

# Ограничения на параметры частиц темной материи кэВ-го диапазона масс по данным телескопа СРГ/ART-XC

Докладчик: Е. И. Захаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

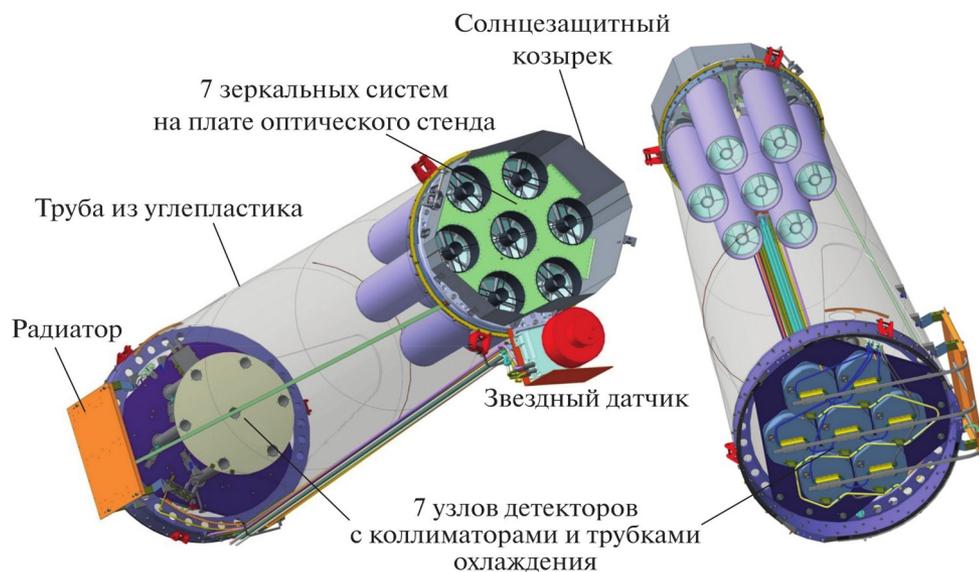
«Спектр-Рентген-Гамма» — российско-немецкая орбитальная астрофизическая обсерватория, предназначенная для построения **полной карты Вселенной** в рентгеновских лучах с энергией от **0,2 до 30 кэВ**. Она состоит из двух рентгеновских телескопов: немецкого **eROSITA**, работающего в **мягком (0.2 — 8 кэВ)** рентгеновском диапазоне, и российского **ART-XC имени М. Н. Павлинского**, работающего в **более жёстком (4 — 30 кэВ)** рентгеновском диапазоне.

Запуск обсерватории осуществлён **13 июля 2019** года; окрестностей **точки Лагранжа L2** системы «Солнце-Земля» аппарат достиг **21 октября 2019** года. Обсерватория обращается по гало-орбите с периодом **6 месяцев** вокруг точки **Лагранжа L2** по орбите радиусом до 400 тыс. км, плоскость которой перпендикулярна прямой, соединяющей эту точку с Солнцем; и стала первым российским аппаратом в окрестностях точки либрации.



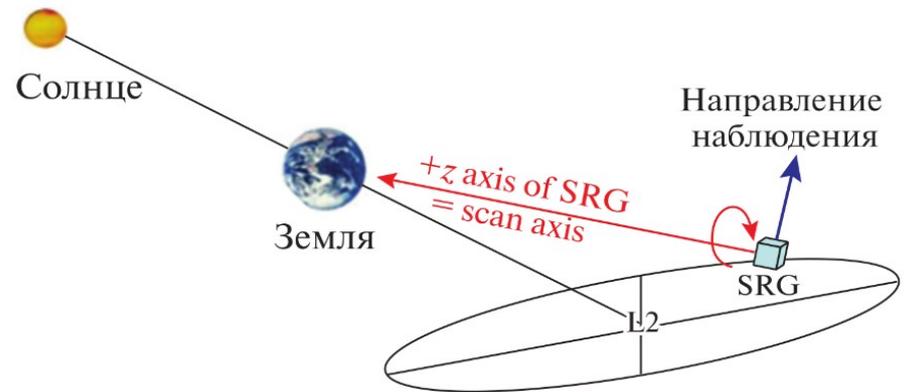
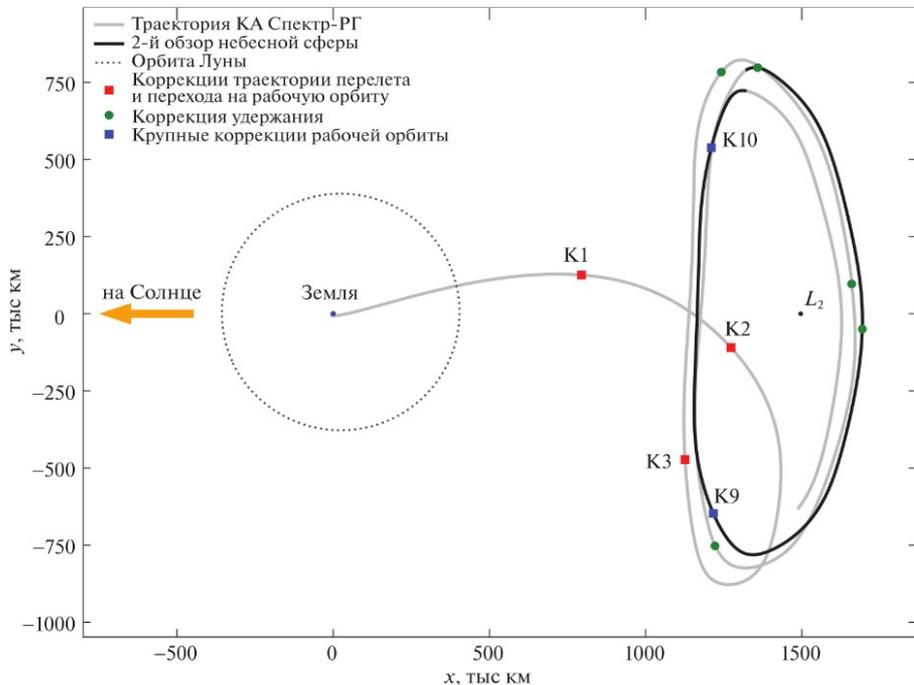
**ART-XC им М.Н. Павлинского** (Astronomical Roentgen Telescope - X-ray Concentrator) — один из двух рентгеновских телескопов обсерватории СРГ. ART-XC сконструирован для получения **прямых изображений (FOV ~ 36')** неба в рентгеновских лучах с использованием рентгеновской **оптики косого падения**. ART-XC также может быть использован в режиме с намного большим эффективным полем зрения (**FOV ~ 50'**), но без хорошего углового разрешения (**“режим концентратора”**). Рабочий диапазон телескопа **от 4 до 30 кэВ**.

Размеры телескопа	3.5 м × 0.9 м
Число оболочек в зеркальной системе	28
Временное разрешение	23 мкс
Энергетическое разрешение	9% на 13.8 кэВ
Фокусное расстояние	2700 мм
Эффективная площадь в режиме наведения	385 см <sup>2</sup> на 8.1 кэВ
Размер детектора	29.95 × 29.95 мм
Число стрипов	48 × 48
Энергия регистрируемых событий	4 — 120 кэВ
Угловое разрешение	53"



Во время обзора всего неба обсерватория вращается вокруг оси, направленной на Солнце, с **периодом 4 часа**, при этом ось вращения смещается примерно на **один градус в день** вслед за движением Солнца. Обсерватория СРГ просматривает все небо и получает новую карту неба **каждые 6 мес.**

Принятая стратегия обзора СРГ приводит к появлению на карте неба “**глубоких полей**” вокруг **северного и южного полюсов эклиптики**, где пересекаются большие круги всех сканирований. В результате время экспозиции зависит от эклиптической широты  $\theta$  как  $1/\cos(\theta)$ , т.е. экспозиция **минимальна на экваторе эклиптики** и **максимальна на полюсах**.



## 1) Сфокусированное рентгеновское излучение

### а) Излучение от точечных и протяженных источников

- Как двукратно отраженные фотоны (с помощью которых и строится изображение), так и однократно отраженные фотоны (которые дают вклад в фон вокруг источника).

### б) Космический рентгеновский фон (*Cosmic X-ray Background* или *CXB*)

- Совокупное излучение далёких активных ядер галактик (квазары, блазары, сейфертовские галактики). Однородно по небу.

### в) Диффузное излучение Галактики (*Galactic ridge X-ray emission* или *GRXE*)

- Совокупное излучение аккрецирующих белых карликов и звёзд с активными коронами. Представляет собой протяжённое излучение малой поверхностной яркости, расположенное в виде полосы шириной около 1-2 градусов вдоль галактической плоскости.

### г) Излучение от распадающейся или аннигилирующей темной материи

- В рамках нашей задачи мы предполагаем, что темная материя может порождать рентгеновские фотоны. Это излучение связано с Галактическим гало темной материи.

## 2) Фон заряженных частиц

- Космические лучи и инструментальный фон телескопа.

Для телескопа ART-XC фон заряженных частиц **много больше** CXB, GRXE и излучения от распадающейся или аннигилирующей темной материи.

# Часть 1. Распадающаяся темная материя из стерильных нейтрино

# Стерильные нейтрино

**Стерильные нейтрино** – гипотетические частицы, расширяющие Стандартную модель физики элементарных частиц (СМ). Они представляют из себя **фермионы**, которые не несут заряда относительно калибровочной группы СМ, т. е. **не участвуют в сильном, слабом и электромагнитном** взаимодействиях, но участвуют в гравитационном. Эти фермионы называют нейтрино, поскольку они **смешиваются с нейтрино СМ, что даёт последним массу** (механизм seesaw) и обеспечивает существование нейтринных осцилляций.

Существует процесс при котором стерильное нейтрино переходит в активное нейтрино СМ и фотон с энергией  $E_\gamma = m_s/2$ :  $\nu_s \longrightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \gamma$ .

Причины исследования данного расширения СМ:

1. Перенормируемость.
2. Объяснение барионной асимметрии Вселенной
3. Кандидат на роль частиц тёмной материи ( $m_s \sim 0.7 \text{ — } 10 \text{ кэВ}$ ).
4. Объясняет аномальные результаты некоторых экспериментов по нейтринным осцилляциям.

$F = \frac{\Gamma_\gamma}{4\pi m_s} \times D$  } Ожидаемый поток фотонов от распада стерильных нейтрино (отсч/(с см<sup>2</sup>)). Здесь D - плотность столба темной материи (M<sub>⊙</sub>/пк<sup>2</sup>).

$$\Gamma_\gamma = \frac{9}{1024} \frac{\alpha}{\pi^4} G_F^2 m_s^5 \sin^2(2\theta) =$$

$$= 1.36 \times 10^{-22} \left( \frac{m_s}{1\text{keV}} \right)^5 \sin^2(2\theta)$$

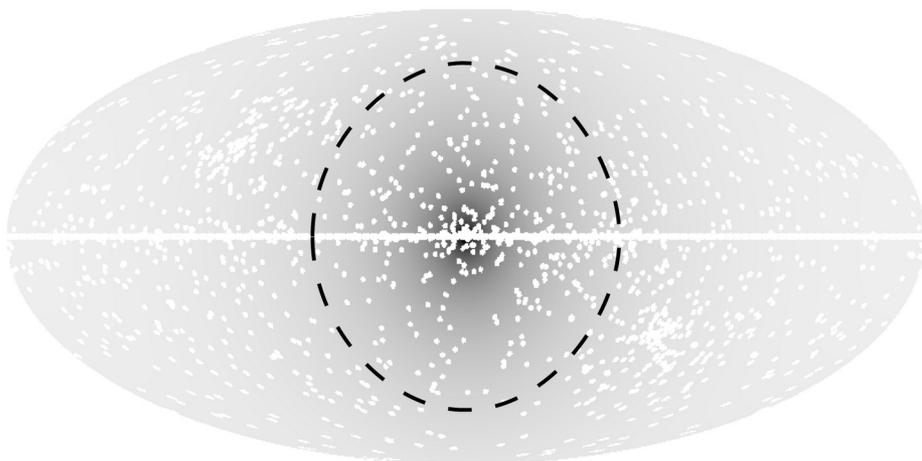
} темп распада стерильного нейтрино в активное нейтрино и фотон (с<sup>-1</sup>)

На небе, в галактической системе координат, задаются **2 области**:

1. **Конус** с углом раствора в **60 градусов**, направленный в центра Галактики.
2. Всё остальное небо

**Вырезаются** яркие точечные **источники** (867 источников из каталога [1] + ещё 642 источника. Радиусом вырезания: 1 градус) и **галактическая плоскость** ( $|b| < 1^\circ$ )

Использовались данные с 12.12.2019 по 19.12.2021



0 250 500 750 1000 1250 1500  
Differential dark matter column density  $dJ/d\Omega$  ( $M_\odot pc^{-2} sr^{-1}$ )

Время экспозиции:

$T^I \approx 10.6$  Мс

$T^{II} \approx 42.5$  Мс

Площадь:

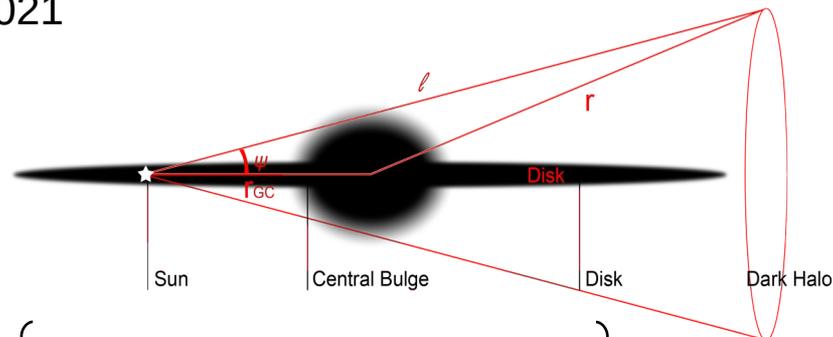
$\Omega^I \approx 9040$  кв. град.

$\Omega^{II} \approx 27600$  кв. град.

Плотность столба темной материи:

$D^I = 1130 M_\odot / \text{пк}^2$

$D^{II} = 1397 M_\odot / \text{пк}^2$



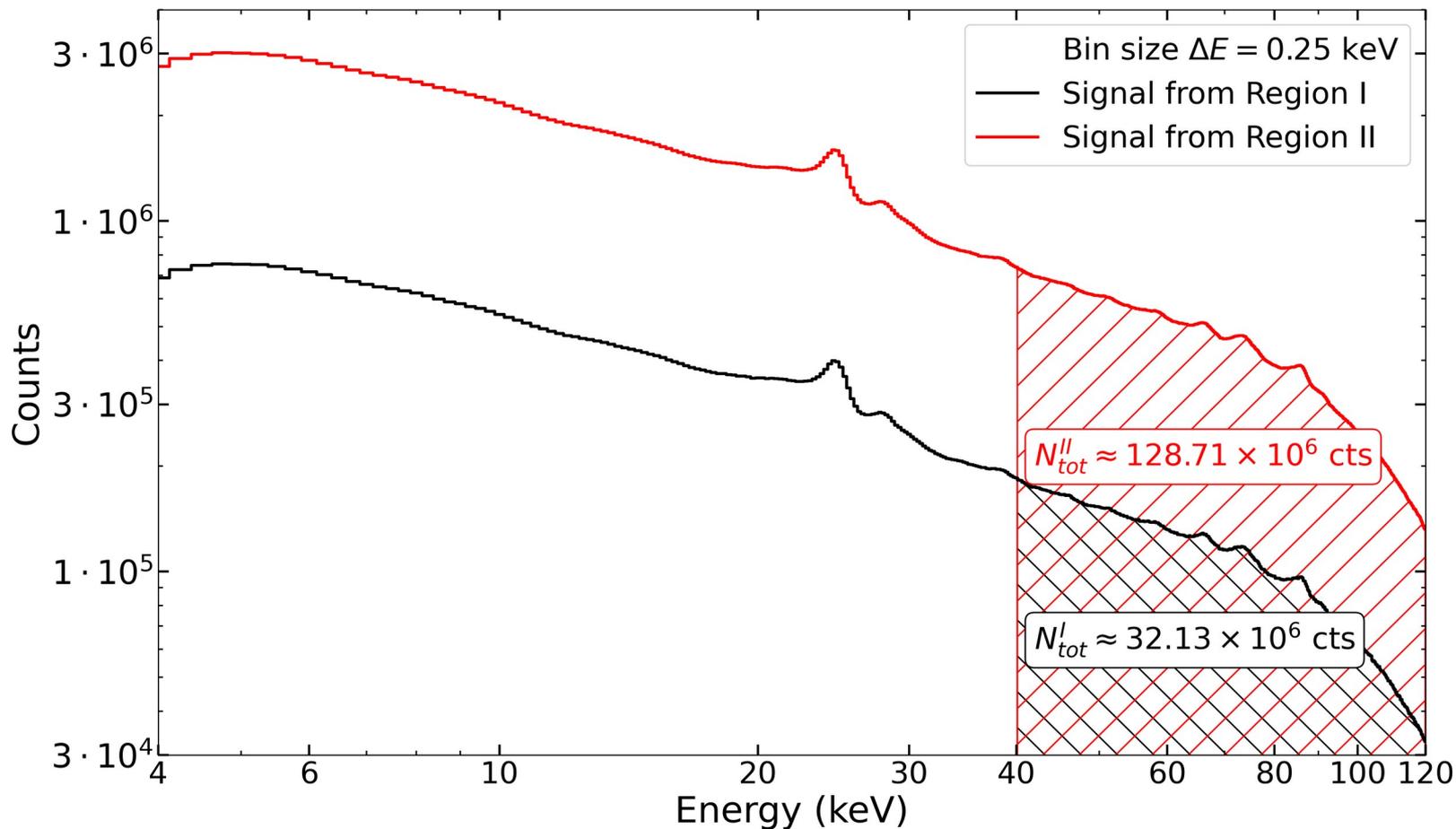
$$\left\{ \begin{aligned} D^I &= \int_0^{2\pi} \int_0^{60^\circ} \int_0^{R+R_{\text{vir}}} \rho_{\text{DM}}(r(l, \psi)) \sin(\psi) d\phi d\psi dl \\ r(l, \psi) &= \sqrt{R^2 + 2Rl \cos(\psi) + l^2} \end{aligned} \right.$$

Плотность столба темной материи для области I.

$R=8$  кпк — расстояние до центра Галактики.

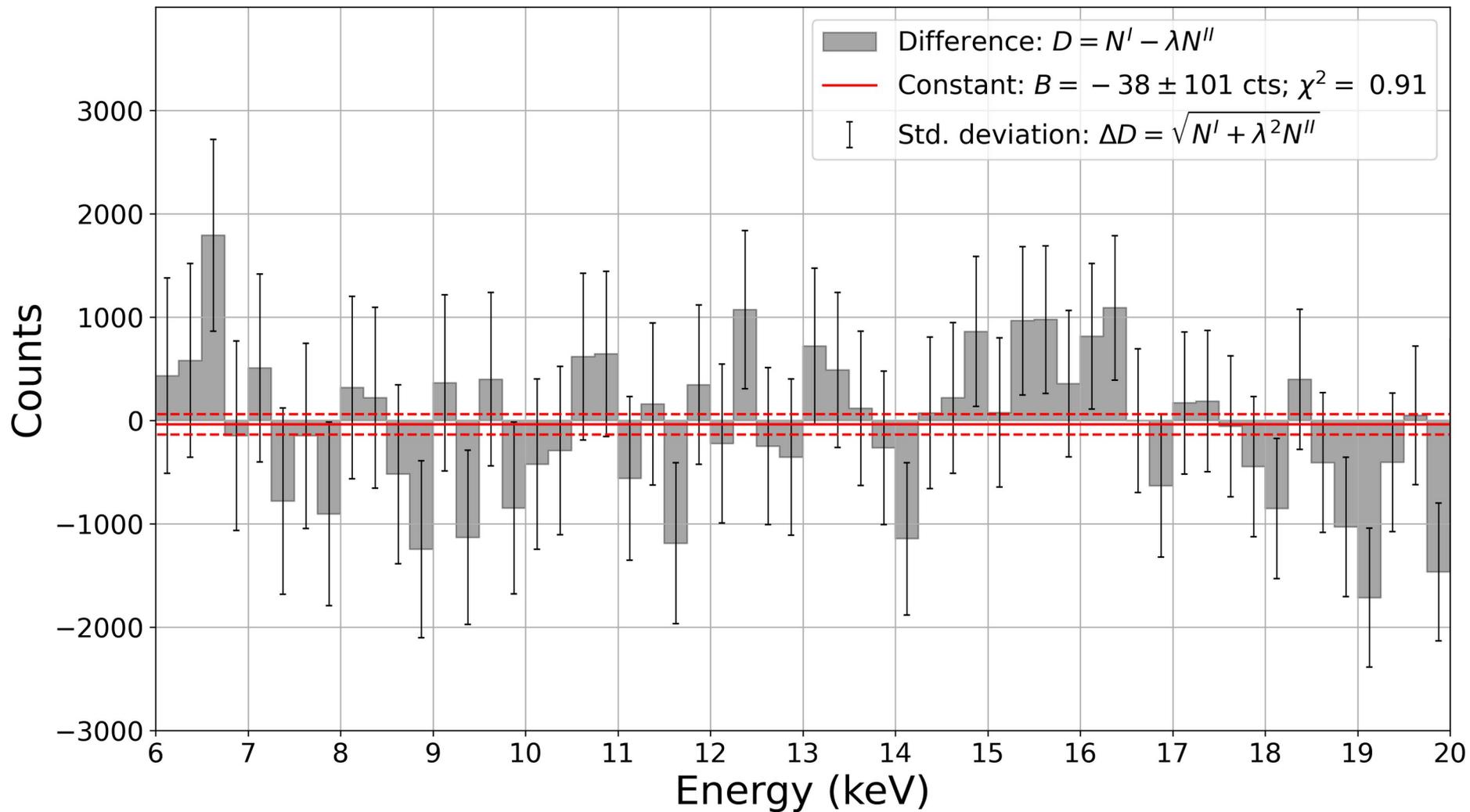
$R_{\text{vir}}=200$  кпк — вариальный радиус

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{\text{DM}}(r) &= \frac{\rho_s}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \\ r_s &= 20 \text{ кпк } \rho_s = 10.5 \times 10^{-3} M_\odot \text{пк}^{-3} \end{aligned} \right. \left. \begin{array}{l} \text{стандартный NFW} \\ \text{профиль для} \\ \text{Млечного Пути} \end{array} \right.$$



$$\lambda = \frac{N_{tot}^I}{N_{tot}^{II}} = \frac{\omega^I T^I}{\omega^{II} T^{II}} \approx \frac{T^I}{T^{II}}$$

$$\lambda = 0.24961 \pm 0.00005$$

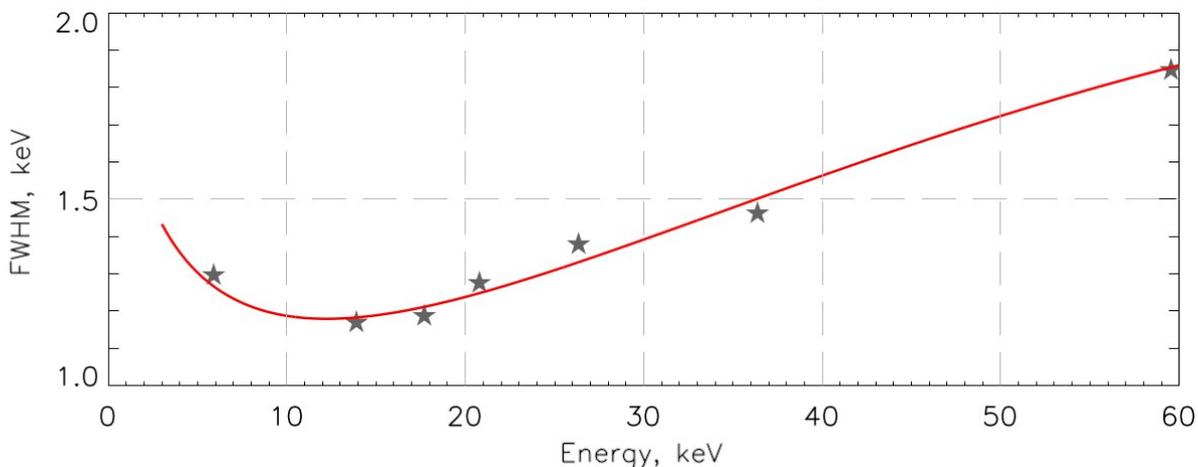


В каждую точку спектра со слайда 10 подставляется гауссиана (1) с шириной FWHM из [2]. Единственный свободный параметр – амплитуда  $A$ . Максимизация (2) по  $A$  даёт оценку максимального правдоподобия  $\hat{A}$ . При этом допускается только  $\hat{A} > 0$ . В качестве верхнего предела выступает такое  $A$ , для которого выполняется равенство (3).

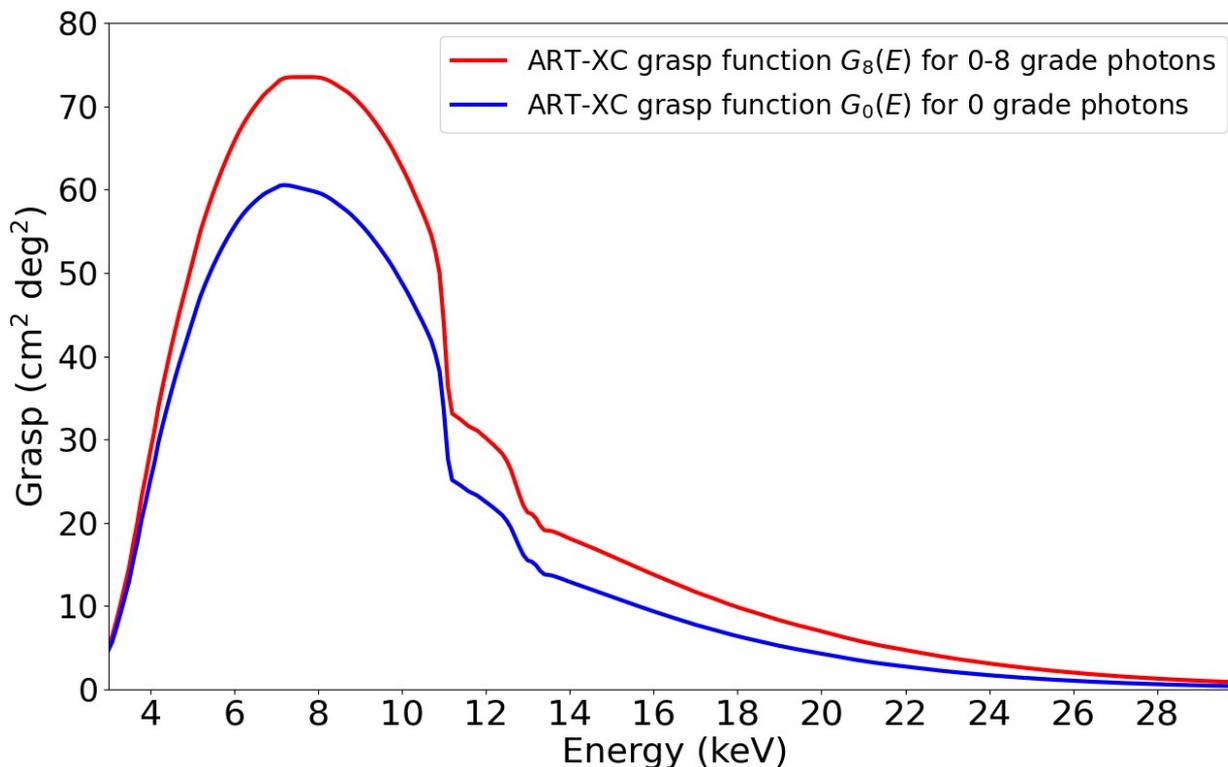
(1) Сигнал от распада частиц темной материи: 
$$S_i = \frac{A \times 2\sqrt{\log 2}}{\sqrt{\pi}\text{FWHM}(E)} \exp\left(-\left(\frac{2(E_i - E)}{\text{FWHM}(E)}\right)^2 \log 2\right) \Delta E$$

(2) Логарифмическая функция правдоподобия: 
$$l(D|A, E) = \sum_{i=1}^{N^b} \frac{(D_i - B - S_i(A, E))^2}{2\sigma_i^2}$$

(3) Верхний 95% предел: 
$$-2 \times \left( l(D|A, E) - l(D|\hat{A}, E) \right) = 2.71$$

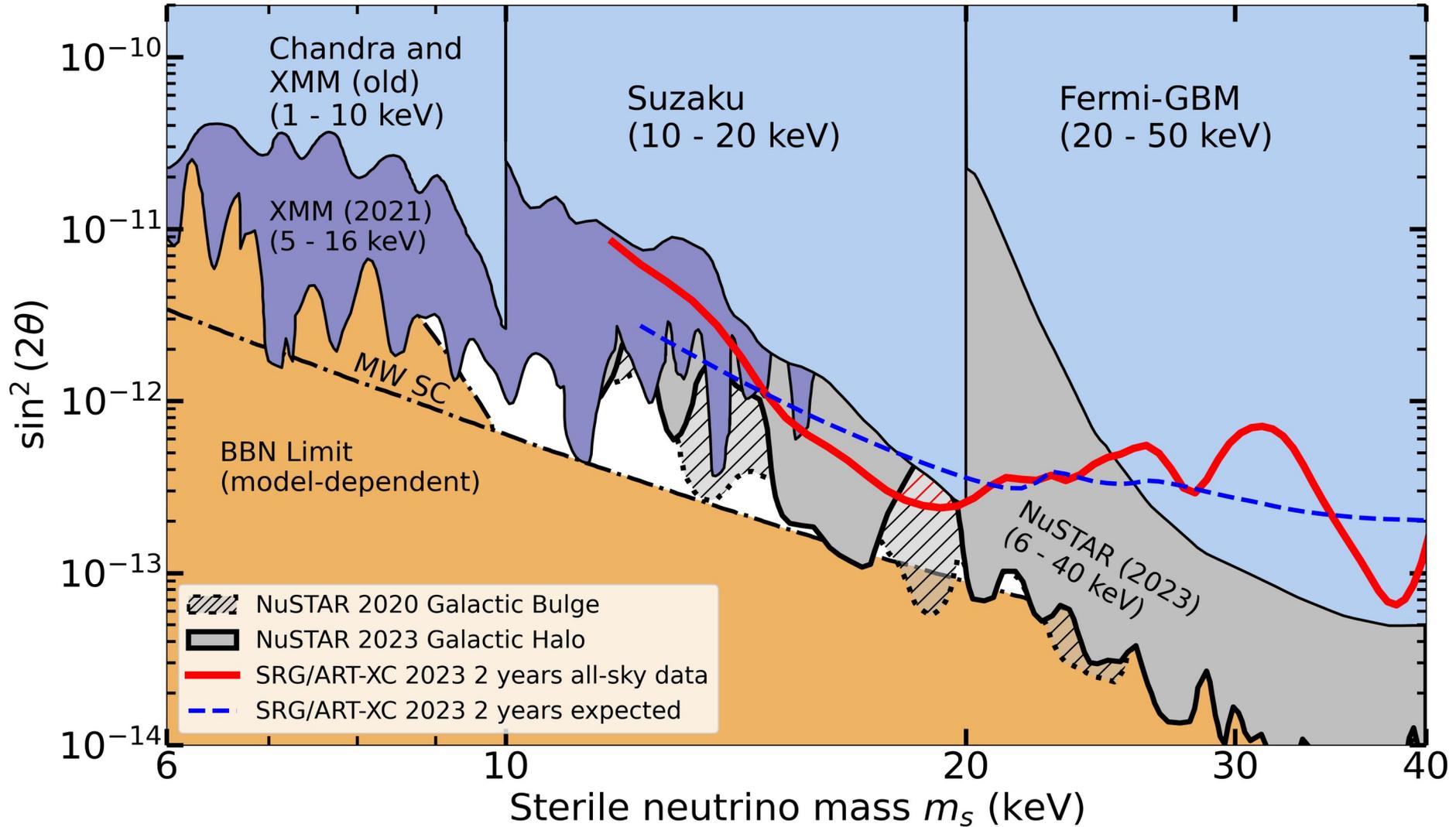


Охват для однократно и двукратно отражённых фотонов с поправкой на класс событий.



$$\frac{A\Omega^I}{T^I G_0(E)} = F^I - \lambda F^{II}$$

Связь между амплитудой зарегистрированного сигнала  $A$ , углом смещения  $\theta$  и массой частицы  $m_s$ .



[3] E. I. Zakharov et. al., Phys. Rev. D 109, L021301 (2024), arXiv: 2303.12673 [astro-ph.HE].

## **Часть 2. Аннигилирующая темная материя.**

1. Процесс “2 в 2”:  $\chi + \chi \rightarrow \gamma + \gamma$ .  $E_\gamma = m_\chi$ .
2. WIMP ( $m_\chi \approx 10$  ГэВ) и аксионы ( $m_\chi < 1$  эВ).
3. Однако поиски в кэВ-ой области также не лишены смысла.

$$F = \frac{1}{8\pi m_\chi^2} \int \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} dE_\gamma \iint \langle \sigma v \rangle \rho_{DM}^2 dl d\Omega$$

- ожидаемый поток от аннигиляции  
в общем случае

$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} = 2\delta(E - m_\chi)$$

- спектр испускаемых фотонов

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

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

}	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

$$F = \frac{\langle \sigma v \rangle}{4\pi m_\chi^2} \times J$$

$$J = \iint \rho_{DM}^2 dl d\Omega$$

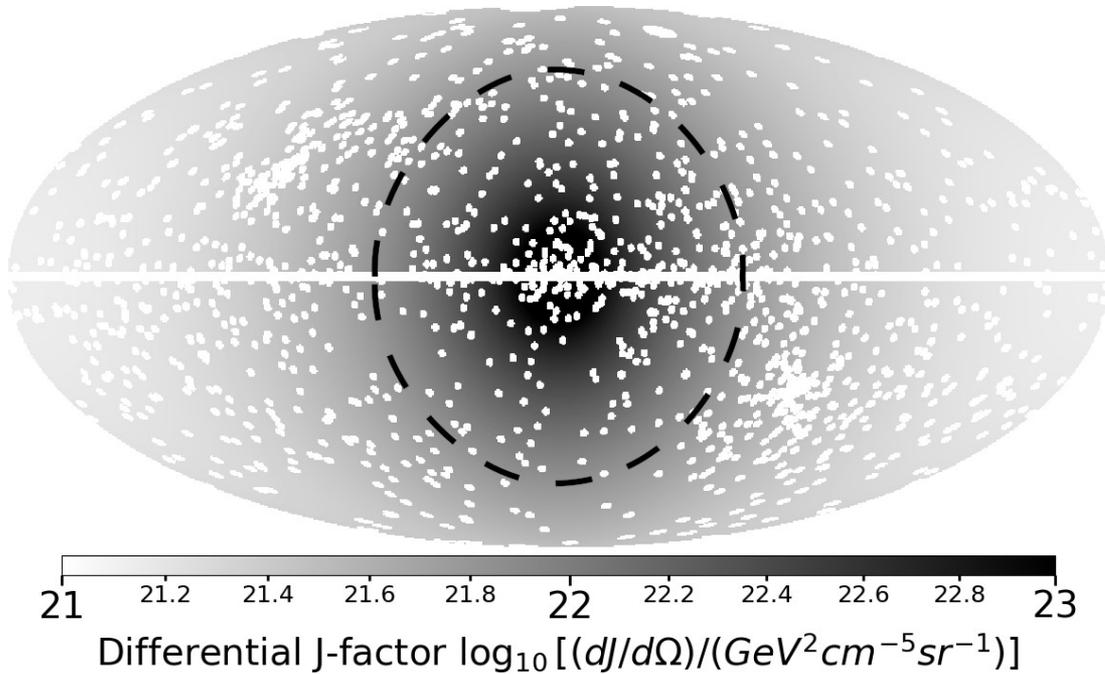
}	ожидаемый поток от аннигиляции $\chi + \chi \rightarrow \gamma + \gamma$ при независимом от скорости сечении
---	---

На небе, в галактической системе координат, задаются **2 области**:

1. **Конус** с углом раствора в **60 градусов**, направленный в центра Галактики.
2. Всё остальное небо

**Вырезаются** яркие **источники** (1545 источников из ARTSS1-5 [4] + скопления Дева и Волосы Вероники) и **галактическая плоскость** ( $|b| < 1^\circ$ )

Использовались данные с 12.12.2019 по 19.12.2021



Время экспозиции:

$$T^I \approx 10.4 \text{ Мс}$$

$$T^{II} \approx 41.4 \text{ Мс}$$

Площадь:

$$\Omega^I \approx 9000 \text{ кв. град.}$$

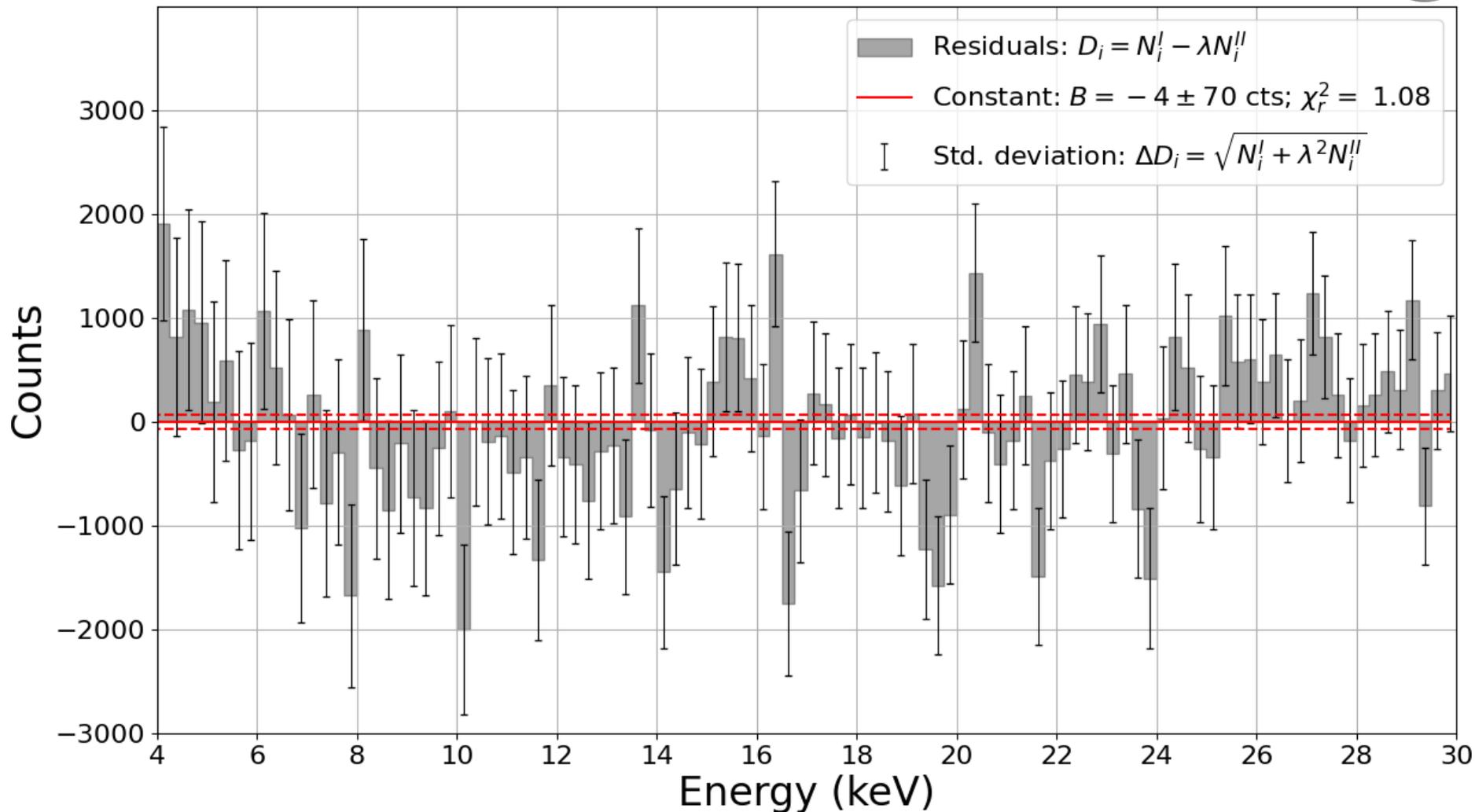
$$\Omega^{II} \approx 27500 \text{ кв. град.}$$

J-фактор:

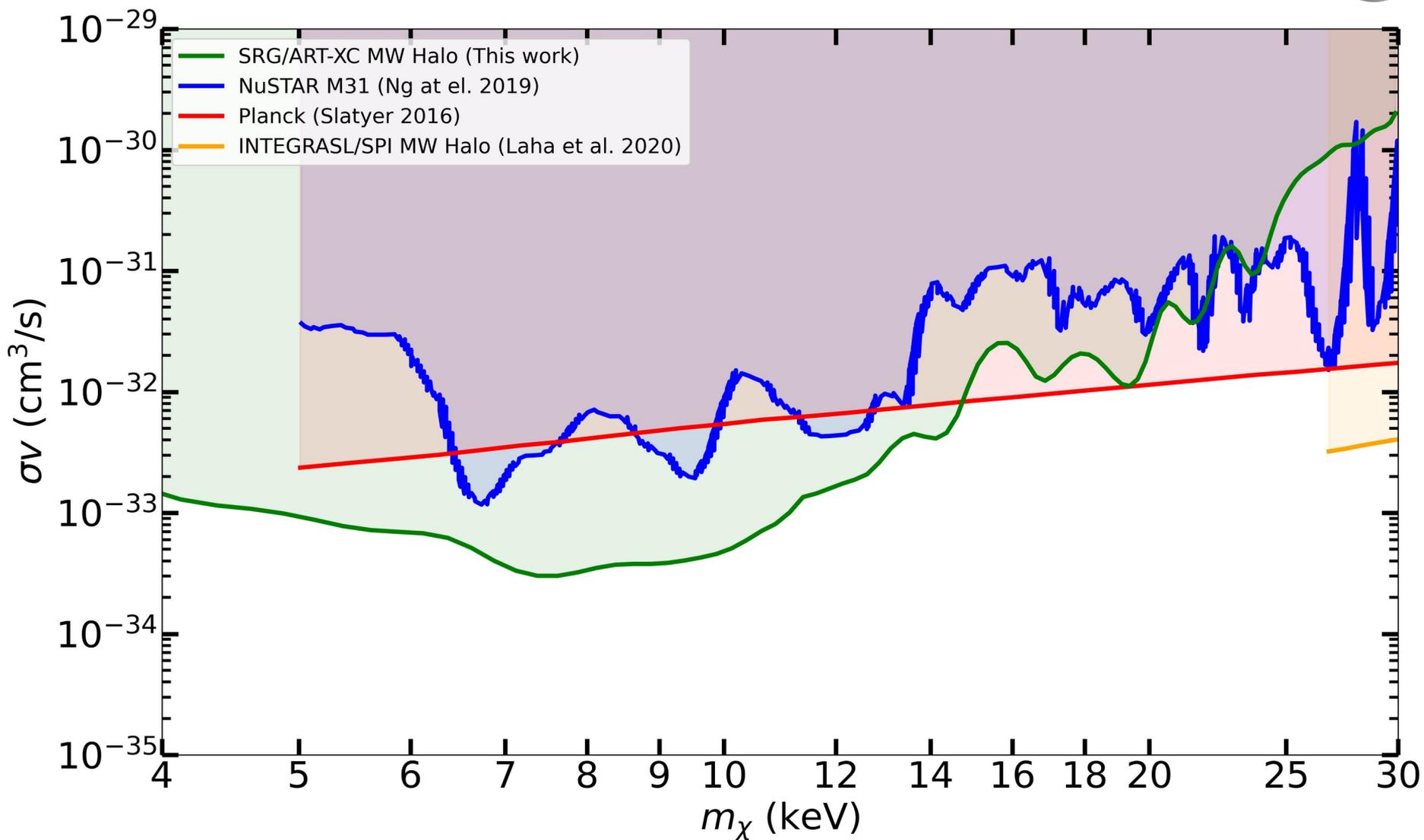
$$J^I = 22.85 \log_{10}(GeV^2 cm^{-5})$$

$$J^{II} = 22.37 \log_{10}(GeV^2 cm^{-5})$$

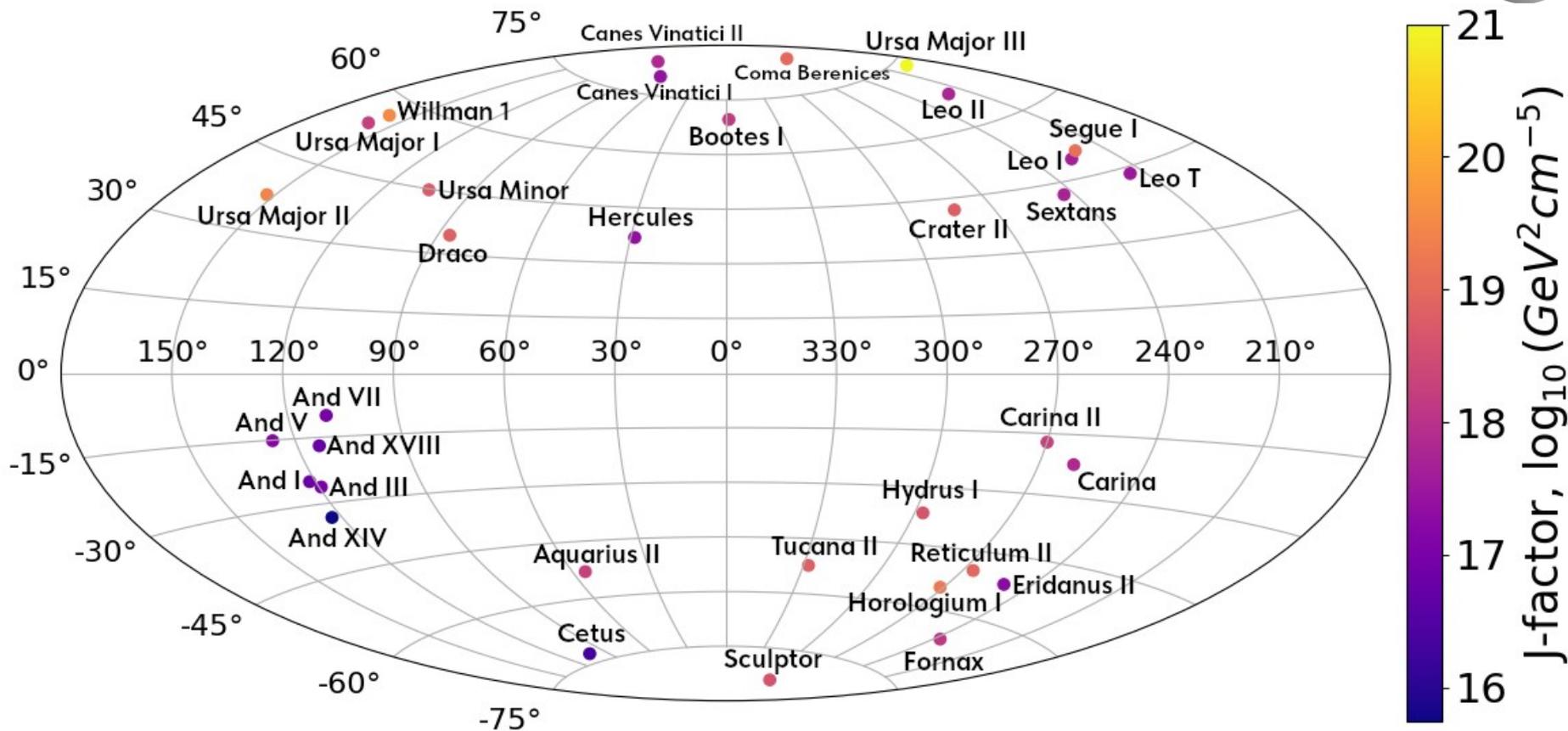
[4] S. Yu. Sazonov et al., A&A. 687, A183 (2024), arXiv:2303.12673 [astro-ph.HE].



$$\lambda = 0.25321 \pm 0.00005$$



[5] E. I. Zakharov et. al., Phys. Rev. D 110, 123026 (2024), arXiv: 2407.18371 [astro-ph.HE].



Всего галактик: 33

Спутники Млечного Пути: 27

Спутники Андромеды: 6

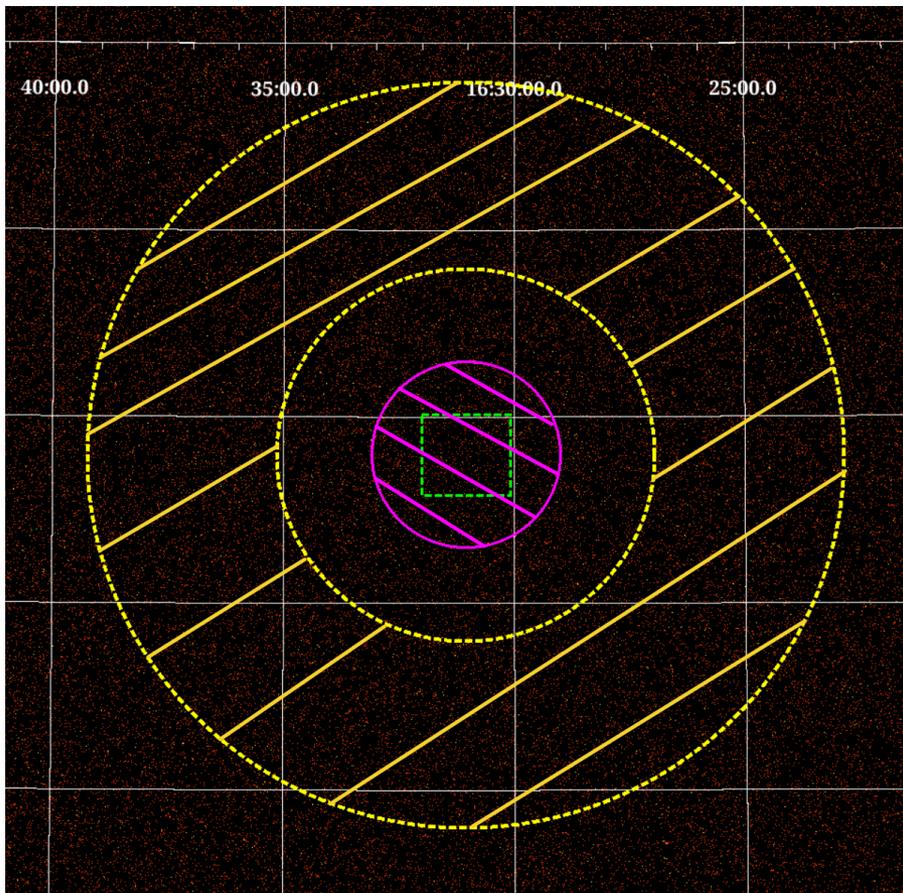
Суммарное время: 6000 сек.

Суммарная площадь: 25.92 кв. град.

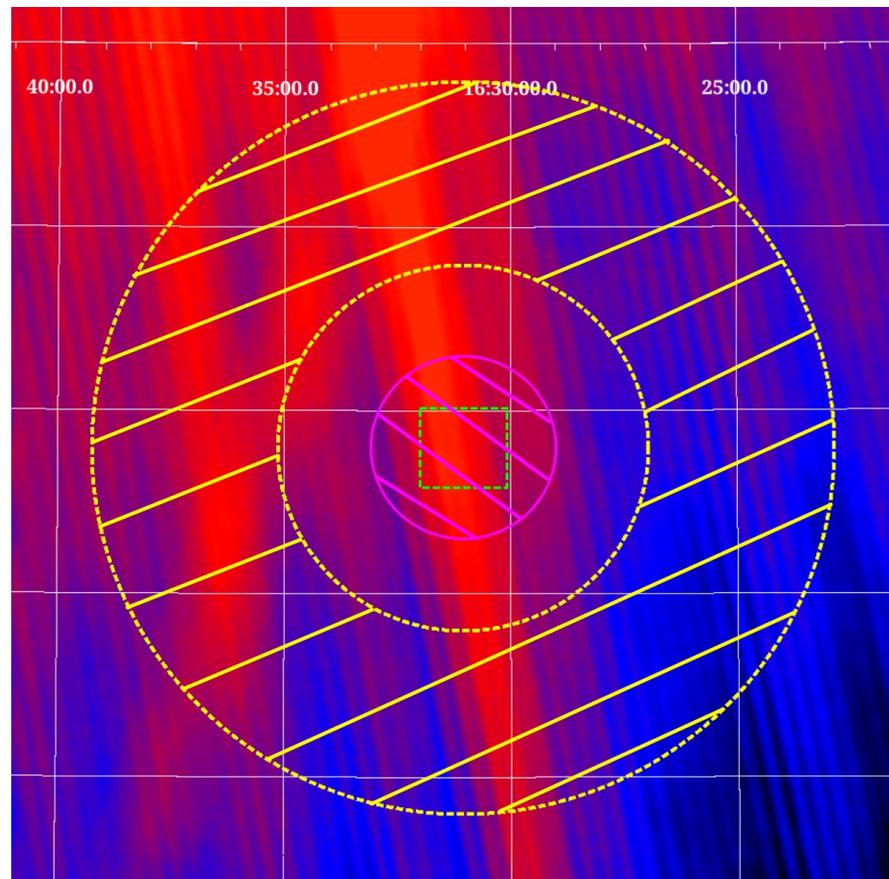
Суммарный J-фактор:  $20.20 + 0.47 - 0.38 \log_{10}(\text{GeV}^2 \text{cm}^{-5})$

[6] A.V. Pace et al., MNRAS 482, 3480 (2019); ArXiv: 1802.06811 (Всего 41 галактика; использовалось 31)

[7] K. K. Boddy et al., Phys. Rev. D 102, 023029 (2020); ArXiv: 1909.13197 (Всего 25 галактик; использовалось 2)

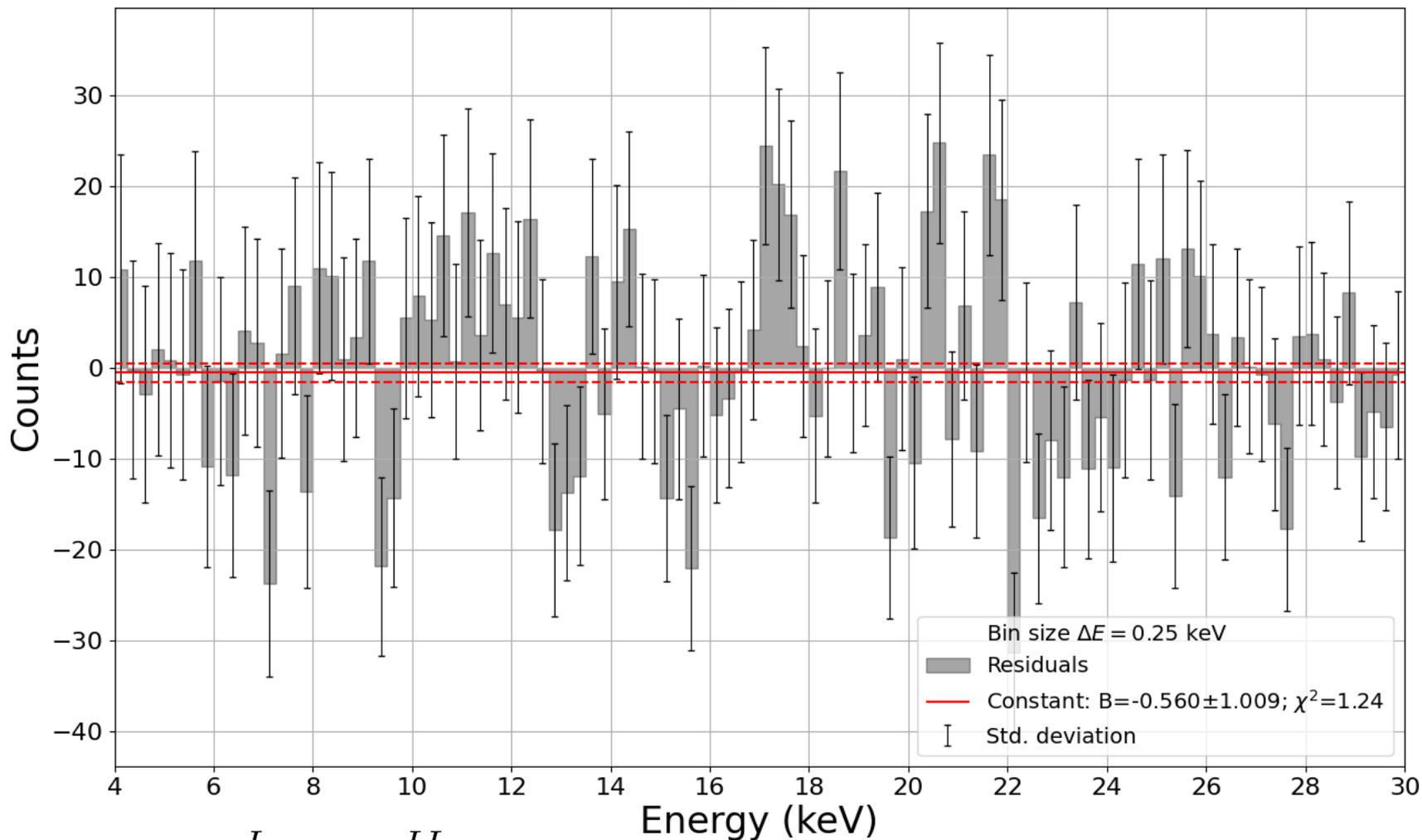


Фотонное изображение



Карта экспозиции

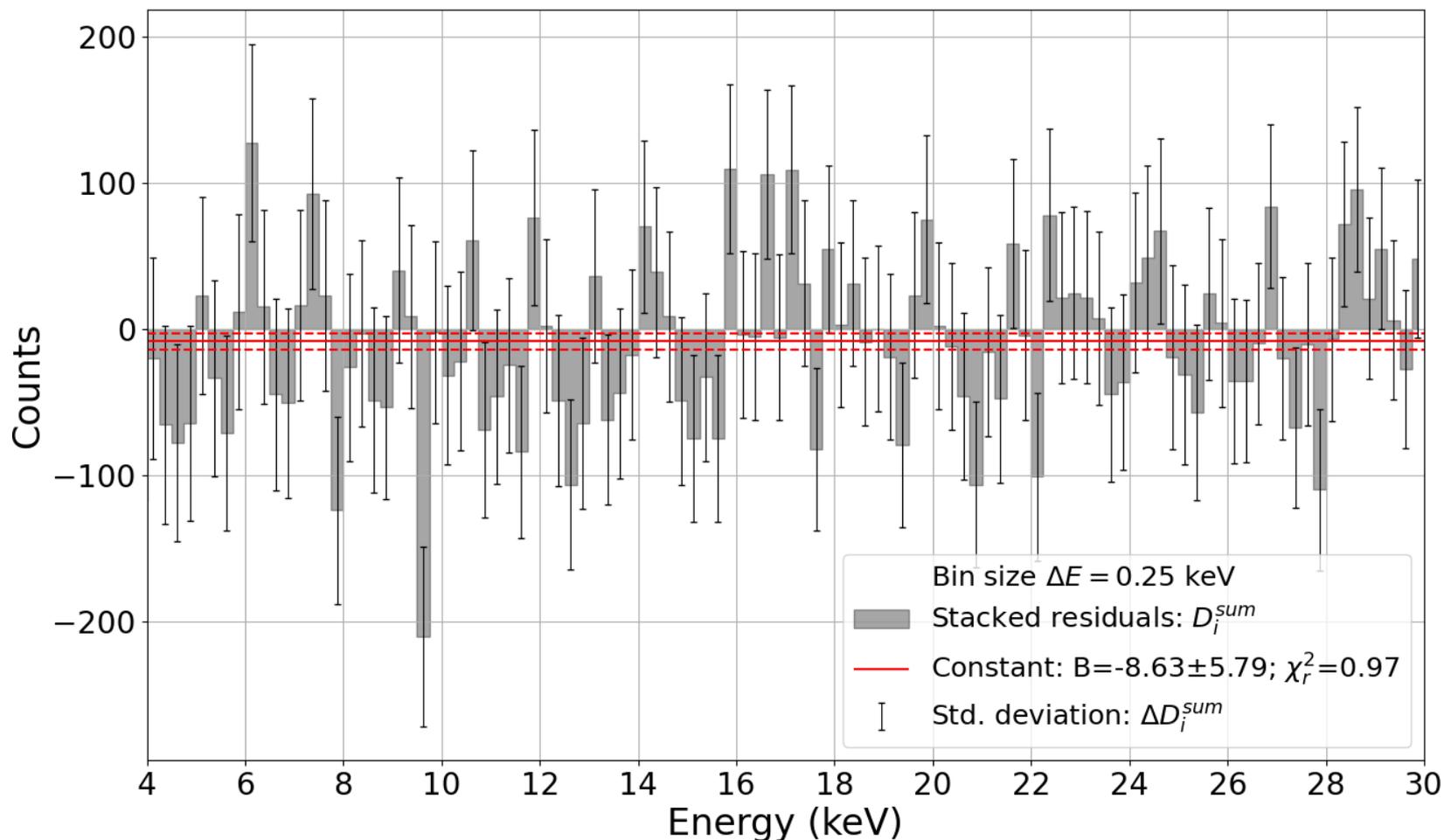
Розовая область — область I («сигнал + фон»);  $N^I$  — число событий из области I  
Желтая область — область II («фон»);  $N^{II}$  — число событий из области II



$$D = N^I - \lambda N^{II}$$

$$\Delta D = \sqrt{N^I - \lambda^2 N^{II}}$$

$$\lambda = \frac{S^I}{S^{II}} \frac{t^I}{t^{II}} = \frac{0.785 \text{ deg}^2}{9.425 \text{ deg}^2} \frac{184.2 \text{ s}}{179.1 \text{ s}} = 0.085$$



$$D^{sum} = \sum_{dSph} D \quad \Delta D^{sum} = \sqrt{\sum_{dSph} \Delta D^2}$$

[8] R. Errani et al., ApJ 965, 20 (2024); ArXiv: 2311.10134

[9] S. E. T. Smith et al., ApJ 961, 92 (2024); ArXiv: 2311.10147

$R_h = 3 \pm 1$  пк — радиус половинной светимости.

$D = 10 \pm 1$  кпк — расстояние от Солнца.

$[Fe/H] = -2.2$  — металличность.

$M_{tot} = 16.5^{+6} M_\odot$  — звездная масса.

$N_{tot} = 57.19^{+21}$  — полное число звезд.

$M_V = +2.2_{-0.3}^{+0.4}$  — абсолютная звездная величина.

$M/L_{1/2} = 6500_{-4300}^{+9100} M_\odot/L_\odot$  — отношение массы к светимости.

$\sigma_{los} = 3.7_{-1.0}^{+1.4}$  или  $1.9_{-1.1}^{+1.4}$  км/с — дисперсия скоростей звезд на луче зрения.

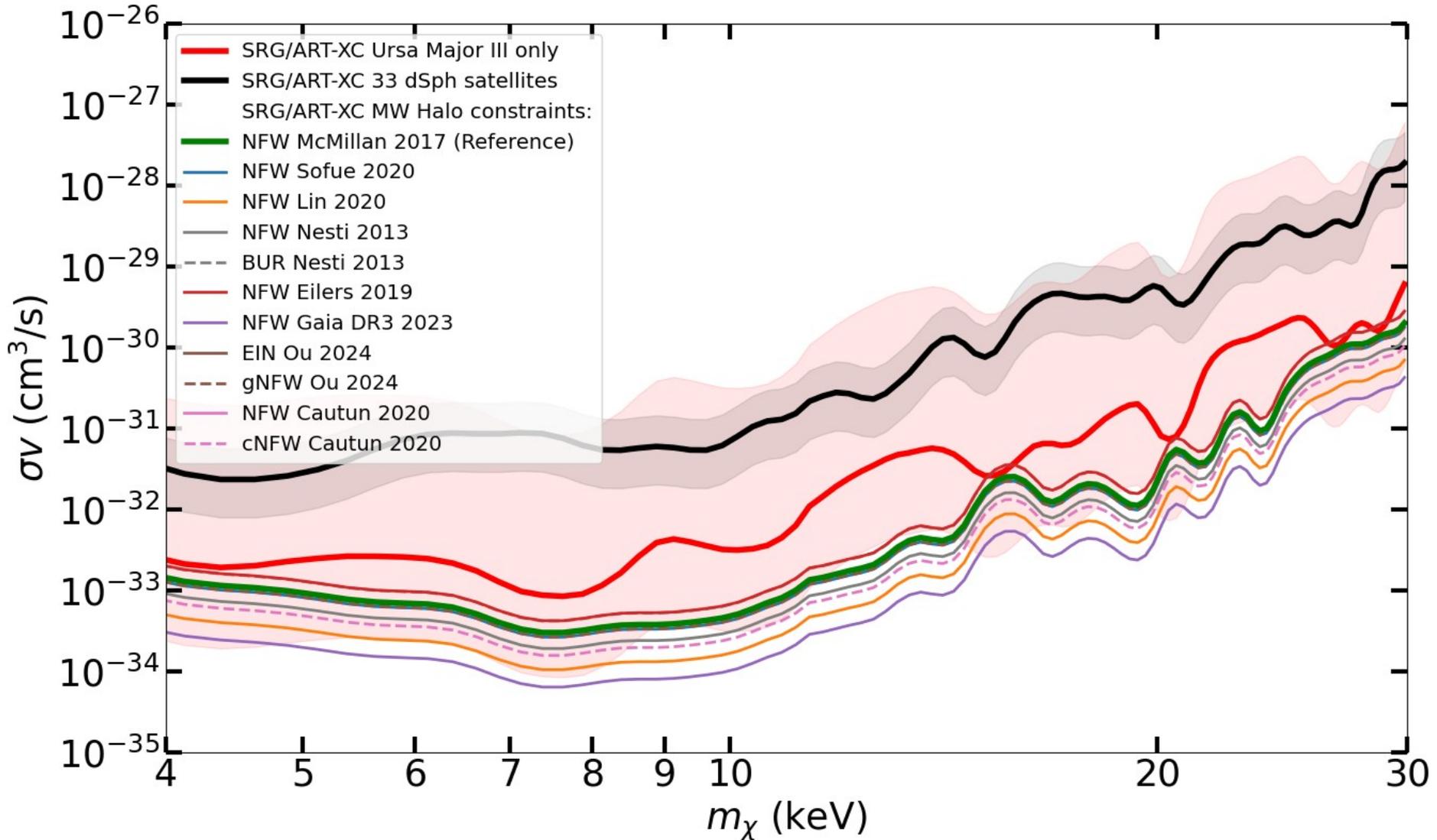
$$J \equiv \iint d\ell d\Omega \rho_{NFW}^2 \approx \frac{25}{8G^2} \frac{\sigma_{los}^4 \theta}{DR_h^2} \longrightarrow \log_{10}(J) = 21.2^{+1} [\text{GeV}^2/\text{cm}^5]$$

Более точная оценка приведена в работе Zhao et al. (2406.16769):  $\log_{10}(J) = 21.4 \pm 0.7 [\text{GeV}^2/\text{cm}^5]$   
 Однако если убрать из анализа всего одну звезду, то  $\log_{10}(J) = 18.6_{-3.5}^{+2.1} [\text{GeV}^2/\text{cm}^5]$

Для сравнения:

Галактическое гало:  $\log_{10}(J) = 22.86 [\text{GeV}^2/\text{cm}^5]$

Суммарный J-фактор для 33 dSph галактик:  $\log_{10}(J) = 20.20_{-0.38}^{+0.47} [\text{GeV}^2/\text{cm}^5]$



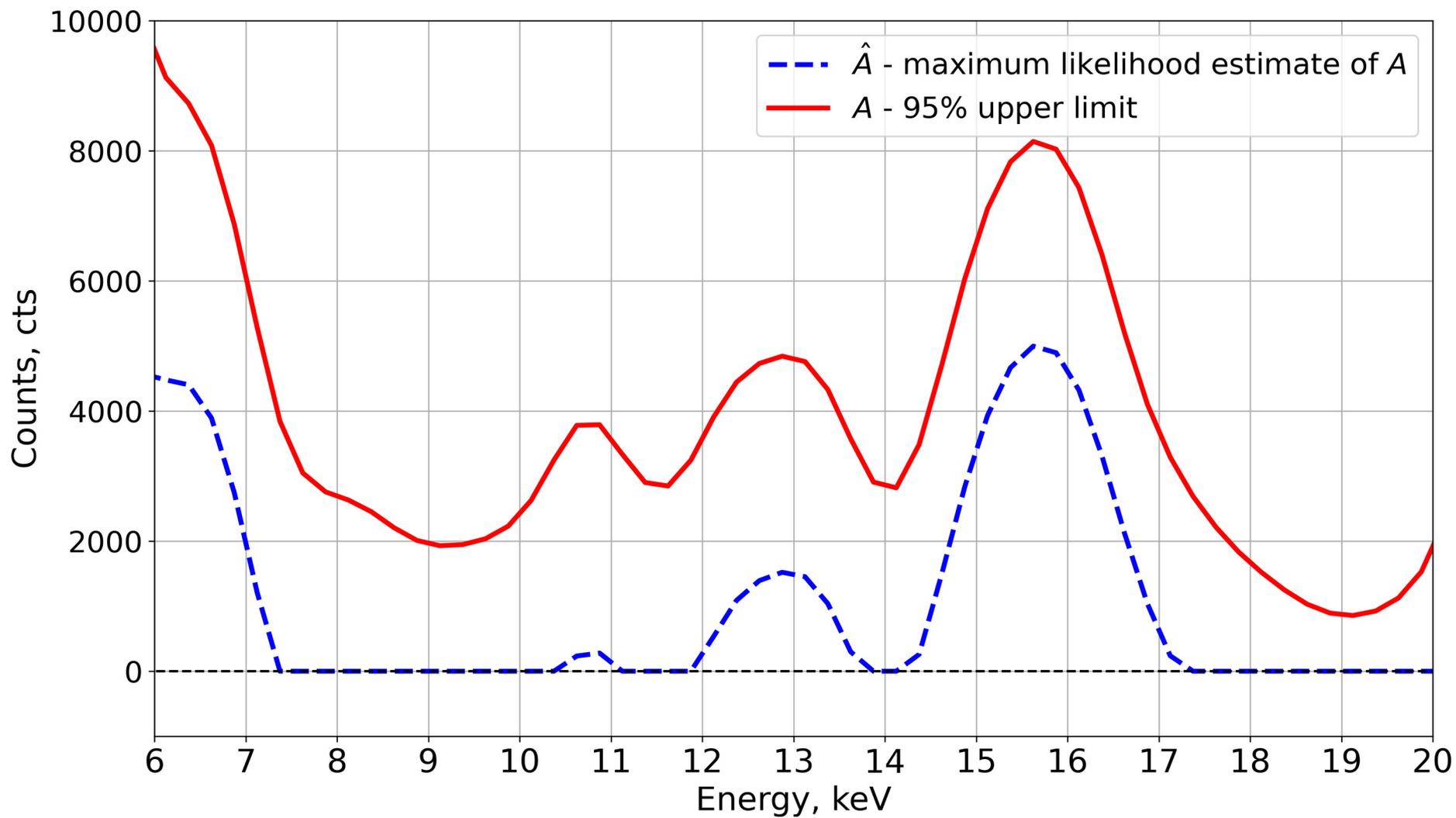
[5] E. I. Zakharov et. al., Phys. Rev. D 110, 123026 (2024), arXiv: 2407.18371 [astro-ph.HE].

# Спасибо за внимание

E-mail: [ezakharov@cosmos.ru](mailto:ezakharov@cosmos.ru)

Telegram: [@eizakharov](https://www.t.me/eizakharov)

# **Дополнительные материалы**



# Классы событий

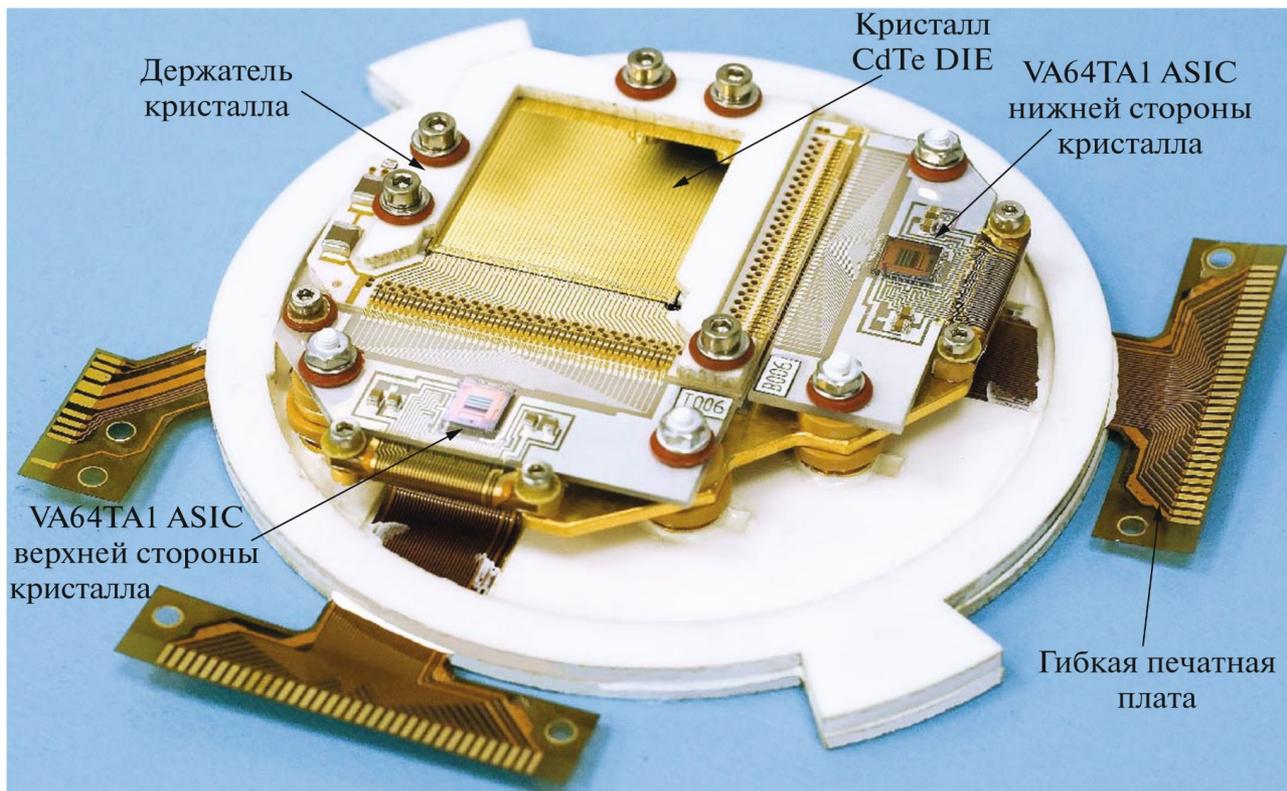
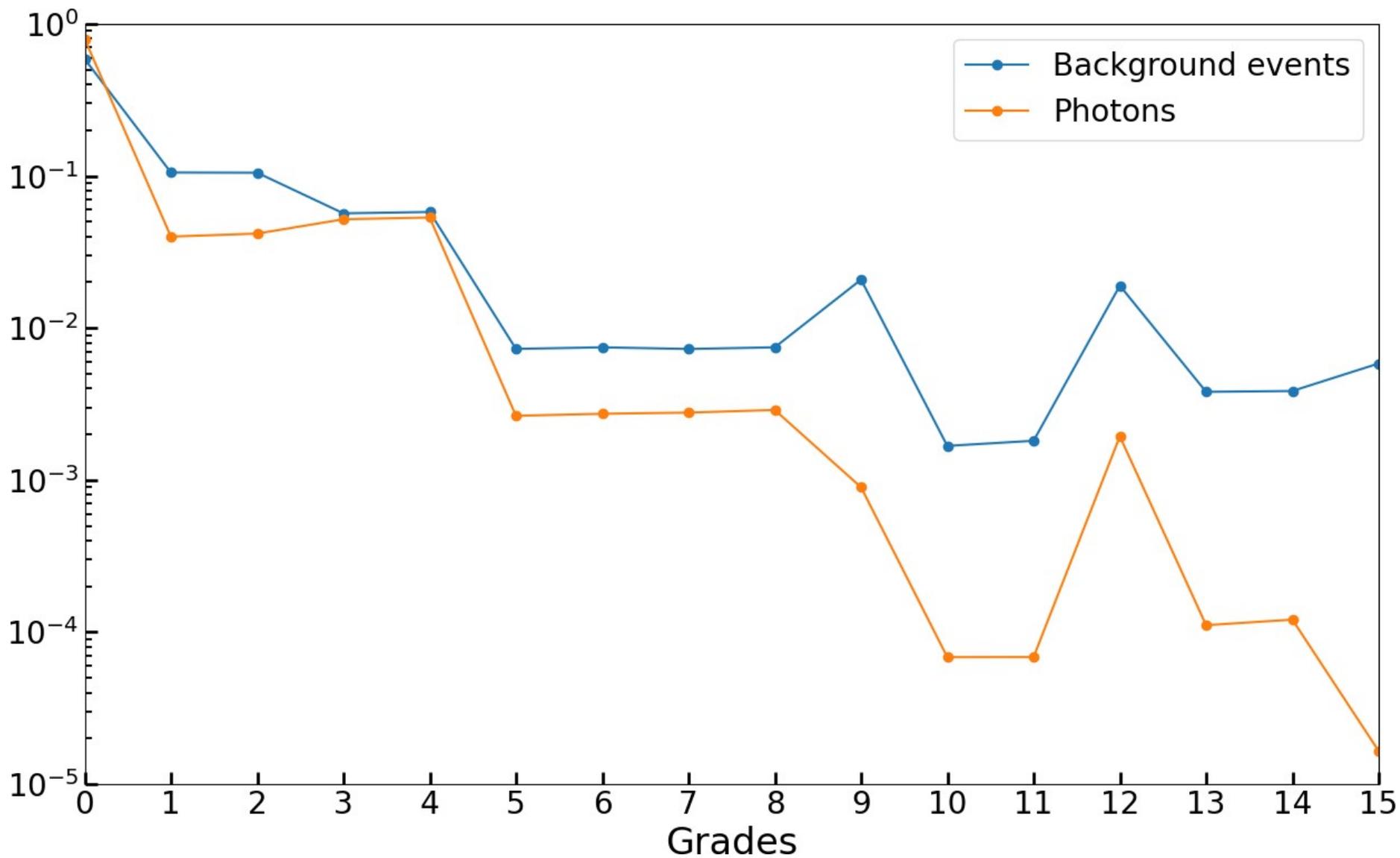
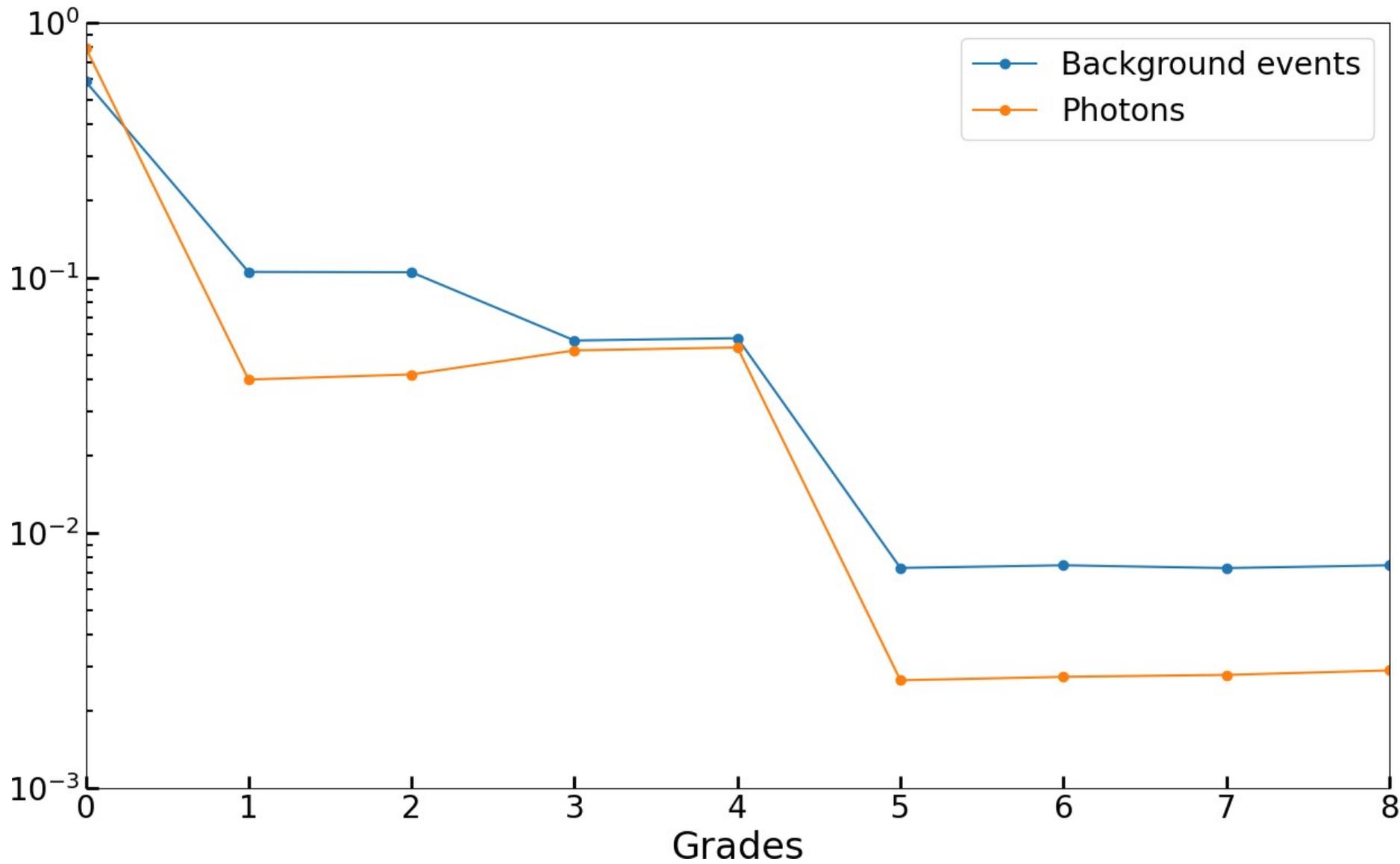


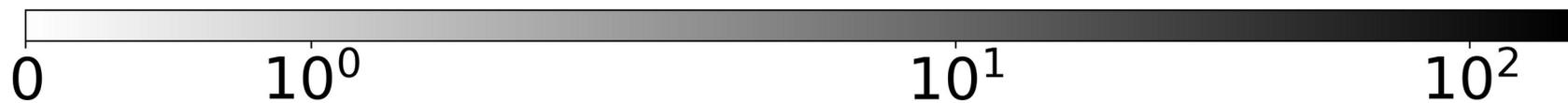
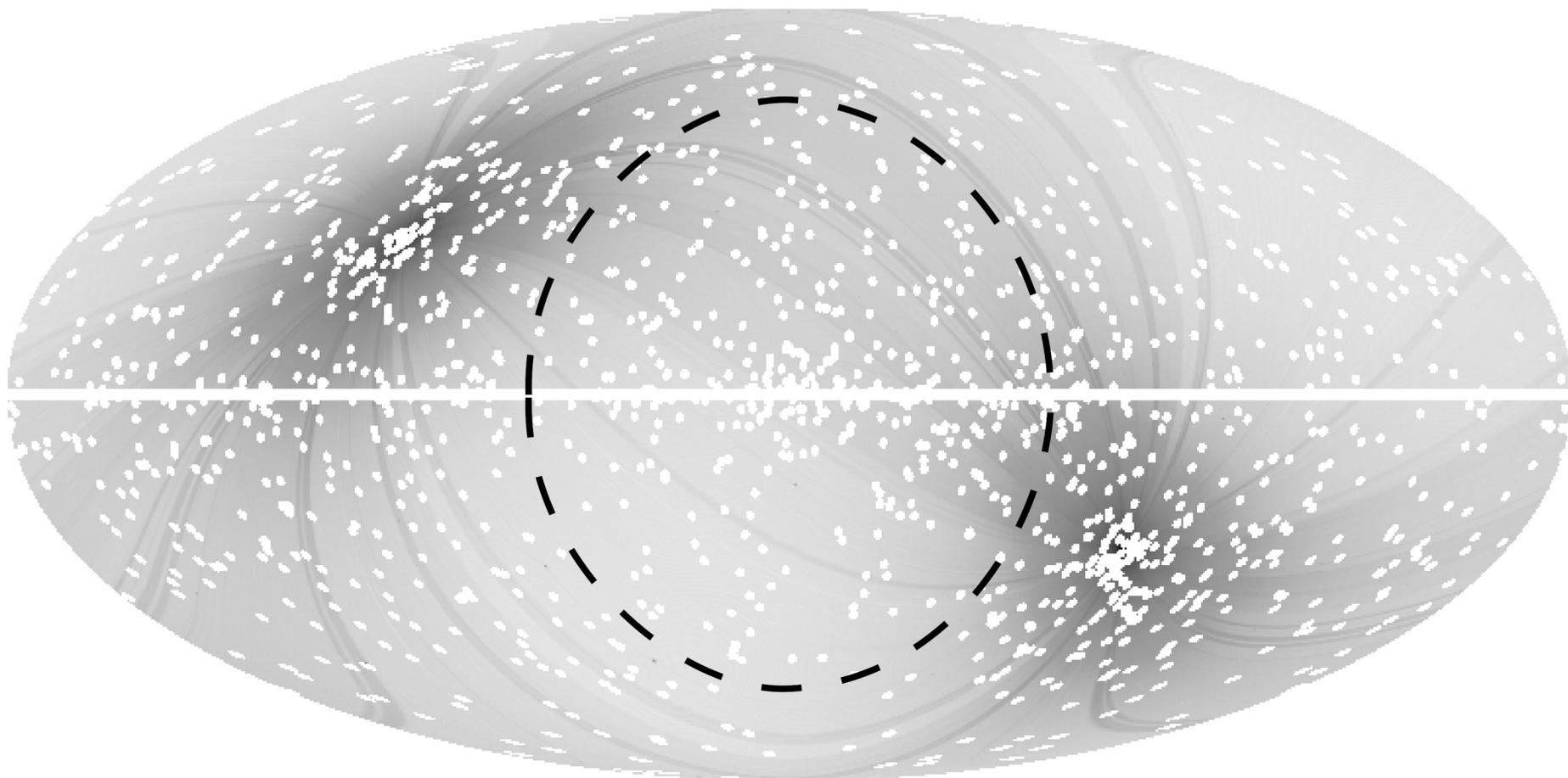
Table 2: EVENT GRADE DEFINITIONS<sup>†</sup>

GRADE	Top	Bot	GRADE	Top	Bot
0	OXO	OXO	8	OXX	OXX
1	XXO	OXO	9	XXX	OXO
2	OXX	OXO	10	XXX	XXO
3	OXO	XXO	11	XXX	OXX
4	OXO	OXX	12	OXO	XXX
5	XXO	XXO	13	XXO	XXX
6	XXO	OXX	14	OXX	XXX
7	OXX	XXO	15	XXX	XXX

<sup>†</sup>X denotes above PHA threshold, O denotes below threshold



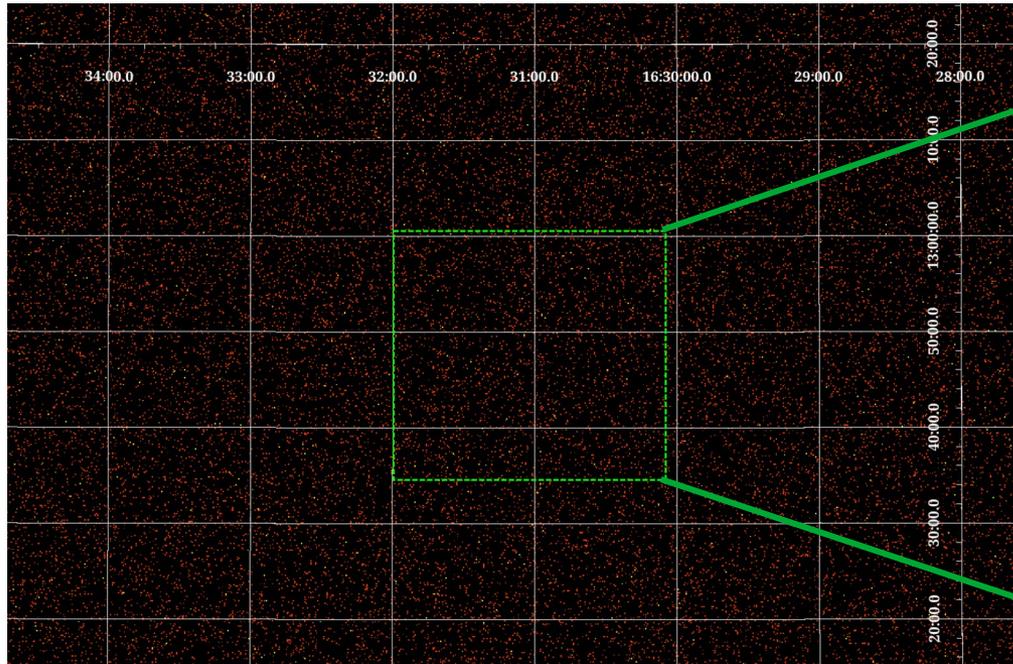




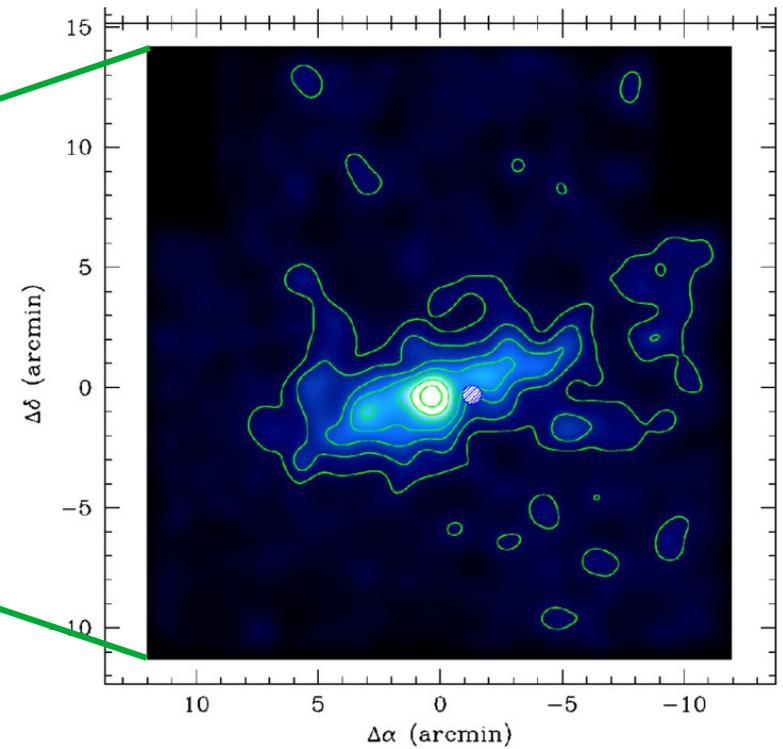
Exposure per pixel (s)

## Hercules dSph

СРГ/ART-XC (4 – 30 кэВ)



Большой бинокулярный телескоп  
ArXiv: 0706.1669



K.K. Boddy et al., Phys. Rev. D 109, 103007 (2024); ArXiv: 2401.05327

#	Name	$A_{\text{eff}}T$ [ $10^{11} \text{ cm}^2\text{s}$ ]	$\bar{N}^B$	$N^O$	$\log_{10}(J)$ [ $\text{GeV}^2/\text{cm}^5$ ]	Ref	#	Name	$A_{\text{eff}}T$ [ $10^{11} \text{ cm}^2\text{s}$ ]	$\bar{N}^B$	$N^O$	$\log_{10}(J)$ [ $\text{GeV}^2/\text{cm}^5$ ]	Ref
1	Aquarius II	5.480	174	216	$18.27^{+0.66}_{-0.58}$	[36]	48	Sextans	5.546	165	179	$17.73^{+0.13}_{-0.12}$	[36]
2	Bootes I	6.101	180	167	$18.17^{+0.51}_{-0.29}$	[36]	49	Triangulum II	6.528	262	272	$19.1^{+0.6}_{-0.6}$	[5]
3	Bootes II	6.041	179	196	$18.9^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	50	Tucana II	6.874	169	185	$18.84^{+0.55}_{-0.50}$	[36]
4	Bootes III	6.523	158	141	$18.8^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	51	Tucana III	6.986	155	178	$19.3^{+0.6}_{-0.6}$	[5]
5	Canes Venatici I	6.697	135	101	$17.42^{+0.17}_{-0.15}$	[36]	52	Tucana IV	7.050	157	166	$18.7^{+0.6}_{-0.6}$	[5]
6	Canes Venatici II	6.657	135	121	$17.82^{+0.17}_{-0.47}$	[36]	53	Tucana V	7.111	166	160	$18.6^{+0.6}_{-0.6}$	[5]
7	Canis Major	6.288	838	563	-	-	54	Ursa Major I	7.407	144	149	$18.26^{+0.29}_{-0.27}$	[36]
8	Carina	7.021	305	244	$17.83^{+0.10}_{-0.09}$	[36]	55	Ursa Major II	8.524	254	312	$19.44^{+0.41}_{-0.39}$	[36]
9	Carina II	7.379	477	461	$18.25^{+0.55}_{-0.54}$	[36]	56	Ursa Minor	9.160	207	182	$18.75^{+0.12}_{-0.12}$	[36]
10	Carina III	7.374	484	471	$20.2^{+1.1}_{-0.9}$	[37]	57	Virgo I	5.525	164	166	-	-
11	Cetus II	5.729	112	133	$19.1^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	58	Willman 1	7.342	145	164	$19.53^{+0.50}_{-0.50}$	[36]
12	Cetus III	5.608	131	110	-	-	59	Antlia II	6.399	706	488	-	-
13	Columba I	6.312	168	174	$17.6^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	60	Balbinot 1	6.006	237	192	-	-
14	Coma Berenices	6.200	151	189	$19.00^{+0.66}_{-0.35}$	[36]	61	Bliss 1	6.342	353	401	-	-
15	Crater II	5.724	210	192	$15.35^{+0.27}_{-0.25}$	[35]	62	Bootes IV	7.465	164	177	-	-
16	Draco	8.671	262	229	$18.83^{+0.12}_{-0.12}$	[36]	63	Bootes V	5.923	127	134	-	-
17	Draco II	9.064	213	226	$18.93^{+1.39}_{-1.70}$	[36]	64	Centaurus I	6.272	364	373	$17.7^{+0.4}_{-0.3}$	[38]
18	Eridanus II	6.661	136	105	$17.1^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	65	DELVE 1	5.948	494	431	-	-
19	Eridanus III	6.840	155	171	$18.1^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	66	DELVE 2	7.395	191	191	-	-
20	Fornax	6.298	126	162	$18.09^{+0.10}_{-0.10}$	[36]	67	DELVE 3	6.969	348	344	-	-
21	Grus I	6.354	147	149	$16.88^{+1.51}_{-1.66}$	[36]	68	DELVE 4	6.798	204	219	-	-
22	Grus II	6.197	198	207	$18.7^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	69	DELVE 5	6.338	211	223	-	-
23	Hercules	6.376	310	323	$17.37^{+0.53}_{-0.53}$	[36]	70	DES 1	6.464	129	121	-	-
24	Horologium I	7.007	161	232	$19.27^{+0.77}_{-0.71}$	[36]	71	DES 3	6.457	231	247	-	-
25	Horologium II	6.840	145	160	$18.3^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	72	DES 4	7.510	245	263	-	-
26	Hydra II	6.040	286	241	$17.8^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	73	DES 5	7.524	240	242	-	-
27	Hydrus I	7.000	281	388	$18.65^{+0.32}_{-0.31}$	[35]	74	DES Sgr 1	5.648	122	130	-	-
28	Indus II	6.234	295	348	$17.4^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	75	DES Sgr 2	5.646	182	115	-	-
29	Kim 2	6.402	276	275	$18.1^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	76	Eridanus IV	5.789	258	289	$18.8^{+0.4}_{-0.4}$	[38]
30	Laevens 3	6.180	314	357	-	-	77	Gaia 3	7.436	375	304	-	-
31	Leo I	5.742	158	176	$17.64^{+0.14}_{-0.12}$	[36]	78	HSC 1	5.619	212	194	-	-
32	Leo II	6.034	140	117	$17.76^{+0.22}_{-0.18}$	[36]	79	Kim 1	5.730	219	581	-	-
33	Leo IV	5.517	165	168	$16.40^{+1.01}_{-1.15}$	[36]	80	Kim 3	6.004	293	253	-	-
34	Leo T	5.867	162	163	$17.49^{+0.49}_{-0.45}$	[36]	81	Koposov 1	5.782	152	190	-	-
35	Leo V	5.542	164	179	$17.65^{+0.91}_{-1.03}$	[36]	82	Koposov 2	6.102	195	179	-	-
36	Pegasus III	5.660	211	227	$18.30^{+0.89}_{-0.97}$	[36]	83	Laevens 1	5.580	187	152	-	-
37	Phoenix II	6.656	147	122	$18.1^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	84	Leo Minor I	6.239	141	194	-	-
38	Pictor I	6.958	160	160	$17.9^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	85	Munoz 1	9.143	205	189	-	-
39	Pictor II	7.463	355	398	-	-	86	Pegasus IV	6.487	333	265	$17.9^{+0.8}_{-0.8}$	[39]
40	Pisces II	5.642	203	190	$17.30^{+1.00}_{-1.09}$	[36]	87	PS1 1	5.986	498	614	-	-
41	Reticulum II	7.072	155	178	$18.96^{+0.38}_{-0.37}$	[36]	88	Segue 3	6.289	329	1021	-	-
42	Reticulum III	7.404	185	228	$18.2^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	89	Smash 1	7.022	380	415	-	-
43	Sagittarius	6.031	580	777	-	-	90	Torrealba 1	7.518	242	248	-	-
44	Sagittarius II	5.898	402	380	$18.4^{+0.6}_{-0.6}$	[5]	91	Virgo II	5.967	243	212	-	-
45	Sculptor	6.062	117	157	$18.58^{+0.05}_{-0.05}$	[36]	92	YMCA 1	7.567	427	428	-	-
46	Segue 1	5.841	158	180	$19.12^{+0.49}_{-0.58}$	[36]	93	Ursa Major III	6.370	148	147	$21^{+1}_{-2}$	[40]
47	Segue 2	6.023	273	338	-	-							

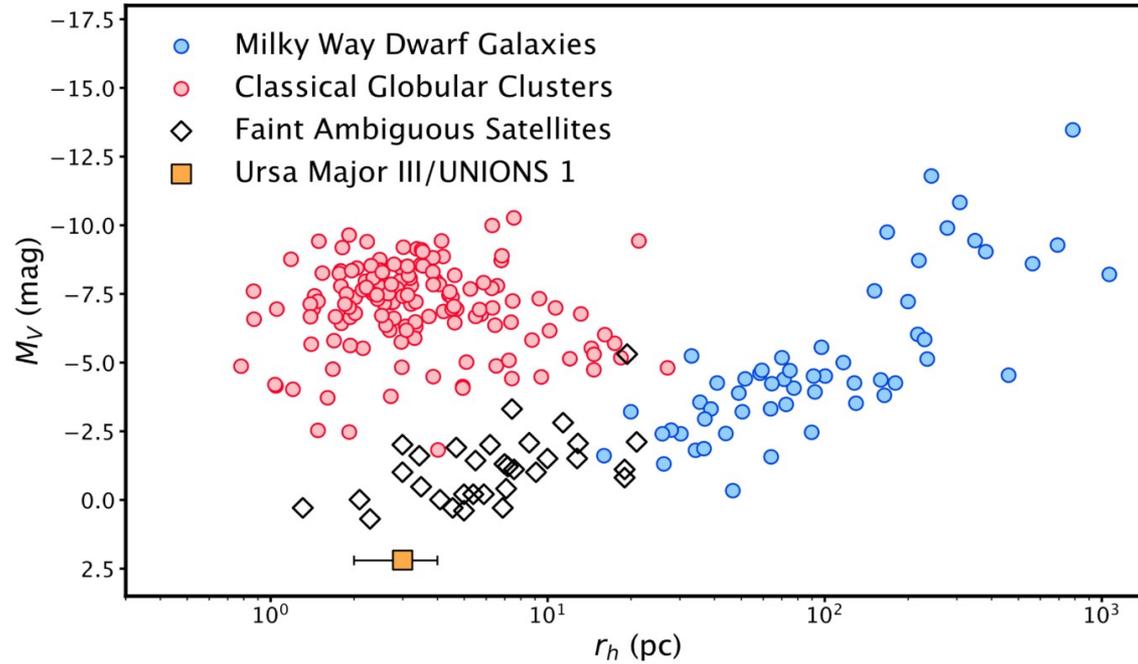
Всего галактик: 93

Известен J-фактор: 55

Использовалось в анализе: 27 + 6

Доступно для анализа: 28

S. E. T. Smith et al., ApJ 961, 92 (2024); ArXiv: 2311.10147



**Figure 9.**  $M_V$ - $r_h$  plane with all known Milky Way satellites included. Dwarf galaxies are plotted in blue, classical globular clusters are plotted in red (where “classical” refers to those in the Harris catalog), and faint, ambiguous Milky Way satellites are plotted as open black diamonds. UMa3/U1 is shown as an orange square with  $r_h$  measurement uncertainties.  $M_V$  uncertainties are about the same size as the square marker.