

Autoreferat

**Emisja rentgenowska jako wskaźnik wydajności
procesów transportu i deponowania energii w
rozbłyskach słonecznych**

Robert Falewicz

**Instytut Astronomiczny
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet Wrocławski**

1 Życiorys naukowy

1.1 Dane osobowe

Imię i nazwisko: Robert Falewicz

Miejsce pracy: Instytut Astronomiczny, Uniwersytet Wrocławski

ul. Kopernika 11, 51-622 Wrocław

tel. +48 71 3729373,

e-mail: falewicz@astro.uni.wroc.pl

1.2 Wykształcenie i stopnie naukowe

1990-1995 - Studia stacjonarne na Wydziale Matematyki Fizyki i Chemii UWr. ukończone z wynikiem bardzo dobrym.

11 sierpnia 1995 r. - uzyskanie tytułu magistra astronomii, praca magisterska „*Analiza promieniowania rentgenowskiego rozbłysków charakteryzujących się długotrwałą fazą narastania*”, promotor prof. dr hab. Jerzy Jakimiec

01.10.1996 – 31.09.2002 r. – Studia doktoranckie, Instytut Astronomiczny, Uniwersytet Wrocławski.

15 stycznia 2002 r. - Uzyskanie stopnia doktora nauk fizycznych w zakresie astronomii, praca doktorska „*Analiza wybranych rozbłysków rentgenowskich*”, promotor prof. dr. hab. Jerzy Jakimiec, Wydział Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego.

1.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

15.02.1992 – 31.09.1995 r. – pracownik techniczny, Instytut Astronomiczny UWr.

01.10.1995 – 31.09.1996 r. – asystent, Instytut Astronomiczny UWr.

01.01.2002 – 16.02.2003 r. – asystent, Instytut Astronomiczny UWr.

Od 17.02.2003 r. - adiunkt, Instytut Astronomiczny UWr.

2 Osiągnięcia naukowe stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem naukowym jest jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany „*Emisja rentgenowska jako wskaźnik wydajności procesów transportu i deponowania energii w rozbłyskach słonecznych*”.

2.1 Wykaz jednotematycznych artykułów naukowych stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

H1. Siarkowski, M., Falewicz, R., Berlicki, A., Advances in Space Research, Volume 38, Issue 5, p. 972-978, 2006, Impact Factor(2006)=0.860, liczba cytowań: 2

Small GOES flares with intense hard X-ray emission

Publikacja oparta jest na przeprowadzonej przeze mnie analizie obserwacji z satelity Yohkoh, brałem również udział w interpretacji wyników i redagowaniu tekstu publikacji, przygotowałem wszystkie rysunki dotyczące interpretacji i obserwacji Yohkoh, wkład własny 40%.

H2. Siarkowski, M., **Falewicz, R.**, Astronomy and Astrophysics, v.428, p.219-226, 2004, Impact Factor(2004)=3.694, liczba cytowań: 16

Variations of the hard X-ray footpoint asymmetry in a solar flare

Brałem udział w interpretacji wyników, redagowaniu tekstu publikacji oraz przygotowaniu rysunków, wkład własny 50%

H3. **Falewicz, R.**, Siarkowski, M., Berlicki, A., Advances in Space Research, Volume 38, Issue 5, p. 956-961, 2006, Impact Factor(2006)=0.860, liczba cytowań: 1

Hard X-ray emission at the footpoints of solar flares

Wyszukałem i przeprowadziłem analizę zjawisk, przygotowałem rysunki, napisałem 80% tekstu publikacji, wkład własny 70%.

H4. **Falewicz, R.**, Siarkowski, M., Astronomy and Astrophysics, Volume 461, Issue 1, pp.285-293, 2007, Impact Factor(2007)=4.259, liczba cytowań: 3

On the causes of hard x-ray asymmetry in solar flares

Przeprowadziłem analizę wybranych zjawisk, przygotowałem rysunki oraz tabele, policzyłem model analityczny, napisałem 70% tekstu publikacji, wkład własny 70%.

H5. **Falewicz, R.**, Rudawy, P., Siarkowski, M., Astronomy and Astrophysics, Volume 500, Issue 2, pp.901-908, 2009, Impact Factor(2009)=4.179, liczba cytowań: 9

Relationship between non-thermal electron energy spectra and GOES classes

Wyszukałem i przeprowadziłem analizę wybranych zjawisk, policzyłem dla nich modele numeryczne, przygotowałem większość rysunków i tabel, brałem udział w interpretacji wyników i przygotowaniu kodów numerycznych, napisałem 60% tekstu publikacji, kierowałem projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy, wkład własny 60%.

H6. Falewicz, R., Rudawy, P., Siarkowski, M., *Astronomy and Astrophysics*, Volume 508, Issue 2, pp.971-978, 2009, Impact factor(2009)=4.179, liczba cytowań: 3

Temporal variations of the CaXIX spectra in solar flares

Wyszukałem i przeprowadziłem analizę wybranych zjawisk, policzyłem dla nich modele numeryczne, przygotowałem rysunki i tabele, brałem udział w interpretacji wyników, napisałem 60% tekstu publikacji, kierowałem projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy, wkład własny 60%.

H7. Siarkowski, M., Falewicz, R., Rudawy, P., *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 705, Issue 2, pp. L143-L147, 2009, Impact Factor(2009)=7.364, liczba cytowań: 7

Plasma Heating in the Very Early Phase of Solar Flares

Wyszukałem i przeprowadziłem analizę wybranego zjawiska, brałem udział w przygotowaniu i liczeniu modelu numerycznego, przygotowałem rysunki i tabele, brałem udział w interpretacji wyników i redagowaniu tekstu publikacji, kierowałem projektem naukowym obejmującym badania opisane w tej pracy, wkład własny 40%.

H8. Falewicz, R., Siarkowski, M., Rudawy, P., *The Astrophysical Journal*, Volume 733, Issue 1, article id. 37, 9 pp., 2011, Impact Factor(2011)=6.024, liczba cytowań: 5

Plasma Heating in the Very Early and Decay Phases of Solar Flares

Wyszukałem i przeprowadziłem analizę wybranych zjawisk, policzyłem dla nich modele numeryczne, napisałem procedurę automatycznej optymalizacji E_e , przygotowałem rysunki i tabele, brałem udział w interpretacji wyników, napisałem 70% tekstu publikacji, wkład własny 70%.

H9. Falewicz, R., *The Astrophysical Journal*, Volume 789, Issue 1, article id. 71, 15 pp., 2014, Impact Factor(2013)=6.280, liczba cytowań: 0

Plasma Heating in Solar Flares and their Soft and Hard X-Ray Emissions

Wyszukałem i przeprowadziłem analizę wybranych zjawisk, policzyłem dla nich modele numeryczne, napisałem procedury wyliczające emisję HXR, przygotowałem rysunki i tabele, napisałem 100% tekstu publikacji, wkład własny 100%.

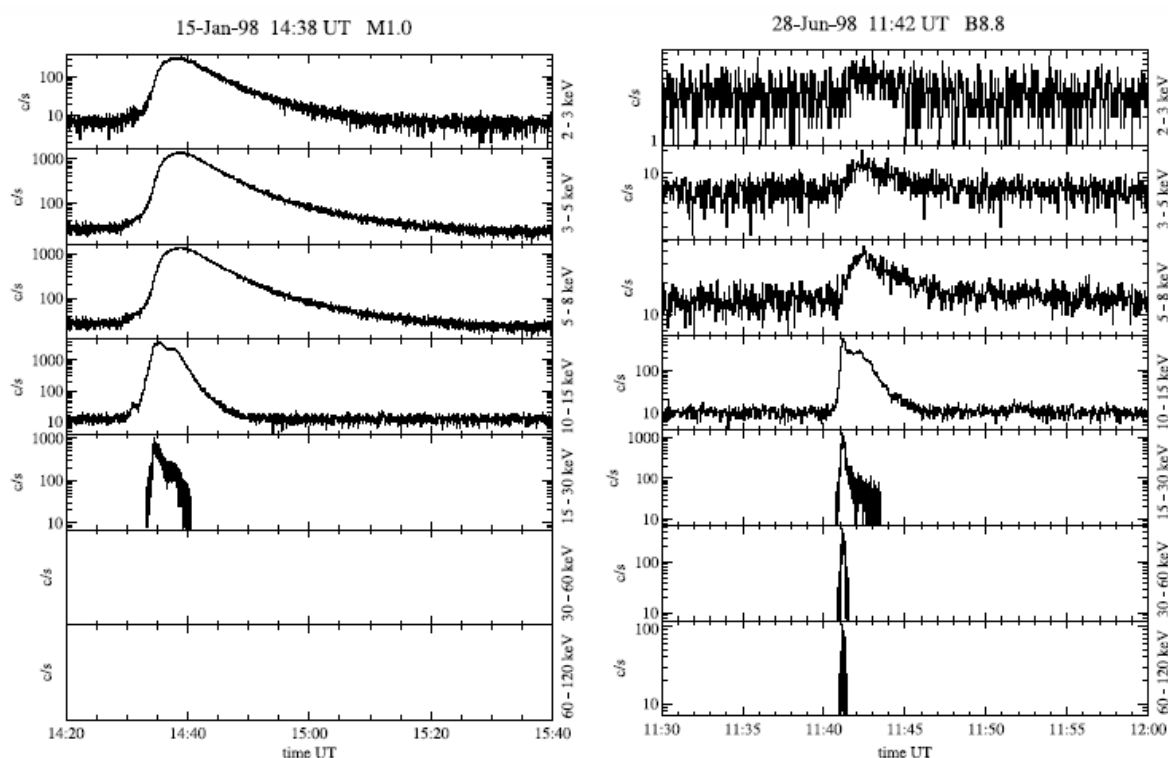
Sumaryczny Impact Factor cyklu prac IF=37.699

2.2 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

Rozbłysk słoneczny jest złożonym zespołem zjawisk i procesów wywołanych nagłym wydzieleniem w zlokalizowanym obszarze atmosfery Słońca energii rzędu 10^{26} - 10^{32} ergów, zakumulowanej wcześniej w polach magnetycznych obszarów aktywnych (Tandberg-Hansen i Emslie 1988). Czas trwania rozbłysków waha się od kilku-kilkunastu minut dla najsłabszych zjawisk aż do kilku-kilkudziesięciu godzin dla najsilniejszych (Kahler, 1977). Zjawiska tworzące łącznie rozbłysk słoneczny przebiegają we wszystkich warstwach atmosfery słonecznej. Podczas tego zjawiska energia emitowana jest w postaci fal elektromagnetycznych od zakresu gamma do fal radiowych oraz strumieni cząstek (elektronów, protonów, jonów) o prędkościach dochodzących do 70% prędkości światła (Aschwanden 2006). Zazwyczaj rozbłysk słoneczny przebiega w kilku fazach, z których najważniejszą jest tzw. *faza impulsowa*, podczas której gwałtownie wydzielana energia pól magnetycznych powoduje nagły (w czasie od sekund do minut) wzrost natężenia emisji promieniowania elektromagnetycznego, oraz *fazy spadku*, gdy wydajność wydzielanie energii z pól magnetycznych spada i plazma zawarta w pętli/pętłach rozbłyskowych stopniowo stygnie. Z reguły, podczas silnych rozbłysków, dochodzi do znacznej przebudowy lokalnych pól magnetycznych, co wiąże się zazwyczaj z pojawieniem np. erupcji protuberancji, koronalnych wyrzutów masy (Dryer 1982; Kahler i in. 1985) itp.

Mechanizmy transportu i deponowania energii w rozbłyskach słonecznych są zbadane jedynie fragmentarycznie, choć ich zrozumienie jest niezwykle istotne dla rozwiązania takich zagadnień jak: bilans energii rozbłysków słonecznych, prognozowanie ich klasy i widma emisji, zagadnienia z dziedziny prognozowania pogody kosmicznej, a nawet wpływu aktywności słonecznej na zjawiska geofizyczne. Podczas fazy impulsowej rozbłysków słonecznych, jak również w znacznie mniejszym stopniu przed i po fazie impulsowej, wiązki elektronów nietermicznych (NTE) przyspieszonych w koronie poruszają się wzdłuż linii pola magnetycznego do chromosfery, gdzie w wyniku zderzeń kulombowskich z gęstą materią chromosferyczną nagrzewają ją (Brown 1971; Emslie 1978). Materia ta podgrzana do temperatur koronalnych ekspanduje wypełniając wcześniej istniejące pętle magnetyczne (zjawisko to nazywane jest parowaniem chromosfery) i emituje miękkie promieniowanie rentgenowskie (SXR). Oddziaływanie elektronów z materią chromosferyczną powoduje również emisję twardego promieniowania rentgenowskiego (HXR) głównie w stopach pętli (w procesie gwałtownego hamowania elektronów – tzw. mechanizm bremsstrahlung) (Dennis i Zarro 1993; McTiernan i in. 1999). Tak więc emisja HXR jest bezpośrednio związana z oddziaływaniem strumienia przyspieszonych elektronów nietermicznych z plazmą, podczas gdy emisja termiczna SXR jest stowarzyszona z energią deponowaną w plazmie przez te elektrony.

Rozbłyski można klasyfikować na różne sposoby, np. ze względu na powierzchnię emisji w zakresie $H\alpha$, w zakresie radiowym 5000 MHz, czy emisję w zakresie rentgenowskim. Powszechnie stosowany sposób klasyfikacji rozbłysków tzw. klasyfikacja *GOES* (Tandberg-Hansen i Emslie 1988), dokonywana jest na podstawie pomiarów strumienia promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez rozbłysk w zakresie długości fal 1-8 Å i mierzonego w odległości 1AU od Słońca. Najłagodniejsze klasyfikowane zjawiska uzyskują w maksimum strumień na poziomie 10^{-8} W/m^2 i otrzymują oznaczenie A, dziesięć razy silniejsze B, kolejne 10 razy silniejsze C, potem M i najsilniejsze X (co odpowiada poziomowi strumienia 10^{-4} W/m^2).

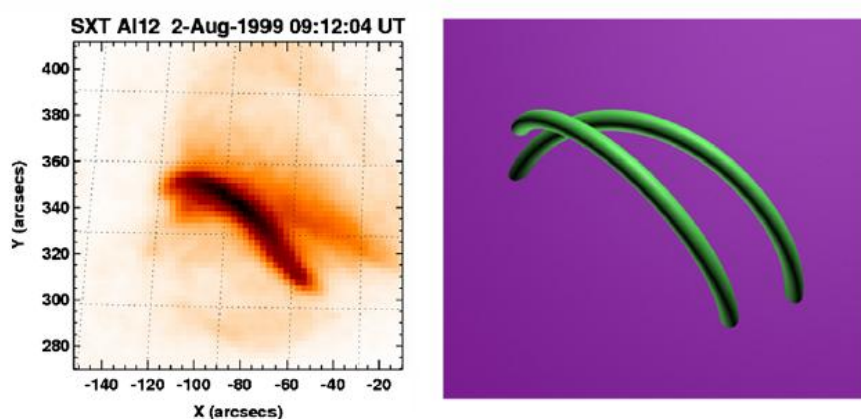


Rys. 1. Porównanie emisji rentgenowskich obserwowanych w różnych przedziałach energii dla dwóch rozbłysków za pomocą fotometru *RFI5-I* na pokładzie satelity *INTERBALL-TAIL*. Po lewej rozbłysk klasy M1.0 dla którego emisja rentgenowska nie występuje powyżej energii 15-30 keV, po prawej bardzo słaby rozbłysk klasy B8.8 dla którego emisja rentgenowska obserwowana jest nawet w kanale 60-120 keV. Rysunek zaczerpnięty z pracy H1.

Klasyfikacja ma charakter ciągły, literami oznaczone są rzędy wielkości do których dodaje się liczbę opisującą ile razy obserwowany strumień jest większy w danej klasie. Oznacza to, że np. rozbłysk klasy M3 jest trzy razy silniejszy od rozbłysku klasy M1 i jego strumień rentgenowski w maksimum jasności wynosił $3 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Rozbłyski silniejsze niż X10 występują bardzo rzadko i niekiedy używa się dla nich oznaczenia Y, wtedy oznaczenie Y2 jest równoważne X20.

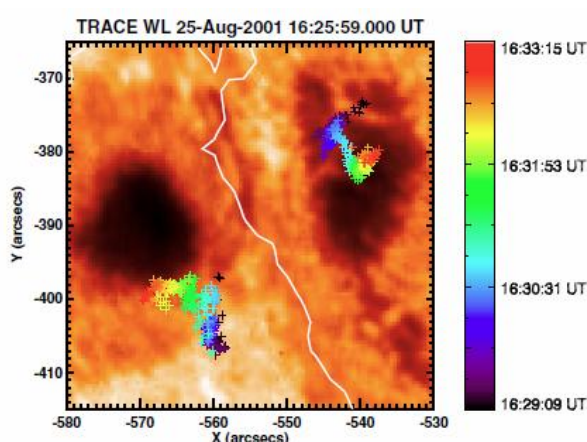
Z reguły rozbłyski słoneczne emitujące silne strumienie twardego promieniowania rentgenowskiego emitują również silny strumień miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Takie zachowanie określane jest w literaturze terminem „Big Flare Syndrome (BFS)” wprowadzonym przez Kahlera (1982) na

podstawie obserwacji i badań statystycznych. Obserwuje się jednak odstępstwa od tej reguły, czyli rozbłyski o niskiej emisji w miękkim promieniowaniu rentgenowskim, ale z silną emisją twardego promieniowania (nawet o energiach powyżej 30 keV) (McDonald i in., 1999; Gburek i Siarkowski, 2002 oraz H1). Obliczenia wykonane przez McDonalda i in. (1999) wskazują, że w takich rozbłyskach tylko niewielka część energii niesionej przez elektrony nietermiczne zużyta jest na parowanie chromosfery, co może być związane z rozkładem widma energii elektronów nietermicznych w wiązce/wiązkach. W pracy H1 wykorzystano katalog 151 rozbłysków z wyraźnie większą od średniej emisją w zakresie HXR i relatywnie niską klasą rentgenowską (C5.0 i niżej) uzyskany na podstawie obserwacji zarejestrowanych za pomocą instrumentu *RF15-I* znajdującego się na pokładzie satelity *INTERBALL-TAIL*. Dla tak wybranych rozbłysków sprawdzono morfologię wykorzystując obrazy (jeśli były dostępne) wykonane przez instrument *Soft X-ray Telescope (SXT)* znajdujący się pokładzie japońskiego satelity *Yohkoh*. Otrzymane wyniki wskazują, że analizowane zjawiska można zaklasyfikować do kilku grup: 1) rozbłyski które posiadają zwartą strukturę, która ma rozmiary poniżej progu rozdzielczości teleskopu *SXT* i dla nich nie została wyjaśniona natura obserwowanego efektu; 2) pojedyncze pętle, w których przyczyna odstępstwa od BFS spowodowana jest prawdopodobnie odpowiednim rozkładem elektronów w widmie i zależy od rodzaju źródła wydzielania energii (schemat zaproponowany przez McDonald i in. 1999); 3) w przebadanych zjawiskach znalazła się również grupa zjawisk w której zaobserwowano dwie lub kilka oddziałujących ze sobą pętli rozbłyskowych (rys. 2) w konfiguracji typu „X” lub „Y” (Sakai i de Jager 1996). Taka przestrzenna konfiguracja pętli może sprzyjać powstaniu krótszej drogi elektronów nietermicznych do chromosfery, co z kolei może stwarzać warunki do powstawania silnej emisji HXR. Na podstawie przeprowadzonych badań w pracy H1 stwierdzono, że istotną przyczyną powstawania rozbłysków nie podlegających BFS może być miejsce generowania elektronów nietermicznych w pętli/pętlach rozbłyskowych znajdujące się blisko jednej ze stóp.



Rys. 2. Przykład zjawiska w którym zaobserwowano oddziaływanie pętli rozbłyskowych typu „Y”. Po lewej obraz zarejestrowany za pomocą instrumentu *SXT/Yohkoh*, po prawej prawdopodobny schemat konfiguracji pętli rozbłyskowych. Rysunek zaczerpnięty z pracy H1.

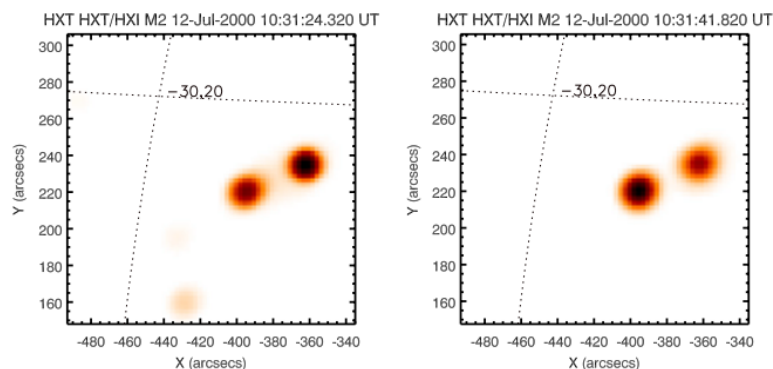
Badania te dały podstawę do zajęcia się obserwowanym zjawiskiem asymetrii strumieni HXR w stopach pętli rozbłyskowych. Analiza danych obserwacyjnych, w tym magnetogramów pokazuje, że jaśniejsze źródło HXR leży zazwyczaj w stopie mającej słabsze pole magnetyczne - i odwrotnie, słabsze źródło leży w stopie mającej silniejsze pole magnetyczne (Sakao 1994; Kundu i in. 1995; Li i in. 1997; Aschwanden i in. 1999). Zjawisko to można wytłumaczyć własnościami tzw. „luster magnetycznych” w pętłach, gdzie w słabszym polu magnetycznym (o mniejszej zbieżności) więcej elektronów nietermicznych ucieka z pułapki magnetycznej i dociera do chromosfery. Zaobserwowano jednak liczne wyjątki od tej prostej reguły, określane jako tzw. rozbłyski typu „non-Sakao” (Asai i in. 2002, Goff i in. 2004), w których stopa z silniejszym polem magnetycznym jest również źródłem silniejszego strumienia HXR (tzw. asymetria odwrotna).



Rys. 3. Obraz zarejestrowany przez satelitę *TRACE* wykonany przy użyciu filtra WL (światło białe) o godzinie 16:25:59 UT oraz nałożone na niego pozycje stóp E i W w funkcji czasu. Biała krzywa reprezentuje linię neutralną pola magnetycznego. Szczegółowy opis znajduje się w pracy H2.

W pracy H2 analizowano rozbłysk klasy X5.3 i na jego podstawie testowano przedstawione powyżej hipotezy o mechanizmie asymetrii występującej w stopach w zakresie HXR. Estymacja pola magnetycznego z miejsca zakotwiczeń pętli wykazała, że stosunek natężenia dla stóp jest mniej więcej stały dla całego okresu obserwacji. Obserwowane zmiany pola magnetycznego w stopach nie mogą być źródłem obserwowanej asymetrii (patrz rysunek 3). Za obserwowaną asymetrię może odpowiadać mechanizm przyspieszania elektronów nietermicznych w źródle wydzielania energii, który może powodować niesymetryczne wstrzeliwanie do pętli wiązki/wiązek elektronów o różnych rozkładach energetycznych w widmie lub zgodnie z pracą Melrose i White (1979) są to efekty transportu wiązki elektronów poprzez plazmę o zmieniających się parametrach fizycznych, co powoduje zmianę głębokości kolumnowej wnikania elektronów. Praca H3 jest kontynuacją poszukiwań zjawisk, w których występuje asymetria w emisji HXR stóp. Przeanalizowano w niej cztery rozbłyski w których zaobserwowano wyraźną asymetrię w emisji stóp. Na podstawie obserwacji testowano różne hipotezy o mechanizmach obserwowanej asymetrii. Wyniki tej analizy wskazują, że za opisane zjawisko odpowiadają raczej mechanizmy związane z transportem elektronów

nietermicznych przez pętlę rozbłyskową lub różny rozkład energetyczny elektronów w widmie dla każdej ze stóp wywołany przez źródło wydzielania energii.



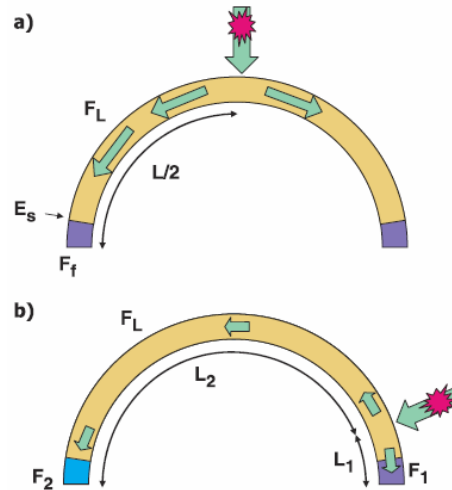
Rys. 4. Przykład zmiany asymetrii źródeł HXR w stopach pętli rozbłyskowej obserwowanej w dwóch momentach czasu podczas trwania rozbłysku. Obrazy zostały wykonane za pomocą instrumentu *HXT/Yohkoh* w kanale M2. W ciągu 14 sekund nastąpiło całkowite odwrócenie stosunku jasności dwóch widocznych stóp pętli rozbłyskowej. Rysunek zaczerpnięty z pracy H3.

Otrzymany rezultat jest potwierdzeniem wcześniejszych wniosków z prac H1 i H2. Na rysunku 4 przedstawiono przykład zmian asymetrii emisji HXR w stopach pętli rozbłyskowej rozbłysku z 12 lipca 2000 r.

Asymetrię odwrotną (non-Sakao) występującą w niektórych rozbłyskach można wytłumaczyć jako efekt lokalizacji obszaru wydzielania energii (rekoneksji/anihilacji pól magnetycznych) w pobliżu jaśniejszej stopy. Taka konfiguracja umożliwia niemal bezstratne docieranie elektronów do chromosfery w obszarze stopy bliskiej źródłu wydzielania energii. Jednocześnie elektrony, które poruszają się ku drugiej stopie pętli rozbłyskowej są efektywnie hamowane w wyniku zderzeń w plazmie wypełniającej pętlę. Tego typu zjawiska badane były w pracy H4. Na podstawie pracy Goff i in. 2004, w której analizowano 32 rozbłyski i badano czy spełniona jest wyżej wspomniana zależność (Sakao 1994) (silne pole magnetyczne – słabsza stopa w HXR i vice versa) wybrano z grupy 11 rozbłysków typu non-Sakao, 3 zjawiska, na których testowano hipotezę o asymetrycznej lokalizacji źródła NTE w pętli rozbłyskowej. Hipoteza była weryfikowana dwustopniowo, przez zbadanie morfologii zjawiska (jak w przypadku pracy H1) oraz przez porównanie emisji obserwowanej HXR z obliczoną przy założeniu modelu emisji typu thin-thick (Wheatland i Melrose 1995). Na tej podstawie mierząc obserwacyjne strumienie rentgenowskie w stopach oraz szczycie pętli rozbłyskowej dla kanałów M1 i M2 instrumentu *HXT* oraz znając parametry fizyczne pętli, oszacowano czy elektrony docierają do drugiej stopy, czy też tracą swoją energię wcześniej, po drodze w pętli (patrz rysunek 5). Dla wszystkich analizowanych zjawisk uzyskano bardzo dobrą zgodność strumieni wyliczonych teoretycznie ze strumieniami obserwowanymi, co może potwierdzać poprawność przyjętego mechanizmu tłumaczącego obserwowaną asymetrię w stopach.

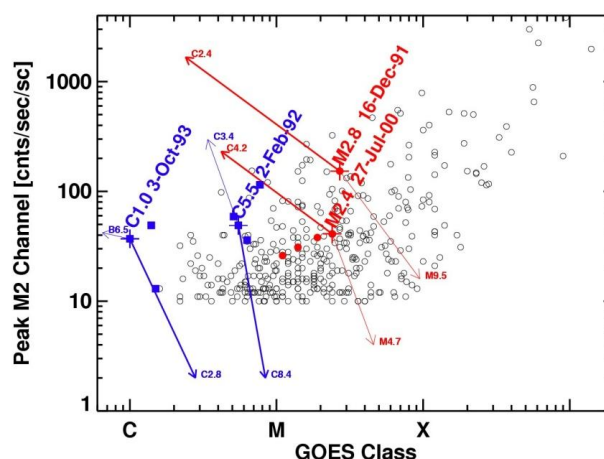
Jak już wspomniano z reguły rozbłyski słoneczne emitujące silne strumienie twardego promieniowania rentgenowskiego emitują również silny strumień

miękkiego promieniowania rentgenowskiego (tzw. rozbłyski skorelowane). Od czasu do czasu obserwuje się także rozbłyski o niskiej emisji w miękkim promieniowaniu rentgenowskim, ale z silną emisją twardego promieniowania.



Rys. 5. Schemat modelu transportu elektronów nietermicznych w pętli rozblyskowej; a) przypadek w którym przyspieszanie elektronów zachodzi w szczycie lub nad szczytem pętli rozblyskowej; b) kiedy źródło wydzielania energii znajduje się blisko jednej ze stóp. Rysunek zaczerpnięty z pracy H4.

W pracy H5 wykazano, że przy ustalonej energii całkowitej wiązki elektronów nietermicznych, wyliczona z krzywych syntetycznych klasa *GOES* rozblysku znacznie się zmienia przy zmianach nachylenia widma (δ) i dolnej energii odcięcia dla NTE (E_c). Jest to spowodowane bardziej efektywnym grzaniem chromosfery przez elektrony nietermiczne o niższych energiach, podczas gdy wyżej energetyczne elektrony wnikają głębiej przekazując energie otaczającej plazmie. Przykład zmian klasy *GOES* rozblysku przy zmianach parametrów widma elektronów nietermicznych przedstawiono na rysunku 6.

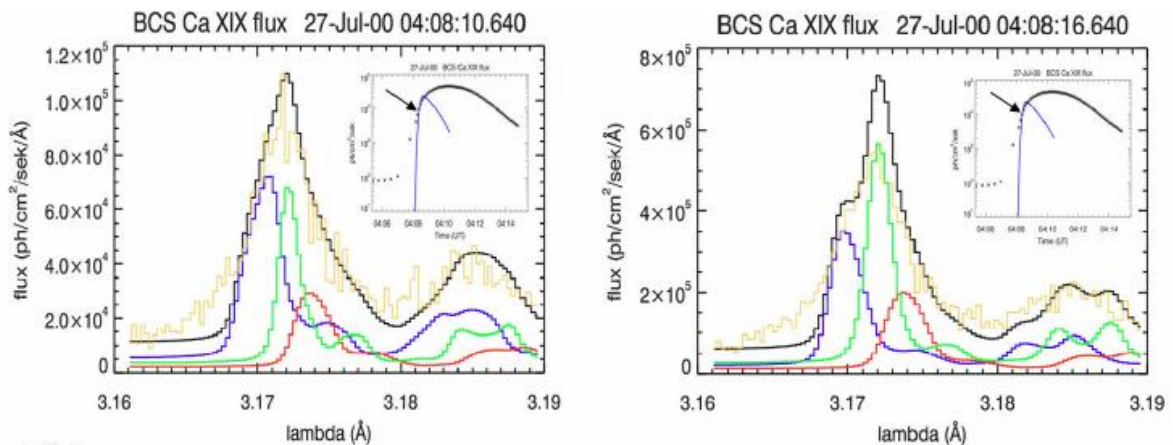


Rys. 6. Zmiany klasy *GOES* i strumieni HXR dla modeli rozblysków policzonych dla różnych energii obcięcia i nachylenia widma elektronów nietermicznych oraz ustalonej energii całkowitej wiązki elektronów nietermicznych. Krzyżyki wskazują obserwowane klasy *GOES*, natomiast strzałki zakres zmienności strumieni i klas przy zmianie parametrów widm elektronów. Kółka reprezentują 369 zjawisk wybranych z katalogu rozblysków *HXT/Yohkoh*. Rysunek zaczerpnięty z pracy H5.

Zmieniając parametry wiązki NTE udało się w skrajnych wypadkach z rozbłysku nieskorelowanego uzyskać rozbłysk skorelowany (niebieski kolor na rys. 6) oraz ze skorelowanego rozbłysku nieskorelowany (kolor czerwony na rys. 6). Podobne rozważania przeprowadził McDonald i in. (1999) wykorzystując do tego celu obliczenia analityczne. W pracy H5 do modelowania badanych zjawisk na podstawie danych obserwacyjnych użyto numeryczny kod hydrodynamiczny Naval Research Laboratory (NRL - Mariska i in. (1982), Mariska i in. (1989)). Szczegółowy opis wielu ważnych zmian wprowadzonych w oryginalnym kodzie NRL znajduje się w pracy H5. Grzanie plazmy rozblyskowej elektronami nietermicznymi modelowane było za pomocą analitycznej funkcji Fishera (1989) w oparciu o parametry wyznaczone z obserwowanych widm twardego promieniowania rentgenowskiego zarejestrowanych za pomocą instrumentu *HXT/Yohkoh*. Podczas obliczeń przyjmowano stałą energię obciążenia (E_c) dla całego rozblysku. Wartość E_c była wstępnie wyznaczana przy użyciu bilansu energetycznego rozblysku w sposób analityczny metodą zaproponowaną przez McDonald i in. (1999) przy założeniu równości ilości energii która została przekazana na proces odparowania (E_{evap}) i energii całkowitej (E_{tot}) wydzielonej w rozblysku ($E_{\text{evap}} \approx E_{\text{tot}}$). Przyjęto, że model jest poprawny gdy zachodziła zgodność wyliczonych z modelu strumieni SXR z obserwacyjnymi (był to tzw. model O). Następnie przy założeniu, że strumień energii wiązki NTE jest stały $F_{\text{NTE}} = \text{const.}$ zmieniano parametry wiązki (E_c i δ) i zbudowano siatkę modeli o różnych parametrach wiązki, ale o tej samej dostarczanej energii, po czym sprawdzano jaką klasę rentgenowską mają modelowane rozblyski. Stwierdzono, iż zmiana widma energii elektronów na bardziej twarde (mniejsza wartość δ) powoduje zmniejszenie klasy rozblysku. Taki sam efekt uzyskuje się zwiększając E_c . Kiedy widmo energii elektronów staje się bardziej miękkie (większa wartość δ) klasa rozblysku ulega zwiększeniu, podobny efekt uzyskuje się gdy obniżamy wartość E_c . Największe różnice pomiędzy strumieniem obserwowanym i syntetycznym występowały, gdy równocześnie zmniejszano δ i zwiększano E_c (twardsze widmo) lub zwiększano δ i zmniejszano E_c (miększe widmo). Opisane modyfikacje parametrów widma zmieniają stosunek energii zdeponowanej E_{evap} do energii niesionej przez NTE. Głównym czynnikiem odpowiadającym za klasę rozblysku jest nie tylko wielkość energii niesionej przez NTE, ale też rozkład ich energii.

Zastosowane do obliczeń kody HD-1D są optymalne podczas modelowania zjawiska rozblysków zachodzących w prostej konfiguracji pola magnetycznego (pojedyncza pętla) nawet w tak zaawansowanych zastosowaniach jak synteza widm w miękkim promieniowaniu rentgenowskim dla instrumentu *Bragg Crystal Spectrometer (BCS)*, który znajdował się na pokładzie satelity Yohkoh (praca H6). Na podstawie analizy i modelowania trzech rozblysków obserwowanych przez instrumenty satelity Yohkoh sprawdzono czy uzyskany modelowy rozkład przestrzenny materii i jej parametrów fizycznych jest zgodny z obserwowanym. Analiza polegała na porównaniu widm obserwowanych i syntetycznych linii CaXIX w zakresie SXR, a zgodność obu tych widm interpretowana była jako potwierdzenie poprawności

wymodelowania zjawiska. Na tworzenie się obserwowanego widma wpływ mają: rozkład przestrzenny materii, jej prędkość, gęstość oraz temperatura.



Rys. 7. Obserwowane i syntetyczne widmo rentgenowskie dla dwóch wybranych momentów czasu dla zjawiska z 27 lipca 2000 r. Obserwowane widma BCS CaXIX są oznaczone kolorem żółtym, syntetyczne widma kolorem czarnym, a składowe syntetyczne oznaczone zostały jako: składnik przesunięty ku krótszym długościom fali (blueshift) kolorem niebieskim, składnik przesunięty ku dłuższym długościom fali (redshift) kolorem czerwonym i składnik stacjonarny kolorem zielonym. Rysunek pochodzi z pracy H6.

Otrzymanie zgodności widm syntetycznych i obserwowanych oznacza poprawne odtworzenie makroskopowych parametrów plazmy wypełniającej pętlę rozbłyskową. Dla całej fazy impulsowej każdego analizowanego rozbłysku otrzymano dobrą zgodność strumieni, kształtów i zmian czasowych pomiędzy widmami obserwowanymi i syntetycznymi dla składnika stacjonarnego oraz dla składników przesuniętych ku mniejszym (blueshift) i większym długościom (redshift) fali w zakresie linii CaXIX (rysunek 7). W pracy H6 wykazano również, że silny składnik przesunięty ku krótszej części widma (blueshift) może być maskowany przez składnik stacjonarny w przypadku odpowiedniego usytuowania pętli na powierzchni Słońca. Może to wyjaśniać, dlaczego nie dla wszystkich obserwowanych rozbłysków, szczególnie dla fazy początkowej, obserwuje się występowanie składnika blueshift w zarejestrowanym widmie.

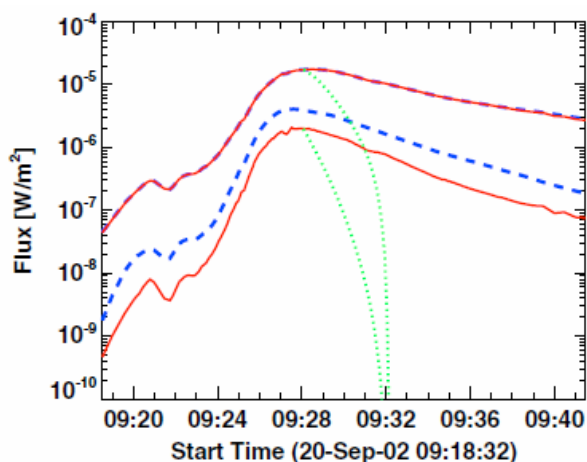
Równie ważnym zagadnieniem jest analiza zależności czasowych między strumieniami SXR i HXR w rozbłyskach słonecznych. Tak jak już wspomniano emisja HXR jest bezpośrednio związana z oddziaływaniem strumienia przyspieszonych elektronów nietermicznych z plazmą, podczas gdy emisja SXR jest związana z energią zdeponowaną w plazmie przez te elektrony. Wynika stąd, że emisja SXR rozbłysków słonecznych nie powinna pojawiać się wcześniej niż emisja twardego promieniowania rentgenowskiego, jednakże w ponad 90% obserwowanych rozbłysków wzrost emisji SXR zaczyna się średnio 3 minuty przed początkiem obserwowanej emisji HXR (Veronig i in. 2002). W literaturze zaproponowano już wiele wyjaśnień tego paradoksu, poczynając od zbyt małej czułości detektorów rejestrujących HXR (Dennis 1988), aż do rozważań teoretycznych wspartych obserwacjami konfiguracji pola magnetycznego wynurzającego się z fotosfery (Heyvaerst i in. 1977). Li i in. (1987) stwierdzili na

podstawie obserwacji satelity *SMM* i rozważań teoretycznych, że podczas wynurzania się strumienia magnetycznego z fotosfery dochodzi do powstania warstwy prądowej w wyniku interakcji z wcześniej istniejącym w koronie polem magnetycznym. Taka warstwa nie zawsze przekształca się w klasyczną warstwę prądową z rozwiniętą turbulencją, ale może pozostać w stanie z minimalną turbulencją, mogącą z czasem rozwinąć się w warstwę spokojną lub impulsową. Autorzy wyróżnili, odpowiednio, cztery fazy grzania, między innymi fazę grzania spokojnego przed-rozbłykowego (bez przyspieszania cząstek). Jeszcze inne podejście do rozwiązania tego paradoksu zastosował Warren (2006) modelując numerycznie układ wielu pętli rozbłykowych, z powodzeniem odtwarzając ewolucję wysoko-temperaturowej plazmy w tzw. rozbłysku Masudy z 13 stycznia 1992 roku. Materia chromosferyczna może być grzana nie tylko przez elektrony nietermiczne, ale także przez strumień przewodnictwa cieplnego pochodzącego z wierzchołka pętli. Taki mechanizm grzania był analizowany i opisany w pracy Battaglia i inni (2009), gdzie szczegółowo przeanalizowano fazę przed-impulsową czterech rozbłyków używając obrazów i widm rentgenowskich z satelity *RHESSI*. Na tej podstawie dla wszystkich badanych zjawisk wyjaśniono obserwowane czasowe zmiany emisji jako efekt saturacji strumienia cieplnego.

W pracy H7 wykazano, że efektywne grzanie plazmy rozbłykowej elektronami nietermicznymi rozpoczyna się już w bardzo wczesnej fazie rozbłysku, znacznie przed fazą impulsową, przy czym dla wyjaśnienia obserwowanych strumieni SXR/HXR nie jest potrzebny żaden dodatkowy mechanizm grzania plazmy poza grzaniem przez elektrony nietermiczne. To istotne odkrycie rozwiązuje wcześniej opisany problem wyjaśnienia przyczyn poprzedzania w większości rozbłyków słonecznych emisji promieniowania HXR przez emisję promieniowania SXR. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie obserwowanych (linie niebieskie) i obliczonych (linie czerwone) strumieni miękkiego promieniowania rentgenowskiego w pasmach 0.5-4 Å (dolne krzywe) oraz 1-8 Å (górne krzywe), rejestrowanych przez satelitę *GOES*. Analizowany rozbłysk jest jednym z kilku opisanych zjawisk (Brosius i Holman 2009, Stoiser i in. 2008, Asai i in. 2006) w których grzanie elektronami nietermicznymi pojawia się w bardzo wczesnej fazie rozbłysku, przed fazą impulsową.

Modelowanie analizowanego rozbłysku odbywało się w podobny sposób jak w pracach H5 i H6, ale przy zastosowaniu danych obserwacyjnych z satelity *RHESSI*. Wykorzystanie obserwowanych przez *RHESSI* widm umożliwiło wprowadzenie istotnej modyfikacji sposobu postępowania, a mianowicie dolna energia odcięcia E_c wyznaczana była bezpośrednio z dopasowania teoretycznego widma do obserwowanego przy założeniu modelu grubej tarczy. Dzięki takiemu postępowaniu wartość E_c była zmienna z czasem. Następnie wartość ta była modyfikowana iteracyjnie dla każdego kroku czasowego, tak aby otrzymać zgodność strumieni syntetycznego i obserwowanego przez instrument *GOES* w przedziale 1-8 Å. W przypadku tej metody kryterium wyboru końcowego rozwiązania była

minimalizacja różnicy pomiędzy przebiegami strumieni syntetycznych i obserwowanych w zakresie 0.5-4 Å (dolna krzywa przedstawiona na rysunku 8).

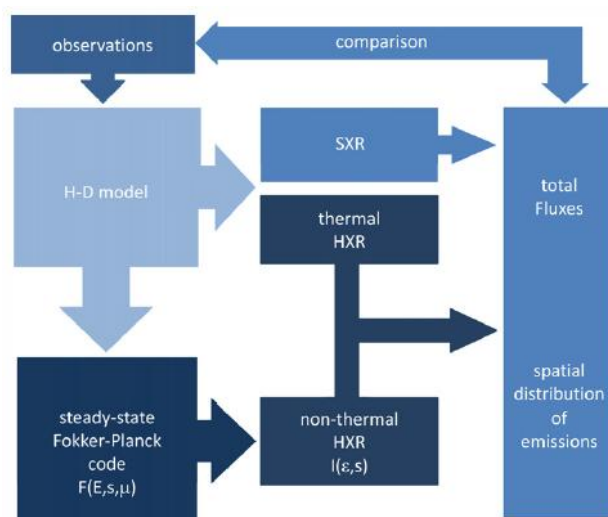


Rys. 8. Linie niebieskie przedstawiają krzywe blasku *GOES* w kanałach 1-8 Å (górna krzywa) i 0.5-4 Å (dolna krzywa), kolor czerwony krzywe syntetyczne wyliczone na podstawie obserwacji *RHESSI* a kolor zielony krzywe syntetyczne liczone przy wyłączonym grzaniu. Rysunek pochodzi z pracy H8.

W pracy H8 analiza przebiegu procesów grzania plazmy rozbłyskowej została dodatkowo rozszerzona na okres po maksimum rozbłysku, gdy dla większości rozbłysków obserwuje się dużo wolniejszy zanik strumienia SXR niż wynikałoby to z oszacowania strat energii plazmy rozbłyskowej poprzez promieniowanie i poprzez przewodnictwo (Carrgill i in. 1995). Modele hydrodynamiczne rozbłysków wskazują, że gęsta plazma rozbłyskowa chłodzi się bardzo szybko, podczas gdy termiczna emisja rentgenowska (SXR) w rzeczywistych rozbłyskach może być obserwowana przez wiele godzin po maksimum rozbłysku (np. Reale i in. 1997). Istotne wydłużenie czasu zaniku emisji SXR rozbłysków słonecznych wskazuje, iż w fazie tej wciąż występuje grzanie plazmy. Podobnie jak dla emisji poprzedzającej fazę impulsową rozbłysku, zbadane zostało, czy możliwe jest wyjaśnienie bilansu energetycznego tego dodatkowego grzania plazmy energią dostarczaną przez elektrony nietermiczne, efektywnie przyspieszane także po fazie impulsowej. Przeprowadzona analiza dla rozbłysku z 20 września 2002 dała pozytywną odpowiedź na tak postawione pytanie (H8). Wyniki tych symulacji zaprezentowano na rysunku 8. Linie niebieskie przedstawiają obserwacyjne krzywe blasku *GOES* w kanałach 1-8 Å (górna krzywa) i 0.5-4 Å (dolna krzywa), kolorem czerwonym oznaczono syntetyczne krzywe wyliczone na podstawie obserwacji *RHESSI*, a kolorem zielonym syntetyczne krzywe liczone przy wyłączonym grzaniu. Okazuje się, że strumień dostarczanej energii rzędu 10²⁶ erg/s, oszacowany na podstawie analizy widm rentgenowskich zarejestrowanych przez satelitę *RHESSI* w końcowej fazie rozbłysku, pozwala w pełni wytłumaczyć przebiegi obserwowanych krzywych blasku (H8).

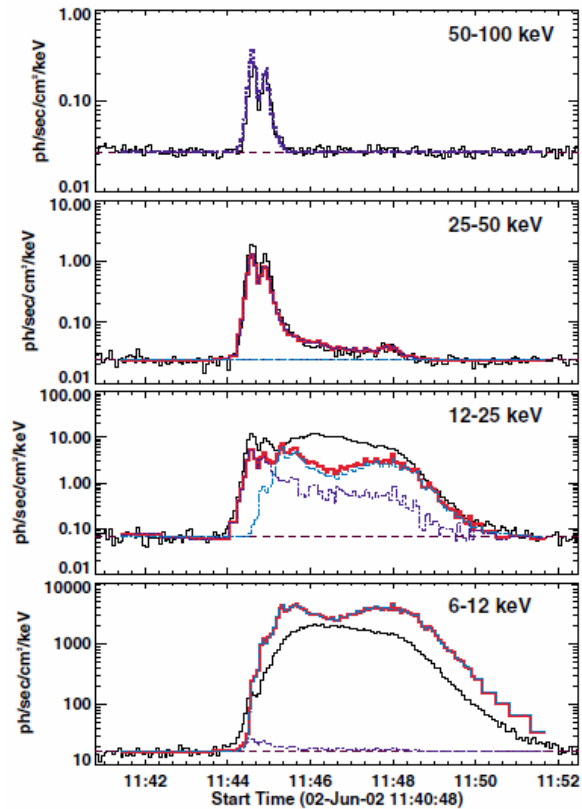
Praca H9 jest podsumowaniem wcześniejszych badań nad wydajnością procesów transportu i deponowania energii w rozbłyskach słonecznych z jednoczesnym zastosowaniem rozbudowanych technik symulacji umożliwiających syntezę emisji

pochodząca od elektronów nietermicznych w zakresie rentgenowskim. W poprzednich pracach do symulowania grzania przez elektrony nietermiczne używano formuł analitycznych zaproponowanych przez Fishera (1989). Takie podejście zapewnia dużą szybkość obliczeń oraz dosyć dobrą zgodność z rozwiązaniami na podstawie metod numerycznych, ale nie daje możliwości wygenerowania rozkładu elektronów nietermicznych wzdłuż symulowanej pętli rozbłyskowej. W takim przypadku możliwe jest tylko porównywanie wyliczonej emisji termicznej z obserwacjami. Dodatkowo, jak to już wcześniej wspomniano, uzyskiwano zgodność strumieni syntetycznych i obserwowanych w zakresie SXR dla 1-8 Å z instrumentu GOES, a jakość modelowania była oceniana po występujących różnicach pomiędzy przebiegami czasowymi emisji syntetycznej i obserwowanej w zakresie 0.5-4 Å. Niestety, rozważane krzywe blasku GOES w obu kanałach nie są niezależne energetycznie i ich zakresy zachodzą na siebie. Dlatego w pracy H9 dla każdego kroku czasowego w którym otrzymywane były obserwowane widma NTE, dodatkowo obliczono rozkłady przestrzenne i energetyczne elektronów nietermicznych.

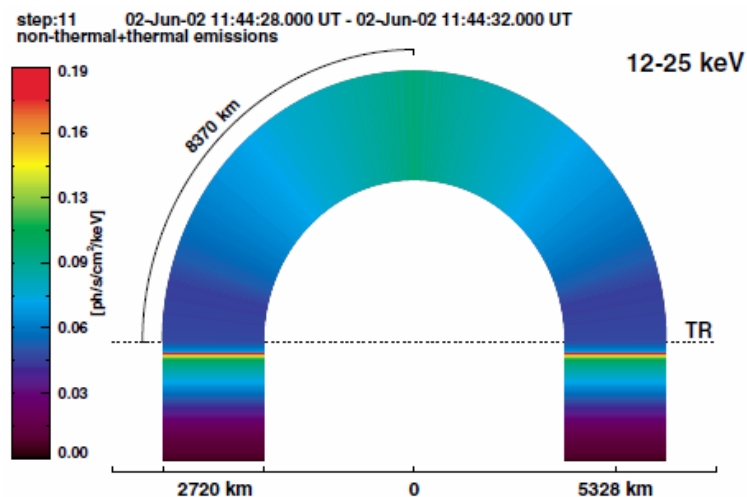


Rys. 9. Zastosowany w pracy H9 algorytm modelowania oraz analizy rozbłysków. Rysunek pochodzi z pracy H9.

Zastosowany kod numeryczny, napisany przez McTiermana i Petrosiana (1990), rozwiązuje równanie transportu Fokkera-Plancka w przybliżeniu stacjonarnym. Znajomość rozkładów NTE i fizycznych parametrów plazmy wzdłuż pętli rozbłyskowej pozwala na wyliczenie przestrzennego rozkładu emisji termicznej i nietermicznej dla promieniowania rentgenowskiego oraz porównanie ich z emisją obserwowaną w wybranych zakresach energetycznych. W takim podejściu można dodatkowo sprawdzić poprawność modelu w różnych zakresach energetycznych. Analiza porównawcza była przeprowadzona dla integralnych strumieni w wybranych zakresach energetycznych oraz dla wybranych struktur na obrazach otrzymanych z satelity *RHESSI*. Rysunek 9 przedstawia schemat ideowy procedur użytych podczas modelowania oraz analizy rozbłysków.



Rys. 10. Wynik modelowania rozbłysku z 2 czerwca 2002 r. Rysunek przedstawia syntetyczne oraz obserwacyjne krzywe blasku w zakresach energetycznych 50-100 keV, 25-50 keV, 12-25 keV oraz 6-12 keV. Kolory i style linii użyte na rysunku: czarna krzywa – obserwacyjne krzywe blasku z satelity *RHESSI*; ciemnoniebieska kropkowana krzywa – modelowa nietermiczna emisja; jasnoniebieska krzywa kropkowana – modelowa emisja termiczna; czerwona krzywa – modelowa suma emisji termicznej i nietermicznej; przerywana brązowa linia – tło wyznaczone z obserwacji. Rysunek pochodzi z pracy H9.



Rys. 11. Przykład modelu rozkładu przestrzennego sumy emisji termicznej i nietermicznej w zakresie energetycznym 12-25 keV policzonej dla wybranego momentu ewolucji rozbłysku z dnia 2 czerwca 2002 r. Linia przerywana odpowiada wysokości obszaru przejściowego. Na rysunku wyraźnie widać impulsowe pojaśnienie stóp pętli, w czasie kiedy emisja termiczna nie daje wkładu do obserwowanego zakresu energetycznego (zobacz rys. 1). Rysunek został zaczerpnięty z pracy H9.

Dla obserwowanych i modelowanych rozbłysków w pracy H9 udało się uzyskać dobrą zgodność integralnych strumieni rentgenowskich w wybranych zakresach energetycznych, zarówno w zakresie wysokich energii jak i dla niskich (rysunek 10). Największe różnice pomiędzy emisją wyliczoną i obserwowaną wystąpiły dla zakresu niskich energii, co spowodowane było uproszczeniami w przyjętych założeniach, m.in. przyjęto symetryczne wstrzeliwanie elektronów do pętli i zastosowano uproszczony model grzania NTE. Modelowanie numeryczne nietermicznej emisji rentgenowskiej daje dodatkowe możliwości interpretacyjne, ponieważ dzięki temu można stwierdzić który składnik emisji rentgenowskiej (termiczny lub nietermiczny) dominuje w wybranym zakresie energetycznym i w jakiej fazie rozbłysku. Natomiast wyliczenie przestrzennych rozkładów emisji rentgenowskiej (rysunek 11) daje możliwość porównywania emisji modelowanej z emisją obserwowaną pochodzącą z zarejestrowanych obrazów. Na tej podstawie można sprawdzić poprawność otrzymanych modeli rozbłysku. Dla obu analizowanych w pracy H9 zjawisk wykazano, że krzywe blasku udaje się odtworzyć przy założeniu, że jedynym nośnikiem dostarczanej energii są elektrony nietermiczne.

2.3 Podsumowanie

Publikacje wchodzące w skład rozprawy poświęcone są analizie emisji rentgenowskiej, będącej wskaźnikiem wydajności procesów transportu i deponowania energii w rozbłyskach słonecznych.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionych w omawianych pracach można zaliczyć:

- Potwierdzenie, że istotną przyczyną powstawania rozbłysków nie podlegających regule Big Flare Syndrom może być położenie obszaru generowania elektronów nietermicznych w pętli/pętlach rozblyskowych blisko jednej ze stóp (H1).
- Wykazanie, że obserwowana asymetria stóp HXR w rozbłyskach może być spowodowana własnościami procesu przyspieszania elektronów nietermicznych w źródle lub efektami transportu wiązki elektronów przez plazmę o parametrach zmiennych wzdłuż pętli rozblyskowej (H2, H3).
- Potwierdzenie hipotezy, iż odwrotna asymetria w niektórych rozbłyskach typu non-Sakao jest efektem lokalizacji obszaru wydzielania energii (rekoneksji/anihilacji pól magnetycznych) w pobliżu jaśniejszej ze stóp (H4).
- Wyjaśnienie przyczyny braku występowania dla niektórych obserwowanych rozbłysków, szczególnie dla fazy początkowej, składnika przesuniętego ku krótszym długością fali w zarejestrowanym widmie (H5).

- Wykazanie na podstawie numerycznych modeli rozbłysków, że głównym czynnikiem odpowiadającym za klasę rozbłysku jest nie tylko wielkość energii niesionej przez NTE, ale też rozkład ich populacji w widmie (H6).
- Wykazanie, że efektywne grzanie plazmy rozbłyskowej elektronami nietermicznymi rozpoczyna się w bardzo wczesnej fazie rozbłysku, znacznie przed fazą impulsową (H7).
- Wyjaśnienie przyczyn poprzedzania w większości rozbłysków słonecznych emisji HXR przez emisję SXR (H7)
- Potwierdzenie, że dla niektórych rozbłysków podczas fazy zaniku po fazie impulsowej występuje efektywne grzanie przez NTE (H8 i H9).
- Zbudowanie i zastosowanie dla obserwowanych zjawisk rozbłyskowych rozbudowanego modelu numerycznego, pozwalającego wyliczać rozkłady NTE oraz generować emitowane strumienie rentgenowskie w wysokich energiach (H9).
- Zastosowanie metody generowania przestrzennych rozkładów emisji rentgenowskiej, umożliwiającej porównywanie emisji syntetycznej z emisją obserwowaną pochodzącą z zarejestrowanych obrazów (H9).
- Wykazanie, że krzywe blasku promieniowania rentgenowskiego rozbłysków słonecznych w różnych zakresach energetycznych udaje się odtworzyć przy założeniu, że jedynym nośnikiem dostarczanej energii są NTE (H9).

Bibliografia

- Asai, A., Masuda, S., Yokayama, T., i in., 2002, ApJ, 578, L91
- Asai, A., Nakajima, H., Shimojo, M., White, S. M., Hudson, H. S., Lin, R. P. 2006, PASJ, 58, L1
- Aschwanden, M. J., Fletcher, L., Sakao, T., Kosugi, T., Hudson, H. 1999, ApJ, 517, 977
- Aschwanden, M., 2006, Physics of the Solar Corona - An Introduction with Problems and Solutions - sec. ed. (Praxis Publishing, Chichester, UK)
- Battaglia, M., Fletcher, L., & Benz, A. O. 2009, A&A, 498, 891
- Brosius, J. W., & Holman, G. D. 2009, ApJ, 692, 492
- Brown, J. C. 1971, Solar Physics, 18, 489
- Cargill, P. J., Mariska, J. T., Antiochos, S. K. 1995, ApJ, 439, 1034
- Dennis, B. R. 1988, Sol. Phys., 118, 49
- Dennis, B. R., Zarro, D. M. 1993, Sol. Phys., 146, 177
- Dryer, M., 1982, Space Sci. Rev., 33, 233
- Emslie, A. G. 1978, ApJ, 224, 241
- Fisher, G. H. 1989, ApJ, 346, 1019
- Gburek, S., Siarkowski, M., 2002, Advances In Space Research, 30/3, 601

- Goff, C. P., Matthews, S. A., van Driel-Gesztelyi, L., & Harra, L. K. 2004, *A&A*, 423, 363
- Heyvaerts, J., Priest, E. R., Rust, D. M. 1977, *ApJ*, 216, 123
- Kahler, S., 1977, *ApJ*, 214, 891
- Kahler, S., 1982, *Journal of Geophysical Research*, 87, 3439
- Kahler, S., Sheeley, N. R., Jr., Howard, R. A., Michels, D. J., Koomen, M. J., 1984, *Sol. Phys.*, 93, 133
- Kundu, M. R., Nitta, N., White, S. M., i in., 1995, *ApJ*, 454, 522
- Li, H.-W., Pallavicini, R., & Cheng, C. 1987, *Sol. Phys.*, 107, 271
- Li, J., Metcalf, T. R., Canfield, R. C., Wülser, J. P. 1997, *ApJ*, 482, 490
- McDonald, L., Harra-Murnion, L. K., Culhane, J. L. 1999, *Sol. Phys.*, 185, 323
- McTiernan, J. M., Petrosian, V. 1990, *ApJ*, 359, 524
- McTiernan, J. M., Fisher, G. H., Li, P. 1999, *ApJ*, 514, 472
- Melrose, D. B., & White, S. M. 1979, *Proc. ASA*, 3(6), 369
- Reale, F., Betta, R., Peres, G., Serio, S., McTiernan, J. 1997, *A&A*, 325, 782
- Sakai, J., de Jager, C., 1996, *Space Science Reviews*, 77, 1
- Sakao, T. 1994, Ph.D. Thesis, University of Tokyo
- Stoiser, S., Brown, J. C., Veronig, A. M. 2008, *Solar Physics*, 250, 315
- Tandberg-Hanssen, E., Emslie, A. G. 1988, *The Physics of Solar Flares* (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
- Veronig, A., Vrsnak, B., Temmer, M., Hanslmeier, A. 2002, *Sol. Phys.*, 208, 297
- Warren, H. P. 2006, *ApJ*, 637, 522
- Wheatland, M. S., & Melrose, D. B. 1995, *Sol. Phys.*, 158, 283

3 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych)

Moja działalność naukowa skoncentrowana jest na badaniu rozbłysków słonecznych i związanych z nimi zjawisk. W początkowym okresie uczestniczyłem w badaniach źródeł energii rozbłysków znajdujących się zazwyczaj w szczycie pętli, na podstawie danych rentgenowskich z satelity Yohkoh. Dodatkowo analizowałem stowarzyszone z rozbłyskami zjawiska obserwowane w innych długościach fali np. w linii $H\alpha$, między innymi eksplozję ekspandującej pętli oraz przeprowadzałem analizę rozbłysków obserwowanych w wielu zakresach fal elektromagnetycznych.

Istotnym rozszerzeniem badań była analiza mechanizmów oddziaływania pętli magnetycznych w różnych konfiguracjach. Analizowałem i badałem także widma rentgenowskie wyrzutów plazmoidów stowarzyszonych z rozbłyskami za pomocą instrumentu BCS znajdującego się na pokładzie satelity Yohkoh.

Zajmowałem się badaniem rozbłysków słonecznych typu Long Duration Events (LDE) charakteryzujących się bardzo długą fazą zaniku, trwającą nawet kilkanaście godzin. Jednym z głównych wyników było wydzielenie grupy zjawisk poniżej klasy rentgenowskiej C6 z fazą zaniku trwającą powyżej jednej godziny.

Analizowałem mikrorozbłyski obserwowane na siatce chromosferycznej oraz badałem ich wkład energetyczny do grzania korony słonecznej. Stwierdziłem, że tego typu zjawiska występują średnio 8000 razy na dzień oraz generują energie rzędu 10^{25} erg/s. Taki strumień energii jest tylko o jeden rząd mniejszy od oszacowanego całkowitego strumienia energii dostarczanej do korony słonecznej i może być istotnym składnikiem bilansu energetycznego korony.

Zajmowałem się także analizą i badaniem szpilek radiowych obserwowanych na falach decymetrowych oraz przyczynami ich powstawania w procesach zachodzących w rozbłyskach słonecznych lub z nimi stowarzyszonych.

Badałem wydajności grzania w obserwowanych rozbłyskach, a następnie rozszerzyłem otrzymane zależności od mikrorozbłysków przez rozbłyski różnych klas zachodzących na Słońcu, aż do silnych zjawisk występujących na gwiazdach typu RS Canum Venaticorum. Udało się na tej podstawie znaleźć proste prawo skalujące opisujące ilość wydzielonej energii w stosunku do miary emisji w zakresie 10 rzędów wielkości. Badania te były podstawą do jeszcze dalszego rozciągnięcia zakresu otrzymanej zależności, w tym celu użyte zostały rozbłyski zachodzące w koronach dysków akrecyjnych czarnych dziur.

Badałem różne metody i strategie wyznaczania temperatury oraz różnicowej miary emisji dla danych pochodzących z instrumentu XRT znajdującego się na satelicie *Hinode*. Wypracowane metody zostały następnie wykorzystane do wyznaczenia map temperatur i miar emisji obserwowanych obszarów aktywnych.

Wszystkie omawiane powyżej tematy badań znalazły swoje odzwierciedlenie w artykułach opublikowanych w recenzowanych czasopismach, lub publikacjach konferencyjnych.

Obecnie pracuję nad zbudowaniem numerycznego modelu rozbłysku na bazie kodów magneto-hydrodynamicznych dwu i trzy wymiarowych, które ze względu na swoje właściwości w realistyczny sposób potrafią odtwarzać rozbłyski wielopętlowe. Jedna z prac na ten temat znajduje się obecnie w recenzji w czasopiśmie *ApJ*.

3.1 Działalność dydaktyczno-popularyzatorska

Byłem promotorem 3 prac magisterskich oraz recenzentem 1 pracy magisterskiej.

Od 2004 do 2010 roku prowadziłem kursowy wykład dla studentów „Analiza obrazów”.

Od 2010 r. do dzisiaj prowadzę kursowy wykład „Zaawansowane metody redukcji i analizy danych”

Od 2010 r. do dzisiaj prowadzę kursowy wykład „Astrofizyka Wysokich Energii” Przez okres swojej pracy dydaktycznej prowadziłem/prowadzę wiele rodzajów ćwiczeń i konwersatoriów:

- a) Wstęp do astronomii
- b) Wstęp do heliofizyki
- c) Mechanika nieba
- d) Wnętrza gwiazdowe
- e) Analiza matematyczna
- f) Matematyka
- g) Systemy operacyjne (UNIX, Linux)
- h) Programowanie w Fortranie
- i) Programowanie w IDL
- j) Aplikacje astronomiczne
- k) Analiza obrazów
- l) Zaawansowane metody redukcji i analizy danych
- m) Astrofizyka wysokich energii

Od 1996 roku biorę aktywny udział w corocznych cyklach wykładów popularnonaukowych, odbywających się w IA UW r podczas roku akademickiego.

Od 1998 roku czyli początku Festiwalu Nauki na naszym wydziale przygotowuję corocznie wykłady i pokazy.

3.2 Działalność organizacyjna

Administrator lokalnej sieci komputerowej w Instytucie Astronomicznym (od 2002 roku do dzisiaj)

Członek Rady Wydziału (3 kadencje) jako przedstawiciel pracowników naukowych niesamodzielnych.

Członek Wydziałowej Komisji Egzaminacyjnej (2009, 2013)

Członek Międzywydziałowej Komisji Doradczej ds. Informatyzacji Uniwersytetu Wrocławskiego (2007-2010)

3.2 Autorstwo i współautorstwo publikacji naukowych

Jestem współautorem lub autorem 35 prac naukowych (WoS), w tym 24 z bazy Journal Citation Reports (JCR) z których 19 ukazało się po uzyskaniu przeze mnie stopnia naukowego doktora. Sumaryczny Impact Factor prac wynosi 55.341. Łączna liczba cytowań na podstawie bazy Web of Science wynosi 169 (129 bez autocytowań), stan na początek stycznia 2015 r. Mój index Hirscha wynosi 7. Szczegółowa lista publikacji znajduje się w osobnym dokumencie.

3.3 Kierowanie i udział w projektach badawczych

„F-CHROMA - Obserwacje i modelowanie chromosfer rozblyskowych” - grant finansowany przez Komisję Europejską w ramach 7 projektu ramowego, 2014 - 2017, wykonawca.

„Badanie procesów wydzielania i transportu energii w rozbłyskach słonecznych”, grant numer N203 022 31/2991, 2006 – 2009, kierownik grantu.

„Modele rozbłysków słonecznych i ich testowanie”, grant KBN numer 2PO3D00123, 2002 - 2005, wykonawca.

„Badanie rozbłysków słonecznych i gwiazdowych”, grant KBN 2 PO3D 016 14, 1998 - 2000, wykonawca.

3.4. Nagrody i wyróżnienia

- Nagroda zespołowa przyznana przez Rektora Uniwersytetu Wrocławskiego w roku 2000r.
- Nagroda zespołowa Ministra Edukacji Narodowej i Sportu za współautorstwo cyklu prac poświęconych badaniu wydzielania energii w rozbłyskach słonecznych na podstawie obserwacji rentgenowskich (2003r.)
- Nagroda zespołowa przyznana przez Rektora Uniwersytetu Wrocławskiego w 2010 roku za cykl prac dotyczących rozbłysków słonecznych.
- Nagroda przyznana przez Rektora Uniwersytetu Wrocławskiego w 2014 roku za osiągnięcia organizacyjne uzyskane w 2013 roku.

3.5 Udział w konferencjach międzynarodowych

- Third Advances in Solar Physics Euroconference: Magnetic Fields and Oscillations, Poczdam, Niemcy , 1999
- 33 COSPAR, Warszawa, Polska, 2000
- 35 COSPAR, Paryż, Francja, 2004
- X-ray spectroscopy and plasma diagnostics from *RESIK*, *RHESSI* and *SPIRIT* instruments, Wrocław, Polska, 2005
- Initial Results from Hinode, Workshop in Memory of Takeo Kosugi, Tokio, Japonia, 2007
- 37 COSPAR, Montreal, Kanada, 2008
- Consultation on Solar Physics, Ondrejov, Czechy, 2011
- XVI Consultations on Solar Physics, Wrocław, Polska, 2013

Na wyżej wymienionych konferencjach prezentowano referat i/lub plakat.

3.6 Członkostwo międzynarodowych organizacjach

- Członek Międzynarodowej Unii Astronomicznej od 2002 roku.

3.7 Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych lub akademickich

- Francja, Orsay Observatory, Szkolenie i analiza danych z satelity SOHO, 2 tygodnie, 1997

- Anglia, Rutherford Appleton Laboratory, Analiza danych z satelity Yohkoh, 2 tygodnie, 1997

- Japonia, National Astronomical Observatory of Japan, 10 dni, 2007

3.8 Recenzje

Od 2011 roku jestem zarejestrowanym recenzentem czasopisma ApJ.