

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фундаментальные и прикладные научные исследования в области астрофизики и радиоинтерферометрии

**Тема ВСЕЛЕННАЯ.** Исследования в области астрофизики высоких энергий, теоретической физики и наблюдательной космологии.

Гос. регистрация № 0120.0 602990

Научный руководитель академик Р.А. Сюняев

### Раздел Астрофизика высоких энергий

#### «Открытие жесткого рентгеновского излучения в линиях прямого вылета от распада $^{44}\text{Ti}$ в остатке Сверхновой 1987А»

Считается, что элементы тяжелее углерода и кислорода не могут образовываться при стационарном термоядерном горении в недрах звезд, а синтезируются в момент их взрыва (вспышках сверхновых). Именно сверхновые, обогатившие межзвездную среду кремнием, кальцием, железом, сделали возможным образование планет и зарождение жизни на Земле. Несмотря на множество косвенных, прямых подтверждений этой концепции не много. Среди наиболее убедительных - регистрация оптического, рентгеновского и гамма-излучения от радиоактивного распада изотопа  $^{56}\text{Co}$  в  $^{56}\text{Fe}$  в остатке Сверхновой 1987А, вспыхнувшей в Большом Магеллановом Облаке 25 лет назад и ставшей единственной близкой (160 тысяч световых лет) и яркой сверхновой, наблюдавшейся за последние ~400 лет.

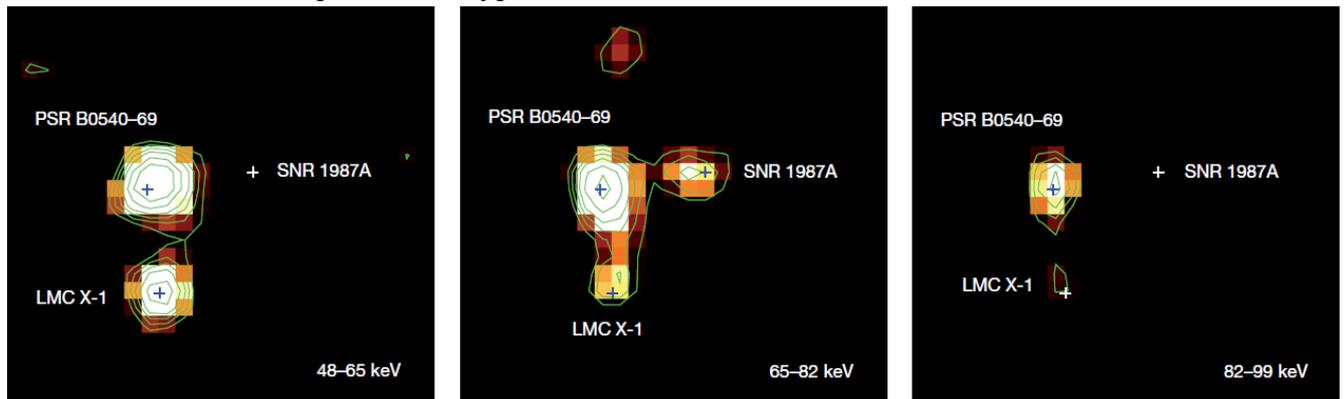
После распада  $^{56}\text{Co}$  (и  $^{57}\text{Co}$ ), обеспечивающего энергетику остатка SN 1987А в первые 3 года после вспышки, и до начала активного взаимодействия разлетающейся оболочки с окружающей средой энергию для наблюдаемого инфракрасного, оптического и ультрафиолетового излучения остатка мог бы дать распад радиоактивного изотопа  $^{44}\text{Ti}$ . Расчеты показывают, что в коллапсирующих сверхновых, подобных SN1987А,  $^{44}\text{Ti}$  может синтезироваться в количестве  $(0.02-2.5) \diamond 10^{-4}$  масс Солнца ( $M_{\odot}$ ). Жесткое рентгеновское и гамма-излучение от этого распада было надежно зарегистрировано лишь от остатка сверхновой Кассиопея А. Возможно, это означает, что заметный (вблизи верхней границы предсказаний) выход  $^{44}\text{Ti}$  при взрывном нуклеосинтезе имеет место лишь в исключительных случаях.

Определить количество  $^{44}\text{Ti}$  в остатке SN1987А ранее пытались на основе инфракрасных кривых блеска и спектров ультрафиолетового излучения. Путем сложных модельно зависящих расчетов была получена оценка массы титана- $(2) \diamond 10^{-4} M_{\odot}$ . Но оставалась возможность и других причин этого излучения, с  $^{44}\text{Ti}$  не связанных.

В данной работе сообщается о регистрации жесткого рентгеновского излучения от остатка SN 1987А в линиях прямого вылета радиоактивного распада  $^{44}\text{Ti}$  (на энергиях 67.9 и 78.4 кэВ). Результат получен на основе сверхдолгих наблюдений Большого Магелланова Облака орбитальной обсерваторией гамма-лучей ИНТЕГРАЛ в 2003-2011 гг. с полной экспозицией 6 млн. сек. Это - первое прямое доказательство синтеза  $^{44}\text{Ti}$  в момент взрыва этой уникальной сверхновой. Измеренные потоки излучения в линиях показывают, что при взрыве было синтезировано количество  $^{44}\text{Ti}$ ,  $(3.1 \pm 0.8) \diamond 10^{-4} M_{\odot}$  (или примерно 100 масс Земли), вполне достаточное для объяснения ее оптического и ультрафиолетового излучения, наблюдавшегося в течение последних 20 лет. Большой выход  $^{44}\text{Ti}$ , вблизи верхней границы

теоретических предсказаний, может свидетельствовать о более сложном режиме взрыва, чем предполагалось, например, о сильно асимметричном взрыве. Указание на такую асимметрию поступали и ранее из данных ультрафиолетовых и гамма-наблюдений.

Распадаясь с периодом полураспада 59 лет в  $^{44}\text{Sc}$ , а затем в  $^{44}\text{Ca}$ , титан еще долго



будет оставаться активным в этой самой большой в локальной Вселенной «мертвой зоне» термоядерного взрыва, обеспечивая ее мощное излучение в разных диапазонах спектра.

Рисунок 1: Рентгеновские изображения области SNR 1987A в трех последовательных диапазонах энергий. Излучение от SNR 1987A регистрируется лишь на центральном изображении, в диапазоне, содержащем две линии радиоактивного распада  $^{44}\text{Ti}$  (67.9 и 78.4 кэВ).

С.А.Гребенев, А.А.Лутовинов, С.С.Цыганков (*Grebennev S.A., Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Winkler C. "Hard X-ray emission lines from the decay of  $^{44}\text{Ti}$  in the remnant of Supernova 1987A", Nature, 2012, v. 490, n. 7420, pp. 373-375*).

### Физика горячего газа в скоплениях галактик.

Исследованы флуктуации поверхностной яркости рентгеновского излучения газа в одном из ярчайших скоплений галактик A1656/Coma (Чуразов и др., 2012). Рассчитан спектр мощности флуктуаций плотности в 3D. Характерная амплитуда флуктуаций плотности составляет ~5-10% на масштабах ~30-300 кпк. Используя результаты численного моделирования исследованы свойства неоднородности газа в скоплениях на разных расстояниях от центра (Журавлева и др., 2012). Показано, что неоднородности газа в 98% объема скоплений может быть описано логнормальным распределением, ширина которого плавно увеличивается с расстоянием от центра скопления. Исследована природа возникающих флуктуаций плотности газа.

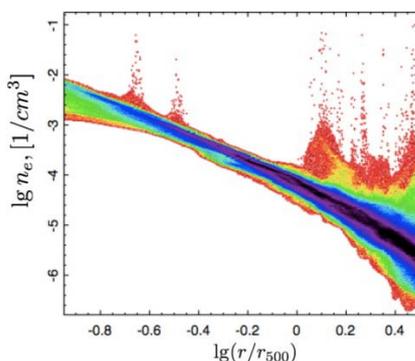


Рисунок 2. Функция распределения плотности газа на разных расстояниях от центра скопления. Результаты численных расчетов.

Показано, что наличие пузырей релятивистской плазмы в горячем газе значительно увеличивает эффективность диссипации ударных и звуковых волн (Фридман, Хайнц и Чуразов, 2012). Такая гетерогенная среда способна «перехватить» заметную долю энергии звуковых волн, генерируемых сверхмассивными черными дырами в ядрах скоплений.

Рассмотрена интересная задача о взрывах сверхновых типа Ia в пузырях релятивистской плазмы в ядрах скоплений галактик (Чугай, Чуразов, Сюняев, 2012). Специфика задачи состоит в ничтожной плотности и огромной скорости звука в среде, окружающей сверхновую. Фрагменты оболочки могут достигать границ пузыря и обогащать окружающий газ тяжелыми элементами. Дальнейшее перемещение обогащенного газа определяется динамикой пузырей, всплывающих под действием архимедовой силы.

Показано, что будущие измерения уширения рентгеновских спектральных линий в скоплениях галактик позволят напрямую исследовать структурную функцию турбулентных движений (Журавлева и др., 2012). Сравнение уширения и сдвига центра линии также позволят оценить форму спектра мощности поля скоростей. Современные обсерватории позволяют получать оценки скоростей движения газа, наблюдая эффект резонансного рассеяния. Эти оценки заметно варьируются от объекта к объекту (де Плаа и др., 2012), что свидетельствует о значительной переменности в амплитуде движений. Такая переменность связана с активностью сверхмассивных черных дыр в центрах галактик.

Используя результаты численных расчетов протестирован простой и быстрый метод оценки массы эллиптических галактик и скоплений галактик. Определение масс таких объектов, как эллиптические галактики и скопления галактик, имеет важнейшее значение для космологии. Современные обзоры содержат информацию о миллионах галактик и тысячах скоплений галактик на различных красных смещениях, измеряя массы которых можно построить функцию масс и получить ограничения на космологические параметры. Однако, набор измеряемых параметров для индивидуальных объектов зачастую весьма ограничен, что не позволяет проводить детальный анализ каждой галактики/скопления. Поэтому необходимы простые и быстрые методы измерения массы, базирующиеся на минимальном наборе данных и обеспечивающие несмещенную её оценку. В работе (Лыскова и др. 2012) обсуждается метод определения круговой скорости эллиптических галактик и скоплений галактик на основе данных наблюдений в оптическом диапазоне – поверхностной яркости и дисперсии лучевых скоростей. Метод позволяет быстро и с разумной точностью получить несмещенную оценку круговой скорости.

#### Публикации

*Churazov, E., Vikhlinin, A., Zhuravleva, I., Schekochihin, A., Parrish, I., Sunyaev, R., Forman, W., Bohringer, H., Randall, S., 2012, "X-ray surface brightness and gas density fluctuations in the Coma cluster", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 421, 1123-1135.*

*Friedman, S.H., Heinz, S., Churazov, E., 2012, "All Curled up: A Numerical Investigation of Shock-Bubble Interactions and the Role of Vortices in Heating Galaxy Clusters", The Astrophysical Journal 746, 112.*

*Chugai, N.N., Churazov, E.M., Sunyaev, R.A., 2011, "Type Ia supernovae and stellar winds in relativistic bubbles driven by active galactic nuclei", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 414, 879-887.*

*Zhuravleva, I., Churazov, E., Kravtsov, A., Sunyaev, R., 2012, "Constraints on the ICM velocity power spectrum from the X-ray lines width and shift", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 422, 2712-2724.*

*de Plaa, J., Zhuravleva, I., Werner, N., Kaastra, J.S., Churazov, E., Smith, R.K., Raassen, A.J.J., Grange, Y.G., 2012, "Estimating turbulent velocities in the elliptical galaxies NGC 5044 and NGC 5813", Astronomy and Astrophysics 539, A34.*

*Zhuravleva, I., Churazov, E., Kravtsov, A., Lau, E.-T., Nagai, D., Sunyaev, R. 2012. "Quantifying properties of ICM inhomogeneities." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 190.*

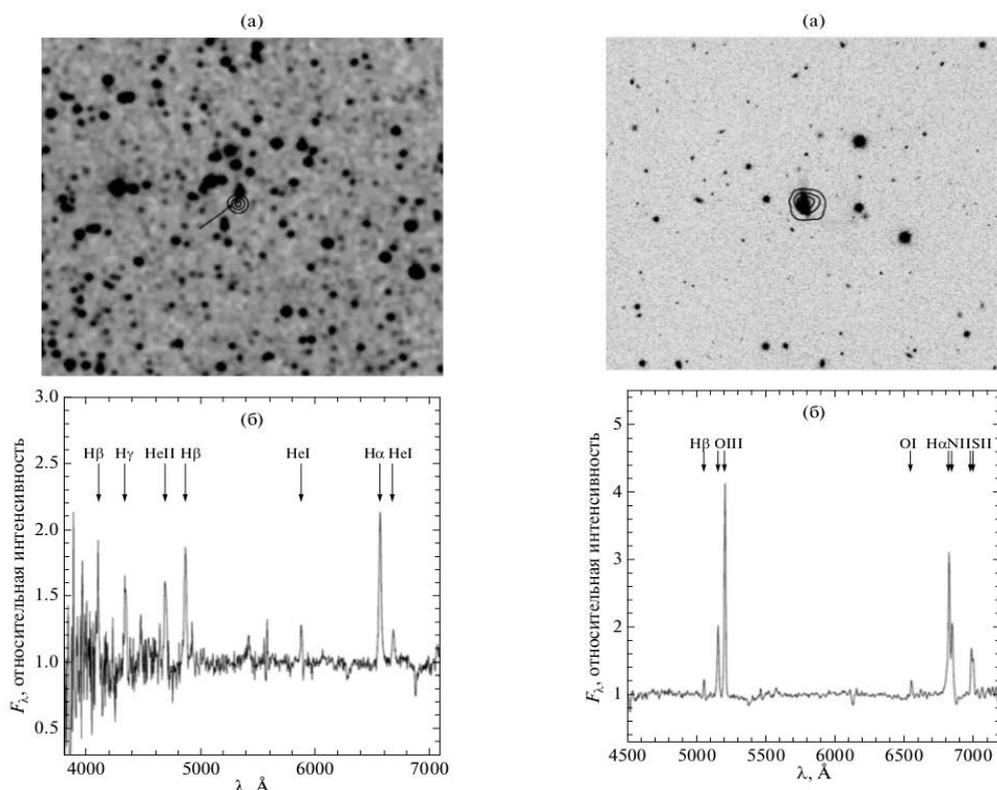
*Arevalo, P., Churazov, E., Zhuravleva, I., Hernandez-Monteagudo, C., Revnivtsev, M., 2012. "A Mexican hat with holes: calculating low-resolution power spectra from data with gaps.", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 426, 1793-1807.*

*Lyskova, N., Churazov, E., Zhuravleva, I., Naab, T., Oser, L., Gerhard, O., Wu, X., 2012., "Testing a simple recipe for estimating galaxy masses from minimal observational data.", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 423, 1813-1824.*

### **Рентгеновские двойные системы**

Представлены результаты исследований аperiodической переменности яркости аккрецирующей двойной системы с белым карликом SS Cyg в оптическом диапазоне. Основной массив наблюдательных данных, представленных в статье, был получен фотометром ANDOR/iXon DU-888, установленным на телескоп РТТ-150, что позволило достичь рекордного для ПЗС фотометров временного разрешения до 8 мсек. Полученные спектры мощности переменности яркости источника позволили показать, что аperiodическая переменность содержит информацию о внутренней границе оптически толстого течения в двойной системе. Показано, что внутренняя граница оптически толстого аккреционного диска в максимуме болометрической кривой блеска источника, т.е. на пике мгновенного значения темпа аккреции на белый карлик, подходит вплотную к поверхности белого карлика, в то время как в периоды выключенного состояния оптически толстый аккреционный диск обрезается на расстояниях  $8 \times 10^9 \text{ см} \sim 10 \text{ RWD}$ . Предложено, что изучение параметров спектров мощности аккрецирующих белых карликов позволяет отслеживать положение внутренней границы аккреционного диска в двойной системе, что, в частности, позволяет получать оценки массы аккрецирующего объекта. (Ревнивцев и др., 2012)

### **Рентгеновские источники**



Продолжены работы по оптическому отождествлению источников жесткого рентгеновского излучения из обзоров всего неба обсерваториями ИНТЕГРАЛ и Swift. Оптические наблюдения проводились в 2011 г. на 6-м телескопе БТА и 1.5-м телескопе РТТ-150 (рис. 3). Показано, что два источника (SWIFT J2237.2+6324 и SWIFT J2341.0+7645) относятся к классу катаклизмических переменных (предположительно полярных или промежуточных полярных). Измеренная ширина эмиссионных линий оказывается достаточно большой ( $F W_{HM} \sim 1525 \text{ \AA}$ ), что свидетельствует о присутствии в системах протяженных быстровращающихся ( $v \sim 400\text{--}600 \text{ км/с}$ ) аккреционных дисков. Помимо уширения линий, для источника SWIFT J2341.0+7645 обнаружено изменение положений их центроидов, что скорее всего связано с орбитальным движением белого карлика в двойной системе. Два других исследуемых объекта (SWIFT J0003.3+2737 и SWIFT J0113.8+2515) имеют внегалактическое происхождение: первый является сейфертовской галактикой второго типа, второй – блазаром, находящимся на красном смещении  $z = 1.594$ . Помимо оптических спектров, для всех источников приведены рентгеновские спектры в диапазоне энергий 0.6–10 кэВ, полученные по данным телескопа XRT обсерватории Swift. (Лутовинов, 2012)

### Рентгеновское излучение звездообразующих галактик в местной части Вселенной и на космологических красных смещениях

Продолжены работы по исследованию рентгеновского излучения от звездообразующих галактик в локальной Вселенной и на космологических красных смещениях. На основе наблюдений близких галактик обсерваторией Чандра показано, что рентгеновское излучение горячей межзвездной среды линейно пропорционально темпу звездообразования (SFR) в широком диапазоне масс галактик и темпов звездообразования и составляет  $\sim 1/3$  от полной светимости звездообразующих галактик в диапазоне 0.5 – 8 кэВ. Получена оценка эффективности преобразования механической энергии сверхновых в тепловую энергию межзвездной среды. Получены ограничения на эволюцию удельной рентгеновской светимости звездообразующих галактик (отношение  $L_X/SFR$ ) с красным смещением. На основе отношения  $L_X/SFR$ , измеренного для близких галактик, и истории звездообразования во Вселенной, вычислен вклад звездообразующих галактик в космический рентгеновский

фон, ~5–15% в мягком диапазоне. С другой стороны известно, что  $\geq 85$ –90 % рентгеновского фона обеспечивается излучением активных ядер галактик. Сравнение этих двух величин показывает, что удельная рентгеновская светимость  $L_X/SFR$  звездообразующих галактик на космологических красных смещениях не могла заметно превышать локальное значение – не более чем в 2 раза на красных смещениях  $z \leq 2$ . Превышение этого отношения в 10 раз возможно только для далеких галактик на  $z \geq 3$ –4. В режиме малого темпа звездообразования  $L_X/SFR$  не могло превышать локальное значение более чем в ~2-3 раза. Т.о. продемонстрировано, что формирование компактных объектов и рентгеновских двойных происходило одинаково в локальной Вселенной и при  $z \sim 1$ –2, и что интенсивное звездообразование, происходившее при  $z \sim 1$  не сопровождалось формированием заметного числа экзотических объектов. (Гильфанов, Сюняев, 2012)

### Активные ядра галактик

Оценены массы 68 сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в близких ( $z < 0.15$ ) активных ядрах галактик, зарегистрированных обсерваторией ИНТЕГРАЛ в жестком рентгеновском диапазоне (17— 60 кэВ) вне плоскости Галактики ( $|b| > 5^\circ$ ). Использовались известные соотношения между массой СМЧД и 1) инфракрасной светимостью звездного балджа (по данным обзора 2MASS), 2) характеристиками широких эмиссионных линий (по данным телескопа РТТ-150). Для ряда объектов также проведено сравнение с более точными оценками массы СМЧД, полученными методом эхокартирования и по результатам прямых динамических измерений. Массы СМЧД, полученные по корреляции со светимостью балджа, оказываются систематически выше оценок, сделанных другими методами. Для всех активных ядер галактик найдено отношение болометрической светимости к критической Эддингтоновской светимости. Оно составляет от 1 до 100% для подавляющего большинства объектов. (Хорунжев и др., 2012)

Расчитаны статистические свойства выборки АЯГ, которая будет получена в результате обзора неба телескопом eРозита обсерватории СПЕКТР-РГ. В ходе 4-х летнего обзора неба будет задетектировано 3 млн. АЯГ. Расчитаны их распределения по светимости и красному смещению, и распределение их яркости в оптическом диапазоне. Рассмотрены перспективы исследования крупномасштабной структуры Вселенной и измерения космологических параметров при помощи АЯГ. (Гильфанов, Сюняев, Сазонов 2012)

### Скопления галактик

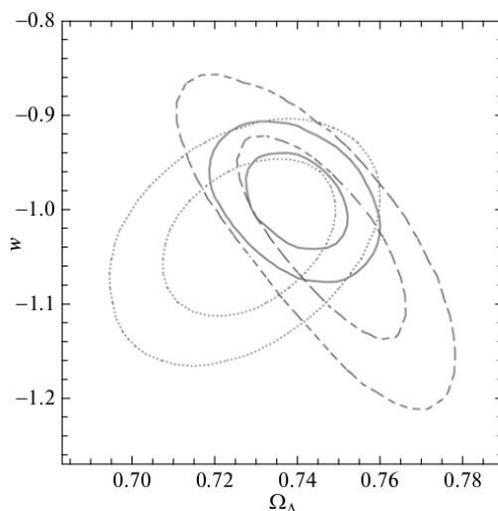


Рисунок 4. Уточненные параметры темной энергии

Представлены ограничения на космологические параметры, полученные путем объединения

данных по измерениям функции масс скоплений галактик и новых космологических данных, полученных за последние три года: измерений анизотропии реликтового излучения при помощи спутника WMAP, мелкомасштабной анизотропии с помощью южного полярного телескопа (SPT), новых данных по измерениям постоянной Хаббла, наблюдениям барионных акустических осцилляций и сверхновых типа Ia. Получены новые ограничения на сумму масс нейтрино  $\Sigma m_\nu$  и эффективное число видов нейтрино  $N_{\text{eff}}$ . В модели с произвольным числом массивных нейтрино ограничения на эти параметры становятся существенно менее строгими, при этом имеющиеся космологические данные согласуются с предположением о ненулевой суммарной массе нейтрино  $\Sigma m_\nu \approx 0.4$  эВ и числе видов нейтрино больше стандартного значения,  $N_{\text{eff}} > 4$ . Эти ограничения сравниваются с результатами экспериментов по поиску осцилляций нейтрино на коротких базисах. Получены наиболее сильные на сегодняшний день ограничения на параметры уравнения состояния темной энергии. Показано, что, с учетом систематических неопределенностей, ограничения на параметры темной энергии из имеющихся данных по функции масс скоплений не уступают по силе ограничениям из наблюдений сверхновых типа Ia. (Буренин, Вихлинин, 2012)

На Российско-Турецком 1.5-м телескопе начаты работы по оптическому отождествлению скоплений галактик, обнаруженных по измерениям эффекта Сюняева-Зельдовича в обзоре всего неба космической обсерватории им. Планка. Проведены наблюдения более чем 80 источников, среди которых было обнаружено около 60 скоплений галактик, для 37 скоплений были получены спектроскопические измерения их красных смещений. Эти данные были использованы в нескольких работах, выполненных по данным обсерватории им. Планка. (Буренин Р. А., Чуразов Е. М., Сюняев Р. А., Гильфанов М.Р., Коллектив сотрудников по работе с данными обсерватории им. Планка, *Planck Collaboration*, 2012a, б, в, г)

### **Глубокий обзор галактики большое Магелланово облако в жестких рентгеновских лучах**

В 2003–2012 гг. обсерваторией ИНТЕГРАЛ были проведены длительные наблюдения галактики Большое Магелланово Облако (БМО) с общей экспозицией  $\sim 7$  Мсек. В настоящее время это один из самых глубоких обзоров внегалактических полей в жестких рентгеновских лучах (20–60 кэВ), и самое глубокое наблюдение ближайшей к нам галактики. В обзоре было зарегистрировано более 20 источников разной природы, десять из которых в разное время были открыты обсерваторией ИНТЕГРАЛ. Среди зарегистрированных объектов 7 массивных рентгеновских двойных систем (НМХВ), 2 пульсара (причем жесткое рентгеновское излучение от одного из них зарегистрировано впервые) и одна маломассивная двойная система относятся к населению самого БМО, 6 являются далекими галактиками или квазарами, 2 объекта принадлежат нашей Галактике, еще один (SMC X-1) – Малому Магелланову Облаку. Природа еще двух источников пока не ясна. В работе также представлены результаты статистического анализа популяции НМХВ в БМО и активных ядер галактик, регистрируемых в его направлении. Показано, что при высоких светимостях ( $L_X \geq 2 \times 10^{36}$  эрг/с) функция светимости НМХВ описывается степенным законом с наклоном  $\alpha \approx 1.8$ . Этот результат хорошо согласуется с измерениями функции светимости как в самом БМО, но проведенными в мягком рентгеновском диапазоне энергий, так и в других галактиках. В то же время число зарегистрированных активных ядер галактик в направлении БМО оказывается существенно меньшим по сравнению с числом активных ядер галактики, регистрируемых в других направлениях, в частности, в направлении на источник 3C273. Последнее подтверждает сделанное ранее предположение о неоднородности распределения вещества в локальной Вселенной.

*Grebenov S.A., Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Mereminskiy I.A., «Deep Hard X-ray Survey of the Large Magellanic Cloud», MNRAS, принята к публикации, (2012)*

Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Цыганков С.С., «Функция светимости массивных рентгеновских двойных систем и анизотропия распределения активных ядер галактик в направлении Большого Магелланова Облака», *Письма в АЖ*, 38, 557-561 (2012)

### **Глубокое сканирование рентгеновского неба поперек галактической плоскости**

В результате работ нашей группы в 2006-2009 годах было определено, что протяженное излучение Галактики (так называемый рентгеновский "хребет" Галактики) в рентгеновском диапазоне на энергиях выше 2-3 кэВ формируется в результате суммарного излучения большого количества галактических источников, преимущественно аккрецирующих белых карликов и коронально активных звезд. Этот вывод позволяет использовать спектральные характеристики протяженного излучения Галактики для измерения вариаций состава звездного населения в Галактике.

Наблюдаемый спектр "хребта" есть результат сложения типичных спектров аккрецирующих белых карликов и коронально активных звезд в определенной доле пропорции. Если какая-то часть звездной популяции имеет особенности в своем пространственном распределении, например, распределена шире (до больших высот над галактической плоскостью), то это можно обнаружить изучив изменения в энергетическом спектре "хребта" Галактики в разных направлениях.

Для этого нами была инициирована большая (общей продолжительностью 380 килосекунд) программа наблюдений на орбитальной обсерватории RXTE - обсерватория сканировала на небе полосу длиной 30 градусов в направлении перпендикулярном к плоскости Галактики. Комбинация большого времени наблюдений и большой собирающей площади обсерватории позволила получить распределение поверхностной яркости рентгеновского неба с рекордной чувствительностью.

Анализ полученных данных позволил получить ряд важных результатов:

- 1) получена оценка объемной плотности излучения звездного населения Галактики
- 2) показано, что энергетический спектр "хребта" Галактики не изменяется статистически значимо при удалении от Галактической плоскости. Поставлен верхний предел на объемную плотность звездного населения, гипотетически имеющего распределение, более широкое, чем распределение звезд.
- 3) на Галактической широте -12-18 градусов обнаружена эмиссионная особенность, которую можно объяснить излучением плазмы с характерной температурой 1-2 кэВ. Обнаруженная особенность может быть объяснена излучением неизвестного до сих пор остатка вспышки сверхновой на расстоянии несколько сотен парсек от Солнца.

Ревнивцев М.Г., Мольков С.В.

*Revnivtsev, Mikhail G.; Molkov, Sergey V. "Results from a deep RXTE/PCA scan across the Galactic plane", MNRAS 2012, 424, 2330*

### **9-тилетний рентгеновский обзор галактики обсерватории интеграл.**

В работе представлены результаты 9-ти летнего рентгеновского обзора плоскости Галактики международной гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ. Используя специально разработанные алгоритмы восстановления изображений, были получены наиболее чувствительные на данный момент карты галактической плоскости в трех диапазонах энергий 17-60, 17-35 и 35-80 кэВ. В опорной полосе энергий 17-60 кэВ были зарегистрированы 402 источника рентгеновского излучения. Данный обзор обладает исключительной полнотой оптической идентификации 92%, что позволяет делать полноценный анализ различных популяций

галактических источников. Публикация обзора привела к выпуску 9-ти астрономических телеграмм и двух пресс-релизов.

*Р.А. Кривонос, С.С. Цыганков, А.А. Лутовинов, М.Г. Ревнивцев, Е.М. Чуразов, Р.А. Сюняев «INTEGRAL/IBIS nine-year Galactic hard X-ray survey» Astronomy and Astrophysics, Volume 545, A27 (2012)*

### **Структура внутренней части аккреционного потока у аккрецирующих белых карликов.**

Физические условия в аккреционных дисках в двойных системах (а так же и у сверхмассивных черных дыр) могут в разных частях значительно отличаться. В частности, надежно показано, что вокруг аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд существуют как оптически толстые, более холодные, диски, так и более горячие оптически тонкие корональные течения. Достаточно долгое время считалось, что аккреционные диски вокруг немагнитных мелких карликов доходят в оптически толстом режиме вплоть до поверхности белого карлика, где переходят в так называемый пограничный слой. В случае наличия большого магнитного поля у белого карлика аккреционный диск обрезается магнитосферой белого карлика и течение вещества после этого идет по силовым линиям магнитного поля. В работах прошлых лет наш коллектив разработал метод определения внутренней границы аккреционного диска по результатам наблюдений аperiodической переменности аккрецирующих объектов. В настоящем цикле работ мы применили этот метод для определения структуры аккреционного потока у немагнитных белых карликов. Мы использовали как данные оптического телескопа РТТ150, так и данные орбитальной рентгеновской обсерватории ХММ-Ньютон. В результате нами было показано, что вокруг немагнитных белых карликов в так называемом выключенном состоянии оптически толстый аккреционный диск заканчивается на определенном удалении от белого карлика (на 3-10 радиусах БК), а во время интенсивной аккреции, когда темп перетекания вещества в аккреционном диске существенно увеличивается, внутренняя граница аккреционного диска пододвигается к поверхности БК. Результаты этих работ впервые подтверждают с наблюдательной точки зрения теоретические модели, предсказывающие испарение внутренних частей аккреционного диска в немагнитных белых карликах.

Ревнивцев М.Г., Буренин Р.А., Ткаченко А.Ю., Павлинский М.Н., Сюняев Р.А.

*Ревнивцев М.Г., Буренин Р.А., Ткаченко А.Ю., Хамитов И.М., Ак Т. Мерлони А., Павлинский М.Н., Сюняев Р.А. “об изменении внутренней границы оптически толстого аккреционного диска вокруг белых карликов на примере карликовой новой SS Cyg” Письма в Астрономический Журнал, 2012, 38, 271*

*Balman S., Revnivcev M. “X-ray variations in the inner accretion flow of Dwarf Novae” A&A принято к печати*

### **Исследования сверхмассивных черных дыр**

По данным инфракрасных наблюдений космическим телескопом им. Спитцера статистически полной выборки 68 близких активных ядер галактик из жесткого рентгеновского обзора неба обсерватории ИНТЕГРАЛ измерен относительный вклад в болометрическую светимость сейфертовских галактик излучения аккреционного диска, горячей короны и пылевого тора. Показано, что светимость диска пропорциональна

светимости жесткого рентгеновского излучения короны, превышая ее примерно в два раза. Это всего в два раза меньше, чем соответствующее отношение для типичных квазаров во Вселенной. Таким образом, в горячей короне аккреционного диска генерируется значительная и примерно постоянная дMasses and accretion rates of supermassive black holes in active galactic nuclei from the INTEGRAL surveyоля полной светимости, излучаемой при активной аккреции вещества на сверхмассивные черные дыры. Из этого в частности следует, что жесткое излучение активных ядер галактик способно разогревать окружающий межзвездный газ до высоких температур и тем самым влиять на эволюцию галактик.

Полученные в последнее время с космических обсерваторий и наземных телескопов данные говорят о том, что рост сверхмассивных черных дыр играет важную роль в формировании и эволюции галактик. Однако пока еще не совсем ясно, как происходит аккреция вещества на сверхмассивные черные дыры и какое влияние связанное с этим энерговыделение оказывает на окружающую межзвездную среду. Наше исследование было основано на каталоге АЯГ, составленного по данным обзора всего неба в жестких рентгеновских лучах обсерватории ИНТЕГРАЛ. Уникальность данной выборки состоит в том, что она практически не подвержена эффектам селекции, связанным с поглощением излучения на луче зрения, от которых страдают обзоры, проводимые в других диапазонах энергий. Задача состояла в том, чтобы измерить массы сверхмассивных черных дыр различными методами и выяснить, как различные оценки согласуются между собой. В том числе использовались известные корреляции масс черных дыр с массами звездных балджей и параметрами широких эмиссионных линий АЯГ. При этом для 20 объектов использовались данные, полученные на российско-турецком 1.5-метровом телескопе, расположенном вблизи г. Анталья. Оказалось, что широко используемые оценки масс черных дыр по корреляции с массой балджа оказываются систематически завышены для черных дыр с массой ниже 100 миллионов масс Солнца.

*Sazonov, S.; Willner, S.P.; Goulding, A.D.; Hickox, R. C.; Gorjian, V.; Werner, M.W.; Churazov, E.; Krivonos, R.; Revnivtsev, M.; Sunyaev, R.; Jones, C.; Murray, S.S.; Vikhlinin, A.; Fabian, A.C.; Forman, W.R.*

*«Contribution of the Accretion Disk, Hot Corona, and Obscuring Torus to the Luminosity of Seyfert Galaxies: INTEGRAL and Spitzer Observations»*

*The Astrophysical Journal 757, 181 (2012)*

*Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Ткаченко А.Ю.*

*«Массы и темпы аккреции сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактиках из обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ»*

*Письма в Астрономический журнал 38, 539 (2012)*

## **Раздел Радиоинтерферометр**

научный руководитель – д.ф.м.н. Л.И. Матвеевко, тел. 333-23-89, [matveen@iki.rssi.ru](mailto:matveen@iki.rssi.ru)

ИКИ и Институтом Прикладной Астрономии введена в действие система КВАЗАР на волнах  $\lambda = 1.35$  и  $\lambda = 18$  см. Начаты регулярные наблюдения астрономических объектов в поляризованном свете в линиях  $\text{H}_2\text{O}$  мазерного излучения и в линиях гидроксидов ОН. В объекте Ориона КЛ на скорости  $v = 7.6$  км/с обнаружен биполярный выброс, ориентированный под углом  $-37^\circ$  и компактная компонента  $v = 7.0$  км/с. Уровень линейной поляризации равен  $m = 62\%$  и  $m = 39\%$  соответственно.

Исследована структура квазара 3C 345 с предельным угловым разрешением 20 мксек. дуги. Установлено, что окружающее вещество аккрецирует на диск, перетекает к центру и эжектируется в виде вращающегося биполярного потока со скоростью  $v \leq 0.1c$ . Остаточное вещество выпадает на черную дыру. Во вращающихся потоках возбуждаются

продольные магнитные поля, ускоряющие либо замедляющие потоки джета - контрджета. Эжектированный поток джета ускоряется до видимой скорости  $v \approx 8$  с. Предполагается, что сверхсветовое движение – результат рефракции.

## Публикации

1. Л. И. Матвеевко, В. А. Демичев, А. В. Ипатов, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис «Поляризация мазерного излучения H<sub>2</sub>O источника Орион KL в эпоху 2011.7», Письма в АЖ, т.38 № 9, с. 645, 2012
  2. Л. И. Матвеевко, В. А. Демичев, А. В. Ипатов, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис «Активная область звездообразования в Орионе КЛ, эпоха 2012», Письма в АЖ, т.38 № 12, с. 853, 2012.
  3. Л.И.Матвеевко, С.С.Сиваконь, С.Г.Джорстадт, А.П.Маршер. «Активная область квазара 3С 345» в печати.
1. Проведены испытания и введены в действие пункты системы КВАЗАР: Светлое и Зеленчукская на волну 1.35 см. Отработана методика спектральных наблюдений. Тестированы электрические параметры антенн. (совместно с Институтом Прикладной Астрономии РАН)
  2. Введен в действие спецпроцессор. Проводится регулярная обработка данных РСДБ наблюдений.
  3. Проведены тестовые РСДБ наблюдения объектов Орион КЛ и W49 на трех станциях системы «КВАЗАР», на волне 1.35, 18 см. Данные обрабатываются.
  4. Начаты регулярные наблюдения объекта Орион КЛ в линиях H<sub>2</sub>O мазерного излучения, в том числе в поляризованном свете на радиоинтерферометре Светлое-Зеленчукская, рис.1. [1][2]

В истекшем году начат мониторинг объекта Орион КЛ в поляризованном излучении на радио интерферометре Светлое-Зеленчукская. Построены радиокарты в мазерном излучении. В январе 2012 г. в период, предшествующий высокой активности Ориона КЛ, обнаружено мазерное излучение двух компонент на скорости  $v = 7.0$  км/с и  $v = 7.6$  км/с (рис.5а)[2]. Повышенное излучение, достигающее 220 кЯн, наблюдалось 14.05.2012. Ширина линии практически не меняется и равна  $\Delta v = 0.46$  км/с.

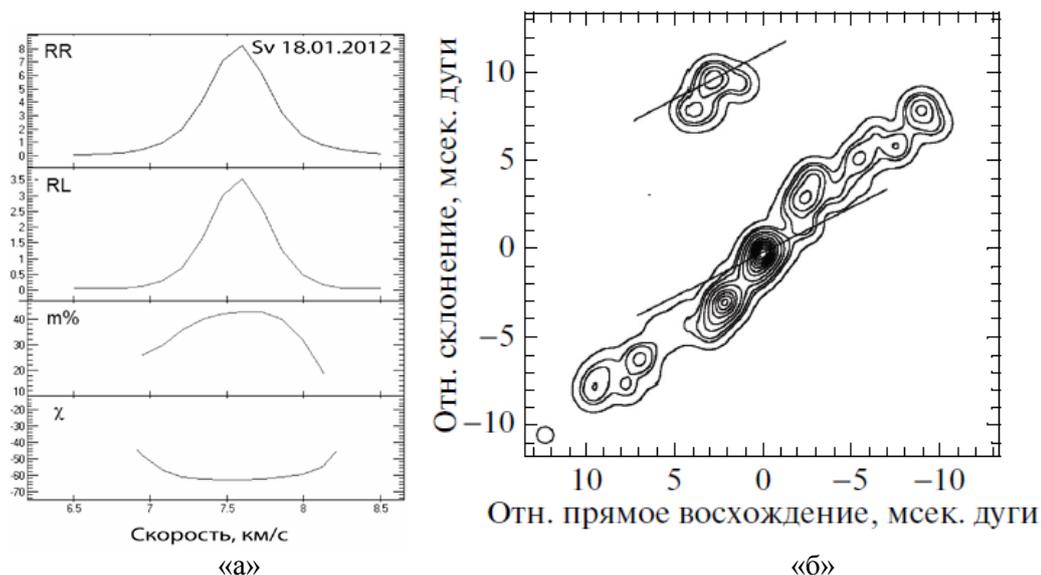


Рис.5. Орион KL, эпоха 18.01.2012. а - профиль линии Ориона КЛ в полном - RR и поляризованном - RL излучении в относительных единицах, уровень поляризации  $m$  в процентах и ориентация  $X$  в градусах, полученные на радиотелескопе в Светлом: б – структура активной области, построенная по данным интерферометра Светлое-Зеленчукская.

Подтверждено, что структура активной области в эпоху 2012 г. состоит из биполярного потока S-образной формы, длиной около 25 мсек. дуги, ориентированный под углом –  $37^\circ$  (рис. 5б). Скорость биполярного потока равна  $v = 7.6$  км/с в местной системе покоя. Размеры, ориентация, скорость биполярного потока сохранились прежними. Излучение линейно поляризовано и достигает  $m = 62\%$ . В отличие от предшествующих эпох, в активной области на скорости 7.0 км/с обнаружена компонента, которая удалена на расстояние  $\sim 12$  мсек. дуги. Уровень поляризации излучения компоненты достигает  $m = 39\%$ .

### ***Модель активной области.***

Произведено уточнение модели активной области в виде космического вихря - антицентрифуги. Установлен механизм эжекции, коллимации и ускорения биполярного потока [3-5].

### ***Исследование кинематики джетов квазаров***

Исследована тонкая структура квазара 3C 345 в поляризованном излучении на волне  $\lambda=7$  мм за период 1998 – 2001 гг. и  $\lambda=2$  см 1998-2000 гг. с предельным угловым разрешением, достигающим 20 мсек. дуги (1 мсек. дуги соответствует 3.8 пк). Выделена структура ядра: диск – биполярный поток (рис.2) [6]. Показано: окружающая тепловая плазма аккрецирует на диск перетекает к центру и эжектируется. Избыточный угловой момент, возникающий на расстоянии  $\varnothing_1 \approx 2.2$  пк, уносится вращающимся биполярным потоком вещества: джет и контрджет. Оставшаяся часть перетекает к центру и из центральной части, диаметром  $\varnothing_3 \approx 0.2$  пк, эжектируется высокоскоростной биполярный поток. Остаточное вещество выпадает в центральную область, где формируется плотное массивное тело – черная дыра, гравитационное поле которой ускоряет процесс аккреции и стабилизирует систему. Газодинамическая неустойчивость – прецессия определяет структуру джета – коническую расходящуюся спираль с возрастающим шагом. Структура контрджета – зеркальное отражение джета, но с меньшим шагом. Яркостная температура потока на выходе сопла контрджета достигает  $T_b \approx (10^{12} - 10^{13})$  К. Диск наклонен под углом  $\sim 60^\circ$  и затеняет поток джета на выходе сопла. Поглощение синхротронного излучения в диске определяет низкочастотную отсечку радио спектров близлежащих фрагментов потоков и вспышек. Размеры области НII достигают  $\sim 30$  пк. По мере удаления от центра плотность электронов снижается от  $N_e \approx 10^8$  см<sup>-3</sup> до  $N_e \approx 10^5$  см<sup>-3</sup> на расстоянии  $r \approx 10$  мсек. дуги.

Скорость эжекции центрального биполярного потока плазмы не превышает  $v \leq 0.1c$ . На расстоянии  $\sim 4$  пк от сопла поток ускоряется до видимой скорости  $v \approx 8$  с. Наблюдаемый эффект может определяться движением потока с околосветовой скоростью в направлении на наблюдателя, что само по себе представляет определенные трудности. Сколь угодно большой может быть фазовая скорость излучения в плазме, что эквивалентно рефракции. Соответствующие изменения плотности в окружающей тепловой плазме могут объяснить наблюдаемые эффекты.

Обнаруженные параллельные центральному биполярному потоку цепочки компонент соответствуют тангенциальным направлениям колец в стенке вращающегося низкоскоростного биполярного потока (рис. 2в). Кольца определяются возбуждаемыми токами в стенках пустотелого вращающегося потока. Расстояние между кольцами с удалением от диска уменьшается с 0.5 мсек. дуги до 0.4 мсек. дуги. Размер поперечных

сечений колец соответствует 0.02 мсек. дуги или 0.08 пк. Эта структура – соленоид, магнитное поле которого ориентировано вдоль оси. Аналогична ориентация поля и в высокоскоростном вращающемся потоке - параллельна скорости его движения. Скорости поступательного движения джета и контрджета параллельны и анти параллельны магнитному полю вращающегося диска, что определяет их ускорение или торможение соответственно. Это объясняет и малую протяженность контрджета и видимость джета на больших расстояниях – компенсацию потерь синхротронного излучения.

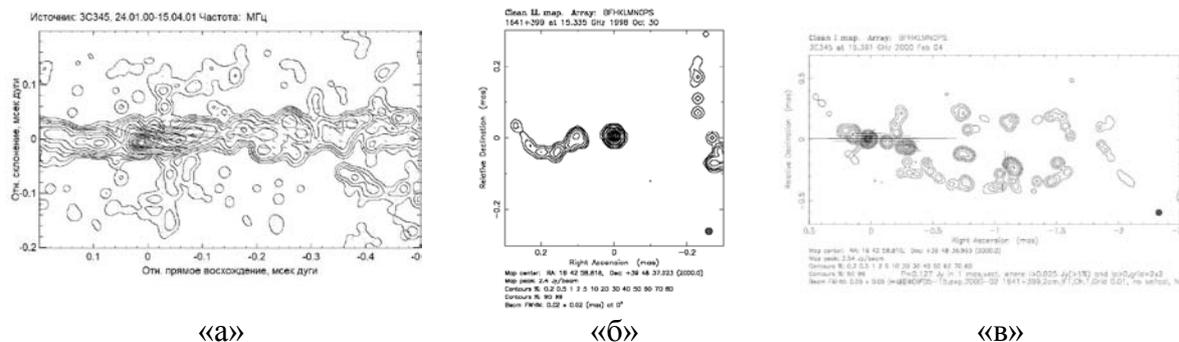


Рис. 6

а – распределение яркости центральной части квазара 3С 345 в поляризованном излучении, разрешение 20 мксек,  $\lambda = 7$  мм: джет и контрджет. В центре - аккреционный диск, наблюдаемый с ребра. Из его периферийной части эжектируется низкоскоростной вращающийся пустотелый поток плазмы, из центра - высокоскоростной биполярный поток.

б - Эжектор и контрджет наблюдаемый в квазаре  $\lambda = 2$  см, разрешение 20 мксек. Излучение близлежащей части джета поглощается в диске, наклоненном в его сторону.

в - Фрагменты высоко скоростного джета и параллельные цепочки низкоскоростного потока  $\lambda = 2$  см, разрешение 50 мксек.

## Публикации

1. Л. И. Матвеевко, В. А. Демичев, А. В. Ипатов, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис «Поляризация мазерного излучения H<sub>2</sub>O источника Орион KL в эпоху 2011.7», Письма в АЖ, т.38 № 9, с. 645, 2012
2. Л. И. Матвеевко, В. А. Демичев, А. В. Ипатов, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис «Активная область звездообразования в Орионе КЛ, эпоха 2012», Письма в АЖ, т.38 № 12, с. 853, 2012.
3. М.Г.Абрамян, Л.И.Матвеевко. «Начальная фаза формирования протозвезды». Астрофизика. **55**. с.443-456. 2012.
4. G.A.Abrahamyan, L.I.Matveenko. «Hydrodynamic mechanism of bipolar outflow formation». International Conference . “Galaxies: origin, dynamics, structure & astrophysical discs”. (14-18).05, Sochi, Russia. 2012.
5. L.I.Matveyenko, D.A.Graham, P.J.Diamond, K.M.Zakharin, S.S.Sivakon, V.A.Demichiev & M.G.Abrahamyan, «Star Formation Region in Orion KL». GA IAU S292, China, Beijing, August, 2012.
6. Л.И.Матвеевко, С.С.Сиваконь, С.Г.Джорстадт, А.П.Маршер. «Активная область квазара 3С 345» в печати.

## Раздел Астропыль

Проведено исследование затменной системы эpsilon Возничего с использованием фотометрии в ближней инфракрасной области спектра. Совместно с ГАИШ МГУ проведены фотометрические измерения долгопериодической (период 27 лет) переменной звезды

эпсилон Возничего в стандартных астрономических полосах JHKLM. В 2012 году наблюдалось окончание затменной фазы этой системы состоящей из F-гиганта (массой 2-3 солнечных массы) и пылевого диска (что достоверно подтверждено было только интерферометрическими наблюдениями во время последнего минимума блеска) вокруг объекта неизвестной природы (возможно, звезды В-типа с массой около 6 солнечных масс). Проведен анализ данных наблюдений за период охватывающий интервал между двумя минимумами блеска с 1982 по 2012 гг. Кривые блеска во время этих минимумов оказались похожи друг на друга. Было обнаружено изменение инфракрасных показателей цвета в зависимости от орбитальной фазы, которое можно объяснить фазовой зависимостью рассеяния света F-гиганта на затмевающем его газопылевом диске (Рис. 1). Кроме того, возможно обнаружен (впервые) вторичный минимум на фазе 0.605, именно в тот момент, когда его можно ожидать исходя из кривых лучевых скоростей (рис. 2).

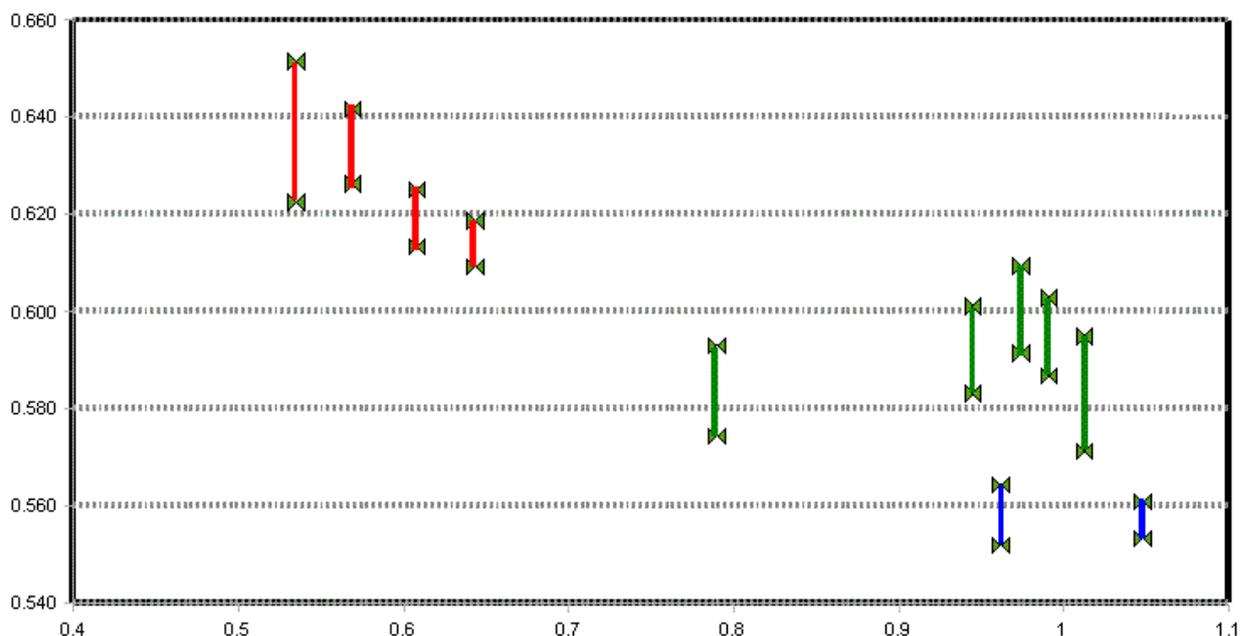


Рис. 7. Зависимость цвета J-M от фазы орбитального периода. Можно отметить более «красный» цвет в области фаз 0.5-0.6 и «посинение» непосредственно до и после затмения — в момент видимого касания затмевающим пылевым диском диска F-гиганта. Вертикальные линии соответствуют среднеквадратичному разбросу измерений.

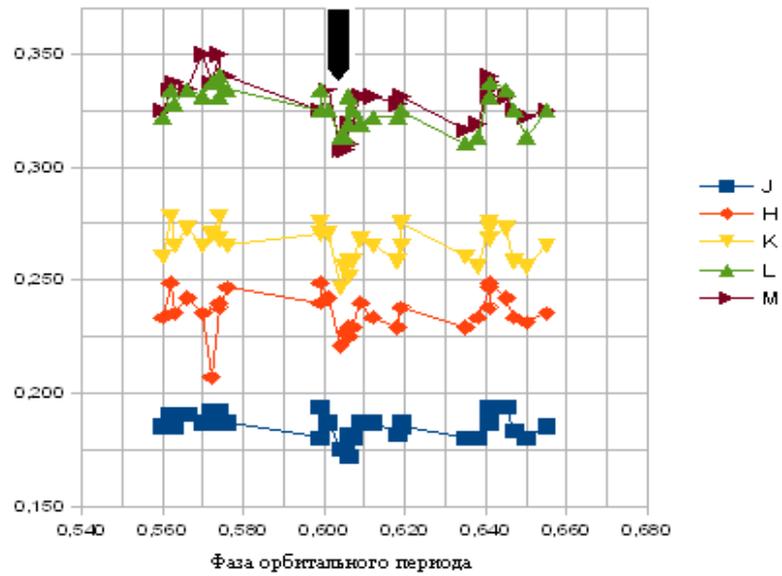


Рис. 8. Кривые блеска в инфракрасных полосах JHKLM вблизи ожидаемого (исходя из кривых лучевых скоростей) момента вторичного минимума. Ширина минимума на фазе орбитального периода 0.605 соответствует покрытию F-гигантом источника небольших размеров.

(Маслов И.А., 333-5267, [imaslov@iki.rssi.ru](mailto:imaslov@iki.rssi.ru)).