

Поиск фотонного сигнала от аннигиляции частиц темной материи с помощью NuSTAR: Ограничения на $\langle\sigma v\rangle$ после 11 лет наблюдений

Докладчик: Е. И. Захаров^{1,2}

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Аннигилирующая темная материя

В данной работе мы сосредоточились на поиске сигнала от процесса «2 в 2»: $\chi + \chi \rightarrow \gamma + \gamma$. При этом $E_\gamma = m_\chi$; спектр фотонов: $dN/dE_\gamma = 2\delta(E_\gamma - m_\chi)$.

Основные кандидаты на роль частиц аннигилирующей темной материи:

1. *Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)*. Как правило, имеют массу сильно больше 1 ГэВ. Создавались вплоть до $T \sim m_\chi/20$. С тех пор они вмерозилимь (freeze-out) и имеют постоянную плотность.
2. *Feebly Interacting Massive Particle (FIMP)*. Альтернатива WIMP. Никогда не были в термальном равновесии (freeze-out). Могут иметь массу в кэВ-ом диапазоне. Имеют чрезвычайно малую константу взаимодействия.
3. *Аксионы или аксионоподобные частицы*. Классические аксионы ультралегкие (массы сильно меньше 1 eV) и связаны с решением CP-проблемы. Однако, аксионоподобные частицы могут иметь массу вплоть до 1 ГэВ.
4. *Стерильные нейтрино*. Один из главных кандидатов на роль частиц темной материи кэВ-го диапазона масс. Однако процесс аннигиляции сильно подавлен по сравнению с процессом распада.

Ожидаемый сигнал от аннигиляции частиц темной материи

Интенсивность излучения от аннигиляции частиц темной материи:

$$I_{\gamma} = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle \sigma v \rangle}{2} \frac{1}{m_{\chi}^2} \frac{dN}{dE_{\gamma}} \left\langle \frac{dJ}{d\Omega} \right\rangle$$

Здесь $\langle \sigma v \rangle$ - сечение процесса, m_{χ} — масса частицы темной материи, dN/dE_{γ} — спектр фотонов, $\langle dJ/d\Omega \rangle$ - средневзвешенное по времени значение дифференциального J-фактора, которое вычисляется следующим образом:

$$\left\langle \frac{dJ}{d\Omega} \right\rangle = \frac{1}{T_{\text{tot}}} \sum_i T_i \frac{dJ_i}{d\Omega}$$

Здесь T_i — экспозиция в i -ом наблюдении, $T_{\text{tot}} = \sum T_i$ — полное время экспозиции, $dJ/d\Omega$ — дифференциальный J-фактор для i -ого наблюдения, который вычисляется как:

$$\frac{dJ_i}{d\Omega} = \int \rho_{\text{DM}}^2(r(l_i, b_i, s)) ds$$

Здесь ρ_{DM} — профиль плотности темной материи, l_i и b_i — галактические широта и долгота i -ого наблюдения, s — расстояние от наблюдателя до точки наблюдения, r — радиальная переменная, вычисляемая как:

$$r(l, b, s) = \sqrt{s^2 + R^2 + 2Rs \cos(l) \cos(b)}$$

Здесь R — расстояние до центра Млечного Пути (примерно 8.5 кпк). Сравнивая наблюдаемую интенсивность с вычисленной, можно оценить значение сечения и массы.

$$\langle \sigma v \rangle = a \iint F(v_{\text{rel}}) f(v_1, \mathbf{r}) f(v_2, \mathbf{r}) dv_1^3 dv_2^3$$

$$F(v_{\text{rel}}) = (v_{\text{rel}}/c)^n, \quad v_{\text{rel}} = |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2|$$

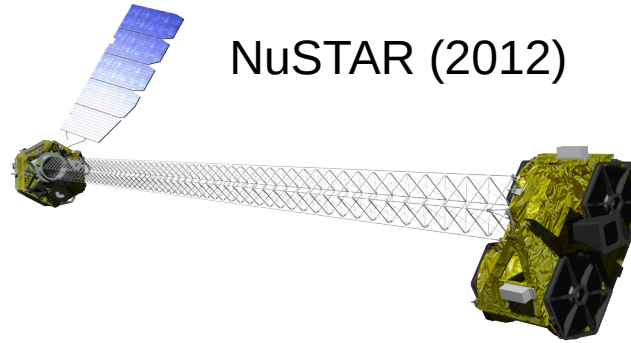
}	Среднее сечение взаимодействия
	$n = 0$ — s-волны (velocity-independent)
	$n = 2$ — p-волны
	$n = 4$ — d-волны
	$n = -1$ — Sommerfeld-enhanced in the Coulomb limit

NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) — рентгеновский телескоп, запущенный NASA в **2012 году** и работающий в диапазоне **от 3 до 79 кэВ**. Является первым телескопом с фокусирующей оптикой, работающий в данном энергетическом диапазоне. Телескоп состоит из двух идентичных пар «зеркальная система + детектор», расположенных соосно и разделенных с помощью раздвижной штанги. Каждая зеркальная система состоит из оптики **Вольтера типа I** с многослойным покрытием. В фокальной плоскости находится массив 2 на 2 пиксельных детектора из CdZnTe (Focal Plane Module A/B). Каждый детектор имеет размер 32 на 32 пикселя и обеспечивает энергетическое разрешение порядка **400 эВ на 10 кэВ**. Всё это позволяет получать изображения неба с угловым разрешением **18" (FWHM)** и полем зрения (FoV) приблизительно **13' на 13'**.

Важной особенностью телескопа является наличие **значительной боковой засветки**. Открытое пространство между зеркалами и детекторами позволяет рентгеновским фотонам попадать на детектор в обход зеркальной системы. Такие фотоны попадают на детектор с удалением от оптической оси **вплоть до 3 градусов**. Особенность значительно мешает при наблюдениях в рамках основной миссии. Однако, она оказалась очень полезна для изучения диффузного рентгеновского фона.

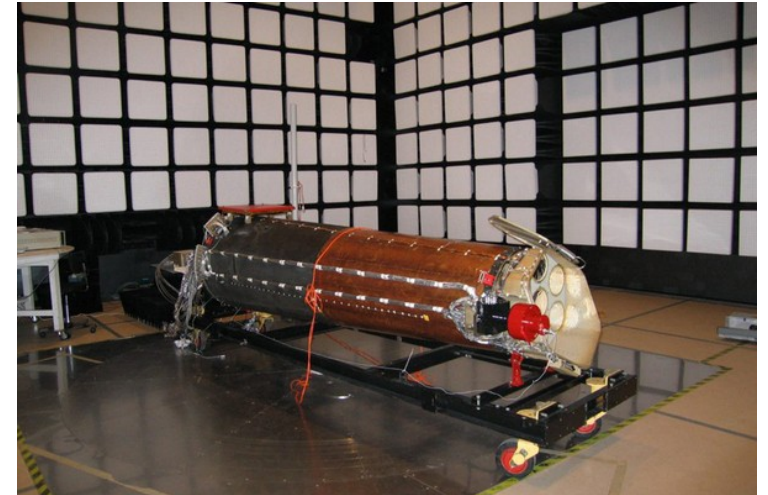


IXPE (2021)



NuSTAR (2012)

ART-XC (2019)



NuSTAR и его боковая засветка

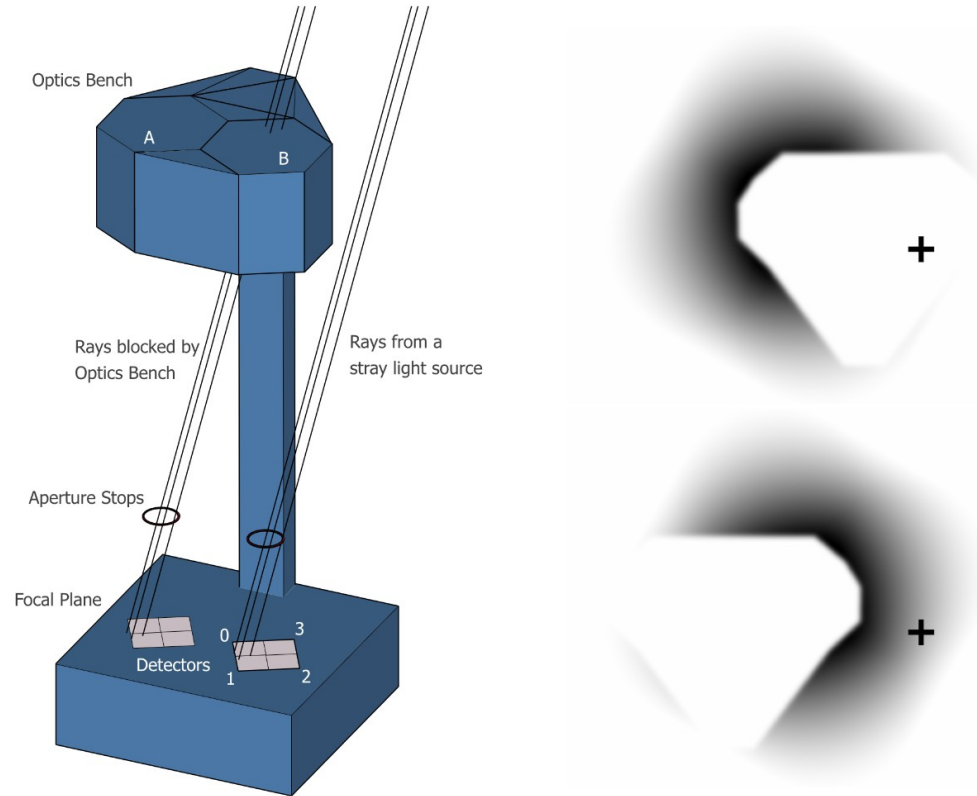


Figure 9. Left: a schematic of the observatory that illustrates how far off-axis sources can directly shine on the detectors through the aperture stop, producing the “Aperture” background. In this example, rays from the source are shielded from striking the left (A) detector plane by the optics bench, but other rays from the same source have an unimpeded path through the aperture stop to shine on a corner of the right (B) detector plane. Right: the location of sources on the sky, as visible from the detector plane, that produce the “Aperture” background for telescopes A (top) and B (bottom). The images are weighted (darker) by the number of detector pixels a given source shines on. The crosses give the approximate position of the source shown in the left panel.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

D. R. Wik et. al., *Astrophys. J.* 792, 48 (2014), arXiv: 1403.2722 [astro-ph.HE].

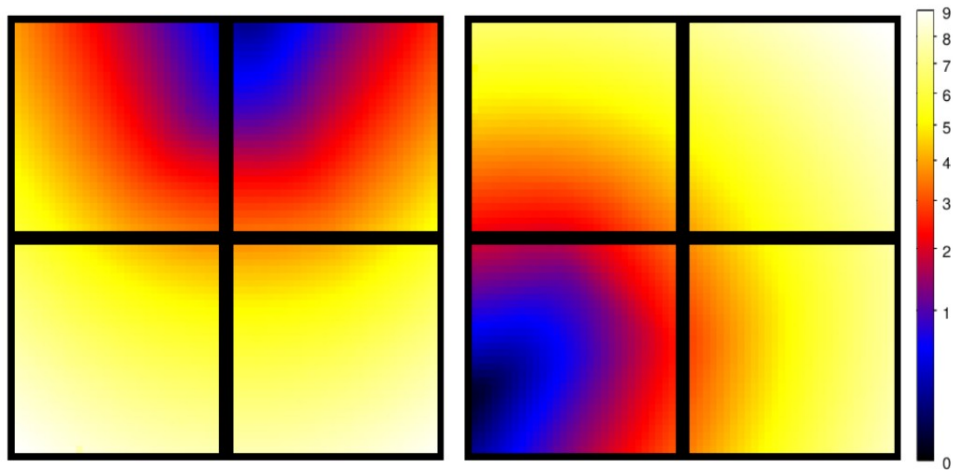


Figure 2. Image of the *NuSTAR* focal plane modules A (left) and B (right) in physical detector pixels, showing the open portion of the sky in squared degrees. The image also shows detector gaps between detector chips (upper right DET0, upper left DET1, bottom left DET2, and bottom right DET3). The square root color map ranges from 0 to 9 deg^2 per pixel.

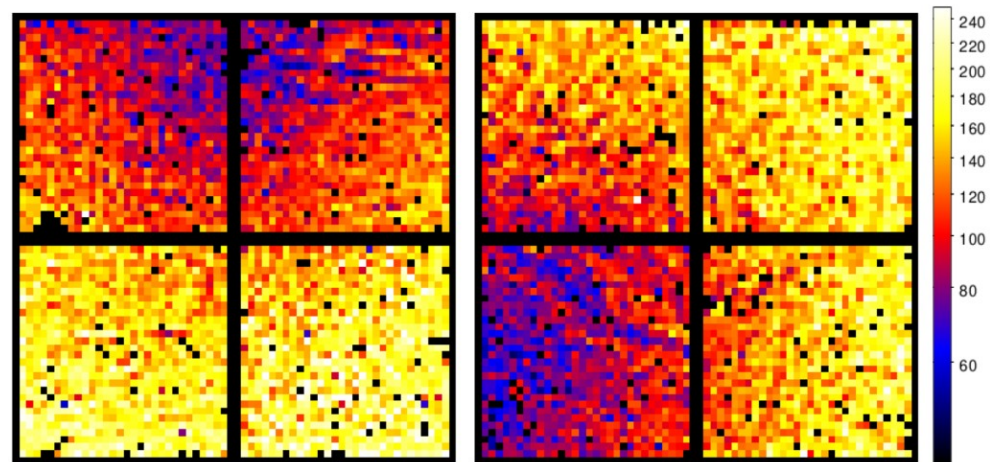


Figure 1. *NuSTAR* FPMA (left) and FPMB (right) 3–20 keV stacked images of the COSMOS field in detector coordinates. The image demonstrates the total counts registered in each detector pixel during the exposure time of 2.4 Ms. The square root color map ranges from 50 to 250 counts per pixel.

В данной работе нами использовались архивные данные за период с **июля 2012 по январь 2024 года**. Использовались **все публично доступные наблюдения за исключением наблюдений объектов Солнечной системы и наблюдений с экспозицией менее 1 кс**. Далее, все наблюдения обрабатывались с помощью процедуры **nuwavdet**, которая с помощью вейвлет-декомпозиции убирает с детектора те фотоны, которые прошли сквозь оптическую систему. Если после этой процедуры, замаскированной оказалось более 40% детектора или Cash-статистика $C > 1.4$, то такое наблюдение так же отбрасывалось.

В итоге мы получили **3248 наблюдений для FPMA (экспозиция 150.1 Мс) и 3139 наблюдений для FPMB (экспозиция 144.9 Мс)**. Для минимизации влияния рентгеновского хребта Галактики, мы так же **отбросили все наблюдения с $|b| < 3^\circ$** . Дополнительно мы отбросили те наблюдения, средняя скорость счёта в которых была в 2 и более раз выше медианного значения. Таким образом, мы получили **5216 наблюдений (FPMA + FPMB) с суммарной экспозицией в 234 Мс**.

Используемые данные

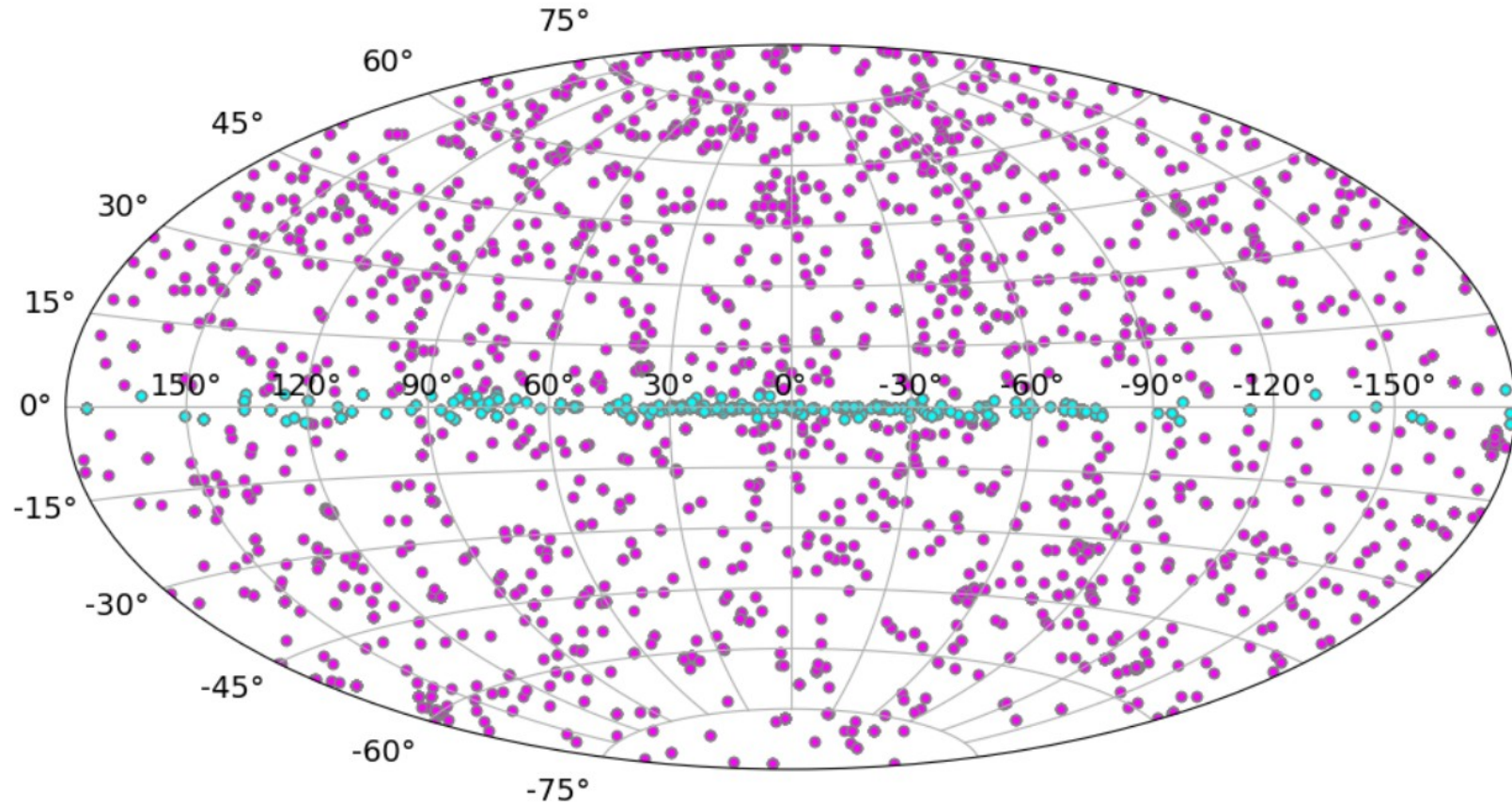


FIG. 4. The distribution of 3248 (FPMA) and 3139 (FPMB) *NuSTAR* observations on the sky in Galactic coordinates. Cyan and magenta points show the *NuSTAR* observations at $|b| < 3^\circ$ and $|b| > 3^\circ$, respectively.

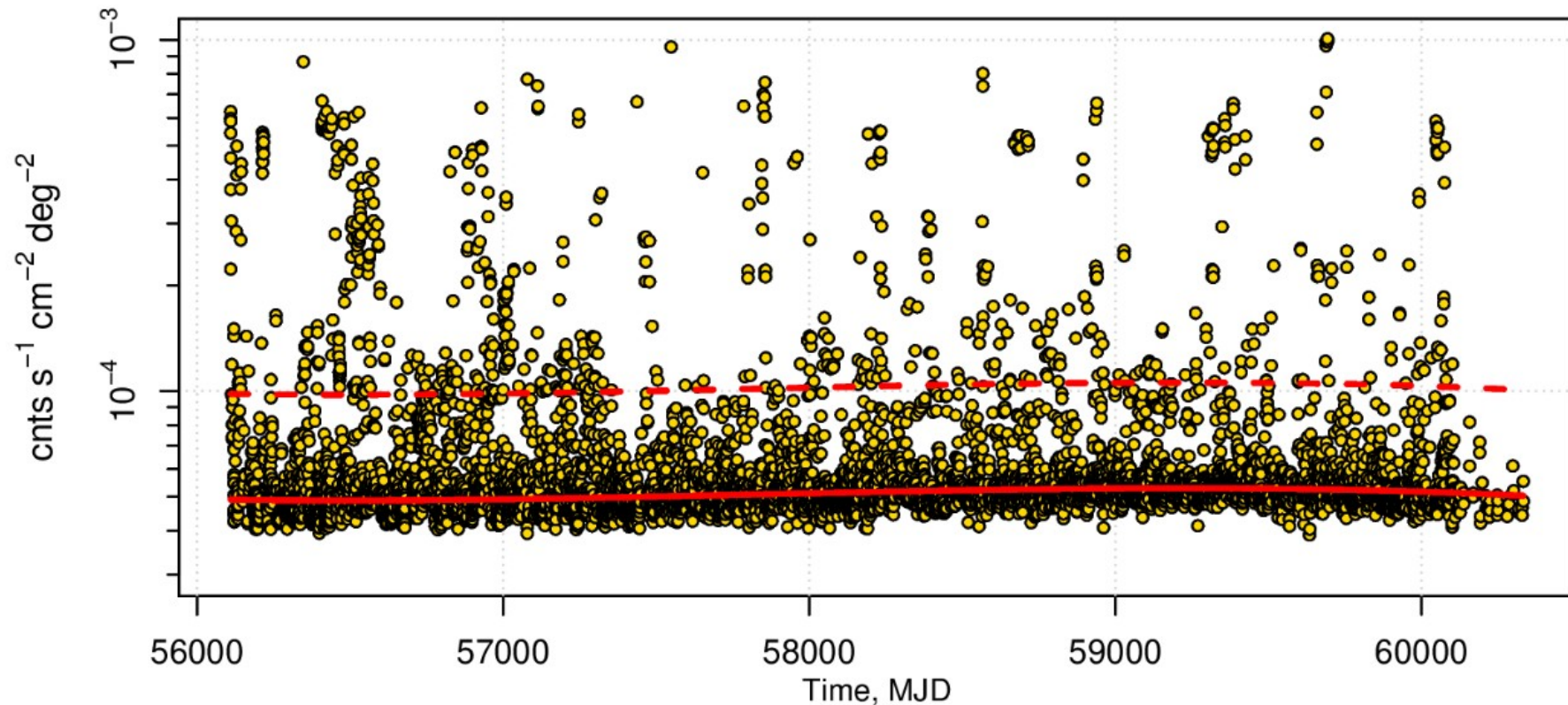
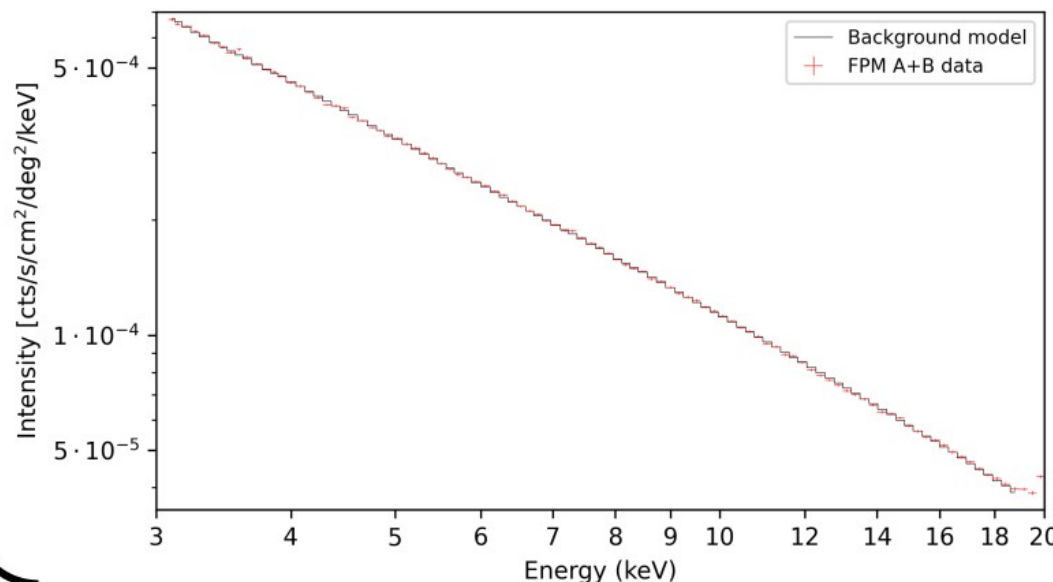


FIG. 5. The *NuSTAR* detector count rate as a function of time. Each point represents individual *NuSTAR* observation. A solid red line is a cubic polynomial outlier-resistant approximation used to describe long-term variation. A dashed red line shows the same approximation scaled by a factor of 2, that is a threshold: the observations above it are excluded from the analysis.

Модель фона

На рисунке представлен спектр фона, полученный после сложения спектров всех отдельных наблюдений. Основной компонентом данного спектра является космический рентгеновский фон (СХВ). Однако на низких энергиях так же присутствует заметная компонента от солнечной засветки. Мы аппроксимировали этот спектр XSPEC моделью вида **powerlaw*cflux(highecut*powerlaw)**. Значения параметров модели после подгонки представлены в таблице.



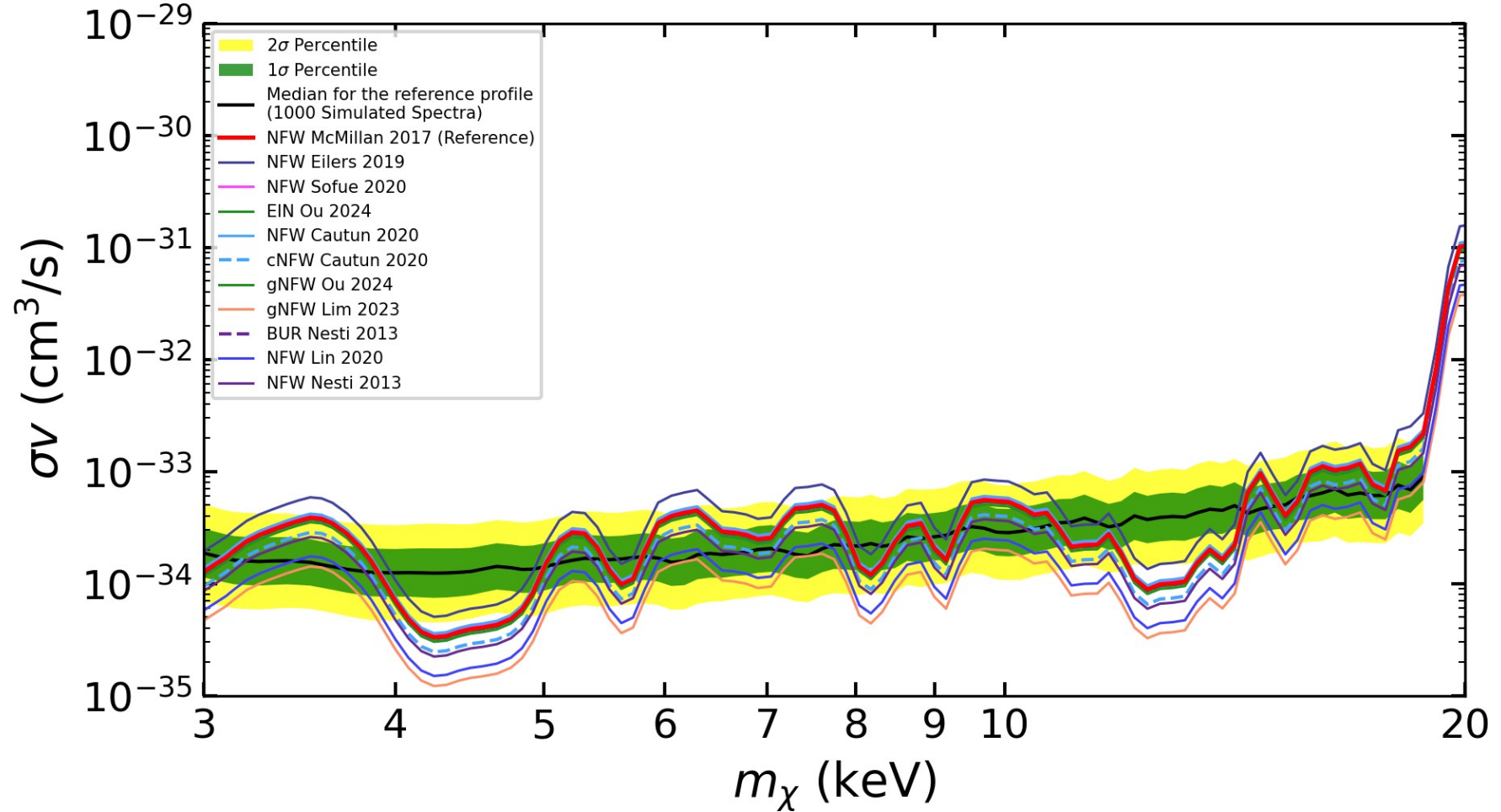
Model	Parameter	Value	Frozen
powerlaw	Γ_{sol}	4	True
powerlaw	N_{sol}	$(9.8 \pm 0.3) \times 10^{-3}$ ^a	False
cflux	E_{min}	3 keV	True
cflux	E_{max}	20 keV	True
cflux	Flux	(3.023 ± 0.006) ^b	False
powerlaw	Γ_{CXB}	1.29	True
highecut	$E_{\text{cut}}^{\text{CXB}}$	10^{-4} keV	True
highecut	E_{fold}	34.9 ± 0.6 keV	False

Test statistic: $\chi_r^2/\text{d.o.f.} = 1.38, p = 8.27 \times 10^{-3}$

^a photons/keV/s/cm²/deg² at 1 keV
^b $\times 10^{-11}$ erg/s/cm²/deg²

Движение частиц темной материи в нашей Галактике с характерными скоростями $v \sim 200 — 300$ км/с приводит к доплеровскому уширению линии на величину порядка $\Delta E/E \approx v/c \approx 0.001$. Таким образом, сигнал, который мы ищем, должен описываться гауссианой с шириной $\sigma_{\text{Gauss}}=0.001$.

Дальнейшая процедура подгонки параметров выглядит следующим образом. Мы добавляем к нашей модели фона гауссиану с фиксированной шириной $\sigma_{\text{Gauss}}=0.001$, положение последовательно изменяется в диапазоне от 3 до 20 кэВ, а интенсивность линии (нормировка гауссианы) остаётся единственным свободным параметром. Дальнейшая процедура минимизации даёт нам оценку максимального правдоподобия на интенсивность линии, а односторонний 95% доверительный интервал мы получаем при изменении хи-квадрат статистики на $\Delta\chi^2=2.71$.



Финальные ограничения

