



2017/2/20 17:30-17:55(20+5分) @京都大学
「木曽広視野サーベイと京都3.8m即時分光
によるタイムドメイン天文学の推進」

3.8m低分散分光や木曽広視野サーベイと スーパーフレア研究

野津 湧太

(京都大学 宇宙物理学教室 D1)

前原裕之(国立天文台岡山), 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)

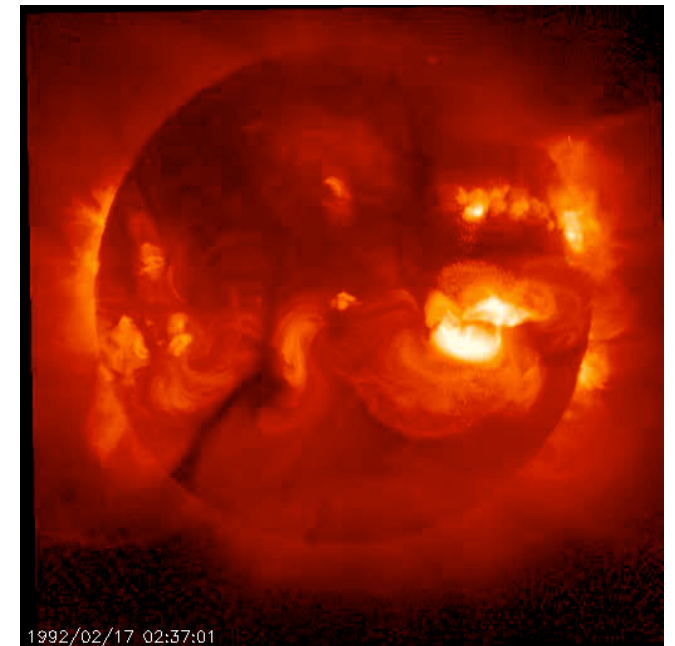
Outline

- これまでのスーパーフレア研究
- 3.8m望遠鏡(+KOOLES-IFUなど)を用いたスーパーフレア研究
- 木曾広視野サーベイ(Tomoe)とスーパーフレア研究
～超新星サーベイのデータから分かること

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)

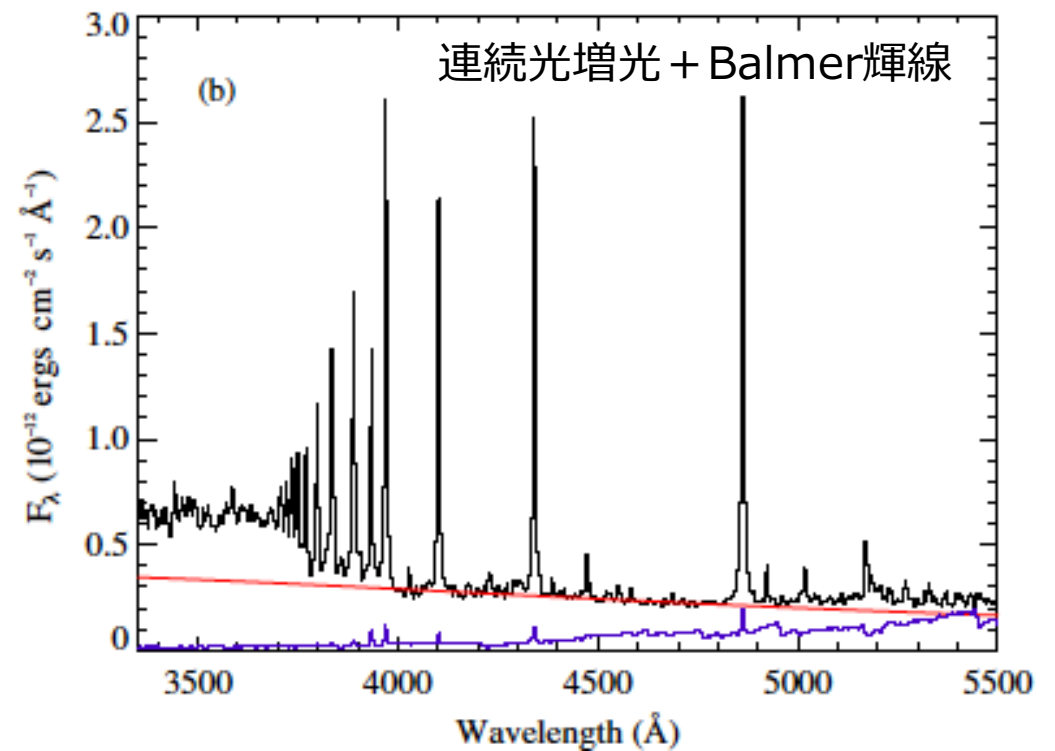
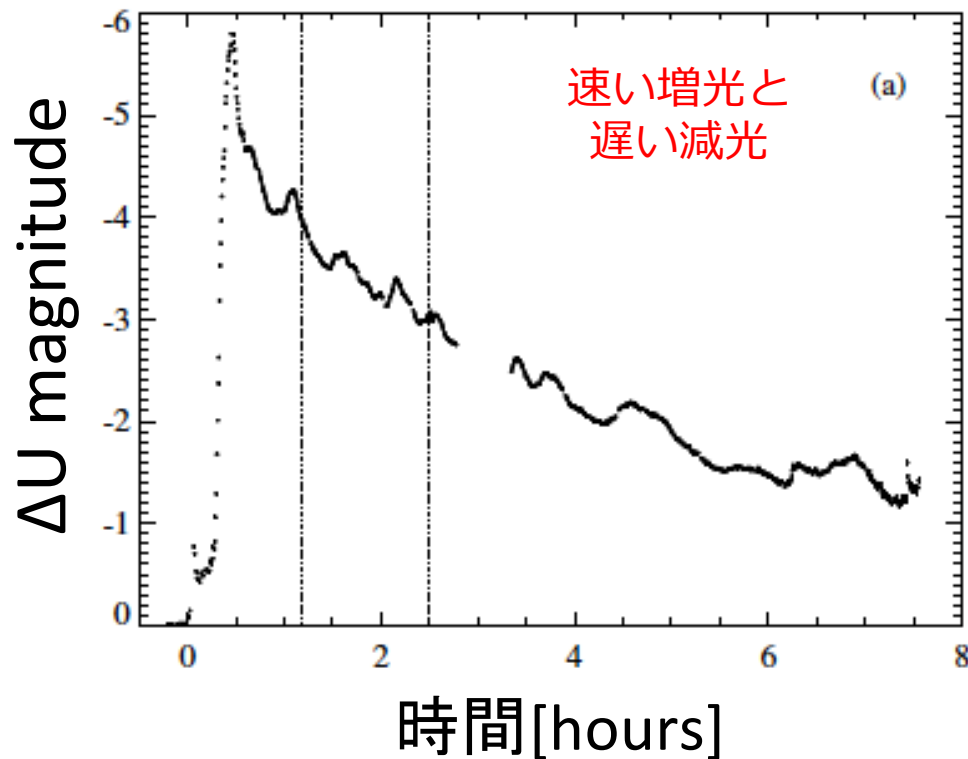


ようこう衛星
軟X線観測

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

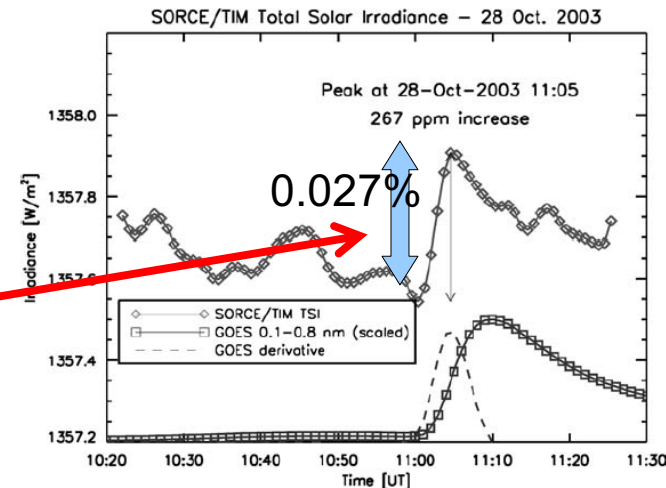
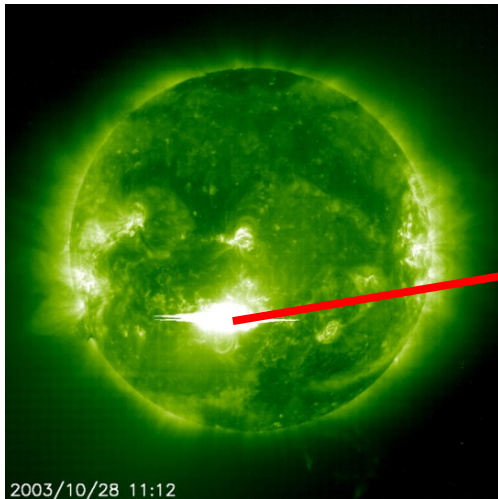


赤線: 10,000K黒体放射
紫線: 静穏期スペクトル

図: dM4.5e星YZ CMiでのフレア(Kowalski+2010)

太陽型星のフレア

- ・フレアが起きてても、星の明るさはほとんど変化しない
最大級の太陽フレアでは、太陽の明るさは1万分の1程度明るくなる
太陽フレアの1,000倍だとしても、10%しか増光しない
- ・スーパーフレアはめったに起こらない
太陽だと1000年に1回??
- ・フレアは短時間の突発的な現象
→ 非常に多くの星を、極めて高い精度で、連続して明るさを測定し続ける必要がある。



Kopp et al., Solar Phys. 230, 129 (2005)

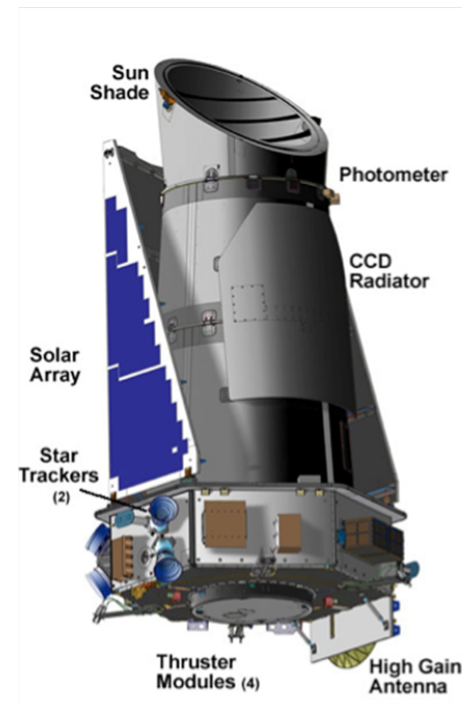
ケプラー衛星

- ・ 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)

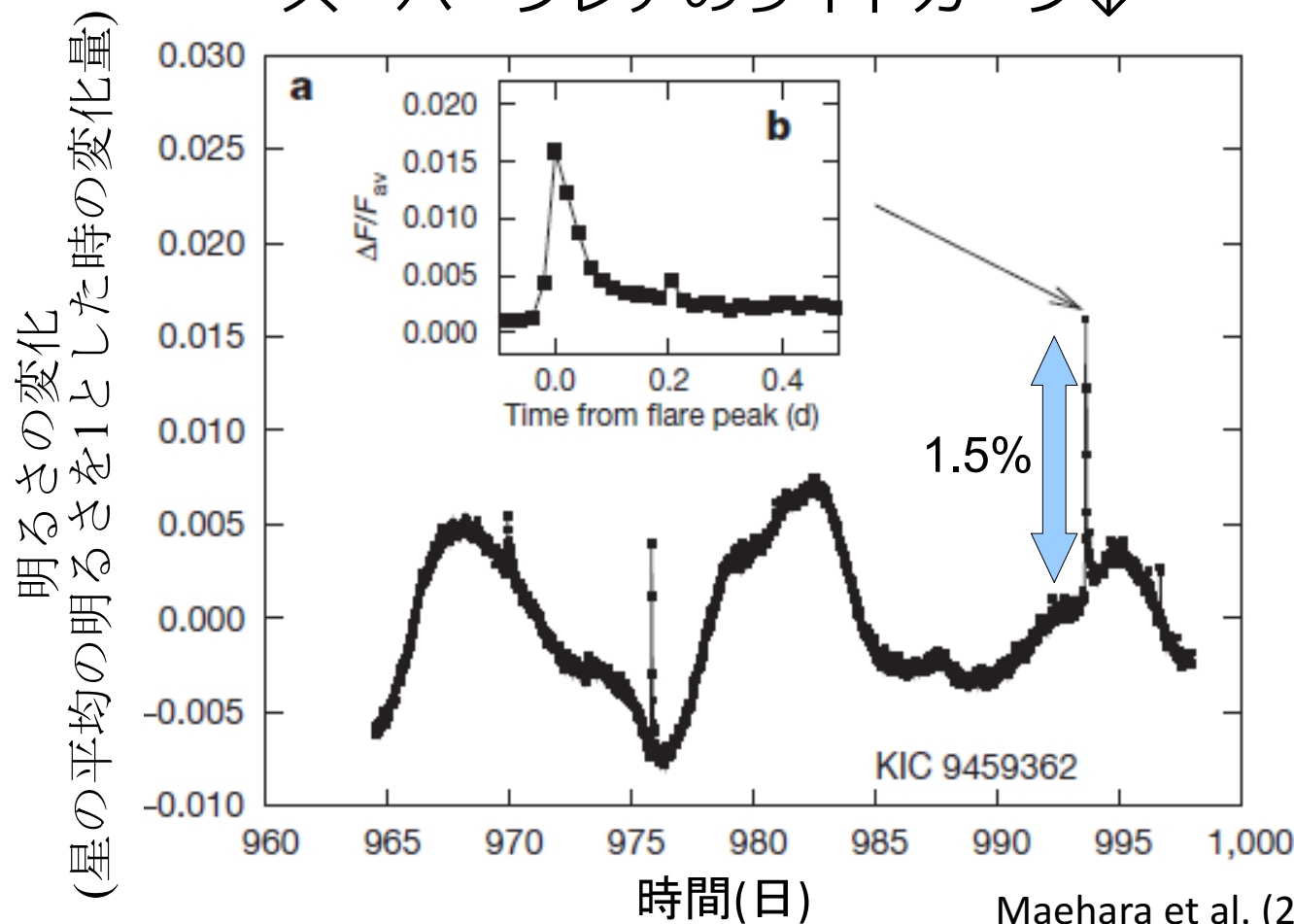


太陽型星におけるスーパーフレアの発見

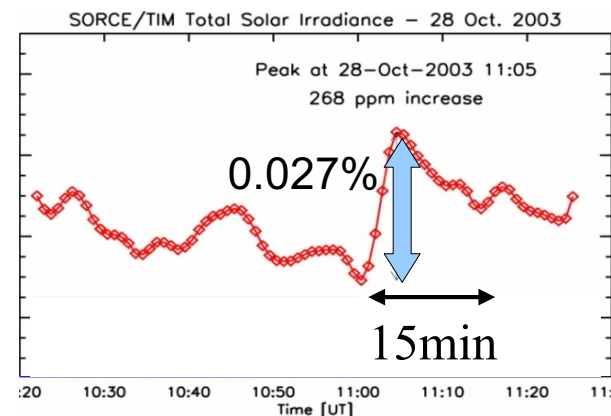
太陽型星(G型主系列星)において、
スーパーフレア($10^{33} - 10^{36}$ erg : 最大級の太陽フレアの
10~1万倍)を多数(1000例以上)発見。

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

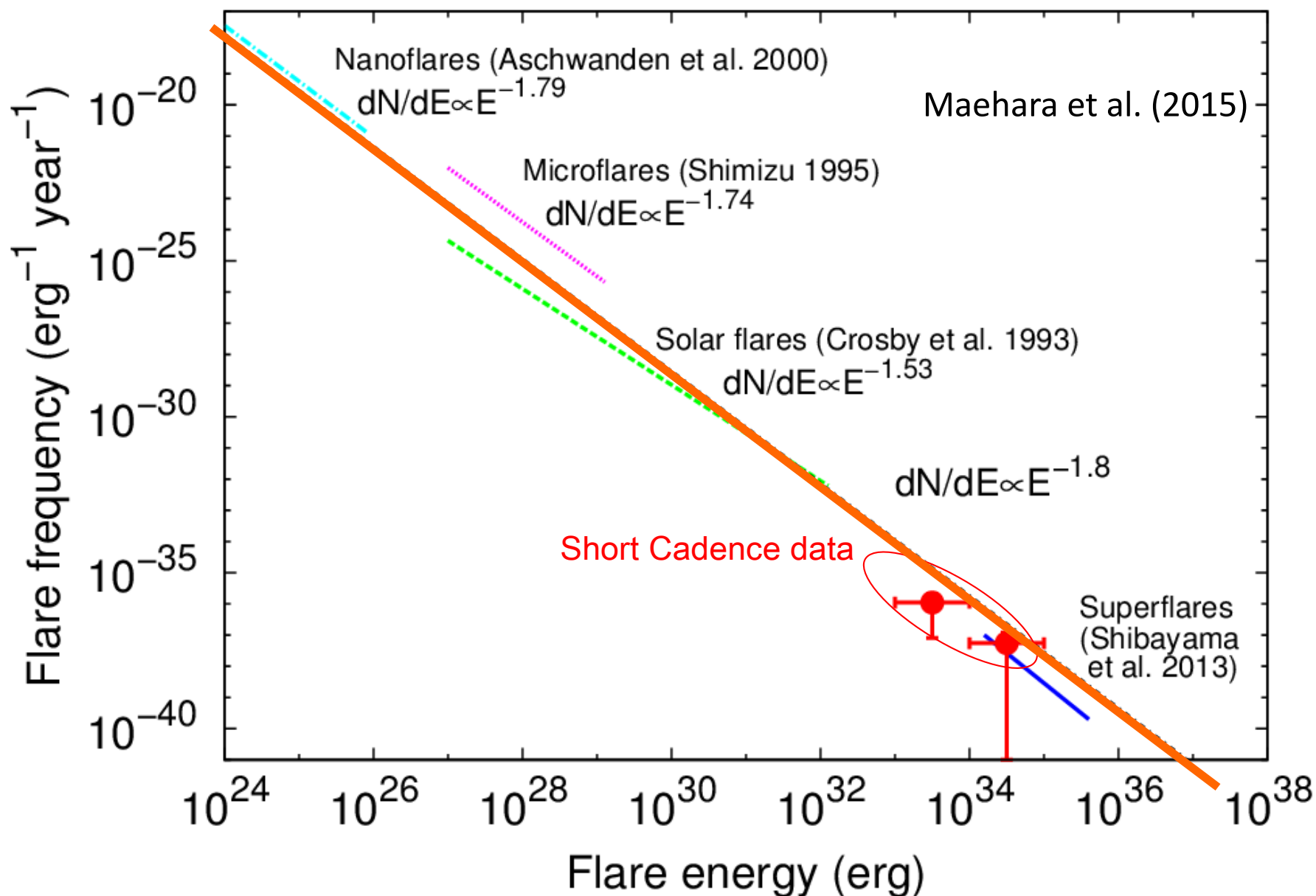
スーパーフレアのライトカーブ↓



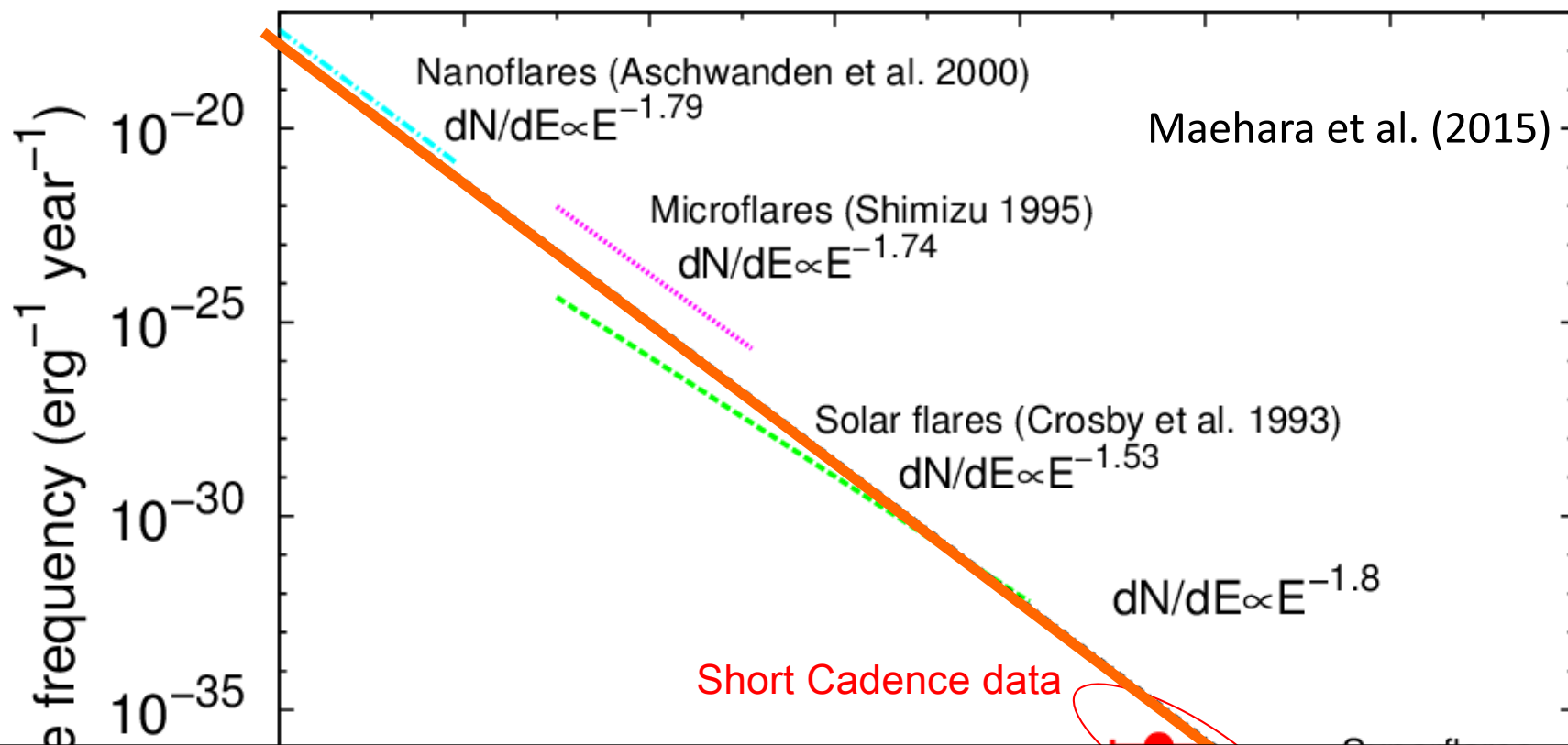
比較的大きな太陽フレア
による太陽全体の明るさ
変化の例 (可視光) ↓



スーパース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

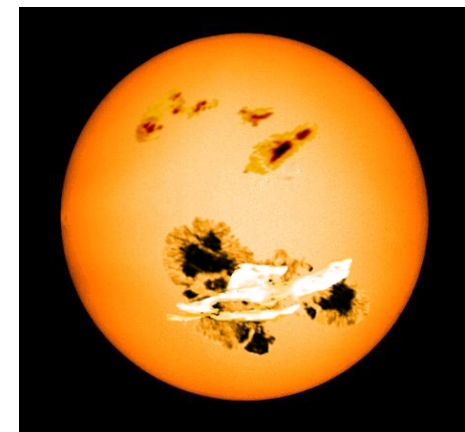
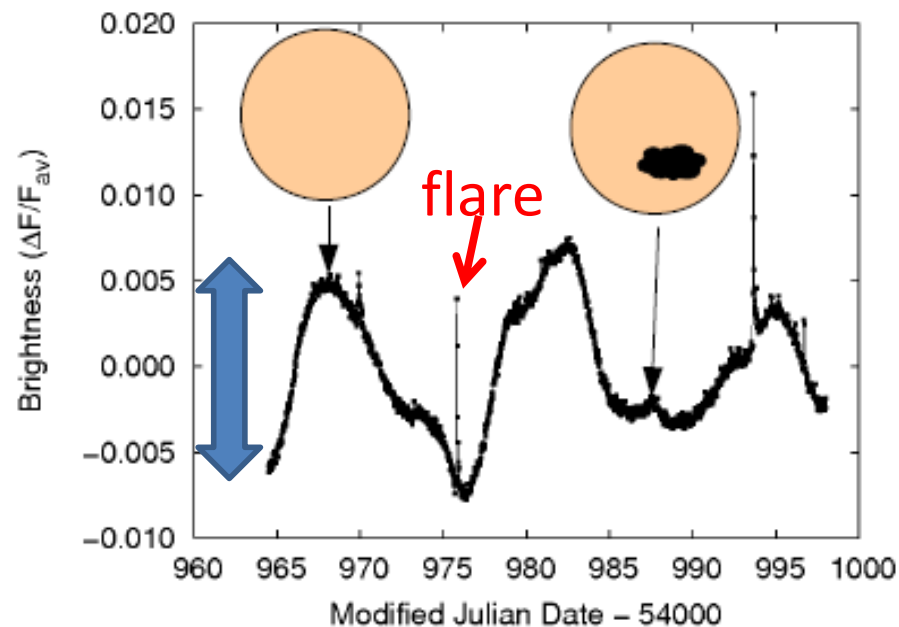
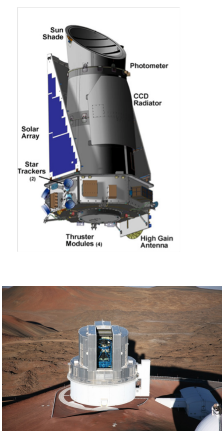


太陽でも数千年に1回の頻度で、
スーパーフレア発生！？

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の50星の分光観測で概ね確認(Notsu+2015a&b)
- ⇒ **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。



スーパーフレア星想像図

これまでのスーパーフレア研究 まとめ

- ・フレアの発生頻度分布

太陽フレアの発生頻度分布の延長上による

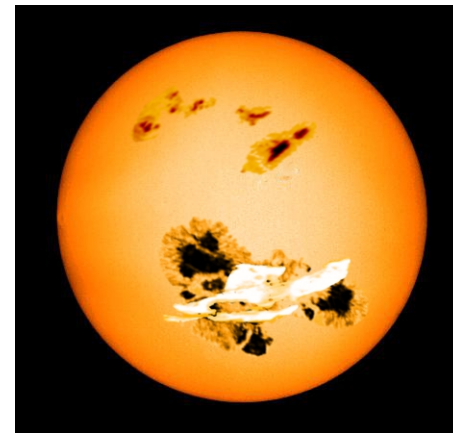
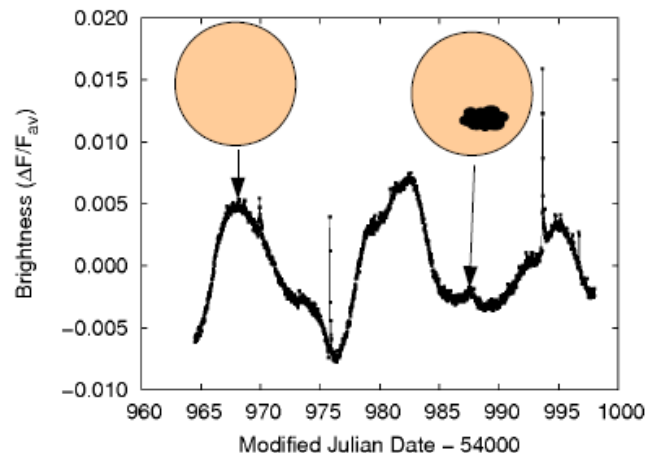
平均すると 10^{34} ergのフレアは $\sim 10^3$ 年に1回

- ・ケプラー明るさ変動 + すばる分光観測

→ 「巨大黒点の存在」がスーパーフレアの理解の上で重要

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！！

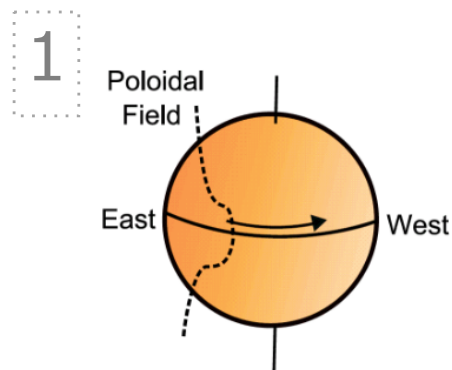


Outline

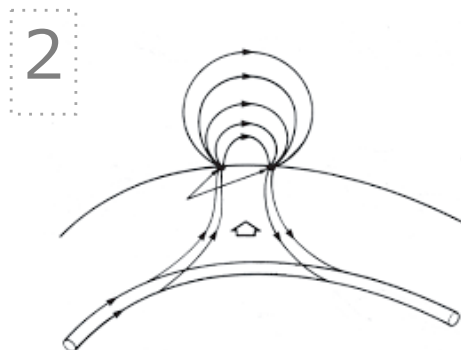
- これまでのスーパーフレア研究
- 3.8m望遠鏡(+KOOLS-IFU)を用いたスーパーフレア研究
- 木曾広視野サーベイ(Tomoe)とスーパーフレア研究
～超新星サーベイのデータから分かること

スーパーフレア研究の残された課題

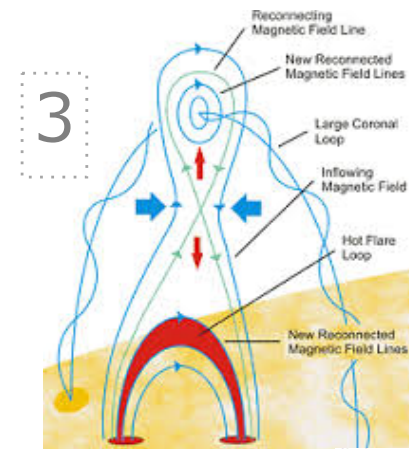
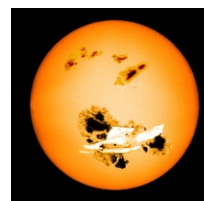
最終目標:「我々の太陽でスーパーフレアは起きうるのか？」



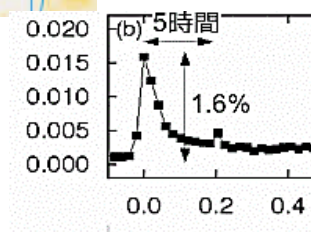
差動回転
(ダイナモ理論)



黒点の形成



磁場エネルギー
の解放



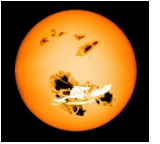
①スーパーフレアの**必要条件**
である、**巨大黒点の形成過程**

②フレア自体の分光観測
(**エネルギー解放過程の詳細**)

3.8m望遠鏡+分光観測で、
この2点に迫りたい。

3.8mで挑むスーパーフレアのサイエンス

①スーパーフレアの**必要条件**である、**巨大黒点の形成過程**



[**高分散分光**(+豊富な観測時間)]

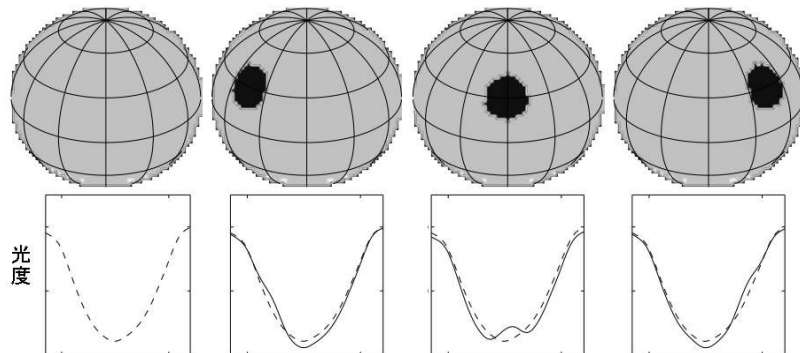
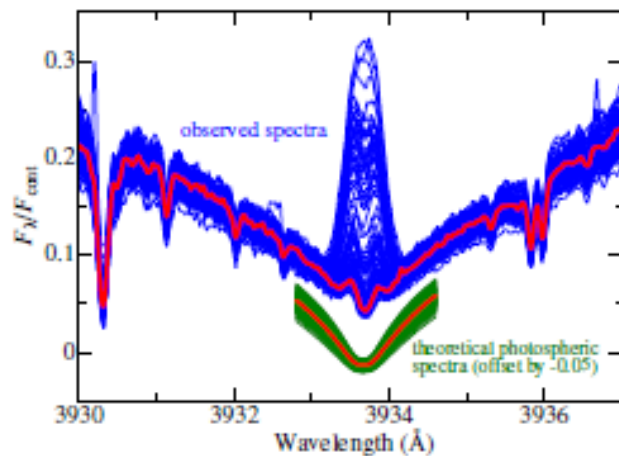
彩層線(Ca II HK線など)モニタ観測

Line profileの時間変化(線輪郭/視線速度)

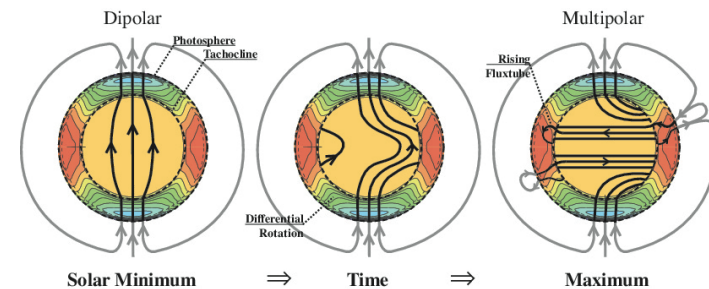


- ・巨大黒点の生成消滅過程
(寿命は?分布の仕方は?)
- ・差動回転の役割は?

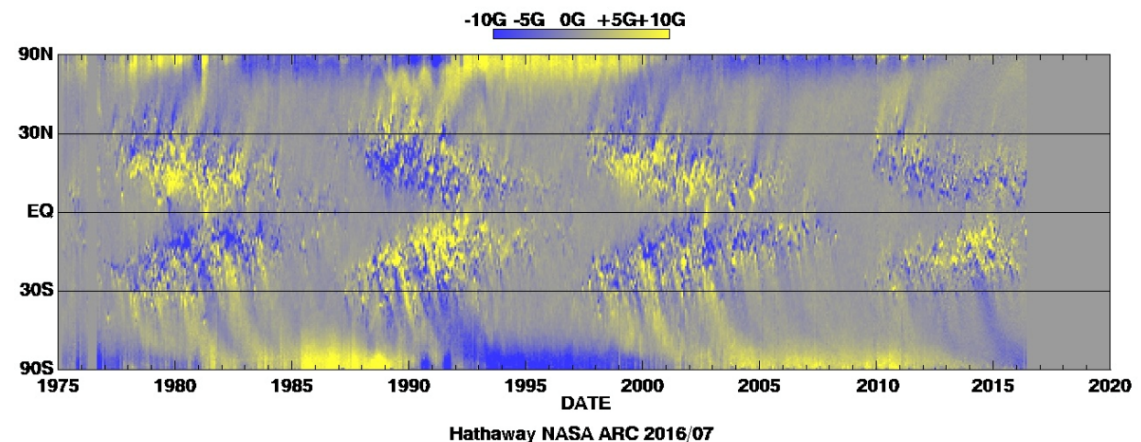
Ca II K line



波長



Higgins+2012



Hathaway NASA ARC 2016/07

3.8mで挑むスーパーフレアのサイエンス

②フレア自体の分光観測(エネルギー解放過程の詳細)

[低分散分光(KOOLS-IFU)&高分散分光]

彩層輝線(主に水素Balmer線)の時間変化

ー下降流(上昇流?)

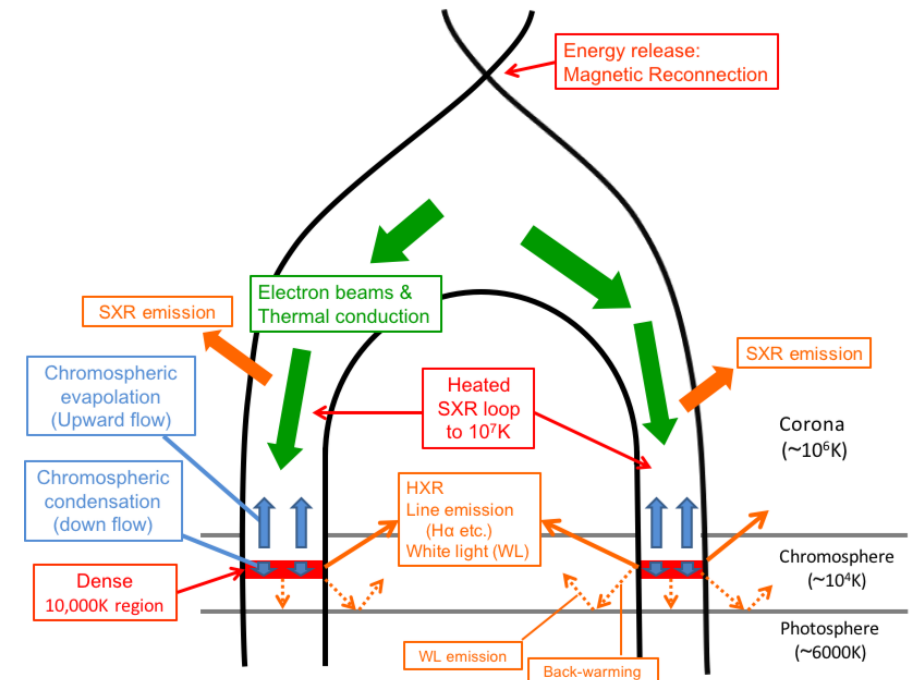
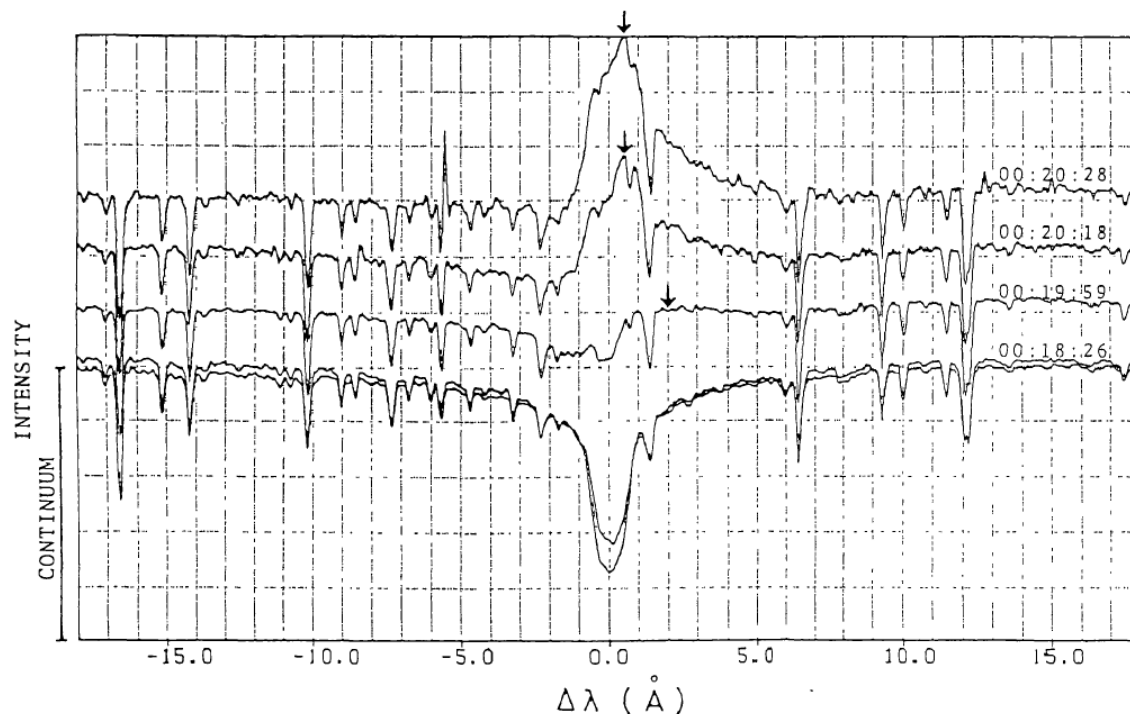
ープラズマ噴出



- ・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



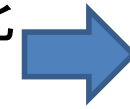
②フレア自体の分光観測(エネルギー解放過程の詳細)

[低分散分光(KOOLS-IFU)&高分散分光]

彩層輝線(水素Balmer線やCa II 線)の時間変化

ー下降流(上昇流?)

ープラズマ噴出



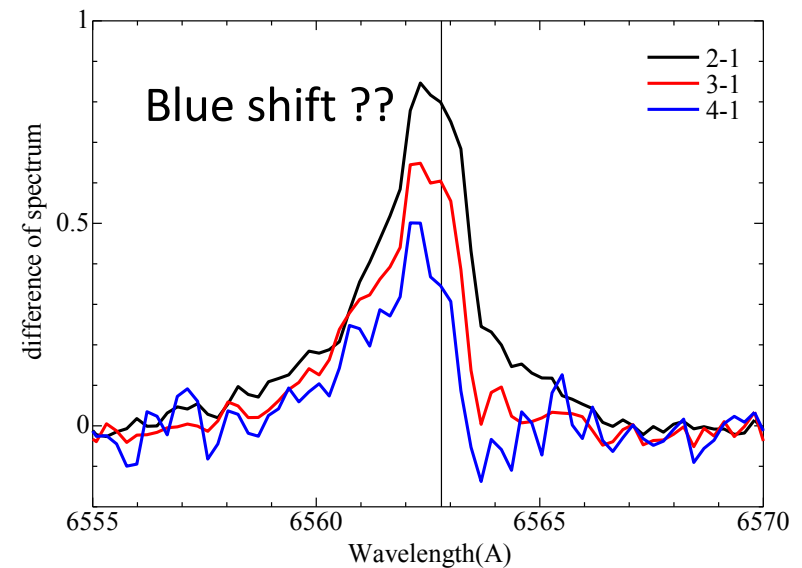
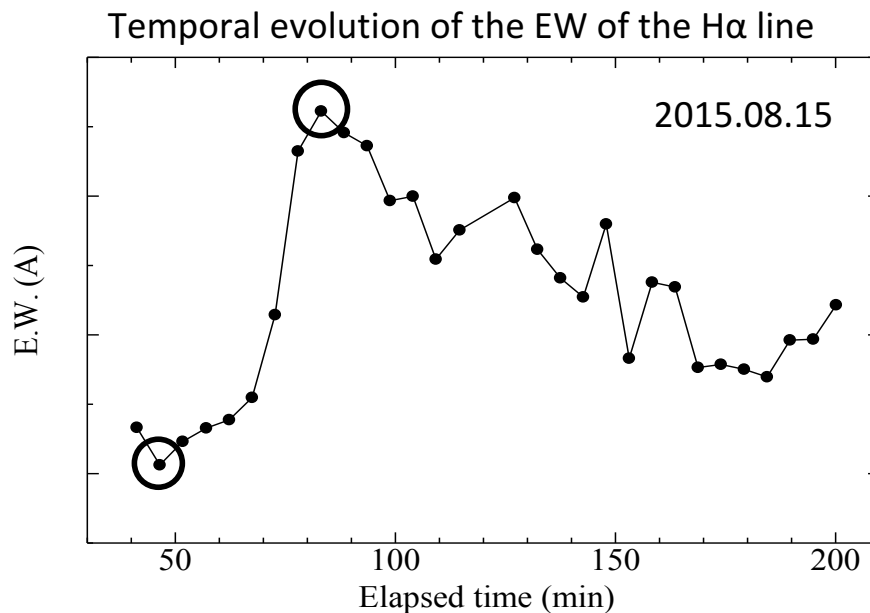
- ・スーパーフレアは、太陽フレアと同じ物理的特性を持つのか？
- ・質量放出-->系外惑星への影響

M型星フレアのH α 線観測例 (at 西はりま天文台; Honda 2017 in prep)

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？

星のフレア分光観測例は非常に少ないので、検証が必須



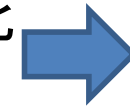
②フレア自体の分光観測(エネルギー解放過程の詳細)

[低分散分光(KOOLS-IFU)&高分散分光]

彩層輝線(水素Balmer線やCa II 線)の時間変化

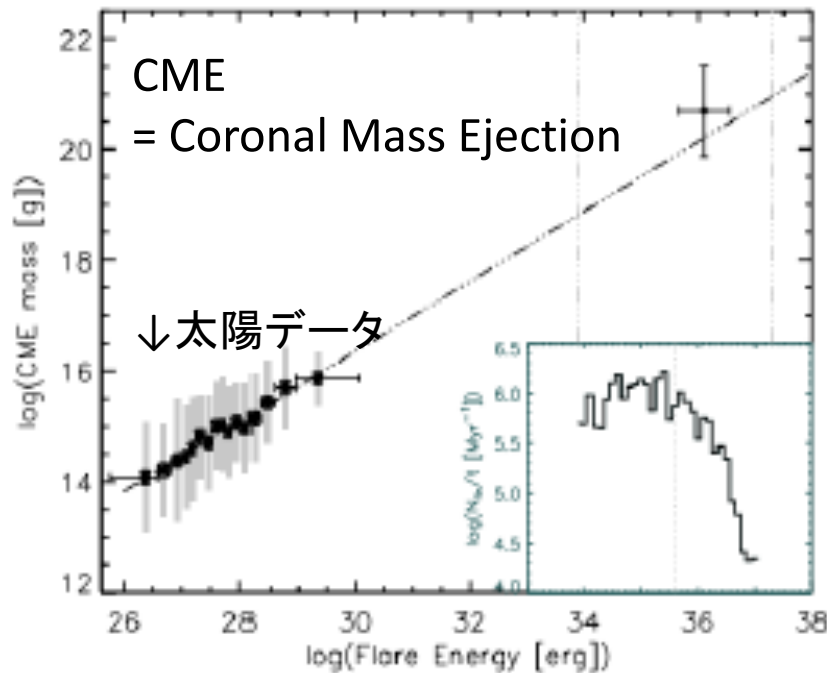
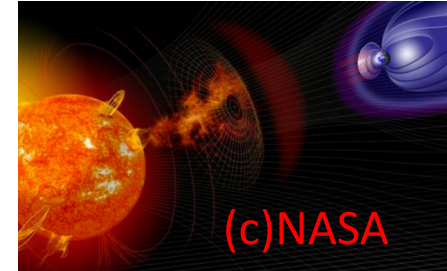
ー下降流(上昇流?)

ープラズマ噴出

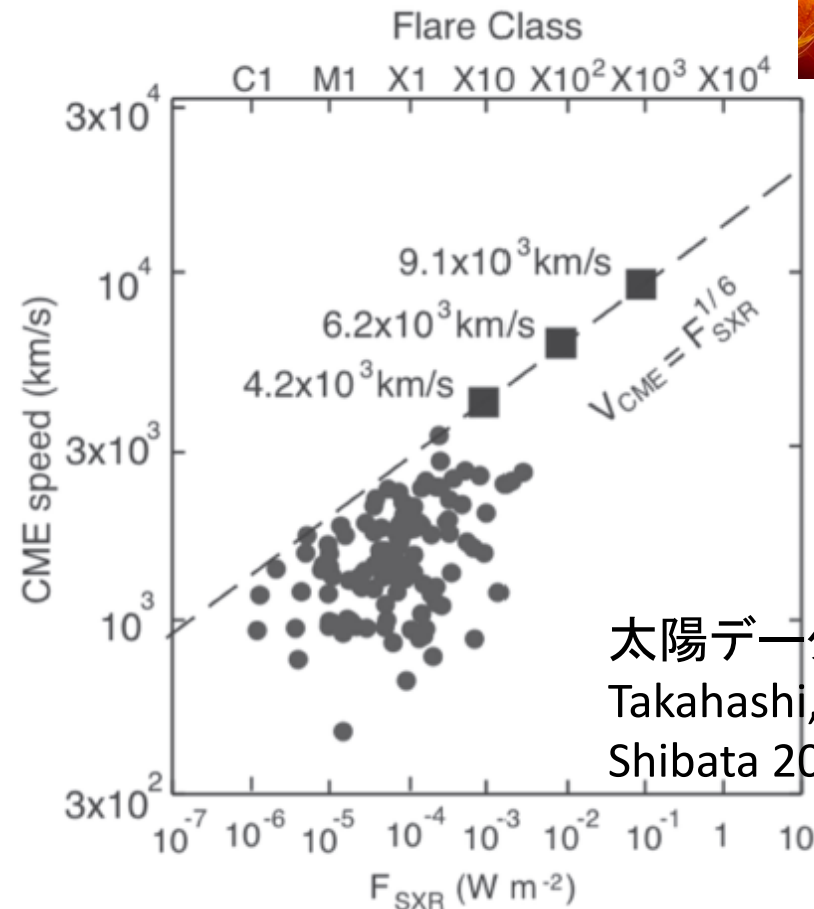


- ・スーパーフレアは、太陽フレアと同じ物理的特性を持つのか？
- ・質量放出-->系外惑星への影響

スーパーフレアでは、どのくらいのエネルギーが、
運動エネルギーへ配分されるのか？
速度や質量はどうか？



Aarnio et al. 2012, ApJ, 760, 9



太陽データを用いた推定
Takahashi, Mizuno,
Shibata 2016 ApJL

②フレア自体の分光観測(エネルギー解放過程の詳細)

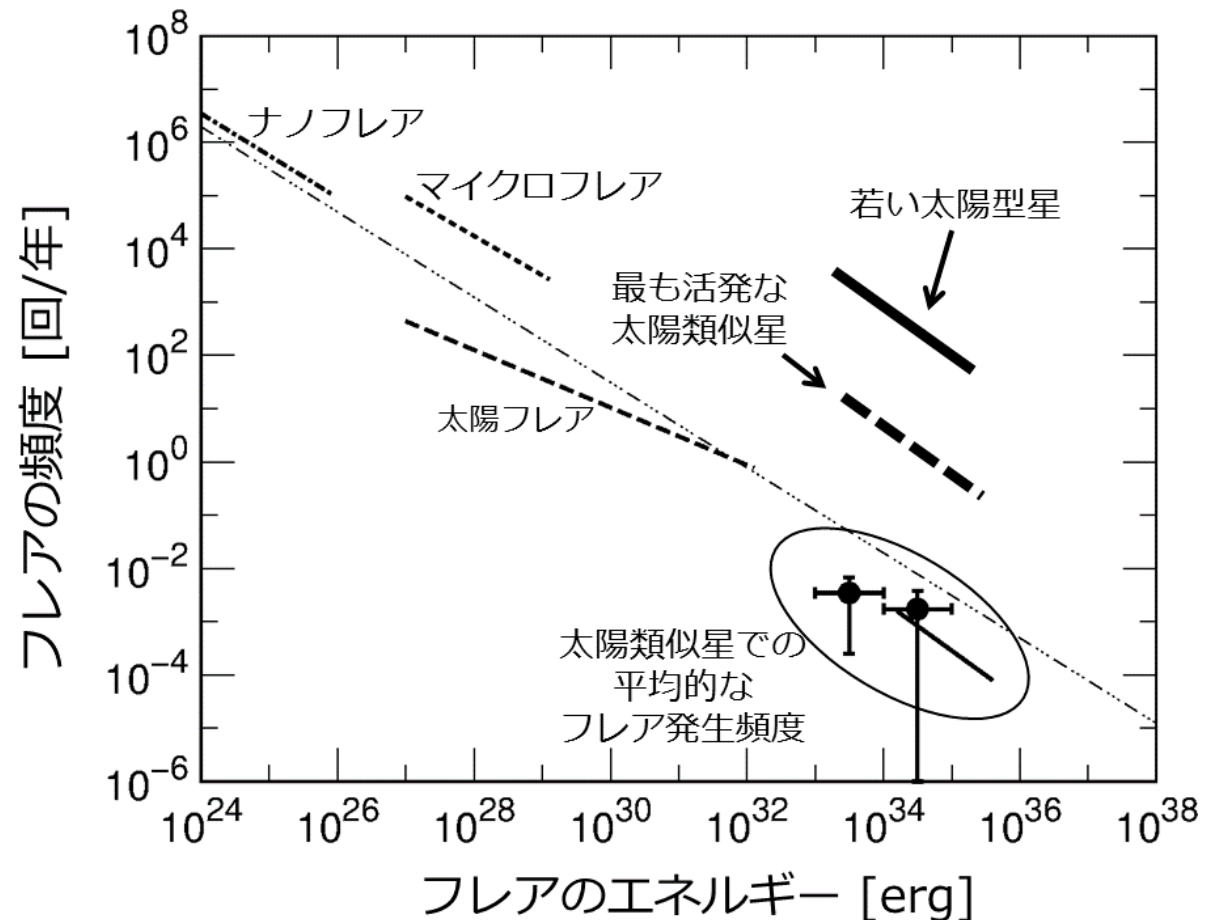
- ・フレア観測の容易な、若い太陽型星及び
特に活動的なM, K 型星計数天体を数週間にわたり、連続観測
10³⁴erg フレア--> 1年に1000回 --> 1日に数回
10³⁵erg フレア--> 1年に100回 --> 3-4日に1回

別途、測光望遠鏡も導入し、同時観測
※TESS(2018年打上)との同時観測？

(太陽データを使った推定by前原さん)

太陽型星で、X200-300(最大級の
太陽フレアの20-30倍)よりも大きな
フレアなら、H α centerで10%程度の
増光が期待できる

KOOLSの分解能(R=1300)
→S/N~100程度は必要そう
(K,M型星などは、はるかに容易なので
まずはそこから。)

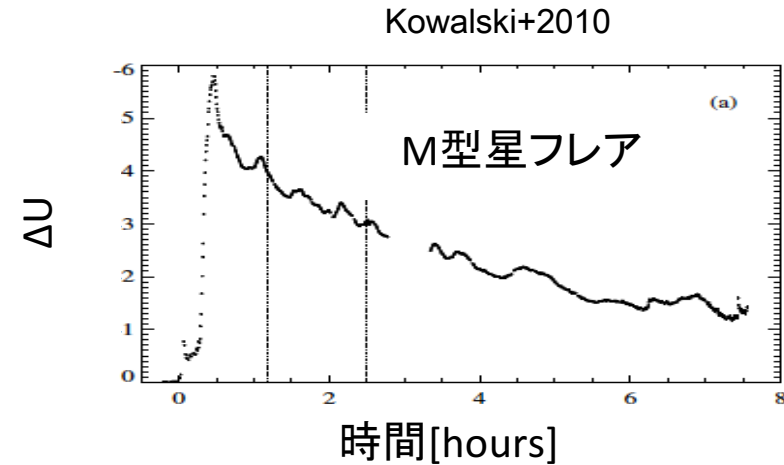
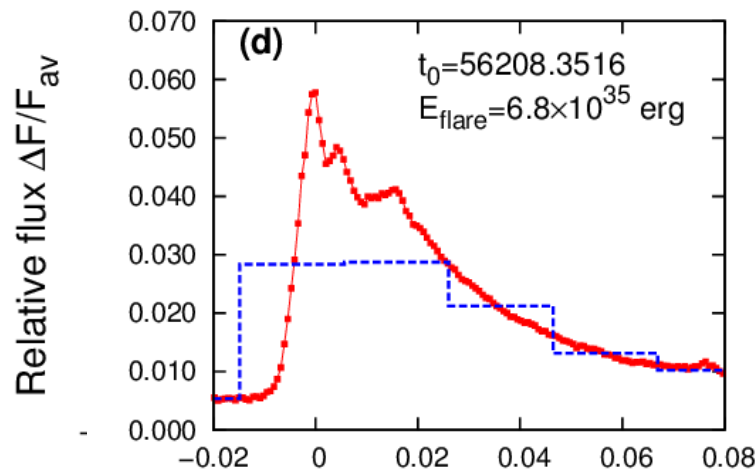
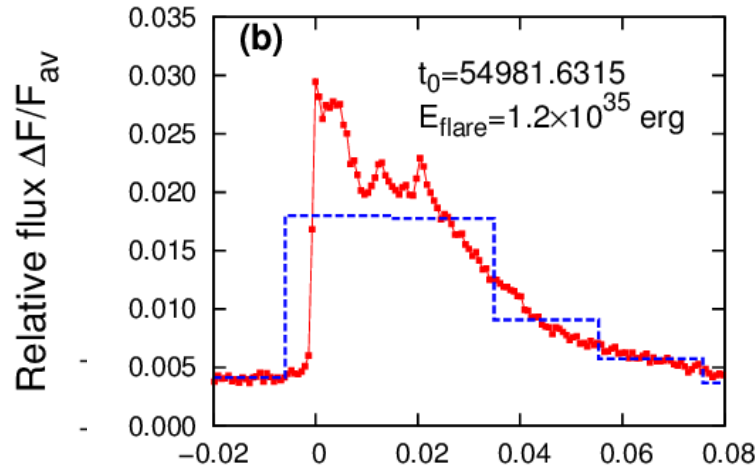


Outline

- これまでのスーパーフレア研究
- 3.8m望遠鏡(+KOOLS-IFU)を用いたスーパーフレア研究
- 木曾広視野サーベイ(Tomoe)とスーパーフレア研究
～超新星サーベイのデータから分かること

Tomoe 2fpsでのデータと恒星フレア

星団(ヒアデスやプレアデス): 視野固定観測 → M型星のflare oscillation



振動

-->フレアループの物理状態を反映

時間分解能では衛星を上回る情報？

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

TESS(2018~): 最大 $\Delta t = 2\text{min}$

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

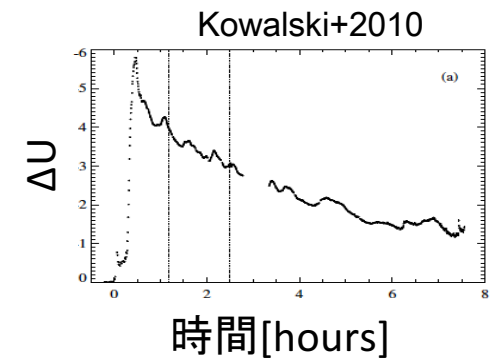
Keplerの太陽型星観測例($\Delta t = 1\text{min}$ (赤), 30min (青))

Tomoe超新星サーベイと恒星フレア

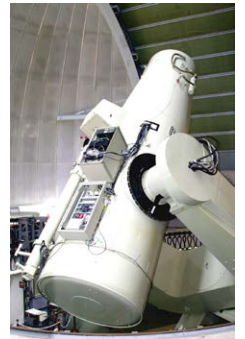
恒星フレア

継続時間：数十分～**数時間**

増光幅：数%～10%(G型星), M型星では>100%も



Tomoeの超新星サーベイ：2時間に1回, 0.5s露出x6回
測光精度：数%以上(>10% ?)



[Good Point]

- ・巨大フレアによる「増光」は多数検出されそう(主にM,K型星)

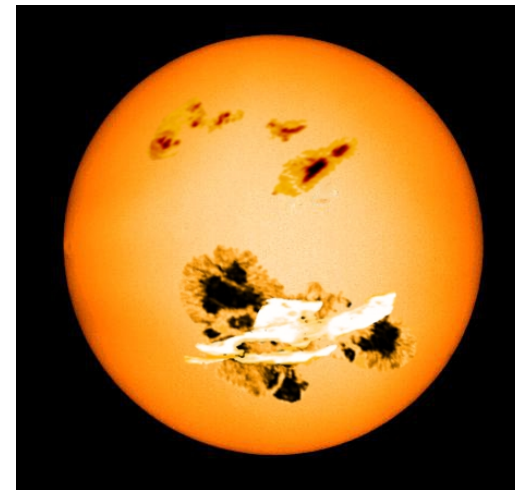
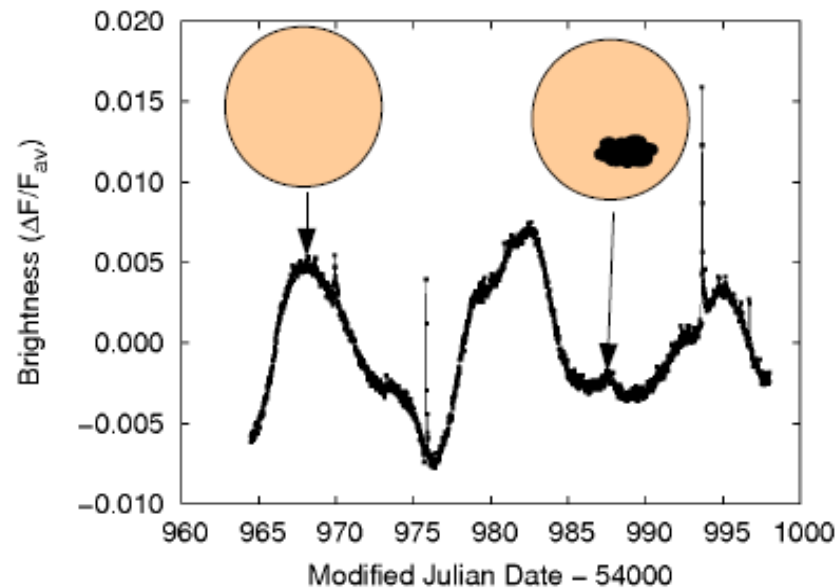
[Bad Point]

- ・詳細なlight curveは描けない (**偽検出の排除が困難**)
- ・フレア継続時間は、せいぜい数時間なので、岡山3.8mでの、即時分光は困難(**間に合わない**)
- ・発生頻度の統計など→今から地上で新しいことが出来るか？
KeplerやTESS(2018-), PLATO(2024-)などの衛星の方が優位？

地上観測と星の磁気活動

Tomoe超新星サーベイ(2時間に1回):フレア研究は難しそう

地上の測光観測 -> とびとびの観測であっても、
数ヶ月~数年データを貯めていけば、
巨大な星の自転による変光は、検出可能??



◎明るい星の全自動サーベイシステム

- ・ $f=105\text{mm}$ レンズ(口径5cm)+CCDカメラで、5度×7.5度の範囲を一度に撮像
- ・ 2010年12月からプロトタイプによる観測を開始、2012年3月から現在の装置に移行
 - ◇ 2010/12-2012/11@京都、2012/12-2014/10@木曽、2014/11-@岡山
 - ◇ 子午線付近の赤緯-33度から+66度の決められた領域を全自動で観測・解析 → 8時間の観測で100度×120度の範囲を観測可能
- ・ $V=5-10$ 等の天体に対して**長期的に5%以下の測光精度**を達成



図4.岡山に設置したサーベイカメラ

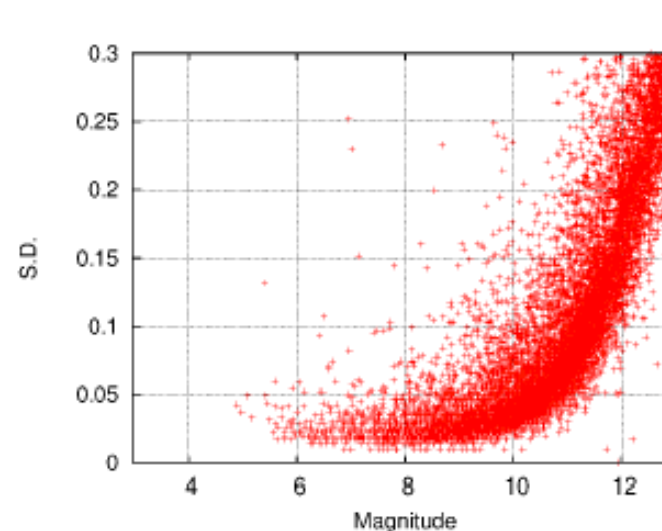
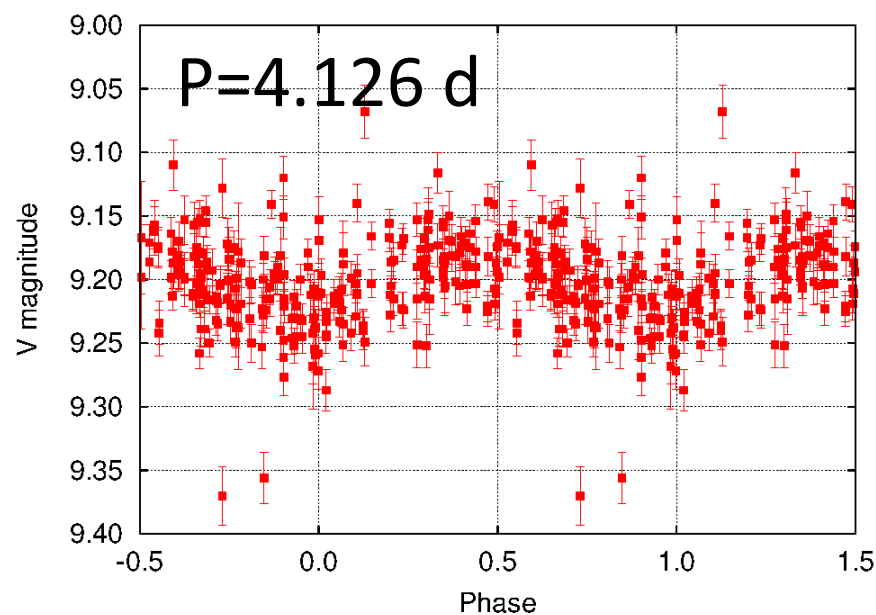
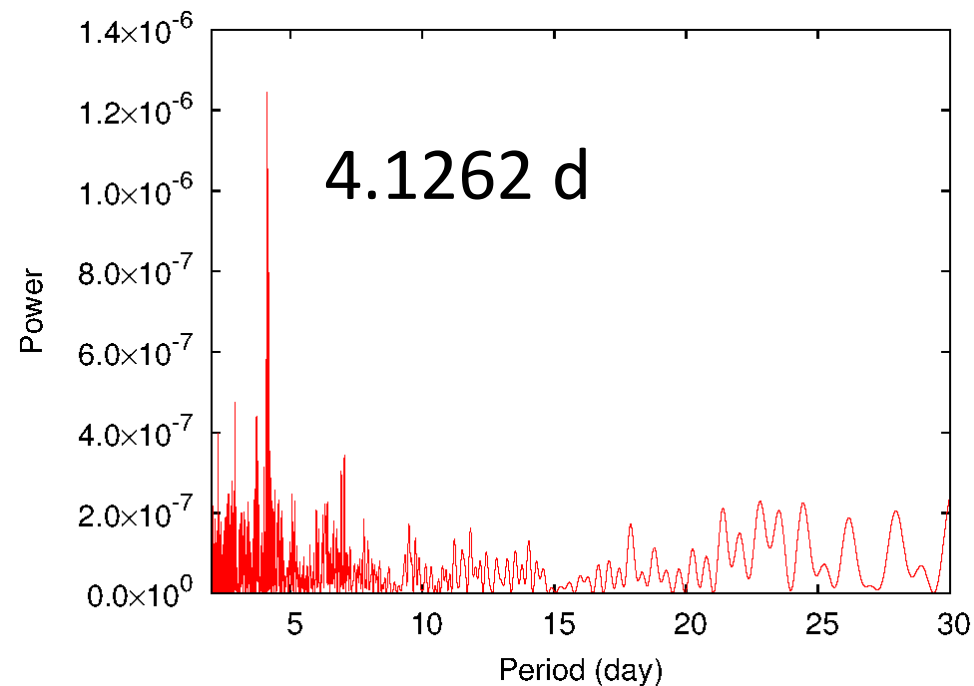
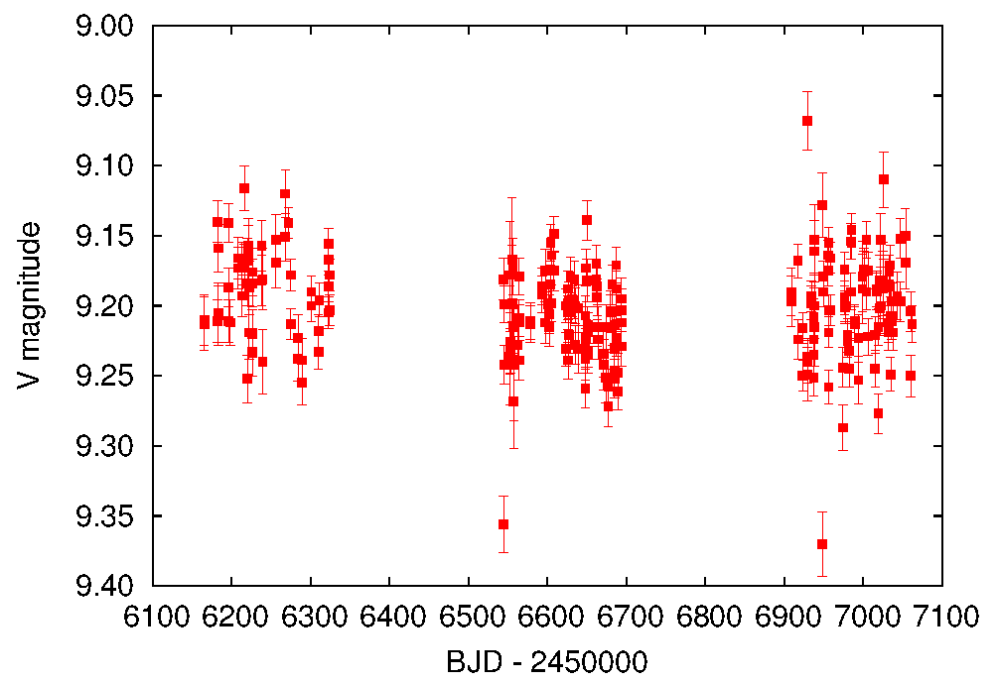


図5.長期的な測光値の標準偏差とV等級の相関

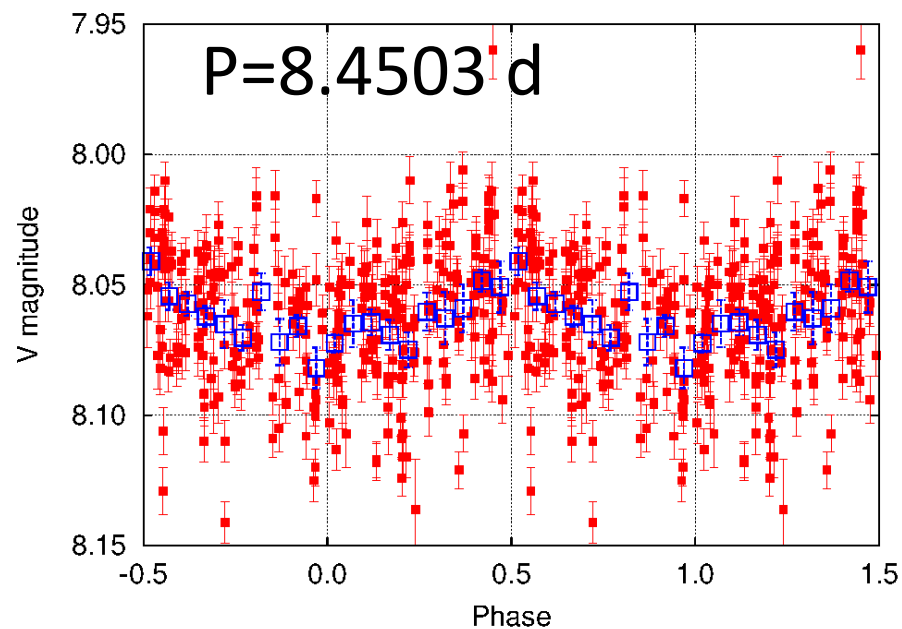
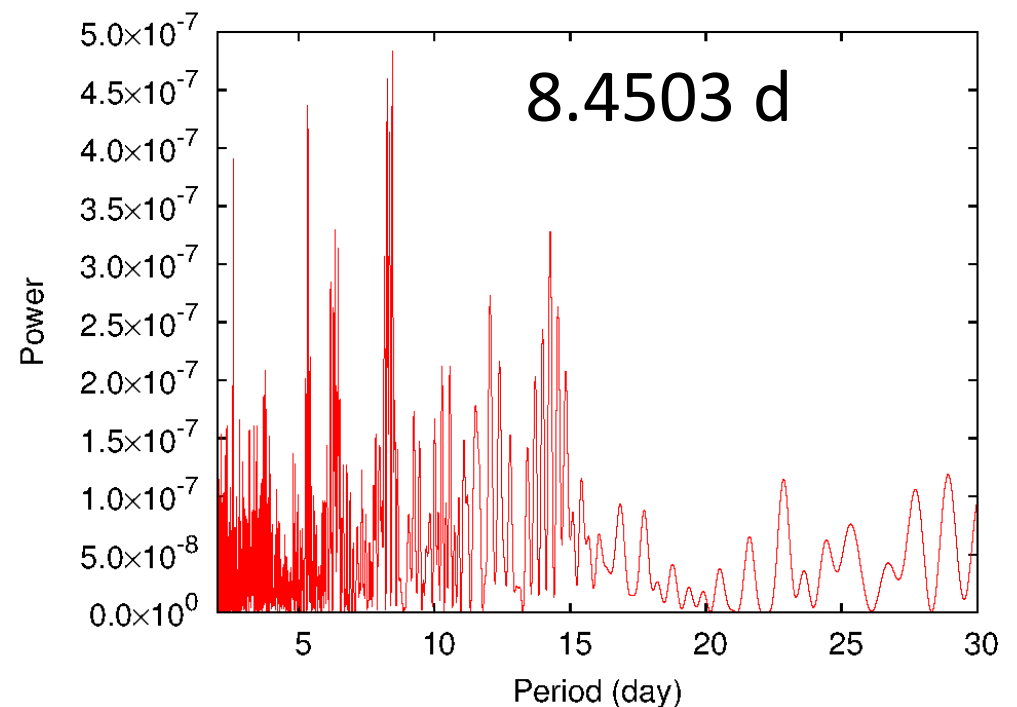
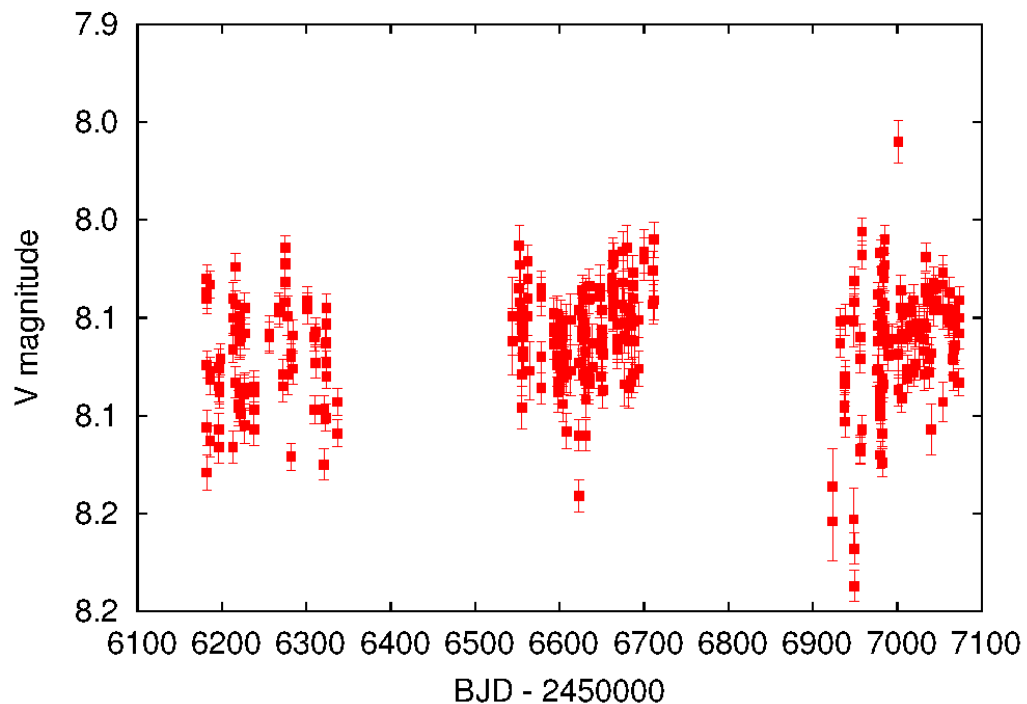
(c)前原さん作成スライドより

観測例 (HIP14997; 太陽型星)



(c)前原さん作成スライドより

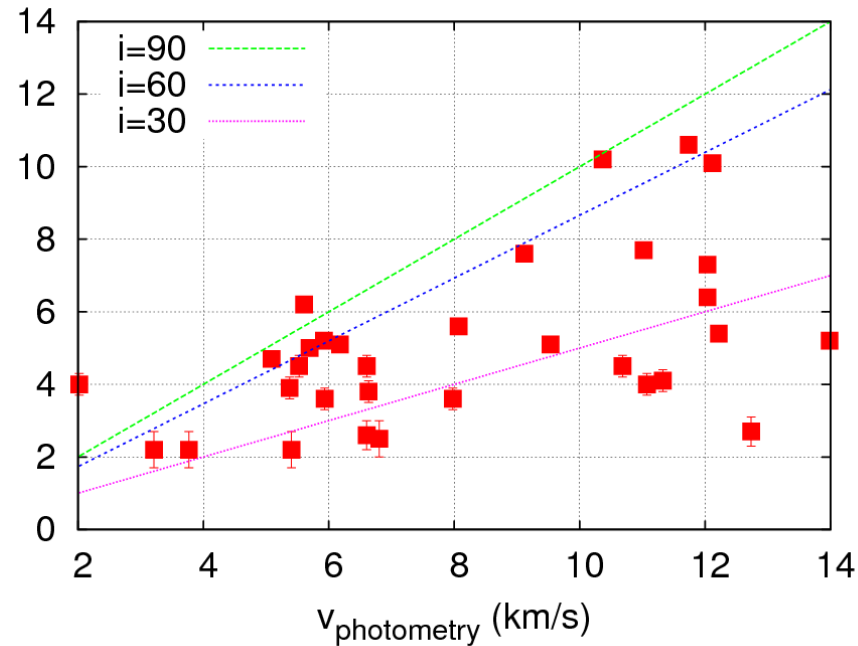
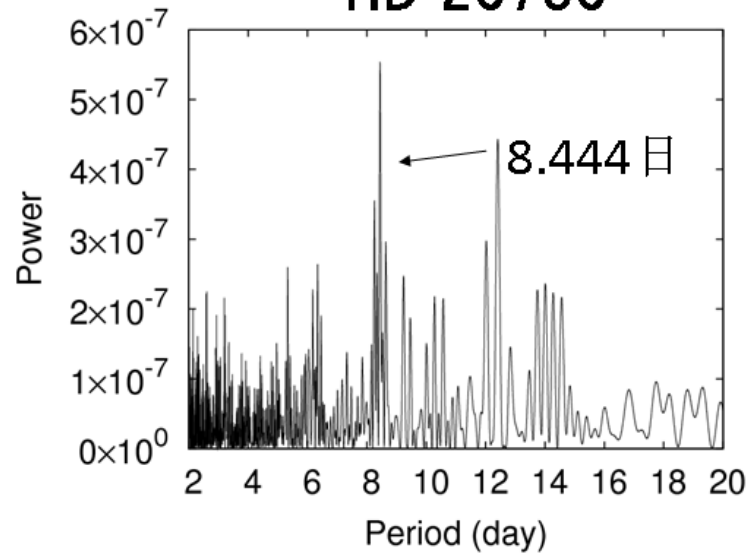
観測例 (V1310 Tau; 太陽型星)



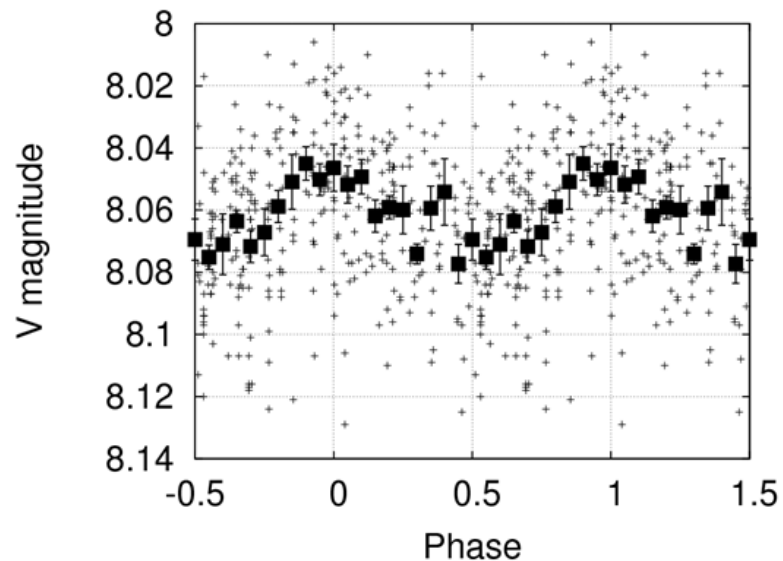
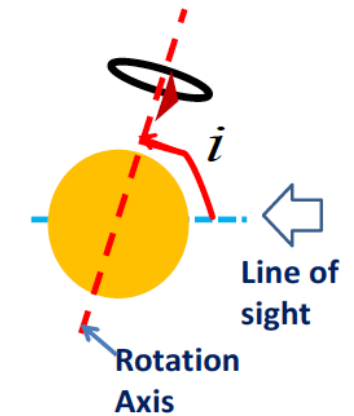
(c)前原さん作成スライドより

近傍太陽型星の測光観測

HD 26736



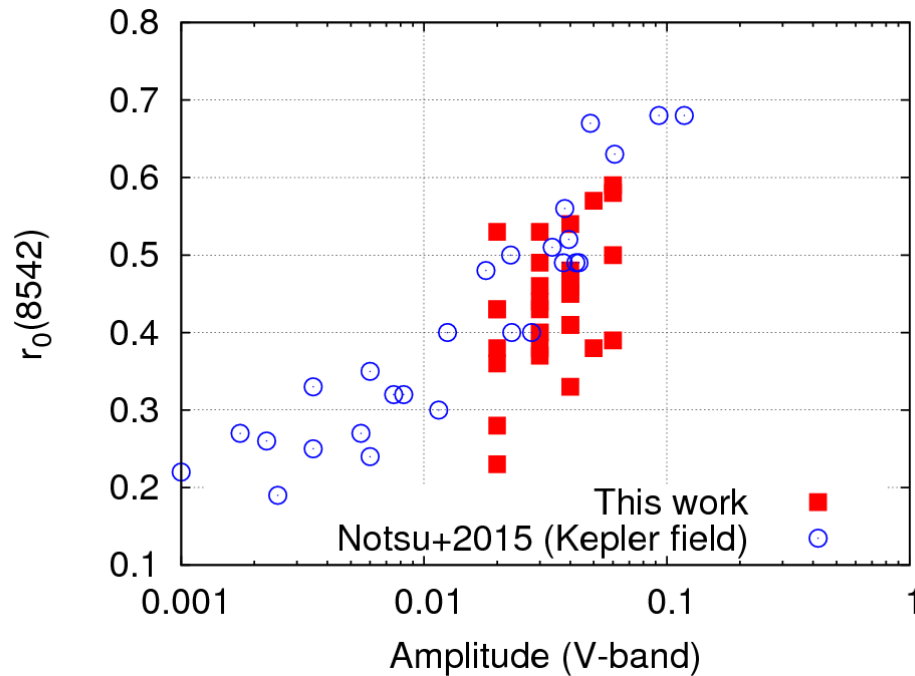
(vsini: Notsu+2017 PASJ で観測)



分光観測から求めた自転速度と測光
観測から求めた自転速度に大きな矛盾
はなかった

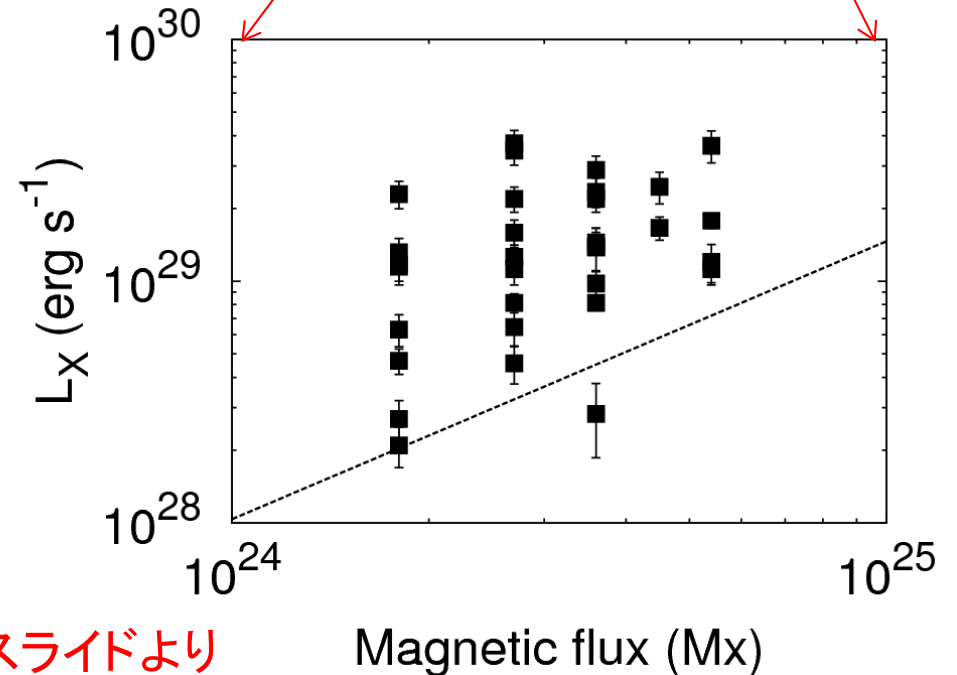
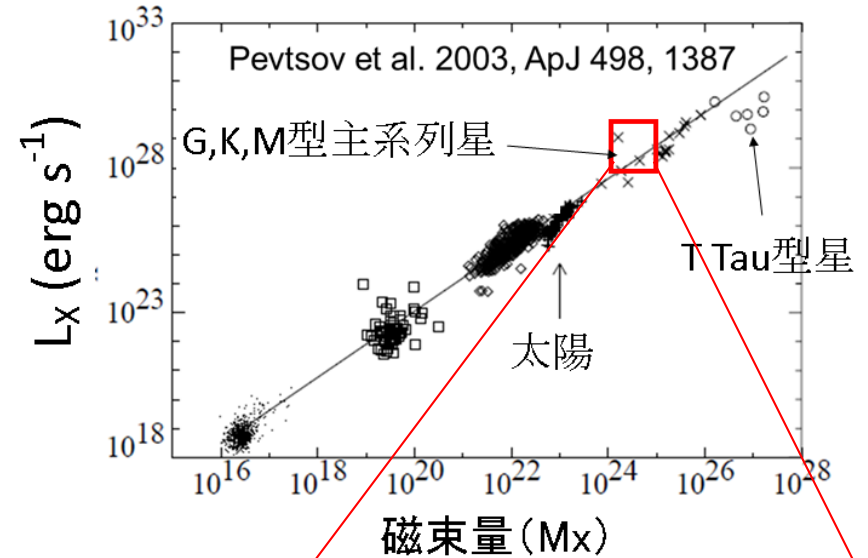
(c)前原さん作成スライドより

近傍太陽型星の測光観測



(Ca II 8542線強度: Notsu+2017 PASJ で観測)

変光の振幅とCaII線の強さやの関係や、振幅から見積もった磁束量と L_X の関係は先行研究の結果とおおむね合う結果が得られた



(c)前原さん作成スライドより

地上観測と星の磁気活動

[地上での測光観測の利点]

長期間(数年～)、観測できる

衛星:長期間の連続観測は難しい

(Kepler:3.5年, TESS:数十日～1年)

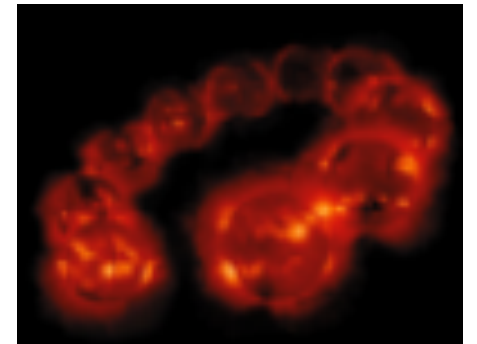
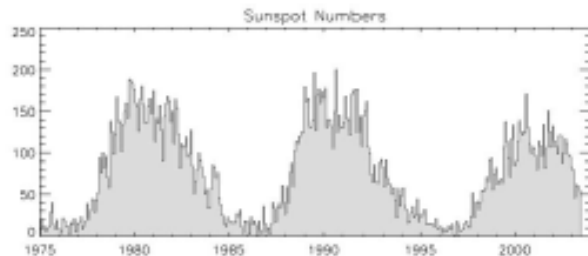
TomoeでG～M型星を、数年以上にわたり測光観測

測光精度数%～数十%→巨大黒点検出可能

—自転周期

—黒点サイズとその「長期変化」

巨大黒点はいつまでも存在し続けるのか？



従来の明るい星のサーベイと異なり、星団なども入ってくる(->利点?)

TESS(2018,2019年に観測)で見つかった巨大黒点星の、

「その後」数年の経過を追うこともできるかも

Tomoe超新星サーベイで可能な、星の自転+黒点の研究

対象星：黒点による変光が大きい(数%~数10%)G,K,M型星

観測間隔(=2時間に1回)は十分

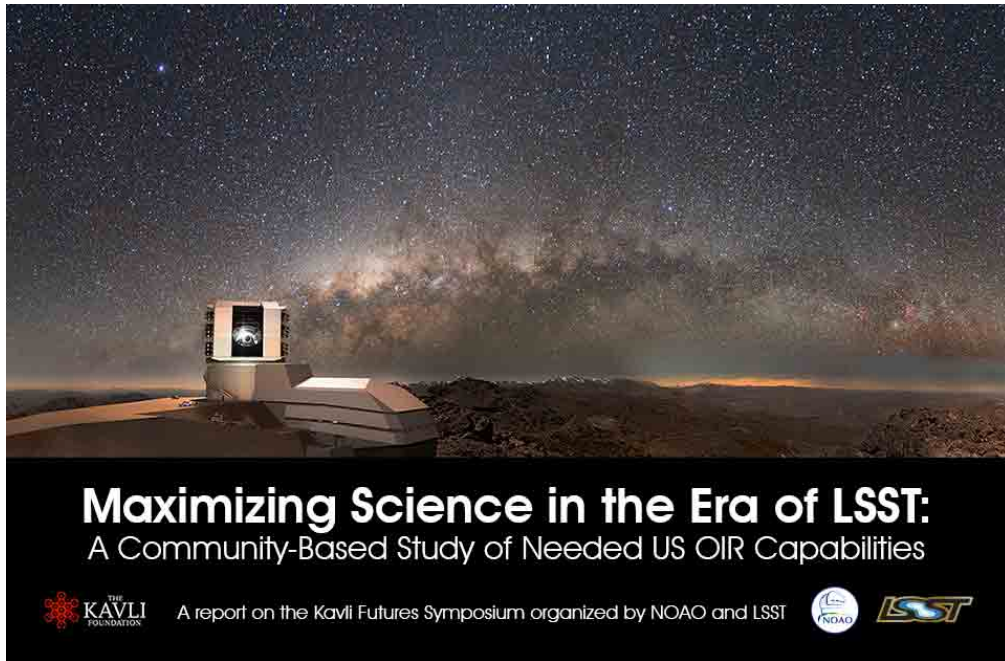
観測精度:数%程度あれば、大きい黒点なら見えてきそう

[必要なこと(重要なこと)]

- あらかじめ、カタログから観測星を選び出して、その周りのpixelだけデータを残しておくような仕組み作りは必須
- 突発天体ではないので、残すデータはあらかじめ決める(?)
- サーベイ観測期間が長い(>数年)ことは、重要
 - > 短いと衛星に対する優位性は出ない。

※ LSST (2020年代に10年間のサーベイ)でも同様のことが検討されている(Hawley+2016, arXiv:1607.04302)

<https://www.noao.edu/meetings/lstt-oir-study/>



Executive Summary	3
Chapter 1: Introduction and Background	7
Chapter 2: Study Structure and Process	10
Chapter 3: Mapping Galaxies to Dark Matter Halos	14
Chapter 4: Characterizing the Transient Sky	29
Chapter 5: Rotation and Magnetic Activity of Stars in the Galactic Field Population and in Open Star Clusters	51
Chapter 6: Using Small Solar System Bodies to Understand the Cosmochemical Evolution of the Solar System	73
Chapter 7: The Co-evolution of Baryons, Black Holes, and Cosmic Structure	90
Chapter 8: Facilitating Cosmology Measurements from LSST	116
Chapter 9: Infrastructure for a Time Domain Follow-up System and the Evolution of Observing Paradigms	134
Chapter 10: Computing and Data Resources for Maximizing LSST Science	150
Chapter 11: Findings and Recommendations	156
Appendix A: Relevant OIR System Study Recommendations	170
Appendix B: Letter of Request from NSF/AST	172
Appendix C: Additional Resource Needs	174

Chapter 5: Rotation and Magnetic Activity of Stars in the Galactic Field Population and in Open Star Clusters

Suzanne Hawley (University of Washington), Ruth Angus (University of Oxford), Derek Buzasi (Florida Gulf Coast University), James R. A. Davenport (Western Washington University), Mark Giampapa (National Solar Observatory), Vinay Kashyap (Harvard-Smithsonian CfA), Søren Meibom (Harvard-Smithsonian CfA)

<https://www.noao.edu/meetings/lsst-oir-study/>

まとめ

- 3.8m+KOOLESと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？
- Tomoeの視野固定観測: M型星のflare oscillation
- Tomoe超新星サーベイとフレア研究
 - フレア研究:
 - 時間分解能の問題
 - 即時分光は間に合わない
 - 巨大黒点星の自転・長期変化の観点で、データを生かすことができそう!?(数年以上にわたり、データを貯めていく必要も有り)