O obfitości wapnia podczas faz zaniku rozbłysków słonecznych

J. Sylwester, B. Sylwester, K.J.H. Phillips* and A. Kępa

Space Research Center of Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

** Natural History Museum, London, UK*

Badania w ramach grantu NCN UMO-017/25/B/ST9/01821

Streszczenie

Używając nowych danych o kalibracji spektrometru z wypukłymi kryształami BCS (Bent Crystal Spectrometer na pokładzie Solar Maximum Mission) wyznaczono z dużą dokładnością obfitości absolutne wapnia. Obfitości wyznaczano analizując wartość emisji w liniach jonu Ca XIX względem poziomu sąsiedniego kontinuum. Zarówno obserwowane linie jak i kontinuum formują się w źródłach (rozbłyskach) o temperaturze T > 5 MK. Stwierdzono, że dla większości spośród przebadanych 194 rozbłysków obfitość wapnia jest stała w granicach niepewności pomiaru (1 - 3%), jednak dla wielu zjawisk widać wyraźne zmiany obfitości. Przedstawimy uzyskane wyniki oraz zaproponujemy możliwe scenariusze fizyczne objaśniające obserwowane zmiany obfitości.

Wyznaczenie obfitości Ca rozbłysków z widm BCS SMM

We wcześniejszej prezentacji (J. Sylwester) przedstawiona została metoda wyznaczania obfitości Ca na podstawie analizy widm rentgenowskich rozbłysków uzyskanych za pomocą SMM BCS. Przeprowadzono powtórną analizę części widm z pracy Sylwester et. al., 1998, ApJ, rozszerzając znacznie bazę danych.

Analizowano jedynie **fazy zaniku rozbłysków**, ponieważ podczas faz wzrostu wpływ nie-izotermiczności plazmy oraz nie-termiczności prom. X jest znaczny.

Nasza aktualna analiza (widma dla 194 faz zaniku rozbłysków) daje znacznie bardziej precyzyjne wyznaczenia obfitości, wykorzystując temperaturę emitującego źródła z obserwacji GOES oraz informację o jego położeniu.

Przebiegi zmian z czasem

- Jako standardowe, obfitość A_{Ca} wyrażamy w skali logarytmicznej gdzie H = 12. Średnia obfitość A_{Ca} dla 194 faz zaniku rozbłysków wynosi ~**6.75**, lub ~2.6 obfitości fotosferycznej Ca.
- Szacujemy dokładność wyznaczenia obfitości Ca jako 0.01 wartości w logarytmicznej skali obfitości. Jest to porównywalne do dokładności wyznaczenia obfitości fotosferycznej a nawet składu meteorytów.
- Nasze wyznaczenia obfitości są tak precyzyjne, że możemy śledzić **zmiany A_{Ca} podczas faz zaniku rozbłysków** i to jest tematem tej prezentacji.
- Pośród badanych 194 faz zaniku rozbłysków poza stałym przebiegiem z czasem dla 60% badanych rozbłysków, można wyróżnić **trzy główne typy przebiegu zmienności** A_{Ca}.
- Przedstawiamy je na kolejnych slajdach i komentujemy na końcu prezentacji.

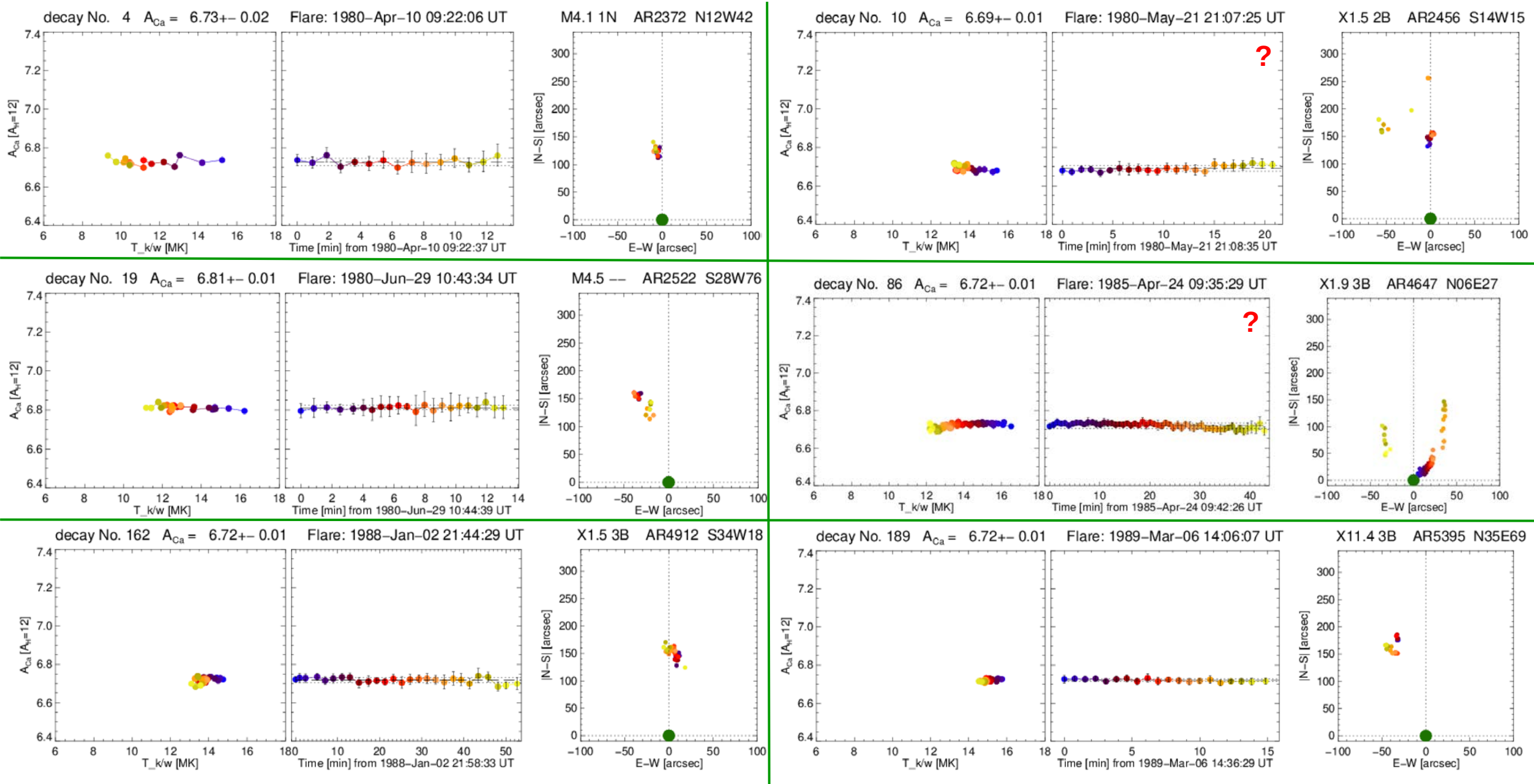
Prezentacja wyników

Wyniki przedstawione są w postaci wykresów:

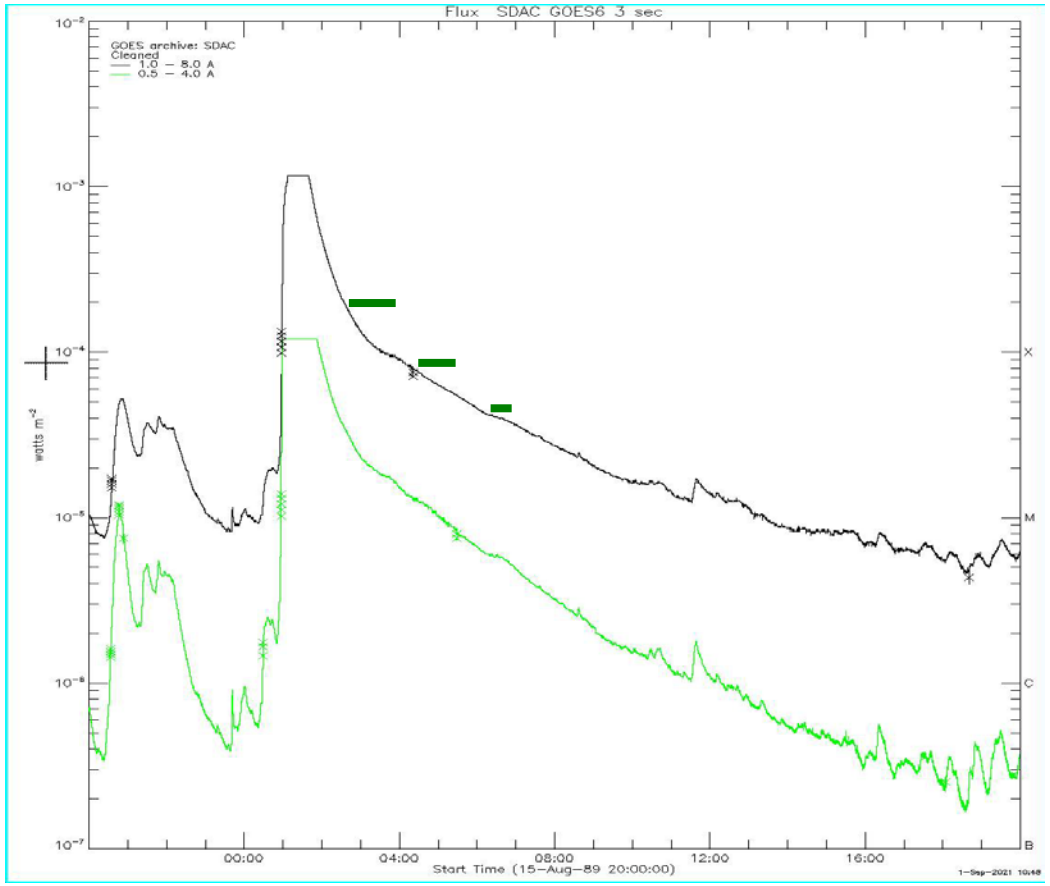
- A_{Ca} vs temperatura obszaru emitującego (ze stosunku linii k/w Ca)
- A_{Ca} vs czas podczas zaniku rozbłysku (5-60 minut)
- Informacja o położeniu rozbłysku – położenie w kierunku E—W otrzymaliśmy z przesunięcia dł. fal w widmie, w kierunku N—S na podstawie porównania całkowitej emisji rejestrowanej przez BCS z emisją rejestrowaną przez GOES.

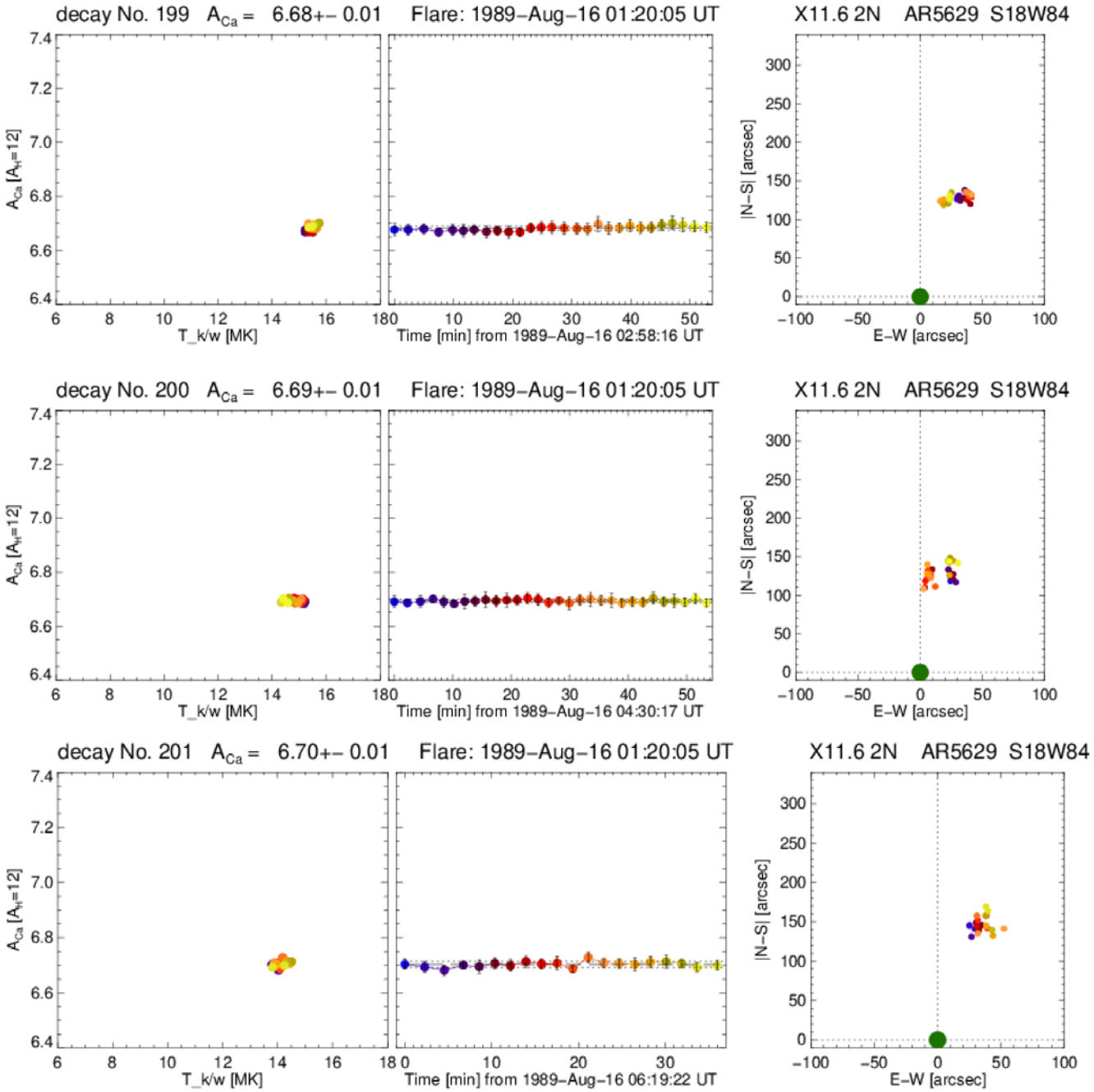
W niektórych przypadkach informacja o położeniu pozwala stwierdzić, że różne części rozbłysku dominują podczas emisji (np. jedna pętla rozbłyskowa może dominować na początku zaniku, inna podczas późniejszej fazy).

Przykłady obfitości A_{ca} stałej z czasem



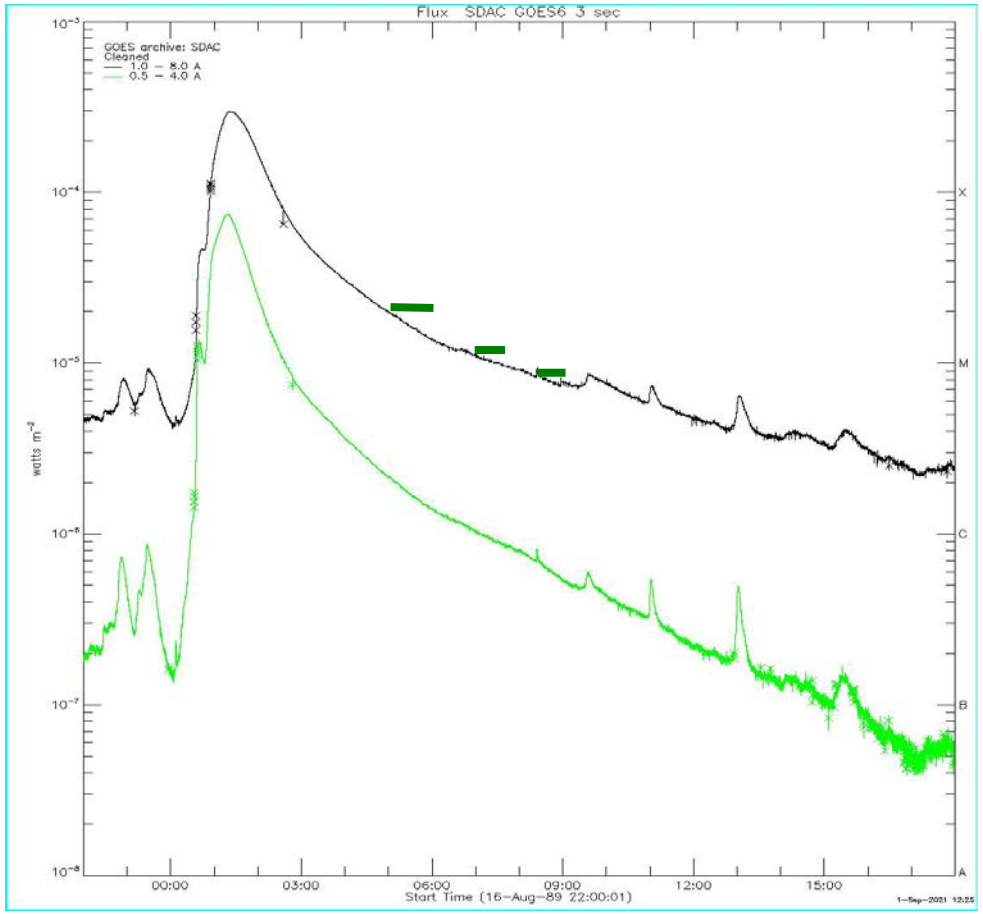
Stała z czasem obfitość A_{ca} dla długotrwałego rozbłysku ~X20 (2N)

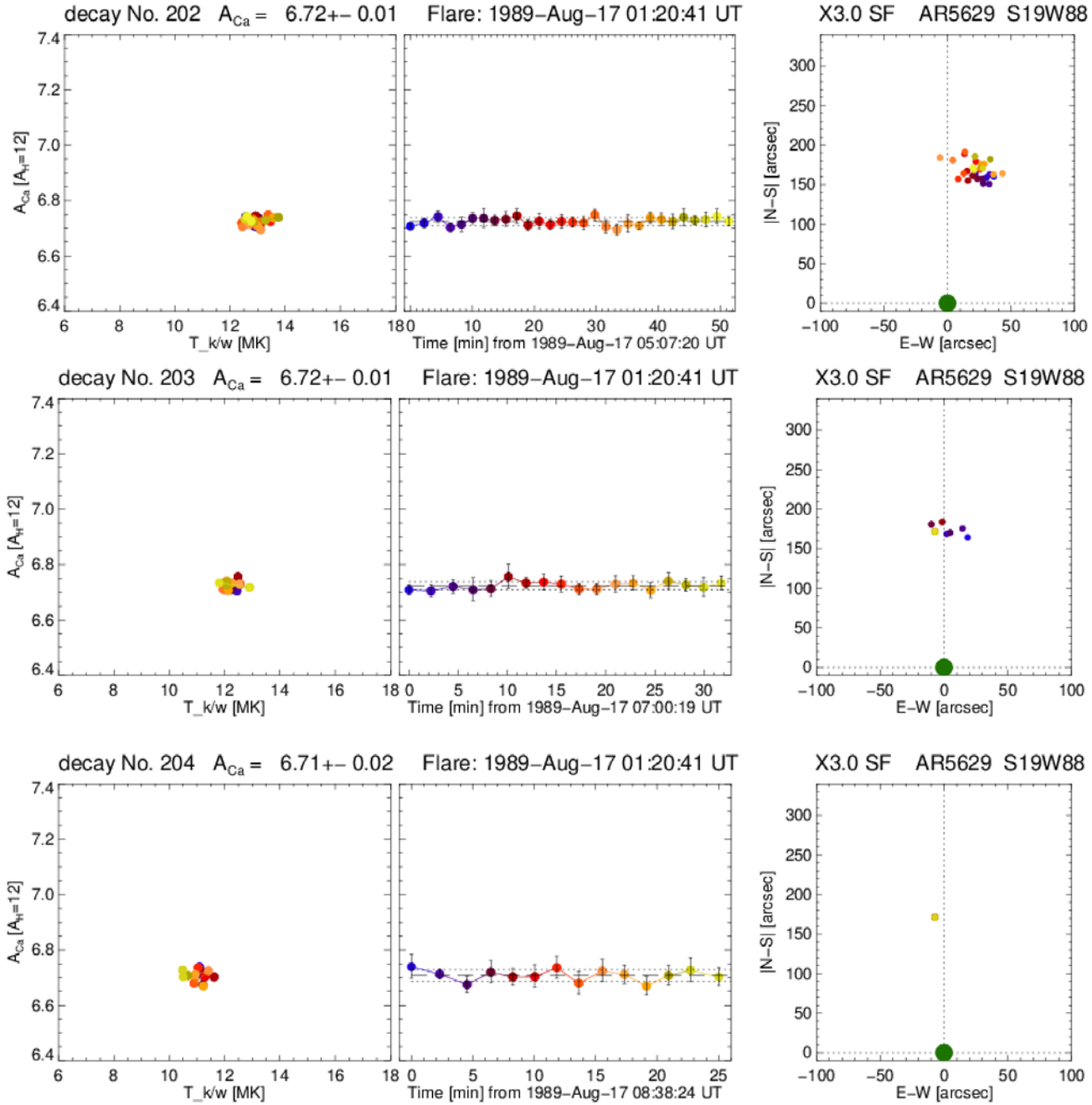




AR 5629 S18W84

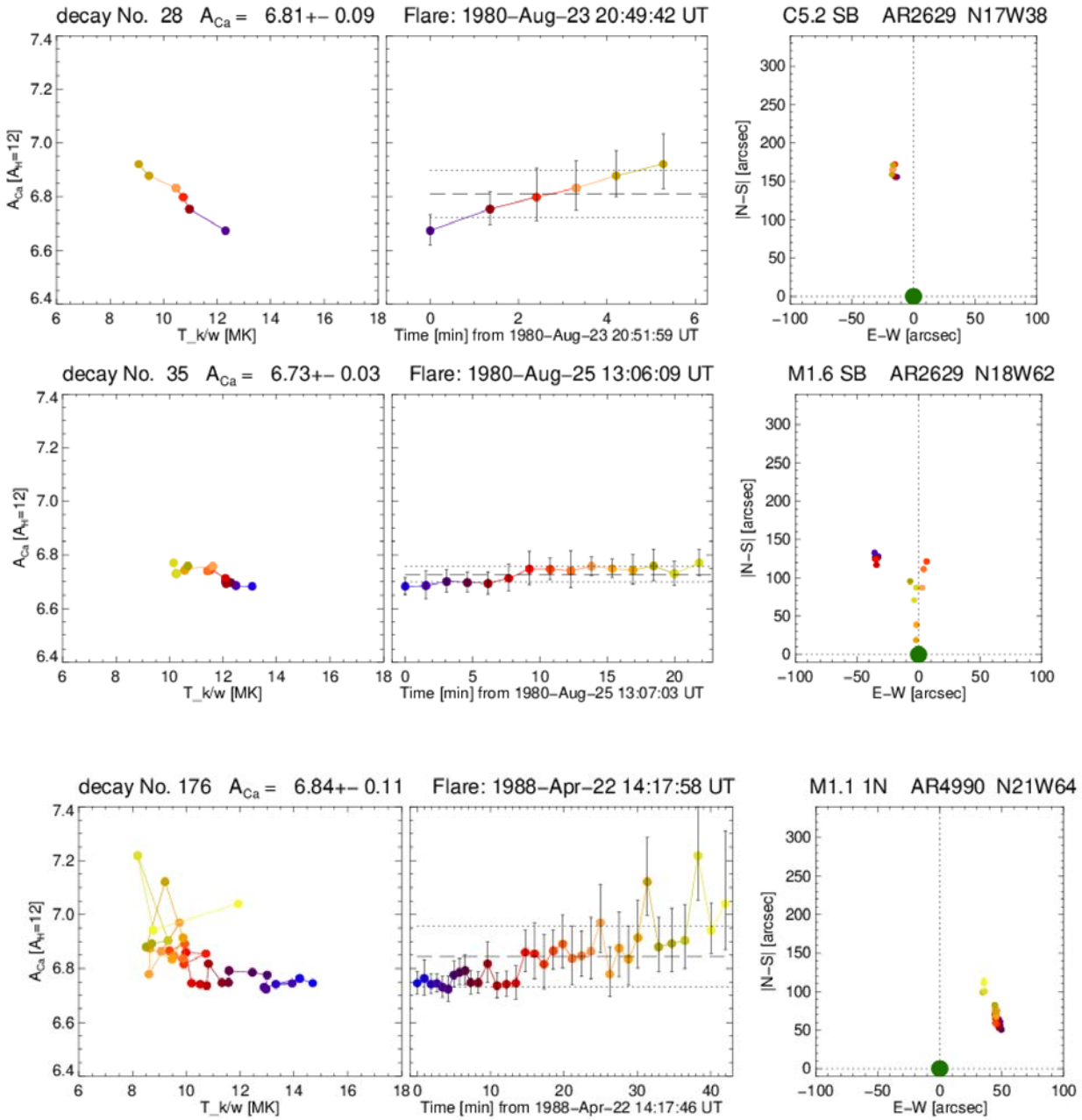
Stała z czasem obfitość A_{ca} dla długotrwałego rozbłysku ~X3.0 flare (SF)



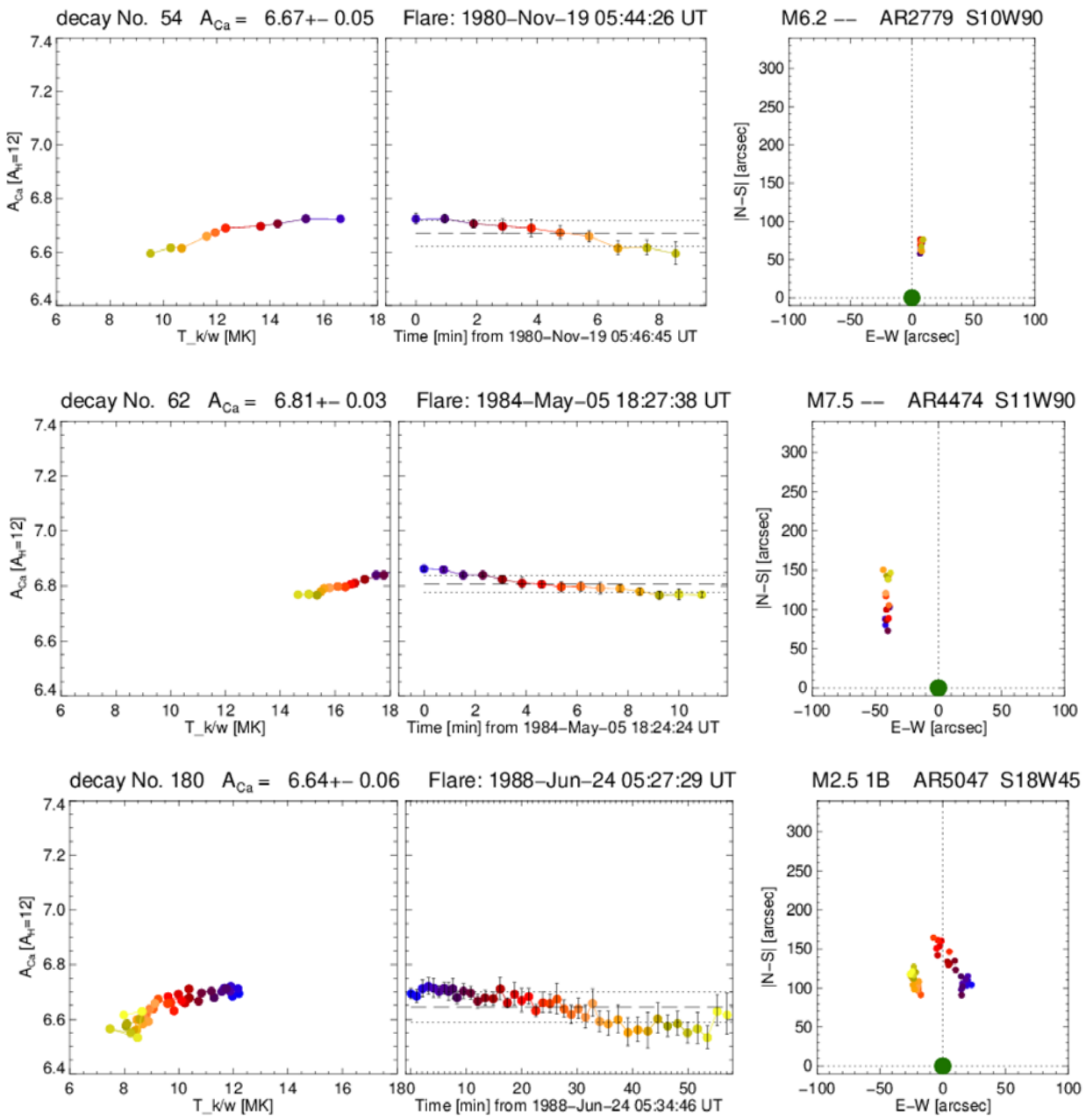


AR 5629 S19W88

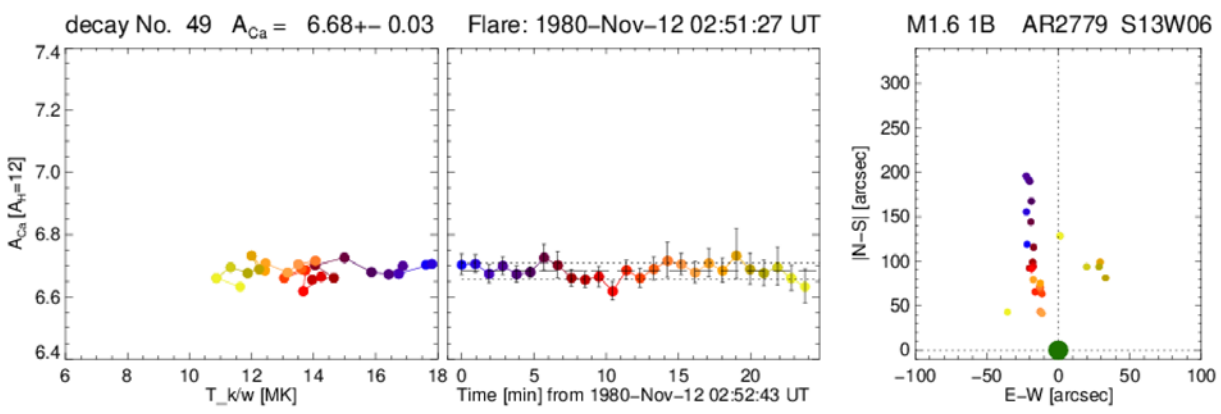
Przykłady **wzrostu** obfitości A_{ca}

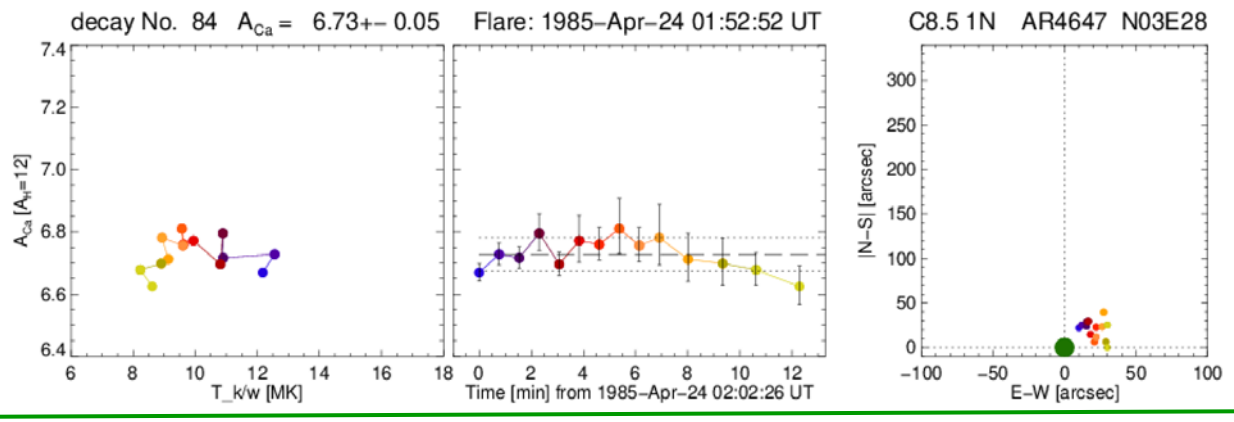


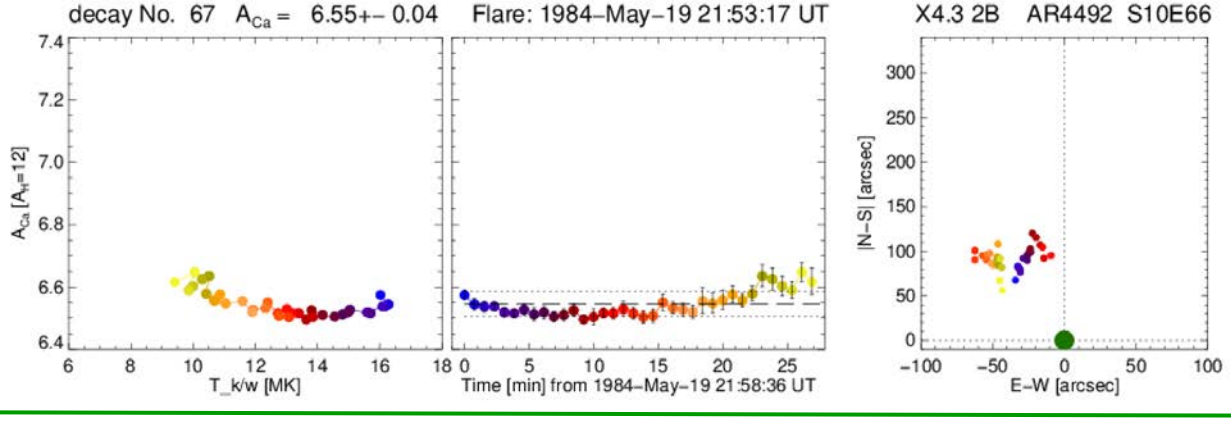
Przykłady **zaniku** obfitości A_{ca}

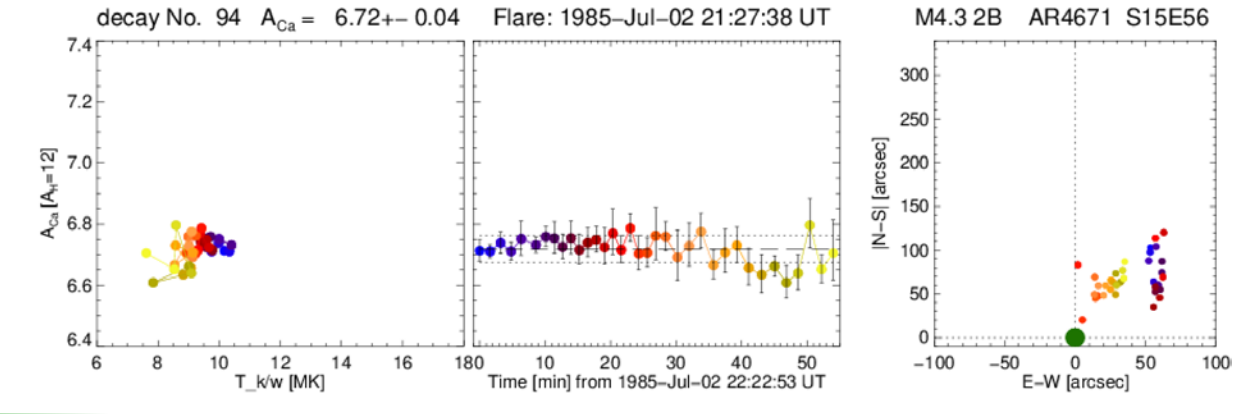


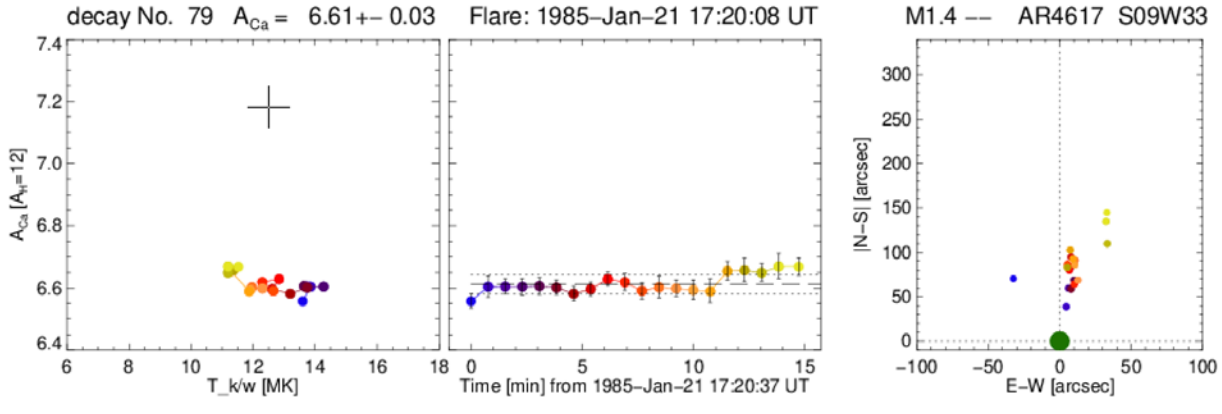
Przykłady **„nie-monotonicznego”** przebiegu obfitości A_{ca} z czasem

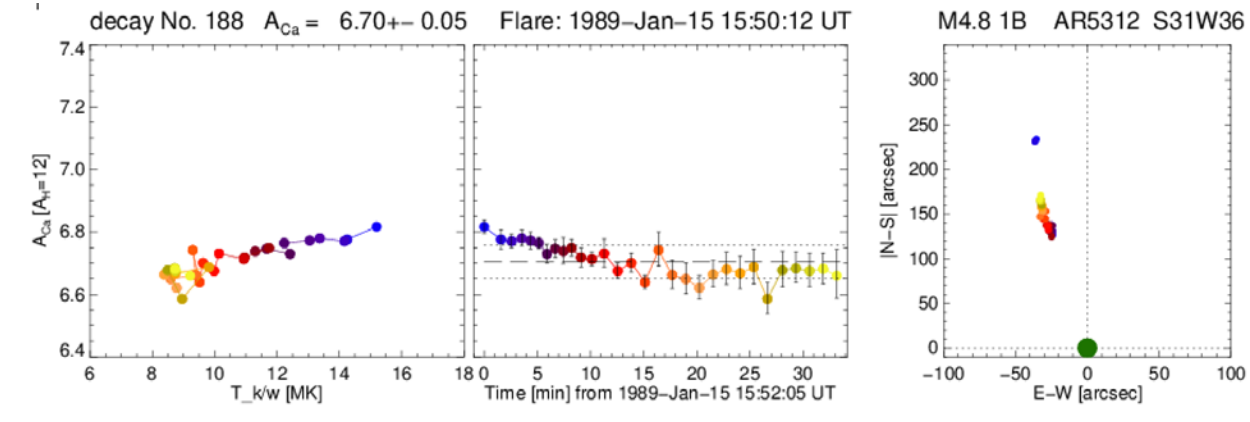












Podsumowanie wyników

- Ponieważ dokładność wyznaczenia obfitości jest bardzo duża (do 0.01 wartości A_{Ca}) **po raz pierwszy** możemy badać przebiegi obfitości Ca z czasem podczas fazy zaniku 194 rozbłysków.
- Na podstawie naszej analizy zaobserwowaliśmy następujące zachowanie się obfitości A_{Ca} podczas fazy zaniku rozbłysków:

Stałe w czasie: 60 % badanych rozbłysków

Wzrost: 10 %

Zanik: 10 %

Nie-monotoniczne: 20 %

Możliwym wyjaśnieniem zmian obfitości wapnia w niektórych przedziałach czasowych podczas zaniku rozbłysków może być zmiana źródła dającego dominujący wkład do emisji w obrębie rozbłyskującego obszaru aktywnego (pętle wypełnione gorącą plazmą o różnej obfitości A_{ca}).

Porównanie z innymi obserwacjami

- Generalnie, obfitości wyznaczane na podstawie widm rentgenowskich uzyskanych za pomocą spektrometrów krystalicznych charakteryzuje niezbyt duża dokładność.
- Również rozdzielczość czasowa danych uzyskiwanych ze spektrometrów krystalicznych jest zbyt niska, aby śledzić zmiany parametrów z czasem.
- Spektrometry szerokopasmowe, jak RHESSI, SAX na Mercury Messenger oraz Suzaku XIS posiadają dostateczną rozdzielczość czasową, ale rozdzielczość widmowa wynosi tylko ~100 eV (tak więc grupa linii Ca jest pojedynczą cechą widmową).
- Katsuda et al. (2020, ApJ, 891:126) obserwował niewielką zmienność obfitości Si, S, Ar dla czterech rozbłysków klasy X, jednak dokładność używanych pomiarów wynosi ~ 30%. Obfitość Ca jest stała w granicach błędów.
- Widma EUV (przyrząd EIS na Hinode) mają zasadniczą przewagę obserwując przestrzenne zmiany obfitości, ale rozdzielczość czasowa nie jest tak dobra jak w przypadku BCS SMM.

Porównanie uzyskanych wyników z teorią

- Szeroko cytowana jest teoria Laminga (e.g. Laming 2004 -2019, ApJ) wprowadzająca do wyjaśnienia różnic w koronalnych obfitościach pierwiastków względem fotosferycznych, siły ponderomotoryczne.
- Teoria ta objaśnia znany wzrost obfitości koronalnych względem fotosferycznych o czynnik ~3 dla pierwiastków o względnie niskim pierwszym potencjale jonizacyjnym (FIP<10 eV), do których należy Ca.
- Obliczenia Laminga z 2021 r. miały na celu interpretację wyników z Suzaku XIS. Połączenie koronalnego pola magnetycznego z amplitudami fal Alfvena daje przybliżoną zgodność z tamtymi obserwacjami.
- Nasze wyniki **prawdopodobnie** również mogą być wyjaśnione w podobny sposób. Dla rozbłysków ze stałą obfitością siła ponderomotoryczna wydaje się być stała. Dla rozbłysków ze zmienną obfitością niewielka zmiana otaczającego pola magnetycznego podczas zaniku rozbłysku (relaksacja) może spowodować niewielkie zmniejszenie lub zwiększenie siły ponderomotorycznej.