

УДК 524.7

Д. А. Якубовський¹, Д. О. Савченко¹, Т. О. Буско²

¹ Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ПОБУДОВА КАРТ НЕБА В РЕНТГЕНІВСЬКОМУ ДІАПАЗОНІ ТА ЇХНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПОШУКУ ЛІНІЇ РОЗПАДУ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

Описано процес побудови карт неба в діапазонах 2–5 та 5–10 кеВ на базі даних публічних спостережень космічної рентгенівської обсерваторії XMM-Newton. На прикладі пошуку лінії розпаду темної матерії в рентгенівському діапазоні показано, як отримані карти неба можна використати для вирішення нагальних задач астрономії.

Ключові слова: рентгенівська астрономія, карта неба, лінія розпаду темної матерії.

ВСТУП

Типова вартість сучасних наукових космічних місій сягає декількох сотень мільйонів євро, тому навіть часткове фінансування такого проєкту є досить обтяжливим для української науки. На щастя, поточна політика розповсюдження даних космічних місій (згідно з якою дані разом зі стандартизованим програмним забезпеченням для їхньої обробки стають публічно доступними через «пропрієтарний» період) сприяє появі малобюджетної альтернативи наукової участі в таких проєктах — створення центрів обробки публічно доступних даних. Один з подібних центрів, Віртуальну рентгенівську та гамма-обсерваторію ВІРГО (<http://virgoa.org>), було створено в 2006 р. за участі Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова, Головної астрономічної обсерваторії НАН України, фізичного факультету та Астрономічної обсерваторії Київського національного університету ім. Тараса Шевченка та центру обробки даних супутника INTEGRAL Женевського університету, із залученням коштів цільового гранту Швейцарського наукового фонду.

Незважаючи на загальний успіх проєкту ВІРГО, кількість українських астрономів, які використовують дані рентгенівських та гамма-обсерваторій, все ще залишається невеликою. Для подолання цієї проблеми в результаті виконання даного проєкту було створено веб-інтерфейс віртуальної обсерваторії ВІРГО <http://skyview.virgoa.org> у вигляді «карти неба», на якій зображається розподіл параметру (інтенсивності, значимості сигналу тощо) в області простору та інтервалі енергій, які задаються користувачем.

З аналізу великої кількості подібних веб-інтерфейсів можна відзначити, що основний прогрес в їхній розвитку пов'язаний із спрощенням доступу до даних та покращенням їхньої візуалізації. Цим двом аспектам приділено належну увагу і в нашому проєкті, проте його ключова ідея полягає у новому підході до якості даних, що надаються користувачу. На нашу думку, однією з основних причин, що стоїть на заваді використання даних в наукових роботах, є невизначеність величини систематичної похибки, яка зазвичай не враховується наявним стандартизованим програмним забезпеченням.

Дана робота присвячена опису обробки даних космічної обсерваторії XMM-Newton для по-

будови спеціалізованих карт неба в жорсткому рентгенівському (2–10 кеВ) діапазоні (розміщених на веб-сторінці проекту <http://skyview.virgo.org>), та використання отриманих результатів на прикладі пошуку лінії розпаду темної матерії.

ПОБУДОВА КАРТ НЕБА В РЕНТГЕНІВСЬКОМУ ДІАПАЗОНІ

Космічна рентгенівська обсерваторія XMM-Newton [3], запущена Європейським космічним агентством у грудні 1999 р., є однією з найважливіших на даний момент рентгенівських місій. Основні цілі обсерваторії — якомога точніші спостереження слабких точкових (а також протяжних) джерел, проведення глибоких оглядів, з можливістю отримання зображень і хорошою спектральною роздільною здатністю. Для отримання зображень використовуються фотони, відбиті від металевих дзеркал за дуже малих (ковзних) кутах падіння на дзеркало. Оскільки малість кута падіння на дзеркало сильно зменшує ефективну площу телескопа, останній роблять дуже довгим (довжина телескопа — понад 8 м), а також використовують унікальну технологію вкладених одне в одному 58 шарів гіперболічно-параболічних дзеркал. В результаті ефективна площа інструментів XMM-Newton помітно перевищує ефективну площу його найближчого аналога — американської обсерваторії Chandra. Основний інструмент обсерваторії — European Photon Imaging Camera (EPIC) — складається з трьох ПЗС-матриць-«камер» (дві камери MOS [7] і одна камера PN [6]), які фокусують зображення, отримане телескопом. Робочий діапазон енергій інструмента становить 300–10000 еВ для MOS камери і 300–12000 еВ для PN камери. Допоміжні інструменти — два рентгенівські спектрометри (RGS), що працюють в діапазоні 0.35–1.5 кеВ, і оптичний монітор (OM).

Детальне вивчення протяжних джерел задача аналізу форми спектру та статистичних властивостей рентгенівського позагалактичного фону потребує обробки з додатковим пошуком та вирізанням протяжних джерел. Стандартна процедура пакету Extended Sources Analysis Software (ESAS) [4], що є частиною програмного забезпечення XMM-SAS 13.5.0, не дає задовільного

результату (кількість знайдених джерел, радіус вирізання) та має обмежені можливості налаштування, тому нами розроблено скрипт на основі низькорівневих процедур XMM-SAS для досягнення задовільного пошуку та вирізання точкових джерел. Детальний чисельний аналіз спектру позагалактичного рентгенівського фону потребує також максимально консервативного викидання спостережень, що містять залишкову протонну складову. Ми використовуємо стандартну процедуру аналізу `Fin_over_Fout` для всіх камер, всіх спостережень, що зроблені до втрати одної з CCD-камери MOS1. Після втрати результат незалежного аналізу даних одної камери вже не може вважатись точним, тому нами розроблено і втілено в скриптах методику аналізу наявності залишкової протонної компоненти для всіх камер на основі даних з камери MOS2.

Перераховані модифікації процесу обробки спостережень дозволили провести ще один аналіз всіх доступних даних обсерваторії XMM-Newton і побудувати карти неба в діапазонах 2–5 та 5–10 кеВ [5], максимально оптимізовані до аналізу протяжних джерел, яким є і сам позагалактичний рентгенівський фон.

ПОШУК ЛІНІЇ РОЗПАДУ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

З використанням побудованих карт неба в рентгенівському діапазоні задетектовано нову лінію випромінювання на енергії приблизно 3.5 кеВ у спектрах галактики Андромеди (рис. 1) та скупчення галактик Персея [1]. Хоча дана лінія слабка, вона має чітку тенденцію до концентрації у центрах об'єктів, є сильнішою у скупченні галактик Персея, ніж у галактиці Андромеди, та відсутня в дуже тривалому комбінованому спектрі спостережень «чистого неба». Хоча для індивідуальних об'єктів наразі складно виключити можливість того, що дана лінія є інструментальним ефектом або атомною лінією випромінювання аномальної яскравості, її властивості повністю узгоджуються з лінією розпаду частинок темної матерії. Подальші детектування або недетектування цієї лінії у спектрах об'єктів допоможуть визначити її природу.

Хоча для індивідуальних об'єктів наразі складно виключити можливість того, що дана лінія є

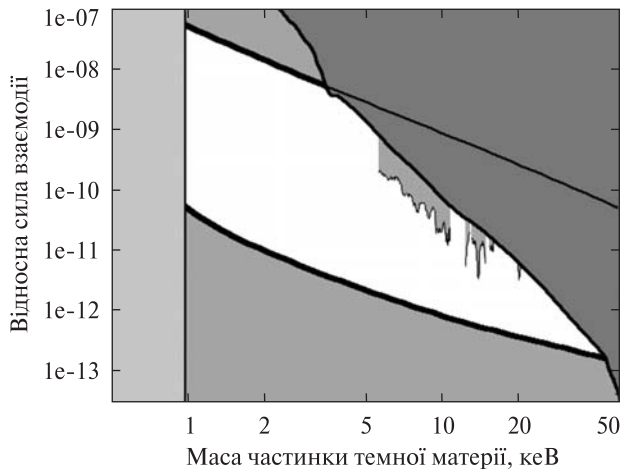
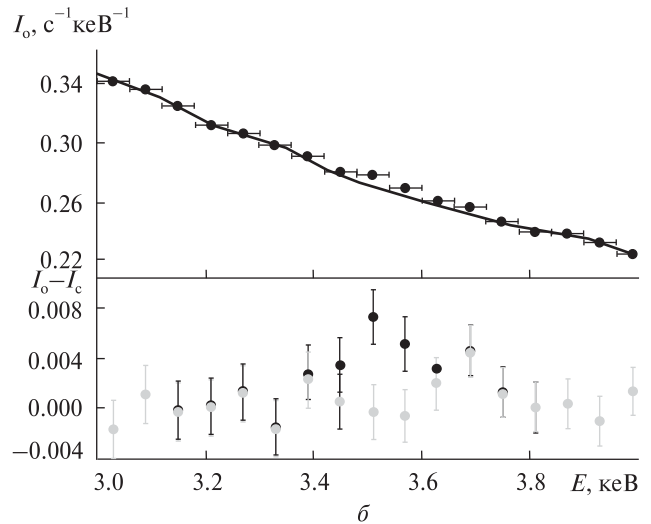
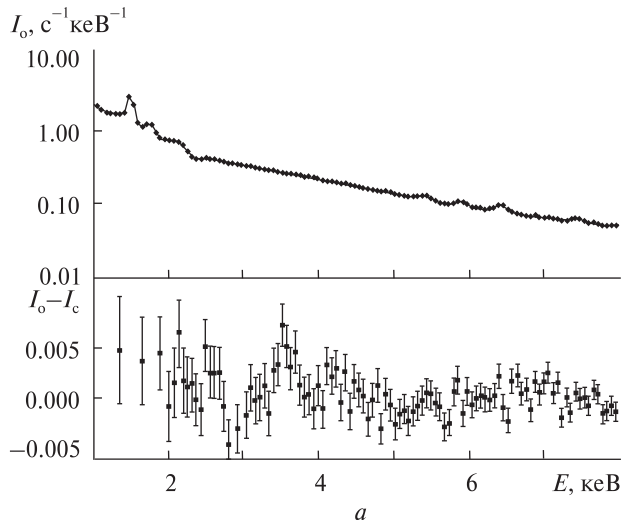


Рис. 1. Зліва (а) — повний спостережуваний потік I_o (згорі) та різниця $I_o - I_c$ між спостережуваним і модельним потоком у континуумі (знизу) від центральної частини галактики Андромеди (дані XMM-Newton) як функція енергії на інтервалі $E = 1...8$ кеВ; справа (б) — ті ж величини на інтервалі $E = 3...4$ кеВ (сірі точки — резидуали для моделей з додаванням нової лінії на 3.53 кеВ, чорні точки — без лінії)

Рис. 2. Дозволена область параметрів темної матерії, що складається зі стерильного нейтрино в рамках моделі ν MSM (біла область), порівняна з відомими обмеженнями, отриманими з аналізу різних астрофізичних та космологічних спостережень

інструментальним ефектом або атомною лінією випромінювання аномальної яскравості, її властивості повністю узгоджуються з лінією розпаду частинок темної матерії. Подальші детектування або недетектування цієї лінії у спектрах об'єктів допоможуть визначити її природу.

Для дальшого посилення відомих обмежень на параметри розпаду темної матерії та перевірки теоретично мотивованих областей простору параметрів відповідних моделей фізики частинок за допомогою наявних рентгенівських космічних обсерваторій необхідно мати спеціальні довготривалі спостереження об'єктів різних типів, домінованих темною матерією (наприклад, спіральних та сферичних карликових галактик), а також

комбінацію архівних спостережень, в яких очікується найбільший сигнал від лінії розпаду. Для цього в роботі [2] було проаналізовано 400 архівних спостережень 59 близьких галактик (що мають найбільший очікуваний сигнал від лінії розпаду) за допомогою рентгенівської обсерваторії XMM-Newton [3]. Надзвичайно велика сумарна експозиція спостережень, 5—8 Мс (що на два порядки перевищує експозицію типового глибокого спостереження XMM-Newton) призводить до появи двох суттєвих ускладнень. По-перше, велика кількість фотонів у кожному інтервалі енергій комбінованого спектру означає, що статистичні похибки не перевищують одного відсотка. Для отримання надійних обмежень на параметри лі-

нії розпаду темної матерії систематичні похибки мають бути контрольованими на аналогічному рівні. В той же час рівень систематичної похибки при спостереженнях XMM-Newton вважається суттєво вищим (на рівні 5—10 %) у зв'язку з деградацією інструмента, змінності інструментального фону з часом, неточності визначення характеристик інструмента. Для подолання цієї проблеми в роботі [2] було розроблено новий метод аналізу даних, який дозволяє контролювати систематичну похибку з необхідною точністю. В результаті було знайдено декілька нових ліній-кандидатів. Після ретельного аналізу ці кандидати були визначені як слабкі інструментальні лінії, які раніше не спостерігалися.

Після цього в роботі [2] були побудовані нові обмеження на параметри темної матерії, що розпадається, які перевіряють суттєву частину простору параметрів відповідних моделей фізики частинок. Отримані обмеження є сильнішими за попередні у кілька разів (максимум у 8.7), див. обмеження згори на рис. 2.

ВИСНОВКИ

Показано, що побудова карт неба (доступних на сайті проекту <http://skyview.virgoua.org>) на базі публічних спостережень рентгенівської обсерваторії XMM-Newton дає можливість «швидкого» доступу до даних спостережень, без необхідності розбиратися в деталях їхньої обробки. На прикладі пошуку лінії розпаду темної матерії в рентгенівському діапазоні показано актуальність отриманих карт неба для розв'язку нагальних задач рентгенівської астрономії.

Робота виконана при фінансовій підтримці «Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.» в рамках проекту «Створення Астрокосмічного центру обробки даних для вирішення задач багатохвильової астрофізики».

1. *Boyarsky A., Ruchayskiy O., Iakubovskiy D., Franse J.* Unidentified line in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and Perseus galaxy cluster // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — **113**. — 251301.
2. *Iakubovskiy D.* Constraining properties of dark matter particles using astrophysical data // *Casimir PhD Ser.* — Delft-Leiden, 2013. — 183 p.

3. *Jansen F., Lumb D., Altieri B., et al.* XMM-Newton observatory. I. The spacecraft and operations // *Astron. and Astrophys.* — 2001. — **365**. — P. L1—L6.
4. *Kuntz K. D., Snowden S. L.* The EPIC-MOS particle-induced background spectra // *Astron. and Astrophys.* — 2008. — **478**. — P. 575—596.
5. *Savchenko D. O., Iakubovskiy D. A.* Creation of 2—5 keV and 5—10 keV sky maps using XMM-Newton data // *Adv. Astron. and Space Phys.* — 2014. — **4**. — P. 51—53.
6. *Strüder L., Briel U., Dennerl K., et al.* The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The pn-CCD camera // *Astron. and Astrophys.* — 2001. — **365**. — P. L18—L26.
7. *Turner M. J. L., Abbey A., Arnaud M., et al.* The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The MOS cameras // *Astron. and Astrophys.* — 2001. — **365**. — P. L27—L35.

Стаття надійшла до редакції 20.09.15

Д. А. Якубовский¹, Д. А. Савченко¹, Т. О. Буско²

¹ Інститут теоретическої фізики ім. Н. Н. Боголюбова Національної академії наук України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ НЕБА В РЕНТЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОИСКА ЛИНИИ РАСПАДА ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Описано процесс построения карт неба в диапазонах 2—5 та 5—10 кэВ на базе данных публичных наблюдений космической рентгеновской обсерватории XMM-Newton. На примере поиска линии распада темной материи в рентгеновском диапазоне показано, как полученные карты неба могут помочь в решении актуальных задач астрономии.

Ключевые слова: рентгеновская астрономия, карта неба, линия распада темной материи.

D. A. Yakubovskiy¹, D. O. Savchenko¹, T. O. Busko²

¹ Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv

CREATION OF THE X-RAY SKY MAPS AND THEIR APPLICATION FOR A SEARCH OF THE DARK MATTER DECAY LINE

We describe a creation of the sky maps in 2—5 and 5—10 keV range using public database of observations of X-ray cosmic observatory XMM-Newton. Considering as an example a search of the dark matter decay line we show how the obtained sky maps can be used for actual astronomical tasks.

Keywords: X-ray astronomy, sky map, dark matter decay line.