

РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА (РЕСИК)

Руководитель проекта с российской стороны:

В. Кузнецов

Руководитель проекта с польской стороны:

Я. Сильвестер

РЕСИК – разработанный ЦКИ ПАН брэгговский спектрометр, который работал на спутнике КОРОНАС-Ф (2001-2005 гг.) и использовал изогнутые кристаллы для регистрации спектров высокого спектрального разрешения в рентгеновском диапазоне длин волн 3,4-6,1 Å в четырех спектральных каналах. Рентгеновские спектры этого диапазона в значительной степени определяются возникновением вспышек на солнечном диске. Прибор не имел коллиматора и в его поле зрения попадал весь солнечный диск. Если на диске одновременно возникали две вспышки, то полученный прибором РЕСИК спектр содержал вклад от излучения обеих вспышек. Вклад каждой вспышки определялся на основе знания характеристик прибора [Sylwester et al., 2005] и дополнительной информации, полученной в других наблюдениях (спутники *RHESSI* и *GOES*).

В течение 2011-2015 гг. продолжались работы по обработке спектров, полученных с помощью этого спектрометра. На данный момент в каталоге явлений, отнесённых к так называемому второму уровню (Level_2) http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/RESI_K_Level2/index.html, находится 100 солнечных вспышек, которые произошли на Солнце между апрелем 2002 г. и мартом 2003 г. Большинство их них (более 80%) - это вспышки балла С и М. Помимо спектров от вспышек получено более 300 спектров от активных областей.

На сайте http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/resik_catalogue.html находится каталог всех явлений, которые наблюдались прибором РЕСИК. Отметим, что наиболее оптимальные условия работы прибора (в смысле постановки уровней дискриминатора амплитуд, ADS) имели место в период с 24 декабря 2002 г. по 29 марта 2003 г.

На рис.1 а,б представлены два спектра, характеризующие фазу роста (см. рис.1а) и

SPEKTROSKOPIA RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK)

Kierownik projektu ze strony Rosji:

V. Kuznetsov

Kierownik projektu ze strony Polski:

J. Sylwester

RESIK [1] był polskim spektrometrem krystalicznym Bragga, który odbył lot na pokładzie rosyjskiego satelity-observatorium Słońca *KORONAS-F*. W przyrządzie zastosowano jako elementy dyspersyjne 4 wygięte cylindrycznie wypukłe kryształy. Promieniowanie gorących obszarów korony słonecznej, po odbiciu od wypukłego kryształu było rejestrowane za pomocą pozycyjnych gazowych detektorów proporcjonalnych, co umożliwiało równoczesną obserwację widm w czterech kanałach widmowych w nominalnym zakresie obejmującym przedział długości fal 3.4 Å - 6.1 Å (granice obserwowanego przedziału w niewielkim stopniu zależały od położenia rozbłysku na tarczy słonecznej). Przed spektrometrem nie umieszczono kolimatorów, w związku z czym w polu znajdowała się cała tarcza Słońca. W wypadku, gdy w dwóch różnych miejscach na tarczy jednocześnie obecne byłyby silne źródła promieniowania rentgenowskiego, ich widma nakładałyby się, powodując problemy z interpretacją. W takiej sytuacji pomocne są dodatkowe informacje otrzymane za pomocą innych instrumentów orbitalnych obserwujących Słońce w podobnym przedziale energii. Najbardziej użyteczne w tym kontekście okazały się obrazy rentgenowskie zrekonstruowane z danych uzyskanych za pomocą teleskopu *RHESSI* (NASA) oraz obserwacje z XRM z satelity *GOES* (NOAA).

W latach 2011-2015 kontynuowano prace nad redukcją widm uzyskanych za pomocą spektrometru RESIK. Analizowano głównie dane zebrane w okresie, kiedy ustawienia instrumentu były optymalne, tzn. z okresu grudzień 2002-marzec 2003. W pierwszym kroku dokonywano redukcji do tzw. poziomu Level_2, gdzie natężenia emisji w funkcji długości fal było wyrażone w jednostkach absolutnych [fotony $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$]. Zredukowane widma umieszczano w katalogu dostępnym publicznie pod adresem <http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/RESI>

затухания (см. рис.1б) вспышки балла C1.9, которая произошла 26 декабря 2002 г. (SOL2002-12-26T08:35). Цвета на рисунках соответствуют отдельным энергетическим каналам. В каждом канале показаны наиболее сильные характеристические линии ионов солнечной плазмы. Спектры содержат спектральные линии таких элементов как Cl, Si, S, Ar, а также K. В наблюдаемом спектральном диапазоне зарегистрированы сильные эмиссионные линии, соответствующие переходам: $1s - np$ и $1s^2 - 1s(np)$, соответственно, в водородо- и гелиоподобных ионах. Переходы, соответствующие $n=2$ и $n=3$, часто наблюдались для различных ионов, но для некоторых вспышек прибор RESIK регистрировал повышенную эмиссию на длинах волн, соответствующих переходам с n вплоть до 9 или 10.

На рис. 1 пунктиром соединены две пары линий ионов S XVI и S XV, а также Si XIV и Si XIII, показывающие, что наклоны этих пунктирных линий диаметрально противоположны на фазе роста и фазе затухания вспышки (времена интеграции спектров указаны на рисунке над спектрами). Такое изменение в отношениях интенсивностей указанных линий свидетельствует о заметном различии физических условий во вспышечной плазме на разных фазах развития вспышки.

Линии и континуум в рассматриваемом спектральном диапазоне формируются в горячей плазме в интервале температур $T = 3 \div 30$ МК, с интенсивностями в разных пропорциях в зависимости от длины волны. Это позволяет использовать полученные прибором RESIK спектры для исследования температурной структуры источника (так называемая дифференциальная мера эмиссии/ DEM), а также для определения содержания в солнечной короне тех элементов, у которых наблюдаются линии излучения.

В первых работах по анализу спектров [Sylwester et al., 2011; Sylwester et al., 2012; Sylwester et al., 2013; Huenemoerder et al., 2013], а также в работе [Phillips et al., 2015] принималось сильно упрощающее предположение о том, что вся излучающая плазма находится при одной температуре, которая мы определялась нами на

IK_Level2/index.html. Aktualnie w katalogu zjawisk zredukowanych znajduje się ok. 10 000 widm zaobserwowanych podczas 101 rozbłysków słonecznych (okres od kwietnia 2002 do marca 2003). Większość z tych rozbłysków (ponad 80%) stanowiły słabsze zjawiska klasy rentgenowskiej C oraz kilka silniejszych klas M i X. RESIK był na tyle czułym spektrometrem, że umożliwił też obserwacje bezrozbłyskowych obszarów aktywnych. W takim wypadku dynamicznie regulowany czas zbierania widm był najdłuższy i wynosił ok. 5 minut. Takich widm jest w katalogu ponad 300. Ze stron, przedstawionych pod innym adresem http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/resik_catalogue.htm można uzyskać informacje o częściowo zredukowanych widmach (ponad milion widm), obejmujących wszystkie zjawiska zaobserwowane za pomocą przyrządu RESIK.

W dalszej części przedstawimy najważniejsze wyniki otrzymane w rezultacie analizy widm dla wybranych zjawisk. Wyniki te były regularnie publikowane, głównie w czasopiśmie *The Astrophysical Journal*.

Na Rysunku 1 przedstawiono przykład widm zaobserwowanych w trakcie fazy wzrostu (lewy) oraz zaniku (prawy) rozbłysku klasy C1.9 z dnia 26 grudnia 2002 (czyli w obecnie obowiązującej notacji zjawisko: SOL2002-12-26T08:35). Kolory na zapisie widm odpowiadają indywidualnym przedziałom widmowym. Na rysunku podano identyfikację przejść odpowiadających silniejszym liniom emisyjnym. Za pomocą kropkowanych linii połączono maksima par linii jonów S XVI i S XV oraz Si XIV i Si XIII. Widać, że nachylenia tych linii są diametralnie różne na fazie wzrostu i zaniku (przedziały czasu integracji widm podano na górze rysunków). Obserwowany efekt jest odbiciem zasadniczych zmian warunków fizycznych w plazmie rozbłysku pomiędzy fazą wzrostu i zaniku.

Widma obserwowane za pomocą spektrometru RESIK zawierają wiele linii widmowych formujących się w takich pierwiastkach jak: Si, S, Cl, Ar oraz K. Linie te związane są z przejściami typu $1s - np$ oraz $1s^2 - 1s(np)$, odpowiednio w jonach wodorodo- jak i helo-podobnych. Przejścia z poziomów wzbudzonych o głównej liczbie kwantowej $n = 2$ oraz 3 były wcześniej dość często

основе рентгеновских потоков излучения, измеряемых в двух спектральных диапазонах спутником *GOES* (0,5-4-8 Å), т.е. предполагалось, что плазма является изотермической.

В последующих работах по более подробному анализу спектров [Sylwester et al., 2014;2015] от предположения об изотермичности плазмы источника отказались и стали считать излучающую плазму многотемпературной, т.е. состоящей из смеси плазм с разными температурами (на временах её релаксации). Однако для линий некоторых ионов (К XVIII, а также Ar XVII) предположение об изотермичности плазмы оказалось вполне удовлетворительным, поскольку полученные из наблюдений *GOES* температуры хорошо соответствуют однотемпературным спектрам прибора RESIK для этих ионов.

observed and analyzed. To, co nowego wniosły obserwacje wykonane za pomocą przyrządu RESIK, to odkrycie, że w pewnych zjawiskach widzimy znacznie wzmocnioną emisję w długościach fal odpowiadających przejściom z $n = 5, 6$ czasem nawet 8 lub 9!

Observed lines and the continuous spectrum in the studied spectral range form a hot component of the plasma, in the temperature range from 3 MK - 30 MK. The proportion of the hotter part of the plasma increases (in general) in the direction of shorter wavelengths. In connection with this effect, the spectra obtained with the RESIK spectrometer are especially useful for the study of the structure of the temperature source described with the help of the form of the distribution, i.e. differential emission measure (DEM). The intensities of the lines depend proportionally on the abundance of the elements responsible for their formation. Such dependencies create an opportunity to use the observed spectra for the determination of the chemical composition of the plasma.

In earlier attempts to determine the chemical composition of the plasma described in the papers [2, 3, 4, 5 and 6] we made a strong simplifying assumption, that the plasma in the source has a uniform temperature, i.e. we used a single-temperature model (i.e. isothermic approximation). The value of the characteristic temperature was determined on the basis of the interpretation of the observed value of the ratio of the horizontal fluxes of X-ray emissions measured in two spectral ranges (0.5-4 Å and 4-8 Å) of the XRM satellite *GOES*.

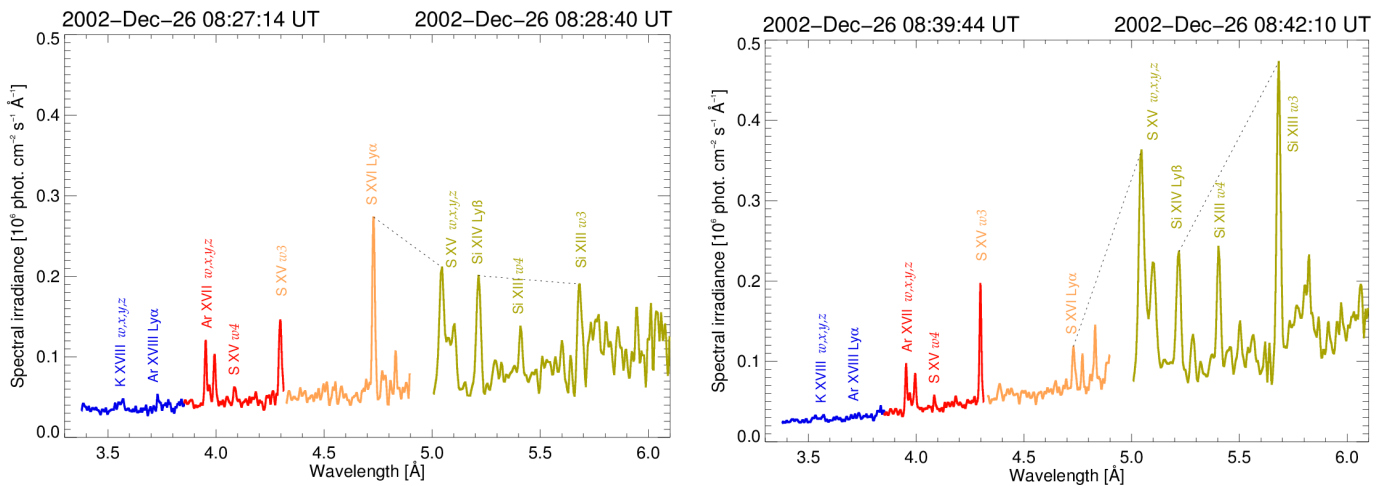


Рис.1. (а) Пример спектра, полученного с помощью спектрометра РЕСИК для фазы роста вспышки балла C1.9, которая произошла на Солнце 26 декабря 2002 года (SOL2002-12-26T08:35). Разным цветам соответствуют разные спектральные каналы. Приведена идентификация основных спектральных линий ионизованных ионов. Пунктирные линии соединяют две пары линий ионов SXVI и S XV, а также Si XIV и Si XIII.
 (б) Пример спектра, полученного с помощью спектрометра РЕСИК для фазы затухания вспышки балла C1.9, которая произошла на Солнце 26 декабря 2002 года (SOL2002-12-26T08:35).

Rys. 1. Przykład widma uzyskanego za pomocą spektrometru RESIK dla fazy wzrostu (lewy panel) oraz zaniku (prawy panel) rozbłysku klasy C1.9 zaobserwowanego 26 grudnia 2002 (SOL2002-12-26T08:35). Kolorami zaznaczono indywidualne przedziały (kanały) widmowe oraz podano identyfikacje silniejszych linii. Kropkowanymi prostymi połączono pary linii jonów S XVI i S XV oraz Si XIV i Si XIII

Во втором канале спектра, наблюдаемого с помощью спектрометра РЕСИК, в диапазоне 4,44-4,5 Å отмечались слабые линии гелиоподобного иона хлора Cl XVI (на рис.1 не показаны). Используя потоки в этих линиях, спектроскопическим методом в изотермическом приближении было определено содержание хлора Cl в корональной плазме [Sylwester et al., 2011]. Было исследовано около 3000 спектров солнечных вспышек (20 явлений, произошедших в 2002 и 2003 годах). В результате проведенного анализа была получена усреднённая по всем спектрам величина содержания хлора $\log A(\text{Cl})=5,75 \pm 0,26$ в общепринятой шкале, где $\log A(\text{H})=12$. Ошибка определения содержания вытекает из разброса величины потоков излучения, измеряемых в линии Cl. Полученный результат является вероятно самым лучшим определением содержания хлора для солнечной плазмы. Величина содержания хлора, полученная по данным прибора РЕСИК, в 1,8 раза выше содержания, полученного на основании

Do pierwiastków dla których istnieją nieliczne tylko wyznaczenia obfitości zalicza się chlor. Linie jonu chloru Cl XVI obserwowane są jako bardzo słabe struktury na widmach z przedziału 4.44 Å - 4.5 Å (kanał widmowy Nr. 3)

Bazując na mierzonych natężeniach tych linii określono obfitość chloru w koronie w przybliżeniu izotermicznym. W tym celu przeanalizowano około 3000 widm rozblyskowych. Wybrano 20 zjawisk z r. 2002 i 2003 takich, w których linie Cl były najlepiej widoczne. W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano średnią wartość obfitości $\log A(\text{Cl})=5.75 \pm 0.26$ (w ogólnie przyjmowanej skali, gdzie zakłada się $\log A(\text{H})=12$). Błąd wyznaczenia obfitości odpowiada 1σ . Wartość błędu została wyznaczona z dopasowania krzywej Gaussa do histogramu rozkładu obfitości Cl [2]. Uzyskana wartość obfitości $A(\text{Cl})$ jest 1.8 razy większa od tej, oszacowanej na podstawie analizy widm plam słonecznych obserwowanych w podczerwieni. Uzyskany wynik jest prawdopodobnie najlepszym wyznaczeniem obfitości chloru dla plazmy

спектров солнечных пятен, наблюдаемых в инфракрасном диапазоне. Полученные в работе [Sylwester et al., 2011] содержания хлора оказались почти постоянными для разных уровней солнечной активности (были исследованы рентгеновские вспышки класса ниже C1 и вплоть до X1 по классификации *GOES*), что свидетельствует о достоверности результата и корректности использованной методики.

В работе [Sylwester et al., 2013] проводилось сопоставление содержания в солнечной короне серы (S), многие линии водорода и гелиоподобных ионов (S XVI и S XV) которой наблюдаются в спектрах плазмы солнечных вспышек, с содержаниями серы, полученным по другим данным. Содержание серы определялось спектроскопическим методом в предположении изотермической плазмы с использованием линии S XV w4 из интервала 4,075 – 4,095 Å, линии S XV w3 из интервала 4,285 – 4,320 Å, триплета (w, x, y, z) иона S XV из интервала 5,006 – 5,14 Å а также линии Ly-α иона S XVI из интервала 4,717 – 4,745 Å.

Были проанализированы 1448 спектров для 13 вспышек, произошедших в 2003 г. В результате проведенного анализа на основе измеренных потоков излучения в линии S XV $1s^2 - 1s4p$ была получена величина $\log A(S) = 7,16 \pm 0,17$ (в общепринятой шкале, когда $\log A(H) = 12$). Ошибка в определении содержания серы связана с разбросом величины потоков излучения, измеряемых в линиях S. Полученный результат наиболее достоверен среди всех оценок по остальным линиям, дающих содержание в пределах 7,13-7,24. Эта величина весьма близка к фотосферному содержанию серы, полученному в последнее время, а также к её содержанию в спокойном солнечном ветре и в метеоритах.

В 2013 году были проведены работы по анализу спектров, полученных спектрометром РЕСИК, которые позволяли определять содержание в солнечной короне кремния (Si) [Sylwester et al., 2013]. Также принималось, что излучающая плазма является изотермической и характеризуется величиной температуры и

солнечной. Одержимые в работе [2] обфитоци хлору были в приближении стаде в широком zakresie активности солнечной (од клас *GOES* C1 до X1).

Przechodząc do jonów formujących się w niższych temperaturach, w pracy [3] poszukiwano odpowiedzi na pytanie czy obfitość siarki, której liczne linie wodoru – oraz helo-podobnych jonów (S XVI oraz S XV) obserwowane są w analizowanych widmach plazmy rozbłysków słonecznych, różni się od podawanych w literaturze obfitości wyznaczonych z innych danych. Wykorzystując linie S XV w4 z przedziału 4.075 Å - 4.095 Å, S XV w3 z przedziału 4.285 - 4.320 Å, tryplet (w, x, y, z) jonu S XV z przedziału 5.006 Å - 5.14 Å oraz linie Lyα jonu S XVI z przedziału 4.717 Å - 4.745, przy założeniu że emitująca plazma jest izotermiczna wyznaczono obfitość siarki. W tym wypadku przeanalizowano 1448 widm z 13 zjawisk obserwowanych w r. 2003. W wyniku przeprowadzonej analizy natężeń linii S XV $1s^2 - 1s4p$ otrzymano wartość $\log A(S) = 7.16 \pm 0.17$. Ten wynik uznajemy za najbardziej wiarygodny spośród istniejących oszacowań, również tych uzyskanych na podstawie analizy natężeń innych w/w linii, dla których wartości $\log A(S)$ zawarte są w przedziale 7.13 - 7.24 Å. Wyznaczone koronalne wartości obfitości siarki są bliskie otrzymanej ostatnio wartości obfitości fotosferycznej oraz wartości uzyskanej dla spokojnego wiatru słonecznego oraz meteorytów. Kolejno badano w приближении izotermicznym obfitość krzemu w koronie. Na podstawie analizy wybranych 1822 widm z 21 rozbłysków słonecznych wyznaczono obfitość krzemu wykorzystując widma obserwowane w kanale 4 obejmującym przedział długości fal 5.00 Å - 6.05 Å. W tym celu wykorzystano natężenia linii jonów wodoru- oraz helopodobnych (Si XIV Lyβ, $\lambda = 5.217$ Å oraz Si XIII w3 odpowiadającej przejściu $1s^2 - 1s3p$, $\lambda = 5.688$ Å). Na podstawie analizy natężeń linii Lyβ (5.217 Å) uzyskano wartość obfitości $\log A(Si) = 7.93 \pm 0.21$, natomiast na podstawie natężeń linii w3 ($\lambda = 5.688$ Å) otrzymano wartość $\log A(Si) = 7.89 \pm 0.13$. Otrzymane wartości tylko nieznacznie zmieniają się od rozbłysku do rozbłysku, będąc od 2.4 do 2.6 razy wyższe od wartości fotosferycznych, oraz 3 razy wyższe od wartości uzyskanych z widm

мерой эмиссии, которые оценивались на основе анализа отношений потоков излучения в мягком рентгеновском диапазоне по данным спутника *GOES*.

На основе анализа 1822 спектров, полученных прибором РЕСИК, по измерениям потоков излучения в линиях кремния в канале 4 в диапазоне длин волн 5,00-6,05 Å для 21 солнечной вспышки было определено содержание кремния. В этот диапазон попадают линии водородо- и гелиоподобных ионов (Si XIV Ly β $\lambda=5,217$ Å, а также линия w3 иона Si XIII, соответствующая переходу $1s^2 - 1s3p$ $\lambda=5,688$ Å). По потокам в линии Ly- β (5,217 Å) была получена величина содержания $\log A(\text{Si})=7,93\pm 0,21$, для потоков в линии w3 (5,688 Å) $\log A(\text{Si})=7,89\pm 0,13$.

Полученные величины лишь незначительно изменяются от вспышки к вспышке. Они в 2,6 и 2,4 раза выше, чем соответствующие фотосферные величины, а также в 3 раза выше, чем величины полученные для кремния в случае очень низкой солнечной активности (периоды наблюдений без вспышек).

Следующим этапом исследований была разработка метода оптимизации по определению химического состава солнечной плазмы (AbuOpt), который вместо предположения об изотермичности излучающей плазмы использует предположение об её многотемпературности. Для описания многотемпературности плазмы использовалась дифференциальная мера эмиссии (DEM). На основе потоков излучения, наблюдаемых в более, чем в десяти спектральных диапазонах, включающих эмиссионные линии и континуум, восстанавливались как химический состав излучающей плазмы, так и её распределение по температурам (DEM). Метод AbuOpt позволяет, таким образом, одновременно определить как оптимальный состав излучающей плазмы, так и распределение этой плазмы по температурам.

Разработанный метод был применен в качестве примера для анализа вспышки балла M1.0, которая произошла на Солнце 14 ноября 2002 (SOL2002-11-14T22:26). Результаты опубликованы в работе [Sylwester et al., 2014].

РЕСИК для очень низкой активности солнечной (okresy bez rozblysków).

Заłożenie stałości temperatury w obszarze emisji mogło wprowadzić błędy w określaniu obfitości pierwiastków. Tak więc w kolejnej, bardziej zaawansowanej interpretacji, zastosowano po raz pierwszy podejście wielotemperaturowe. Rozważano sytuacje kiedy plazma źródła stanowi mieszanę składowych posiadających znacznie różniące się temperatury.

Opracowano oryginalną metodę optymalizacji obfitości pierwiastków chemicznych (o nazwie AbuOpt), w której przyjęto realistyczne założenie, że źródło emisji jest wielotemperaturowe tzn. istnieje pewien rozkład plazmy z temperaturą opisywany za pomocą tzw. różniczkowej miary emisji - DEM. Na podstawie analizy natężeń obserwowanych w kilkunastu przedziałach widmowych zawierających zarówno linie emisyjne jak i wyłącznie promieniowanie ciągłe, próbowaliśmy odtworzyć zarówno skład chemiczny emitującej plazmy jak i jej rozkład z temperaturą. Metoda AbuOpt pozwala na jednoczesne wyznaczenie tego rozkładu oraz optymalnego składu chemicznego emitującej plazmy.

Opracowaną metodę zastosowano do analizy przykładowego rozbłysku klasy M1.0 z 14 listopada 2002 (SOL2002-11-14T22:26). Wyniki opublikowano w pracy (7). Zredukowane widma analizowano w celu wyznaczenia rozblyskowych obfitości pierwiastków (Si, S, Cl, Ar oraz K), które emitują obserwowane linie.

Otrzymane wyniki jednoznacznie wykazały, że założenie izotermiczności jest bardzo dobrym przybliżeniem przy interpretacji obserwowanych natężeń linii niektórych, tzw., gorętszych jonów (np. K XVIII lub Ar XVII). Wynika to z faktu, że wykorzystywane podczas analizy wartości temperatury uzyskane z interpretacji obserwacji XRM *GOES* dobrze odpowiadają odpowiednim temperaturom formowania się linii w gorętszych jonach. Jednakże w wypadku chłodniejszych jonów, przybliżenie izotermiczne jawnie zawodzi, co przedyskutowano poniżej. Wyniki zastosowania metody AbuOpt do interpretacji widm zaobserwowanych w trakcie rozbłysku ilustruje

Редуцированные спектры были использованы Rysunek 2 zaczerpnięty z pracy [7] для определения содержания элементов (Si, S, Cl, Ar и K), у которых линии излучения ионов регистрировались прибором РЕСИК. Ранее оценки содержания этих элементов были нами получены на основе упрощенного предположения, что излучающая плазма является изотермической. На рис.2 показаны временные изменения полученных содержаний указанных выше элементов для этой вспышки, а также усредненные по времени величины содержаний из работы [Sylwester et al., 2014].

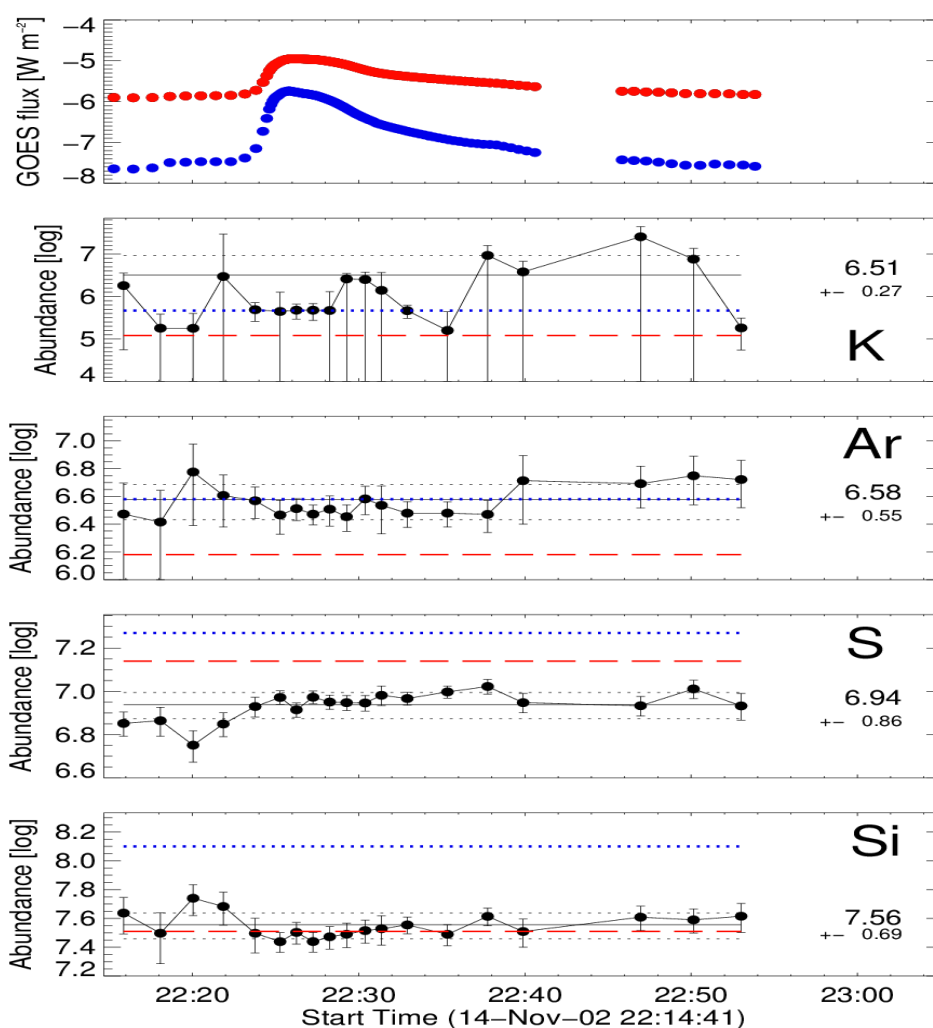


Рис.2. Временные изменения абсолютных содержаний элементов K, Ar, S и Si для вспышки балла M1.0, которая произошла на Солнце 26 декабря 2002 года (SOL2002-11-14T22:26), полученные с помощью метода AbuOpt. Тонкие черные горизонтальные линии показывают усредненные по времени величины содержания, а черные пунктирные линии соответствуют ошибкам, полученным с помощью метода наименьших квадратов. На верхнем рисунке представлены рентгеновские потоки излучения, зарегистрированные в двух каналах спутника GOES. Пунктирная голубая линия соответствует значениям содержания элементов в короне из работы [Feldman, et al., 1992], а красный пунктир - фотосферным значениям [Asplund et al., 2009].

Рис. 2. Zmiany z czasem absolutnych obfitości pierwiastków: K, Ar, S, oraz Si podczas rozbłysku klasy M1.0 z 14 listopada 2002 (SOL2002-11-14T22:26) wyznaczone z wykorzystaniem metody AbuOpt. Cienkie czarne linie poziome przedstawiają uśrednione po czasie wartości obfitości zaś czarne linie kropkowane odpowiadają błędom wyznaczonym za pomocą metody najmniejszych kwadratów (rms). Górny panel przedstawia strumienie rentgenowskie w 2 kanałach GOES. Kropkowane linie niebieskie odpowiadają obfitościom „koronalnym” [Feldman, et al., 1992], zaś przerywane czerwone obfitościom „fotosferycznym” Asplund et al., 2009].

В работе [Sylwester et al., 2014] с использованием метода AbuOpt исследованы более 2400 спектров, полученных в диапазоне длин волн 3,4 – 6,1 Å для 33 солнечных вспышек, отобранных с учетом периода оптимальной работы прибора РЕСИК (декабрь 2002 - март 2003) и длительности наблюдений вспышек. Были определены содержания в короне элементов K, Ar, S и Si, сильные линии излучения которых наблюдались в изученных спектрах. Был использован новый метод анализа спектров, который основывался на реальных и поддержанных другими наблюдениями предположениях о том, что излучающая плазма является смесью плазм с разными температурами (т.е. не является изотермической). На рис. 3 показаны результаты, полученные в этой работе: усредненные по времени величины содержаний в короне отдельных элементов по данным отдельных вспышек, а также средние величины содержания по данным всех 33 проанализированных вспышек.

Проведенные вычисления и анализ результатов позволяют сделать вывод о том, что величины содержаний элементов K и Ar в короне, полученные в рамках предположения о многотемпературности излучающей плазмы, сравнимы с величинами, которые для этих элементов были получены ранее в рамках предположения об изотермичности излучающей плазмы. Это является следствием того, что температуры плазмы, использованные в анализе и полученные по наблюдениям спутника *GOES*, достаточно хорошо совпадали с температурами, соответствующими ионизационному состоянию ионов K XVIII и Ar XVII. Для элементов S и Si величины содержаний элементов, полученные в рамках многотемпературного приближения, оказались в 1,8 и 2,1 раза меньше, чем соответствующие величины, полученные в рамках изотермического приближения. Для серы (S) величины содержаний, полученные в рамках многотемпературного приближения оказались также ниже корональных и фотосферных величин содержаний, полученных другими авторами. Для кремния (Si) величины содержаний, полученные в рамках

В badanym zjawisku nie stwierdzono istnienia znaczących zmian obfitości analizowanych pierwiastków w trakcie zjawiska. Postanowiono więc zbadać, czy występują różnice składu chemicznego pomiędzy rozbłyskami, na co wskazywały wyniki analizy danych SMM BCS. W tym celu wyselekcjonowano spośród wszystkich zredukowanych zjawisk te, dla których warunki rejestracji widm były najkorzystniejsze. Takich zjawisk było 33. Obserwowane one były w okresie (grudzień 2002 – marzec 2003). Przeprowadzono analizę ich 2400 widm, wykorzystując metodę AbuOpt. Wyznaczono obfitości pierwiastków K, Ar, S oraz Si dla wszystkich widm. Okazało się, że w większości rozbłysków nie obserwuje się zmian z czasem obfitości analizowanych pierwiastków w trakcie zjawiska. W większości zjawisk niewielkie zmiany obfitości nie były znaczące statystycznie. Tak więc postanowiono przypisać każdemu z badanych zjawisk zespół reprezentatywnych obfitości, wyliczony jako średnie z tych obserwacji, kiedy strumienie w zespole analizowanych linii były dostatecznie silne. Na Rysunku 3 (z pracy [8]) przedstawiono sumaryczne wyniki.

Nie stwierdzono występowania zasadniczych zmian obfitości pomiędzy poszczególnymi rozbłyskami – jedynie w wypadku potasu, można starać się dopatrzeć występowania różnic w obfitości pomiędzy poszczególnymi rozbłyskami – jedynie w wypadku potasu, można starać się dopatrzeć występowania różnic w obfitościach pomiędzy indywidualnymi rozbłyskami. Trzeba jednakże brać pod uwagę fakt, że wartości obfitości są w wypadku potasu obarczone dużą niepewnością. Jest to związane ze stosunkowo niskim natężeniem linii K w obserwowanych widmach – obfitość tego pierwiastka jest niewielka.

Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że obfitości uzyskane dla pierwiastków K oraz Ar w podejściu wielotemperaturowym (AbuOpt) są zbliżone do tych, uzyskanych wcześniej z wykorzystaniem założenia o jednakowej temperaturze plazmy w całym obszarze emisji. Wynika to z faktu, że wykorzystywane podczas analizy temperatury uzyskane z obserwacji *GOES* dobrze opisują odpowiednie temperatury dla jonów K XVIII oraz Ar XVII. W wypadku pierwiastków

многотемпературного приближения, значительно ниже соответствующих корональных содержаний и находятся на уровне величины фотосферного содержания Si. Не были обнаружены какие-либо заметные изменения содержания элементов в короне от вспышки к вспышке. Единственные изменения, которые могли бы быть замечены, связаны с калием, однако полученные для калия величины содержаний имеют большую погрешность, которая обусловлена сравнительно малой интенсивностью излучения в линии калия в наблюдаемых спектрах.

S oraz Si, wartości obfitości uzyskane w przybliżeniu wielotemperaturowym są o czynnik przybliżeniu wielotemperaturowym są o czynnik 1.8 oraz 2.1 **niższe** od odpowiednich wartości otrzymanych w przybliżeniu izotermicznym. Dla siarki są one również niższe zarówno od obfitości koronalnych jak też fotosferycznych. Dla krzemu są one znacznie niższe od wartości koronalnych i mają wartość zbliżoną do fotosferycznej obfitości Si.

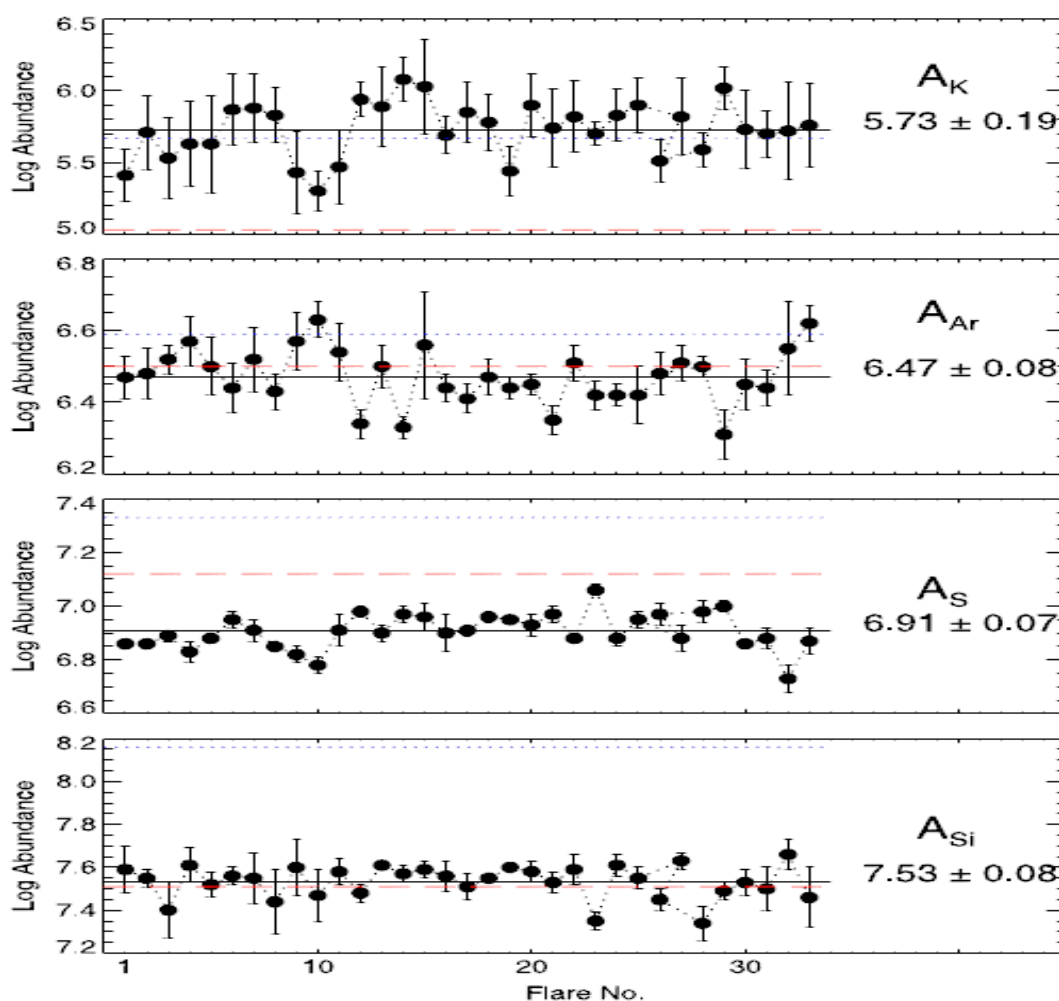


Рис.3. Усредненные по времени содержания элементов в короне по данным отдельных вспышек, а также усредненные величины содержаний элементов (черная сплошная линия) по данным всех 33 исследованных вспышек. Красные прерывистые линии соответствуют величинам "фотосферных" содержаний элементов из работы [Asplund et al., 2009] для Si, S, K, а для Ar из работы [Lodders et al., 2008]. Голубые пунктирные линии соответствуют величинам "корональных" содержаний из работы [Feldman, 1992] для Si, S, Ar, а для K из базы CHIANTI.

Rys. 3. Uśrednione po czasie wartości obfitości dla indywidualnych rozbłysków oraz wartości średnie (czarna linia ciągła) dla całego zespołu 33 analizowanych rozbłysków. Czerwone linie przerywane odpowiadają obfitościom "fotosferycznym" z pracy [10] dla Si, S, K oraz z pracy [11] dla Ar. Niebieskie linie kropkowane odpowiadają wartościom obfitości „koronalnych” z pracy [9] dla Si, S, Ar oraz z bazy CHIANTI dla K. Czarne linie poziome odpowiadają wartościom średnim dla zespołu 33 analizowanych rozbłysków.

В работе 2015 г. [Phillips et al.,2015] по анализу полученных прибором РЕСИК рентгеновских спектров представлены результаты, которые могут пролить свет на природу наблюдаемого избытка излучения в диапазоне энергии 3,5 кэВ в спектрах некоторых скоплений галактик и в Галактике Андромеды [Bulbul et al.,2014; Boyarsky et al.,2014], а также способствовать разрешению возникшего разногласия в интерпретации этого избытка. В указанных работах наблюдаемый избыток излучения в рентгеновском спектре связывают с присутствием тёмной материи в виде так называемых стерильных нейтрино <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/mysterious-x-rays-might-hint-at-dark-matter-07082014/>. Между тем, представленные в работе [Phillips et al.,2015] результаты указывают на то, что избыток излучения в спектральной области энергии 3,5 кэВ наблюдается также в спектрах солнечных вспышек по данным спектрометра РЕСИК. Для солнечных вспышек наблюдаемый избыток излучения связан с наличием многократно ионизованного калия, содержание которого в горячей вспышечной плазме значительно выше фотосферного содержания калия. Это связано с известным в астрофизике так называемым эффектом FIP (FIP - First Ionization Potential, эффект первого ионизационного потенциала).

В упомянутой работе [Phillips et al.,2015] проанализировано около 9000 спектров в области энергии 3,5 кэВ для 101 вспышки и было подтверждено, что содержание калия во вспышечной плазме значительно повышено по сравнению с фотосферным значением (на фактор ~ 10). На рис. 4 из этой работы представлены результаты по содержанию калия в солнечной короне, полученные в рамках предположения об изотермичности излучающей плазмы. В левой части рисунка 4 черными точками показаны величины потоков излучения, измеренные в спектральных линиях в диапазоне энергий 3,465–3,520 кэВ (был вычтен средний уровень континуума, определённый как уровень в двух соседних диапазонах энергии свободных от линий), разделённые на соответствующие меры

Важность энергии в которой наблюдаются линии калия ~ 3.5 keV. В аналогичном диапазоне энергии наблюдается избыток в спектрах некоторых скоплений галактик и в Галактике Андромеды [12, 13]. Авторы работ [12, 13] приписывают наблюдаемый избыток в рентгеновском спектре присутствию тёмной материи в виде стерильных нейтрино. <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/mysterious-x-rays-might-hint-at-dark-matter-07082014/> .

Тем самым результаты представленные в работе [6] указывают, что избыток излучения в окрестности энергии 3.5 keV наблюдается также в спектрах солнечных вспышек полученных с помощью польского спектрометра RESIK. Наблюдаемый избыток, в случае спектров солнечных вспышек, связан с наличием многократно ионизованного калия, содержание которого в горячей вспышечной плазме значительно выше фотосферного содержания калия. Это связано с известным в астрофизике так называемым эффектом FIP (FIP - First Ionization Potential, эффект первого ионизационного потенциала).

На Рис. 4 з работы [6] видно, что большинство точек наблюдений лежит значительно выше теоретической (даже в 10 раз), что означает, что наблюдаемый избыток указывает на **значительно** **высшую** **ниж** **фотосферную** обитость калия в короне. Соответствующая обитость в солнечных вспышках $\log A(K) = 6.06 \pm 0.34$.

эмиссии, определенные по наблюдениям спутника *GOES*. Красная сплошная линия соответствует теоретической зависимости (теоретические потоки в линиях w, x, y а также в линии z для иона $K XVIII$), полученной на основе модели CHIANTI (в фотонах/см²/с) для единичной меры эмиссии, равной 10^{48} см⁻³ и для фотосферного содержания калия из работы [Asplund et al., 2009].

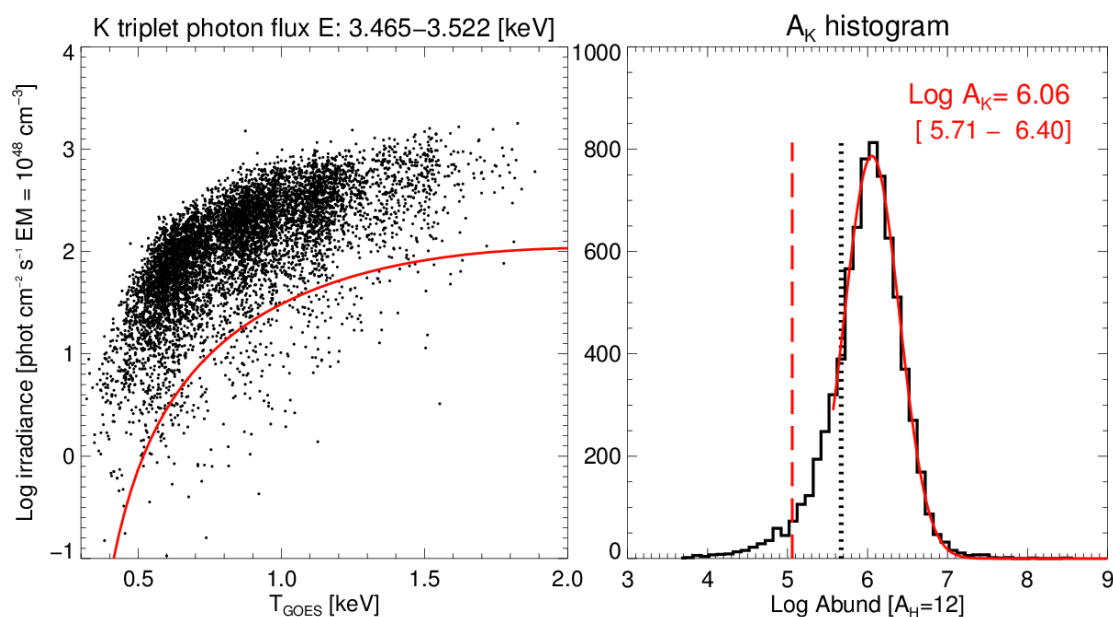


Рис.4. *Левая панель:* Потоки излучения (фот/см²/сек), наблюдаемые в диапазоне энергий 3,465-3,520 кэВ (с учтенным вкладом среднего уровня континуума и разделенные на меру эмиссии, определенную из наблюдений *GOES*). На рисунке черными точками показаны величины потоков излучения для наиболее сильных 7439 спектров (из всех ~9000 проанализированных). Красная сплошная линия соответствует зависимости теоретического потока излучения (линии w, x, y , а также линия z иона $K XVIII$ в том же самом энергетическом диапазоне), вычисленного с помощью пакета CHIANTI для единичной меры эмиссии 10^{48} см⁻³ и общепринятого фотосферного содержания калия

Правая панель: Гистограмма, полученная на основе наблюдаемых потоков излучения, которая позволяет определить величину содержания калия в солнечной короне. Наилучшему совпадению наблюдений (черная кривая) с функцией Гаусса (красная сплошная линия) соответствует содержание калия в солнечной короне $\log A(K) = 6.06 \pm 0.34$. Вертикальные линии соответствуют фотосферному содержанию калия из работы [Asplund et al., 2009] (красная прерывистая линия) и корональному содержанию, взятому из модели CHIANTI [Feldman, 1992] (черный пунктир).

Рис. 4: Po lewej: Znormalizowane strumienie [fotony/cm²/s; EM= 10^{48} cm⁻³] obserwowane w przedziale energii 3.465–3.520 keV (z odjętym wkładem od średniego poziomu kontinuum i podzielone przez miarę emisji wyznaczoną z obserwacji *GOES*). Na rysunku czarnymi kropkami przedstawiono wyniki dla najsilniejszych 7439 widm (spośród ~9000 analizowanych). Czerwona linia ciągła reprezentuje przebieg strumienia teoretycznego (wkład dają linie w, x, y , oraz z jonu $K XVIII$) policzony z wykorzystaniem kodu CHIANTI, również przyjmując miarę emisji 10^{48} cm⁻³. W wyliczeniach założono fotsferyczną obfitość potasu [10]. **Po prawej:** Histogram rozkładu mierzonych obfitości (odległości punktów od krzywej teoretycznej) wraz z naniesionym (czerwona linia ciągła) najlepiej dopasowanym profilem Gaussa. Wyniki dopasowania wskazują, że koronalna obfitość potasu $\log A(K) = 6.06 \pm 0.34$. Pionowe linie zaznaczają referencyjne wartości obfitości fotsferycznej potasu z pracy [Asplund et al., 2009], (linia czerwona, przerywana) oraz koronalnej z pliku CHIANTI “coronal_extended”, [Feldman, 1992], (linia czarna kropkowana).

На рис. 4 видно, что большинство точек, соответствующих наблюдениям находится значительно выше теоретической кривой (фактор ~10); это связано с тем, что содержание калия в солнечной короне, определяющее величины наблюдаемых потоков излучения, значительно выше фотосферного содержания,

Wcześniej, w pracy [5] anonsowaliśmy również podwyższoną obfitość potasu w innej niż Słońce gwiazdzie aktywnej (σ Gem). W pracy tej porównywano widma uzyskane za pomocą spektrometru RESIK dla wybranego rozbłysku (SOL2002-12-26T08:30) z widmami o podobnej rozdzielczości widmowej uzyskanymi za pomocą

принятого в теоретических расчетах.

В правой части рис. 4 представлена гистограмма, соответствующая наблюдаемым потокам излучения с наилучшим теоретическим соответствием функции Гаусса, что позволяет определить среднюю величину содержания калия в плазме солнечной короны на основе выполненных наблюдений - $\log A(K) = 6,06 \pm 0,34$.

На повышение содержания калия на другой активной звезде (двойной σ Gem) мы указывали ранее в работе [Huenemoerder et al., 2013], в которой было проведено сравнение спектров, полученных с помощью РЕСИК для одной отдельной солнечной вспышки (SOL2002-12-26T08:30), со спектрами с близким спектральным разрешением, полученными спектрометром HETG на обсерватории *Chandra* для двух звезд: σ Gem и HR 1099. В этой работе на основе наблюдаемых спектров были также исследованы и сравнены распределения плазмы с разными температурами.

Авторы работ [Vulbul et al., 2014; Boyarsky et al., 2014] в которых сообщалось о несоответствии наблюдений и теории, исходили из фотосферных значений содержания калия для Солнца и пришли к заключению что наблюдаемое в спектрах XMM-Newton излучение в линиях невозможно объяснить атомными переходами, соответствующими энергии 3,5 кэВ в ионах калия. К сожалению, они в своих рассуждениях не приняли во внимание возможности и последствия повышенного содержания калия, как это следует из наблюдений солнечных вспышек и звезды σ Gem. Результаты работы [Huenemoerder et al., 2013] показывают, что эффект FIP представляет собой значительно более универсальное явление, чем это принималось до сих пор, а также что вывод об объяснении наблюдаемого избытка излучения в спектре в окрестности энергии 3.5 кэВ за счет стерильных нейтрино является, по крайней мере, преждевременным.

Резюмируя результаты опубликованных нами в течение 2011-2015 гг. работ в области интерпретации рентгеновских спектров, полученных спектрометром РЕСИК,

спектрометру HETG з обсерватории Chandra. Porównanie prowadzono dla gwiazd: σ Gem oraz HR 1099. Oprócz problemu wyznaczania obfitości w pracy [5] zbadano również i porównano rozkłady plazmy z temperaturą (czyli DEM) uzyskane na podstawie analizy widm tych gwiazd i rozbłysków).

Autorzy kontrowersyjnej interpretacji nadwyżki widmowej [12, 13] zakładali w swoich pracach fotosferyczną obfitość słoneczną potasu. Doszli do wniosku, że obserwowanej w widmach XMM-Newton linii nie można wyjaśnić przejściem odpowiadającym energii 3.5 keV w jonach potasu. Niestety, w swoich rozważaniach nie uwzględnili oni możliwości oraz konsekwencji podwyższonej obfitości potasu w plazmie kosmicznej, jak to ma miejsce w przypadku rozbłysków słonecznych oraz gwiazdy σ Gem.

Wyniki naszej pracy [6] wykazują, że efekt FIP jest zjawiskiem znacznie bardziej uniwersalnym niż dotychczas uważano oraz że przypisywanie sterylnym neutronom obecności nadwyżki widmowej w okolicy energii 3.5 keV jest co najmniej przedwczesne.

Podsumowując, w latach 2011-2015 wspólne prace dotyczące interpretacji widm otrzymanych za pomocą przyrządu RESIK poświęcone były wyznaczaniu obfitości pierwiastków (K, Ar, Cl, S oraz Si) z obserwacji widm rentgenowskich zakresu 3.4 Å - 6.1 Å. W ich wyniku ustalono wartości rozblyskowe obfitości pierwiastków dających podstawowy wkład do formowania się widm z obserwowanego zakresu. Przykład tego typu analizy przedstawiono dla dwóch zjawisk w pracy [8].

Posiłkując się dodatkowymi obserwacjami np. obrazami rentgenowskimi jąder rozblyskowych rekonstruowanych na podstawie obserwacji z satelity *RHESSI*, oszacowano rozmiary gorących jąder rozblyskowych, w których formują się widma. Porównanie wielkości miary emisji jąder z ich objętością, umożliwiło oszacowanie jej gęstości

необходимо отметить, что они главным образом i zawartości energii termicznej [7].

относились к определению содержания в солнечной короне различных элементов (K, Ar, Cl, S, Si), излучающих спектральные линии в наблюдаемом интервале длин волн 3,4-6,1 Å.

Полученные результаты могут быть использованы также для анализа распределения дифференциальной меры эмиссии излучающей корональной плазмы по температурам, и изменения ее во времени для отдельных вспышек. Пример такого анализа для двух событий представлен в работе [Sylwester et al., 2015]. Использование дополнительной информации, например, рентгеновских снимков вспышек, полученных телескопом спутника *RHESSI*, позволит оценить размеры источника излучения. Это в свою очередь дает оценку плотности плазмы и её тепловой энергии [Sylwester et al., 2014]. Пока такой анализ был сделан только для нескольких отдельных вспышек. Такая работа планируется для всех 33 вспышек, для которых в работе [Sylwester et al., 2015] было изучено содержание элементов в солнечной короне.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- Sylwester, J., Gaicki, I., Kordylewski, et al. RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition//Solar Physics, 2005. V226, P.45.
- Sylwester, B., Phillips, K.J.H., Sylwester, J., Kuznetsov, V.D. The solar flare chlorine abundance from RESIK X-ray spectra//Astrophys. J. 2011. V.738. P.49
- Sylwester, J., Sylwester, B., Phillips, K.J.H., Kuznetsov, V.D. The solar flare sulphur abundance from RESIK observations//Astrophys. J. 2012. V.751.P.103
- Sylwester, B., Phillips, K.J.H., Sylwester, J., Kepa, A. Silicon Abundance from RESIK Solar Flare Observations//Solar Physics. 2013. V. 283. P. 453.
- Huenemoerder, D.P., Phillips, K.J.H., Sylwester, J., Sylwester, B. Stellar Coronae, Solar Flares: a Detailed Comparison of σ Gem, HR 1099, and the Sun in High-resolution X-rays//Astrophys. J. 2013. V.768.No 135. P.15.
- Phillips, K.J.H., Sylwester, B., Sylwester, J. The X-ray Line Feature at 3.5 keV in Galaxy Cluster Spectra// Astrophys. J. 2015.V. 809.No 50.
- Sylwester, B., Sylwester, J., Phillips, K.J.H., Kepa, A., Mrozek, T. Solar Flare Composition and Thermodynamics from RESIK X-ray Spectra. Astrophys. J.// 2014.V.787.P.122.
- Sylwester, B., Phillips, K.J.H., Sylwester, J., Kepa, A. RESIK solar X-ray flare element abundances on non-isothermal assumption//Astrophys. J. 2015. V.805.P. 49.
- Feldman, U. Elemental abundances in the upper solar atmosphere//Physica Scripta. 1992.V. 46 P. 202.
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A.J., & Scott, P. The Chemical Composition of the Sun//Annual review of Astronomy and Astrophysics. 2009. V. 47. P. 481.
- Lodders, K. The Solar Argon Abundance.// Astrophys. J. 2008. V.674. P. 607.

- Bulbul, E., Markevitch, M., Foster, A., et al. Detection of an Unidentified Emission Line in the Stacked X-ray Spectrum of Galaxy Clusters, // *Astrophys. J.* 2014. V.789. P.13.
- Boyarsky, A., Ruchayskiy, O., Iakubovskiy, D., & Franse, J. An Unidentified Line in X-ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster // *Physical Review Letters*. 2014. V. 113. P.251301.

The main scientific objectives for the X-ray spectrometer RESIK are presented. RESIK made extensive observations of the X-ray spectra of the solar corona onboard the Koronas-F satellite. The measured spectra cover the wavelength region between 3.3 Å and 6.1 Å. This spectral region is rich with the emission lines of elements such as: K, Ar, S, Si and Cl. Analysis of relative and absolute intensities of these lines are important for the coronal plasma diagnostic. The analysis of more than 3000 flare spectra obtained has been performed. As the results, the absolute abundances of elements: K, Ar, S, Si and their time variations have been determined for 20 flare events. The theoretical, atomic physics calculations of the continuum level have been verified from the available measurements. The distribution of plasma with temperature (so called differential emission measure) have been determined for various phases of the event evolution.