

Прохождение гамма-всплеска через молекулярное облако: численные расчеты и наблюдения

Нестерёнок А.В., ФТИ им. А.Ф. Иоффе

«Физика и астрофизика –
от фундаментальных констант до гамма-всплесков и космологии».

Конференция памяти Д.А. Варшаловича и Е.П. Мазеца

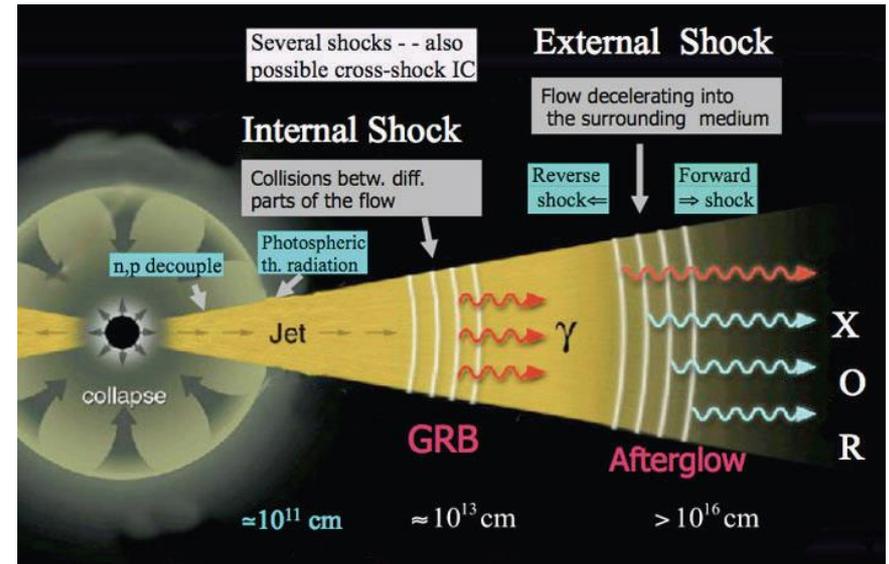


Введение

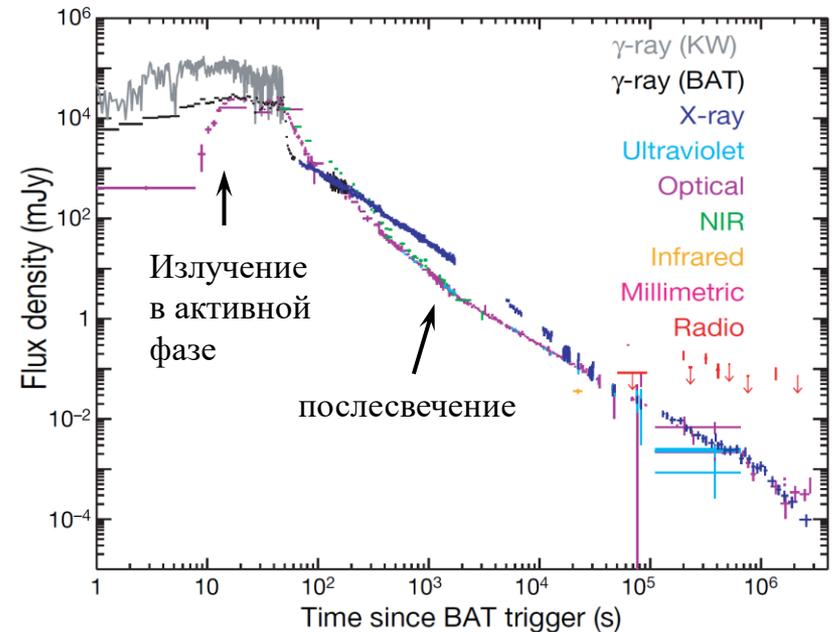
Общепринятой моделью формирования гамма-всплесков является модель «файербола». Согласно этой модели «центральная машина», которая образовалась в результате коллапса массивной звезды или слияния двух компактных звезд, запускает релятивистский направленный поток плазмы (джет).

Две основные стадии формирования излучения:

- излучение в активной фазе (prompt emission) – диссипация энергии внутри релятивистского джета, фотосферное происхождение излучения.
- излучение «оптической вспышки» и послесвечения – взаимодействие джета с внешней средой, образование головной и обратной ударных волн.



(Peer, 2015)

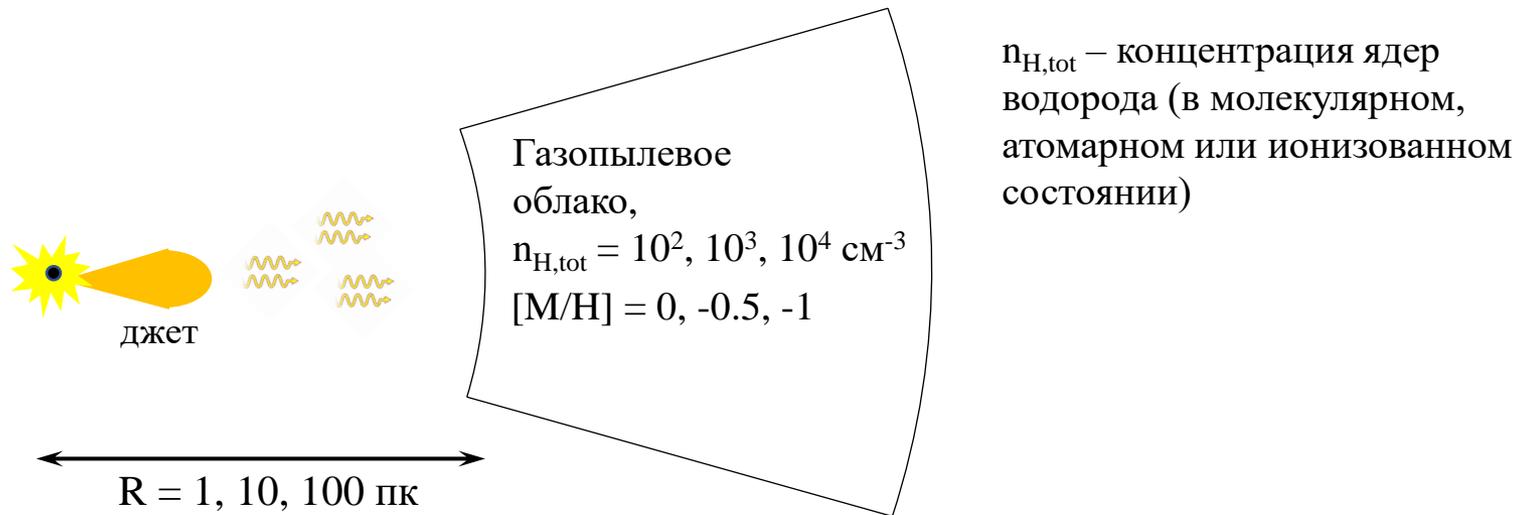


(Racusin et al. 2008; GRB 080319B)

Постановка задачи

Массивные звезды имеют короткое время жизни, поэтому взрыв массивной звезды с большой долей вероятности происходит в области своего рождения. Области звездообразования характеризуются относительно высокими плотностями межзвездного газа.

В докладе приводятся результаты численного моделирования ионизации газопылевого облака излучением гамма-всплеска. Эти результаты используются для аппроксимации наблюдаемых спектров послесвечения.



Численная модель

В модели учитываются:

- ионизация атомов H, He;
- ионизация ионов металлов с учетом испускания Оже-электронов;
- ионизация и фотодиссоциация молекул H₂;
- поглощение УФ излучения в линиях H₂ полос Лаймана и Вернера
- испарение частиц пыли;

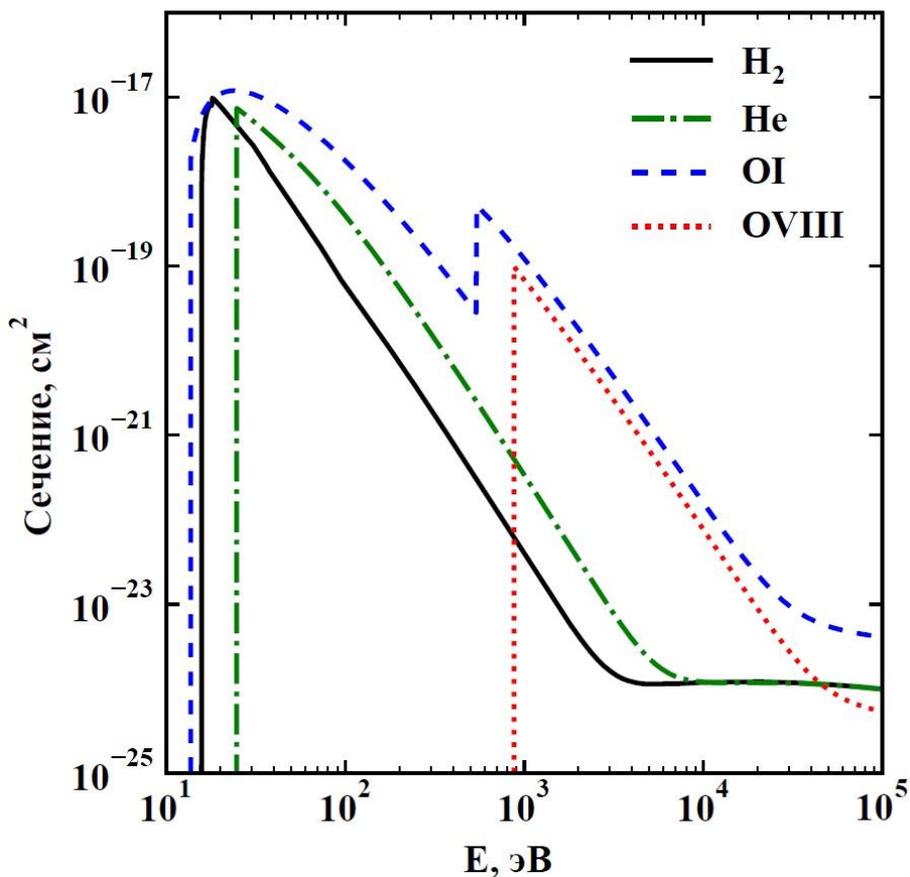
Излучение гамма-всплеска:

- оптическая вспышка;
- активная фаза,
 $E_{\gamma,iso} = 5 \times 10^{52}$ эрг; $E_p = 350$ кэВ;
- послесвечение гамма-всплеска,
энергия ударной волны $E_K = 2.5 \times 10^{53}$ эрг,

Параметры газопылевого облака:

- расстояние от источника всплеска до облака: $R = 1, 10, 100$ пк
- металличность $[M/H] = \log(Z/Z_{\odot}) = 0, -0.5, -1$
- плотность газа $n_{H,tot} = 10^2, 10^3, 10^4$ см⁻³
- Распространенность химических элементов из Lodders et al. (2009):

Сечения ионизации



Основной вклад в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн вносит фотоионизация внутренних электронных оболочек ионов металлов. Ионизация ионов металлов приводит к изменению коэффициента поглощения излучения.

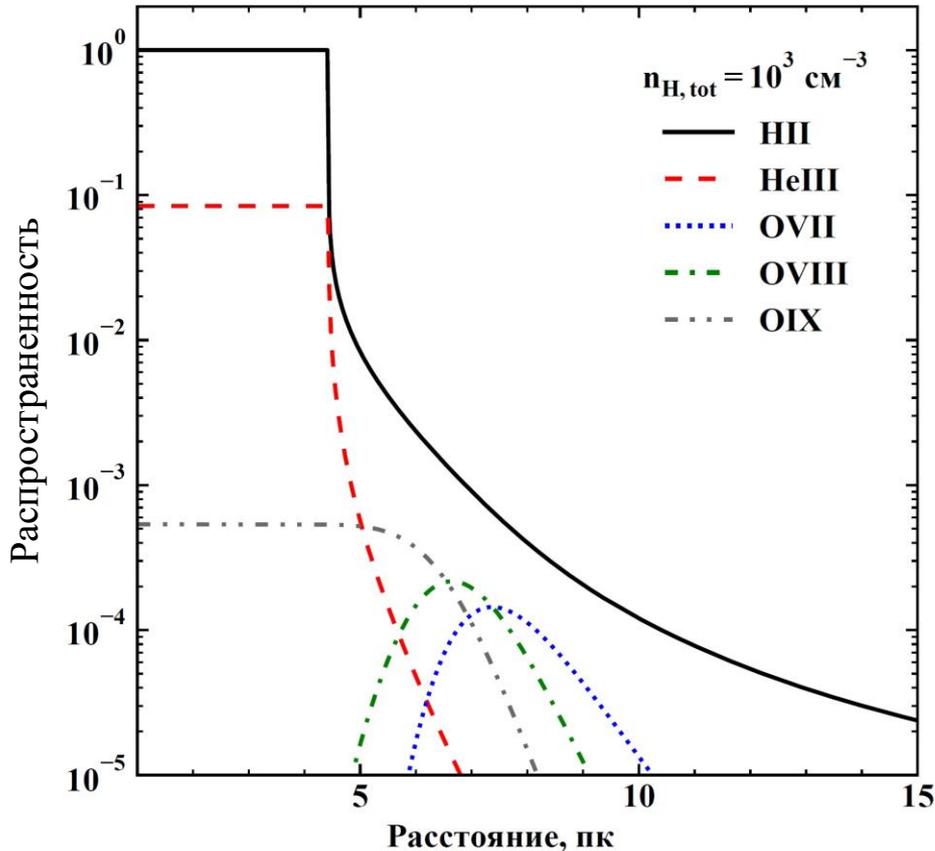
В стандартной модели поглощения излучения в межзвездной среде Тюбинген–Боулдер (**tbabs**) газ считается нейтральным и невозмущенным, т.е. не учитывается ионизация газа излучением.

Результаты. Ионизационная структура газопылевого облака

Полностью
ионизованный
газ

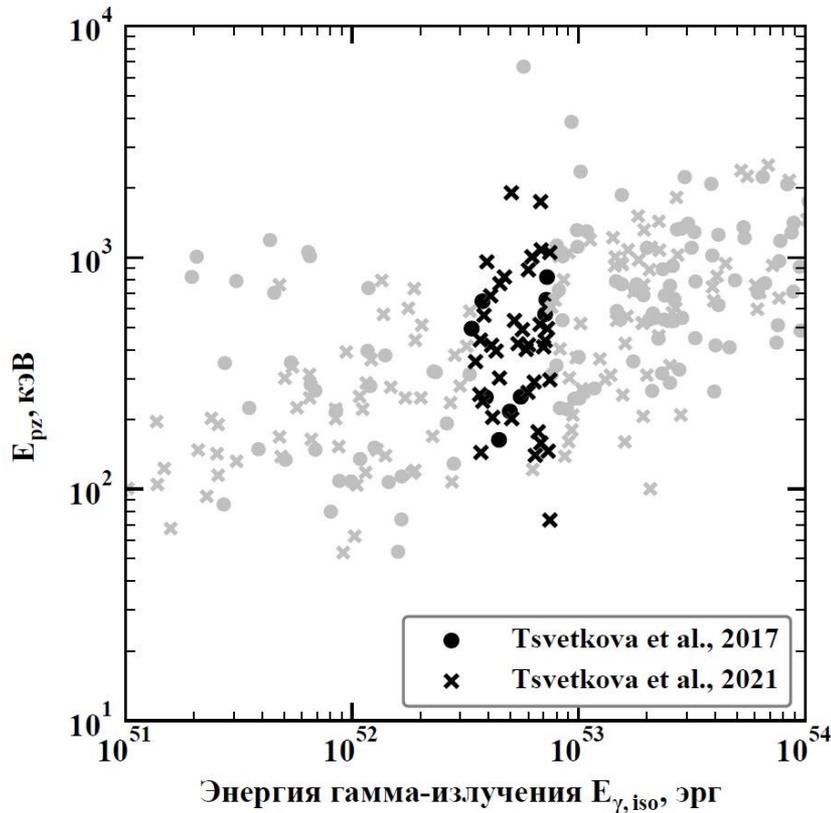
Нейтральный газ,
поглощает излучение,

$$N_{\text{HX}} = n_{\text{H,tot}} \times R$$



- Результаты для всех расстояний показаны в один и тот же момент запаздывающего времени $t_r = 10^5$ с после начала гамма-всплеска, $t_r = t - R/c$.
- Резкое падение концентраций ионов водорода и гелия на расстоянии около 4.4 пк формирует границу ионизованный–нейтральный газ. Однако, для атомов металлов такой резкой границы нет – распространённость ионов металлов с большим зарядом плавно уменьшается с расстоянием.
- N_{HX} – лучевая концентрация ядер водорода (в молекулярном, атомарном или ионизованном состоянии), которая отсчитывается от границы ионизованный/нейтральный газ.

Данные наблюдений



- Каталоги Цветковой и др. (2017, 2021) включают суммарно 317 гамма-всплесков с известным красным смещением.
- В первом каталоге – гамма-всплески, зарегистрированные в триггерном режиме в эксперименте Конус-Винд. Во втором – гамма-всплески, зарегистрированные одновременно телескопом Swift/BAT и гамма-спектрометром Конус в режиме ожидания.

- Были выбраны 46 гамма-всплесков, у которых изотропная энергия излучения активной фазы приблизительно соответствует значению, принятому в численном моделировании, $E_{\gamma, iso} = 5 \times 10^{52}$ эрг.
- Для выбранных гамма-всплесков проведен анализ энергетических спектров послесвечений, которые были получены на рентгеновском телескопе Swift/XRT в поздние моменты времени, $t \geq 4 \times 10^3$ с, в режиме счета фотонов РС.

Аппроксимация энергетических спектров послесвечений гамма-всплесков

Модели в XSpec:

1. `tbabs * ztbabs * powerlaw`

2. `tbabs * etable{n1e4.fits} * powerlaw`

← Степенной спектр

↑
Поглощение в нашей Галактике,
в случае 090926B
 $N_{\text{H,Gal}} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$

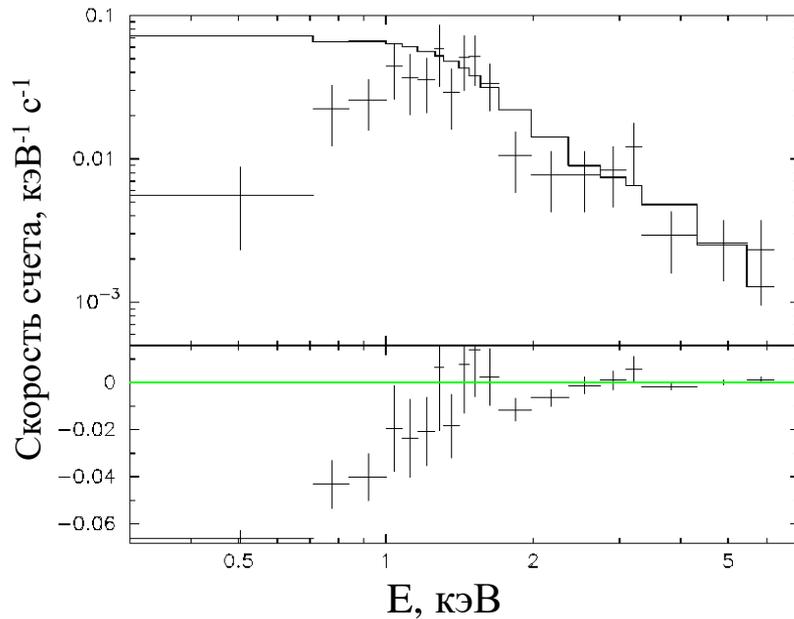
↑
Поглощение в родительской галактике
на заданном красном смещении,
результаты численного моделирования
записаны в виде таблицы fits

- Распространенности химических элементов в обеих моделях выбраны одинаковыми – значения в фотосфере Солнца из Лоддерс и др. (2009), их таблица 4;
- В аппроксимации учитывалось, что сигнал от источника и фон подчиняются распределению Пуассона (**statistic cstat**);
- Ошибки параметров определялись с помощью команды **error**. Параметр **delta fit statistic** был выбран равным 2.706, что соответствует уровню доверия 90% ($\sigma = 1.65$);
- Для 19 гамма-всплесков из 46 аппроксимация дает либо верхние пределы на $N_{\text{HХ}}$, либо ошибка равна наиболее вероятному значению (результаты для этих всплесков не приводятся далее).

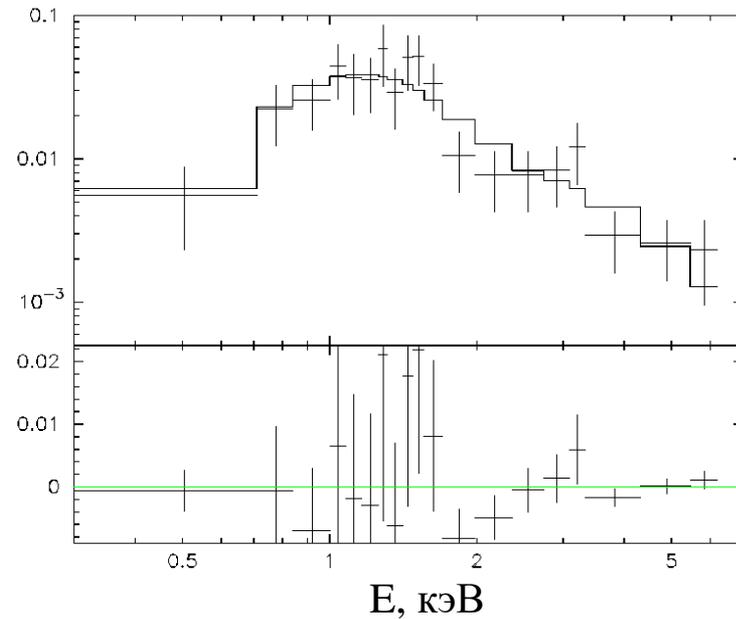
Спектр послесвечения 090926 В

Спектр получен на телескопе Swift/XRT, является усредненным спектром за период времени 5288 – 40016 сек:

без учета поглощения в родительской галактике на красном смещении $z = 1.24$,
но с учетом $N_{\text{H,Gal}} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$:

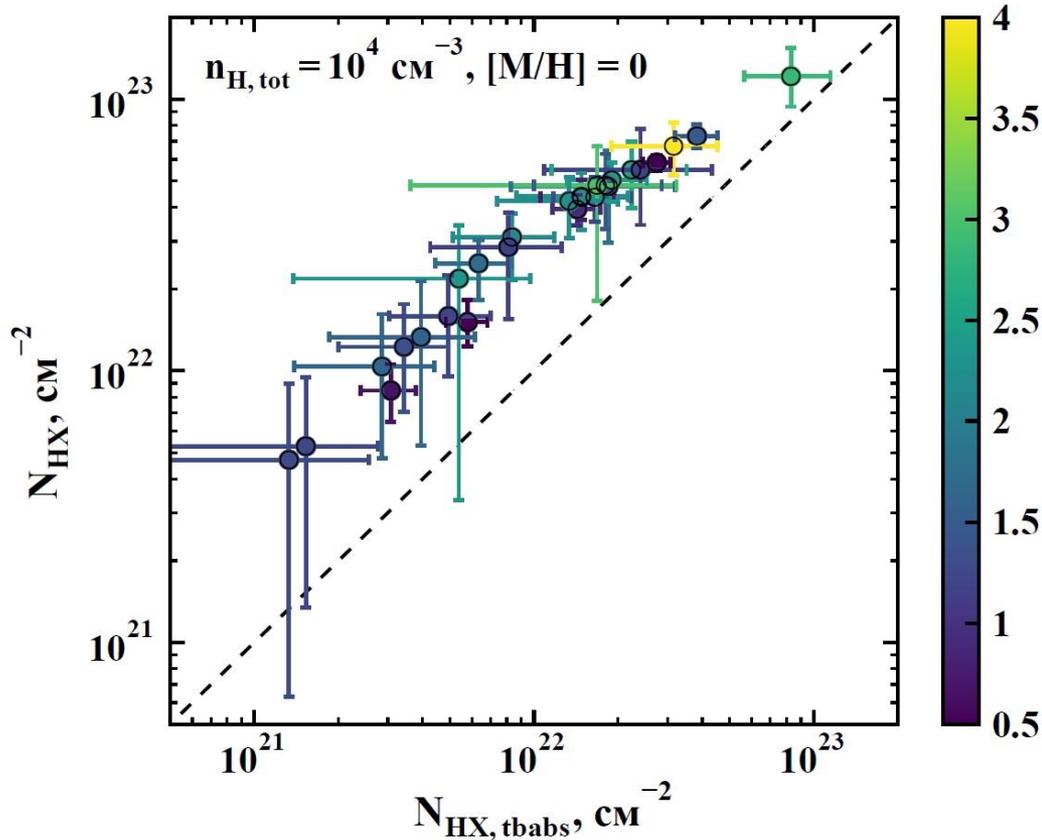


с учетом поглощения в родительской галактике,
 $N_{\text{НХ}} = 5.5_{-2.1}^{+2.3} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$
(численная модель, $n_{\text{Htot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$)



Результаты аппроксимации спектров послесвечений гамма-всплесков

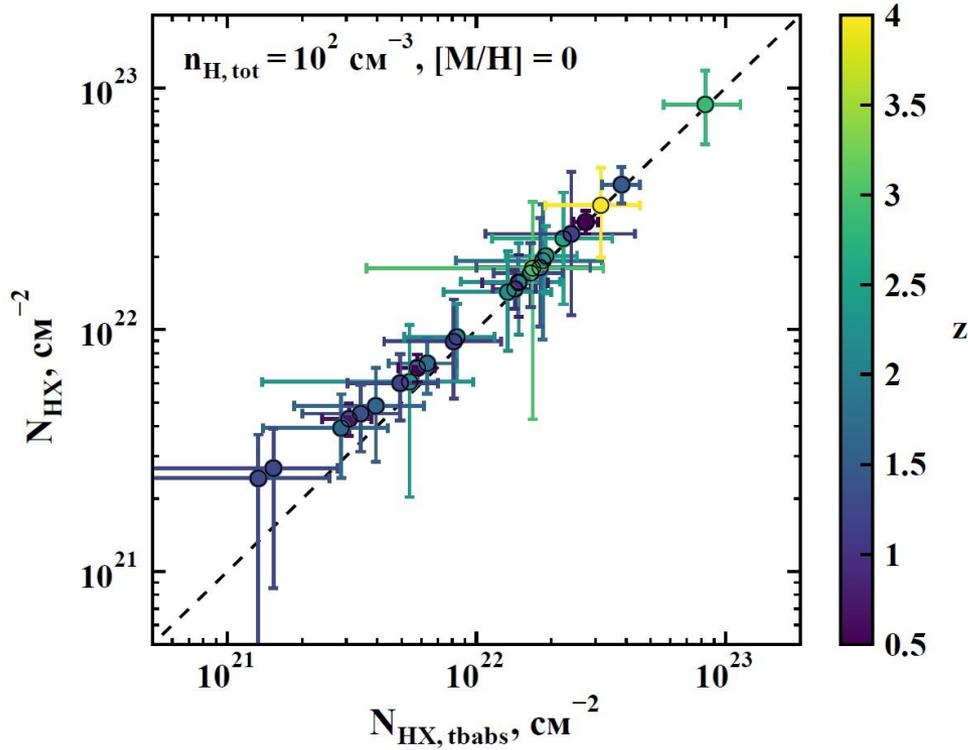
Лучевая концентрация газа, вычисленная в результате аппроксимации спектров, по оси абсцисс – результаты модели **tbabs**, по оси ординат – наша численная модель.



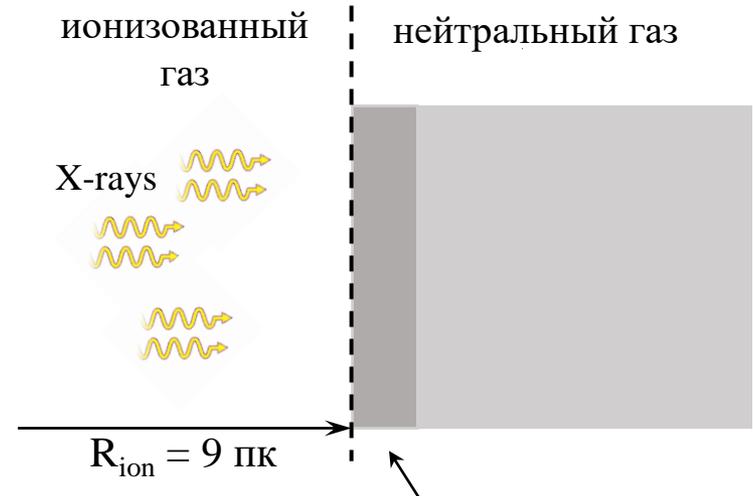
Параметры:

$n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}, R = 1 \text{ пк}, [\text{M}/\text{H}] = 0,$

Среднее отношение лучевых концентраций $N_{\text{HX}}/N_{\text{HX,tbabs}}$, полученных с помощью двух моделей, составляет около 3 для $N_{\text{HX,tbabs}} \leq 2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$.

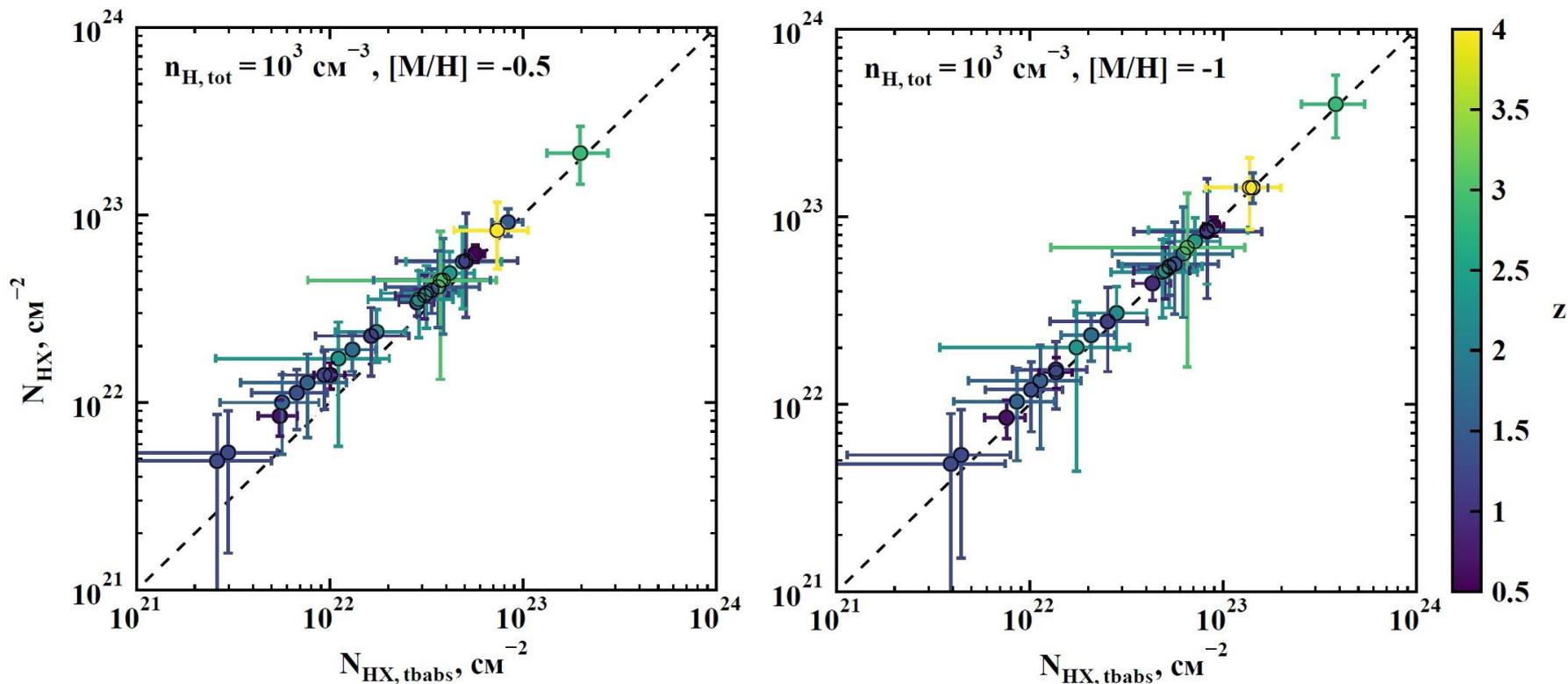


При меньших плотностях газа в облаке – 10^2 см^{-3} – газ располагается дальше от источника излучения – при заданной лучевой концентрации водорода. Поэтому эффект ионизации металлов на поглощение излучения менее выражен.



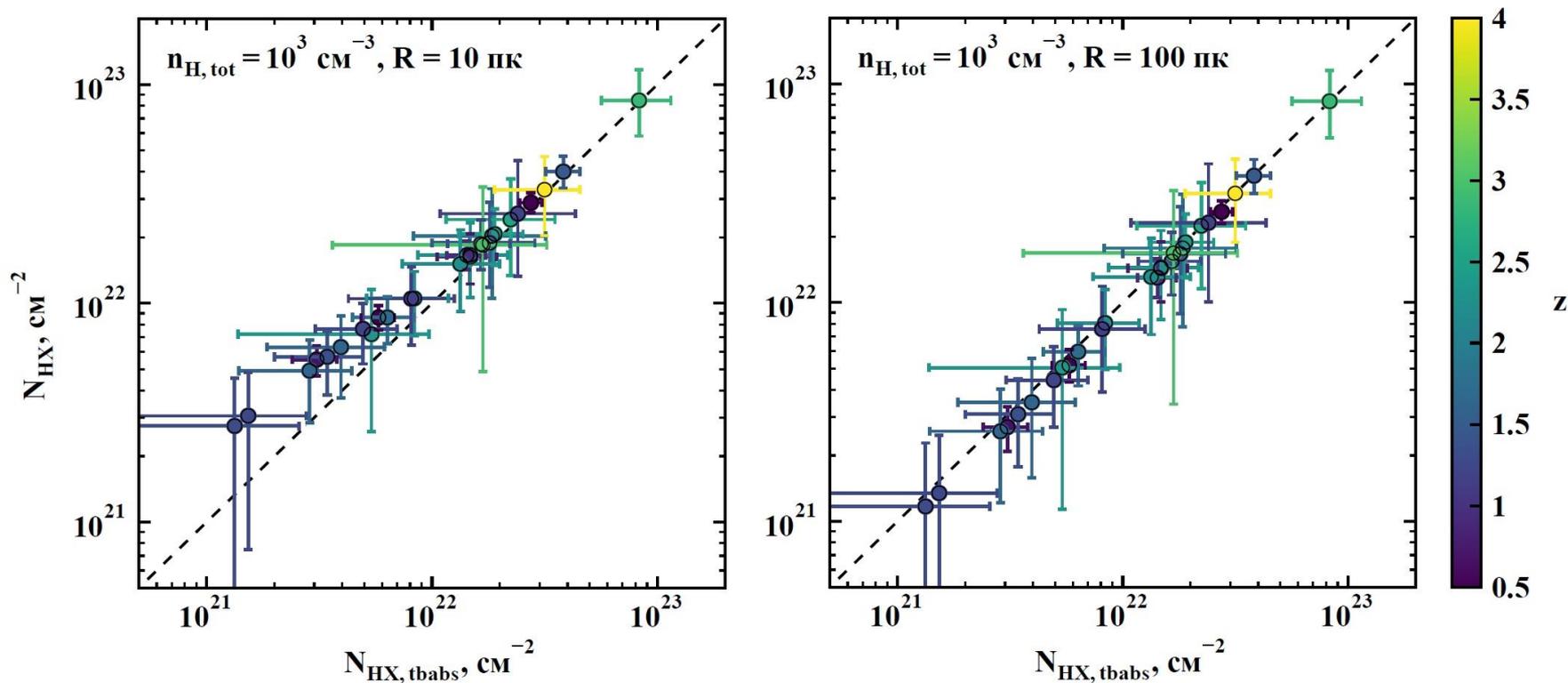
область ионизации ионов,
 $N_{\text{HX}} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$,
 или 0.5 пк

Результаты расчетов для низкой металличности, $[M/H] = -0.5$ и -1



Для металличности $[M/H] = -1$ обе модели – **tbabs** и наши расчеты – дают одинаковые результаты. В этом случае ионы металлов не вносят вклад в поглощение излучения. И учет ионизационной структуры облака не оказывает эффекта на вычисления значений лучевой концентрации водорода.

Результаты расчетов для расстояний $R = 10, 100$ пк



С увеличением расстояния, уменьшается слой газа за фронтом ионизации, в котором ионы металлов находятся в ультра-ионизованном состоянии. При $R = 10$ пк, отличие между значениями N_{HX} и $N_{\text{HX,totabs}}$ сравнимо с ошибками измерений этого параметра.

Наблюдаемое изменение N_{HX} для некоторых гамма-всплесков

Излучение гамма-всплеска ионизует газ, расположенный вблизи источника всплеска. В результате, излучение послесвечения, испущенное в поздние моменты времени, встретит на своем пути меньше поглощающего газа, чем излучение в более ранние моменты (Lazzati, R. Perna, 2002). Этот эффект теоретически можно наблюдать как уменьшение со временем наблюдаемого значения N_{HX} .

В работе Валана и др. (2023) проведено исследование изменения N_{HX} для 199 гамма-всплесков. Только 7 всплесков имеют признаки уменьшения лучевой концентрации N_{HX} . Один гамма-всплеск из этого списка попадает в нашу выборку – GRB 090926B.

численная модель ($n_{\text{Htot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$):

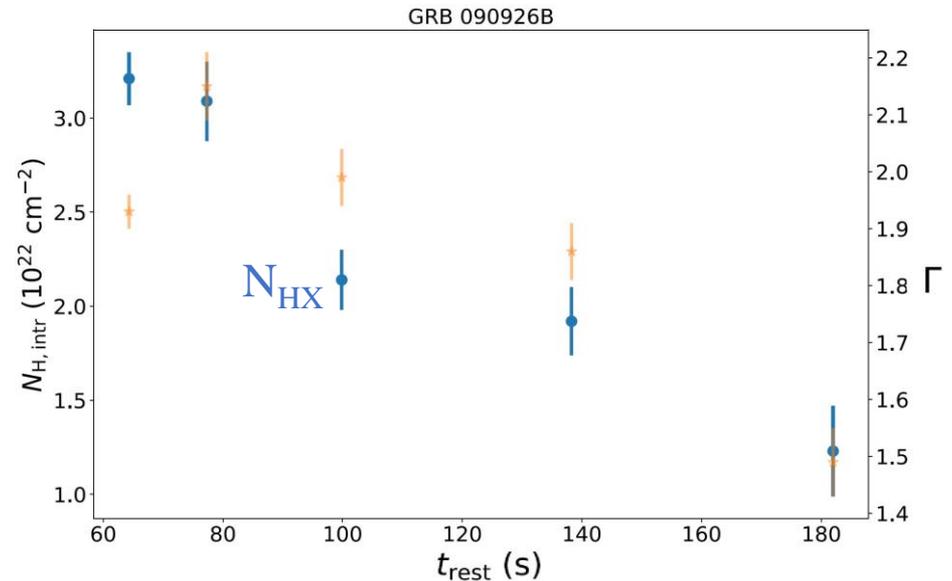
$$N_{\text{HX}} = 5.5^{+2.3}_{-2.1} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$$

tbabs:

$$N_{\text{HX, tbabs}} = 2.4^{+1.9}_{-1.3} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$$

(режим РС, период времени 5288 – 40016 сек)

Данные Swift/XRT, режим WT, GRB 090926B
(синие точки – N_{HX}) – Валан и др. (2023)



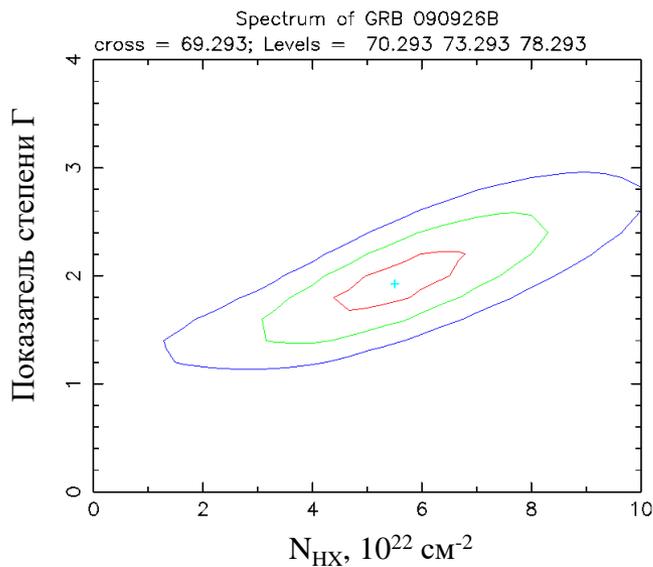
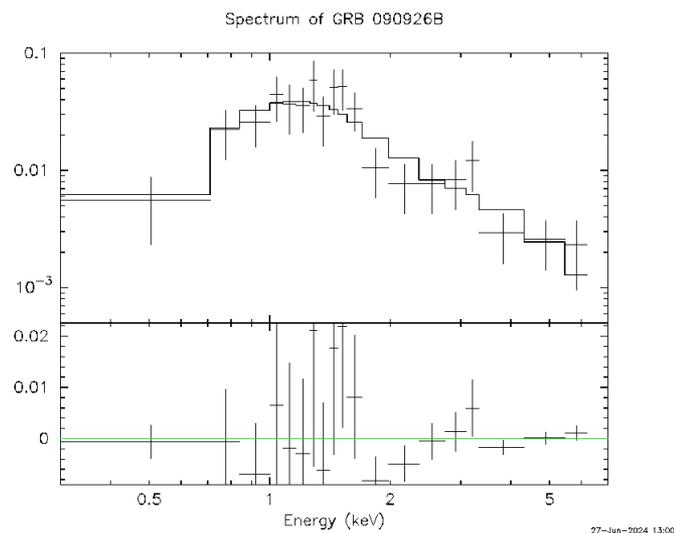
Заключение

- В работе рассмотрена выборка из 46 длинных гамма-всплесков с известным красным смещением, у которых полная изотропная энергия гамма-излучения $3.3 \times 10^{52} \leq E_{\gamma, \text{iso}} \leq 7.5 \times 10^{52}$ эрг. Для этих гамма-всплесков проведен анализ энергетических спектров послесвечения, полученных на телескопе Swift/XRT в поздние моменты времени, $t \geq 4 \times 10^3$ с.
- Аппроксимация энергетических спектров с помощью модели **tbabs** приводит к значениям лучевой концентрации, которые меньше действительных значений приблизительно в 3 раза – в случае, если поглощающий газ находится вблизи источника гамма-всплеска.
- Если молекулярное облако располагается на расстоянии $R \geq 10$ пк от источника гамма-всплеска или металличность газа $[M/H] \leq -1$, модель поглощения, основанная на результатах численного моделирования, и модель **tbabs** предсказывают одинаковые значения лучевой концентрации водорода.

Спасибо за внимание

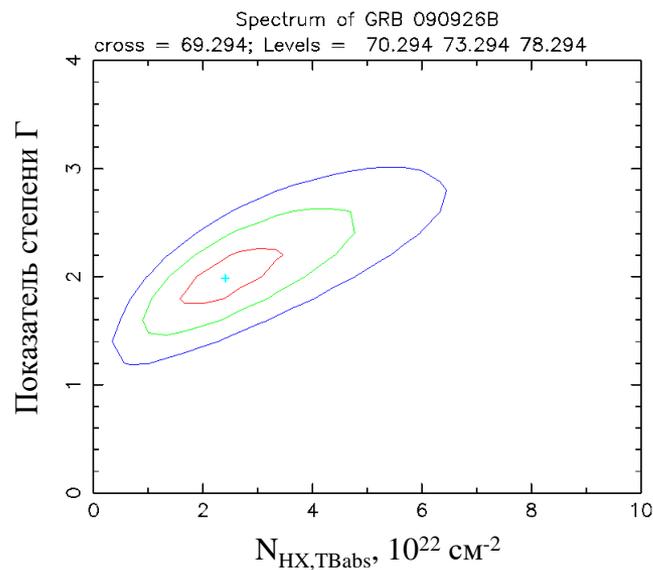
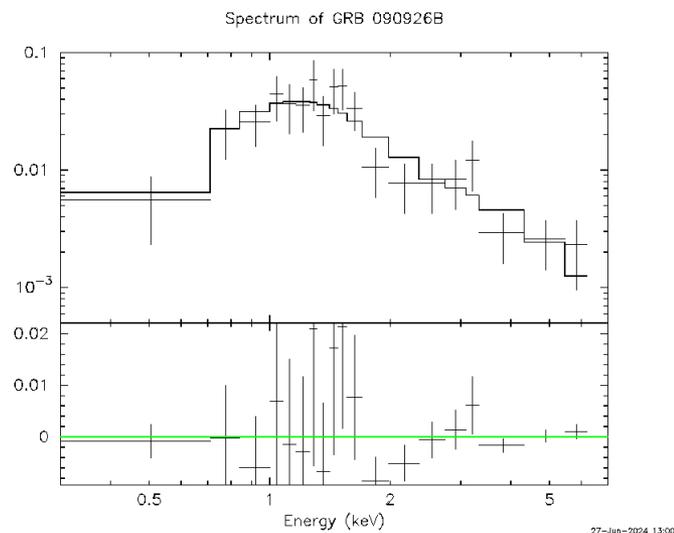
GRB 090926B

Численная модель: $N_{\text{HX}} = 5.5_{-2.1}^{+2.3} \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, $\Gamma = 1.9_{-0.5}^{+0.5}$ (1.6 σ)



контуры 1 σ , 2 σ , 3 σ

tbabs: $N_{\text{HX, tbabs}} = 2.4_{-1.3}^{+1.9} \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, $\Gamma = 2.0_{-0.5}^{+0.5}$



Модель tbabs (Wilms et al. 2000)

Модель tbabs описывает поглощение рентгеновского излучения в нейтральном межзвездном газе:

- Степень молекуляризации газа f_{H_2} составляет 20%;
- В модели TBabs учитываются химические элементы Na, Al, P, Cl, Ar, Ca, Ti, Cr, Mn, Co, Ni – дополнительно к тем, что рассматриваются в нашей модели. Но вклад их мал.
- TBabs не учитывает процесс комптоновской ионизации H, H₂, He, который вносит основной вклад в оптическую толщину для энергий фотонов ≥ 10 кэВ. Но оптическая толщина на таких энергиях мала.
- Газ невозмущенный, т.е. не учитывается ионизация газа излучением.