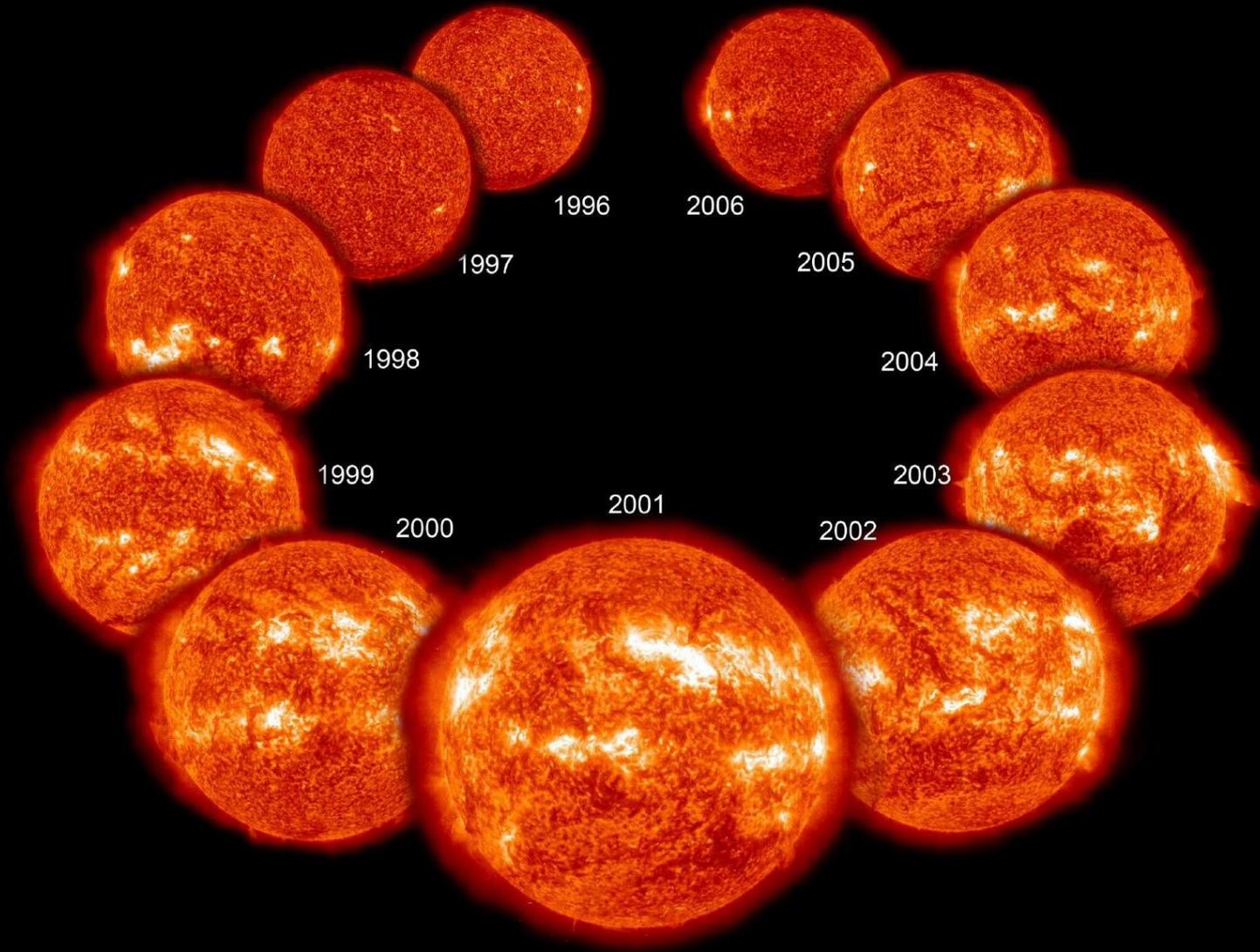


Aktivitätsphänomene junger Sterne

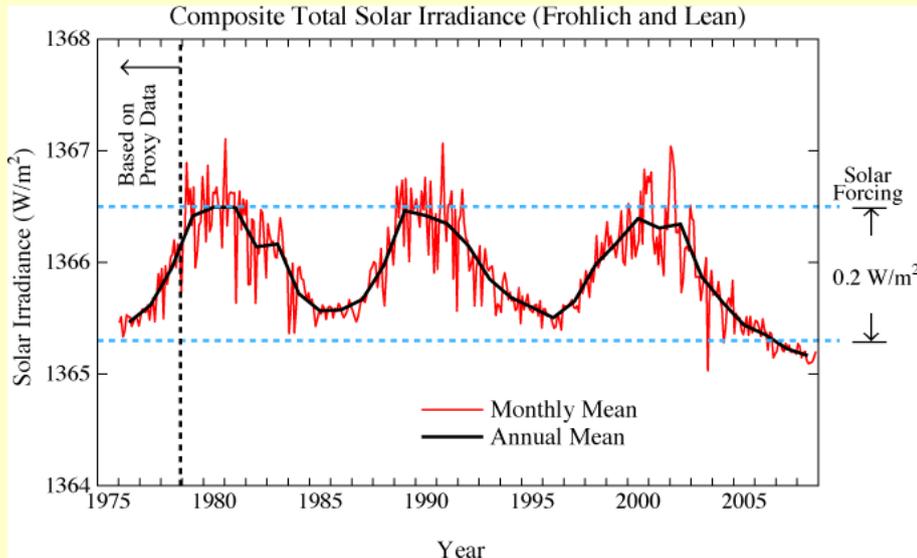


Martin Leitzinger
Universität Graz, Institut für Physik
Institutsbereich für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie

Variabilität der Sonne und Aktivitätsphänomene?

die Sonne ist variabel auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen

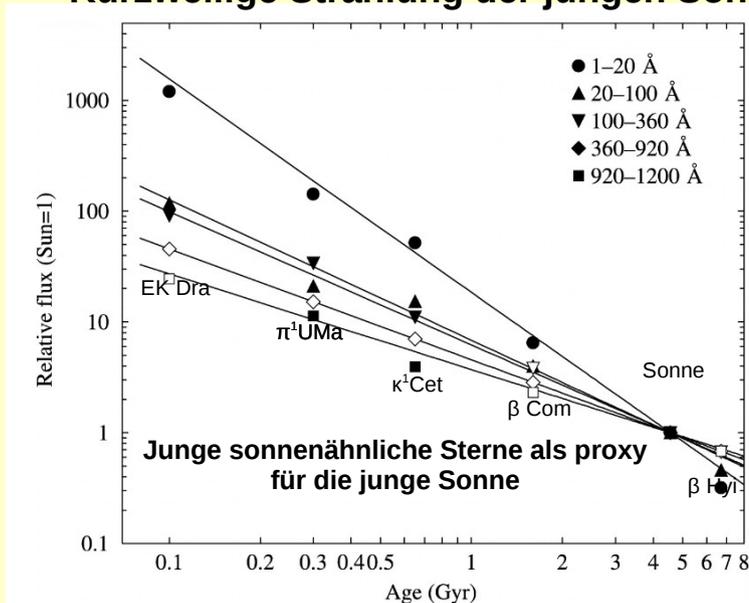
Variabilität der solaren Irradianz über mehrerer solare Zyklen



Frohlich & Lean, 2004, A&ARev, 12, 273-320

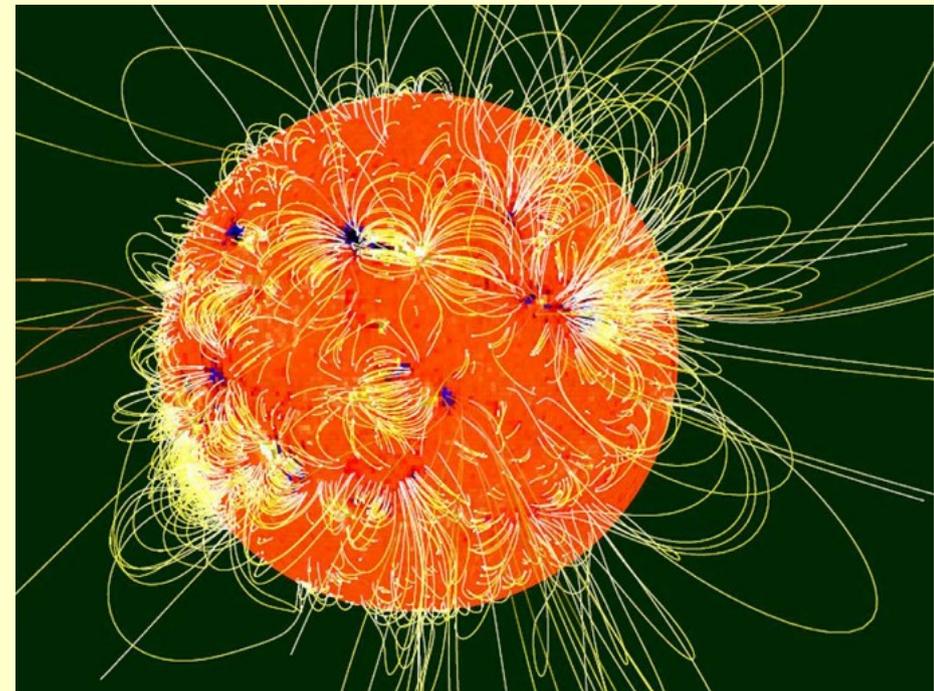
- Sonne ist kein statisches Gebilde – permanente Plasmabewegung macht die Sonne zu einem dynamischen Gebilde – Variabilität – z.B Granulation
- Aktivität – viele Phänomene haben ihren Ursprung im Magnetfeld der Sonne

Kurzwellige Strahlung der jungen Sonne



Ribas et al., 2005, ApJ, 622, 680

Rekonstruktion des solaren Magnetfeldes

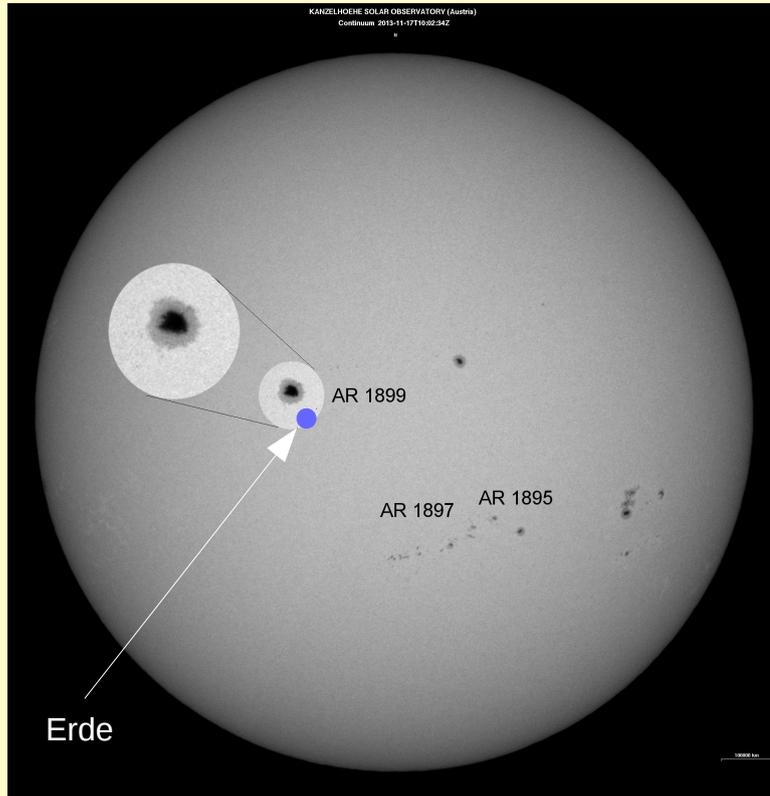


Wiegmann & Solanki, 2004, ESA, SP-575

Auffällige Phänomene

(bereits mit einfachen optischen Hilfsmitteln zu sehen)

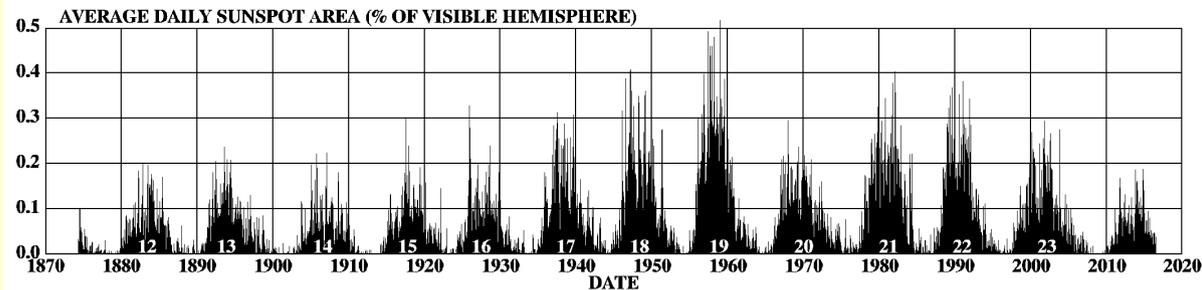
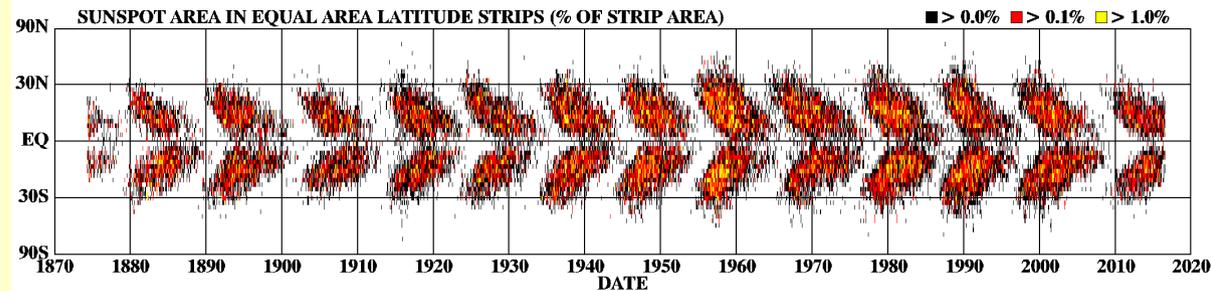
Sonnenflecken



Kanzelhöhe Solar Observatory – University of Graz
<https://www.kso.ac.at>

- einfach durch ein Teleskop mit Sonnenfilter zu beobachten
- dunkel=kühl (kühler als die umgebende Photosphäre), starkes Magnetfeld tritt durch solare Oberfläche und unterbindet die Konvektion
- 11 jährig zyklische Variabilität
- Bedeckungsgrad zw. 10^{-5} - 10^{-4} der Sonnenhemisphäre im Aktivitätsminimum, im Maximum 10^{-3}

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

HATHAWAY NASA/ARC 2016/08

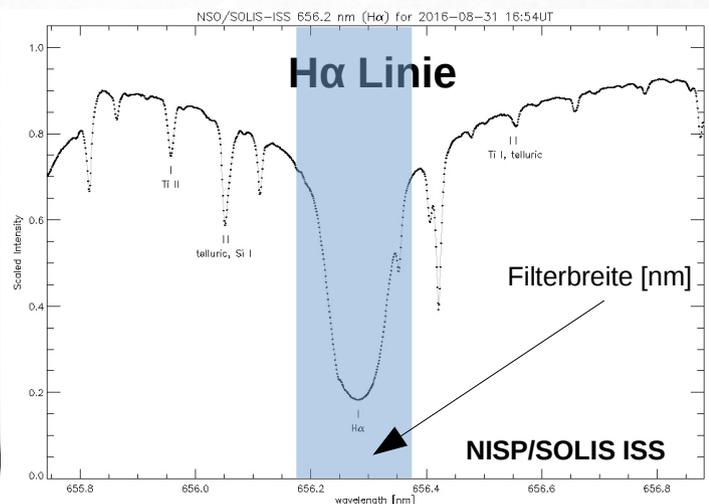
Auffällige Phänomene

2011-06-04 05:23:10 UT (bereits mit einfachen optischen Hilfsmitteln zu sehen)

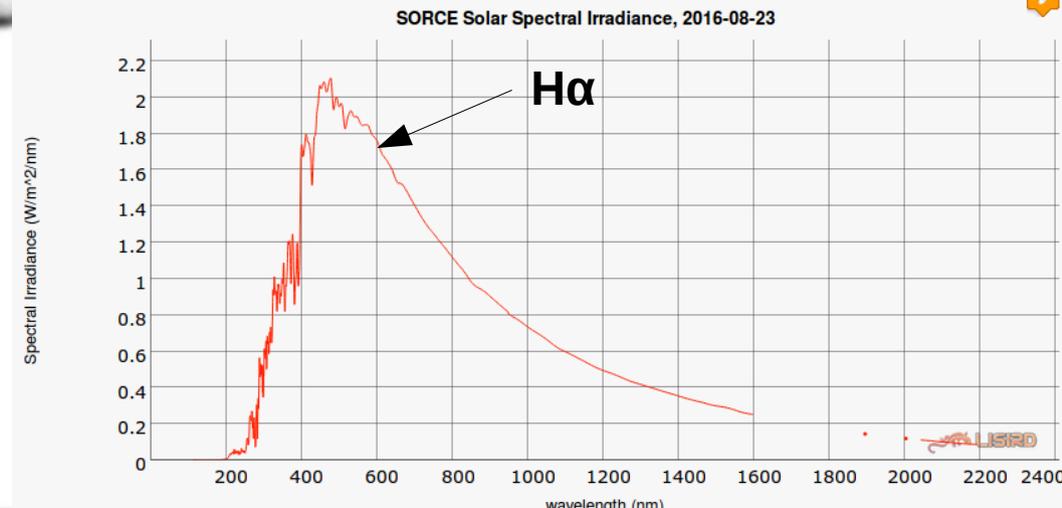
Protuberanzen



- Mit Teleskop, Sonnenfilter und einem Filter zu beobachten – gut sichtbar im Licht der Spektrallinie $H\alpha$ (656.28nm)
 - angeregter Wasserstoff entsteht bei Übergang von Energieniveau 2 auf 3 (Absorption) oder 3 auf 2 (Emission)
- Solares Plasma gefangen in Magnetfeldlinien
- Protuberanz=hell gegen dunkles All
- Filament= dunkel gegen helle (heiße) Sonne
- Mittlere Höhe $\sim 25000\text{km}$ - $R_{\text{Sun}} \sim 700000\text{km}$

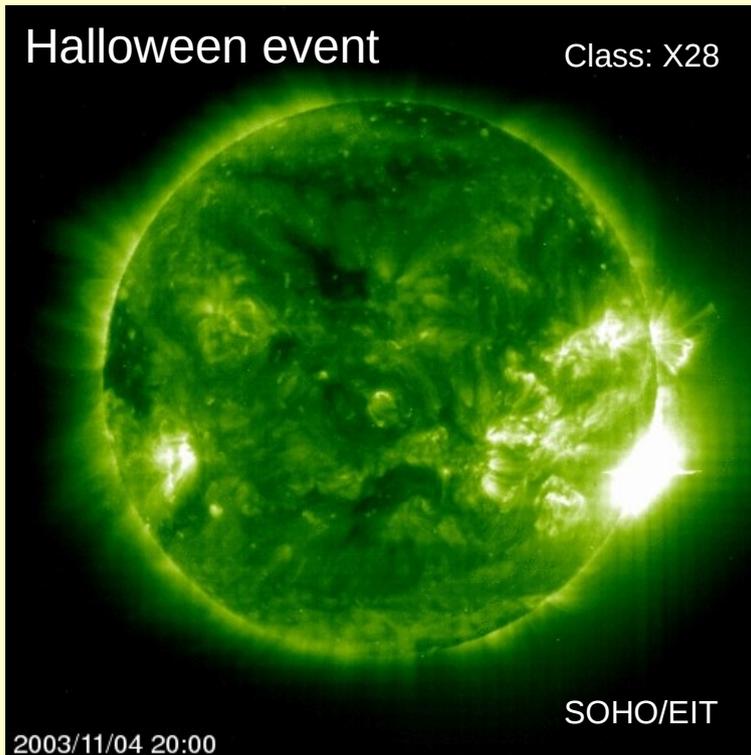


SORCE SOLAR SPECTRAL IRRADIANCE - SPECTRA



Halloween event

Class: X28



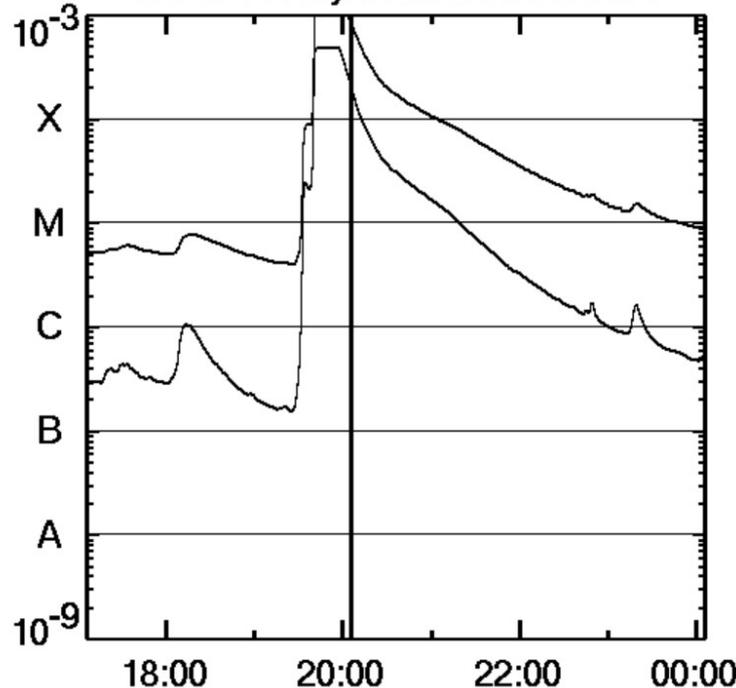
Hochenergetische Phänomene:

Strahlungsausbrüche (flares)

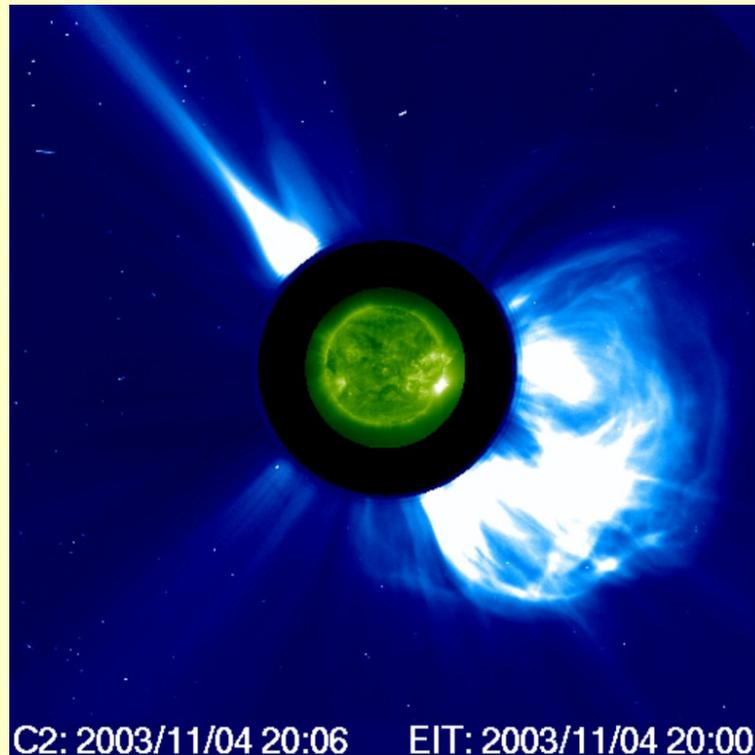
- Strahlungsausbrüche sind seit dem 19 Jhd bekannt – Carrington-Event – Superflare – um einige Faktoren größer als der energetischste Flare aus jüngster Vergangenheit
- Plötzlicher Helligkeitsanstieg einer Region oder der gesamten solaren Strahlung
- Erzeugung durch Verschmelzung von Magnetfeldlinien – sog. Rekonnexion
- Erhöhtes Flareaufkommen im absteigendem Ast des Aktivitätszyklus
- Solare Flarerate für – X-class flares ($\sim 10^{31}$ erg- 10^{32} erg) ~ 0.02 /Tag (2010-2015) – 1 X-class flare alle 44 Tage (<http://proba2.oma.be/lyra/data/Flarelist/CompleteFlareListG.txt>)

Lichtkurve im Röntgenlicht

GOES X-Rays: 2003/11/04 20:06



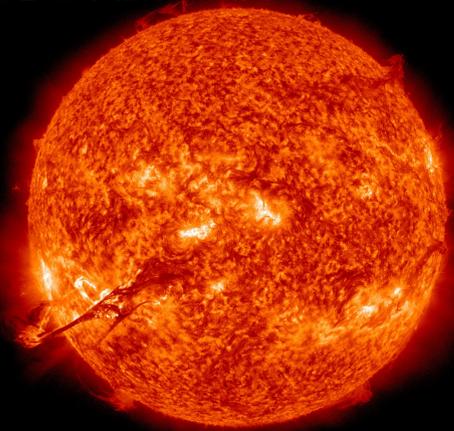
- Flares sind mit Masseauswürfen sog. CMEs korreliert
- Eine hohe Korrelation ergibt sich für energetische Events



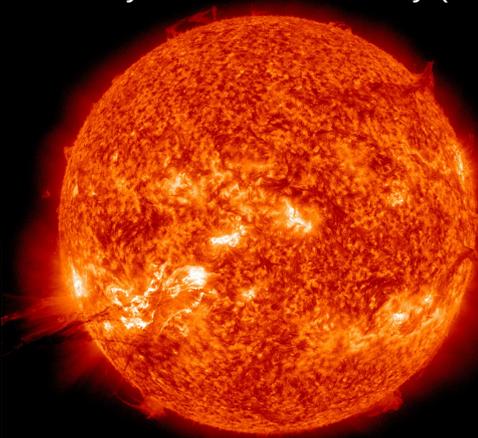
Hochenergetische Phänomene: (CMEs – Coronal Mass Ejections) und eruptive Filamente

- Hohe Korrelation von CMEs und eruptiven Filamenten (72-92%)
- In vielen Fällen ist der Kern der CME das Filament
- Filament wird bei einigen 100000km Höhe beschleunigt und durchläuft dann solare atmosphärische Schichten - in der Korona hat sich die Masse vergrößert weil koronales Material mitgerissen wird – eine CME hat sich gebildet

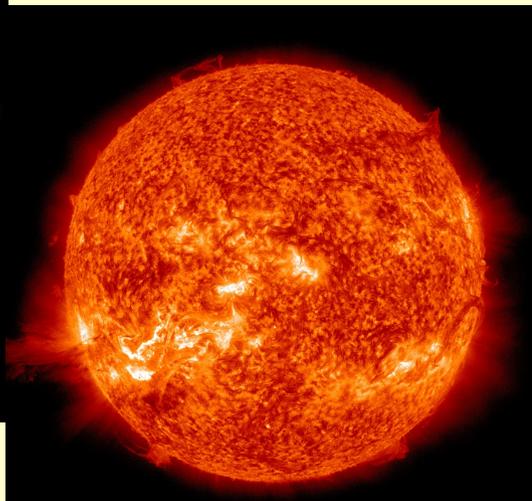
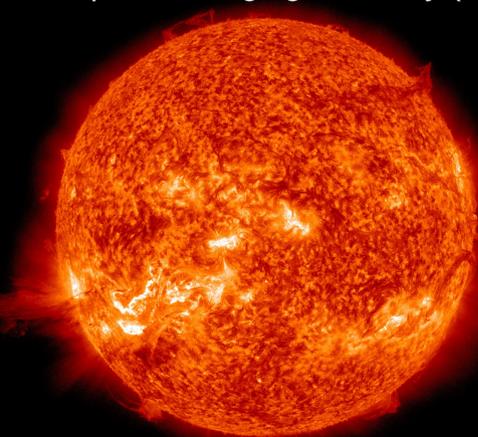
SDO/AIA 304A



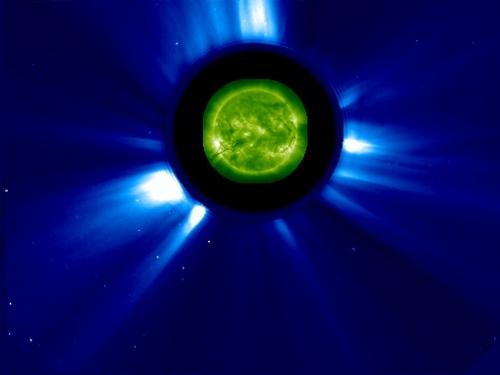
Solar Dynamcis Observatory (SDO)



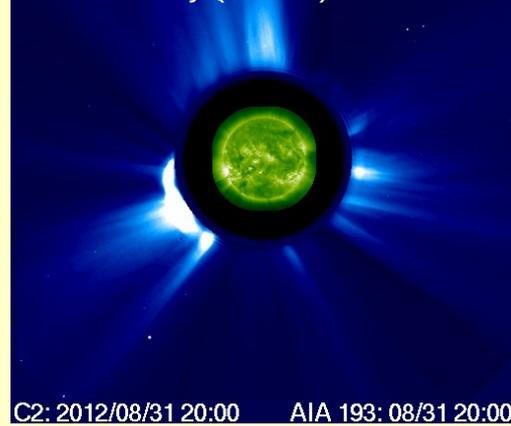
Atmospheric Imaging Assemby (AIA)



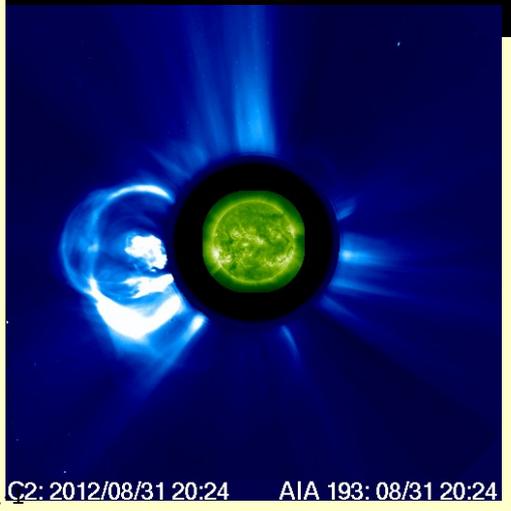
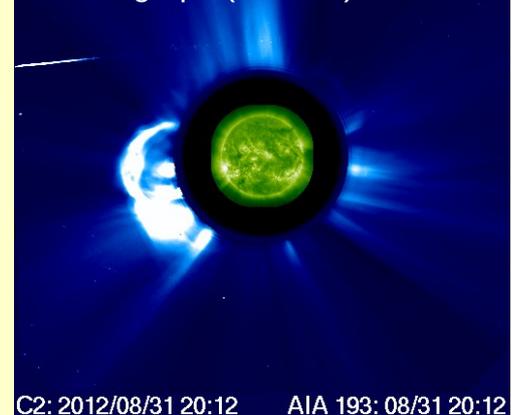
SOHO/LASCO
SDO/AIA 193A



Solar and Heliospheric
Observatory (SOHO)



Large Angle and Spectrometric
Coronagraph (LASCO)



C2: 2012/08/31 19:48 AIA 193: 08/31 19:48

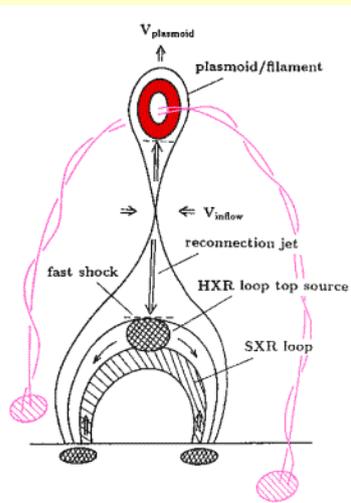
C2: 2012/08/31 20:00 AIA 193: 08/31 20:00

C2: 2012/08/31 20:12 AIA 193: 08/31 20:12

C2: 2012/08/31 20:24 AIA 193: 08/31 20:24

CME Massen: 10^{11} - 10^{17} g

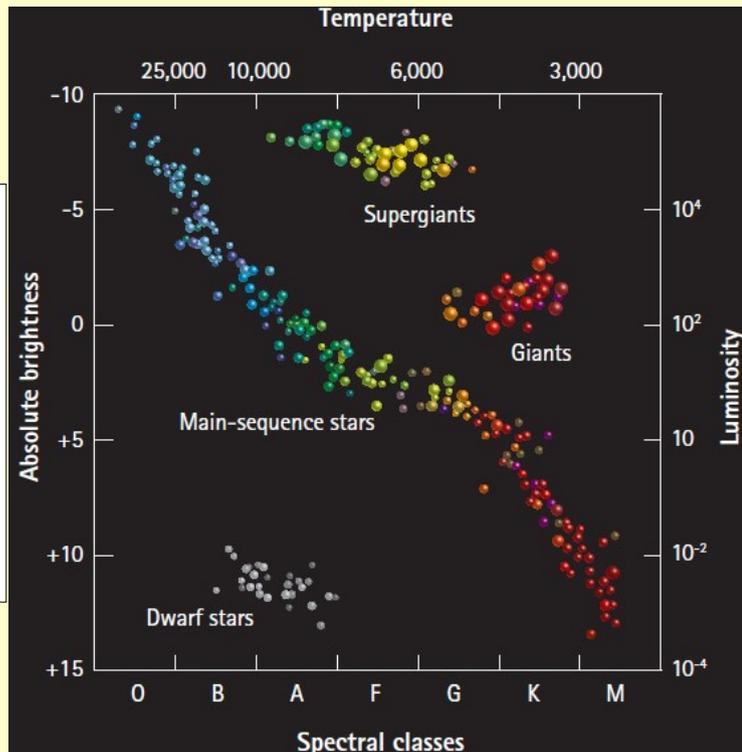
CME Geschwindigkeiten: einige 100 bis wenige 1000 km s



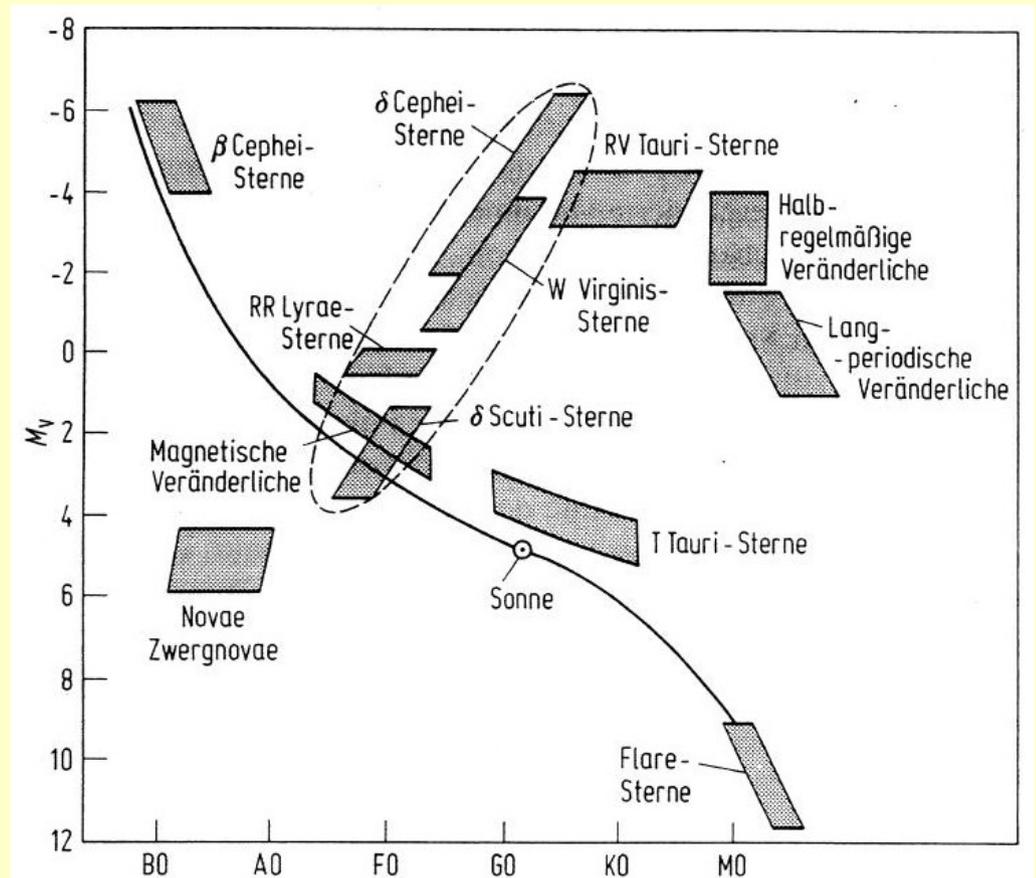
Aktivitätsphänomene junger Sterne

Was sind junge Sterne?

- junge Sterne: Wenn das Wasserstoff-Brennen gestartet hat und die Sterne auf der Hauptreihe angekommen sind
- Das Wasserstoffbrennen ist ein Kernfusionsprozeß wo H-Atome zu He Atomen fusionieren dabei wird Energie frei und der Stern beginnt einen relativ stabilen Evolutionsabschnitt – die Hauptreihenphase – Beginn dieser wird Zero-Age-Main-Sequence (ZAMS) genannt
- ZAMS entspricht einem Alter von einigen Dutzend Mio. Jahren für späte Sterne (Spektraltyp F-M)
- Frühe Spektraltypen (O, B, A) haben eine kurze Hauptreihenzeit weil sie leuchtstark sind und ihren Wasserstoffvorrat schnell verbraucht haben, späte Spektraltypen (z.B.) M-Sterne sind klein und leuchtschwach, deswegen haben diese eine Hauptreihenzeit von zig Milliarden Jahren (>10)

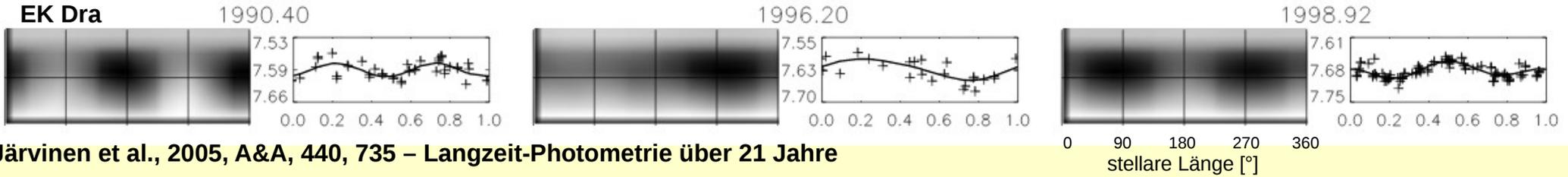


Quelle: www.mpg.de



Sternflecken - lassen sich auf mehrere Arten nachweisen:

Lichtkurven – die periodische Variation der Lichtkurve wird verursacht durch Sternflecken



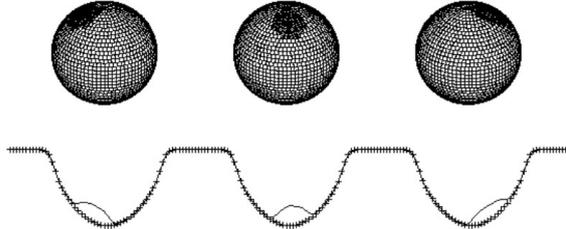
Doppler imaging:

Variationen in der Intensität verursacht durch Sternflecken können in Spektrallinien detektiert werden, als spektrale Features die durch die Rotation des Sterns über das Linienprofil wandern

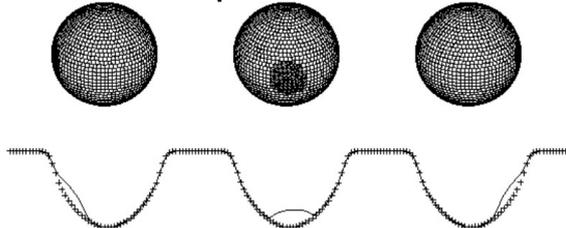
- **Fleckenmodellierung:** Vorteil "nur" Photometrie wird benötigt, Nachteil: Parameter von Flecken mit doppler imaging besser bestimmbar

Vergleich von heutiger und junger Sonne:

Fleck nahe des Pols

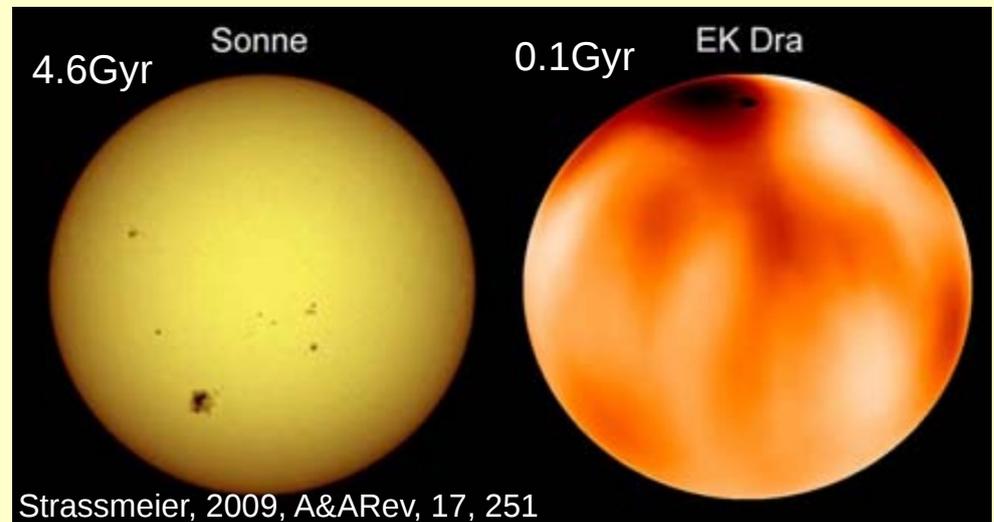


Fleck nahe des Äquators



Somit kann ein Sternbild mit Flecken reproduziert werden

1dim → 2dim



1dim spektrale Information ist eine 1dim Projektion des Flecks – über eine Serie von Spektren/Projektionen läßt sich Lage, Größe und Form des Flecks reproduzieren

Bedeckungsgrad: 25-40% auf EK Dra

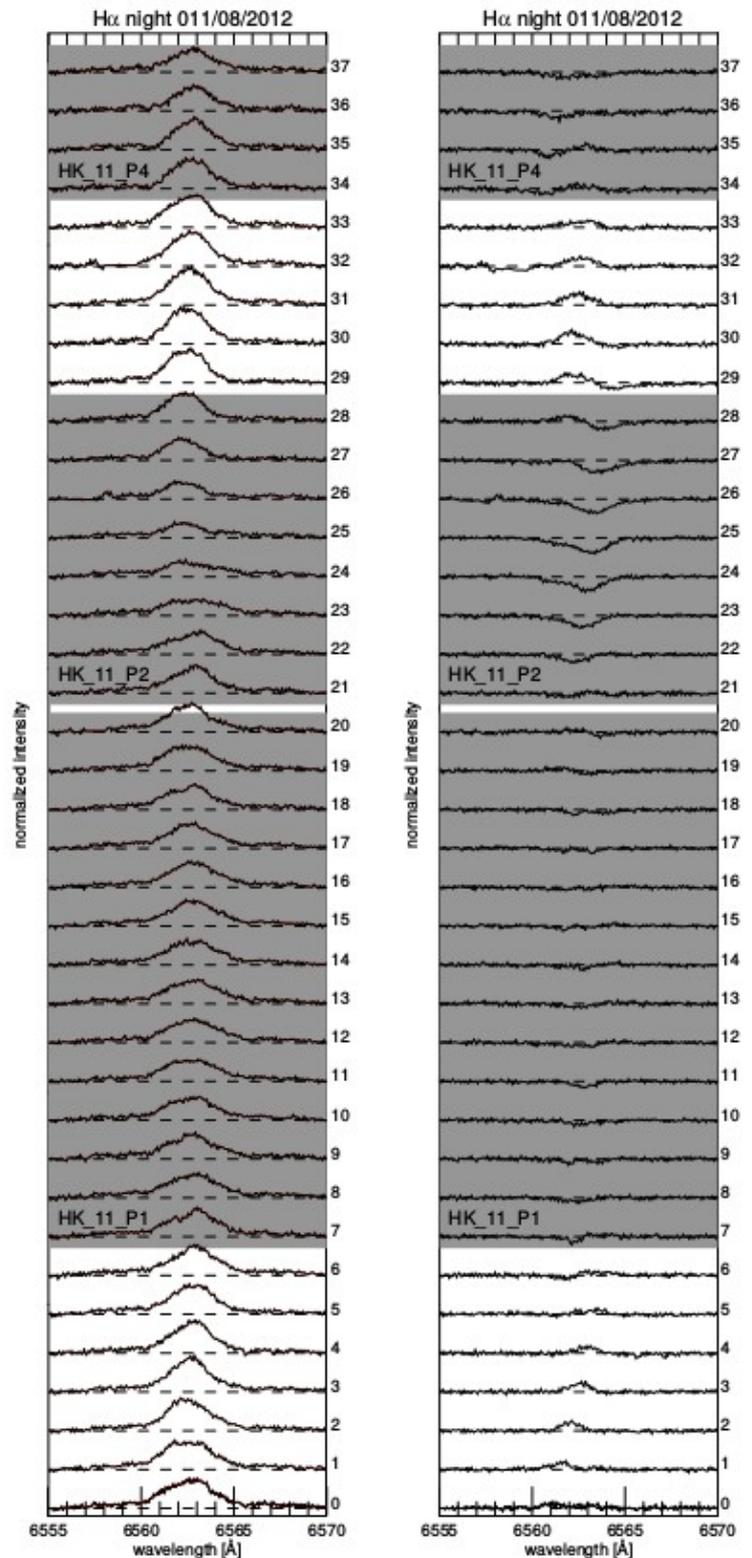
(O'Neal et al, 2004, AJ, 128,1802)

Bedeckungsgrad kann sich binnen Tagen ändern (Dorren & Guinan, 1994, ApJ, 428, 805)

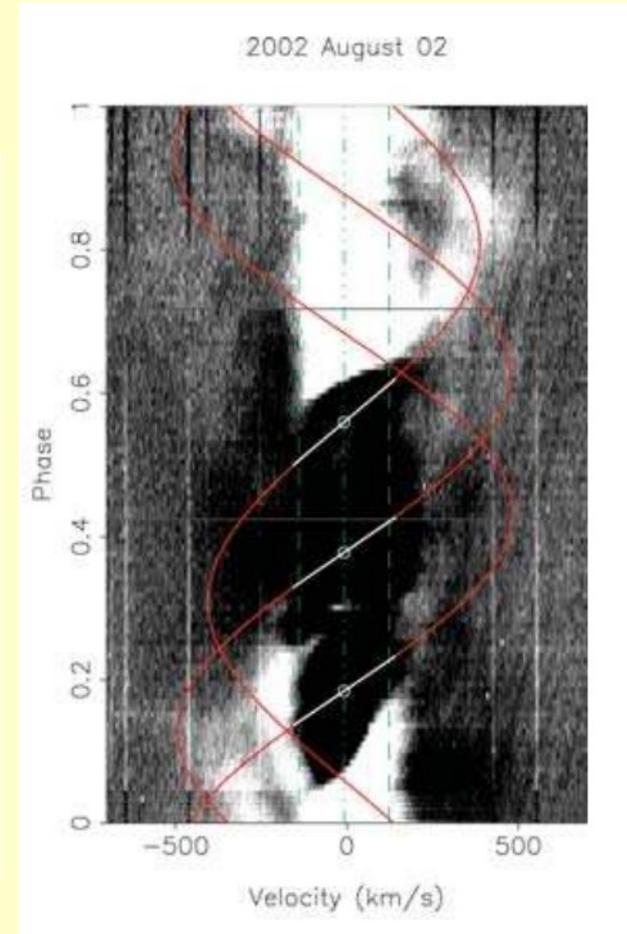
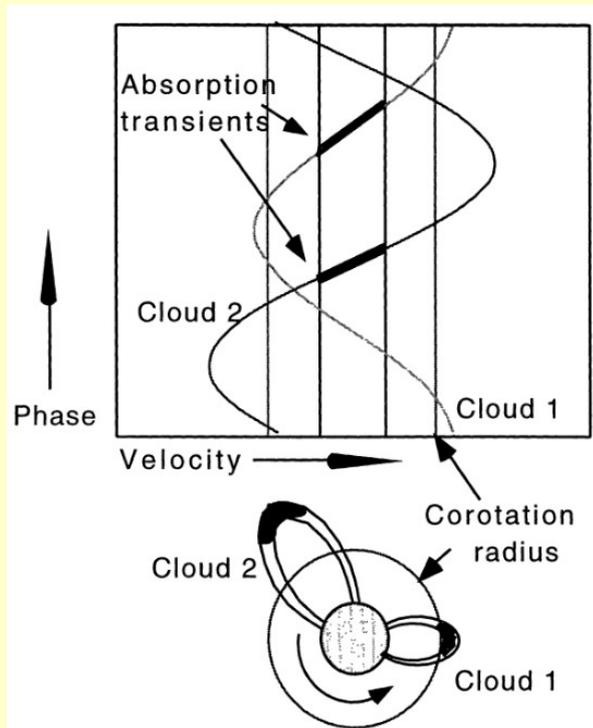
Stellare Protuberanzen

Stellare Protuberanzen können mittels spektralen Beobachtungen in H α nachgewiesen werden

Leitzinger et al., 2016, arXiv:1608.00453



Collier-Cameron, 1996, IAUS, 176, 449



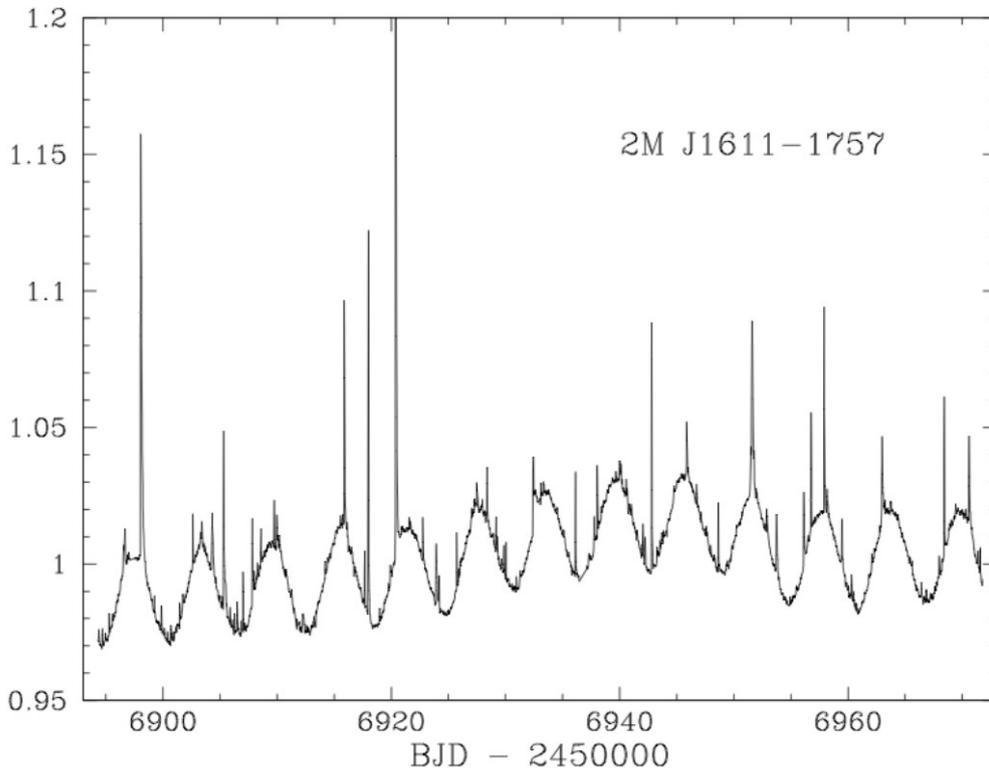
Dunstone et al., 2006, MNRAS, 365, 530

Stellare flares

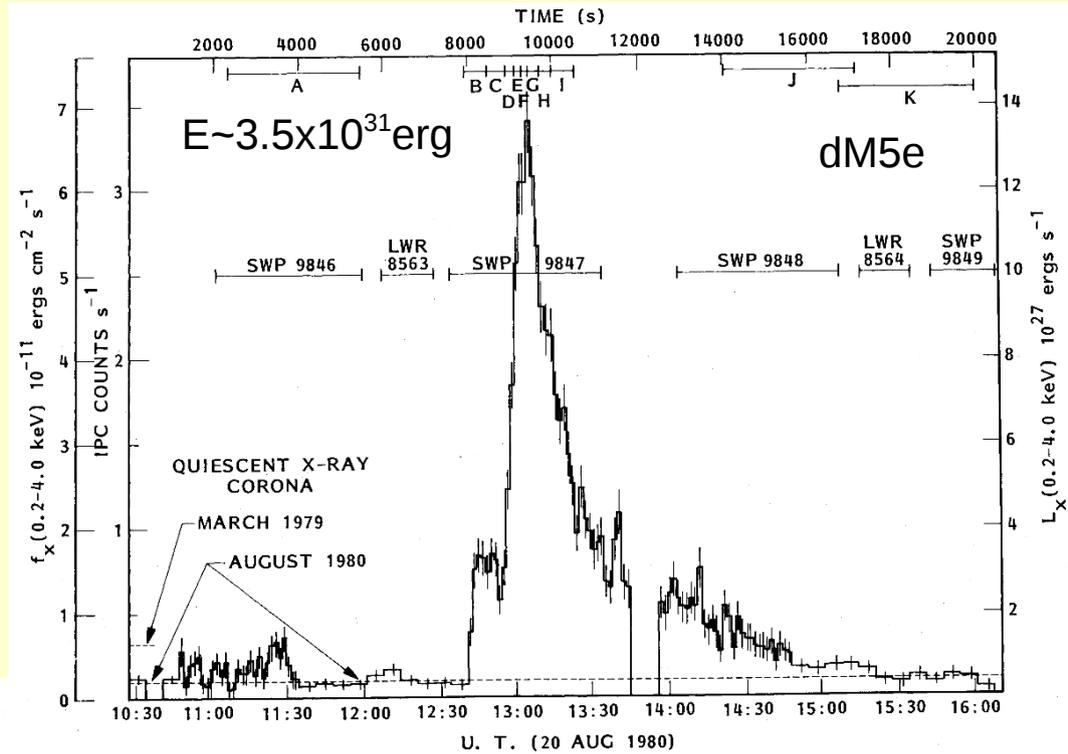
Stellare flares kann man über Lichtkurven detektieren:

Zwergstern des Spektraltypes M – Mitglied der Upper Scorpius Assoziation- Beobachtungen des Kepler Satellits über 77 Tage – kontinuierlich – 105 flares

Dauer des stärksten flares ~18h
Energie ~ 1.3×10^{32} erg



Günther et al., 2016, in preparation



Haisch et al., 1983, ApJ, 267,280

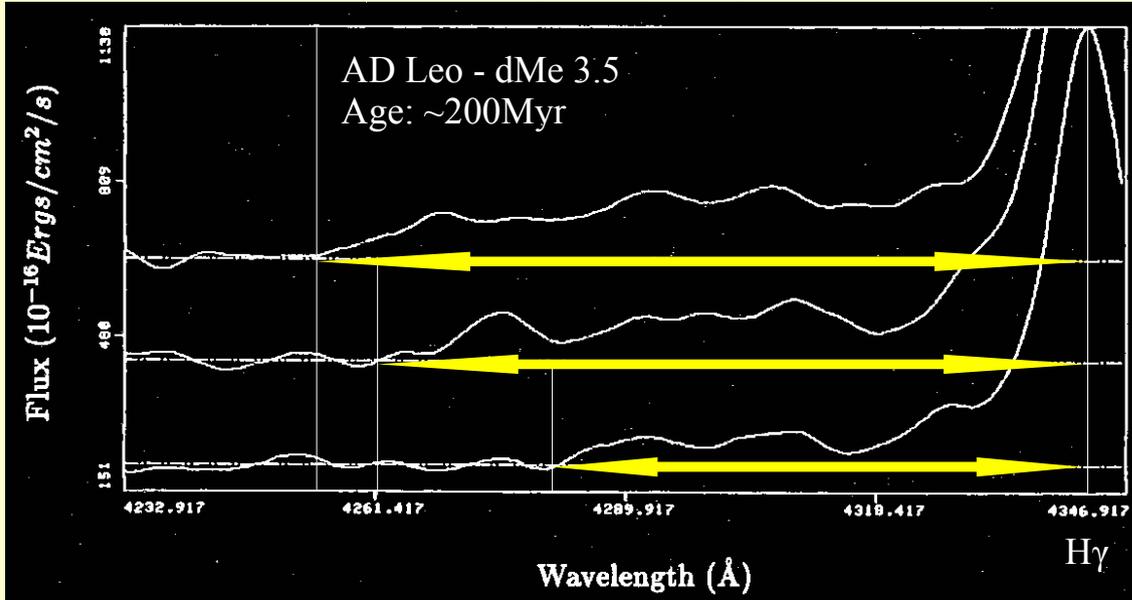


Zwergstern des Spektraltypes M – Proxima Cent - Beobachtungen des Einstein Satellits

Um Proxima Cent wurde erst kürzlich ein Planet in der habitablen Zone entdeckt

Stellar CMEs

Houdebine et al., 1990, A&A, 238, 249



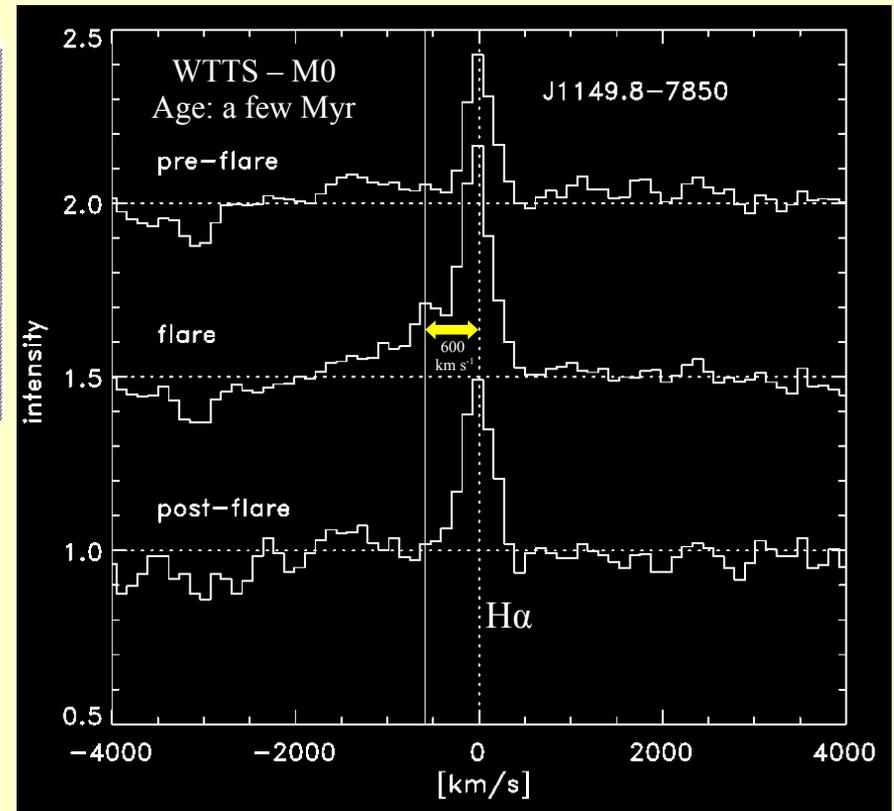
Stellare CMEs lassen sich u.a. über spektrale H α Beobachtungen nachweisen

AD Leo: $v \sim 5000 \text{ km s}^{-1}$
 $M_{\text{CME}} \sim 7.7 \times 10^{17} \text{ g}$

PROPERTIES	Infalling Protostar	Evolved Protostar	Classical T Tauri Star	Weak-lined T Tauri Star	Main Sequence Star
SKETCH					
AGE (YEARS)	10^4	10^5	$10^6 - 10^7$	$10^6 - 10^7$	$> 10^7$

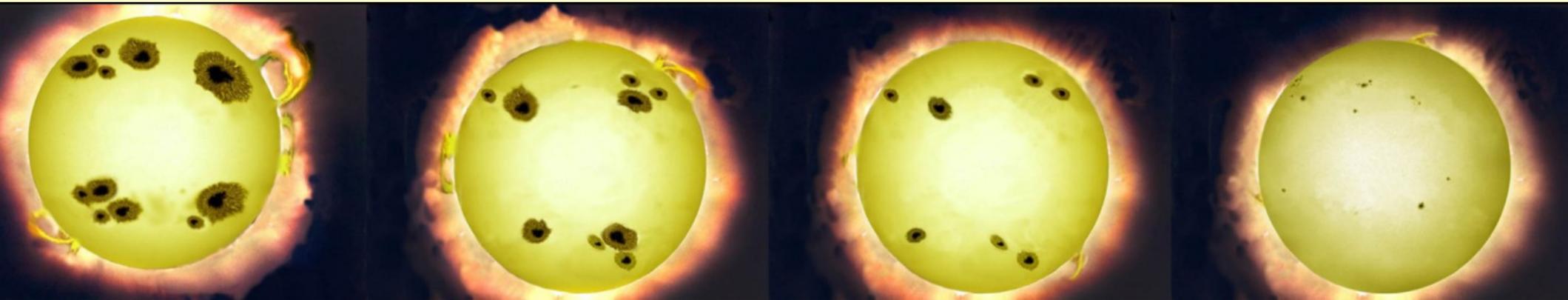
Feigelson & Montmerle, 1999, ARA&A, 37, 363

WTTS: $v \sim 600 \text{ km s}^{-1}$
 $M_{\text{CME}} \sim 1.4 \times 10^{18} - 7.8 \times 10^{19} \text{ g}$



Guenther & Emerson, 1997, A&A, 321, 803

Vergleich von solaren und stellaren Aktivitätsphänomenen



EK Dra
(100Myr)
50 flares/Tag
($E > 10^{32}$ erg)

π^1 UMa
(300Myr)
8 flares/Tag
($E > 10^{32}$ erg)

κ^1 Cet
(650Myr)
5 flares/Tag
($E > 10^{32}$ erg)

Sonne
(4.56Gyr)
0.06-0.16 flares/Tag
($E > 10^{32}$ erg)

CMEs	solar	stellar
Geschwindigkeit:	$< 3000 \text{ km s}^{-1}$	$< 5000 \text{ km s}^{-1}$
Masse:	$10^{11} - 10^{17} \text{ g}$	$< 10^{19} \text{ g}$
Häufigkeit:	$\sim 3/\text{Tag}$ (LASCO 1997-2006)	keine Statistik

Protuberanzen	solar	stellar
Höhe:	$\sim 26000 \text{ km}$	einige R_*
Masse:	$\sim 10^{14} \text{ g}$	$10^{14} - 10^{17} \text{ g}$

Flares	solar	stellar
Energie:	$< 10^{32} \text{ erg}$	$< 10^{36} \text{ erg}$
Häufigkeit:	0.02/Tag(X-class) (2010-2015)	siehe oben

Welchen beobachtungstechnischen Zugang gibt es um stellare Aktivität zu detektieren?

Generell: bodengebunden im optischen Bereich, satellitengebunden für X-ray oder EUV

2 Methoden:
▶ Imaging: **flares, Flecken**
▶ Spektroskopie: **CMEs, Granulation**

Zugänge für Uni Graz national:

Leopold-Figl-Sternwarte Mitterschöpfung – Uni-Wien

1.5m Spiegel
Imaging
Spektroskopie



Observatorium Lustbühel Graz



30cm

0.5m Spiegel
0.3m Astrograph
Imaging
Spektroskopie



50cm



Welchen beobachtungstechnischen Zugang gibt es um stellare Aktivität zu detektieren?



Zugänge für Uni Graz international: European Southern Observatory (ESO)

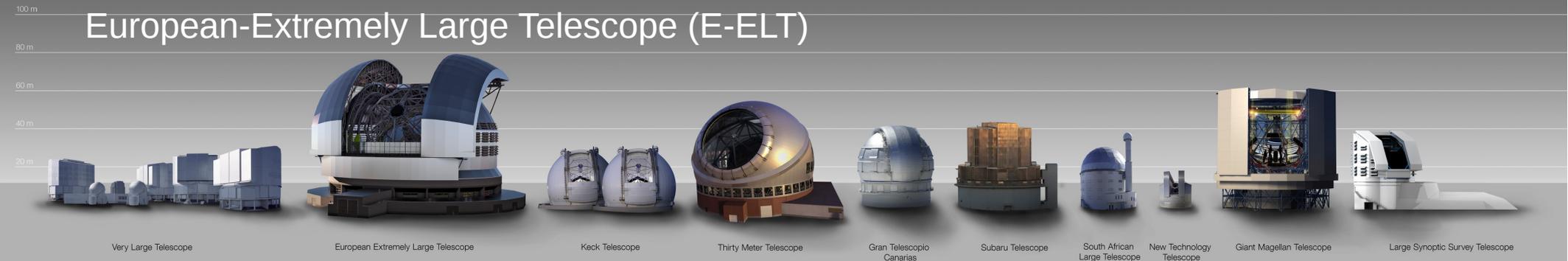


LaSilla, ESO's erste Beobachtungsstätte



Paranal, die Heimat des Very Large Telescope (VLT)

European-Extremely Large Telescope (E-ELT)



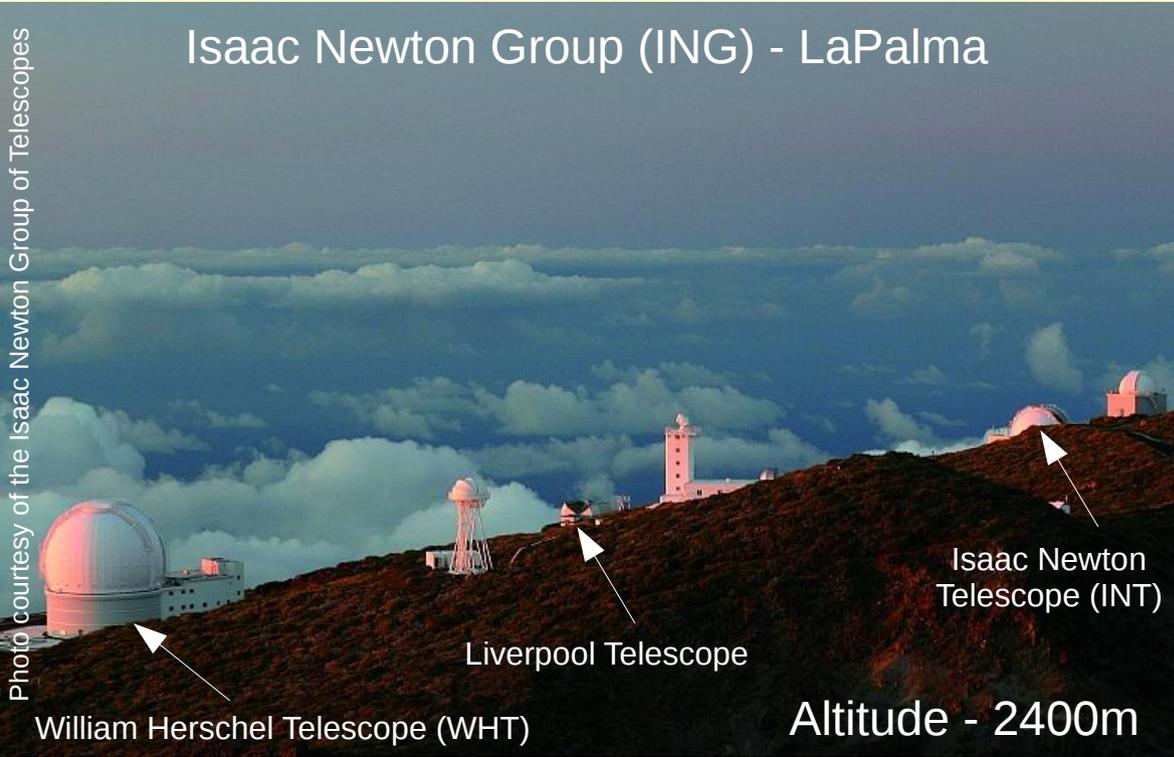
Welchen beobachtungstechnischen Zugang gibt es um stellare Aktivität zu detektieren?



Zugänge für Uni Graz international: Optical Infrared Co-ordination Network (OPTICON) – 7th Framework Program (FP7 – 2007-2013) - European Union's Research and Innovation funding program – 14 verschiedene Teleskope

Isaac Newton Group (ING) - LaPalma

Photo courtesy of the Isaac Newton Group of Telescopes



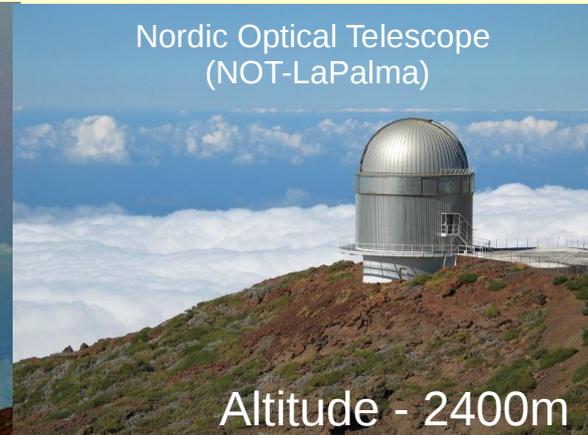
William Herschel Telescope (WHT)

Liverpool Telescope

Isaac Newton Telescope (INT)

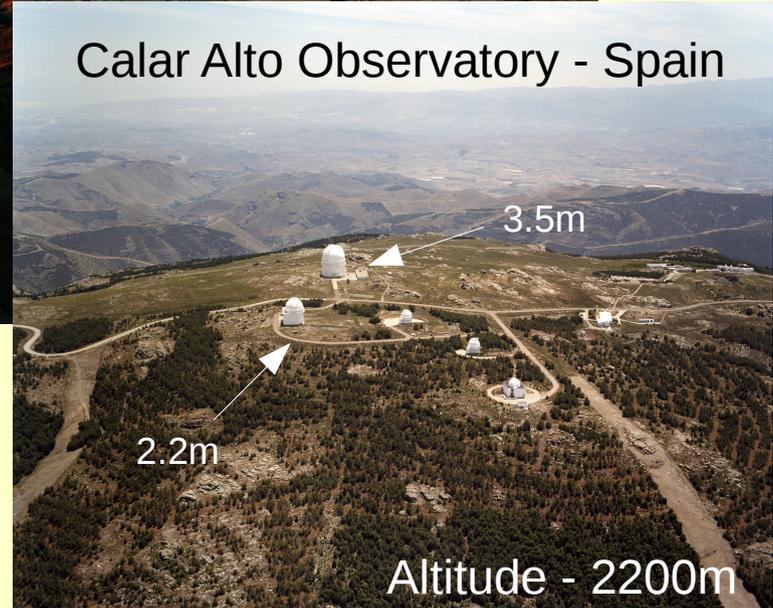
Altitude - 2400m

Nordic Optical Telescope (NOT-LaPalma)



Altitude - 2400m

Calar Alto Observatory - Spain



3.5m

2.2m

Altitude - 2200m

Altitude - 1200m

Anglo Australian Telescope (AAT),
3.9m

Siding Spring Observatory – Australia

Beobachtungsnächte pro Semester über OPTICON:
WHT=6, INT=10, NOT=20, CA2.2m=20, CA3.5m=3, AAT=10

Zusammenfassung

Die meisten der solaren Aktivitätsphänomene lassen sich bei jungen Sternen detektieren – wenn auch diese nur eingeschränkt untersucht werden können

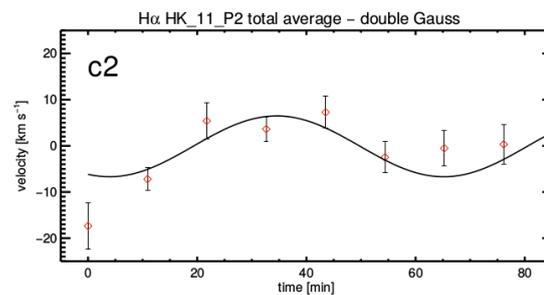
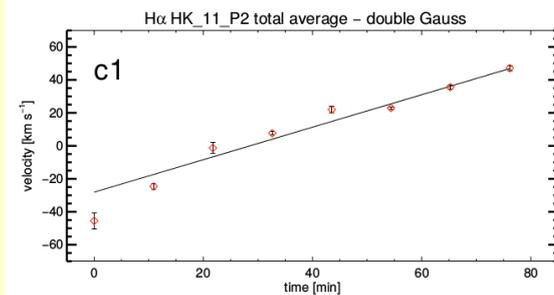
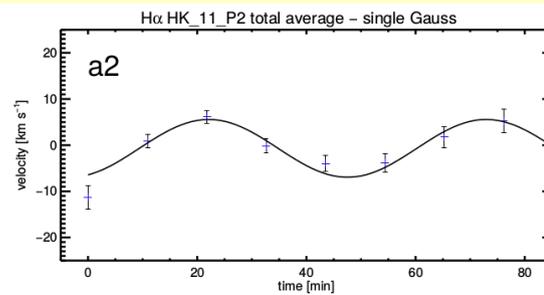
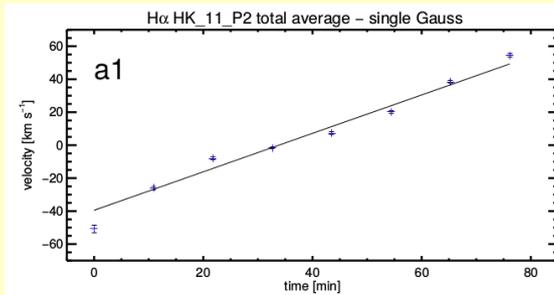
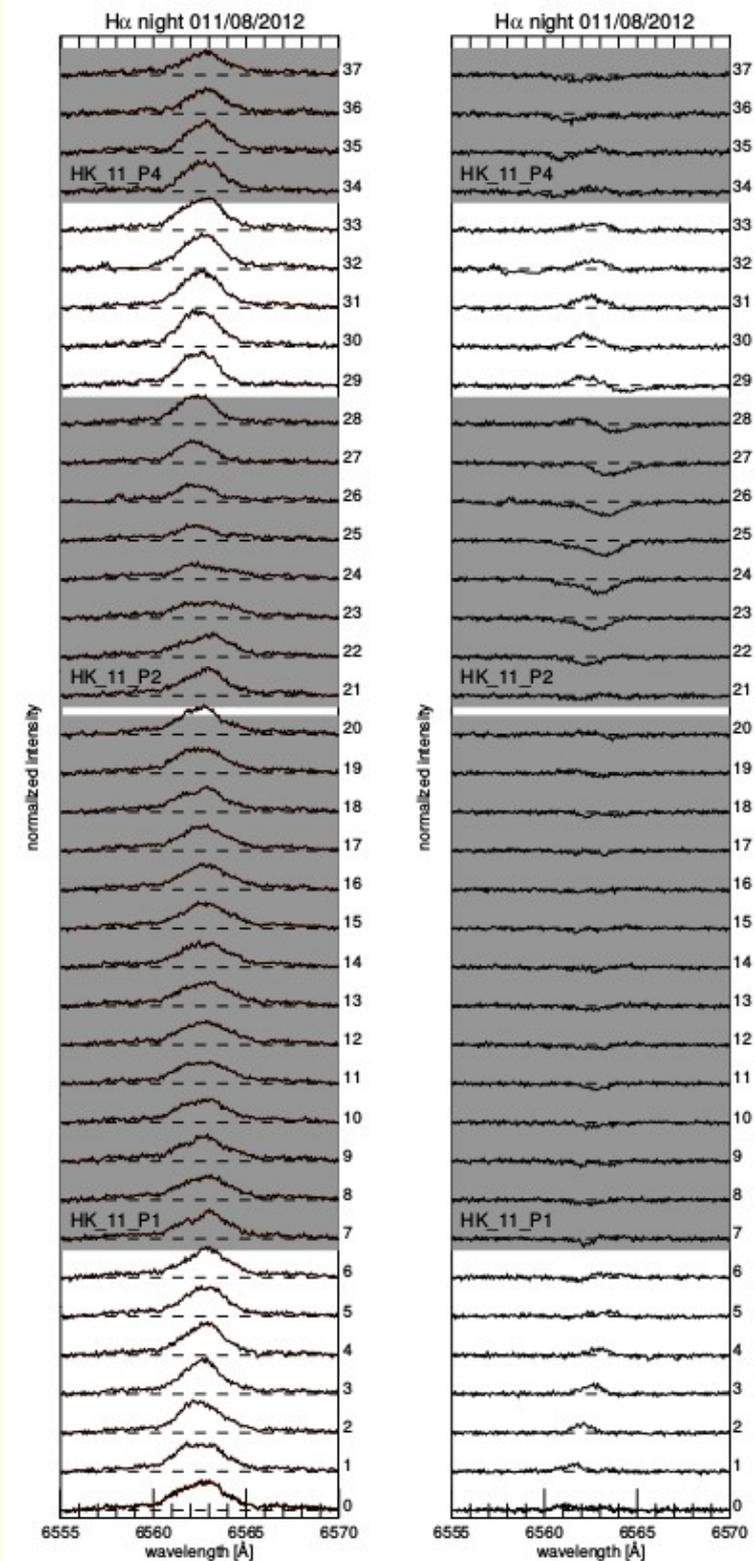
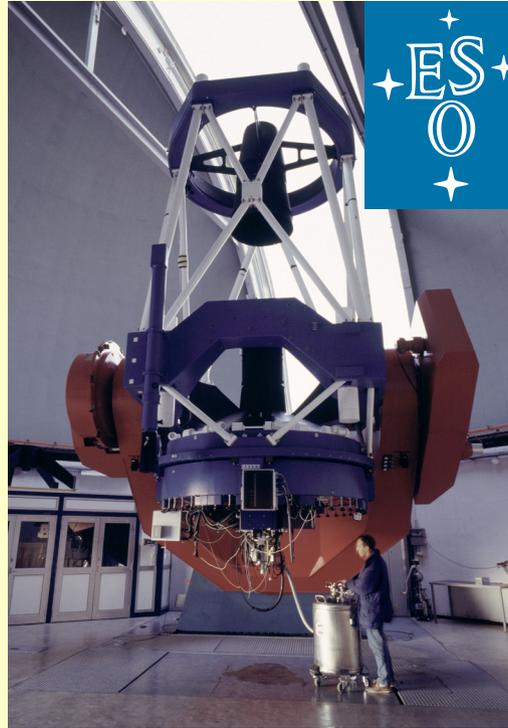
Stellarer Aktivitätsphänomene sind meist häufiger und stärker als solare

Für einige stellare Aktivitätsphänomene (z.B. CMEs) besteht immer noch der Bedarf der Charakterisierung, insbesondere in Bezug auf statistische Signifikanz



Oszillationen stellarer Protuberanzen

- Schnell rotierender junge M Zwerg - HK Aqr
- Beobachtungen ESO LaSilla, 2.2m MPG/FEROS
- Spektren müssen hochaufgelöst sein um kleine Geschwindigkeitsänderungen zu sehen $>6\text{km/s}$



Oszillationen solarer Protuberanzen

Protuberanzen können durch Störungen auf der Sonne zu Oszillationen angeregt werden – bei Sternen läßt sich bei Detektion Rückschlüsse auf das stellare Magnetfeld ziehen

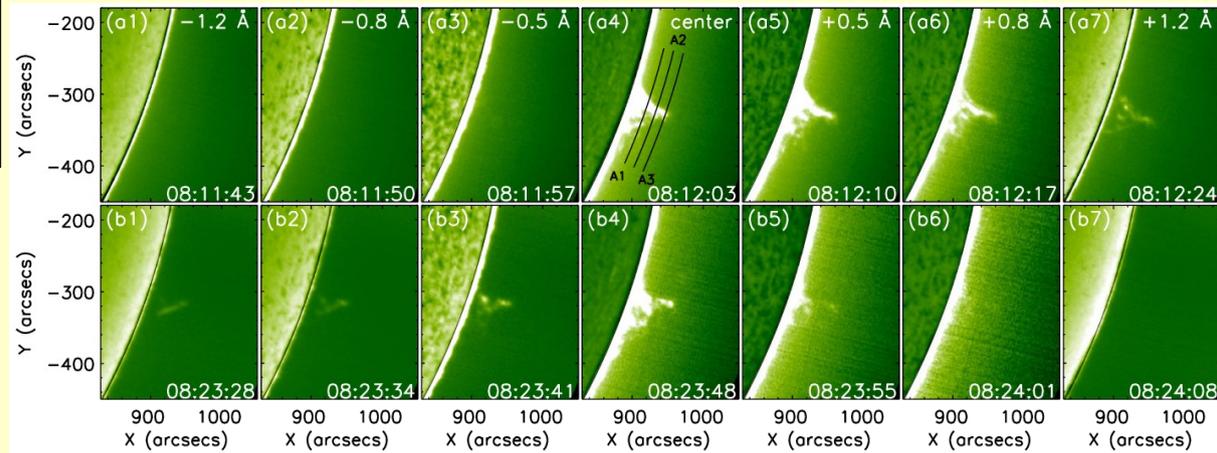
Small amplitude oscillations –
Amplituden von sehr wenigen km/s,
Lebenszeiten im Minuten bis
Stundenbereich – Auslöser weitgehend
unbekannt

Large amplitude oscillations –
Amplituden von ~20km/s und
Lebenszeiten von Stunden (aber auch
<1 h) – Auslöser sind oft flares

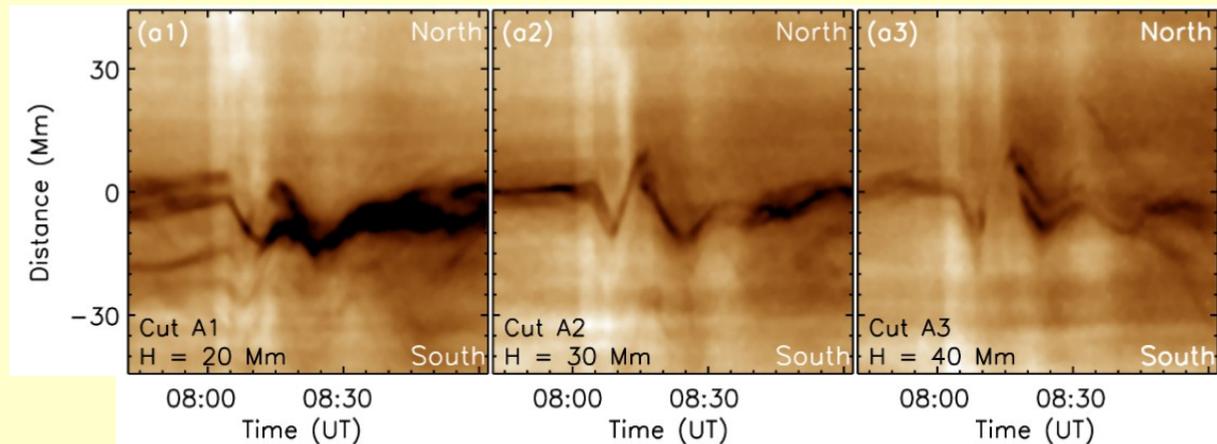
- longitudinale Oszillationen
- transversale Oszillationen

Transversale Oszillation eines solaren
Filaments ausgelöst durch eine
Schockwelle

H α Bildsequenz des Kerns und der Flügel einer solaren Protuberanz



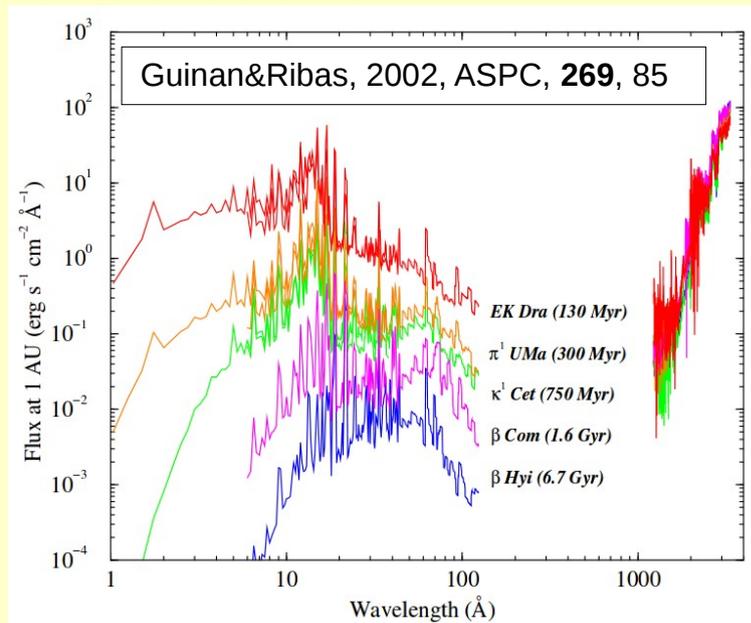
Transversale Oszillation dieser Protuberanz



Shen et al., 2014, ApJ, 795, 130

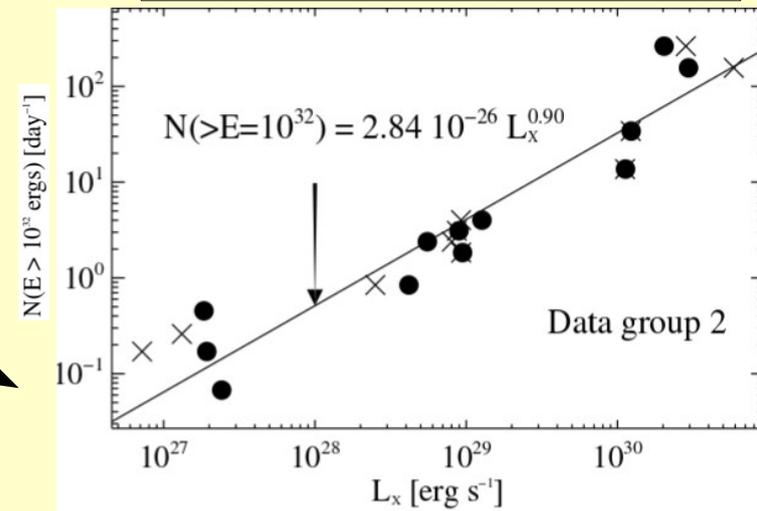
Amplitude ~ 30km s⁻¹
Periode ~ 14 Minuten

Stellare Flares:



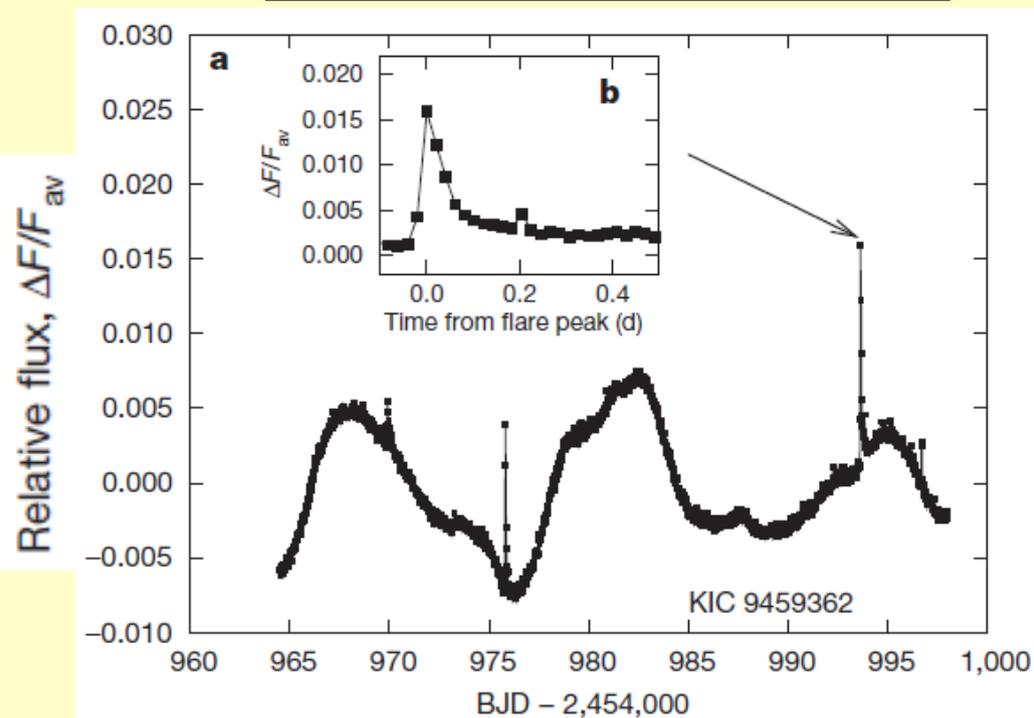
- Junge Hauptreihensterne zeigen höhere Röntgenleuchtkräfte (L_x) als unsere Sonne
- Es existiert ein Zusammenhang zw. der Röntgenleuchtkraft von HR-Sternen und Anzahl von flares pro Tag mit bestimmten Energien ($N(E > E_c)$)

Audard et al., 2000, ApJ, **541**, 396-409



Eindeutig über die Lichtkurve zu detektieren

Maehara et al., 2012, Nature, **485**, 478-481



Superflares auf jungen Sternen *junge sonnenähnliche Sterne:*

- Aus einem sample von 83 000 Sternen, beobachtet mit dem Kepler Satelliten, zeigen 148 Sterne flares mit Energien stärker als der Carrington Event im 19 Jahrhundert auf der Sonne (energetischste Event in den Aufzeichnungen)
- Junge Sterne haben höhere magnetische Energien und größere Aktivitätsgebiete/Sternflecken keine dieser Flare-Sterne hat einen Planeten
- Bsp.: Proxima Cent ~ 8 Superflares/Jahr
Sonne ~ 1 Superflare/(5-600 Jahren) - $E \sim 10^{33}$ erg

Inwiefern ist solare/stellare Aktivität relevant?

Sonne

Sterne

Solare/stellare Aktivität beding das Weltraumwetter

Vorhersage von Aktivität ist relevant
für die Weltraumfahrt

Energetische Teilchen sind eine
große Gefahr für Astronauten

Charakterisierung Parameter stellarer
Aktivität

Input für stellare Aktivitätsstudien

Charakterisierung von stellarer Aktivität

Einfluß stellarer Aktivität auf
Exoplaneten

Wesentlicher Faktor für die Habitabilität
von Exoplaneten

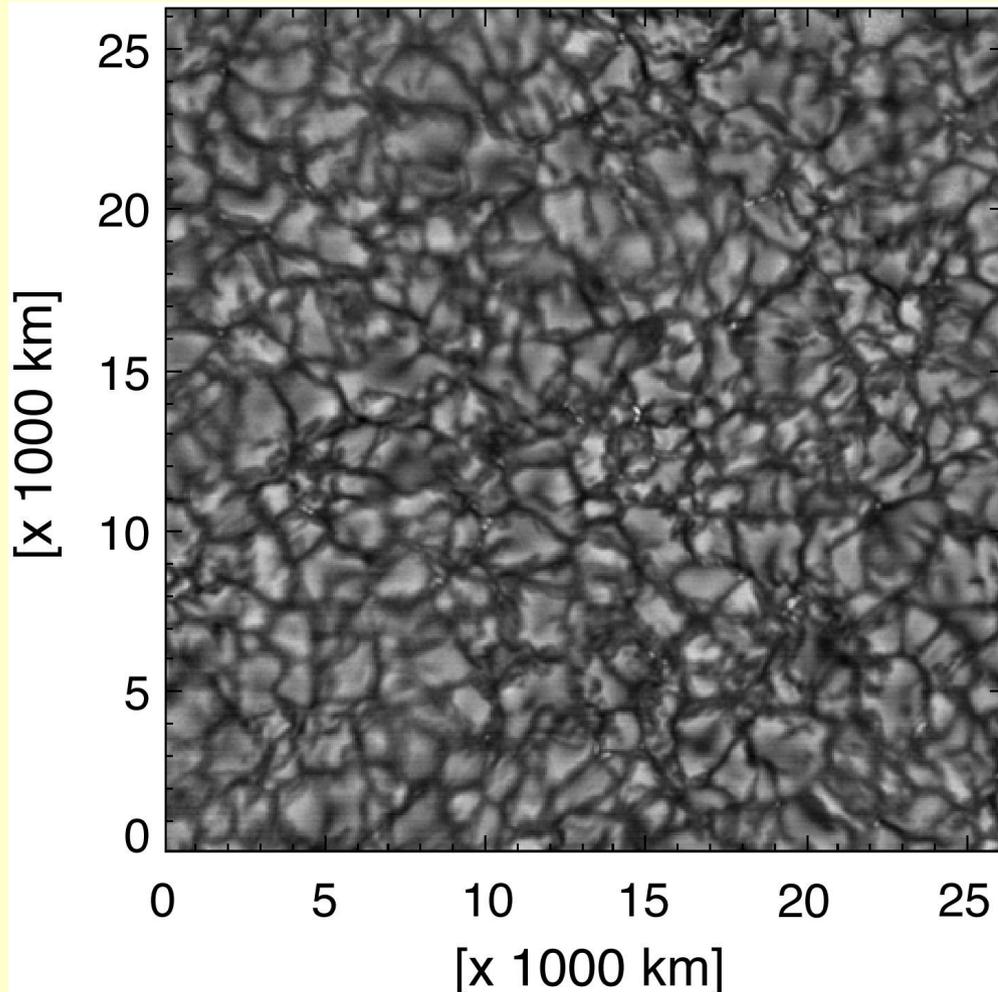
Entschlüsselung der Geschichte der
Sonne

Ist der Wind der jungen Sonne dominiert
von CMEs?

Welche dieser Phänomene kennen wir von jungen sonnenähnlichen Sternen und wie kann man diese bestimmen?

	Sonne	Sterne
• Flecken	Bild	Bild/Spektrum
• Protuberanzen	Bild	Spektrum
• Flares	Bild	Bild/Spektrum
• CMEs/eruptive Filamente	Bild	Spektrum
• Granulation	Bild	Spektrum

Variabilität auf der Oberfläche - Granulation



- Offensichtliche wabenförmige Oberflächenstruktur der Sonne – Manifestation der Dynamik der Sonnenoberfläche
- Bekannt seit dem 19. Jahrhundert
- Manifestation von Konvektion – das Auf- und Absteigen von Plasmazellen als solarer Energietransport nahe der Oberfläche
- Größe der Granulen – bis einige 1000km, Lebenszeit von einigen Minuten
- Granulen bewegen sich horizontal auf der Sonne – Wohin?

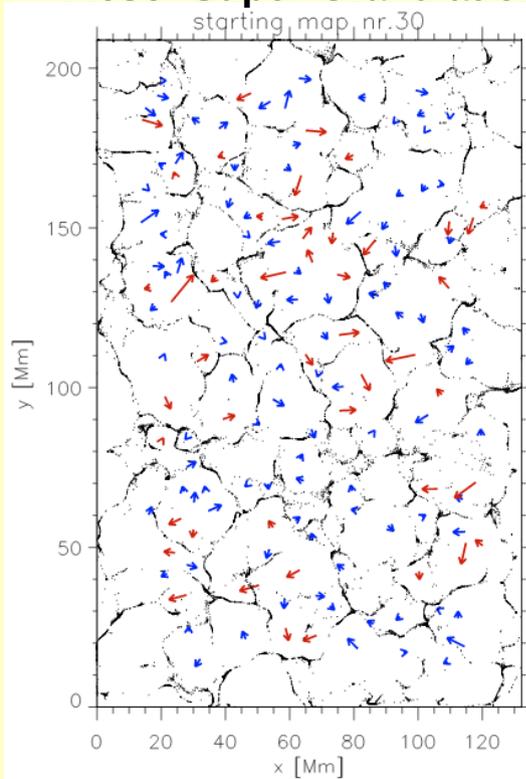
T. Rimmele/NSO/AURA/NSF – Richard B. Dunn Solar Telescope, Sacramento Peak, USA

Variabilität auf der Oberfläche - Mesogranulation und Supergranulation

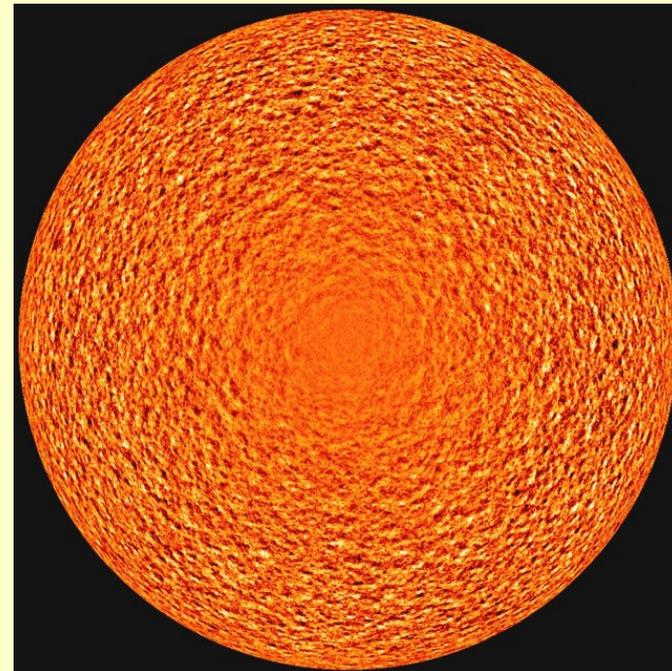
- Supergranulation – horizontales Geschwindigkeitsfeld der Granulation
- Supergranulation wird sichtbar in sog. Dopplerimages – eine Technik um Doppler verschobene Elemente bildhaft darzustellen (Strukturen die sich bewegen erscheinen Wellenlängenverschoben in einem Spektrum)
oder
durch verfolgen (“tracken”) von Granulen die sich an den Rändern der Supergranulen sammeln
- Größten Granulen ~4000km – kleinsten Supergranulen ~12000km – dazwischen Mesogranulation?
- Mesogranulation ist nicht direkt sichtbar sondern nur in gemittelten vertikalen Geschwindigkeitsfeldern – von der Skala her würden Mesogranulen zw. Granulation und Supergranulation passen und auch den missing link in der Theorie der “multi-scale in convection” – bis heute umstritten

Leitzinger et al., 2005, A&A, 444, 245

Meso- Super-Granulation



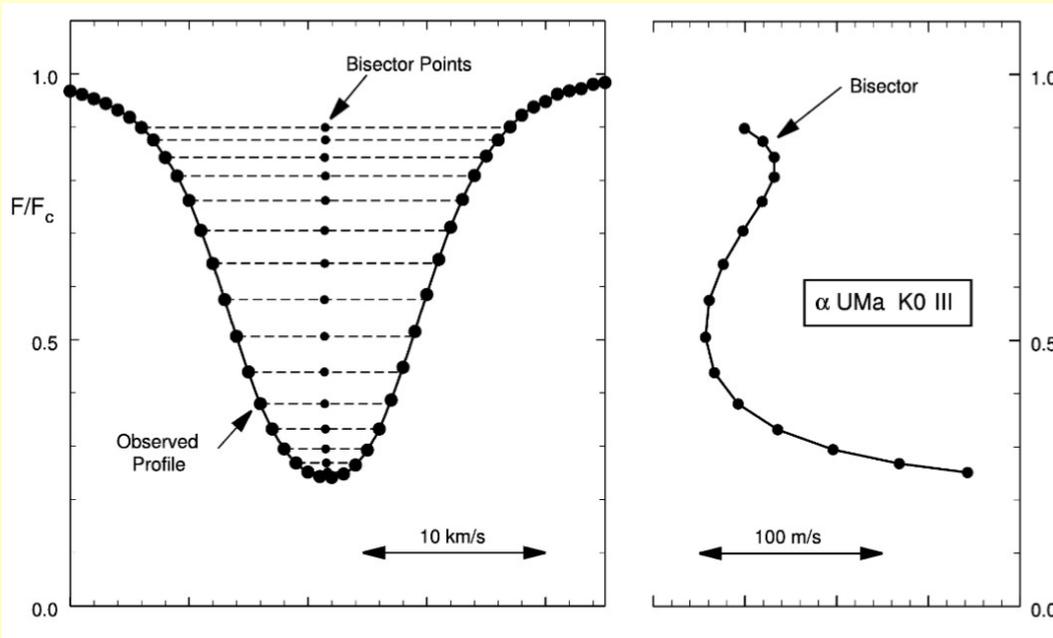
Supergranulation



SOHO/NASA

Granulation auf Sternen?

Stellare Granulation kann unmöglich räumlich aufgelöst werden aber spektrale Linienasymmetrien in photosphärischen Linien geben Auskunft über Konvektion in Sternen



- hohe spektrale Auflösung notwendig
- Form des Bisektors ist bestimmt durch Geschwindigkeit und Temperatur – Auf- und Absteigen von Plasma verschiedener Temperatur und Geschwindigkeit

