



Поиск фотонного сигнала от аннигиляции частиц темной материи с помощью NuSTAR:

Ограничения на $\langle\sigma v\rangle$ после 11 лет наблюдений

Е. И. Захаров^{1,2}, В. В. Баринов³, Д. С. Горбунов^{3,4}, Р. А. Кривonos¹, А.А. Мухин^{1,4}

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

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

³Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия



Аннотация: в работе представлены новые ограничения на независящее от скорости сечение аннигиляции $\langle\sigma v\rangle$ для частиц аннигилирующей темной материи кэВ-ого диапазона масс, основанных на 11-летних наблюдениях на рентгеновском телескопе NuSTAR. Используя фотоны от боковой засветки, обеспечивающие широкое поле зрения, мы проводим поиск фотонных сигнатур от аннигиляции темной материи в галактическом гало. Мы моделируем результирующий диффузный рентгеновский спектр в диапазоне энергий 3-20 кэВ и ищем линейчатые спектральные особенности, которые могут возникать в результате аннигиляции частиц темной материи в фотоны. Статистически значимого превышения над ожидаемым астрофизическим фоном не обнаружено. Поэтому мы устанавливаем верхние ограничения на $\langle\sigma v\rangle$ как функцию массы темной материи, предполагая независимую от скорости аннигиляцию s-волн и несколько профилей темной материи в Галактике. Наши результаты на данный момент являются наиболее строгими рентгеновскими ограничениями в этом диапазоне масс и согласуются с данными, полученными другими обсерваториями.

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 эВ) 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:

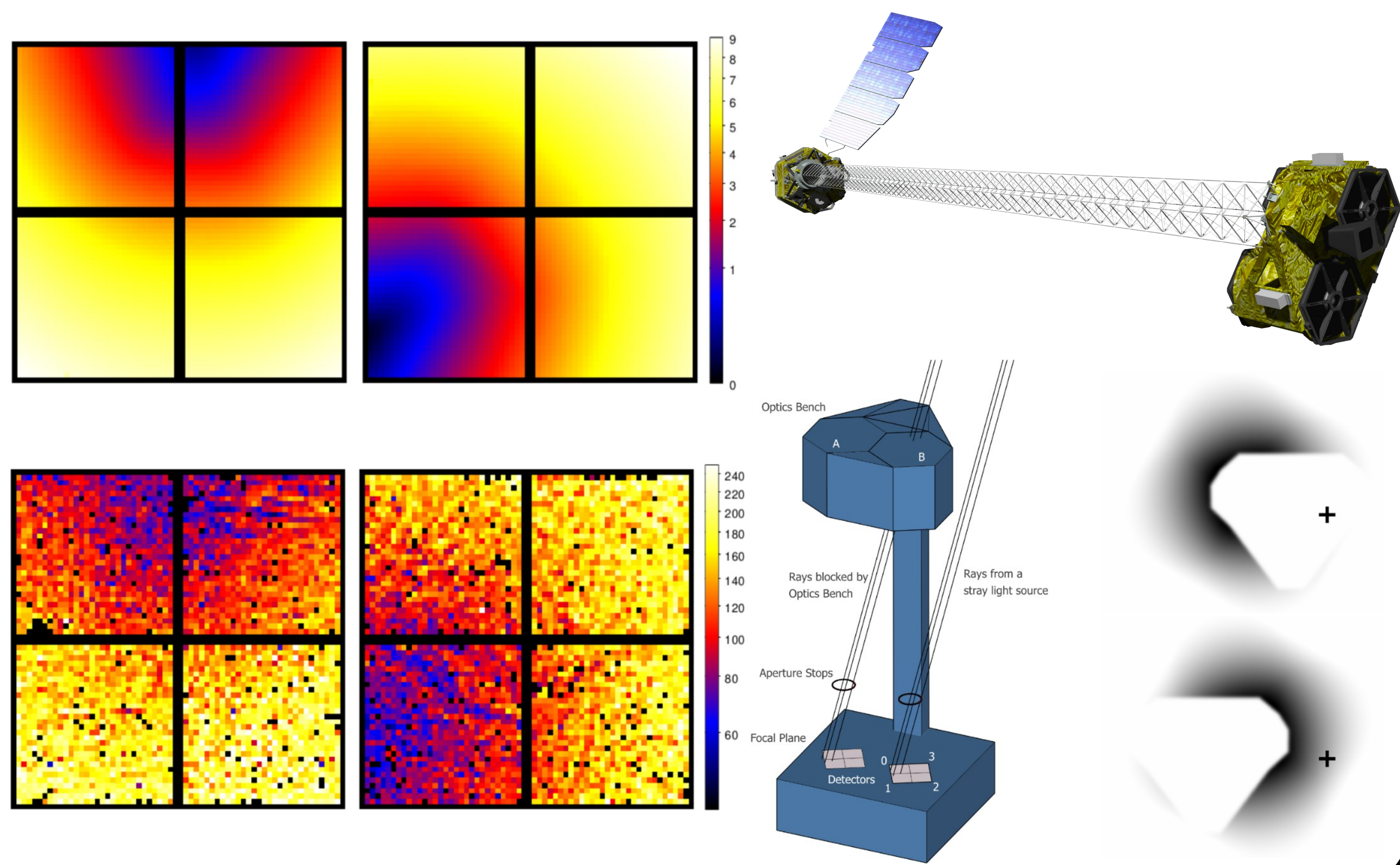
$$r(l, b, s) = \sqrt{s^2 + R^2 + 2Rs \cos(l) \cos(b)}$$

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

Телескоп NuSTAR и его боковая засветка

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.



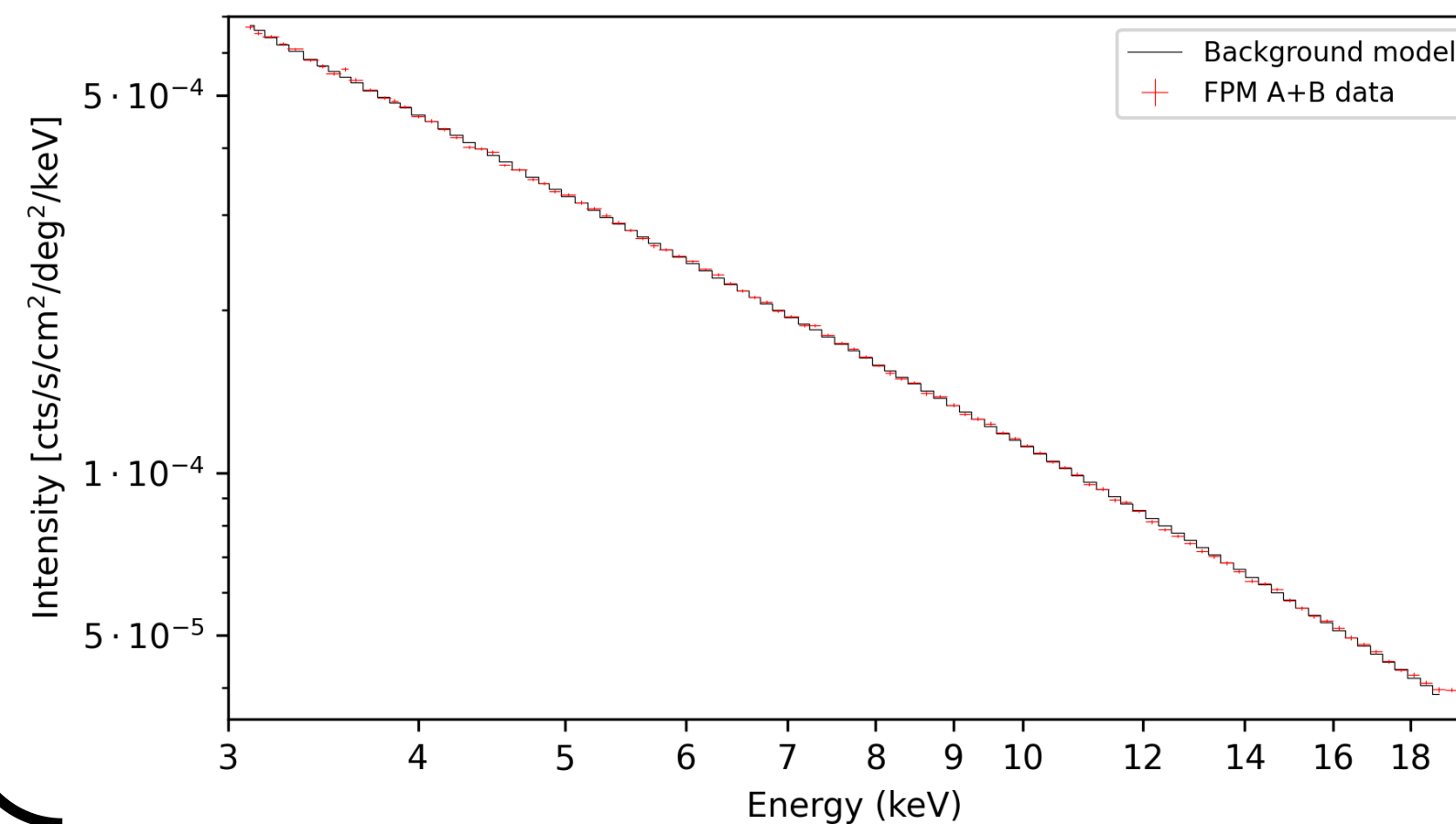
Используемые данные

В данной работе нами использовались архивные данные за период с июля 2021 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.

Модель фона

На рисунке представлен спектр фона, полученный после сложения спектров всех отдельных наблюдений. Основной компонентой 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}	$(9.8 \pm 0.3) \times 10^{-4}$ ^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

^a photons/keV/s/cm²/deg² at 1 keV

^b $\times 10^{-11}$ erg/s/cm²/deg²

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

Поиск линии

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 $\Delta\chi^2 = 2.71$.

Итоговые ограничения

На рисунках представлены итоговые ограничения (95% доверительный интервал) на независящее от скорости сечение аннигиляции как функция от массы частицы.

