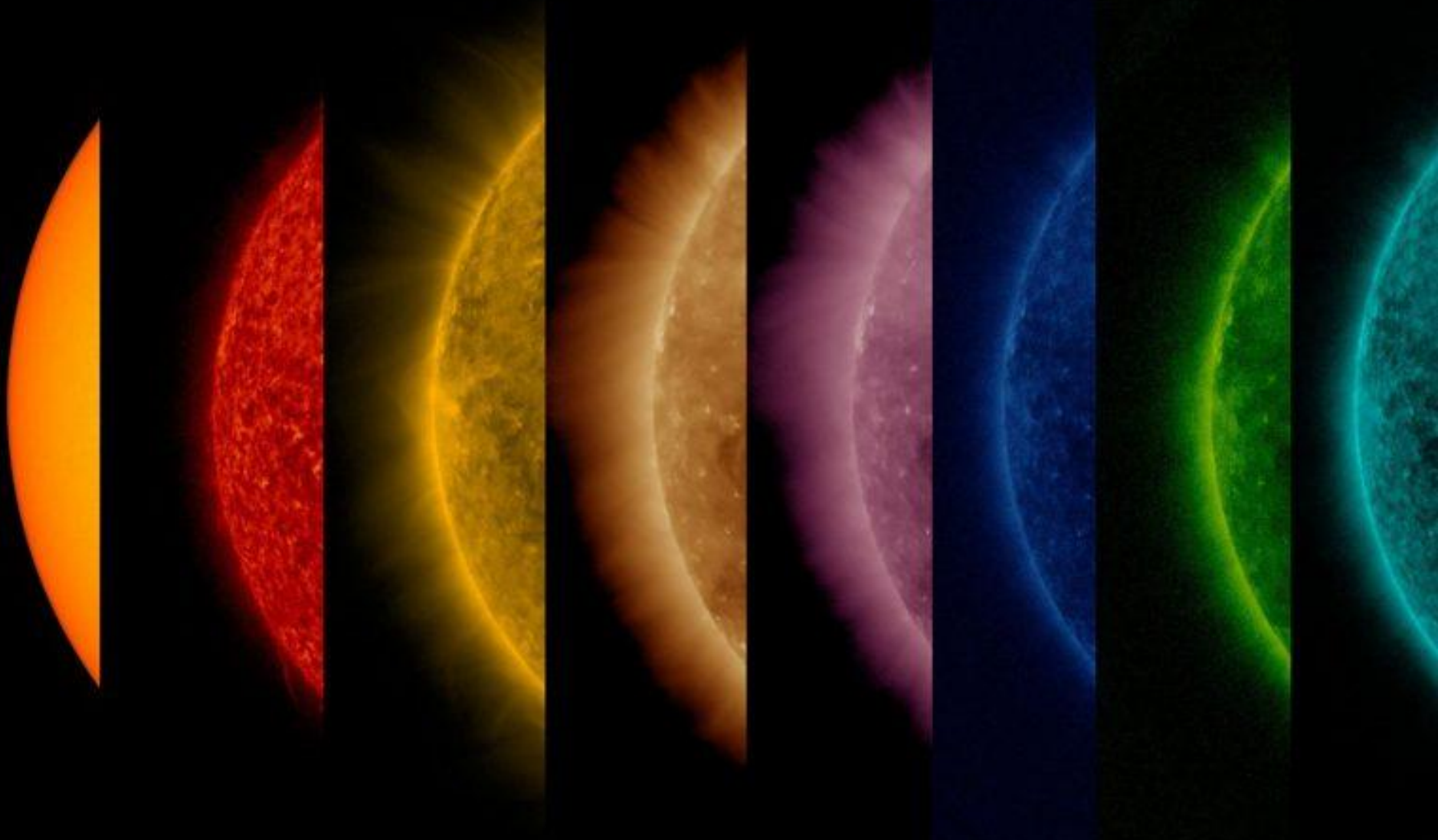


aktywność: Słońce vs. gwiazdy



SDO/HMI Quick-Look SDO/AIA 304 2 SDO/AIA 171 2 SDO/AIA 193 SDO/AIA 211 SDO/AIA 335 SDO/AIA 94 SDO/AIA 131

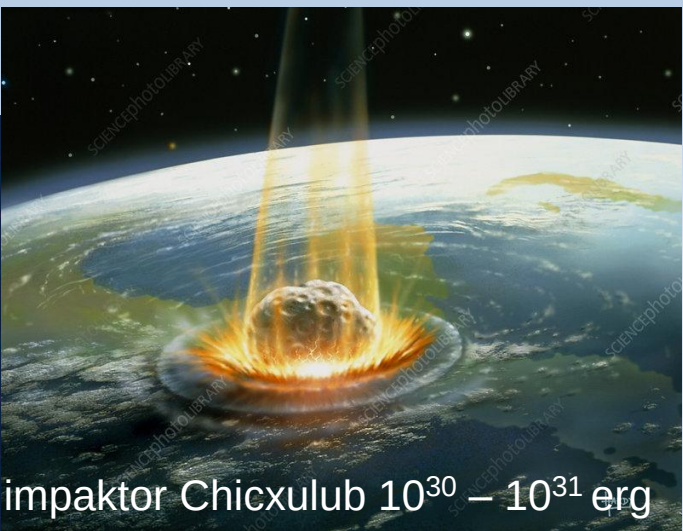
rozbłysk słoneczny – ile energii?



bomba termojądrowa $<2 \times 10^{24}$ erg



trzęsienia ziemi $<10^{26}$ erg



impaktor Chicxulub $10^{30} - 10^{31}$ erg

sumarycznie	$E=3 \times 10^{32}$ erg
miękkie pr. X (SXR, $\lambda > 5\text{\AA}$)	10×10^{31} erg
twarde pr. X (HXR, $\lambda < 5\text{\AA}$)	5×10^{31} erg
UV, Vis, IR	1×10^{31} erg
SEP ($>10\text{MeV}$)	2×10^{31} erg
SEP ($<10\text{MeV}$)	2×10^{31} erg
CME	10×10^{31} erg

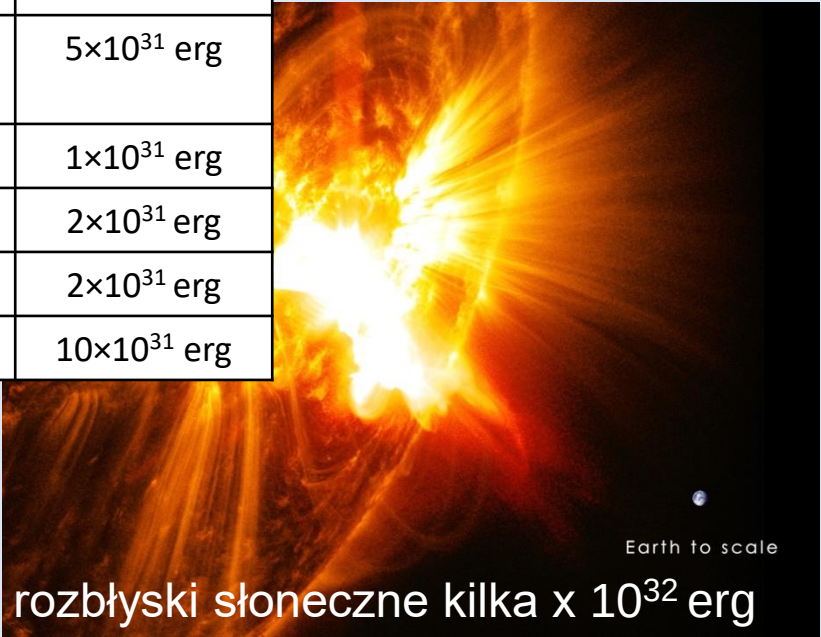


erupcje wulkaniczne

Mount St. Helens, 1980 (VEI 5): $\sim 10^{24}$ erg

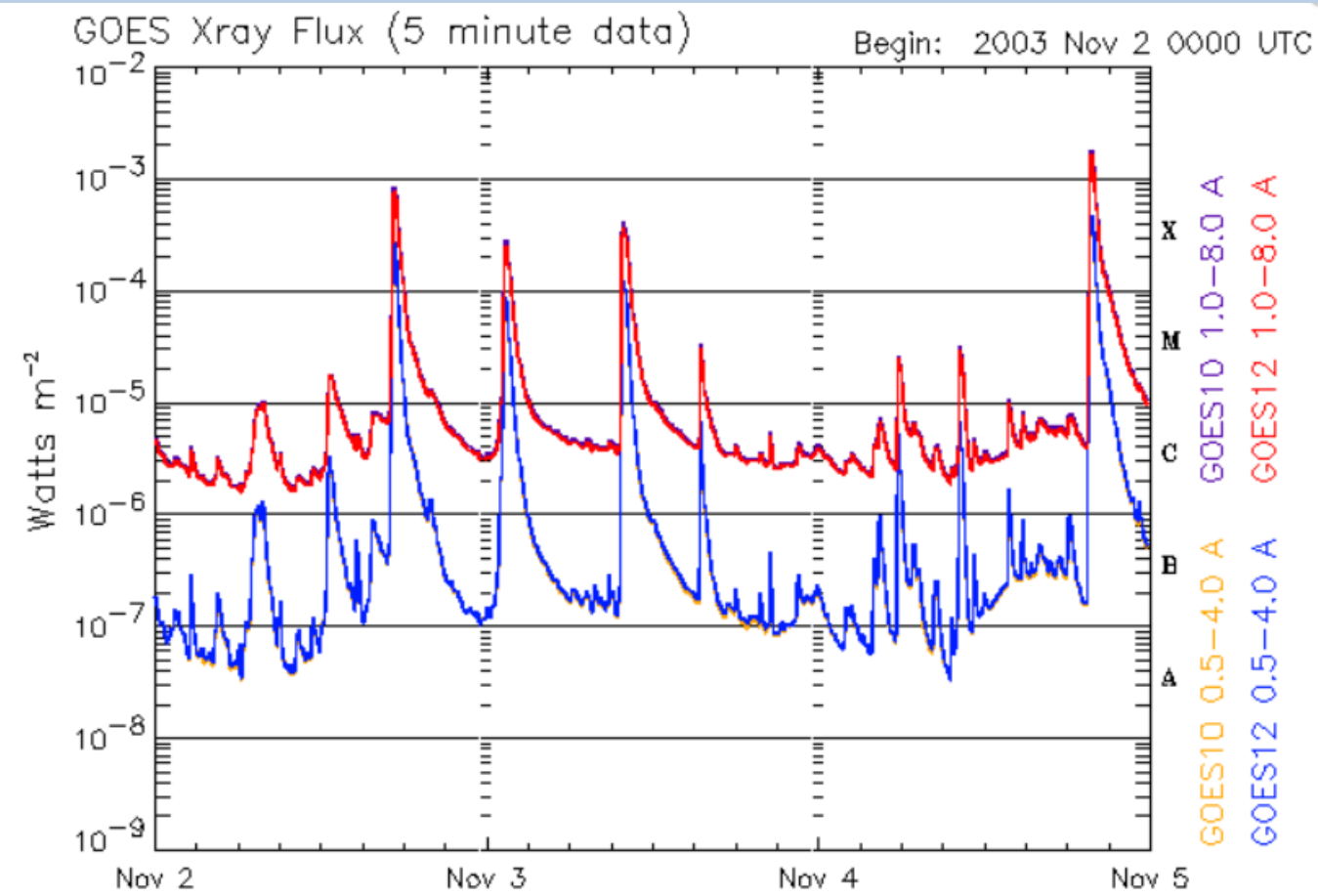
Krakatoa, 1883 (VEI 6): $\sim 10^{25}$ erg

Yellowstone, 640000 b.p. (VEI 8): $\sim 4 \times 10^{28}$ erg



rozbytyski słoneczne kilka $\times 10^{32}$ erg

rozbłysk słoneczny – naj...



1	X40+	2003/11/04
2	X28.57+	2001/04/02
3	X24.57+	2003/10/28
4	X24.42+	2005/09/07
5	X20.67+	2001/04/15
6	X14.36	2003/10/29
7	X13.3	2017/09/06
8	X12.97	1997/11/06
9	X12.95	2006/12/05
10	X11.96	2003/11/02

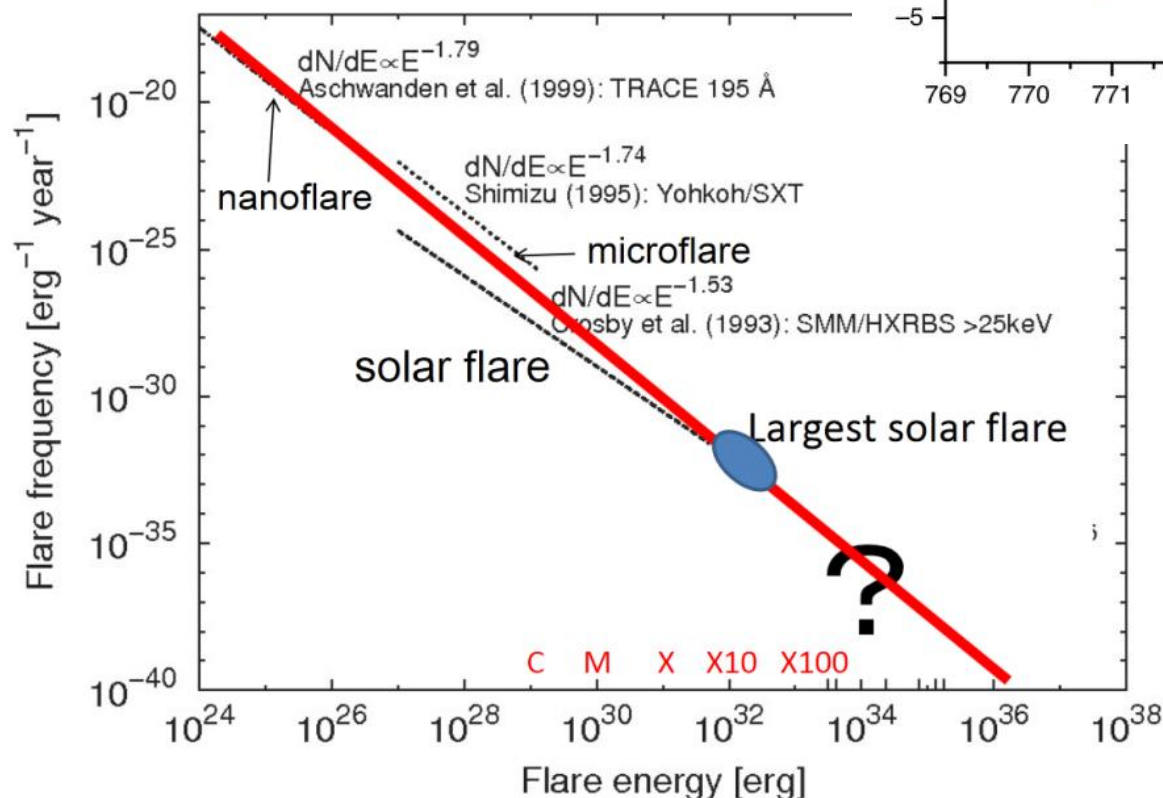
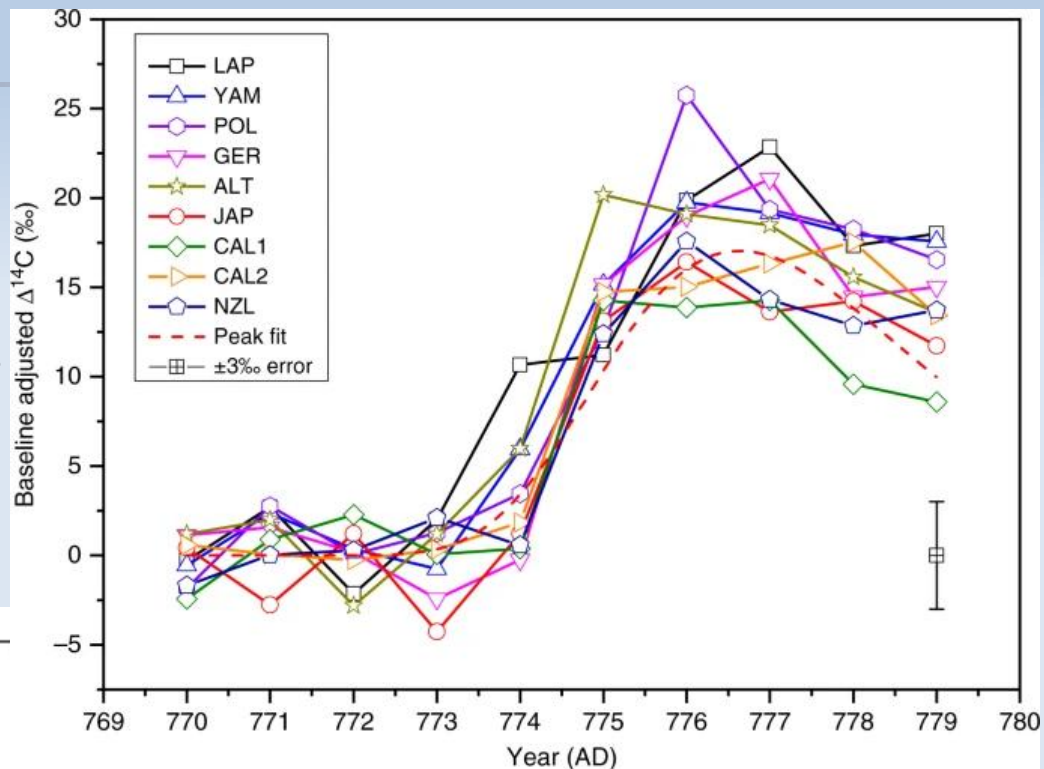
lista najsilniejszych rozbłysków (od 1996)
www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/top-50-solar-flares

Jednak okres prowadzenia obserwacji z zakresie wysokich energii jest dość krótki (~50 lat) i może nie obejmować największych możliwych dla Słońca poziomów aktywności. Być może Słońce potrafi wyprodukować silniejsze rozbłyski. Na to pytanie można szukać odpowiedzi badając dane pośrednie o aktywności, co pozwala sięgnąć dalej wstecz w czasie.

rozbłysk słoneczny – naj...

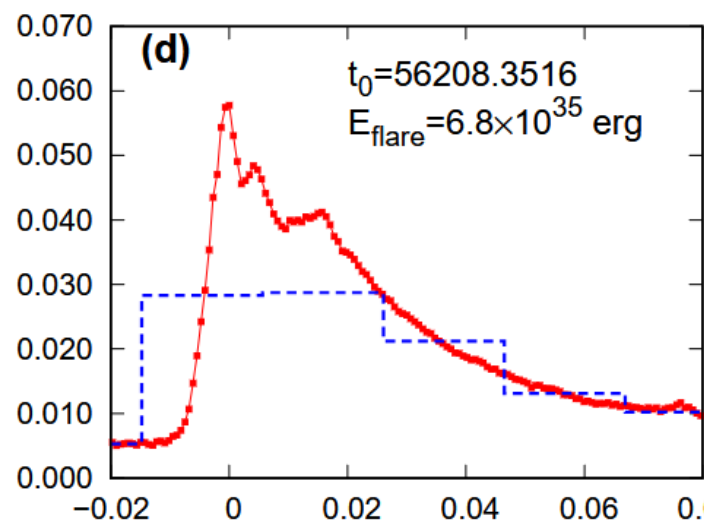
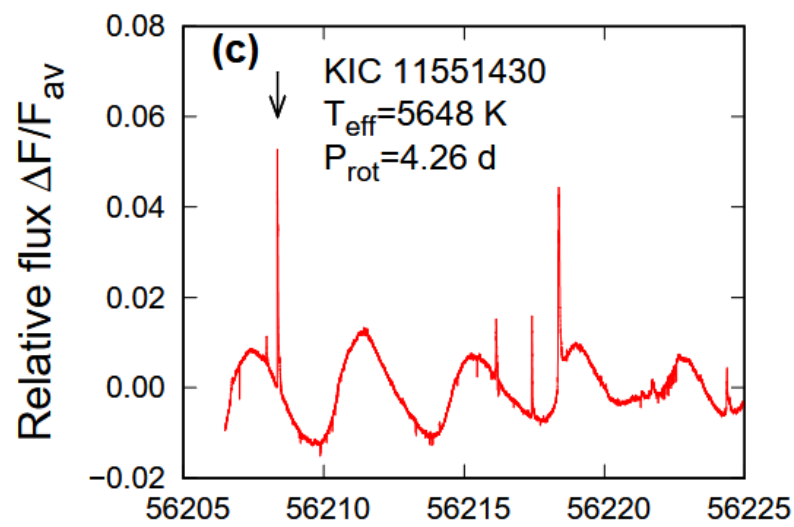
Jakie silne mogą być rozbłyski słoneczne?

Miyake event (Miyake et al. 2012) – znaczny wzrost ilości ^{14}C w drzewach dla lat 774-775. Jedno z wyjaśnień to wyjątkowo silny SEP połączony z super-rozbłyskiem ($\sim 10^{33}$ - 10^{34} erg).



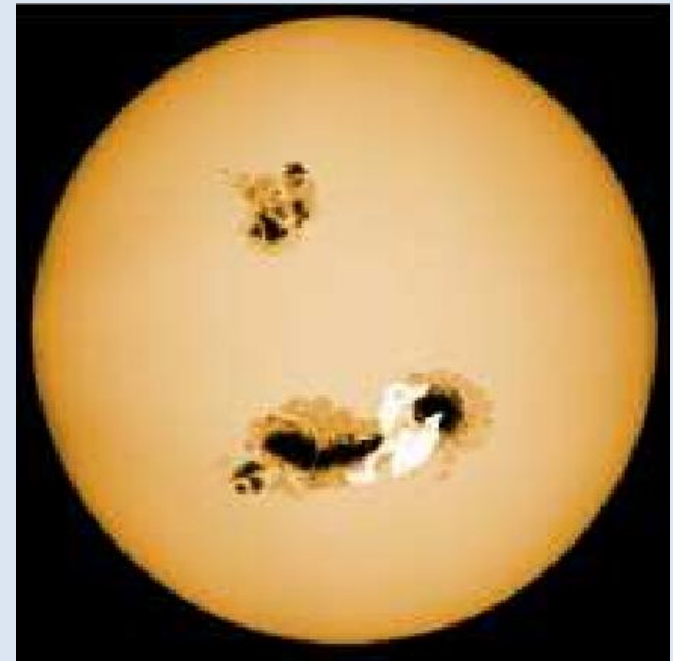
Częstotliwość występowania rozbłysków (w tym mikro- i nano-rozbłysków) w zależności od wydzielonej w nich energii. Największe zaobserwowane współcześnie rozbłyski zaznaczono niebieską elipsą. Miyake event mógł mieć energię jeszcze 10-100x większą, ale szacowanie jest niepewne. Według danych proxy, Miyake event to jedno z najsilniejszych zjawisk w ciągu ostatnich 9000 lat

rozbiłyski słoneczne i gwiazdowe



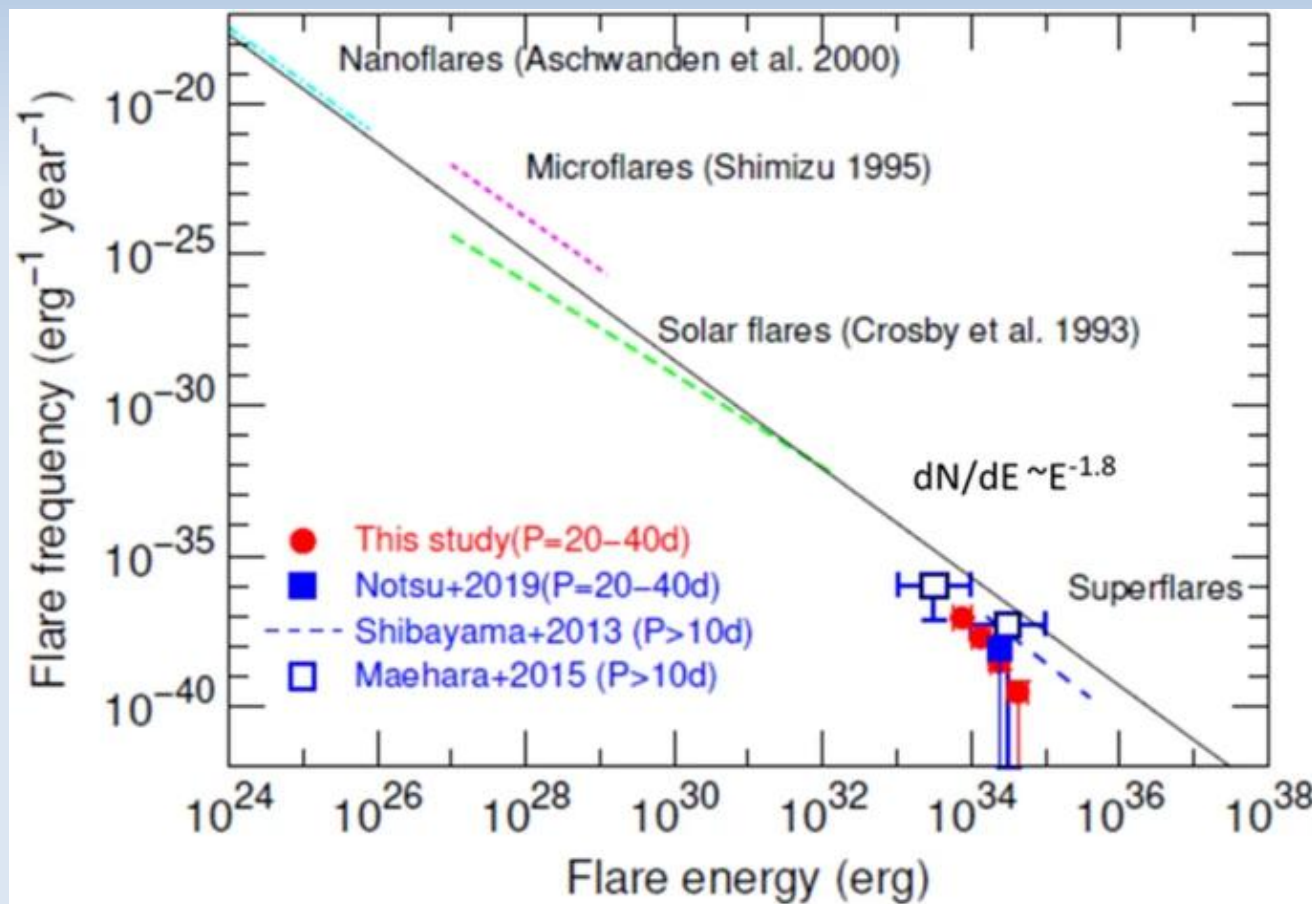
Długookresowe zmiany jasności gwiazdy rozbiłyskowej KIC 11551430 (c). Powiększony wykres zmian jasności podczas rozbiłysku oznaczonego strzałką (d). Czerwone i niebieskie punkty to dane o krótkiej i długiej kadencji. Na wykresie podano szacowaną energię rozbiłysku [Notsu et al. 2016].

gwiazda	czas trwania	energia (erg)	typ
Groombridge 1830	18 min	$E_B \sim 10^{35}$	G8 V
Kappa Cet	~ 40 min	$E \sim 2 \times 10^{34}$	G5 V
MT Tau	~ 10 min	$E_U \sim 10^{35}$	G5 V
Pi ¹ UMa	>~35 min	$E_X = 2 \times 10^{33}$	G1.5 V
S For	17 - 367 min	$E_V \sim 2 \times 10^{38}$	G1 V
BD +10°2783	~ 49 min	$E_X \gg 3 \times 10^{34}$	G0 V
Omicron Aql	~ 5 - 15 dni	$E_{BV} \sim 9 \times 10^{37}$	F8 V
5 Ser	~ 3 - 25 dni	$E_{BV} \sim 7 \times 10^{37}$	F8 IV-V
UU CrB	>~ 57 min	$E_{\text{opt}} \sim 7 \times 10^{35}$	F8 V



przykładowe super-rozbiłyski gwiazdowe

rozbłyski słoneczne i gwiazdowe



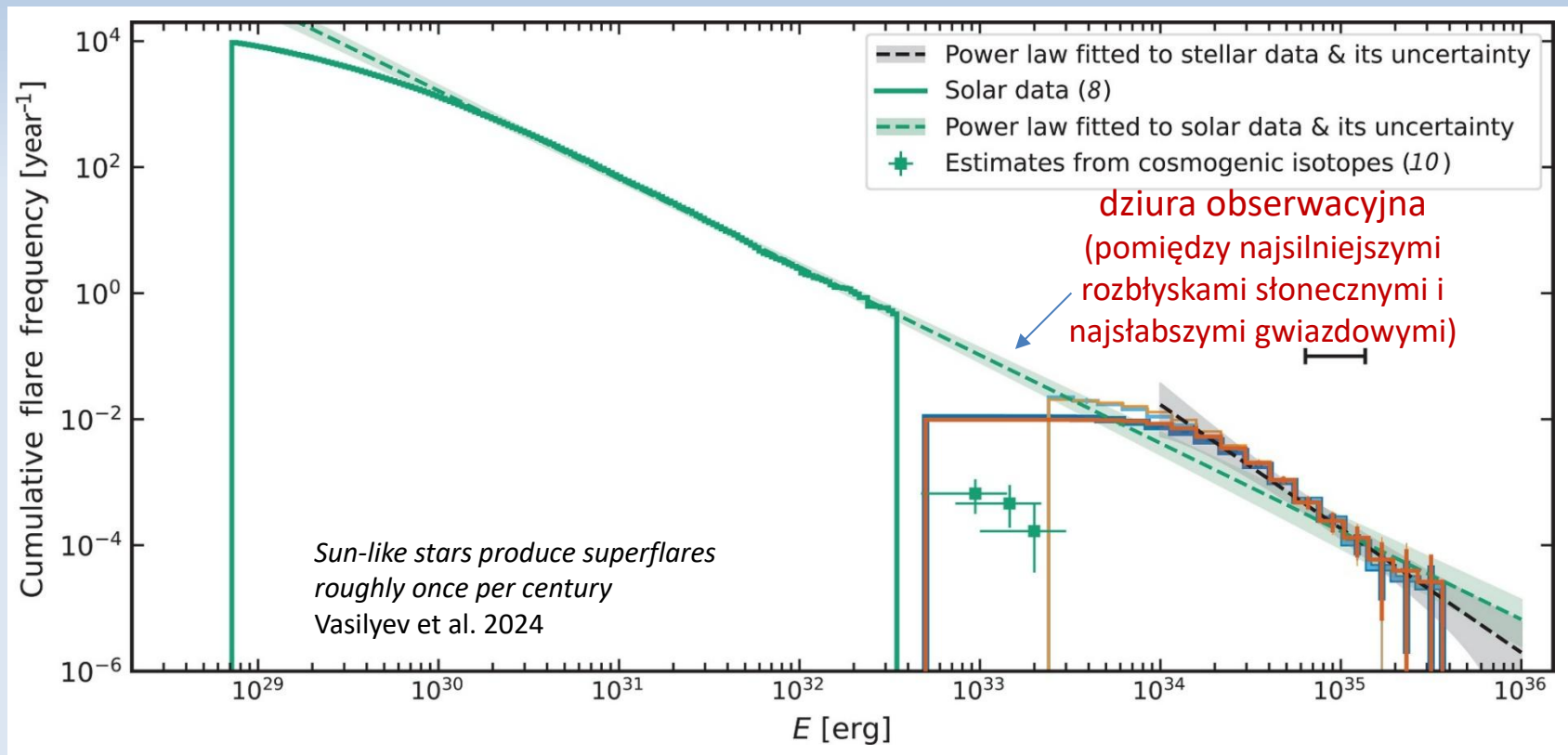
Częstotliwość występowania rozbłysków (w tym nano- i mikro-rozbłysków, linie) na Słońcu i super-rozbłysków na gwiazdach podobnych do Słońca (punkty, linia niebieska) [Cliver et al. 2022].

Super-rozbłyski klasy X100 – X10000 (10^{33} – 10^{35} erg) na gwiazdach podobnych do Słońca ($T_{\text{eff}}=5600\text{--}6000\text{K}$, wolna rotacja) zdarzają się raz na 500 – 5000 lat (dane z Keplera, Shibayama et al. 2013).

Nie można wykluczyć, że na Słońcu mogą również takie rozbłyski występować, ale dane nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, na ile obserwowane gwiazdy są podobne do Słońca.

Rozbłyski słoneczne i gwiazdowe leżą na jednej linii $dN/dE \sim E^{-1.8}$ – ten sam mechanizm fizyczny?

rozbłyski słoneczne i gwiazdowe



Częstotliwość występowania super-rozbłysków o energiach $>10^{34}$ erg dla gwiazd podobnych do Słońca wynosi $8-9 \cdot 10^{-3}$ rok (raz na ok. 120 lat, linia czerwona)

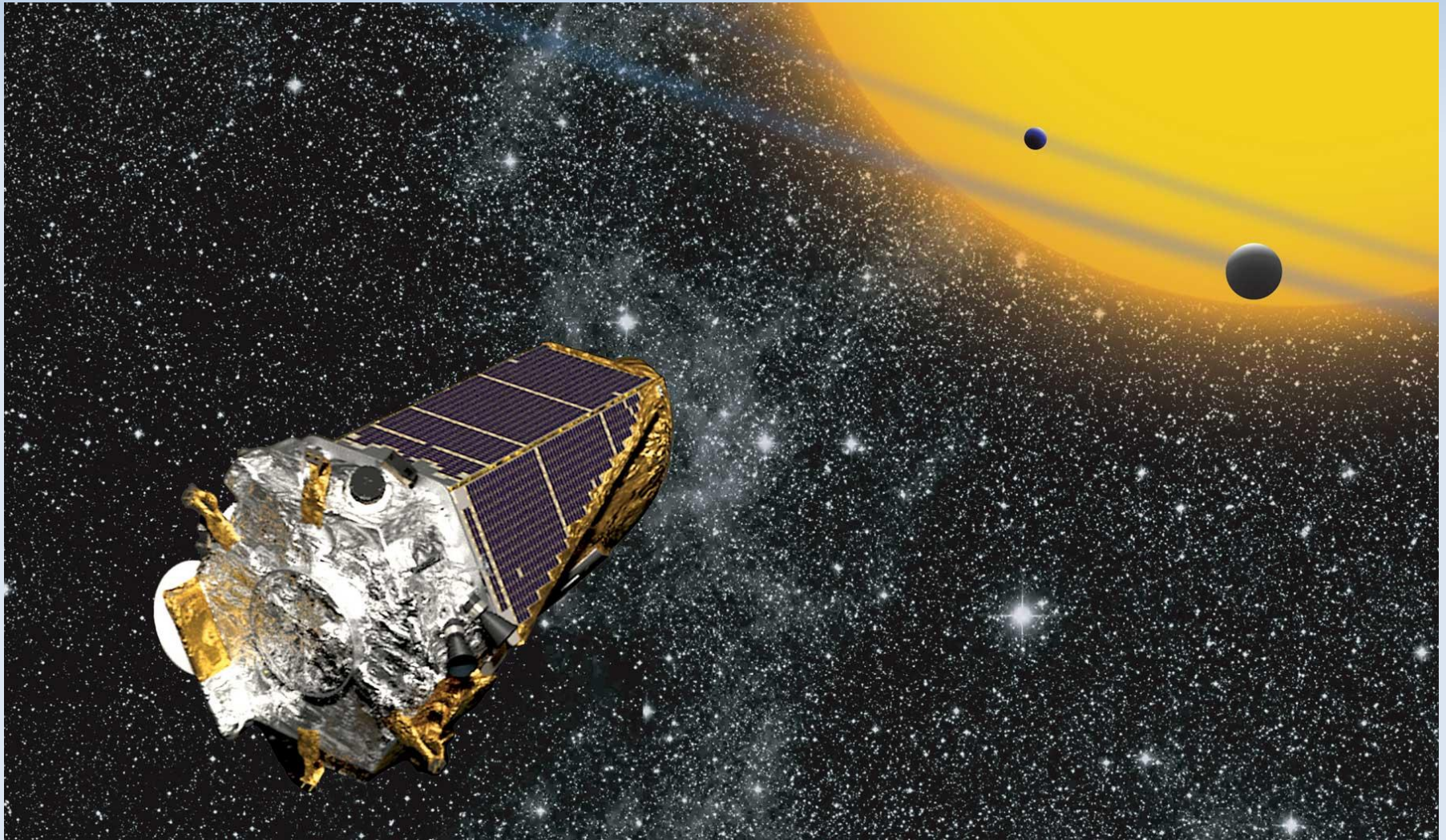
Ekstrapolacja rozkładu częstotliwości rozbłysków słonecznych na energie $>10^{34}$ erg jest prawie zgodna z obserwacjami dla gwiazd (1 super-rozbłysk na 150-350 lat, linia zielona przerywana)

Najsilniejsze zaobserwowane rozbłyski słoneczne: $6-7 \cdot 10^{32}$ erg (za ostatnie 200(?) lat)

Dane proxy (izotopy kosmogeniczne) wskazują na znacząco niższą częstotliwość SEP w ostatnich 12 tys. lat w porównaniu do powyższych oszacowań (zielone pkt) (problematiczne: relacja SEP – rozbłyski jest złożona)

Wątpliwość: czy badana próbka gwiazd jest reprezentatywna dla Słońca? (+ braki obserwacyjne)

SEP = solar energetic particles



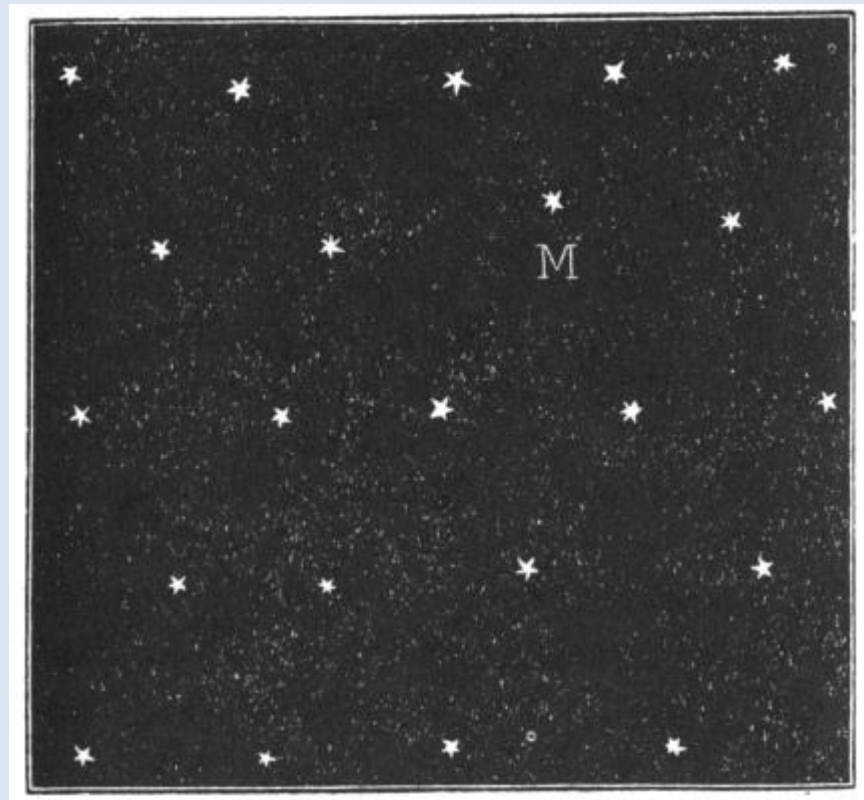
Czy Słońce jest typowe pod względem aktywności?
Zapytaj Kopernika i Keplera

przeciętność aktywności Słońca

Czy Słońce jest typowe pod względem aktywności?

Odpowiedź wg. zasady kopernikańskiej (kosmologicznej): jest typowe

Odpowiedź wg. Keplera (teleskopu): ??

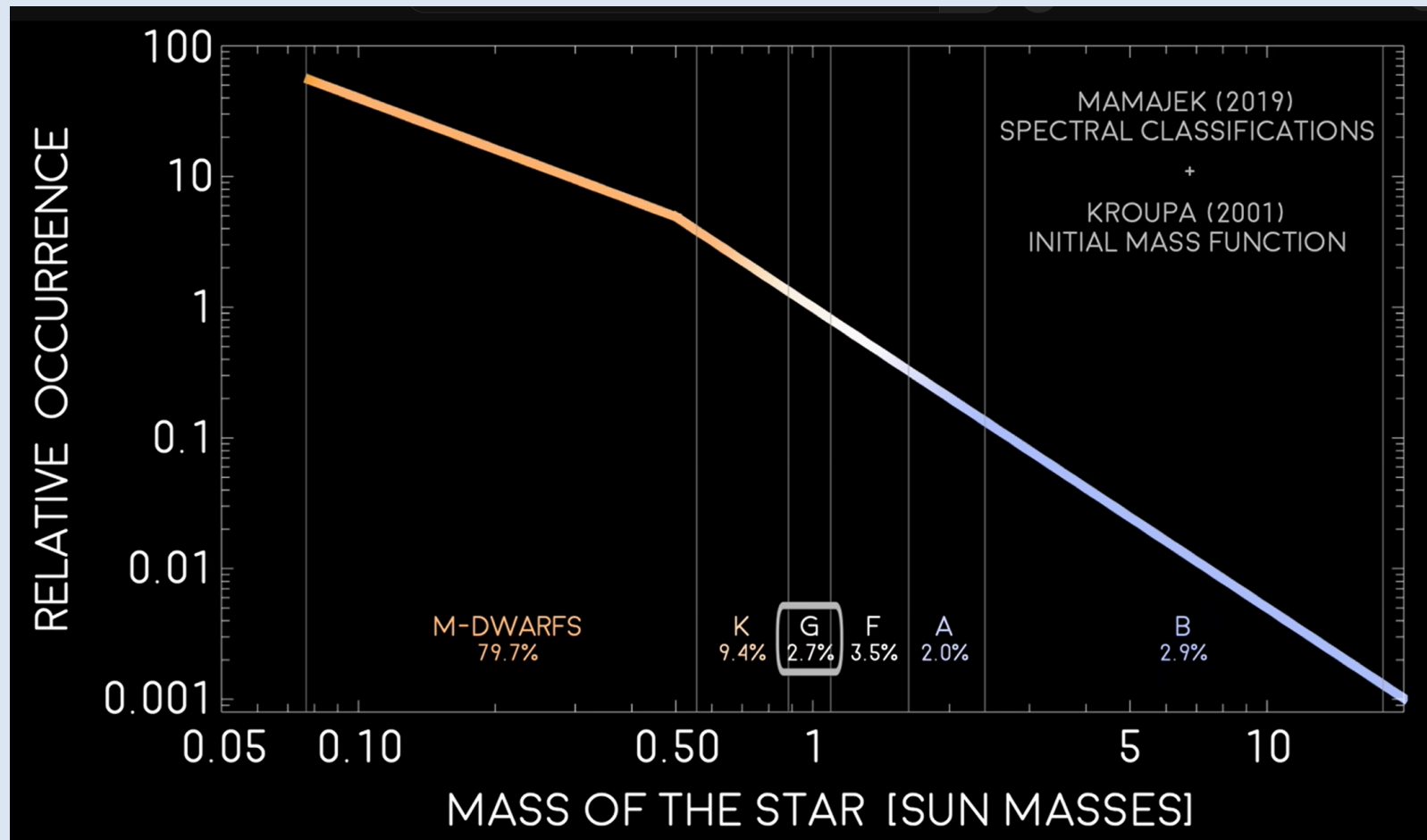


*Ilustracja z książki Epitome astronomiae Copernicanae Keplera.
M to Stella Mundi (Słońce) – jedna z wielu takich samych gwiazd.*

przeciętność aktywności Słońca

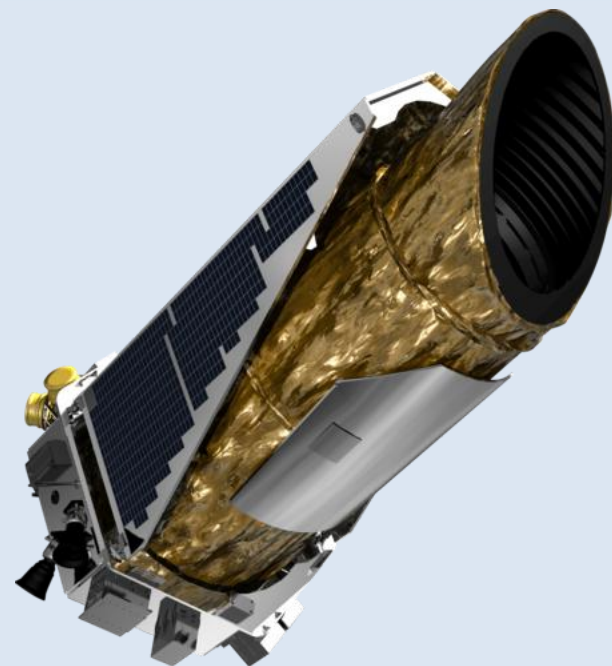
Słońce to typowa gwiazda?

- 90% gwiazd to gwiazdy ciągu głównego
- 40% gwiazd widocznych na niebie to ciąg główny (bias obserwacyjny)
- 2.7% gwiazd to typ widmowy G klasa jasności V
- 50% gwiazd typu G klasy V to gwiazdy pojedyncze



Misja Kepler:

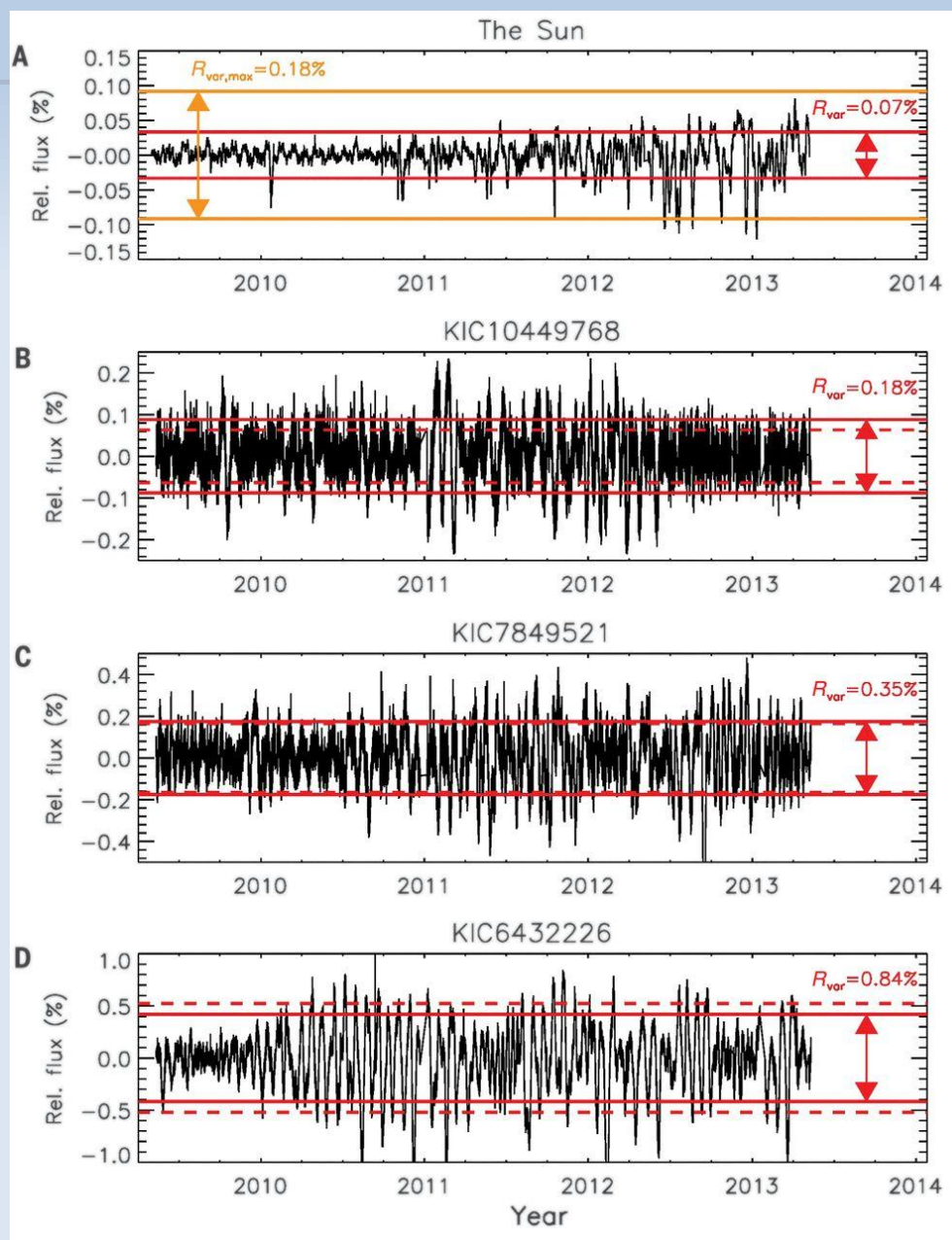
- Cel: detekcja egzoplanet metodą tranzytu, szczególnie planet skalistych znajdujących się w strefie habitacyjnej (*prime goal of detecting true Earth-analog exoplanets*)
- Planowany czas: start 2009, trwanie: +3.5 roku
- Problemy: cięcia budżetowe --> odchudzenie misji
- Precyzja teleskopu i długość trwania misji miała być wystarczająca do odkrycia planet wielkości Ziemi krążących wokół gwiazd podobnych do Słońca.
- Do określenia wymagań technicznych konieczne było określenie poziomu szumu, w tym tego związanego z aktywnością gwiazd podobnych do Słońca
- Poziom oczekiwanego szumu gwiazdowego oszacowano na podstawie danych słonecznych. Wyznaczona zmienność jasności wyniosła 20 ppm. Przyjęto, że to wartość typowa dla gwiazd podobnych (zasada kopernikańska).
- Oczekiwano, że w czasie trwania misji (3.5 roku) możliwa będzie detekcja sygnału od planet druga-Ziemia na poziomie $\geq 4\sigma$



przeciętność aktywności Słońca

Tymczasem okazało się:

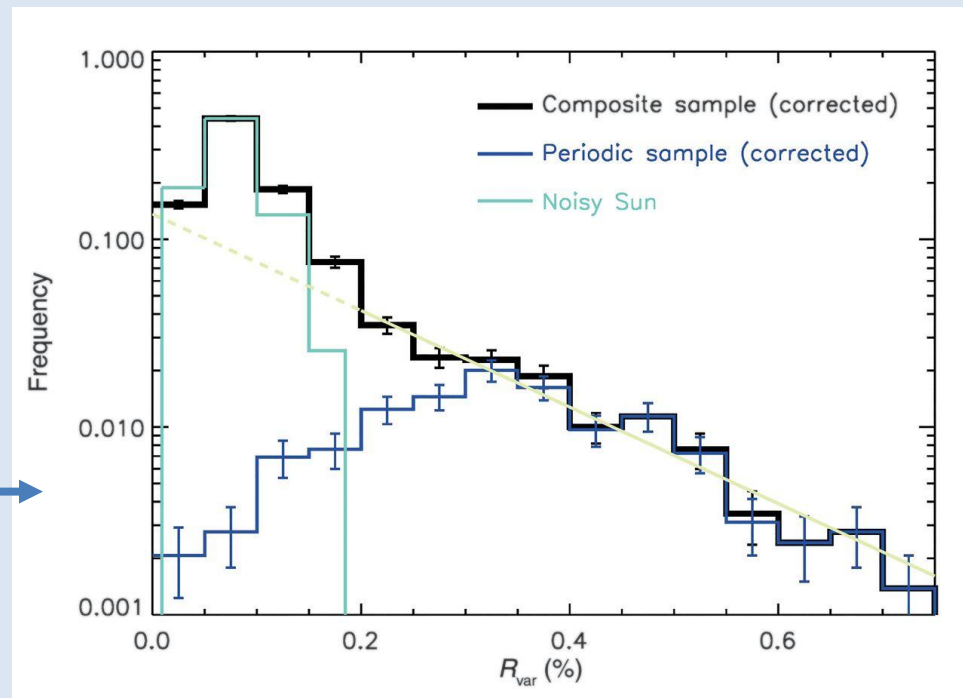
- Gwiazdy typu słonecznego mają średnio o 50% większy poziom szumu niż Słońce.
- Kepler Mission Stellar and Instrument Noise Properties, Gilliland et al. (2011)*
- Przez większy szum gwiazdny, po 3.5 latach misji nie odkryto żadnej drugiej Ziemi.
- Potrzebny był dłuższy ciąg obserwacji, ale w 2013 Kepler uległ awarii (żyroskop).
- Próbką analizowaną przez Gilliland et al. (2011) nie rozpatrywała wieku gwiazd (selekcja po T_{eff} i $\log g$, tylko ciąg główny).
- Dokładniej dobrana próba gwiazd analizowana przez Reinhold et al. (2020), (*The Sun is less active than other solar-like stars*). Wybrano gwiazdy o podobnych T_{eff} , $\log g$, metaliczność, wiek, okres rotacji. Wyznaczono zmienność fotometryczną.



Krzywe blasku dla Słońca (A) i trzech z analizowanych gwiazd (B-D). Dla wszystkich wyznaczono zmienność fotometryczną R_{var} . Na powyższym przykładzie widać, że R_{var} Słońca jest niższa [Reinhold et al. 2020]

przeciętność aktywności Słońca

- Wyznaczono zmienność fotometryczną R_{var} jako miarę aktywności magnetycznej.
- Większość gwiazd słonecznych z wyznaczonym fotometrycznie okresem obrotu (periodic sample), ograniczonym do 20-30 dni, wykazuje znacznie większą aktywność niż Słońce – średnio 5x większą, a co najmniej 1.8x większą. (zgodność z analizą rozbłysków gwiazdowych).
- Zmienność Słońca jest zgodna ze zmiennością słabo zmiennych gwiazd słonecznych o różnych okresach obrotu (composite sample = periodic sample + nonperiodic sample). Nonperiodic sample to gwiazdy, dla których nie udało się wyznaczyć okresu rotacji z krzywych blasku.



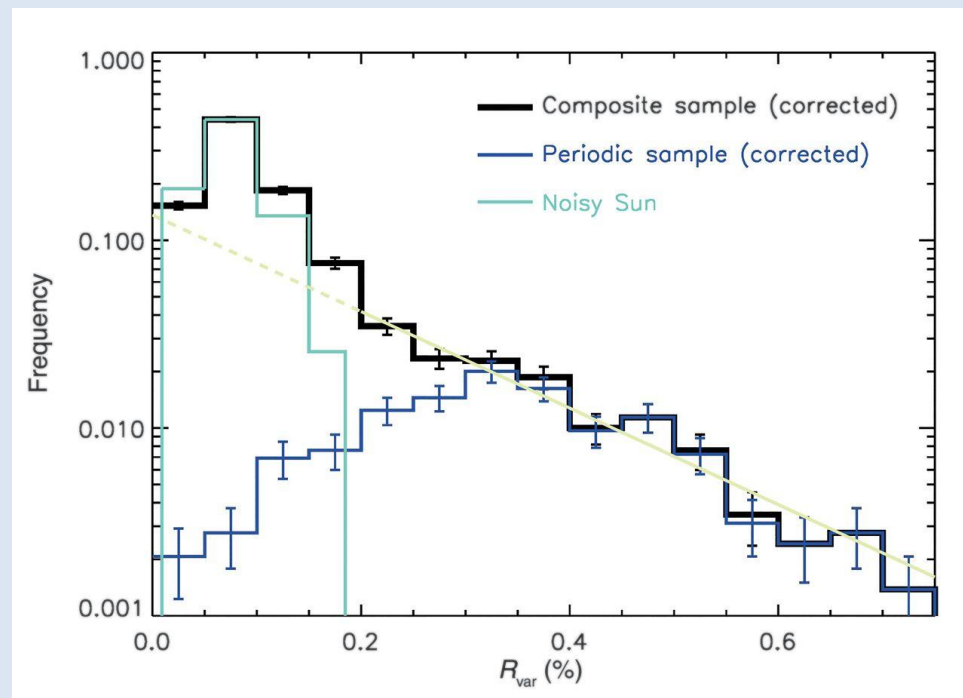
przeciętność aktywności Słońca

Interpretacja:

- Gwiazdy słoneczne mogą należeć do dwóch rozdzielnych podgrup poziomu aktywności: niskiej i wysokiej (nonperiodic, periodic). Obecna niska aktywność Słońca to stan stały.

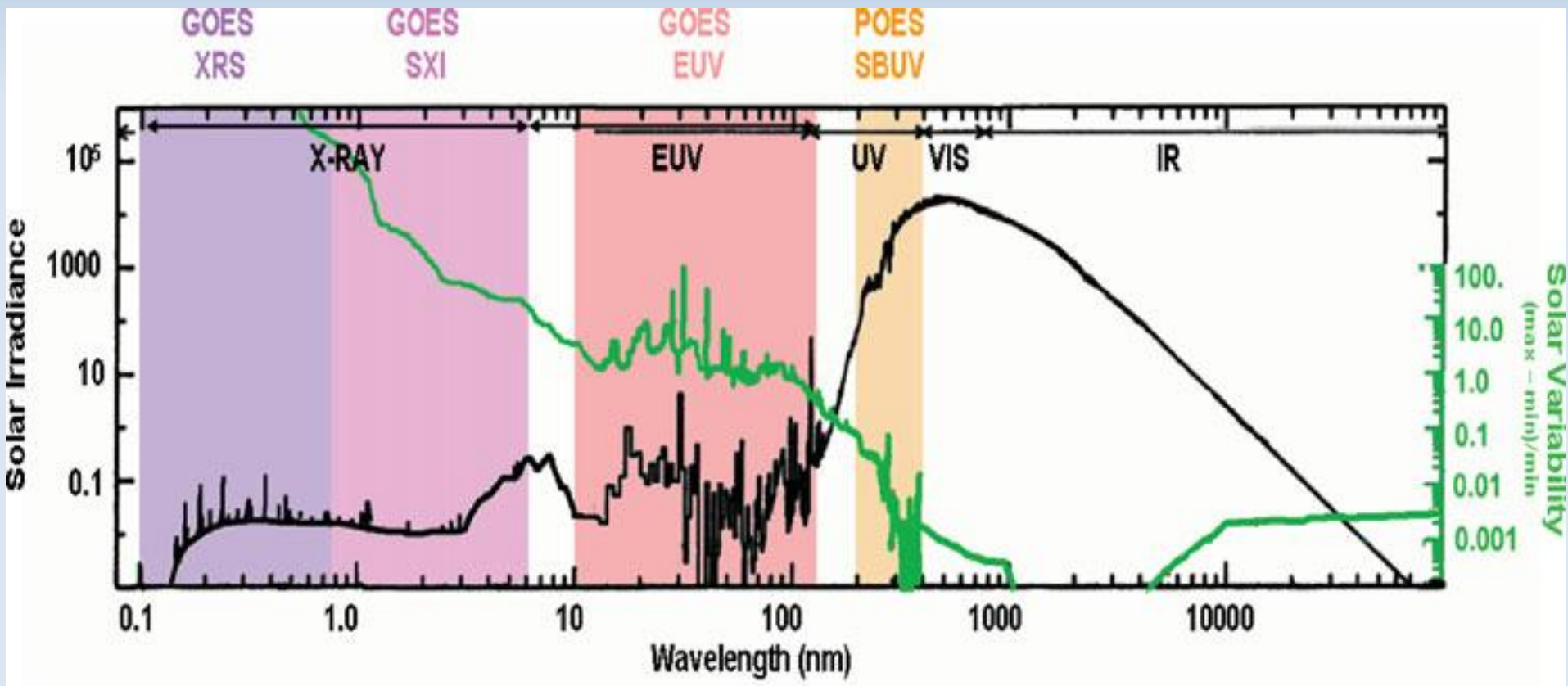
lub

- Gwiazdy słoneczne tworzą jedną grupę o bardzo szerokim zakresie możliwej aktywności. Obecna niska aktywność Słońca to tylko stan przejściowy trwający od min. 9000(?) lat.
- Ponadto, być może analizowane cechy gwiazdowe nie określają jednoznacznie poziomu aktywności.



Łącząc %: obecnie wygląda na to, że $<0.5\%$ gwiazd można uznać na podobne do Słońca, uwzględniając różne cechy, w tym poziom aktywności magnetycznej

przeciętność aktywności Słońca



Dlaczego ważne jest określenie czy Słońce może być bardziej aktywne?

Większość emisji związanej z aktywnością przypada na promieniowanie wysokoenergetyczne.

Jeśli Słońce może być bardziej aktywne niż to, co do tej pory zaobserwowano, to w przypadku wystąpienia super-rozbitysku, znaczna część energii wyemitowana będzie w promieniowaniu wysokoenergetycznym, z możliwym znaczącym wpływem na środowisko ziemskie i pogodę kosmiczną.