

**ХЕМИКС - РЕНТГЕНОВСКИЙ
СПЕКТРОМЕТР БРЭГГА ДЛЯ
СОЛНЕЧНО-ГЕЛИОСФЕРНОЙ МИССИИ
"ИНТЕРГЕЛИОЗОНД"**

Авторы проекта с российской стороны:

**В. Кузнецов (ИЗМИРАН)
С. Кузин (ФИАН)**

Авторы проекта с польской стороны:

**М. Сялковски, Я. Сильвестер, Я. Бонкала,
Ж. Шафощ, З. Кордылевски (ЦКИ ПАН)**

Миссия "Интергелизонд" (ИГЗ) Российского космического агентства направлена на изучение внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений [Kuznetsov et al., 2014]. Два космических аппарата (КА), запуск которых планируется после 2025 года, будут располагаться на наклонных к плоскости эклиптики гелиоцентрических орбитах, формируемых за счет многократных гравитационных маневров у Венеры. В состав научной аппаратуры космического аппарата (КА) включается изготавливаемый совместно польскими и российскими учеными брэгговский спектрометр ХЕМИКС (CHEMIX - CHEMIcal composition in X-Rays). Анализ рентгеновских спектров, которые будут получаться с использованием этого спектрометра, даст возможность определять химический состав горячих структур короны Солнца, вспышечной плазмы и активных областей (АО). Прибор находится в стадии разработки, которая возглавляется Вроцлавской лабораторией физики Солнца (ЛФС) Центра космических исследований Польской Академией Наук. В работах принимают участие представители институтов России (ИЗМИРАН, ИКИ РАН, ФИАН) и Украины (НАНУ). Ниже будут описаны основные научные задачи прибора ХЕМИКС и детали его конструкции.

Основные научные задачи проекта ИГЗ состоят в исследовании приполярных областей Солнца, тонкой структуры солнечной атмосферы, динамических процессов в атмосфере Солнца, в изучении процессов нагрева солнечной короны, ускорения солнечного ветра и, что очень важно, измерения „in situ” свойства плазмы

**CHEMIX: RENTGENOWSKI
SPEKTROMETR BRAGGA NA
MIĘDZYPLANETARNĄ MISJĘ
INTERHELIOPROBE.**

Авторы проекта ze strony Rosji:

**V. Kuznetsov (IZMIRAN)
S. Kuzin (FIAN)**

Авторы проекта ze strony Polski:

**M. Siarkowski, J. Sylwester, J. Bąkała,
Ż. Szaforz, Z. Kordylewski (CBK PAN)**

Interhelioprobe (IHP) to rosyjska międzyplanetarna misja, której obiekty będą zbliżać się do Słońca na odległość ok. 60 promieni słonecznych [Kuznetsov et al., 2014]. Misja ta prowadzona jest przez Rosyjską Agencję Kosmiczną ROSKOSMOS. Będą brały w niej udział dwie sondy kosmiczne, których start przewidywany jest na lata po 2025. Dzięki zastosowaniu dwóch obiektów możliwe będzie prowadzenie stereoskopowych obserwacji indywidualnych struktur w atmosferze słonecznej, w szczególności w koronie. W skład aparatury naukowej obu sond wejdzie, przygotowany we współpracy polsko-rosyjskiej, Braggowski spektrometr ChemiX. Analiza widm rentgenowskich otrzymanych za pomocą tego spektrometru umożliwi wyznaczenie składu chemicznego gorących struktur korony takich jak rozbłyski i obszary aktywne (AR). ChemiX znajduje się w projektowaniu, w tzw. fazie B. Współpraca obejmuje wrocławski Zakład Fizyki Słońca, wchodzący w skład Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk oraz instytuty z Rosji (IZMIRAN, IKI, FIAN) i Ukrainy (Instytut Radioastronomii NANU). Niniejsza praca przedstawia zadania naukowe przyrządu ChemiX, zawiera zwięzły opis instrumentu oraz opis stopnia zaawansowania prac projektowych.

Obie okołosłoneczne sondy *IHP*, podobnie jak ich europejski odpowiedniki *Solar Orbiter*, zbliżą się do naszej dziennej gwiazdy na odległość około 0.3 j.a. Tak znaczne zbliżenie do Słońca będzie możliwe dzięki serii tzw. manewrów

гелиосферы. Космические аппараты приблизятся к Солнцу на расстояние в 65-70 солнечных радиусов, наклонение орбит к плоскости эклиптики достигнет 30°.

Солнечная спектроскопия мягкого рентгеновского диапазона бурно развивалась в 80-х годах XX века на основе наблюдений со спутников на околоземных орбитах. Большой вклад был внесен советскими экспериментами, выполненными под руководством проф. Мандельштама и Житника [Grineva et al.,1973] по программе ИНТЕРКОСМОС. Основную роль для развития знаний по физике процессов энерговыделения во вспышках сыграли исследования проведенные с помощью аппаратуры размещенной на борту спутников P78-1 (США, приборы SOLEX, SOLFLEX) [Doschek et al.,1979], HINOTORI (JAXA) [Tanaka et al.,1982], SMM (NASA, прибор XRP: BCS & FCS [Acton et al.,1980]) и Yohkoh, (JAXA, прибор BCS [Culhane et al.,1991]). Эти приборы характеризовались довольно большим спектральным разрешением, однако их общим недостатком было отсутствие системы абсолютной калибровки сдвигов спектральных линий из-за того, что невозможно было определять физическую причину часто наблюдаемых смещений линии, так как сдвиг из-за эффекта Доплера нельзя было отличить от сдвига из-за перемещения источника в плоскости наблюдений. Несмотря на эти недостатки, выполненные до настоящего времени интерпретации рентгеновских спектров, полученных за последние 50 лет с помощью вышеупомянутых инструментов, дали целый ряд основных достижений в области физики горячей плазмы вспышек. Наблюдались эмиссионные спектры H-, He- и Ne-подобных ионов наиболее обильных элементов, так называемых "металлов": Fe, Ca, Ar, S, Si, Mg, Ne, Na, и O. Полученных во время вспышек спектры излучения позволили установить:

- наличие значительного уширения линии в начальной импульсной фазе вспышек, которая

гравитационных вблизи Земли и Венус. По ок. 1,5 року од startu sondy znajdą się w peryhelium, gdzie będą one „unosily się” ponad indywidualnym obszarem fotosfery (tzw. korotacja). Pozwoli to na obserwacje wybranych fragmentów atmosfery Słońca przez wiele dni z rzędu. Kolejne manewry grawitacyjne (co ok. pół roku) będą wykorzystywane do stopniowego zwiększania nachylenia płaszczyzny orbity sond w stosunku do płaszczyzny ekliptyki. Pod koniec misji nachylenie to osiągnie wartość ok. 30°, co pozwoli na wygodne prowadzenie obserwacji obszarów okołobiegunowych Słońca (w znacznym stopniu zredukowany będzie efekt perspektywy zakłócający lub uniemożliwiający prowadzenie obserwacji tych obszarów z płaszczyzny ekliptyki).

Do głównych celów naukowych misji *IHP* należy kontynuacja badań procesów związanych z dynamiką zjawisk zachodzących w atmosferze Słońca, w tym prowadzenie obserwacji struktur koronalnych z dużą rozdzielczością przestrzenną, diagnostyka procesów wydzielania energii (przyspieszanie cząstek i grzanie) korony słonecznej, badanie przyspieszania wiatru słonecznego, a także prowadzenie pomiarów *in situ* własności fizycznych plazmy heliosferycznej.

Sondy *IHP*, konstruowane w Rosji przez kompanię „Lavochkin Research and Production Association”, będą posiadały 3-osiową stabilizację przestrzenną, umożliwiającą nakierowanie obiektów na centrum tarczy Słońca z precyzją 1 minuty łuku. Dryfy (tempo zmian) osi nakierowania nie przekroczą 1 sekundy łuku/sek w każdym z kierunków. Maksymalna prędkość przesyłania na Ziemię danych telemetrycznych wynosić będzie 1GB/24h. W początkowej fazie lotu sondy wykorzystywać będą (do korekty orbity) silniki plazmowe, co znacznie skróci czas potrzebny do osiągnięcia perihelium, w porównaniu do podobnego czasu dla misji *Solar Orbiter* (której start jest zaplanowany na październik 2018 r). Szacowany czas trwania misji *IHP* to minimum 5 lat. Obie sondy *IHP* będą zawierały identyczny zestaw ok. 20 instrumentów naukowych, o łącznej wadze

сопровождалась жестким рентгеновским излучением ($E > 20$ кэВ) [Antonucci et al., 1989];

- наличие коротковолновой составляющей профилей линии, связанной с процессами испарения хромосферы в начальной стадии вспышек (в одном случае); для вспышки балла X5.3, самой мощной, которая наблюдалась спектрометрами мягкого рентгена, зарегистрировано доплеровское смещение всей эмиссионной линии [Plocieniak et al., 2002];
- зависимость относительной интенсивности линий $K\alpha$ и $K\beta$, возбуждаемых на уровне фотосферы вследствие флуоресценции, от расстояния вспышки от центра диска Солнца [Parmar et al., 1984];
- наличие многотемпературной структуры источника излучения (на основе измерения относительных интенсивностей линий, формирующихся при разных температурах) [Sylwester et al., 2015];
- отличие распределения электронов в источнике от максвелловского [Dudík et al., 2014];
- отличие химического состава короны от фотосферного (природа физического механизма этого эффекта остается пока не вполне известной); присутствие эффекта FIP - Первого потенциала ионизации [Laming et al., 2015].

В 2005 году Лаборатория физики Солнца Центра космических исследований ПАН получила возможность участия в проекте ИГЗ, что связано с успешной работой Брэгговского спектрометра RESIK [Sylwester et al., 2015] на борту спутниковой обсерватории КОРОНАС-Ф. В связи с этим в последние время совместными силами проводилась разработка спектрометра нового поколения ХЕМИКС.

Наблюдения структур короны с близкого расстояния дают возможность значительного увеличения углового разрешения, в ~ 4 раза лучше, чем с расстояния Земли, а также увеличения потоков излучения в квадрате, т.е. в ~ 16 раз, что позволит значительного уменьшить размеры и вес спектрометра с одновременным

около 150 kg. Schematyczny wygląd satelity przedstawiono na rysunku 1.

W założeniach misja IHP umożliwi:

- Rejestrację obrazów powierzchni Słońca i korony słonecznej z niewielkiej odległości ($\sim 60 R_{s1}$) w różnych długościach fali (od światła widzialnego przez UV i zakres rentgenowski, aż do zakresu gamma);
- Obserwacje z poza płaszczyzny ekliptyki, tj. obserwacje słonecznych obszarów okołobiegunowych i fragmentów tarczy Słońca niewidocznych z Ziemi;
- Pomiarы *in situ* parametrów fizycznych plazmy wewnętrznej heliosfery w bezpośrednim otoczeniu satelity.

W skład aparatury naukowej obu sond wejdzie konstruowany wspólnie przyrząd ChemiX. ChemiX to spektrometr rentgenowski Bragga. Burzliwy rozwój spektroskopii słonecznej w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego przypadł na lata 80'te XX wieku. Wysłano wtedy na orbity wokół Ziemi szereg satelitów i obserwatoriów słonecznych. Eksperymenty te podążały drogą wyznaczoną pionierskimi pomiarami przeprowadzonymi przez grupę prof. prof. Mandelsztama i Żytnika [Grineva et al., 1973] w ramach programu INTERKOSMOS. Podstawową rolę prowadzącą do rozwoju wiedzy o naturze fizycznej procesów wydzielania energii w rozbłyskach słonecznych odegrały badania przeprowadzone przy pomocy aparatury umieszczonej na pokładach satelitów: *P78-1* (USA, przyrządy SOLEX i SOLFLEX) [3], *Hinotori* (JAXA) [4], *SMM* (NASA, przyrząd XRP: BCS & FCS [5]) i *Yohkoch* (JAXA, przyrząd BCS) [6]. Przyrządy te charakteryzowały się dość dużą rozdzielczością widmową, jednak ich wspólną wadą był brak absolutnej kalibracji położenia i przesunięcia emisyjnych linii widmowych. Nie pozwalało to na określenie przyczyny fizycznej często obserwowanych zmian położenia linii w związku z tym, że nie można było odróżnić przesunięć dopplerowskich tych linii od przesunięć wywołanych ruchem źródła w płaszczyźnie obserwacji. Pomimo tej wady, interpretacja widm rentgenowskich rozbłysków, uzyskanych przy

увеличением отношения сигнала к фону (по сравнению с условиями на расстоянии в 1 а.е.). Прибор ХЕМИКС должен работать на протяжении примерно 10 лет на межпланетарной околосолнечной орбите, на расстояниях от Солнца в $0,3 \div 0,7$ а.е.

Конструкция прибора ХЕМИКС представляет собой усовершенствованный вариант спектрометра, который включает достоинства всех предыдущих инструментов подобного типа. Использование изогнутых кристаллов в сочетании с ПЗС-матрицами в качестве детекторов обеспечивает одновременную регистрацию спектров во всех каналах и на всех длинах волн внутри отдельных каналов. Это, в свою очередь, дает возможность следить за быстрыми изменениями спектров, с характерным временем порядка секунд. В спектральном диапазоне $1,5-9 \text{ \AA}$ будут наблюдаться непрерывный спектр и все линии, общее число которых несколько сотен. Они формируются при температурах от 1,5 МК и выше (до 100 МК). Таким образом, возможно определение не только температурной структуры ядер эмиссии, но и химического состава плазмы для таких элементов как: Ne, Mg, Al, Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Fe и Ni. Дисперсионные элементы (вафли монокристаллов) подобраны таким образом, чтобы флуоресценция от материала кристалла не попадала в область регистрации спектра в данной секции. Это значительно понижает уровень инструментального шума и повышает отношение сигнала к шуму для непрерывного спектра. Все 10 секций спектрометра снабжены коллиматорами, которые ограничивают поле зрения в обоих направлениях до 3 мин дуги, что заметно устраняет эффект перекрывания спектров от разных источников, присутствующих одновременно в короне. Используемые ПЗС-матрицы охлаждаются до температур ниже -20° C , что заметно уменьшает уровень шума в системах первичного усилителя.

Космический аппарат "Интергелизонд" разрабатывается НПО им. С.А.Лавочкина. КА будет ориентирован на Солнце (трехосная

помocy wyżej wymienionych instrumentów w okresie ubiegłych 50 lat, pozwoliła uzyskać sporo nowych i cennych informacji, szczególnie dotyczących warunków formowania się widm w jonach H-, He- i Ne-podobnych najbardziej obfitych pierwiastków słonecznych takich jak: Fe, Ca, Ar, S, Si, Mg, Ne, Na, i O. Do najczęściej wymienianych i najważniejszych osiągnięć zaliczamy:

- Detekcję znacznego poszerzenia turbulентnej linii we wczesnej, impulsowej fazie rozbłysków, której towarzyszy emisja rentgenowska w twardym ($E > 20 \text{ keV}$) zakresie widma [7];

- Stwierdzenie obecności, w początkowej, impulsywnej fazie rozbłysków, składowych widmowych linii przesuniętych w stronę krótszych długości fali w stosunku do linii głównej (tzw. blue-shifted components). Przynajmniej w jednym wypadku (silnego rozbłysku klasy rentgenowskiej X5.3) zarejestrowane zostało przesunięcie dopplerowskie całej linii [8];

- Odkrycie, że linie emisyjne $K\alpha$ i $K\beta$ powstają głównie w wyniku fluorescencji materii fotosferycznej poprzez stwierdzenie, że względne natężenia tych linii wykazują zmienność z odległością od środka tarczy słonecznej [9];

- Stwierdzenie, poprzez analizę względnych natężeń linii, że plazma w rozbłyskach i obszarach aktywnych znajduje się jednocześnie w wielu temperaturach [10];

- Wykrycie występowania tzw. „niemaxwellowskich” rozkładów elektronów w plazmie rozbłyskowej [11];

- Precyzyjny pomiar składu chemicznego plazmy koronalnej w rozbłyskach słonecznych i obszarach aktywnych i potwierdzenie występowania różnic pomiędzy składem chemicznym struktur fotosfery i korony, związanego z obecnością tzw. efektu FIP (zależności od wartości pierwszego potencjału jonizacji) [12]. Określenie składu chemicznego korony jest niezbędne w badaniach procesu rozdzielania obfitości pierwiastków w plazmie, obliczeniach całkowitego strumienia

ориентация) с точностью ± 1 минуты дуги. Скорости вращения по всем осям не будут превышать значения 1 сек дуги/с. Максимальная скорость передачи информации на Землю составит 1 Гб/сутки в случае радиопрозрачности короны и отсутствия помех. В начальной стадии миссии, для корректировок орбиты, будут использоваться ионные плазменные двигатели. Благодаря этому время подлёта к Солнцу значительно уменьшится по сравнению с временем долёта КА Solar Orbiter (запуск октябрь 2018). Время полной работоспособности КА ИГЗ составит не менее 5 лет. Оба КА будут снабжены научной аппаратурой весом в 150 кг (20 научных инструментов). Схема КА представлена на рис.1.

Наблюдения, проводимые с использованием комплекта научной аппаратуры, дадут возможность:

- регистрации изображений поверхности и короны Солнца с расстояния 65-70 солнечных радиусов в широком диапазоне спектра (от видимой его части, до УФ- и гамма - диапазона);
- исследования из мало изученных внеэклиптических областей полярных районов Солнца;
- измерения „in situ” физических свойств плазмы в непосредственной близости от Солнца и во внеэллиптических областях гелиосферы.

Прибор ХЕМИКС будет в основном измерять спектры вспышек и активных областей короны с очень высоким спектральным, угловым и временным разрешением, что даст возможность исследовать динамику горячей плазмы и свойства турбулентной плазмы в разных фазах развития вспышек. Эти измерения будут вносить вклад в решение основных научных задач проекта в области исследований высокоэнергетических проявлений активности Солнца, их связи с выбросами корональной массы, т.е. тех явлений, которые определяют состояние космической погоды в

promieniowania emitowanego przez gorącą plazmę i stanowi podstawę prawidłowych interpretacji danych helio-sejsmologicznych.

Około roku 2005, krótko po przeprowadzeniu zakończonego sukcesem eksperymentu RESIK [13], za pomocą którego prowadzono obserwacje korony słonecznej z pokładu satelity *CORONAS-F*, przystąpiono do prac nad nowym spektrometrem Bragga - przyrządem ChemiX. Prace podjęto w związku z tym, że Zakład Fizyki Słońca - wrocławski oddział Centrum Badań Kosmicznych PAN otrzymał propozycję uczestniczenia nieodpłatnie w obu rosyjskich misjach *IHP*. W przypadku instrumentu umieszczonego na niskiej orbicie okołozemskiej, tak jak to miało miejsce w przypadku instrumentu RESIK, uzyskanie wystarczająco silnych strumieni widmowych w spektrometrze Bragga wymaga użycia dość dużych kryształów, o rozmiarach ok. 20 cm x 5 cm. Ich koszt jest ogromny, dużo powyżej możliwości sfinansowania w Polsce. Budowa tak drogiego instrumentu nie uzyskałaby akceptacji. Jednak wykorzystanie przedstawionej przez stronę rosyjską możliwości uczestnictwa w projekcie *Interhelioprobe* stworzyło szansę, gdyż zmniejsza koszt przygotowania takiego instrumentu o rząd wielkości, w związku ze zmniejszeniem rozmiarów kryształów i detektorów. Mając to na uwadze, pracownicy ZFS przygotowali wniosek o dofinansowanie instrumentu ChemiX, który otrzymał wsparcie z Narodowego Centrum Nauki Rzeczypospolitej Polskiej (NCN). Dedykowane fundusze NCN dały możliwość przeprowadzenia fazy „B” projektowania instrumentu.

Według naszej wiedzy ChemiX będzie jedynym spektrometrem słonecznym przeznaczonym do obserwacji miękkiego promieniowania rentgenowskiego na przełomie 25/26 cyklu Aktywności Słonecznej.

Opracowana obecnie w ZFS CBK, konstrukcja przyrządu ChemiX czerpie z najlepszych doświadczeń zebranych w trakcie obserwacji prowadzonych za pomocą wcześniejszych spektrometrów tego typu.

околоземном космическом пространстве. Одна из главных задач прибора ХЕМИКС - определение химического состава плазмы рентгеновской короны с точностью не хуже той, которая присуща измерениям с поверхности Земли в видимой области спектра.

После успешного выполнения миссии КОРОНАС-Ф, на борту которой находился прибор RESIK, во Вроцлавской лаборатории ЦКИ началась разработка аналогичного рентгеновского спектрометра нового поколения с использованием ПЗС-матрицы в качестве детектора. В случае наблюдения таким прибором на околоземной орбите, для получения нужных потоки освещения надо было бы использовать кристаллы и детекторы размерами ~ 20 x 5 см, высокая стоимость которых не могла быть обеспечена финансированием в Польше. Однако, используя предложенную российской стороной возможность участия в проекте "Интергелиозонд", в рамках которого наблюдения Солнца будут проводиться с близких расстояний, стоимость разработки такого инструмента падает на порядок в связи с уменьшением размеров кристаллов и детекторов. И специалистами ЛФС подготовили было подготовлено грантовое предложение по прибору ХЕМИКС, которое получило поддержку Народного центра по науке Республики Польши (NCN) и выделенные NCN средства дали возможность проведения фазы „Б” работ по этому проекту.

Wykorzystanie cylindrycznie wypukłych kryształów wraz z detektorami (po raz pierwszy matrycami CCD) zapewni jednoczesną rejestrację widm we wszystkich kanałach widmowych oraz wszystkich długościach fali wewnątrz oddzielnych kanałów. Obserwowane będą zarówno linie emisyjne jak i widmo ciągłe w zakresie długości fal 1,5 Å – 9 Å. Widma w tym zakresie formują się w plazmie o temperaturach powyżej 1,5 MK (aż do kilkudziesięciu milionów Kelwinów). Interpretacja obserwacji wykonanych za pomocą przyrządu ChemiX umożliwi nie tylko określenie struktury temperaturowej emitującej plazmy, lecz także pozwoli na precyzyjne pomiary jej składu chemicznego obejmując takie pierwiastki jak: Ne, Mg, Al, Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Fe i Ni. W przyrządzie zastosowano elementy dyspersyjne w postaci wygiętych cylindrycznie waflów mono-kryształicznych. Materiały z których wykonane są wafle dobrano w taki sposób, aby ich własna fluorescencja wywołana oświetleniem poprzez promieniowanie rentgenowskie Słońca nie przypadła w zakresie energii mierzonych widm. Dzięki temu poziom tzw. szumów tła uda się wyeliminować, co doprowadzi do poprawy stosunku sygnału do szumu, ważnego w szczególności przy wyznaczaniu poziomu widma ciągłego. Każdy z 10 torów pomiarowych spektrometru, czyli układów widmowych, wyposażony będzie w kolimator, którego zadaniem będzie ograniczenie pola widzenia spektrometru do 3 minut łuku w każdym z kierunków. Zastosowanie kolimatorów ma na celu eliminację (ograniczenie) efektu nakładania widm formujących się w niezależnych źródłach obecnych jednocześnie w koronie. Wykorzystywane do rejestracji widm detektory CCD chłodzone będą do temperatury ok. -20°C (i poniżej), co pozwoli dodatkowo zmniejszyć poziom szumów elektroniki.

Przyrząd ChemiX będzie obserwował widma rozbłysków i obszarów aktywnych korony z niespotykaną rozdzielczością spektralną, kątową i czasową, co pozwoli na śledzenie dynamiki gorącej plazmy i określanie właściwości gorącej

plazmy turbulentnej w poszczególnych fazach rozwoju rozbłysków. Pomiarów te w istotny sposób uzupełnią wypełnianie głównych celów naukowych misji *IHZ* w części dotyczącej badania przejawów aktywności słonecznej w zakresie wysokich energii i analizy ich związku z wyrzutami materii koronalnej (CME), czyli zjawiskami które określają stan pogody kosmicznej w bezpośrednim otoczeniu Ziemi. Jednak zasadniczym celem przyrządu ChemiX jest wyznaczenie składu chemicznego rentgenowskich źródeł w koronie z dokładnością nie gorszą niż ta, mierzona z powierzchni Ziemi w widzialnej części widma.

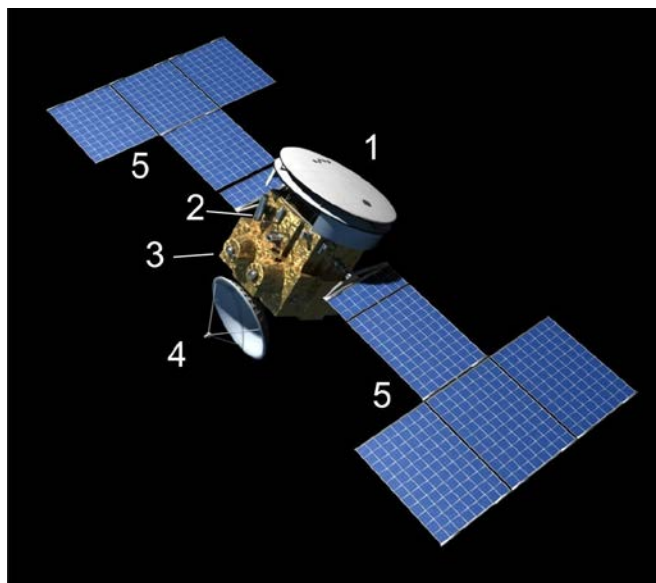


Рис. 1. Схематический вид КА Интергелиозонд и его основные системы: 1- защитный экран, 2 - платформа с комплексом научной аппаратуры, 3 - двигательная установка, 4-антенна, 5 - солнечные панели . Размеры КА 3.7 × 4.5 × 3.7 м.

Rys. 1. Schematyczna wizja satelity Interhelioprobe z opisem głównych podzespołów. Rozmiar satelity wynosi 3.7 x 4.5 x 3.7 m.

Общая схема прибора ХЕМИКС представлена на рис. 2 и 3. На рис. 2 указано положение измерительного блока (measurement block - MB) в системе космического аппарата (КА). Блок MB с (описанными далее) системами спектрального атласа (SA), доплерометра, пинхол-камеры (камера обскура) и соответствующими приводами размещается в тени системы тепловых и рентгеновских фильтров, встроенных в тепловую защиту КА.

Ogólny schemat przyrządu ChemiX pokazany został na rysunkach 2 i 3. Na rysunku 2 uwidoczniło położenie bloku pomiarowego (measurement block - MB) na pokładzie sondy. Blok ten wraz z opisanymi dalej systemami spektrometru, dopplerometru, kamery otworkowej i ich oprzyrządowania, znajduje się w cieniu zestawu filtrów ultrafioletowych i termicznych (thermal and ultraviolet filters - TUVF) wbudowanych w osłonę termiczną sondy.

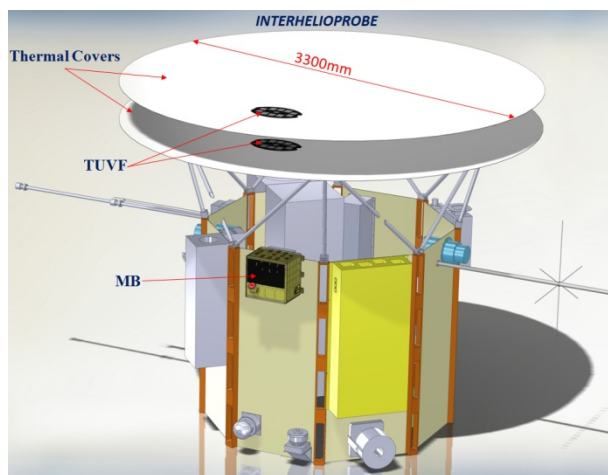


Рис. 2. Размещение измерительного блока MB прибора ХЕМИКС в составе космического аппарата «Интергелиозонд». Блок MB размещен в тени за фильтрами рентгеновского излучения(TUVF)

Rys. 2. Położenie bloku pomiarowego (MB) przyrządu ChemiX na pokładzie sondy międzyplanetarnej IHP. Blok MB umieszczony jest w cieniu filtrów termicznych (TUVF).

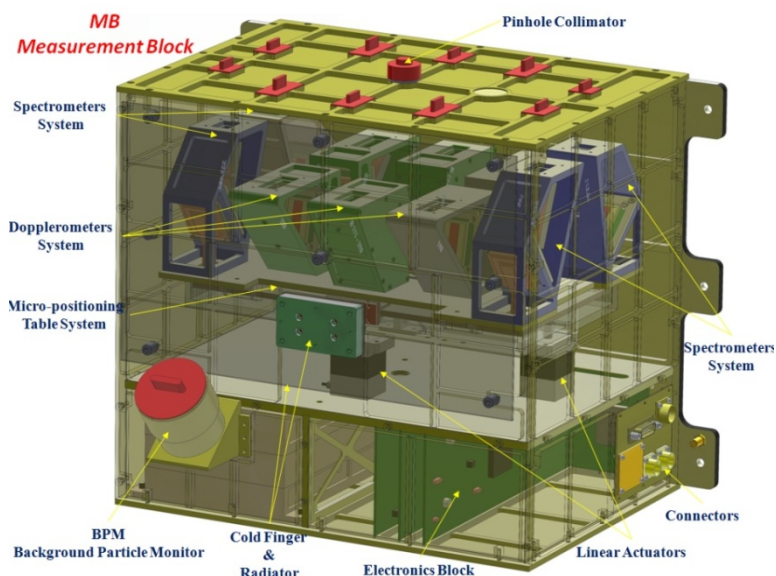


Рис. 3. Детали конструкции измерительного блока (MB) прибора ХЕМИКС (см. описание в тексте).

Rys.3. Szczegóły budowy bloku pomiarowego (MB) przyrządu ChemiX (patrz opisy w tekście).

На рисунке 3 представлены детали конструкции измерительного блока MB, особенно детально для десяти жестко связанных пар кристалл-ПЗС-матрица. Общая масса прибора (включая фильтры TUVF - Termo-Ultra-Violet Filters) 6 кг, энергопотребление 10 Вт, скорость телеметрии порядка 20 МБ/сутки. Размеры блока MB, который размещается в тени рентгеновских фильтров TUVF под тепловым экраном на расстоянии примерно 1 м от него, составляют 30x30x24 см.

В состав измерительного блока входят следующие системы:

Rysunek 3 przedstawia szczegóły bloku pomiarowego, a zwłaszcza ułożenie 10 układów kryształ-detektor czyli 10 torów pomiarowych spektrometru. Całkowita masa przyrządu (włączając blok filtrów TUVF) wynosi 6 kg, średni pobór energii to 10 W, a prędkość transmisji danych przekroczy ponad 20MB/dobę. Blok MB ma wymiary 30 x 30 x 24 cm i jest umieszczony ok. 1 m za zestawem filtrów TUVF.

W skład bloku pomiarowego ChemiXa wchodzi:

- **monitor naładowanych cząstek tła** (background particle monitor system - BPM). System BPM to pół-autonomiczny moduł, którego

- **монитор радиационных частиц фона BPM** (background particle monitor system -); Это полуавтоматическая система, предназначенная для защиты чувствительных электронных частей прибора (электроника, детекторы) от пагубного влияния потоков энергетических частиц, пронизывающих КА во время его прохождения через ударные волны, связанные с выбросами коронального вещества, или через потоки энергетических частиц, связанные со вспышками. Под воздействием энергетических частиц повышается уровень шума в детекторах, что значительно уменьшает точность определения рентгеновского непрерывного спектра и может привести к нарушению работоспособности систем управления прибором. В случае превышения допустимых уровней по данным BPM прибор ХЕМИКС будет частично или полностью отключаться на определенное время. Поскольку BPM должен работать автономно, питание на него подается независимо от питания других частей прибора ХЕМИКС. BPM будет не только измерять потоки энергетических частиц, но также определять энергетические спектры их отдельных составляющих (электроны, протоны, альфа-частицы и ионы легких ядер - до кислорода). Монитор BPM разработан и изготовлен группой из Харьковского института радиоастрономии, возглавляемой д.ф.м.н. О.В.Дудником. Более детальное описание системы можно найти в работах [Dudnik et al., 2015, Dudnik et al., 2015].

- **пинхол-камера (Pinhole Collimator)** камера обскура с апертурой в 1 мм^2 - используется для получения в реальном времени изображений короны Солнца в мягком рентгеновском диапазоне. Изображения будут формироваться на ПЗС-матрицах (1024x256) после прохождения через тонкий графитовый фильтр, что даст возможность наблюдения эффекта уярчения края диска и определения его положения, и, как следствие, привязки положения активных областей и вспышек к солнечным координатам. Угловое разрешение на

главным заданием jest ochrona delikatnych części elektroniki detektorów przed wpływem obecności „w środowisku” wysokoenergetycznych, naładowanych cząstek. Strumień cząstek mierzony przez BPM może rosnać znacząco w trakcie przechodzenia sondy przez obłok naładowanych cząstek pochodzenia słonecznego (SEP), towarzyszących niektórym rozbłyskom lub koronalnym wyrzutom materii (CMEs). Dla szczególnie silnych zjawisk, strumienie naładowanych cząstek mogą spowodować uszkodzenie elektroniki instrumentu, zatem obserwacje BPM posłużą do określenia, czy należy w danej sytuacji wyłączyć instrument lub ograniczyć zakres prowadzonych pomiarów. Wzmoczony strumień cząstek przenikając osłony instrumentu i docierając do detektorów CCD w modułach spektrometru i dopplerometru będzie zakłócał pomiary powodując np. wzrost poziomu tła. BPM pomoże także zbadać wpływ naładowanych cząstek otoczenia promienistego na pomiary w określonych energiach. System BPM musi działać niezależnie od funkcjonowania pozostałych części przyrządu ChemiX, w związku z czym BPM posiada niezależną linię zasilania. Oprócz pomiarów wartości strumieni energetycznych cząstek, BPM będzie mierzył również ich widma (niezależnie widma elektronów, protonów, cząstek alfa i jonów lekkich pierwiastków - do tlenu włącznie). System monitora cząstek został zaprojektowany i wykonany na Ukrainie, w Instytucie Radio-Astronomii, NANU w Charkowie przez grupę kierowaną przez dr. O.V. Dudnika. Bardziej szczegółowy opis BPM znajduje się w pracach [14,15].

- **kamera otworkowa (pin-hole camera)** o aperturze ok. 1 мм^2 tworzyć będzie i obserwować w sposób ciągły rentgenowskie obrazy korony Słońca. Obrazy rejestrowane będą za pomocą detektora CCD (1024 x 256) po przejściu przez cienki filtr grafitowy, co pozwoli na detekcję efektu tzw. pojaśnienia brzegowego. Obraz Słońca z wyraźnie obserwowanym pojaśnieniem brzegowym dysku pozwoli na wyznaczanie położenia obszarów o podwyższonej emisji we współrzędnych słonecznych. Rozdzielczość na

получаемых изображениях будет составлять около 1 мин дуги. Этого достаточно для определения точного положения центров корональных активных областей. Бортовое программное обеспечение будет отслеживать положение и изменения яркости отдельных активных областей с целью обнаружения вспышек. В случае их обнаружения будут определены координаты явления, а система привода внутренней платформы с кристаллами наведет ось коллиматоров на вспыхивающую область. Предусмотрено также наведение оси прибора на заданную точку диска Солнца по команде с Земли;

- **подвижная следящая платформа (Micro-positioning Table System)**, на которой размещены все кристаллы с детекторами. Платформа будет наводить коллиматоры, кристаллы и детекторы спектрометра в направлении вспыхивающей области, мгновенно, в течение секунды от начала явления.

Все детекторы прибора ХЕМИКС (одиннадцать ПЗС-матриц 1024x256) изготовлены фирмой e2v; <http://www.e2v.com/>. Четыре детектора используются с кристаллами системы спектрального атласа, шесть детекторов в системе доплерометра и один предназначен для регистрации изображений, получаемых пинхол-камерой. Размеры пикселя на ПЗС-матрице: 26x26 мкм. Предусмотрено охлаждение детекторов пассивным методом с использованием охлаждающих труб, подключенных к внешнему радиатору. Это обеспечит температуру работы ниже -20°C. При такой температуре тепловые шумы детекторов ниже значения, допускаемого для измерений. Система охлаждения разрабатывается в сотрудничестве с ФИАН (Москва).

Дополнительное оборудование прибора включает двойную систему фильтров TUVF, которая размещена впереди (как указывалось выше) на расстоянии 1 м от блока МВ. Эти фильтры устраняют всё нежелательное излучение (тепловое, жёсткое ультрафиолетовое), пропуская хорошо

образцах выносить będzie ok. 1 минуты łuku, co wystarczy, by oddzielić od siebie Źródła emisji pochodzącej od indywidualnych obszarów aktywnych. Obrazy będą na bieżąco analizowane za pomocą algorytmów umieszczonych w komputerze pokładowym, co umożliwi śledzenie i wybór najbardziej interesujących do analizy widmowej źródeł, na które następnie zostaną nakierowane wszystkie sprzężone mechanicznie układy spektrometru. Standardowo wybierane będą najjaśniejsze obszary rentgenowskiej emisji korony słonecznej. Istnieć będzie również możliwość wyboru dowolnego innego obszaru obserwacji poprzez przesłanie odpowiedniej komendy z Ziemi.

- **ruchoma platforma śledząca**, na której umieszczono, wyjustowano i sprzęgnięto wszystkie 10 układów spektrometru. Ten układ tworzą zamocowane nieruchomo kryształy wraz z detektorami. Platforma naprowadzać będzie jednocześnie wszystkie układy na obszar rozbłysku w przeciągu sekundy od zaistnienia zjawiska.

- **układy dopplerometru**. Ważną część przyrządu stanowi nowatorski system kryształów i detektorów ustawionych w konfiguracji dopplerometru (DOP) [16,17]. System ten będzie umożliwiał rozróżnienie przesunięć linii spowodowanych ruchami wzdłuż kierunku widzenia od ruchów emitującej materii w polu widzenia kolimatora. Ruchy radialne rejestrowane będą w absolutnym układzie odniesienia, kalibrowanym z wykorzystaniem wiedzy o rzucie prędkości satelity względem Słońca, a analiza zmian profili linii pozwoli na oszacowanie prędkości turbulentnych emitującej plazmy. Pomiarы przeprowadzane będą w trzech zakresach widma czułych na obecność plazmy w temperaturach charakterystycznych dla AR, słabych i silnych rozbłysków.

W przyrządzie ChemiX wykorzystanych będzie 11 identycznych detektorów CCD firmy e2v (<http://www.e2v.com/>). Cztery z nich służyć będą do rejestracji widm tzw. Atlasu Widmowego (AW), sześć rejestrować będzie widma w sekcjach dopplerometru (DOP), a ostatni służyć będzie do rejestracji obrazów w kamerze otworkowej.

солнечную радиацию с длинами волн короче 10 Å. Фильтры будут изготовлены из графитовых/графеновых фольг и будут размещены на двух поддерживающих рамках (из композитов), встроенных в конструкцию экрана тепловой защиты (Termal Covers) КА (см. рис. 2).

Десять отдельных коллиматоров с угловым разрешением (FWHM) 3×3 угл.мин² размещаются непосредственно перед кристаллами. Коллиматоры в виде капилляров ограничивают поле зрения кристаллов до размеров выбранной активной области. Применение коллиматоров не допускает перекрытия спектров, формирующихся в разных активных областях, что значительно мешало интерпретации данных, полученных в предыдущих экспериментах.

Прибор ХЕМИКС будет управляться бортовым компьютером, изготовленным по технологии FPGA. Программное обеспечение будет выполнять следующие задачи:

- постоянный мониторинг активности в отдельных активных областях короны (измерения каждую секунду) с целью обнаружения вспышек;
- активация нужных приводов, наведение на вспышку или другую интересную для измерений часть короны;
- бортовая обработка сигналов, сжатие информации, формирование телеметрических блоков;
- управление бортовой памятью;
- отслеживание состояния прибора, мониторинг температур в разных его частях, мониторинг напряжений и токов;
- управление отключением/включением питания и др.

Прибор должен работать после включения питания, с возможностью автоматического выключения в случае прохождения через сильные радиационные бури. Повторное включение происходит по команде с КА.

Предусматривается применение в приборе памяти большого объема (до 512 ГБ) с системой устранения ошибок. Вся информация, получаемая системами прибора,

Каждый из детекторов wyposażony jest w prostokątną matrycę o wymiarach 256 x 1024 pikseli. Piksele mają rozmiary 26 µm x 26 µm. Detektory będą chłodzone pasywnie poprzez system przewodów cieplnych (z ang. heat pipes) podłączony do zewnętrznego radiatora. Dzięki temu systemowi detektory będą pracować w temperaturze poniżej -20°C. System chłodzenia zostanie opracowany i przetestowany we współpracy z moskiewskim instytutem FIAN RAN.

W części przedniej przyrządu ChemiX znajduje się system podwójnych filtrów termicznych i ultrafioletowych (TUVF). Składa się on z dwóch identycznych paneli, wykonanych z kompozytów węglowych, wbudowanych w przednią i tylną płytę osłony termicznej satelity w odległości ok. 1 m przed blokiem pomiarowym MB (patrz rysunek 2). Głównym zadaniem filtrów jest zablokowanie promieniowania termicznego i EUV, a przepuszczenie promieniowania o długościach fal krótszych niż 10 Å. Filtry wykonane będą z folii grafenowych lub grafitowych, umieszczonych na ramach wspierających, wykonanych również z kompozytów węglowych.

Dziesięć oddzielnych kolimatorów w postaci systemu szklanych kapilar umieszczonych zostanie we wszystkich układach spektrometru, tuż przed kryształami. Kolimatory te o rozdzielczości kątowej (FWHM-pełna szerokość połówkowa transmisji) 3 minuty łuku x 3 minuty łuku zawężają pole widzenia kryształów do wybranego, pojedynczego obszaru aktywnego. Obecność kolimatorów uniemożliwia nakładanie się widm formujących się w indywidualnych obszarach aktywnych obecnych jednocześnie na tarczy słonecznej. Takie nakładanie się widm znacznie utrudniało interpretację danych we wcześniejszych eksperymentach, np. w przyrządzie RESIK i BCS na *Yohkoh*.

Funkcjonowanie przyrządu ChemiX sterowane będzie za pomocą odpowiednich algorytmów przechowywanych w pamięci komputera pokładowego. Układy komputera będą wykonane w technologii FPGA z zachowaniem pełnej redundancji. Ważną częścią komputera

будет записываться в эту память, в том числе время регистрации фотонов (с точностью в 1мс) и амплитуда сигнала. Из записанной информации в телеметрию будут передаваться только фрагменты, которые наиболее интересны с научной или технической точки зрения. Остальная информация будет сбрасываться в периоды хорошей телеметрической связи с КА. Данные, полученные прибором, будут общедоступными после их начальной обработки и предварительного анализа.

Прибор ХЕМИКС - это усовершенствованный брегговский спектрометр с изогнутыми кристаллами, которые используются в качестве дисперсионных элементов. В состав прибора входят 10 кристаллов, отраженное излучение от которых в диапазоне мягкого рентгеновского излучения попадает на 10 отдельных ПЗС-матриц. Четырьмя кристаллами непрерывно перекрывается спектральная область 1,5-9 Å таким образом, что спектры перекрываются на концах что будет способствовать хорошей взаимной относительной калибровке. Спектральное разрешение этой четырехкристальной системы так называемого спектрального атласа (SA) в 5-7 раз превышает разрешение, достигнутое в приборе РЕСИК (RESIK). Ожидаемое в приборе ХЕМИКС отношение сигнала к шуму будет также выше в 3-5 раз, чем в приборе РЕСИК, что даст возможность уверенно определять уровень непрерывной эмиссии даже для бесвысвеченных активных областей. Отдельную часть прибора составляет система так называемого Доплерометра (DOP) [Sylwester et al.,1990; Sylwester et al.,2015], позволяющего проводить измерения радиальной составляющей скорости плазмы по отношению к объекту. Используя известную величину проекции вектора орбитальной скорости движения КА по отношению к источнику рентгеновского излучения будет возможна абсолютная калибровка зависимости спектральных сдвигов от скорости. Измерения будут проводиться в трех участках спектра, характерных для температуры плазмы в АО, в

будет procesor wyposażony w zestaw programów służących do:

- stałego (co sekundę) monitorowania aktywności rentgenowskiej indywidualnych obszarów aktywnych celem wykrycia rozbłysków,
- aktywacji silników w ruchomych częściach instrumentu oraz naprowadzania sekcji spektrometrów na obszar rozbłyskujący,
- przetwarzania, kompresowania i formatowania danych, w sposób wymagany przez system telemetryczny sond,
- zarządzania pamięcią pokładową,
- śledzenia statusu urządzenia (tzw. housekeeping), w tym monitorowania temperatur w różnych jego częściach, monitorowanie napięć i prądów,
- kontroli włączania/wyłączania zasilania podukładów i inne.

Przewiduje się stałą pracę przyrządu od momentu włączenia zasilania z możliwością automatycznego wyłączenia w przypadku pojawienia się silnych strumieni cząstek tła promienistego. Powtórne włączenie nastąpi na komendę z komputera sondy.

Przewiduje się zastosowanie w urządzeniu pamięci stałych RAM o dużych objętościach (do 512 GB) z systemem eliminacji błędów. Przechowywane w tej pamięci będą wszystkie informacje otrzymywane z zewnątrz urządzenia oraz informacje pojawiające się w instrumencie, głównie dane o czasie rejestracji każdego fotonu (z dokładnością do 1 milisekundy) i amplitudzie indukowanego sygnału. Do telemetrii przekazywane będą jedynie fragmenty zapisanych informacji, te najbardziej interesujące z naukowego lub technicznego punktu widzenia. Reszta danych będzie przesyłana „na Ziemię” w okresach dobrej radio-widoczności satelity ze stacji telemetrycznych dalekiego zasięgu. Przekazane dane zostaną udostępnione publicznie po przeprowadzeniu ich wstępnej redukcji i analizie.

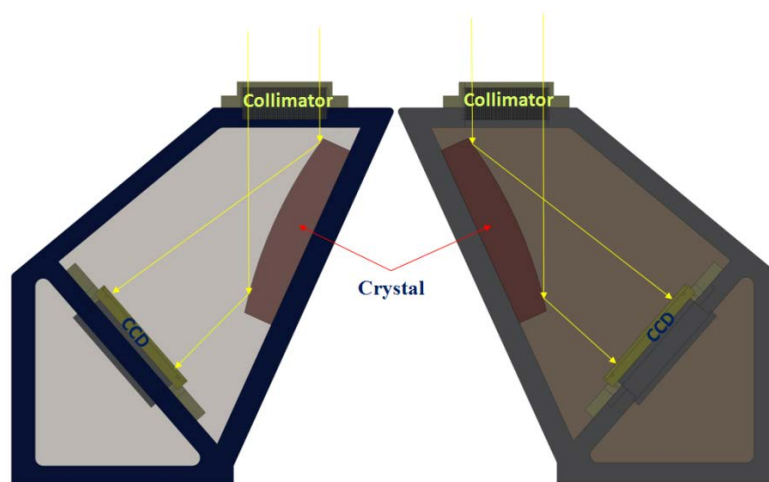
Spektrometr prowadzi obserwacje w zakresie 1,5 Å – 9 Å w czterech, nieco zazębiających się przedziałach widmowych. Rozdzielczość widmowa tego systemu (tzw. atlasu widmowego – AW) będzie 5-7 razy lepsza niż ta,

слабых и сильных вспышках, соответственно. В диапазоне спектров мягкого рентгена, перекрываемых системами SA и DOP, находятся сотни эмиссионных линий, излучаемых тяжелыми элементами, примесями оптически тонкой горячей плазмы короны. Уширения и временные изменения профилей этих эмиссионных линии дадут возможность изучения турбулентного состояния плазмы в импульсной фазе вспышек. По информации на сегодняшний день, прибор ХЕМИКС – это единственный брэгговским спектрометр, который будет проводить наблюдения солнечной короны в 25-и и 26-м циклах солнечной активности.

На рис. 4 указаны детали конструкции одного из каналов системы SA и схема взаимного размещения кристаллов в блоке Спектрального атласа (SA).

якую uzyskano w instrumencie RESIK. Dodatkowo, oczekiwany stosunek sygnału do szumu w przypadku widm AW będzie także 3-5 razy korzystniejszy, umożliwiając wiarygodne pomiary poziomu widma ciągłego nawet dla spokojnych obszarów aktywnych poza rozbłyskami. W zakresie widm miękkiego promieniowania rentgenowskiego objętych pomiarami AW i DOP znajdują się setki linii emitowanych w optycznie cienkiej, gorącej plazmie korony. Poszerzenie i zmiany czasowe profili tych linii dają możliwość badania turbulencji plazmy w fazie impulsowej rozbłysków.

Na rysunku 4 przedstawiono szczegóły konstrukcji par kanałów systemu AW. Schemat wzajemnego rozmieszczenia kryształów i detektorów w jednej z dwóch sekcji tzw. atlasu widmowego (AW) wraz z pokazanym przebiegiem promieni (żółte linie) dla dwóch kanałów. W przypadku dopplerometru, pokazanym na następnym rysunku, kryształy w obu kanałach są identyczne.



Spectrometer System

Рис.4

Rys. 4.

В каналах спектрального атласа прибора ХЕМИКС будет проводиться регистрация полных спектров в диапазоне $1,5 - 9,0 \text{ \AA}$ с использованием четырех (отдельных) кристаллов, "сопряжённых" с четырьмя ПЗС-

Спектрометр będzie prowadzić obserwacje przy użyciu czterech kryształów (dwie pary jak na rysunku 4). Kryształy te zostały wygięte cylindrycznie tak, by uzyskać żądane promienie krzywizny i (związany z geometrią układu kryształ-detektor) zakres widmowy.

матрицами. Для того, чтобы выполнить следующие принципиальные условия:

- спектральная область 1,5 - 9 Å должна полностью перекрываться наблюдениями,

- четыре спектральные суб-диапазона должны перекрывать друг друга по краям при сильных эмиссионных линиях;

- отраженные лучи должны попадать на ПЗС-матрицы приблизительно под прямым углом;

- длина волн характерного рентгеновского излучения материала кристаллов не должна попадать в измеряемый участок спектра,

- была разработана специальная программа типа "слежения лучей". С использованием этой программы проведен анализ десятков вариантов размещения кристаллов относительно ПЗС-матриц и оптической оси прибора. Выбран вариант, в котором кристаллам кремния, кварца, KAP и KDP соответствуют спектральные промежутки: 1,500÷2,713 Å; 2,700÷4,304 Å; 4,290÷5,228 Å и 5,200÷8,800 Å, соответственно. Более детальные данные по отдельным спектральным каналам прибора приведены в таблице.

Секция рентгеновского доплерометра (DOP) прибора ХЕМИКС состоит из трех двойных пар жестко связанных изогнутых кристаллов и ПЗС-матрицы. Дисперсионные элементы изготовлены из идентичных кристаллов, изогнутых таким же образом; это значит, что они не отличаются друг от друга, кроме противоположного направления дисперсии. Кристаллы и радиусы кривизны подобраны таким образом, чтобы перекрывать области спектров вокруг линий сильно ионизованных элементов Fe (~ 1,85 Å), Ca (~ 3,2 Å) и Ar (~ 3,9 Å).

Promieniowanie odbite przez każdy z kryształów pada na oddzielny detektor CCD. Geometrie poszczególnych układów oraz zakresy widmowe poszczególnych układów kryształ-detektor wyznaczano przy użyciu specjalnie opracowanego oprogramowania, stworzonego na potrzeby eksperymentu i uwzględniającego wypełnienie następujących podstawowych warunków:

- zakres widmowy 1,5 Å - 9 Å powinien być obserwowany w sposób nieprzerwany,

- cztery podzakresy widmowe systemu AW powinny się częściowo ząbeć. Ząbienie powinno zachodzić w okolicach silnych linii emisyjnych,

- promienie odbite od kryształów powinny padać na matryce CCD w przybliżeniu pod dużym kątem bliskim kąta prostego,

- długość fali promieniowania charakterystycznego materiału, z którego wykonany jest monokryształ (fluorescencja), nie powinna przypadać w zakresie pomiarowym widma danego układu.

Spośród setek wariantów, przeanalizowanych za pomocą tego programu, wybrano wariant optymalny, w którym wykorzystuje się jako elementy dyspersyjne kryształy krzemu, kwarcu, KAP oraz KDP (patrz Tabela 1). W wybranym wariacie mierzone będą widma z zakresu 1,500 – 2,713 Å, 2,700 – 4,304 Å, 4,290 – 5,228 Å i 5,200 – 8,800 Å. Pozostałe dane charakteryzujące poszczególne układy spektralne przyrządu przedstawiono w tabeli.

Sekcja dopplerometru rentgenowskiego wchodząca w skład ChemiXa składa się z trzech par układów kryształ-detektor (jak na rysunku 3). W każdej parze oba kryształy są identyczne, układy różnią się jedynie przeciwnymi kierunkami dyspersji. Kryształy i ich promienie krzywizny dobrano tak, aby obserwować widma wokół linii wysoko zjonizowanych pierwiastków: Fe (~ 1,85 Å), Ca (~ 3,2 Å) i Ar (~ 3,9 Å). Szczegóły konstrukcji układów w parach podano w tabeli 1 (oznaczenia 6 ÷ 10).

Спектральные каналы прибора ХЕМИКС.
Charakterystyki wszystkich układów spektralnych przyrządu ChemiX

ChannelNo (crystals' number)	Crystal	Diffracting plane	2d [Å] (at -20 °C)	Wavelength Range [Å]	Average spectral resolution [mÅ/pix]	Curvature radius [mm]	Crystal length [mm]	Crystal width [mm]
Спектральные каналы системы SA Spectrometer channels AW								
1 (1)	Si	111	6.271	1.500 – 2.713	1.41	176.000	46.5	10.0
2 (1)	Quartz	10_10	8.514	2.700 – 4.304	1.82	166.729	44.8	10.0
3 (1)	KDP	011	10.185	4.290 – 5.228	0.98	410.425	53.5	10.0
4 (1)	KAP	001	26.64	5.200 - 8.800	4.2	364.731	61.7	10.0
Спектральные каналы системы Доплерометра Dopplerometer channels DOP								
5, 6 (2)	LiF	022	2.848	1.835 - 1.949	0.12	650.00	46.1	10.0
7, 8 (2)	Si	111	6.271	3.150 - 3.324	0.11	2500.0	58.2	10.0
9,10 (2)	Si	111	6.271	3.900 – 4.080	0.19	1000.0	47.0	10.0

На рис. 5 представлена система доплерометра.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat funkcjonalny systemu Dopplerometru.

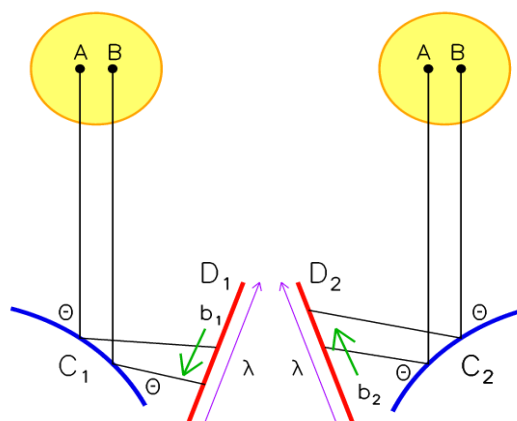


Рис. 5. Наглядная схема системы доплерометра. Излучение, попадая на два цилиндрически изогнутых элемента идентичного монокристалла C_1 и C_2 , вследствие Брэгговской дифракции отражается на два детектора D_1 и D_2 (ПЗС-матрицы). Фиолетовые стрелки (вверх) указывают направление возрастания длин волн на детекторах. В случае трансверсального перемещения источника (вспышки) в плоскости дисперсии (от точки A к точке B) попадающие на детекторы фотоны от источника будут перемещаться в противоположные стороны на обоих детекторах (показано зелеными стрелками). В случае, когда источник не меняет положения, но плазма движется в направлении к наблюдателю, спектральная линия смещается в коротковолновую сторону из-за эффекта Доплера, в направлении вниз на обоих детекторах. Таким способом становится возможным разделение обоих эффектов и определение как доплеровских сдвигов, так и перемещения источника.

Rys. 5. Schemat funkcjonalny dopplerometru (DOP). Dwa cylindrycznie wygięte kryształy C_1 i C_2 powodują dyfrakcję padającego promieniowania rentgenowskiego, emitowanego początkowo w położeniu A na powierzchni Słońca. Pozycje D_1 i D_2 , gdzie rejestrowana jest na detektorach emisja o danej długości fali, określona jest przez prawo Bragga $\lambda = 2d \sin \theta$. Purpurowe strzałki (w górę na rysunku) wskazują kierunek wzrostu długości fal rejestrowanych na obu detektorach. W przypadku przesuwania się źródła emisji z położenia A do położenia B (w kierunku dyspersji kryształu) pozycja, w której rejestrowana jest dana długość fali, na obu detektorach przesuwają się w przeciwnych kierunkach, jak to pokazano przy użyciu zielonych strzałek. W przypadku promieniowania emitowanego stale w położeniu A , ale przez plazmę poruszającą się radialnie w kierunku obserwatora, linia widmowa ulega przesunięciu Dopplerowskiemu w stronę mniejszych długości fali. Rejestrowana pozycja linii jest w tym przypadku przesunięta w tym samym kierunku (w dół) w obu detektorach. Dzięki temu możemy rozróżnić efekty wywołane przez ruch poprzeczny plazmy na dysku Słońca od przesunięć dopplerowskich linii.

В системе DOP как эмиссионные линии, так и непрерывный спектр будут измеряться с высоким спектральным разрешением, особенно вблизи перигелия. Тогда все потоки излучения, приведенные на рис. 6, будут на порядок выше.

На рис. 6 указаны синтетические спектры, которые будут получаться в каналах 1 и 4 системы SA. Вычисления спектров проводились с использованием атомного кода CHIANTI-7 (<http://www.chiantidatabase.org>). Принимались следующие значения температуры и меры эмиссии: $T_e \approx 18,7$ МК, $EM \approx 5,6 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$, соответствующие рентгеновской вспышке балла M5.0. На этом этапе моделирования пренебрегалось влиянием трансмиссии коллиматора и эффективностью регистрации фотонов ПЗС-матрицами. Эти величины не меняют существенным образом результаты моделирования.

W systemie dopplerometru, widma, zarówno w liniach jak i kontinuum, będą rejestrowane z bezprecedensową rozdzielczością, szczególnie w momencie, gdy satelita znajdować się będzie w pobliżu peryhelium. Wówczas wszystkie rejestrowane strumienie będą co najmniej o rząd większe niż te pokazane na rysunku 6.

Rysunek 6 przedstawia syntetyczne, tzn. wyliczone, widma rentgenowskie, takie, jakie spodziewamy się zaobserwować w kanałach #1 i #4 systemu AW. Widma liczone przy wykorzystaniu kodu widmowego CHIANTI-7 (<http://www.chiantidatabase.org>). Do wyliczeń przyjęto typowe wartości charakteryzujące warunki fizyczne w plazmie rozbłysku klasy GOES M5, tj. temperatura $T_e = 18,7$ МК и мера эмисии $EM = 5,6 \cdot 10^{49} \text{ cm}^{-3}$. Na obecnym etapie symulacji pominięto efekty związane z wpływem funkcji transmisji kolimatora i efektywności rejestracji fotonów przez detektor CCD. Wpływ pominiętych efektów nie zmienia znacząco wyników modelowania.

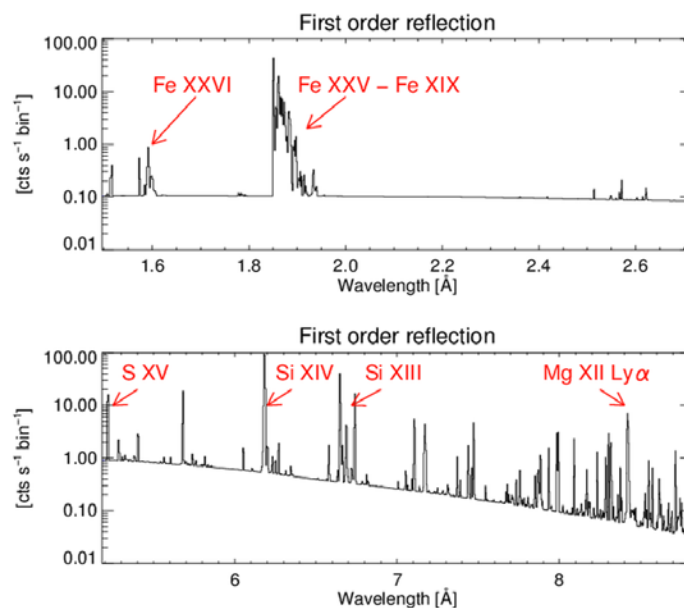


Рис.6. Модельные спектры в каналах 1 (верхняя панель) и 4 (нижняя панель) системы спектрального атласа (SA), вычисленные для условий вспышки балла M5.0 на расстоянии КА в 1 а.е. Обозначены основные линии отдельных элементов, соответствующие разным степеням ионизации.

Рис.6. Przykłady symulacji widm rejestrowanych spektrometrem ChemiX w przypadku obserwacji Słońca z odległości 1 j.a. **U góry:** widma w kanale 1 z dielektronowymi liniami satelitarnymi jonów Fe XXV i Fe XXIV. Charakterystyczna temperatura formowania się to ok. 15-30 МК. **Na dole:** widma w kanale 4 zawierającym linie wysoko-zjonizowanych jonów Si, S i Mg. Charakterystyczna temperatura formowania się to ok. 2-30 МК.

Определение химического состава короны принципиально важно для исследований процессов сепарации разных ионов в плазме (первый потенциал ионизации FIP), для вычислений полного потока излучения от Солнца, а также для корректной интерпретации гелиосейсмологических наблюдений.

Выполненные нами вычисления спектральной эффективности прибора ХЕМИКС показывают, что его измерения позволят определять содержание в солнечной короне основных примесей с более высокой точностью, чем это достигается наземными измерениями. Это даст новый импульс исследованиям роли эффекта FIP в процессе сепарации ионных примесей между фотосферой и короной. Кроме определения содержания в солнечной короне отдельных элементов, измерения, проводимые прибором ХЕМИКС, дадут информацию об отношениях интенсивностей излучения диэлектронных сателлитов к интенсивности соответствующих прямо возбуждаемых переходов. Так как сателлитные линии возбуждаются вследствие процессов диэлектронной рекомбинации (DE), их интенсивность зависит от присутствия электронов, энергия которых точно совпадает с энергией данного процесса DE. Сателлитных линий в спектральной области $1,5 \div 9 \text{ \AA}$ довольно много (сотни), они соответствуют переходам с $n=2, 3, \dots, 10$ для элементов Mg-Ni. Их резонансные энергии перекрывают область 1-10 кэВ довольно густо, в связи с чем можно будет на основе измерения их относительных интенсивностей определять функции распределения электронов по энергиям и их отличие от распределения Максвелла.

Для анализа спектров, регистрируемых прибором ХЕМИКС, будут использоваться различные пакеты атомного кода CHIANTI, с помощью которых возможно определение величин следующих физических параметров:

- тепловая/турбулентная ширина линий;
- радиальные и трансверсальные движения плазмы вспышек в разных температурных

Проведенные обчисления чувствительности спектрального прибора ChemiX указывают на то, что на основе измеренных спектров в линиях и в непрерывном спектре возможно будет определение обилия наиболее важных элементов с точностями, превышающими те, которые характеризуют точности наземных измерений в оптическом диапазоне. Прогнозируемые результаты станут основой для более детального изучения роли эффекта FIP, который приводит к различиям в обилии элементов между структурами фотосферы и короны Солнца.

Помимо возможности точного определения обилия элементов, измерения, проводимые с помощью прибора ChemiX, дадут богатую информацию о соотношениях напряжений в линиях. Особенно важными будут отношения напряжений т.н. сателлитов (формирующихся в процессах рекомбинации диэлектронных) и линий возбуждаемых впрямую (здерzeniowo). Возбуждение линий сателлитных является процессом резонансным и происходит для электронов, чья энергия совпадает с энергией процесса рекомбинации диэлектронной. Линии сателлитных в спектре в диапазоне $1,5 \text{ \AA} - 9 \text{ \AA}$ являются довольно густыми, соответствуют переходам с уровней возбужденных с главной квантовой $n = 2, 3, \dots, 10$ для ионов элементов от Mg до Ni. Их энергии резонансные охватывают на довольно густо диапазон энергий 1-10 кэВ возбуждающих электронов, что на основе относительных интенсивностей этих линий возможно будет по крайней мере определить форму профилей функций распределения электронов по энергиям и исследовать возможные отклонения этих распределений от максвелловского.

Для анализа полученных спектров применены самые последние пакеты соответствующих обчислений атомных, в том числе CHIANTI. С их помощью будут определяться следующие параметры характеризующие условия формирования спектров:

- Термическая и турбулентная ширина линий, и их соответствующие изменения со временем;
- Движения плазмы разрывной в различных диапазонах температур (радиальные и поперечные), в линиях ионов Si, S, Ar, Ca, Fe;

режимах в отдельных линиях ионов Si, S, Ar, Ca, Fe;

- распределение плазмы по температурам (так называемая дифференциальная мера эмиссии, DEM);

- распределение возбуждающих электронов по энергиям.

Так как наблюдения будут проводиться с двух объектов под разными углами зрения, станет возможным получение информации о полном векторе скорости направленных движений плазмы. Дополнительно для анализа будет использоваться информация, полученная с других космических аппаратов, например Solar Orbiter, и тех, которые будут находиться на околоземных орбитах, а также от наземных наблюдений (в оптическом и радиодиапазонах).

Конструкция прибора ХЕМИКС разработана во Вроцлавской лаборатории физики Солнца ЦКИ ПАН в международном сотрудничестве.

Разработчики прибора ХЕМИКС благодарны всем лицам и организациям в странах-участницах за возможность размещения прибора ХЕМИКС на борту солнечно-гелиосферной аппарата "Интергелиозонд" и за финансовую поддержку работ над проектом. В особенности благодарим Польский Народный Центр по исследованиям (NCN) (грант No.UMO-2011/01/M/ST9/05878).

ЛИТЕРАТУРА

- Kuznetsov V., Zelenyi L. The Interhelioprobe Mission for Solar and Heliospheric Studies//In: 40th COSPAR Scientific Assembly, COSPAR Meeting 40. (2014).P. 1721.
- Grineva Yu. I.; Karev V. I.; Korneev V. V.; Krutov V. V.; Mandelstam S. L.; Vainstein L. A.; Vasilyev B. N.; Zhitnik I. A. Solar X-Ray Spectra Observed from the `Intercosmos-4' Satellite and the `Vertical-2' Rocket// Solar Physics. (1973).V. 29. P.441-446.
- Doschek G.A., Kreplin R.W., Feldman U. High-resolution solar are X-ray spectra//Astrophys. J. Lett. (1979).V.233, L157.
- Tanaka K., Watanabe T., Nishi K., Akita K. High-resolution solar are X-ray spectra obtained with rotating spectrometers on the HINOTORI satellite// Astrophys. J. Lett. (1982).V.254. L59.
- Acton L.W., Finch M.L., Gilbreth C.W., Culhane J.L., Bentley R.D., Bowles J.A., Guttridge P., Gabriel A.H., Firth J.G., Hayes R.W. The soft X-ray polychromator for the Solar Maximum Mission//Solar Phys. (1980).V. 65.P. 53
- Culhane J.L., Hiei E., Doschek G.A., Cruise A.M., Ogawara Y., Uchida Y., Bentley R.D., Brown C.M., Lang J., Watanabe T., Bowles J.A., Deslattes R.D., Feldman U., Fludra A., Guttridge P., Henins A., Lapington J., Magraw J., Mariska J.T., Payne J., Phillips K.J.H., Sheather P., Slater

- rozkład plazmy po temperaturach (tzw. różniczkowa miara emisji, DEM);

- rozkład elektronów po energiach.

Ponieważ obserwacje prowadzone będą z dwóch sond pod różnymi kątami widzenia, można będzie wyznaczać pełny wektor prędkości ruchów plazmy w indywidualnych zjawiskach. Dodatkowo, przy interpretacji wyników uwzględniane będą informacje uzyskane z innych misji, na przykład *Solar Orbiter* i tych znajdujących się na niskich orbitach wokół Ziemi, a także obserwacji naziemnych (w zakresach optycznym i radiowym).

Chemix konstruowany jest w Zakładzie Fizyki Słońca CBK PAN we współpracy z międzynarodowym zespołem badawczym.

Konstruktorzy dziękują wszystkim osobom i organizacjom w krajach uczestniczących za możliwość umieszczenia przyrządu Chemix na pokładzie stacji międzyplanetarnej projektu *Interhelioprobe* oraz za wsparcie finansowe prac nad projektem.

W szczególności dziękujemy polskiemu Narodowemu Centrum Nauki (NCN) za objęcie przeprowadzonych prac grantem 2011/01/M/ST9/05878.

BIBLIOGRAFIA

- K., Tanaka K., Towndrow E., Trow M.W., Yamaguchi A. The Bragg Crystal Spectrometer for SOLAR-A.// *Solar Phys.* (1991).V.136.P. 89.
- Antonucci E. Solar flare spectral diagnosis - Present and future, IAU, Colloquium on Solar and Stellar Flares, 104th, Stanford, CA, Aug. 15-19, 1988 //*Solar Physics* (1989) .(ISSN 0038-0938). V. 121, 31-60; Discussion.P. 459,
- Plocieniak S.; Sylwester J.; Kordylewski Z.; Sylwester B. Determination of wavelengths and line shifts based on X-ray spectra from Diogeness, “Solar variability: from core to outer frontiers”//The 10th European Solar Physics Meeting, 9 - 14 September 2002, Prague, Czech Republic// Ed. A. Wilson. ESA SP-506, Noordwijk: ESA Publications Division(ISBN 92-9092-816-6). (2002). V. 2. P.963 – 966.
- Parmar A. N., Culhane J. L., Rapley C. G., Wolfson C. J., Acton L. W., Phillips K. J. H., Dennis, B. R. SMM observations of K-alpha radiation from fluorescence of photospheric iron by solar flare X-rays// *Astrophysical Journal.* (1984).(ISSN 0004-637X).V. 279.P. 866-874.
- Sylwester B., Phillips K. J. H., Sylwester J., Keça A. Resik Solar X-Ray Flare Element Abundances on a Non-isothermal Assumption.// *The Astrophysical Journal*(2015).V. 805.Article id. 49. 8 p.
- Dudík J., Del Zanna G., Mason H. E., Dzifčáková E. Signatures of the non-Maxwellian κ -distributions in optically thin line spectra. I. Theory and synthetic Fe IX-XIII spectra.//*Astronomy & Astrophysics*(2014). V. 570. id.A124. 23 p.
- Laming J.M.: The FIP and Inverse FIP Effects in Solar and Stellar Coronae, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2015-2>, doi: 10.1007/lrsp-2015-2.
- Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowaliński M., Nowak S., Plocieniak S., Siarkowski M., Lang K.J.H., Brown J., Brown C.M., Doschek G.A., Kuznetsov V.D., Oraevsky V.N., Stepanov A.I., Lisin D.V. RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition.// *Solar Phys.* (2005).V.226.P. 45.
- Dudnik O.V., Kurbatov E.V., Tarasov V.O., Andryushenko L.A., Zajtsevsky I.L., Sylwester J., Bąkała J., Kowaliński M. Background particle detector for the solar X-ray photometer ChemiX of space mission Interhelioprobe : an adjustment of breadboard model modules.//(*ISSN 1561-8889*) *Kosmichna Nauka I Tekhnologiya* (2015).V.21.P 3(in Russian).
- Dudnik et al.// *Радиофизика и радиоастрономия.* (2015). Т. 20. № 3.С. 247–260.
- Sylwester J., Farnik F. Diogeness - Soft X-ray spectrometer-photometer for studies of flare energy balance.//*Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia.* (1990).V.41.P.149.
- Sylwester J., Kordylewski Z., Plocieniak S., Siarkowski M., Kowaliński M., Nowak S., Trzebiński W., Stęślicki M., Sylwester B., Stańczyk E., Zawerbny R., Szaforz Ż., Phillips K.J.H., Farnik F., Stepanov A. X-ray Flare Spectra from the DIOGENESS Spectrometer and Its Concept Applied to ChemiX on the Interhelioprobe Spacecraft//*Solar Phys.* (2015) in press.

Interhelioprobe (*IHP*), an analogue to the ESA *Solar Orbiter*, is the prospective Russian space solar observatory intended for in-situ and remote sensing investigations of the Sun and the inner heliosphere from a heliocentric orbit with a perihelion of about 65-70 solar radii. One of several instruments on board will be the Bragg crystal spectrometer ChemiX which will measure X-ray spectra from solar coronal structures. Analysis of the spectra will allow the determination of the elemental composition in hot coronal sources like flares and active regions (AR). ChemiX is under development at the Wrocław Solar Physics Division of the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in collaboration with an international team. This paper gives an overview of the ChemiX scientific goals and design preparatory to phase B of the instrument development.