Жесткое рентгеновское излучение молекулярного облака Sgr B2 после 2009 года по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ

Кузнецова Е.¹, Кривонос Р.¹, Лутовинов А.^{1,2}, Клавель М.³ 23.12.21 **НЕА2021**

¹ Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ² National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
 ³ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, Grenoble, France

Sgr A^{*} — СМЧД массой 4.3 · $10^6 M_{\odot}$, расположенная в Галактическом центре (ГЦ). Сейчас Sgr A^{*} находится в спокойном состоянии со светимостью $\sim 10^{33-34}$ эрг с⁻¹.

Была ли Sgr A* активна в прошлом?

Была предсказана возможность регистрации активности Sgr A* в недавнем прошлом по отраженному излучению, наблюдаемому в Центральной Молекулярной Зоне (ЦМЗ) (Sunyaev, Markevitch, Pavlinsky, 1993). **Проявления отраженного отражения:**

- сильная флюоресцентная линия Fe K_α на энергии 6.4 кэВ
- жёсткий рентгеновский континуум
- переменность на масштабе нескольких лет



Альтернативной гипотезой генерации рентгеновского излучения молекуряных облаков является взаимодействие нейтральной материи с низкоэнергетическими частицами космических лучей (LECR) (см. Tatischeff+2012).

Основные отличия от отраженного излучения:

- присутствие потока LECR
- отсутствие переменности

Переменность излучения молекулярных облаков в ГЦ демонстрирует прохождение фронта вспышки Sgr A* (Ponti+2010).

Отражение — главный сценарий для наблюдаемого излучения облаков ЦМЗ.

Молекулярное облако Sgr B2

Sgr B2 — наиболее массивное в ЦМЗ молекулярное облако ($\sim 10^6 M_{\odot}$).



Суммарное изображение области ГЦ по данным обсерватории Chandra. Источник: NASA/CXC/UMass/D. Wang et al.

Наблюдения ASCA обнаружили линию Fe K_{lpha} (Koyama+1996).

3

Revnivtsev+2004

Обсерватория ИНТЕГРАЛ: жесткий источник IGR J17475–2822 (далее IGR J1747) был ассоциирован с облаком Sgr B2.

18-60 кэВ



 $A\sim 1.9,\ \Gamma\sim 1.8,\ \Theta\sim 80^\circ,$ $L_{\rm X}\sim 1.5\cdot 10^{39}$ эрг с $^{-1}$



Предполагаемая вспышка — 300-400 лет назад.

4

Terrier+2010



Кривая блеска Sgr B2 в диапазоне энергий 20–60 кэВ (черные точки), полученная за период 2003–2010 гг.



Характерное время $au = 8.2 \pm 1.7$ лет сравнимо со временем прохождения света через ядро облака.

Zhang+2015



1E-05 1.2E-05 1.4E-05 1.6E-05 1.8E-05 2E-05 2.2E-05 2.4E-05 2.6E-05 2.8E-05





 $\tau \sim 11$ лет — время жизни рентгеновских фотонов.

Поток Sgr B2 в 2013 году значимо не

отличается от уровня 2012 г.

Выход на постоянный уровень?

Излучение Sgr B2 в линии Fe K_{α} (Terrier+2018)



17-летний обзор ИНТЕГРАЛ/IBIS



Krivonos R., Sazonov S., Kuznetsova E., Lutovinov A., Mereminskiy I., Tsygankov S., INTEGRAL/IBIS 17-year hard X-ray all-sky survey, 2021

17-летний обзор ИНТЕГРАЛ/IBIS



https://integral.cosmos.ru/

17-летний обзор ИНТЕГРАЛ/IBIS



https://integral.cosmos.ru/

ИНТЕГРАЛ IBIS/ISGRI

Были использованы все доступные данные с 2003 по 2019 гг. телескопа *IBIS/ISGRI*.

Жесткий источник IGR J1747 был зарегистрирован со значимостью 24.5 σ в диапазоне 30–80 кэВ. IGR J1747 пространственно совпадает с пиком плотности молекулярного газа Sgr B2 (Protheroe+2008).



Долговременная кривая блеска Sgr B2



30–80 кэВ карты области ГЦ в единицах потока мКраб. 30-80 кэВ кривая блеска демонстрирует значимую регистрацию источника Sgr B2 после 2009 г.



Линейная функция хорошо описывает данные ($\chi^2_{\rm red}=1.48/15$). Характерное время падения — $\tau_{1/2}=12\pm2$ лет.

Долговременная кривая блеска Sgr B2

Кусочно-линейная функция:

 $T_{
m break} = 2011 \pm 3$ $au_{
m 1/2} = 6 \pm 2$ Постоянный уровень $C = 0.8 \pm 0.1$ мКраб не

совместим с нулём.

Кусочно-линейная функция лучше описывает данные $(\chi^2_{\rm red}=1.09/15)$, чем простая линейная функция.





Степенной закон с экспоненциальным завалом: T1: $\Gamma = 1.4 \pm 0.6$, $E_{\rm cut} = 44^{+61}_{-18}$ keV T2: $\Gamma = 1.4$ (fixed), $E_{\rm cut} = 35^{+12}_{-8}$ keV Joint: $\Gamma = 1.4 \pm 0.5$, $E_{\rm cut} = 43^{+48}_{-17}$ keV, $C_{\rm cross} = 0.51 \pm 0.06$



В спектральной форме не наблюдаются значимые изменения до и после $\mathcal{T}_{\rm break}\sim 2011$

Модель отражения CREFL16 (Churazov+2017) согласуется с обоими спектрами с фотонным индексом вспышки $\Gamma \sim 2.3$ и фиксированными параметрами $Z/Z_{\odot} = 1.9$, $\tau_{\rm T} = 0.4$, $\mu = cos\Theta = 0$ (в соответствии с Revnivtsev+2004).

Падение потока Sgr B2, наблюдаемое в 2003-2011 гг. (T1), поддерживает сценарий отражения.

Излучение в 2012–2019 гг. (T2) может быть обусловлено **долгоживущим альбедо многократных рассеяний**, в предположении, что световой фронт вспышки Sgr A* покинул облако (Sunyaev+Churazov1998, Khabibullin+2020, Khabibullin+2022).

Кроме того, однократные рассеяния могут доминировать на масштабе всего периода наблюдений в том случае, если вся кривая блеска согласуется с линейной падающей функцией.

Многолетняя переменность излучения Sgr B2, наблюдаемая в 2003–2011 гг., противоречит сценарию космических лучей (КЛ).

Наклон спектра LECR ионов $s=2.7\pm0.5$ (модель LECRp, Tatischeff+2012) был оценен по спектру Sgr B2 за 2012–2019 гг.

Нижний предел на скорость ионизации КЛ $\zeta\sim 5.4\times 10^{-14}~{\rm H}^{-1}~{\rm s}^{-1}$ оказался значительно выше оценки, полученной в области ГЦ, $\zeta\sim (1-3)\times 10^{-15}~{\rm H}^{-1}~{\rm s}^{-1}$ (Goto+2011) и предыдущего результата для ядра Sgr B2 по данным XMM-Newton $\zeta\sim (6-10)\times 10^{-15}~{\rm H}^{-1}~{\rm s}^{-1}$ (Zhang+15).

Сценарий космических лучей не рассматривается, как главная причина остаточного излучения Sgr B2.

Сценарий неразрешенных источников

10-40 кэВ карта области Sgr B2 по данным NuSTAR.





<- 30-80 кэВ карта по данным ИНТЕГРАЛ с источниками NuSTAR.

Суммарный поток от известных рентгеновских источников по данным NuSTAR $F_{25-50 \rm keV} \sim 3.4 \times 10^{-12} \rm \ erg \ cm^{-2} \ s^{-1}$ не описывает более половины потока, наблюдаемого обсерваторией ИНТЕГРАЛ после 2011 г. $F_{25-50 \rm keV} = (7.2 \pm 0.7) \times 10^{-12} \rm \ erg \ cm^{-2} \ s^{-1}$.

Sgr B2 в линии 6.4 кэВ в 2018 г.





Падение потока жесткого континуума по данным ИНТЕГРАЛ согласуется с падением потока в линии 6.4 кэВ по данным XMM-Newton (Rogers+2021, in prep.)

Sgr B2 по данным SRG/eROSITA

Карта ЦМЗ на энергетическом диапазоне 4–8 кэВ (Khabibullin+2022).

Регистрируется только верхний предел поверхностной яркости на уровне 1σ : $\lesssim 2 \times 10^{-14}$ эрг с⁻¹ см⁻² угл. мин.⁻².



Galactic longitude

Результаты

- Источник IGR J1747, пространственно совпадающий с Sgr B2, был значимо зарегистрирован после 2009.
- Долговременная эволюция Sgr B2 подтвердила падающий характер излучения.
- Было обнаружено, то кривая блеска Sgr B2 хорошо описывается кусочно-линейной функцией с изломом в 2011 ± 3 г., после которого произошел выход излучения на постоянный уровень с потоком 0.8 ± 0.1 мКраб.
- Спектральная форма осталась неизменной после $T_{\rm break}$.
- Спектр Sgr B2 хорошо описывается моделью степенного закона с Г ~ 1.4 и экспоненциальным завалом ~ 43 кэВ.
- Природа 2003–2011 Sgr B2 излучения хорошо согласуется со сценарием отражения, в то время как природа остаточного излучения точно неизвестна.

Будущее

Степень поляризации отраженного излучения зависит от угла рассеяния Θ : $P = (1 - cos^2 \Theta)/(1 + cos^2 \Theta)$



Измерения угла и степени поляризации излучения молекулярных облаков ЦМЗ с помощью IXPE позволят подтвердить или опровергнуть сценарий отражения (Gesu+2020).

Спасибо за внимание!