

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА»



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Курсовая работа

**ПОИСК СИГНАЛА РАСПАДА ЧАСТИЦ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ
С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА ART-XC**

Выполнил:
студент 206 гр. Я. А. Писарев

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1 Теоретическая справка	4
1.1 Стерильные нейтрино	4
1.2 ART-XC	5
Глава 2 Практическая часть	7
2.1 Постановка задачи	7
2.2 Источники	7
2.3 Искомый сигнал	8
2.4 Спектр скоплений	11
Заключение	14
Список использованных источников	15

ВВЕДЕНИЕ

Наличие невидимого вещества во Вселенной (темной материи), необъясняемое в рамках Стандартной модели физики элементарных частиц, является одной из основных нерешенных проблем физики. Введение новых лептонов — стерильных нейтрино — позволяет объяснить природу темной материи, а с помощью новейших рентгеновских телескопов можно найти следы распада этих частиц.

Глава 1 Теоретическая справка

1.1 Стерильные нейтрино

Стерильные нейтрино — это гипотетические частицы (нейтральные лептоны-нейтрино), которые, как полагают, взаимодействуют только через гравитацию, а не через какие-либо другие фундаментальные взаимодействия Стандартной модели [1]. Добавление трёх майорановских синглетных фермионов в Стандартную модели решает сразу 3 космологические проблемы

- 1) *Тёмная материя.* Физика тёмной материи до сих пор не ясна, в рамках стандартной модели эта проблема не решается. Все стерильные нейтрино обладают массой, а легчайшее из них может быть настолько долгоживущим, что может претендовать на роль частиц тёмной материи
- 2) *Нейтринные осцилляции.* Нейтрино осциллируют (Нобелевская премия по физике 2015 года). Это явление невозможно объяснить в рамках Стандартной модели физики частиц. Одно из возможных решений состоит в добавлении к известным частицам так называемых стерильных нейтрино — фермионов, которые могут смешиваться с обычными (активными) нейтрино и таким образом (как бы играя роль промежуточного состояния) обеспечить необходимые переходы между активными нейтрино, нейтринные осцилляции.
- 3) *Барионная асимметрия Вселенной.* Вводом новых частиц можно объяснить и барионную асимметрию вселенной через механизм лептогенезиса в первичной плазме

Стерильные нейтрино являются нестабильными и распадаются на 2 частицы: нейтрино и фотон, с темпом распада [2]:

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

Где m_s — масса стерильного нейтрино, а θ — угол смешивания стерильного нейтрино. Энергия фотона распада — $\frac{m_s}{2}$. Для стерильных нейтрино,

формирующих материю галактик, спектр фотонов должен быть практически монохроматичен с шириной порядка скорости частиц в галактике. Это наталкивает на мысль искать следы фотонов в галактическом спектре с помощью рентгеновских телескопов.

1.2 ART-XC

Частицы темной материи, согласно концепции, которую мы рассматриваем, могут распадаться, продуктом распада станет рентгеновский фотон, который, впоследствии, может быть зафиксирован рентгеновскими телескопами. [2]

Совсем недавно начала работу космическая обсерватория SRG (Спектр-рентген-гамма), состоящая из двух рентгеновских телескопов: ART-XC и eROSITA. Ожидается, что она внесет значительный вклад в космологию, исследуя свойства масштабных космических структур.

Рентгеновские электроны обладают большой энергией. Если они падают на зеркало перпендикулярно или почти перпендикулярно, то проходят через поверхность насквозь. Поэтому в рентгеновских телескопах используют зеркала косого падения, обеспечивающие очень маленький угол отражения. Это достигается за счет использования схемы телескопа Вольтера I рода, где зеркало имеет форму парабола-гипербола. Но одно зеркало перехватывает очень небольшую долю излучения. Чтобы повысить эффективность телескопа, несколько таких зеркал косого падения концентрически вкладываются друг в друга. Поэтому каждая зеркальная система телескопа ART-XC состоит из 28 вложенных зеркальных оболочек. [3]

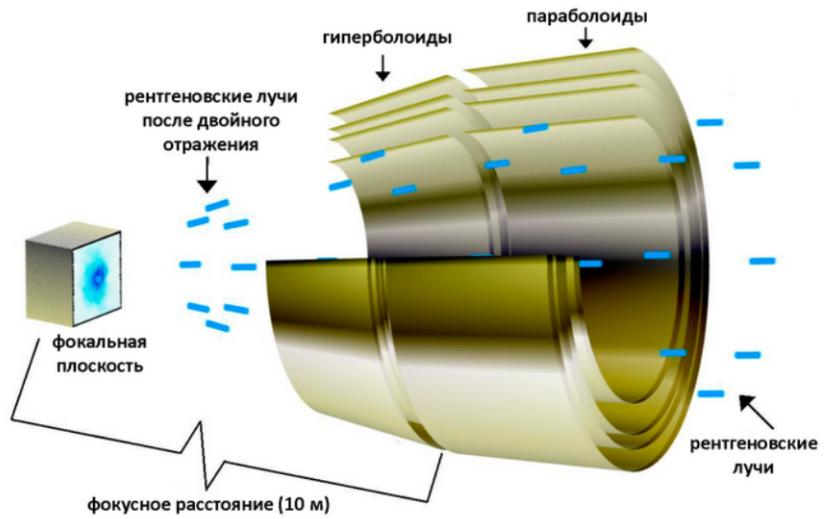


Рисунок 1 — Схема рентгеновского телескопа Чандра в разрезе (он имеет схему телескопа Вольтера I рода). Рентгеновские электроны идут почти параллельно поверхности, прежде чем отразиться от нее. Каждый из семи телескопов ART-XC устроен по такой же схеме, только зеркальных оболочки не 4, а 28, а фокусное расстояние не 10 м, а 2,7 м.

Космический аппарат выводится на орбиту в точку L2 на удалении от Земли примерно в 1,5 миллиона километров. Эта точка считается наиболее подходящей для проведения обзоров за всем небом. Вращаясь вокруг своей оси (примерно соответствует направлению на Солнце), космическая обсерватория сможет осуществить полный обзор небесной сферы за шесть месяцев, при этом Солнце не будет оказываться в поле её зрения. За четыре года работы научный аппарат сможет выполнить сразу 8 обзоров всего неба

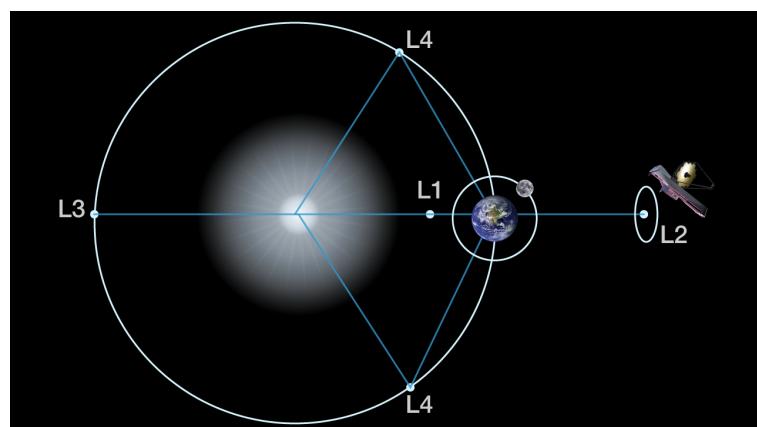


Рисунок 2 — Местонахождение обсерватории

Глава 2 Практическая часть

2.1 Постановка задачи

Как отмечалось выше, с помощью данных рентгеновского телескопа ART-XC можно попытаться найти сигнал распада стерильных нейтрино [2]. Для этого нужно подобрать подходящий источник. Идеальным источником являются скопления галактик, так как они массивные, следовательно, содержат тёмную материю, распады которой нужно детектировать.

После выбора источников необходимо понять, как будет выглядеть искомый сигнал

Далее следует построить спектр скоплений и исследовать его на предмет подходящих сигналов

2.2 Источники

Подходящим источником, как говорилось ранее, являются скопления. Однако, одно скопление имеет достаточно малый угловой размер, поэтому общие закономерности в его спектре проявляться не будут. Следует включать в выборку данные сразу нескольких скоплений, и чем их будет больше, тем лучше. Большинство известных скоплений находятся в каталоге скоплений Планка [4], так как все объекты находятся на разных расстояниях каждый спектр необходимо поправить на красное смещение, чтобы при наложении сигналы тёмной материи суммировались.

Таблица 1 — Некоторые скопления из каталога Планка.

Название	Прямое восхождение	Склонение	Масса, M_{\odot}	Красное смещение
PSZ2 G000.04+45.13	229.19°	-1.02°	3.96×10^{14}	0.12
PSZ2 G000.13+78.04	203.56°	20.25°	5.12×10^{14}	0.17
PSZ2 G000.40-41.86	316.06°	-41.35°	5.29×10^{14}	0.17

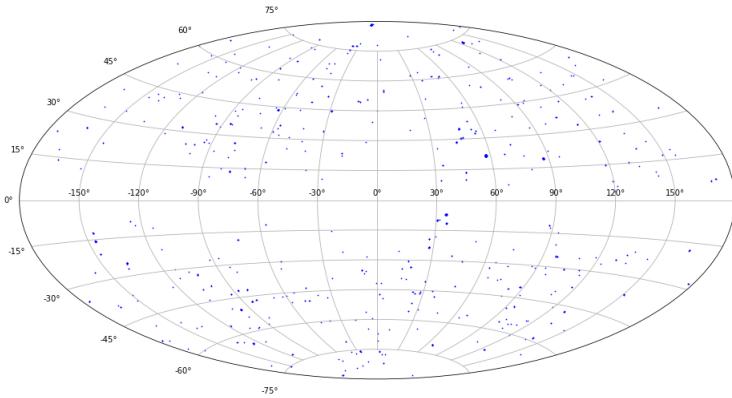


Рисунок 3 — Карта скоплений из каталога Планка

2.3 Искомый сигнал

Необходимо понимать, что даже при идеальном детекторе сигнал распада стерильных нейтрино не монохроматичен, так как детектор и распадающаяся частица находятся в разных системах отчёта и из-за эффекта Доплера линия будет иметь определённую ширину. Для качественной оценки сигнала, не ограничивая общности, рассмотрим 1 скопление. Это скопление находится на большом расстоянии с характерным красным смещением, поправим центр масс этого скопления на красное смещение, т.е. расчитаем энергии фотонов в системе отчёта центра масс скопления.

$$E_{new} = E_{old} \times (1 + z) \quad (2)$$

После этого нужно ещё раз учесть эффект Доплера, но в масштабах скопления, разброс скоростей для отдельных галактик внутри скопления может достигать 1000 км/с + разброс внутри галактик до 500 км/с. Поэтому ширину линии распада можно оценить сверху как $\Delta E = \frac{\Delta V}{c} E_{max} \approx 0.3$ КэВ, что даже при такой высокой оценке не разрешимо для ART-XC, у которого в самом лучшем случае разрешение 1.2 КэВ

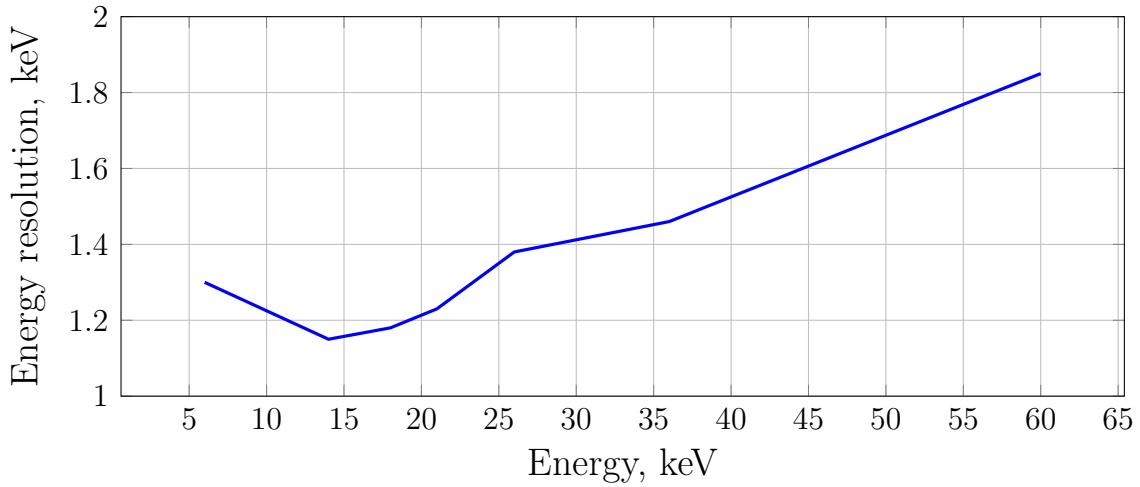


Рисунок 4 — Зависимость энергетического разрешения от энергии зафиксированных фотонов

Рассчитаем теоретически поток от всех известных скоплений. Для этого необходимо посчитать угловой размер источника $\Delta\theta$, который определяется выражением [5]:

$$d = r_a(z)\Delta\theta \quad (3)$$

где $r_a(z) = \frac{1}{1+z}r(z)$, $d = 2r_{200}$, $r(z)$ полностью определяется величиной красного смещения через выражение:

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_m(1+z')^3}} \quad (4)$$

а r_{200} можно найти через массу скопления

$$M_{200} = \frac{4\pi}{3} \rho_c r_{200}^3 \times 200\Omega_m \quad (5)$$

где $\rho_c = \rho_c(z) = \frac{3H(z)^2}{8\pi G}$

Подставляя (4) и (5) в (3) и учитывая необходимые зависимости, вычисляем $\Delta\theta$.

Для того, чтобы посчитать поток фотонов со скоплением необходимо знать распределение темной материи в нём, для данной задачи достаточно использовать первое приближение, а именно, сферическое распределение

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s}(1 + \frac{r}{r_s})^2} \quad (6)$$

где ρ_s – характерная плотность темной материи $\rho_s = \frac{M_{200}}{V} \Omega_m$,
 r_s – характерный размер скопления $r_s = r_{200}$. Далее требуется найти геометрический фактор

$$S_{DM} = \int_{\alpha - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\alpha + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_{\beta - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\beta + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_{r-r_{200}}^{r+r_{200}} \rho(r') d\phi d\theta dr' \quad (7)$$

который, после несложных математических преобразований (учитывая, что $r_{200} \ll r$) вырождается в:

$$S_{DM} = \Delta\theta^2 \rho_s r_{200} \left(\frac{r_{200}}{r} \right)^2 \quad (8)$$

После подчёта геометрического фактора можно напрямую найти поток по формуле [2]:

$$F_{DM} = \frac{1}{7.88 \times 10^{-4}} \left(\frac{S_{DM}}{M_{\odot} pc^{-2}} \right) \times \left(\frac{2E_{\gamma}}{1 keV} \right)^4 \sin^2 2\theta \times \left(\frac{1}{1+z} \right)^2 \frac{cts}{cm^2 s} \quad (9)$$

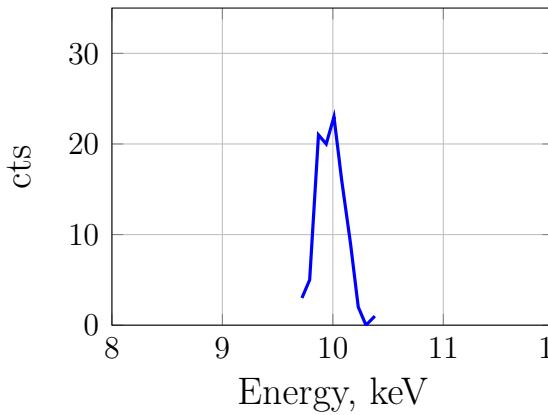
Число отчётов за пол года с одного скопления:

$$\phi = F_{DM} \times \frac{1}{2} year \times S_{det} \quad (10)$$

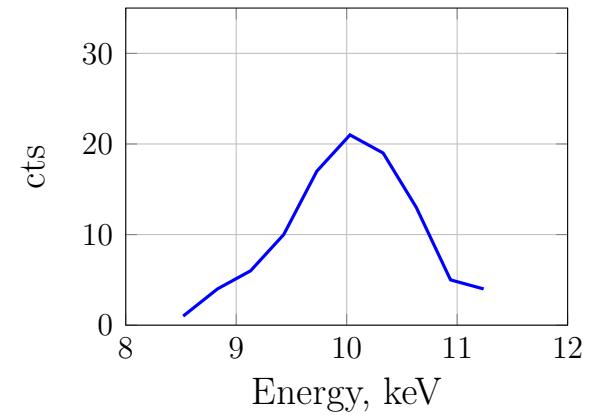
$\frac{1}{2} year$ – время полного обзора неба телескопом ART-XC, S_{det} – площадь детектора ($\sim 10 cm^2$) Далее потоки с каждого скопления суммируются

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (11)$$

Где N - количество скоплений. В итоге в спектре скоплений должна быть видна линия с шириной 0.3 КэВ (Для ART-XC – 1.2 КэВ) и амплитудой $\sim 10^2 cts$.



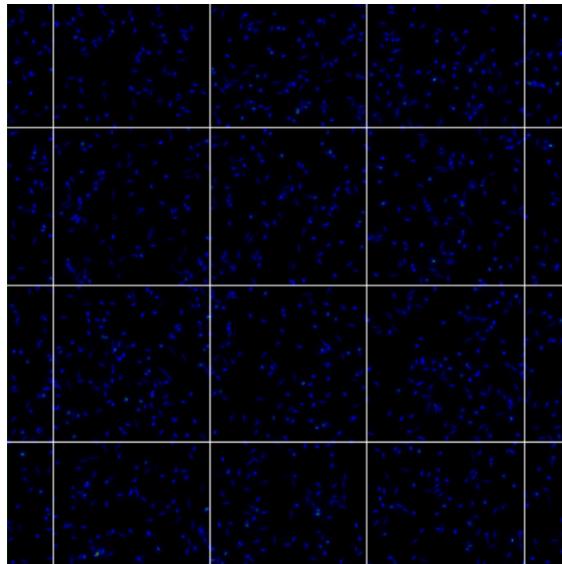
(а) Сигнал распада стерильных нейтрино
для идеального прибора



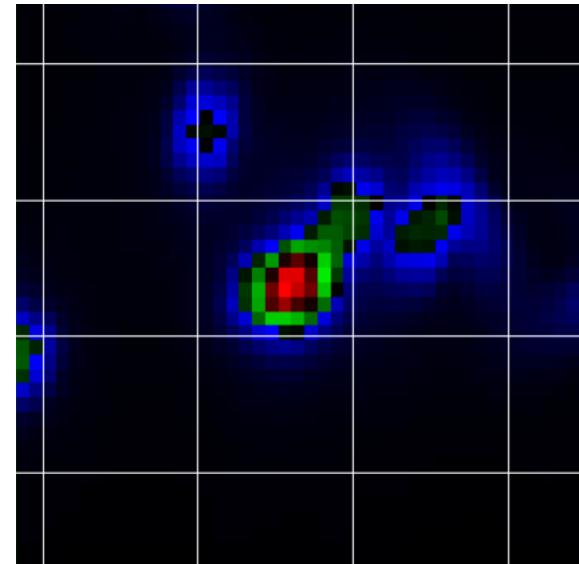
(б) Сигнал распада стельных нейтрино
для ART-XC

2.4 Спектр скоплений

Для простоты разберем задачу построения спектра с одним рентгеновским источником на тестовых данных.



(в) Изображение площадки тестовых
данных (источник в левом нижнем углу)



(г) Источник на площадке, принцип
работы программы

Рисунок 5 — Тестовые данные телескопа ART-XC (цветами подсвечиваются выделяющиеся из общего фона фотоны)

На площадке размером $4^\circ \times 4^\circ$ расположен источник и необходимо построить его спектр. Эта задача легко решается с помощью python.

- 1) Все данные наблюдений телескопа содержаться в fits файле. В данном случае это просто таблица, строки которой отвечают сигналам (в

данному случае это фотоны), а столбцы - определенной характеристике сигнала (энергия, склонение, прямое восхождение и т.д.)

- 2) Выбирается участок неба, вокруг него описывается круг и считаются все фотоны, которые попали в данную область
- 3) Далее строятся гистограммы энергий фотонов
- 4) Так как у скоплений на небе значения телесных углов невелики, то детектор фиксирует с них довольно небольшое количество сигнала, распределение фотонов по энергиям подчиняется распределению Пуассона, которым и аппроксимируется данная зависимость в программе.

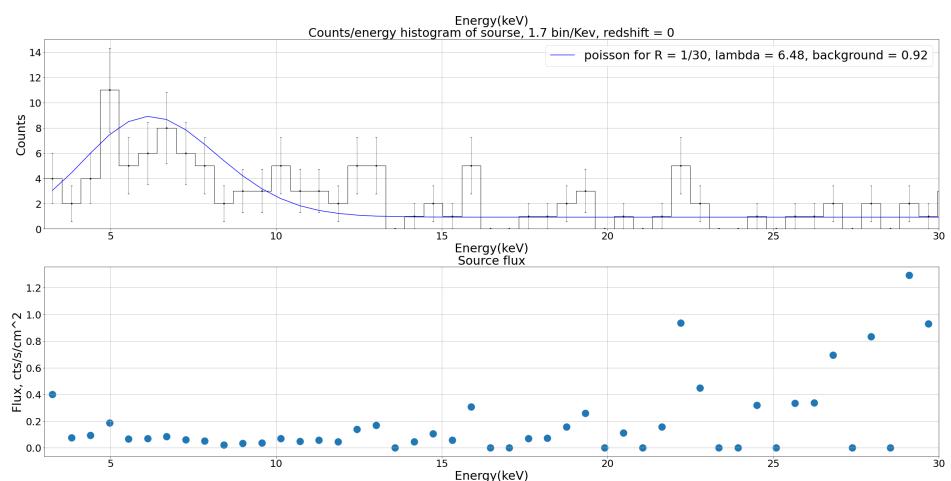


Рисунок 6 — Гистограмма источника, для $z=0$

Так как источник может находиться на значительном расстоянии необходимо поправить спектр на красное смещение.

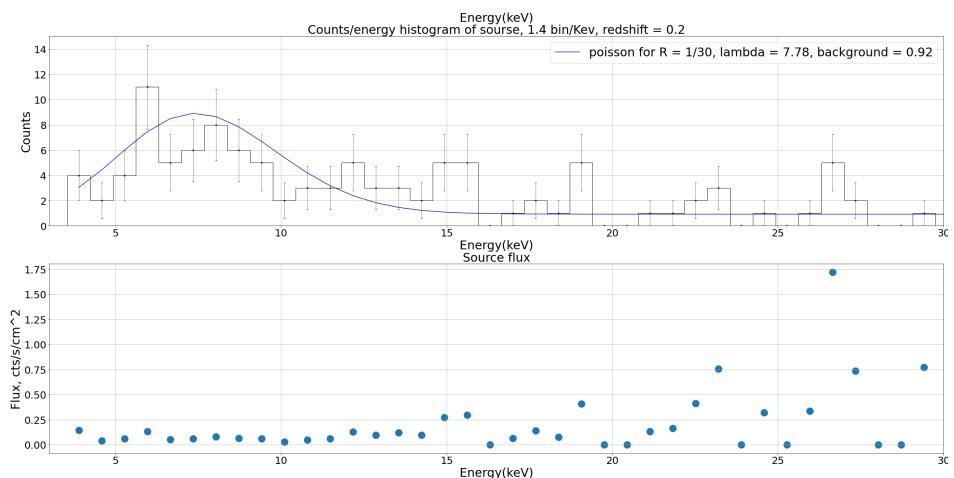


Рисунок 7 — Гистограмма источника, для $z=0.2$

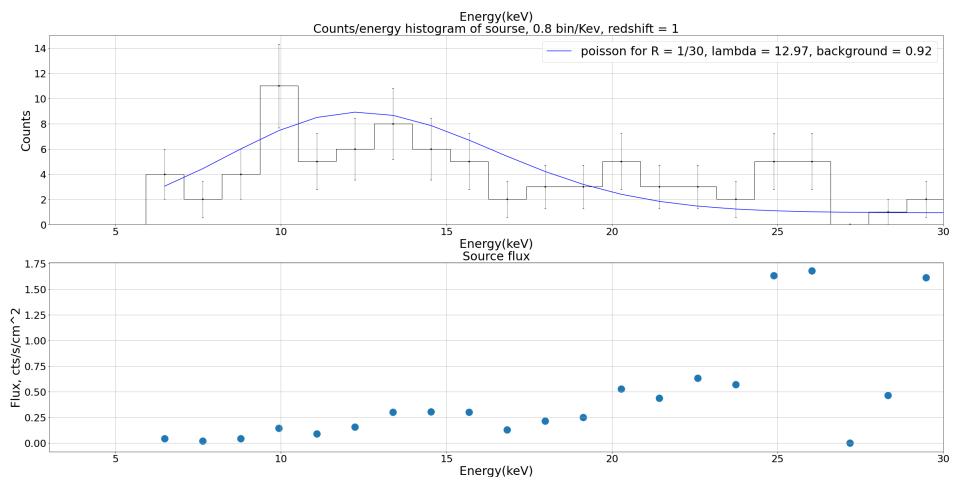


Рисунок 8 — Гистограмма источника, для $z=1$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подрезюмируем проведённое исследование.

- 1) *Кратко освещена тема стерильных нейтрино.* Объяснена мотивация введения этих частиц в Стандартную модель.
- 2) *Теоретически оценен поток фотонов распада на детектор телескопа,* на основе этого можно судить о возможности поймать сигнал распада стерильных нейтрино с помощью ART-XC (При наличии данных по скоплениям с самого телескопа).
- 3) *Проведен анализ тестовых данных.* Основной упор был сделан на программу, которая способна обрабатывать данные с ART-XC, по которым, впоследствие, можно будет судить о наличии неизвестного сигнала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Горбунов Д. С.* Стерильные нейтрино и их роль в физике частиц и космологии. — 2014.
2. *Barinov V. V.* Towards Testing Sterile Neutrino Dark Matter with Spectrum-Roentgen-Gamma Mission. — arXiv:2007.07969vP, 2021.
3. *M. Pavlinsky A. Tkachenko V. L.* The ART-XC telescope on board the SRG observatory. — 2021.
4. Planck Catalogue. — 2015.
5. *Д.С.Горбунов.* ВВЕДЕНИЕ ТЕОРИЮ РАННЕЙ ВСЕЛЕНОЙ. — ЛКИ, 2008.