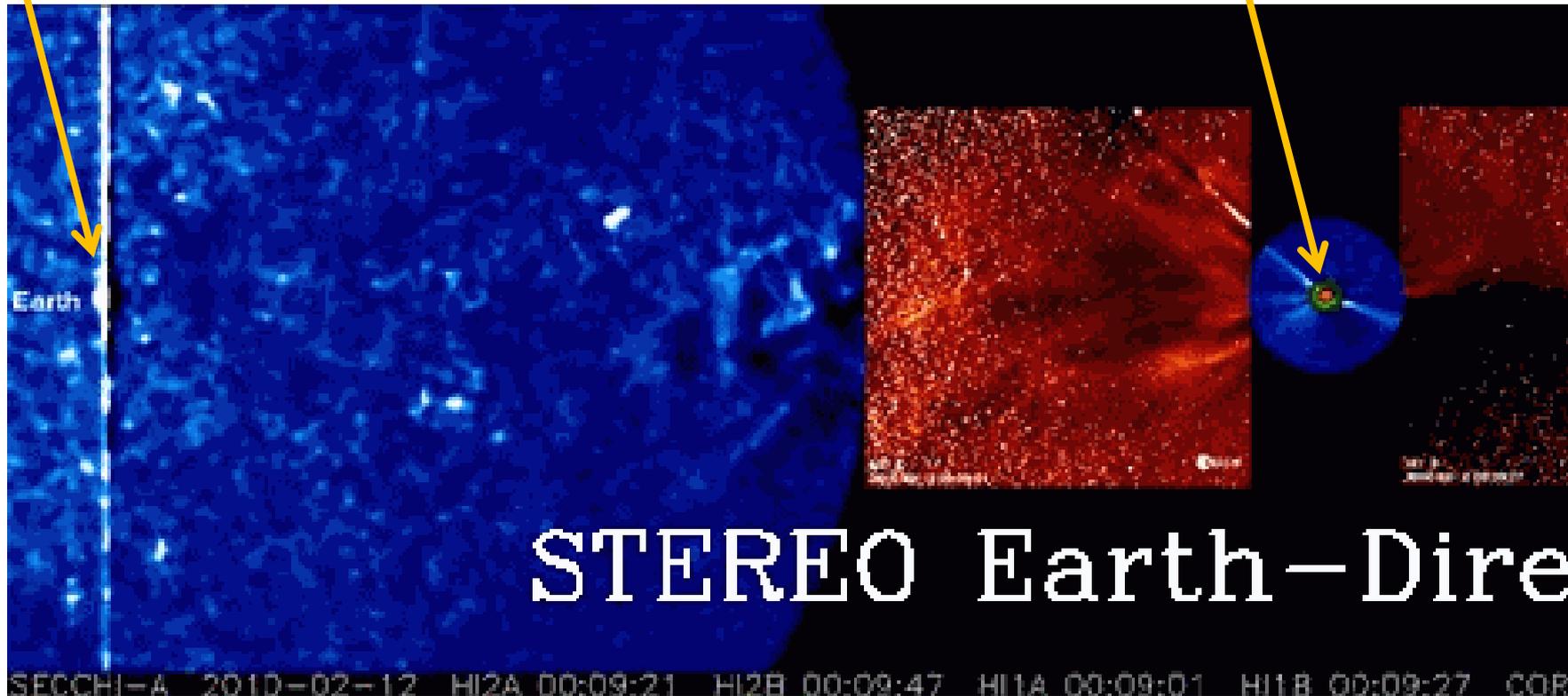
(1859年9月1日午前11時18分)

- リチャード・キャリントン(英国)によって、人類史上初めて詳細に記録されたフレア
- 約5分続いた白色光フレア
- 次の日にハワイや中米など多くの場所で非常に**明るいオーロラ**が観測された
- **10^{25} ジュール**程度のエネルギーと推定される
- 過去200年で最も**大きな磁気嵐**(> 1000ナノテスラ)
- ヨーロッパや北アメリカの広範囲で電信システムが故障



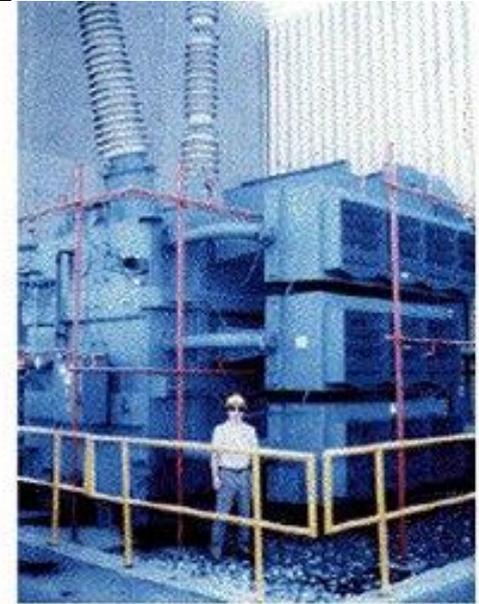
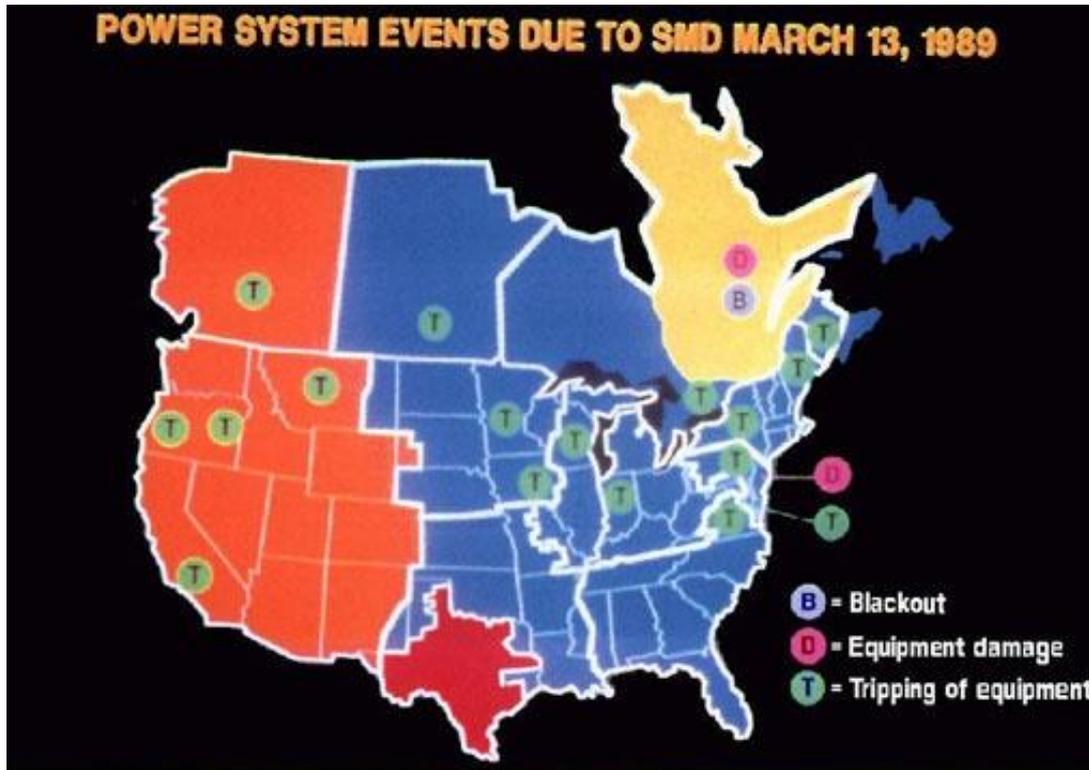
地球

太陽



太陽フレアで放出された大量の物質、放射線、高エネルギー粒子が惑星間空間を飛んでいく
→ 地球環境への影響！

1989年3月13日の磁気嵐による ケベック州の大停電



PJM Public Service
Step Up Transformer

Severe internal damage caused by
the space storm of 13 March, 1989



数年に1度くらいの規模の太陽フレア
→磁気嵐(～540ナノテスラ)
→600万人が被害を受ける停電

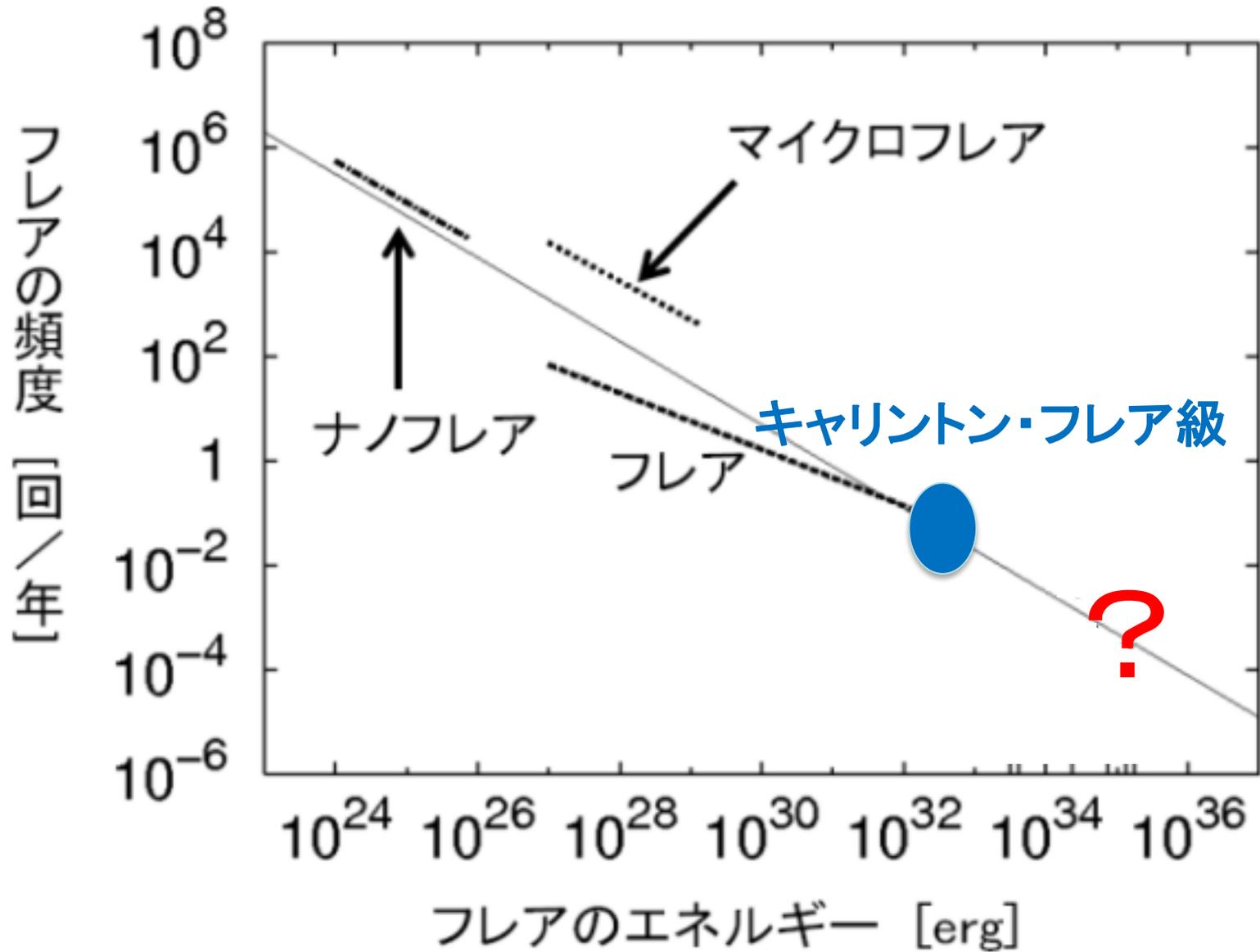
もし今キャリントン・フレアくらいの フレアが起こったら？

- 全地球規模の停電？
- 長時間の通信障害？
- 人工衛星が制御不能？
- 宇宙飛行士や飛行機内の人の大量被爆？

興味のある方はhttp://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/

御覧下さい。

フレアの発生頻度



太陽でスーパーフレア
は起こるのか？

明

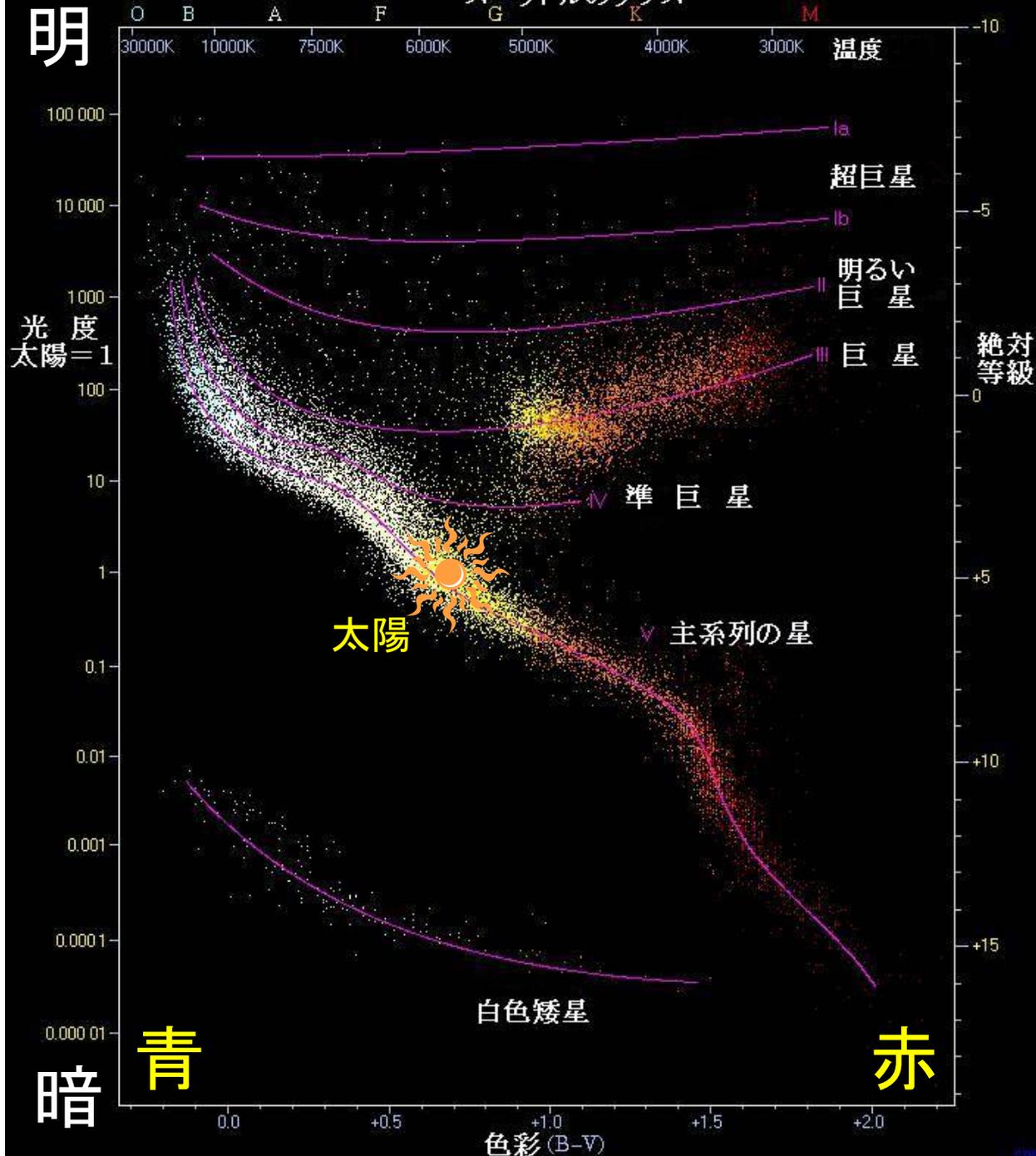
H-R図

星の色と明るさのグラフを作ったとき、非常に特徴的な分布になる。

温度の高いほうからO-B-A-F-G-K-M型と分類される。(Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me!)

※近年核融合反応が起こらないほど軽くて暗い赤い星が発見・研究されており、L型T型と分類されている。

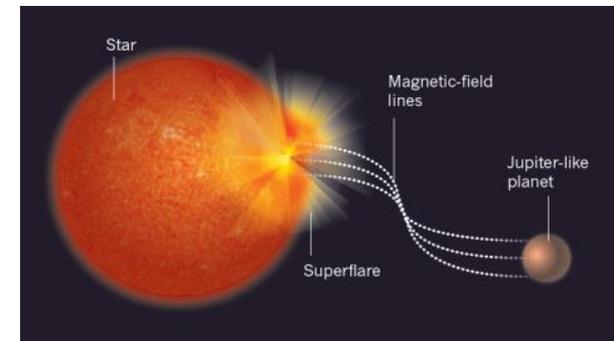
。



太陽に近い星でのスーパーフレアの発見

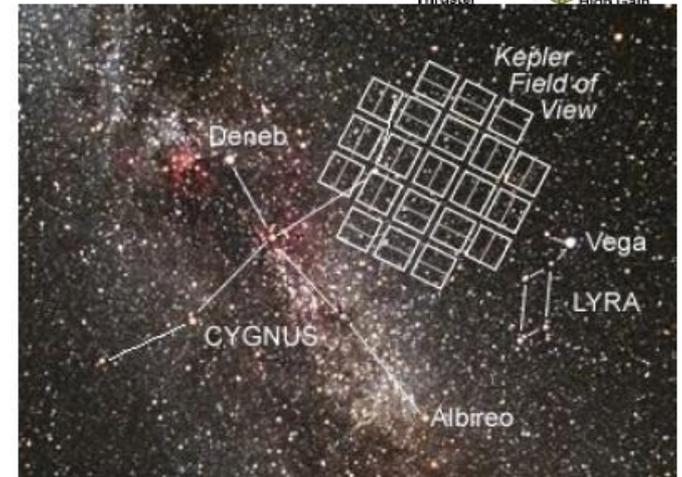
Schaefer, B. E., King, J. R., Deliyannis, C. P.
ApJ, 529, 1026 (2000)

- キャリントン・フレアの $10 \sim 10^6$ 倍のエネルギーのフレアを9例発見(ただしいくつか疑わしいデータも含まれる)
- スペクトル型はF8 – G8
- 太陽と同程度に自転が遅く、若くない。
- でも大きな木星のような惑星があるかもしれない？



系外惑星探査衛星「ケプラー」

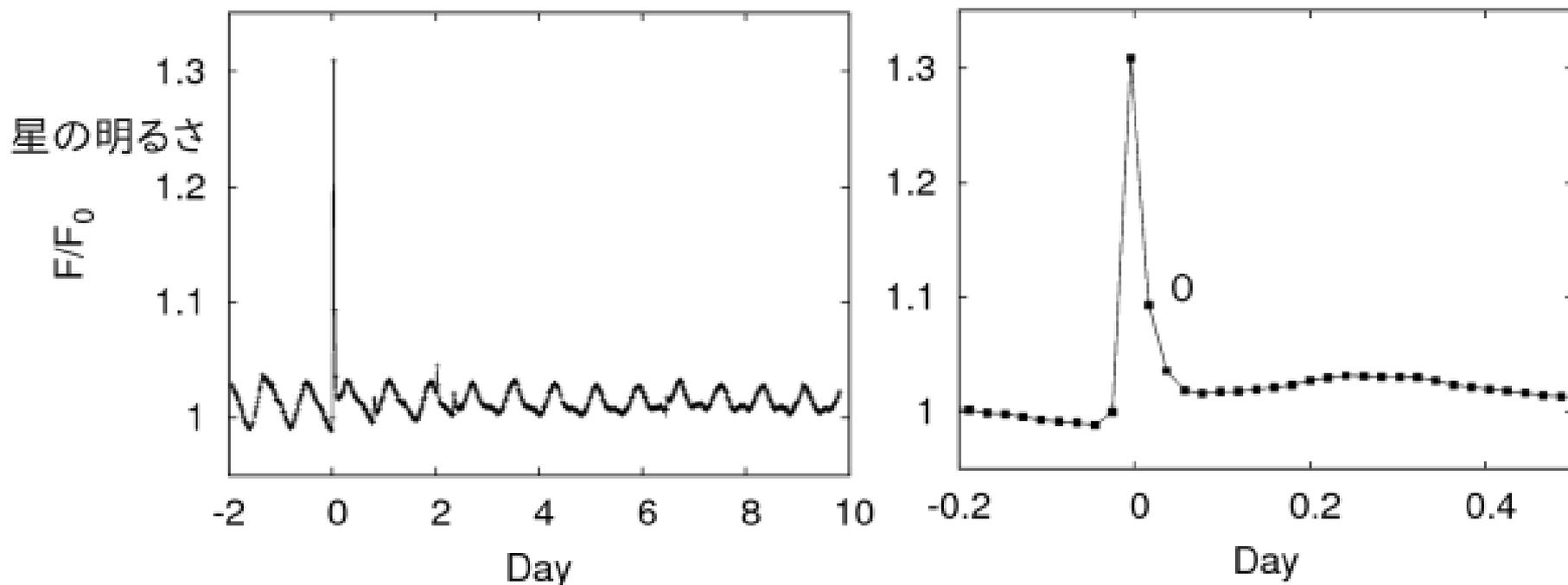
- 惑星が星の前を横切るときに、星が暗く見えるところを捕らえるための衛星
- 口径0.95mの望遠鏡
- 限られた領域にある約15万個の星を連続的に観測
- 約30分間隔で非常に高い精度($<10^{-4}$)で観測。



2009年4月から2010年8月までに得られた約9万個の太陽型星(G型主系列星)のケプラーデータの観測から、約300個の星で約1500個のスーパーフレアを見つけた！ Shibayama et al. 2013, ApJS, 209, 5; see also Maehara et al. 2012, Nature, 475, 478).

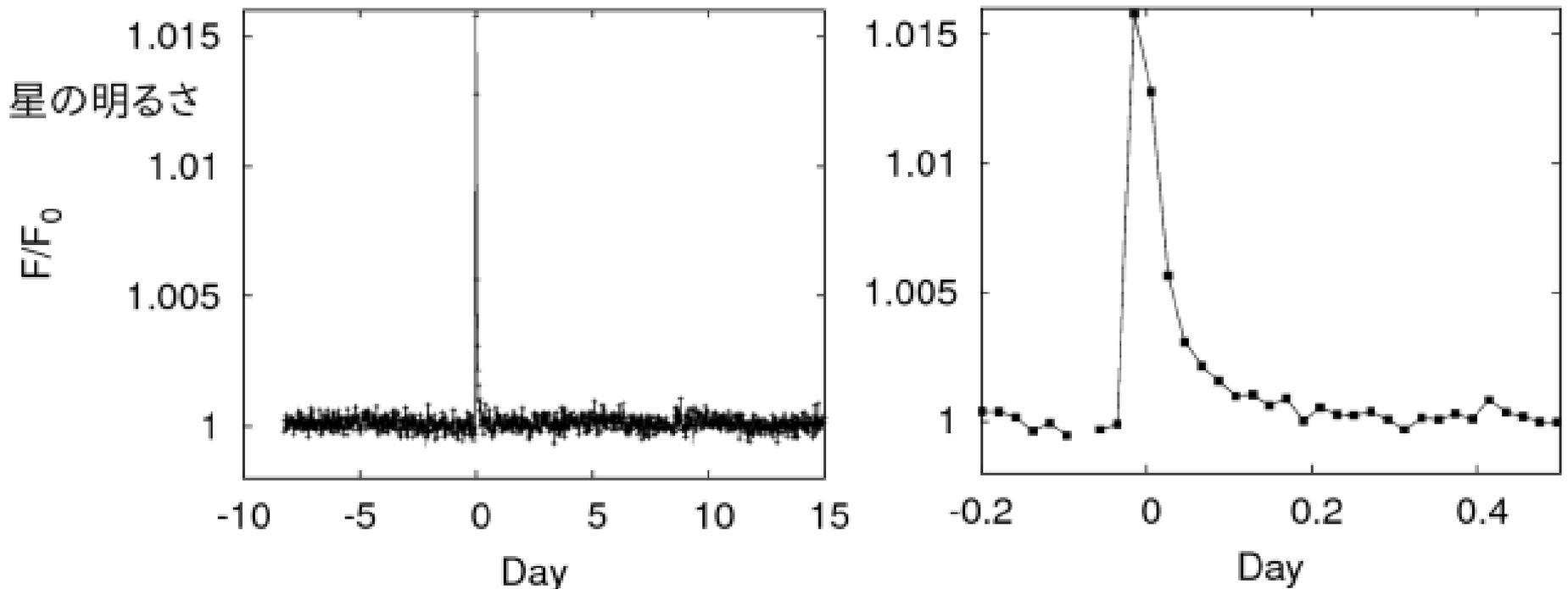
検出例 その1

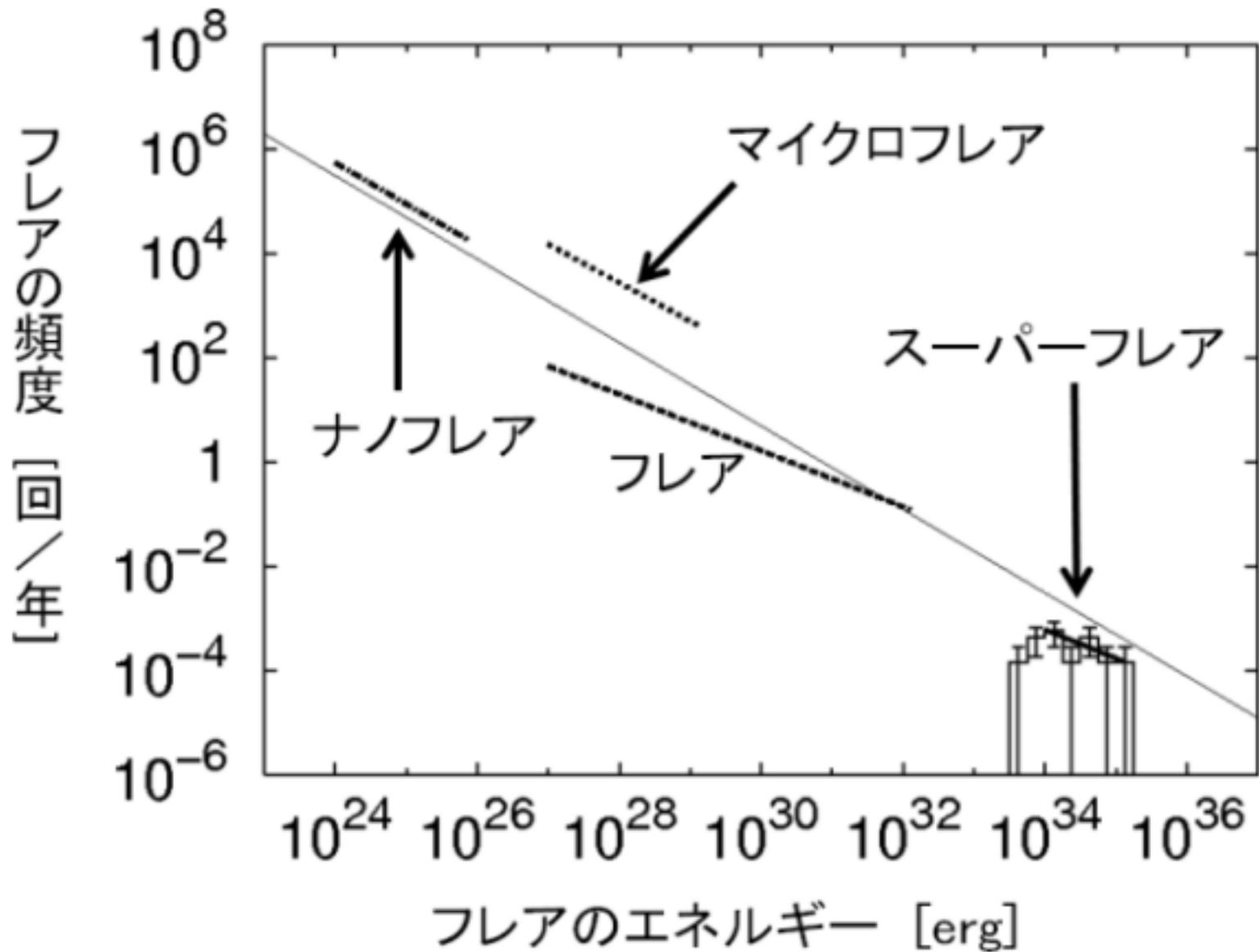
- KIC12354328
- フレア振幅 星の明るさの約30%
- エネルギー 2.6×10^{35} erg (太陽の2600倍)



検出例 その2

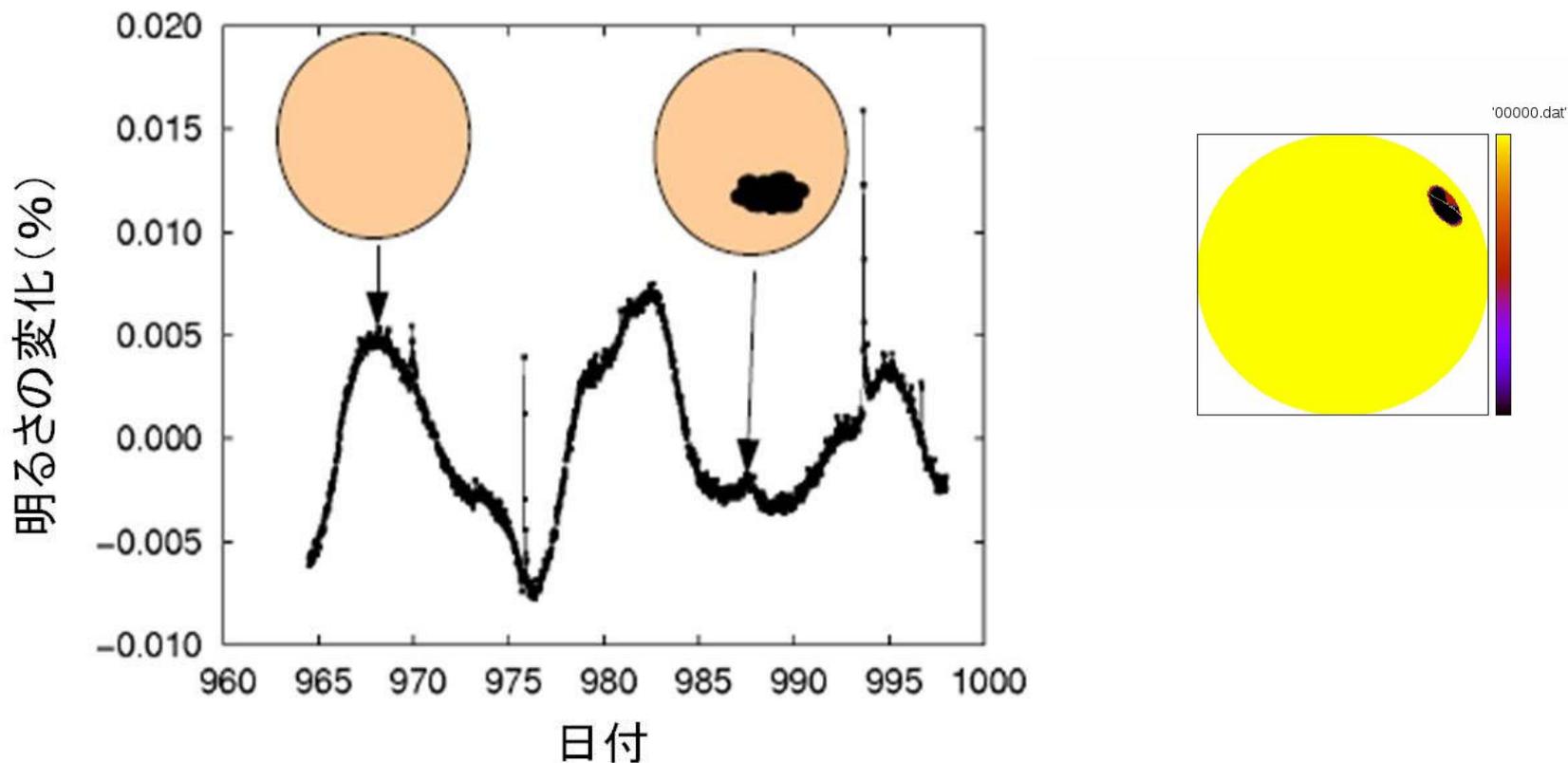
- KIC11401109
- フレア振幅 星の明るさの約1.6%
- エネルギー 4.4×10^{34} erg(太陽の440倍)





スーパーフレアは数千年に1度は起こりうる？

スーパーフレア星の明るさの変化

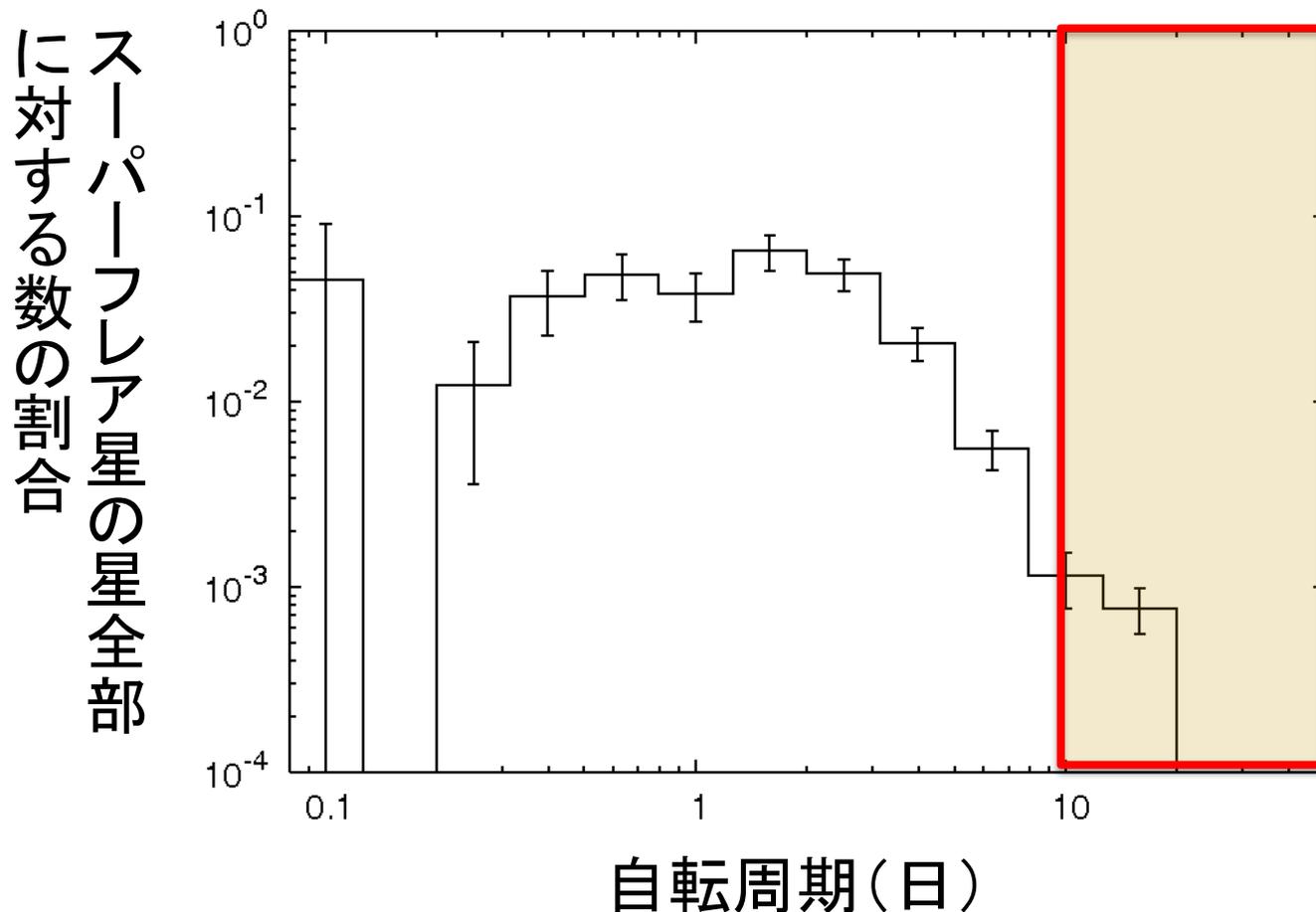


明るさの変化の周期 = 自転の周期

明るさの変化の振幅 = 黒点の大きさの目安

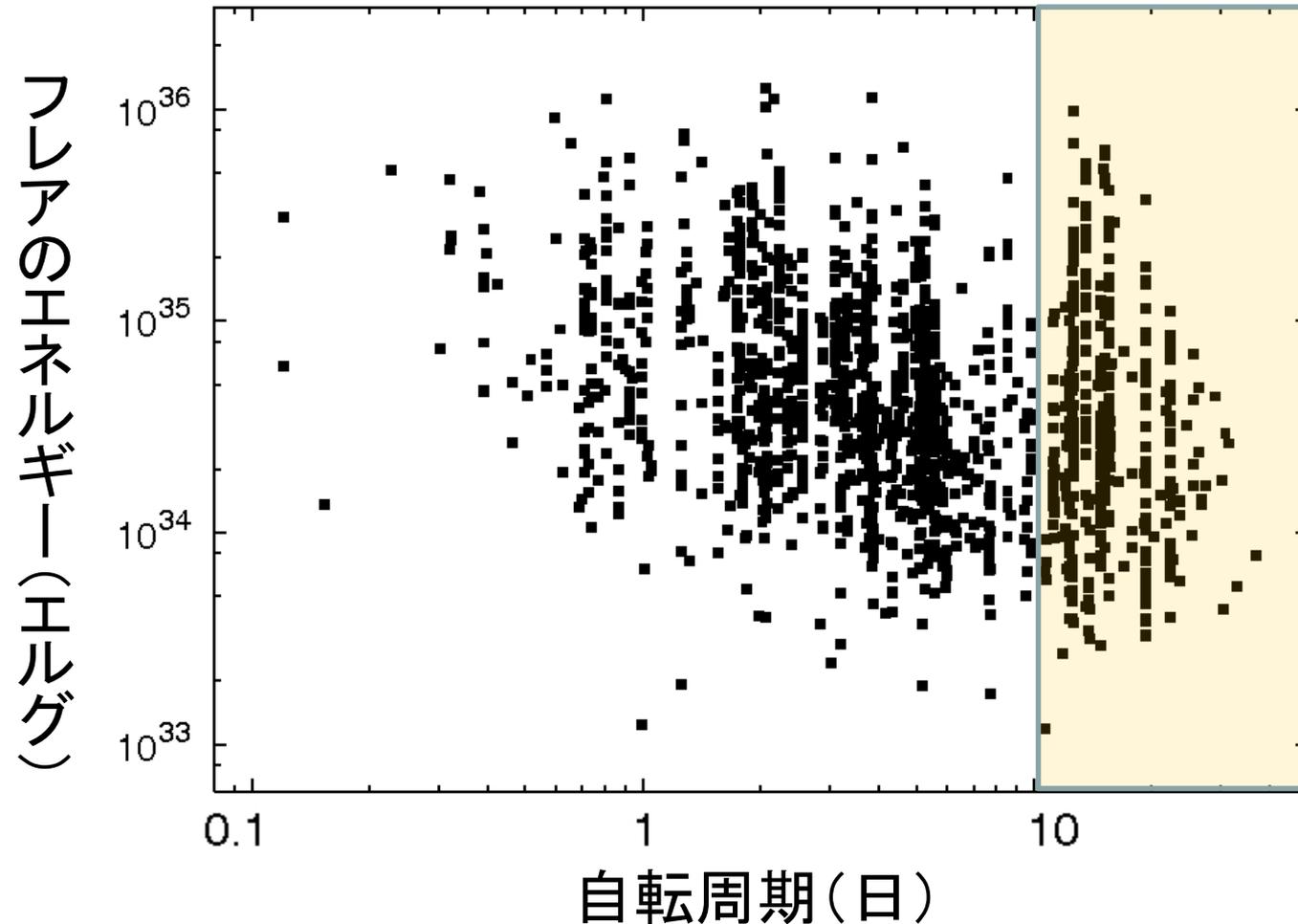
と考えられそうだが本当か？

自転周期と(スーパーフレア星の星全部 に対する数の割合)の関係



自転周期が長い星ほどスーパーフレア星の割合は少ない。でも確かに太陽くらいの自転周期(25~27日)でもスーパーフレア星は存在する！

自転周期とフレアのエネルギーの関係



どういう自転周期でも一番大きなフレアのエネルギーは 10^{36} エルグ(最大級の太陽フレアの1万倍)くらい！

すばる望遠鏡で詳しく観測して
星の性質を徹底解明！
太陽と似ているのか？

すばる望遠鏡での高分散分光観測

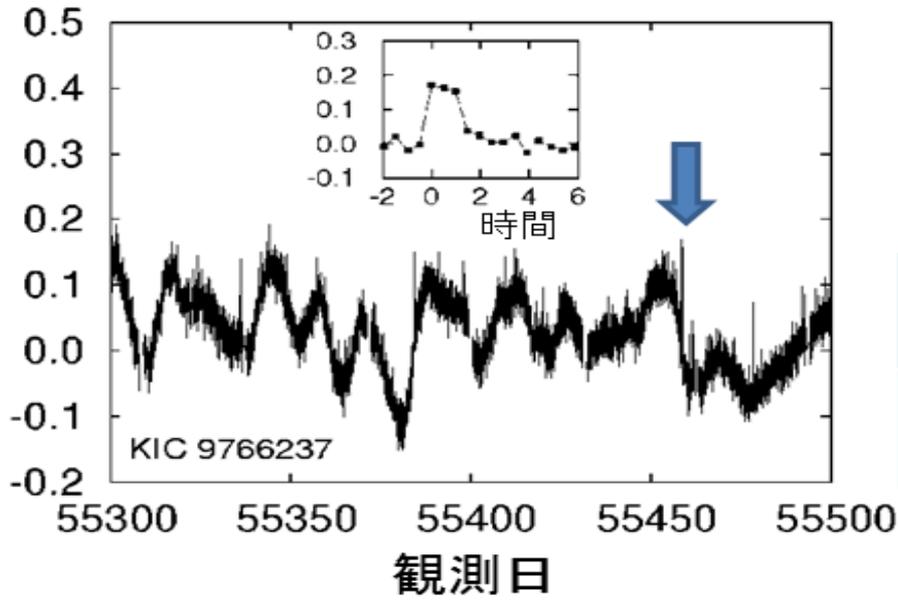
- 星の自転速度、連星かどうか、表面重力(半径の指標)、温度、金属量などを調べるために、すばる望遠鏡を用いて高分散分光観測。
- これまでにS11B, S12A, S13Aの観測期間で、計50個のスーパーフレア星を観測。



この中で、2つの太陽に非常によく
似た星を発見！

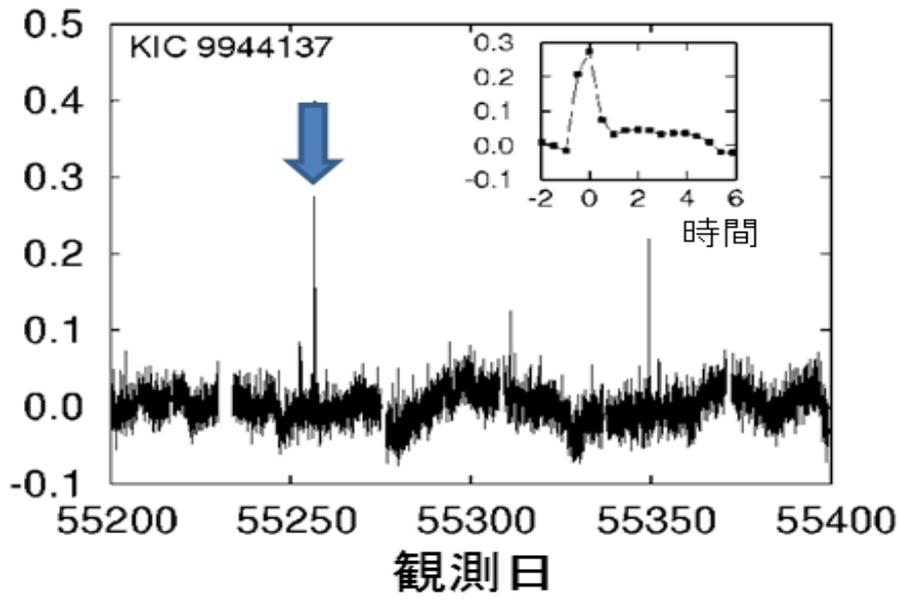
(Nogami et al. 2014, PASJ 66, L4)

明るさの変化(%)



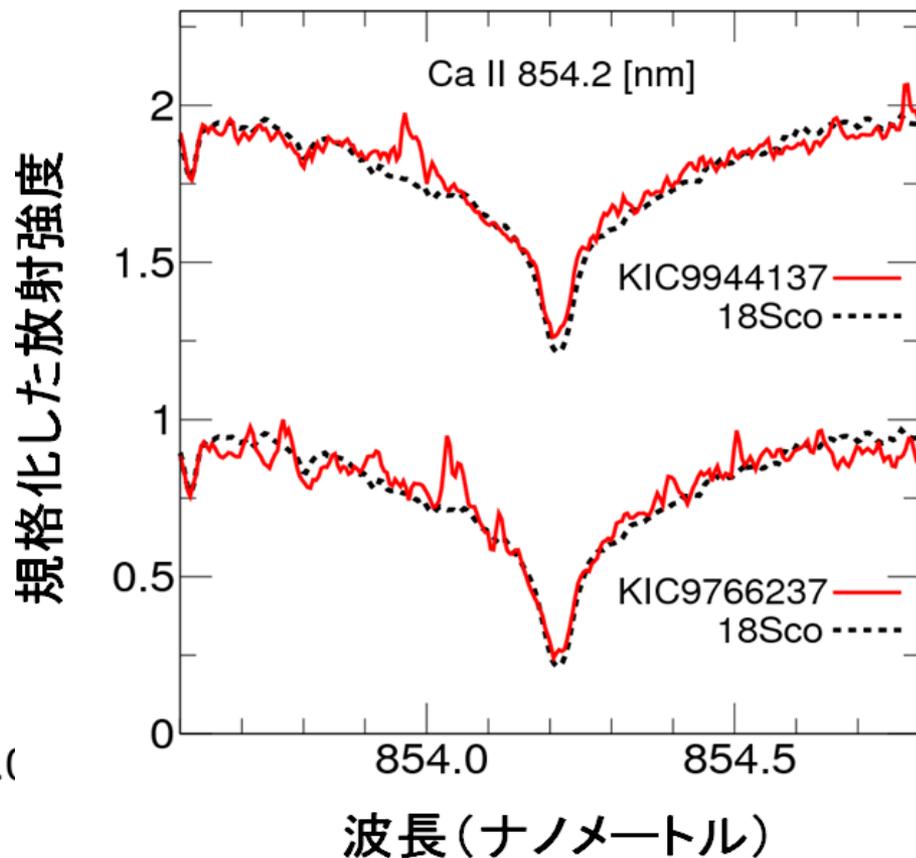
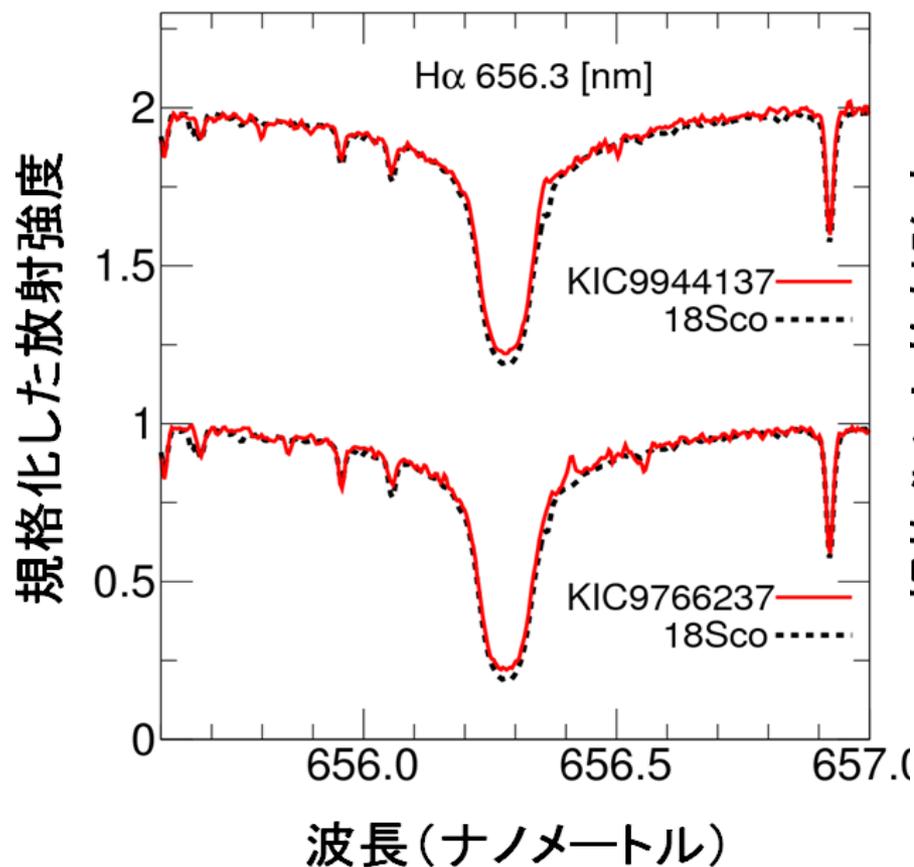
星の名前	周期 [日]
KIC9766237	21.8
KIC9944137	25.3

明るさの変化(%)



- キャリントン・フレアの100倍程度のエネルギーのスーパーフレア(明るさの変化~0.1%、継続時間:1時間強)を検出。

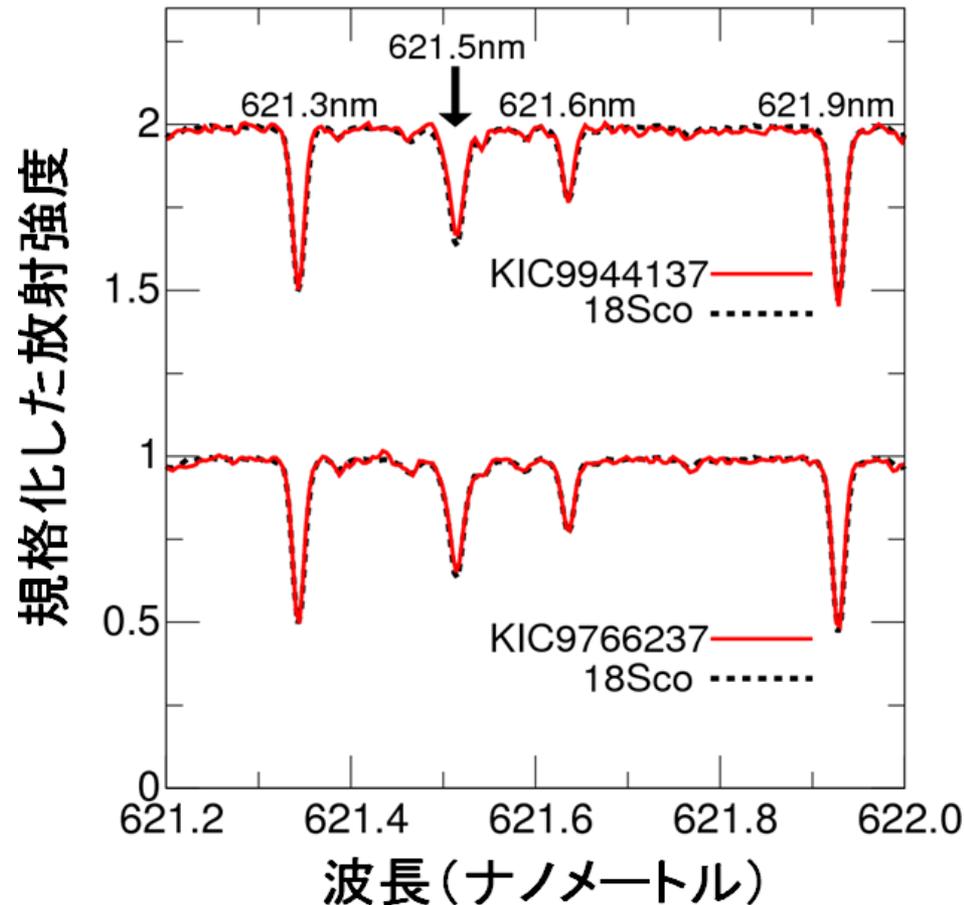
活動度の指標とされる水素(H α)とカルシウム(Ca II 854.2)



太陽の双子星と言われるほどよく似ているさそり座18番星とほとんど変わらない。

→ 太陽と似たような活動度！

活動度以外の星の性質を調べる金属の吸収線



左右対称(→**2つの星の成分が見えてはいない**)
で、さそり座18番星とほぼ重なっている(同じくらいの
自転速度~毎秒2kmで鉄の含有量が同程度)。

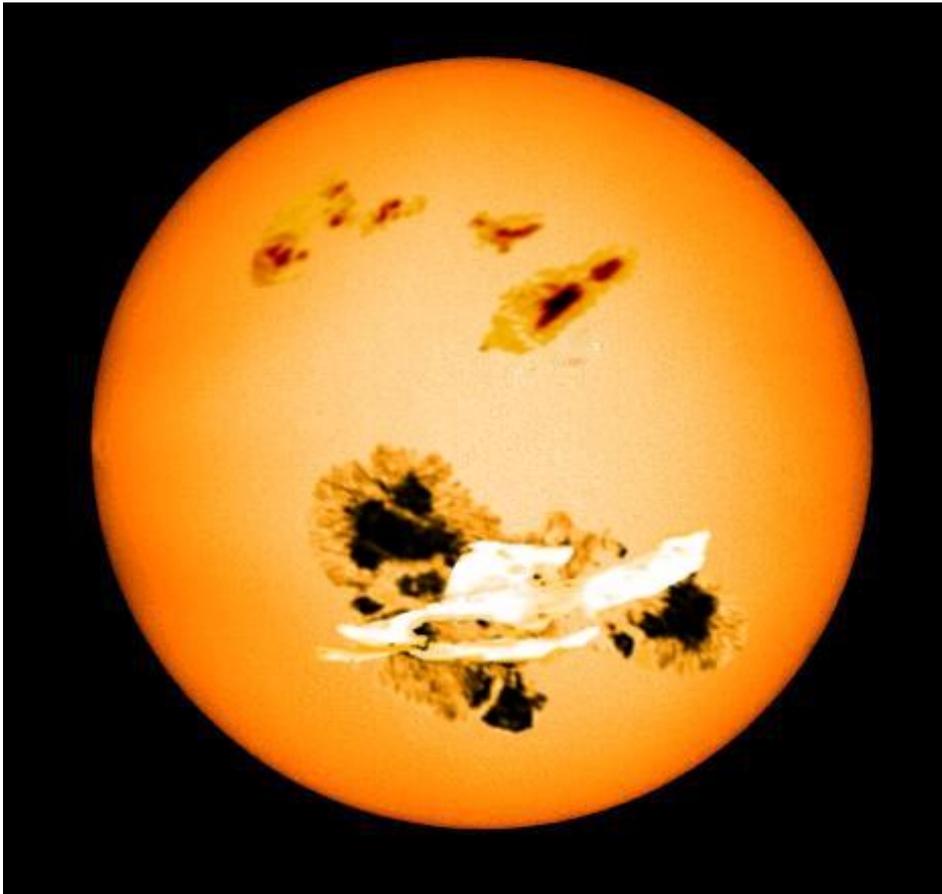
星	自転 周期 [日]	射影自転 速度 [km/秒]	温度 [K]	表面重力 Log g	金属量 [Fe/H]	リチウム 含有量 A(Li)
KIC97662 37	21.8	2.1(0.3)	5606(40)	4.25(0.11)	- 0.16(0.04)	<1.0
KIC99441 37	25.3	1.9(0.3)	5666(35)	4.46(0.09)	- 0.10(0.03)	<1.0
Sun	~25	2.0	5725	4.4	0.0	0.92

この2つの星の性質は、(スーパーフレアが観測されていること以外)太陽に非常に近いことがわかった。

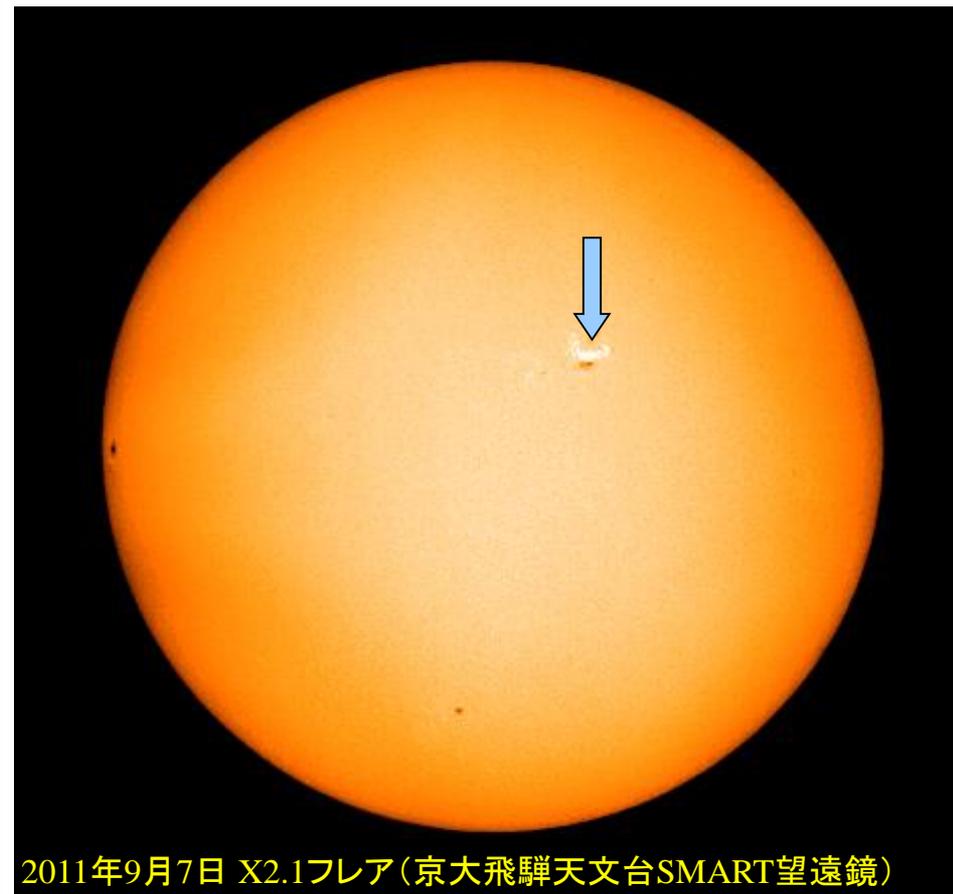
→太陽もスーパーフレアを起こす可能性があることを支持する！

太陽でもめっちゃくちゃ大きな黒点が出てきたら、
スーパーフレアが起こるかも？

スーパーフレアの想像図



太陽フレア
(実際の観測)



2011年9月7日 X2.1フレア(京大飛騨天文台SMART望遠鏡)

スーパーフレア星の観測で

- スーパーフレアによる放出物質は？
(質量、速度、、、)
- そもそもスーパーフレアのメカニズムは太陽と同じと考えていいのか？
- 巨大黒点のどのよう^に生まれ成長し消滅していくのか？

スーパーフレアは本当に太陽で起こるのか？

- スーパーフレアを起こした星は**本当に太陽と同じような特徴を持つのか？**
 - 活動性、磁場強度、自転速度、金属量、、、
- スーパーフレアを起こす星は**いつもスーパーフレアを起こす？スーパー活動期のみ？**
 - 長期的にモニターして、活動性の変化を調べる
 - 連続高分散分光で黒点の様子、差動回転の様子を調べる
 - 太陽はスーパーフレアを起こせるか？その予兆は？大きな被害を防げるか？

スーパーフレアが起きたら 地球はどうなるか？

	巨大フレア (1989年3月13日)	キャリントン・フレア (1859年)	スーパー・フレア (巨大フレアの100~1000倍)
放射線 (航空機内の推定値)	4mSv	20mSv	400~ 4000mSv?
地磁気嵐	540nT (全米でオーロラ)	1760nT (赤道帯でオーロラ)	5000~ 15000nT?
社会への影響	ケベック州大停電 電波通信障害 気象衛星故障 衛星放送停止 (被害総額数100億円以上)	電信局の火事 >今起きたら 中高磁気緯度の 大停電 多くの衛星の故障 地球規模の通信障害 GPS故障 (被害総額1兆~2兆ドル)	地球規模の大停電 オゾン層破壊 全衛星の故障 地球規模の通信障害 全航空機飛行停止 船舶運航停止 GPS停止 ITインフラの破壊

まとめ

最重要未解決課題

太陽でもスーパーフレアは起きるのか？

達成目標

高分散分光装置 + 高頻度継続観測 + 理論的データ解釈
の統合により、世界に先駆けて、スーパーフレアの
物理的メカニズムを解明する

本研究の緊急性

- スーパーフレア研究における世界的リードの維持
- 低頻度大規模災害への警告と備え

世界の天文学発展へ

- 恒星活動の長期変動の解明
- 系外惑星の環境への影響