

Космические лучи в центре Галактики

Д. Чернышов

В.А. Догель, K.S. Cheng, С.М. Ко

Центр Галактики

- Ближайший к нам галактический центр
- Наиболее изученный регион Галактики (исключая Солнечную Систему)
- Активен в широком диапазоне энергий
- Содержит сверхмассивную черную дыру ($4 \times 10^6 M_{\odot}$) с удивительно низкой активностью в настоящий момент

Активность центра Галактики

- Линия электрон-позитронной аннигиляции 511 кэВ – природа неизвестна
- ГэВ-ТэВ источник J1745-2859
- Диффузное гамма-излучение ГэВ-ТэВ
- Рентгеновское излучение на разных масштабах (включая переменное)
- Высокая степень ионизации молекулярного водорода

Молекулярный газ в центре Галактики

- CMZ (0-500 pc): $6 \times 10^7 M_{\odot}$ (доминирует < 1 kpc) – Ferriere et al., (2008)
- Он плотный ($\times 1000$ межзвездная среда)
 - Любые процессы, пропорциональные плотности, будут выделяться на внешнем фоне
- Он холодный (10 – 100 K)
 - Тепловые процессы в низкоэнергичной области
 - Любой энергичный процесс – внешний источник

Что можно оценить?

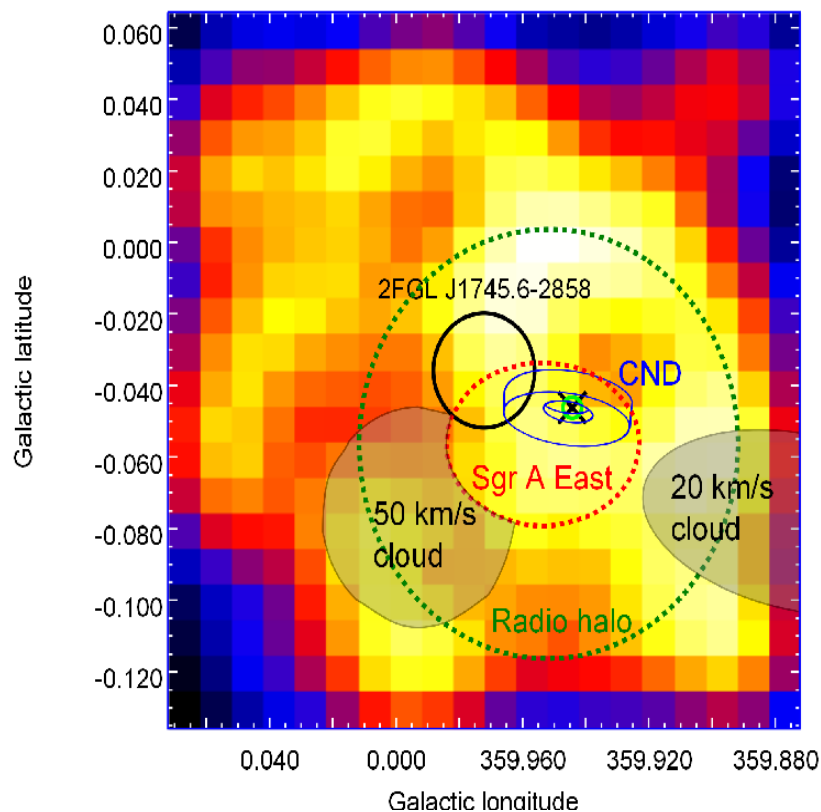
- Релятивистские энергии
 - Гамма-излучение -> р-р столкновения, IC или тормозное излучение
 - Пространственная корреляция с молекулярным облаком убирает IC (не всегда)
 - Радио, энергетические соображения – убирает тормозное излучение
 - Непосредственное измерение плотности КЛ в других областях Галактики (с оговоркой)!

Что можно оценить?

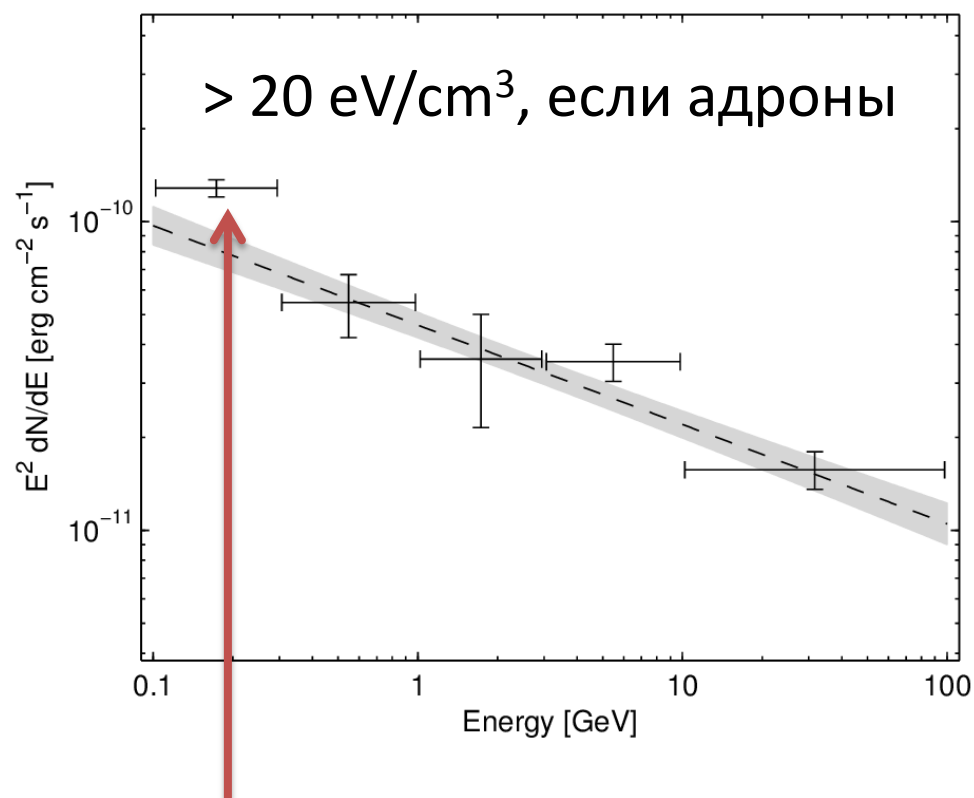
- Нерелятивистские энергии
 - Рентген – если корреляция с газом, тормозное излучение или комптоновское рассеяние (+ точечные источники – корреляция с SFR)
 - Ионизация – заряженные частицы или внешнее ($> \text{УФ}$) излучение
 - Линии нейтральных элементов (трассер молекулярного газа) – заряженные частицы или излучение
 - Ядерные линии (нет телескопа!)
- Оценить плотность нрКЛ сложно (даже в СС)

Гамма-излучение из ГЦ

2FGL J1745.6-2858

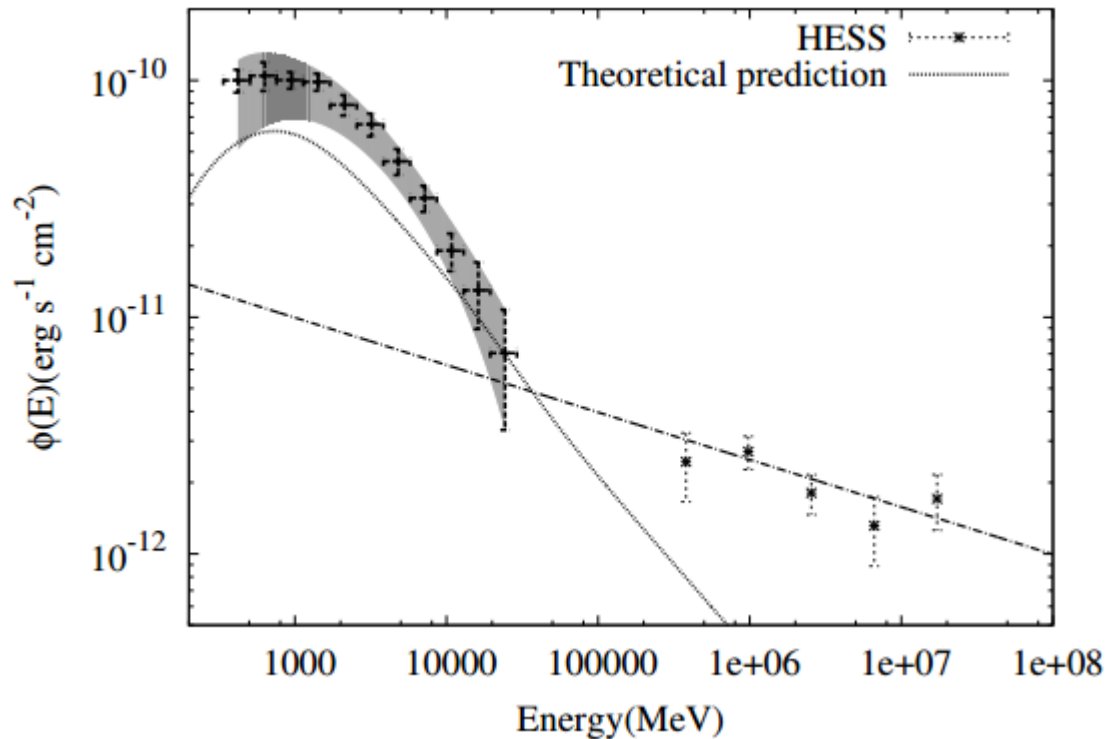


3FGL J1745.6-2859c



Нет адронного обрезания!
Лептонная модель?

Sgr B2

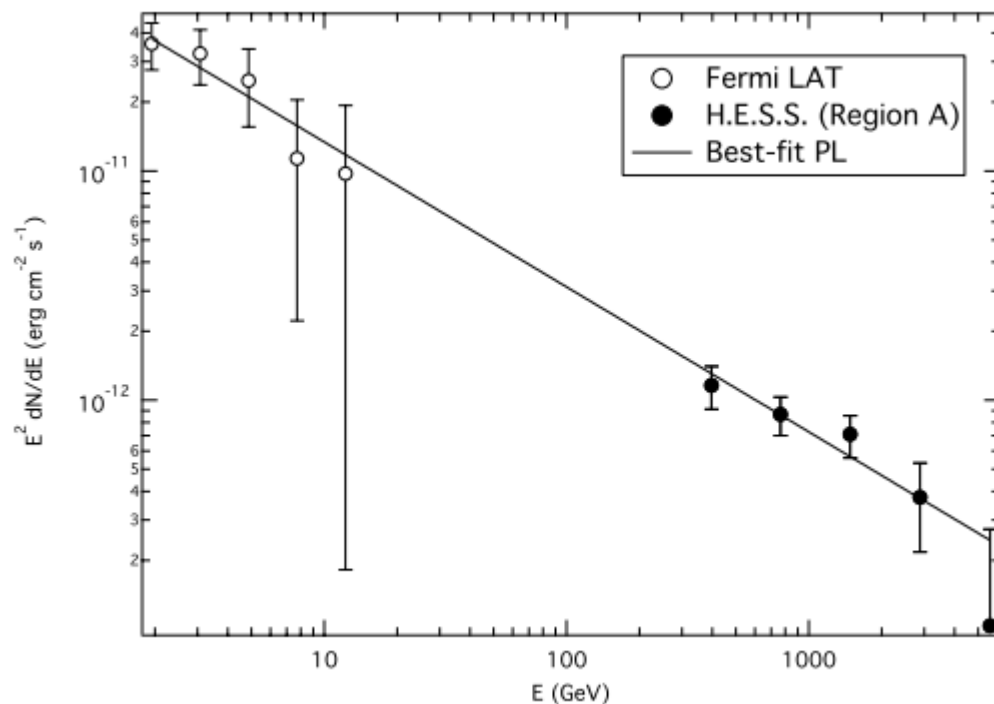
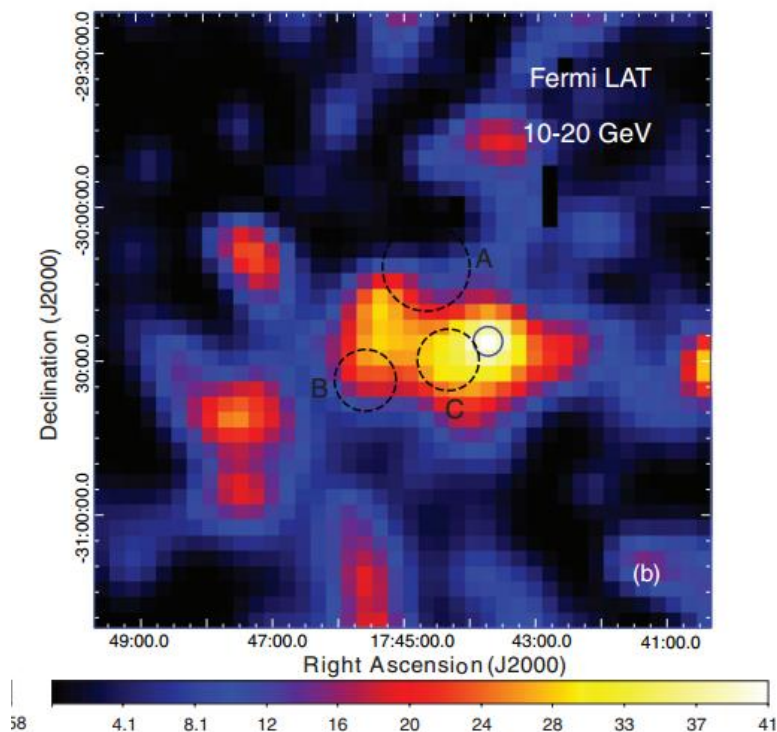


Плотность КЛ солнечная
при массе $10^7 M_{\odot}$

Оценки массы Sgr B2
разнятся на порядок!

Yang et al (2014)

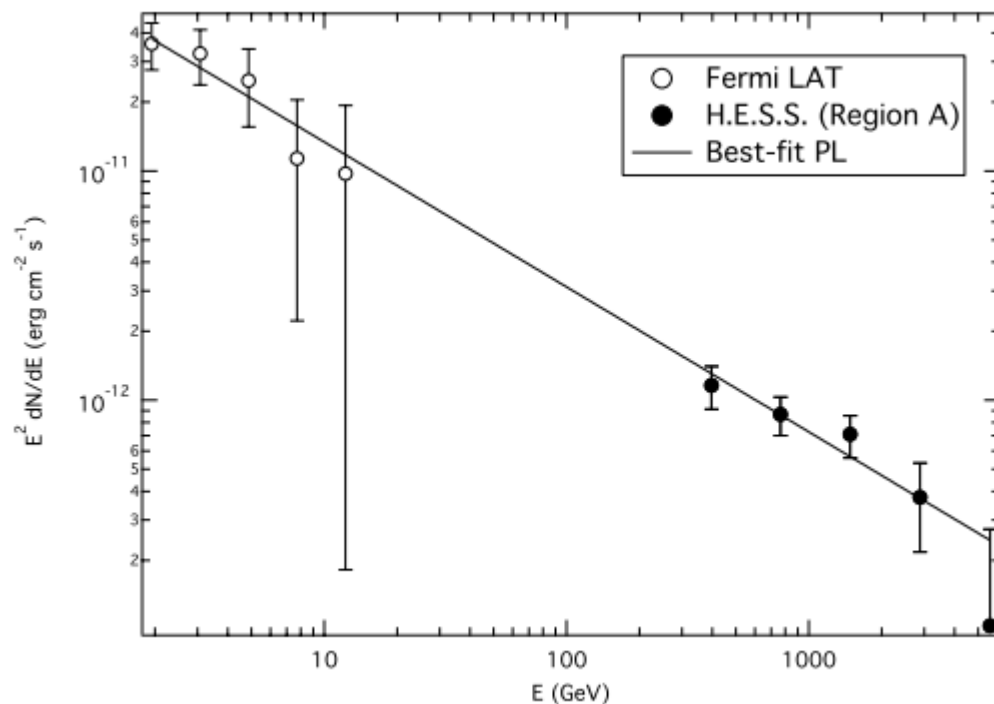
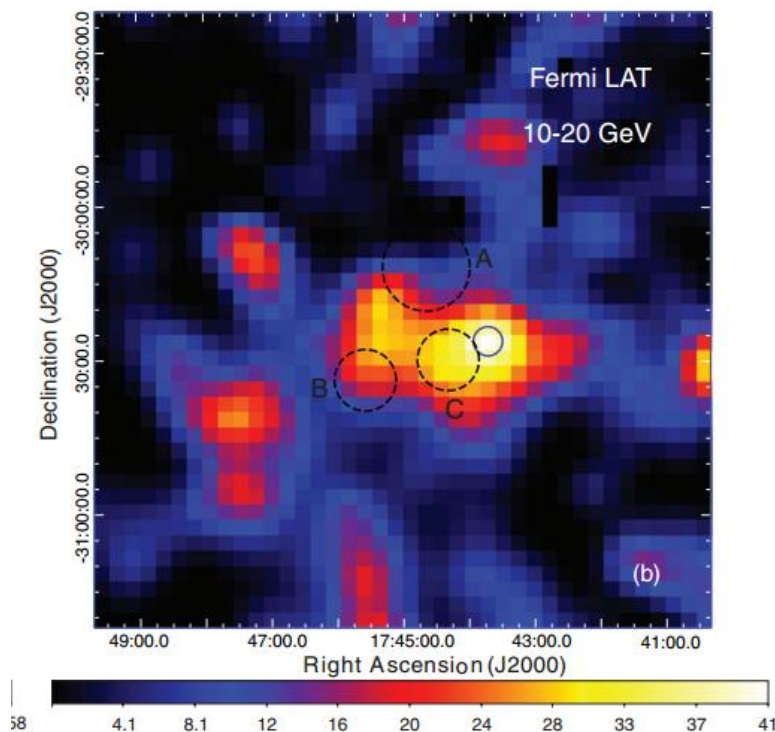
HESS 1745-303 “Dark Accelerator”



Hui et al. (2011)

$M = 2 \times 10^6 M_{\odot} \Rightarrow w_{\text{CR}} \sim 2\text{-}3 \text{ eV/cm}^3$. Соответствует GALPROP!
 Масса Sgr B2 в таком случае $6 \times 10^6 M_{\odot}$

HESS 1745-303 “Dark Accelerator”



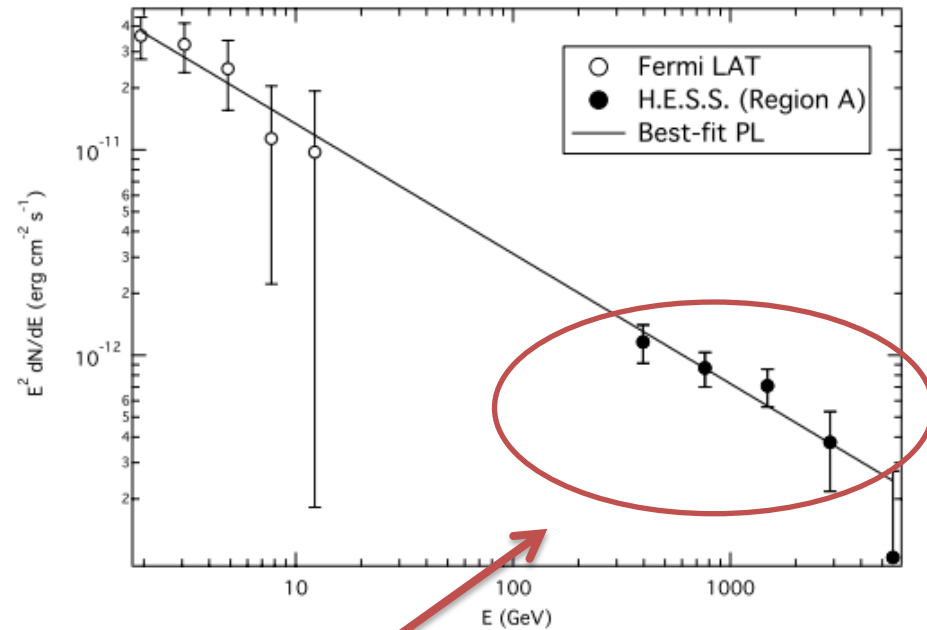
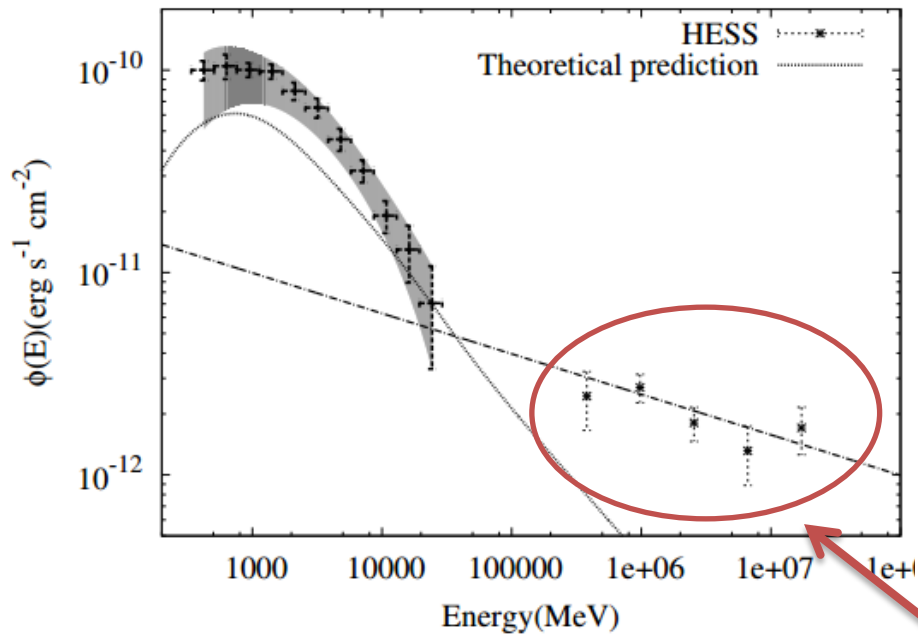
Hui et al. (2011)

$M = 2 \times 10^6 M_{\odot} \Rightarrow w_{\text{CR}} \sim 2\text{-}3 \text{ eV/cm}^3$. Соответствует GALPROP!
 Масса Sgr B2 в таком случае $6 \times 10^6 M_{\odot}$

Привязка HESS 1745-303

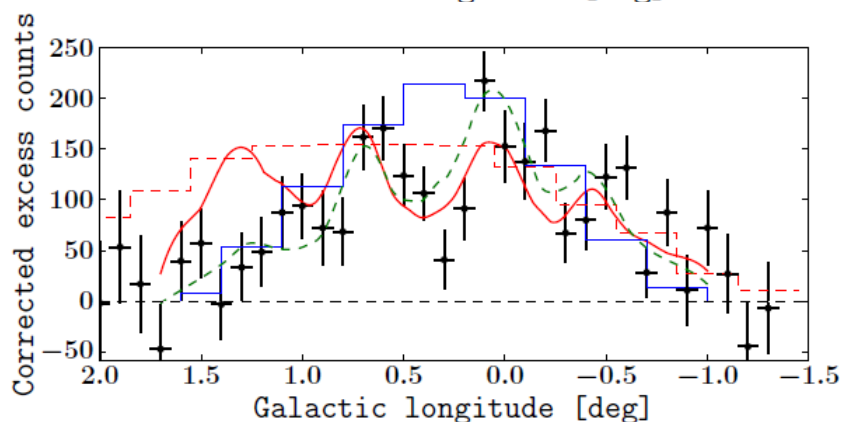
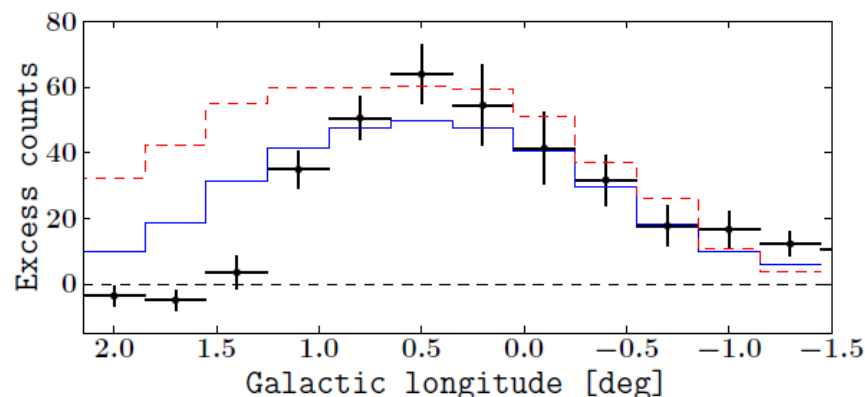
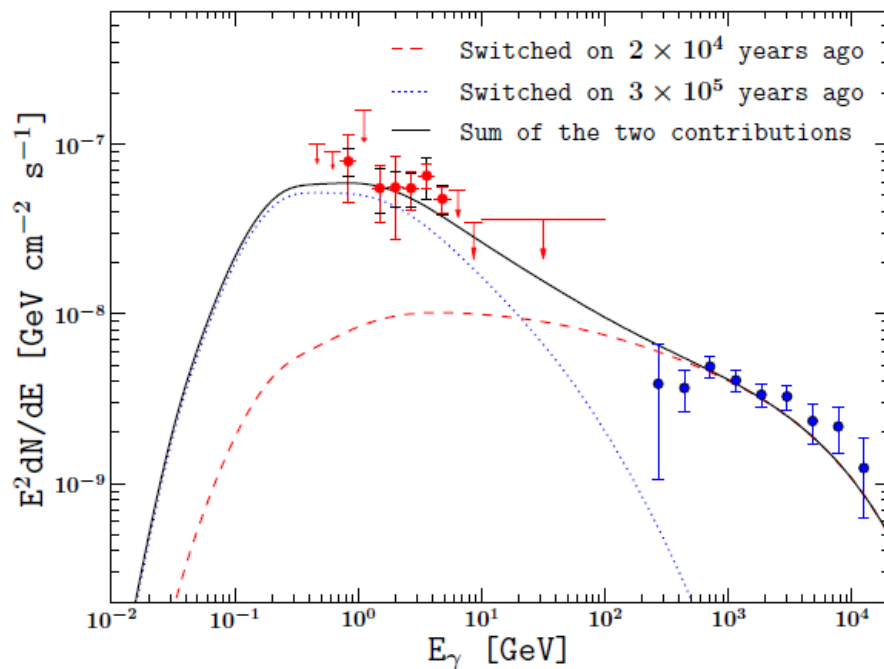
- Яркий излучатель в линии 6.4 кэВ:
интенсивность $1.1 \times 10^{-5} \text{ ph/s/cm}^2$
- Sgr B2 в максимуме: $5.6 \times 10^{-5} \text{ ph/s/cm}^2$
- Полагая природу – отраженный рентген,
считая расстояние до Sgr B2 = 164 пк
получаем $R = 214 \text{ пк}$.
- Задержка импульса – 240 лет.
Предположение о единой вспышке разумно.

ТэВные хвосты в излучении



Откуда такая разница?

Двух-вспышечная модель



$W(>1 \text{ GeV}) = 4 \text{ eV/cm}^3$ (согласуется с Sgr B2)

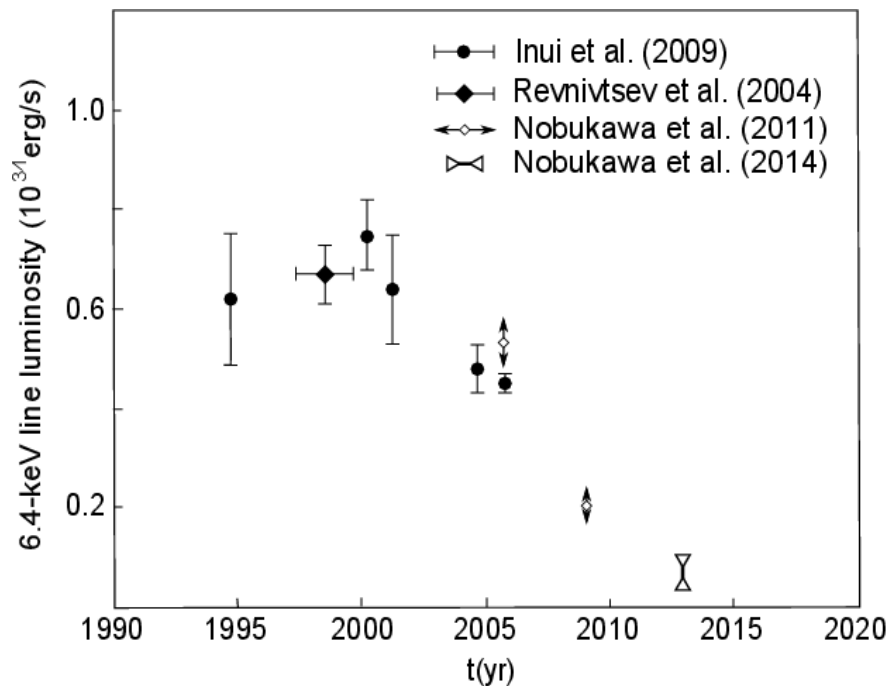
Macias et al. (2015)

HESS 1745-303?

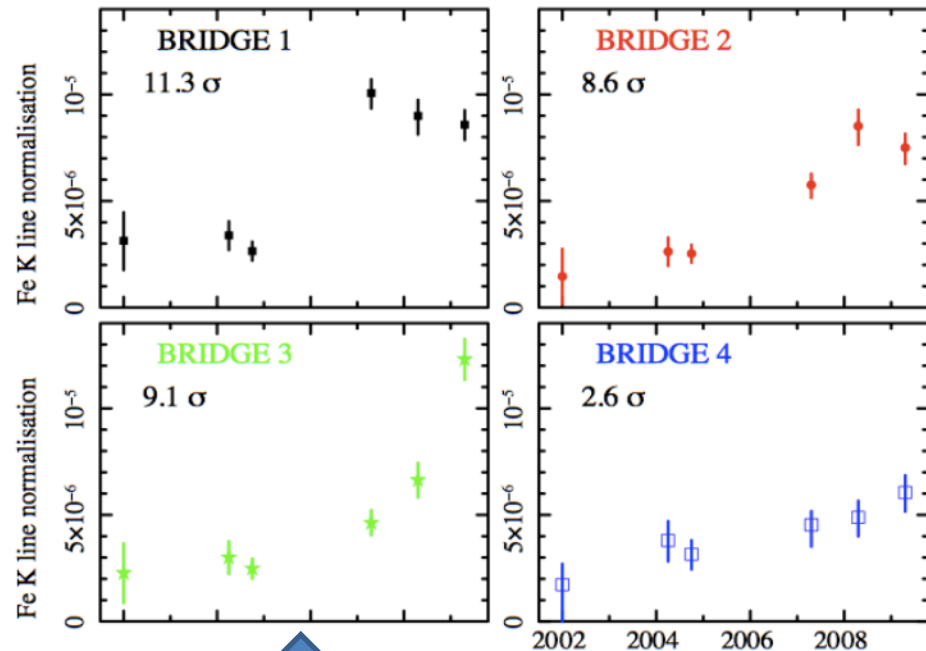
Нерелятивистские энергии

Линия 6.4 кэВ (линия нейтрального железа)
из молекулярных облаков

Sgr B2



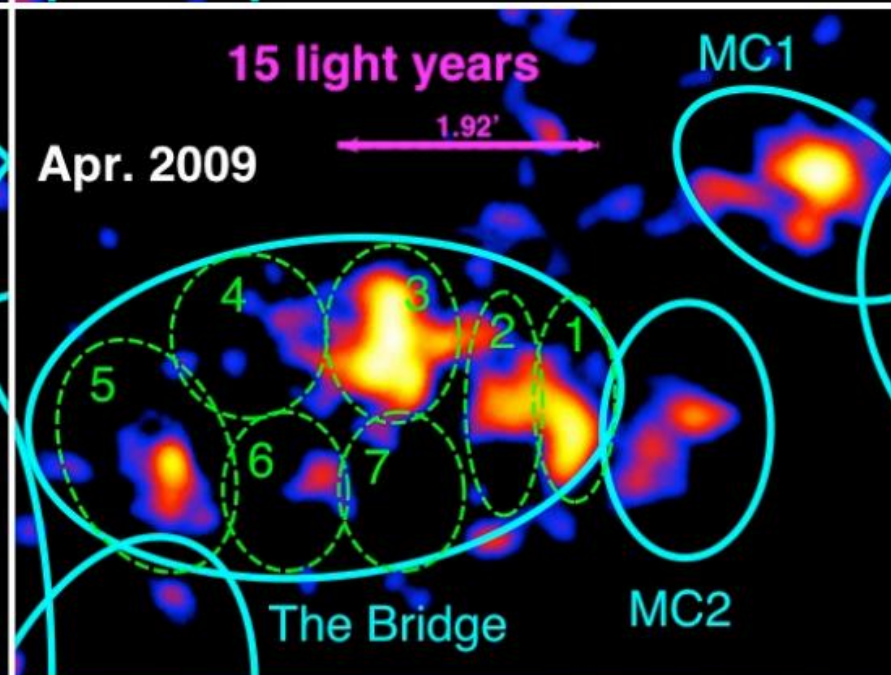
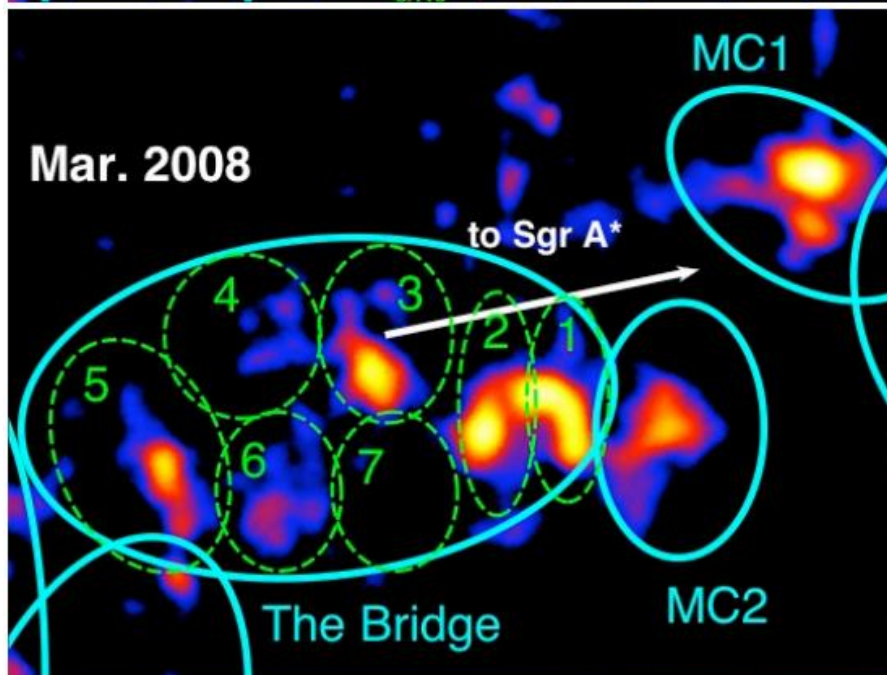
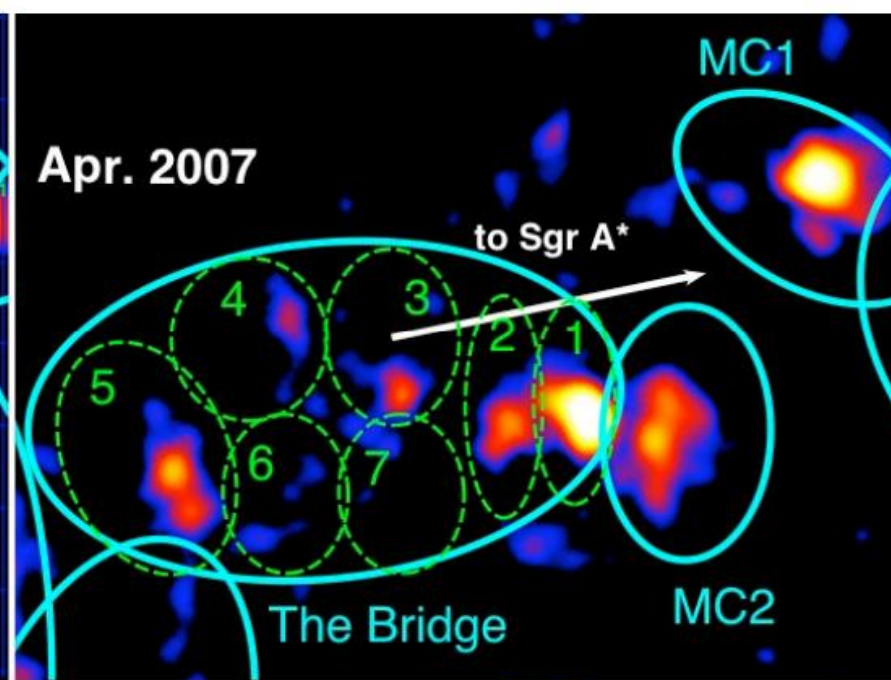
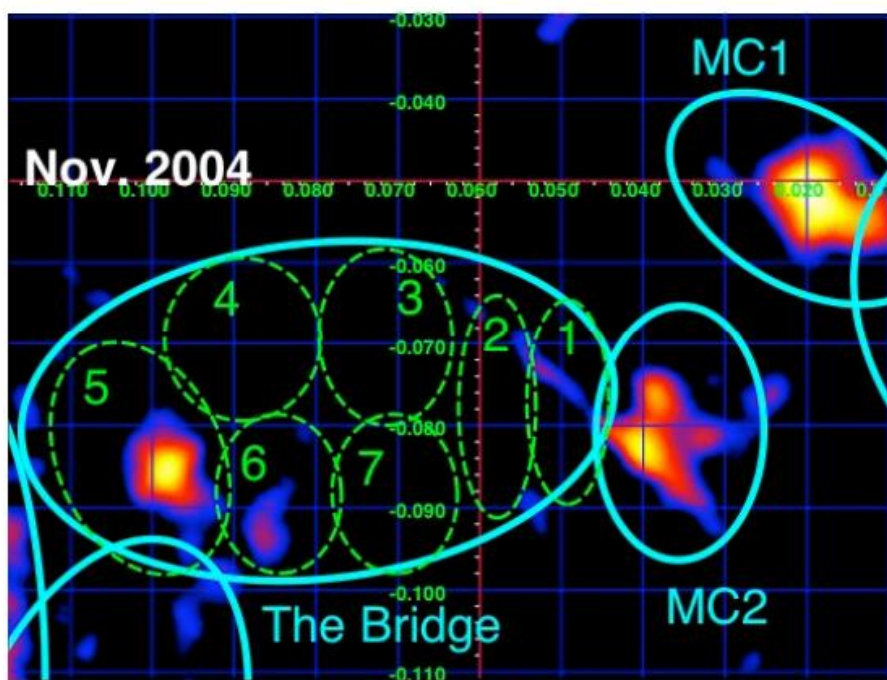
Vicinity of Sgr A*



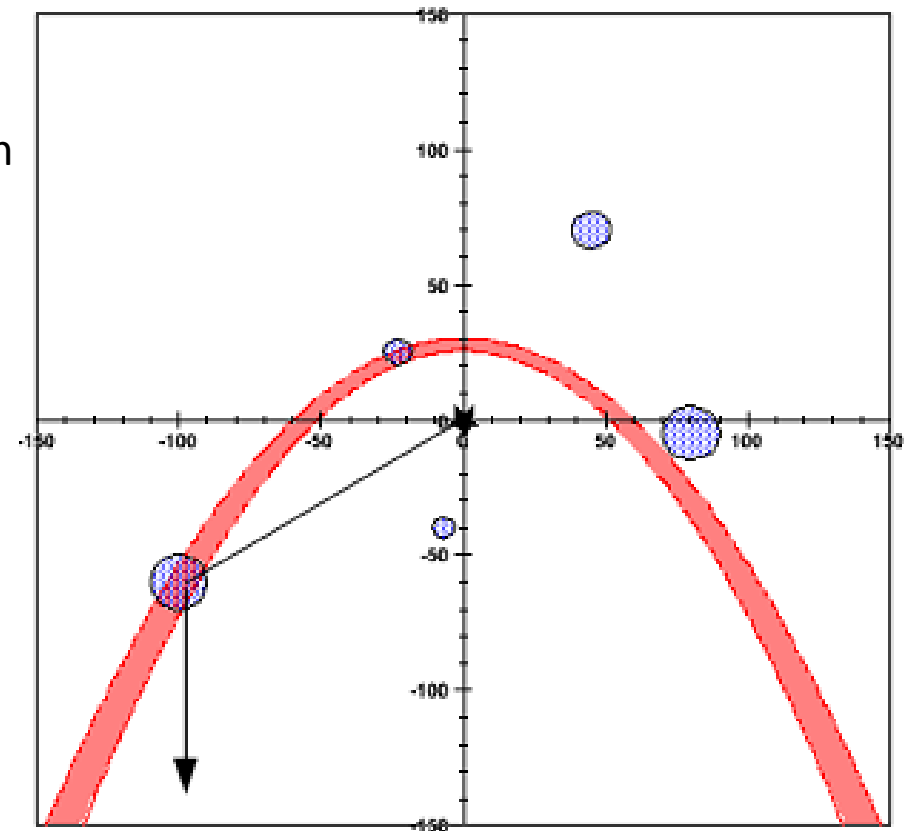
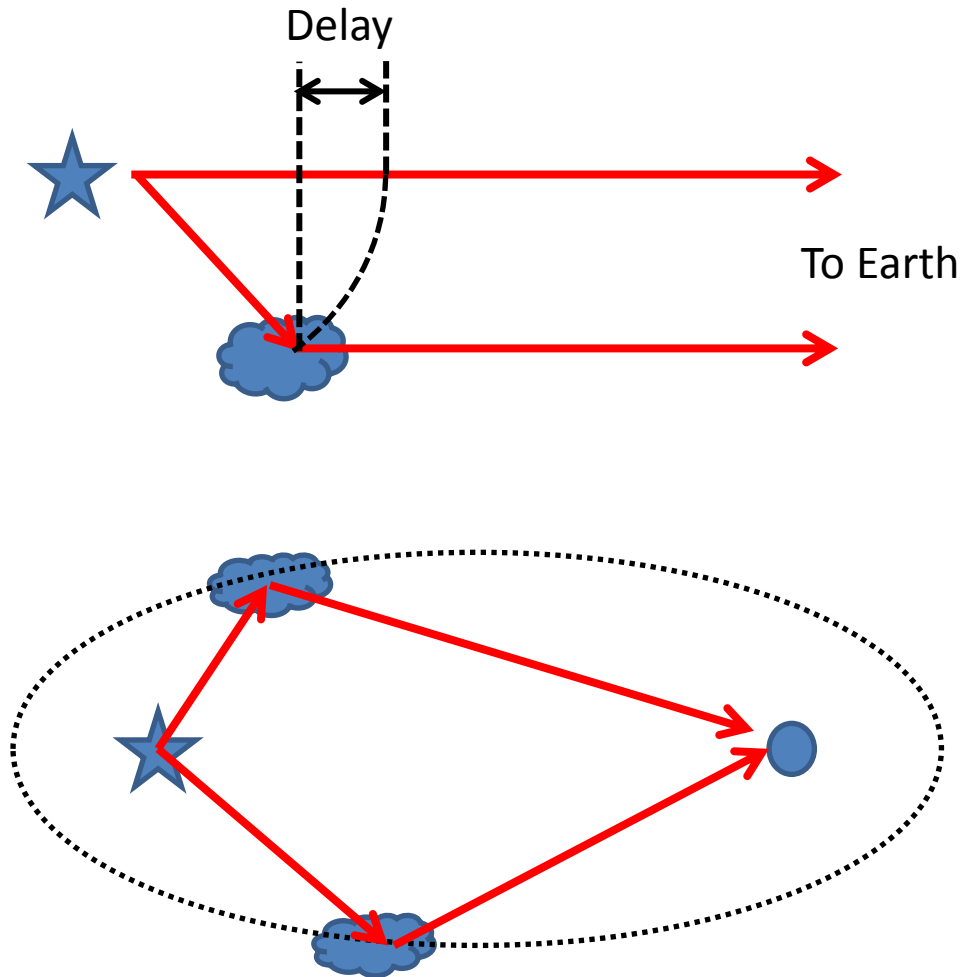
Ponti, Terrier (2010)

«Superluminal» expansion of the source

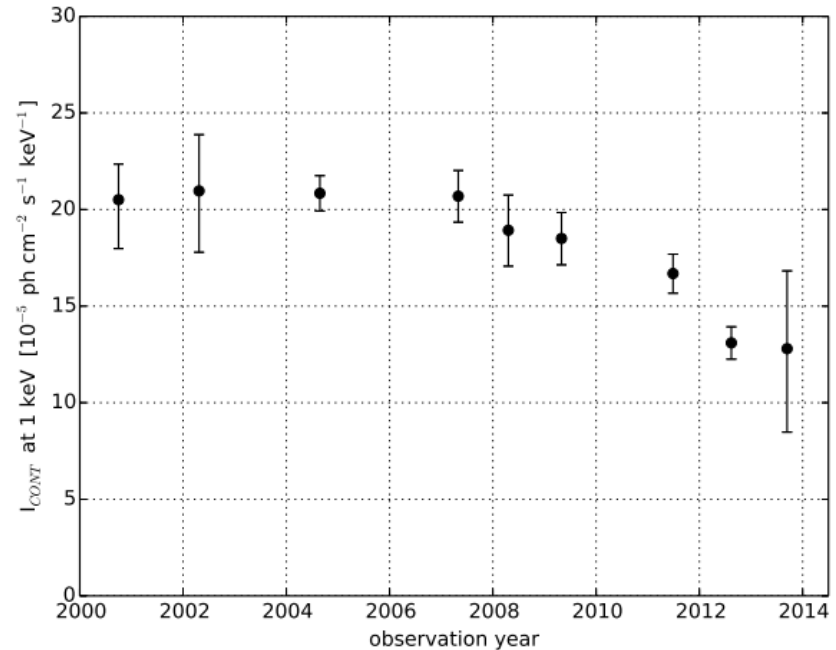
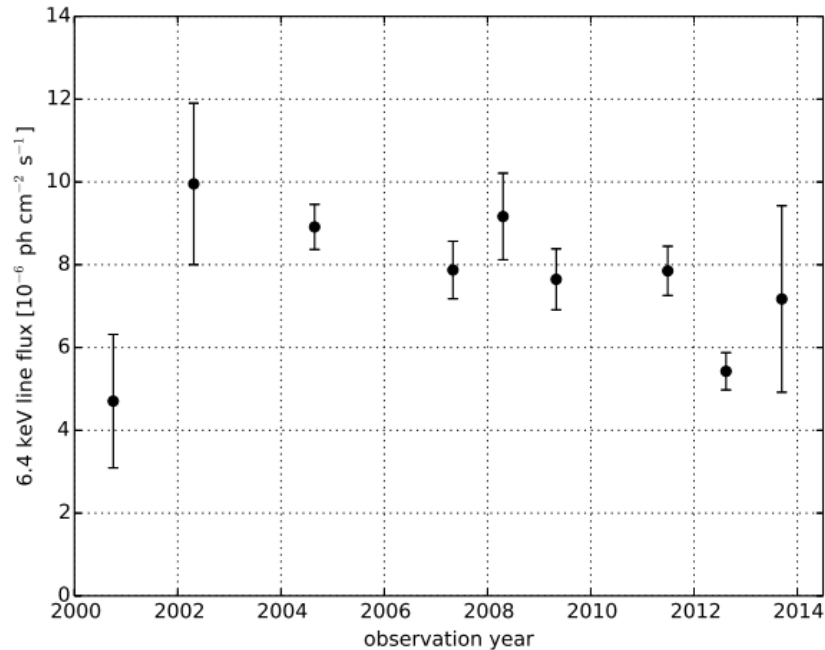
Ponti, Terrier (2010)



Линия 6.4 кэВ из молекулярных облаков



Arches cluster

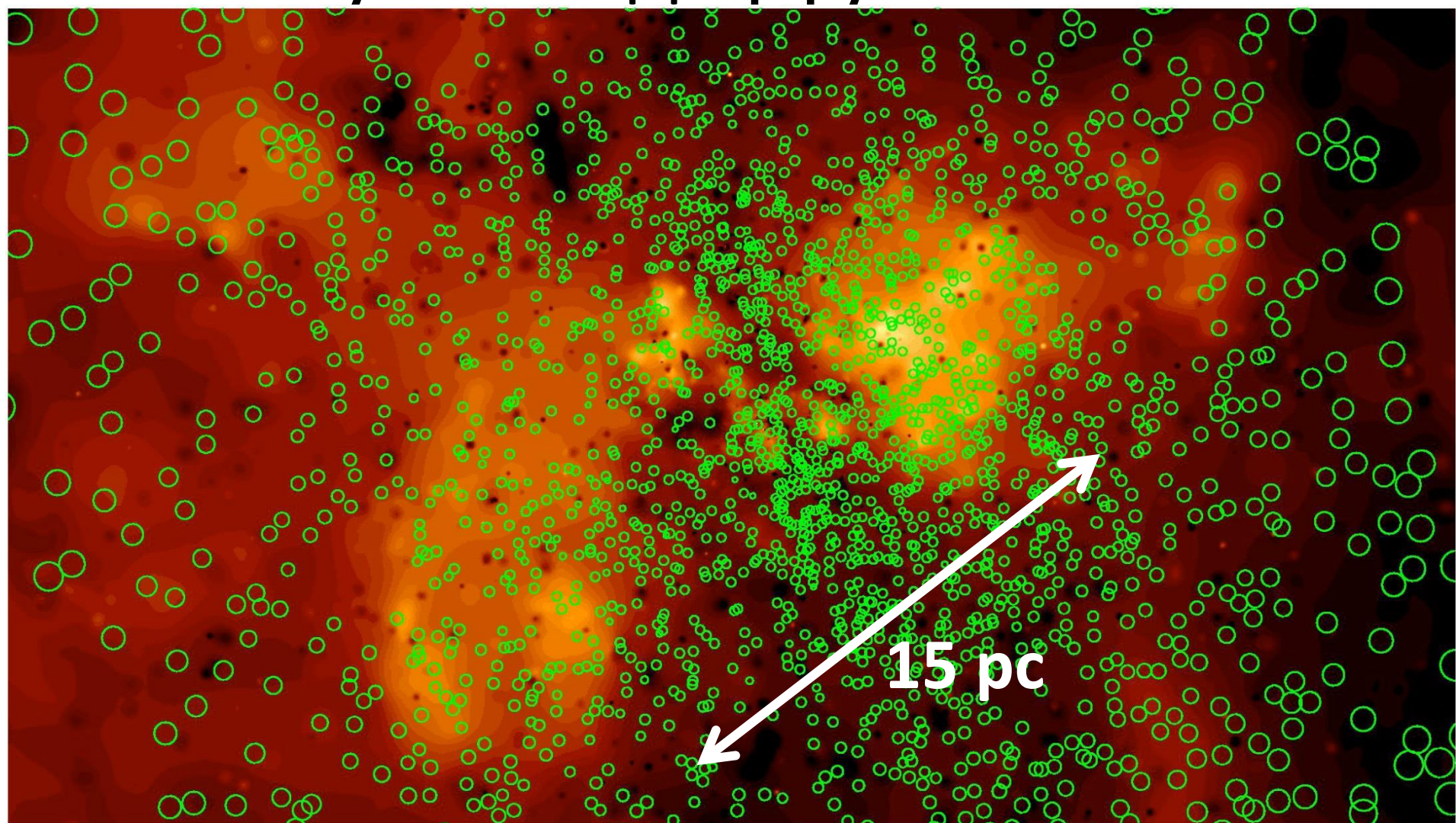


Variability! Not CR origin.

(Clavel et al., 2014)

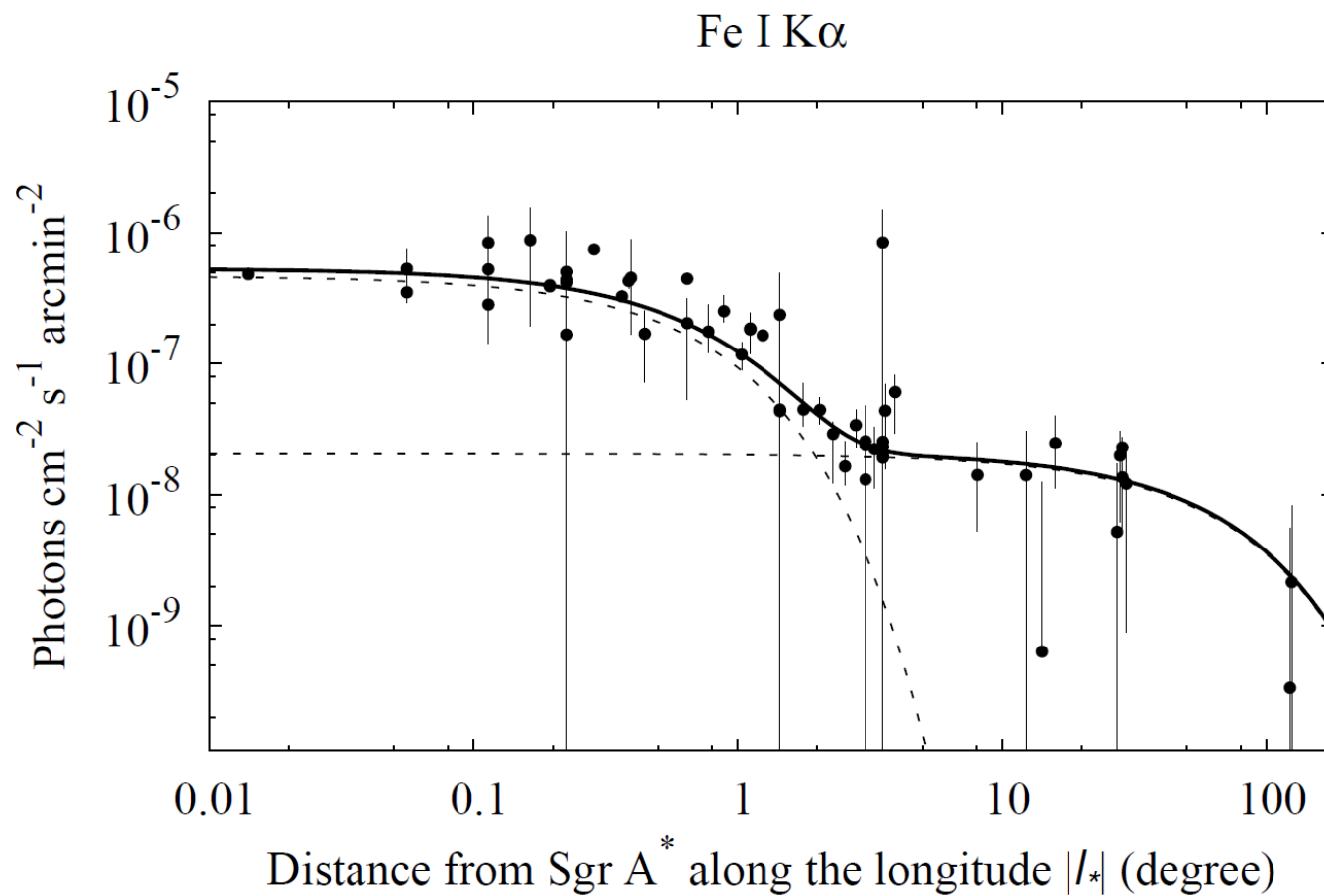
Рентген из молекулярных облаков (пока) не дает информации о КЛ

Излучение диффузного газа



Muno et al., 2005

Излучение диффузного газа



Uchiyama et al. (2012)

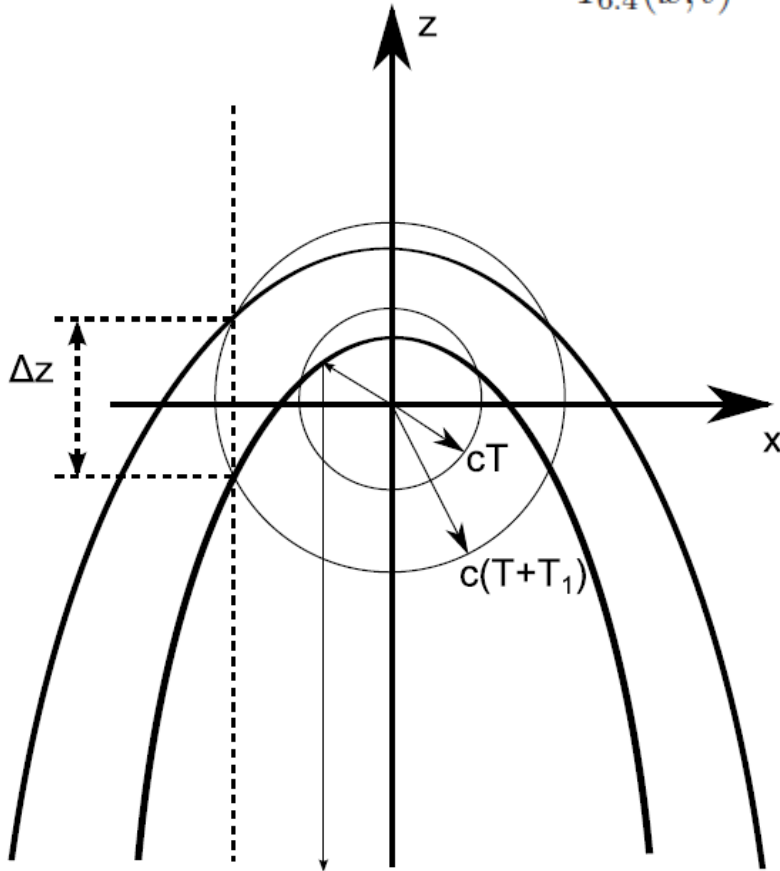
Неразрешенные точечные источники

- Galactic ridge $> 88\%$ (Revnivtsev, 2009)
- Возможно, вносят вклад в центр (Heard & Warwick, 2013)

НО:

- Типичная $EW = 100 \text{ eV} \ll 800 \text{ eV}$ (Landi et al. 2009, Bernardini et al. 2012, Ezea et al. 2013)
- Молекулярные облака – другой природы

Излучение от вспышки в прошлом



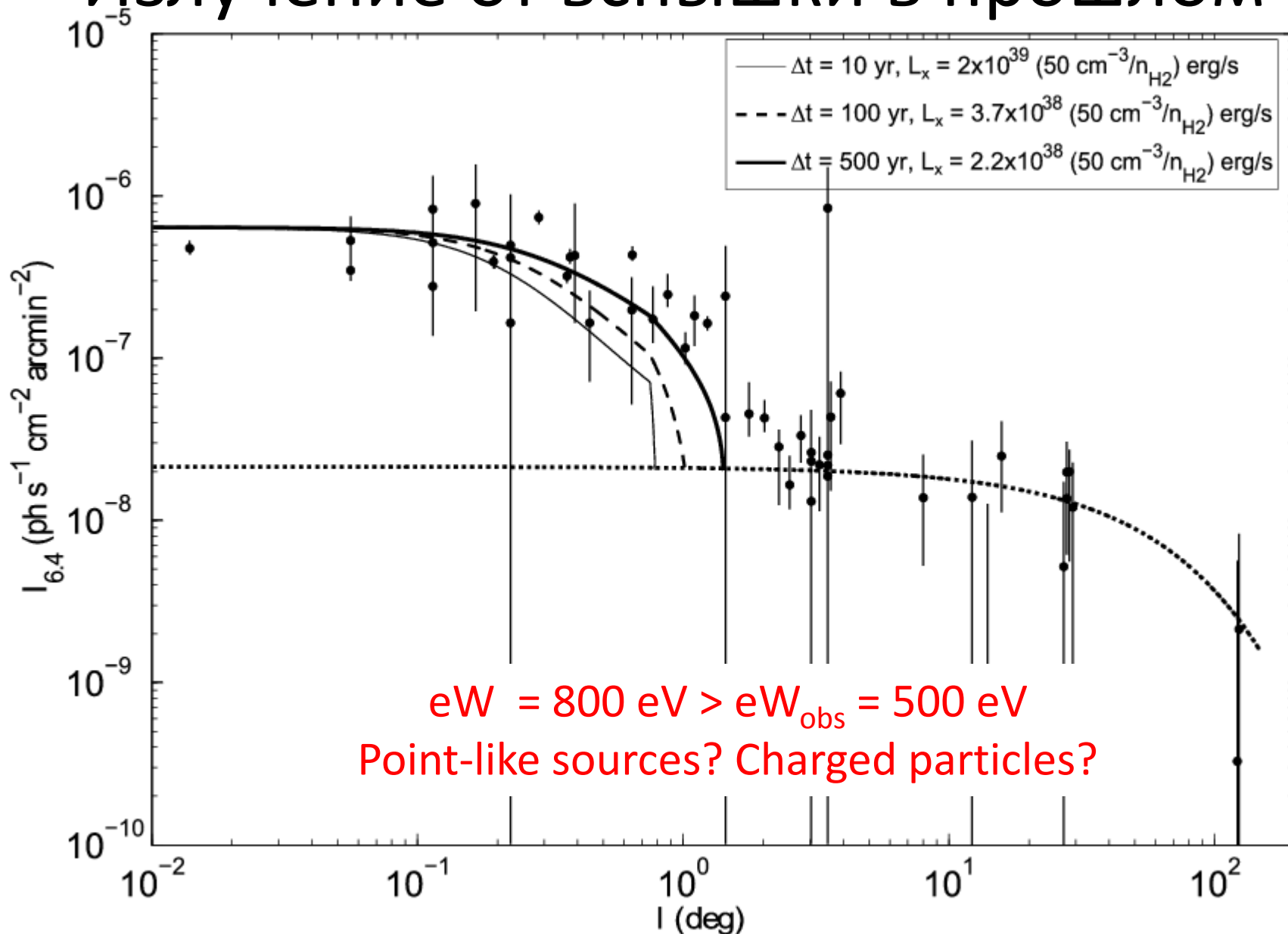
$$I_{6.4}(x, t) = \frac{4.62 \times 10^{13} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ sq.min}^{-1}}{x} \times$$

$$\times \left(\frac{\eta}{2\eta_{\odot}} \right) \left(\frac{n_H}{10 \text{ cm}^{-3}} \right) \left(\frac{L_{fl}}{10^{39} \text{ erg s}^{-1}} \right) \times$$

$$\times \left[\arctan \left(\frac{1}{2} \left[\frac{c\tau_2}{x} - \frac{x}{c\tau_2} \right] \right) - \arctan \left(\frac{1}{2} \left[\frac{c\tau_1}{x} - \frac{x}{c\tau_1} \right] \right) \right]$$

- K-alpha production threshold 7 keV
- No significant absorption of 7 keV photons
- Assuming power-law spectrum, index -2 (continuum emission from Sgr B2)
- $R_{\text{disk}} = 200 \text{ pc}$ (Ferriere et al, 2007)

Излучение от вспышки в прошлом



Ионизация нейтрального водорода

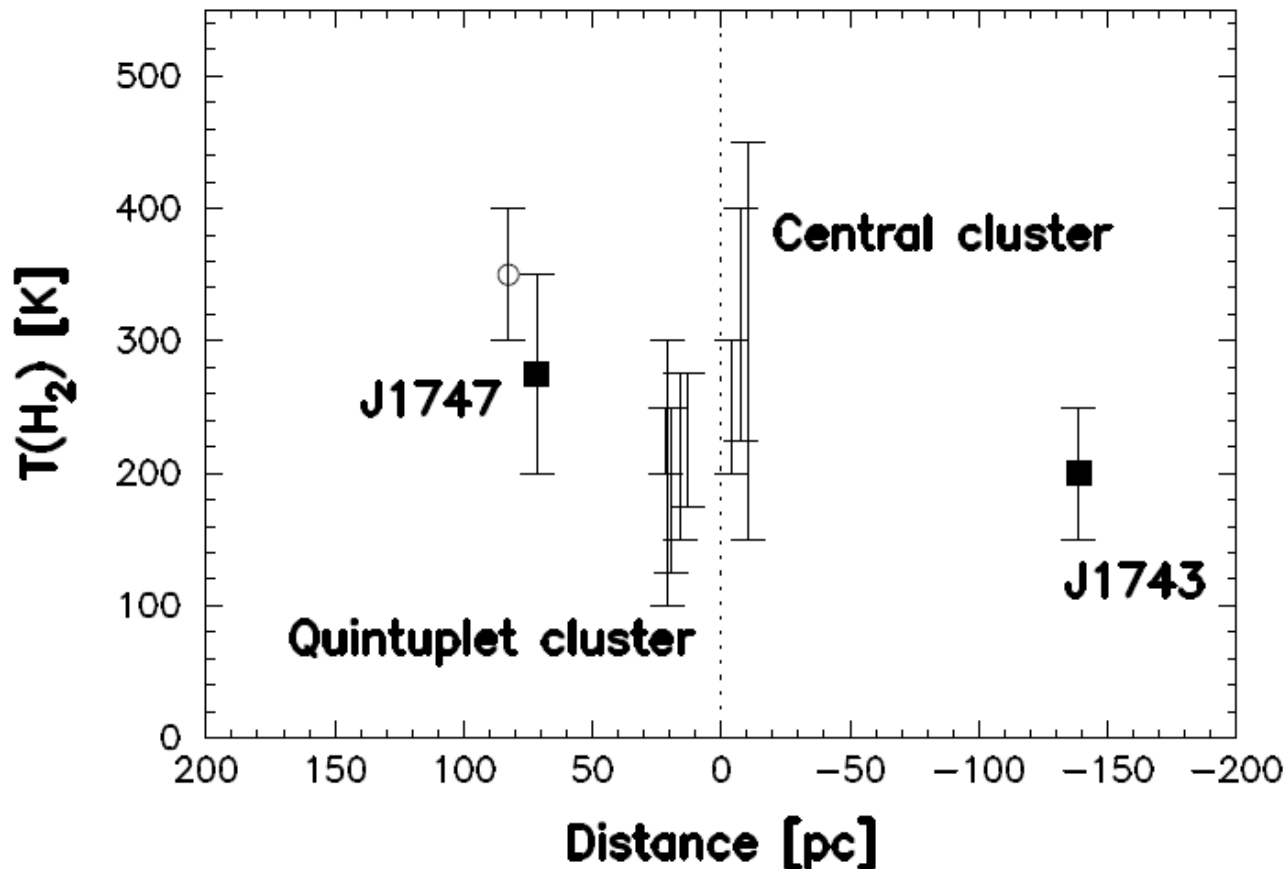
- Ионизация ведет к нагреву среды примерно на 15 eV (Yusef-Zadeh et al., 2013):

$$\frac{\Gamma_H}{n_H} = 4.0 \times 10^{-26} \left(\frac{\zeta_H}{10^{-15} s^{-1} H^{-1}} \right) erg s^{-1} H^{-1}$$

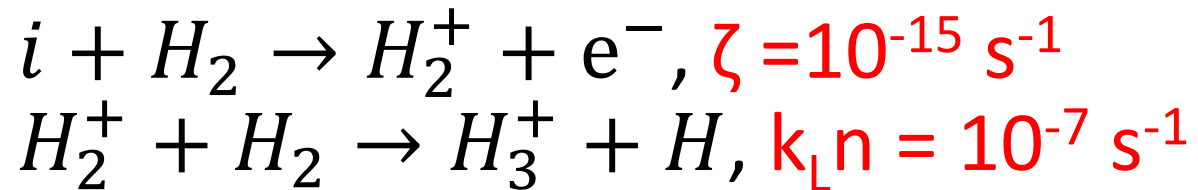
- высокий темп ионизации => высокая температура молекулярного газа (обратное не всегда верно)

Температура газа в ГЦ

- Только в ГЦ
- Большие масштабы – универсальный механизм



Астрохимия



Межзвездный H_3^+ предсказан в 1961 Martin, McDaniel, & Meeks, also Herbst & Klemperer (1973), Watson (1973)

Simple chemistry!

Обнаружен по поглощению в ИК - Geballe and Oka (1996)

Ионизованный молекулярный водород в ГЦ

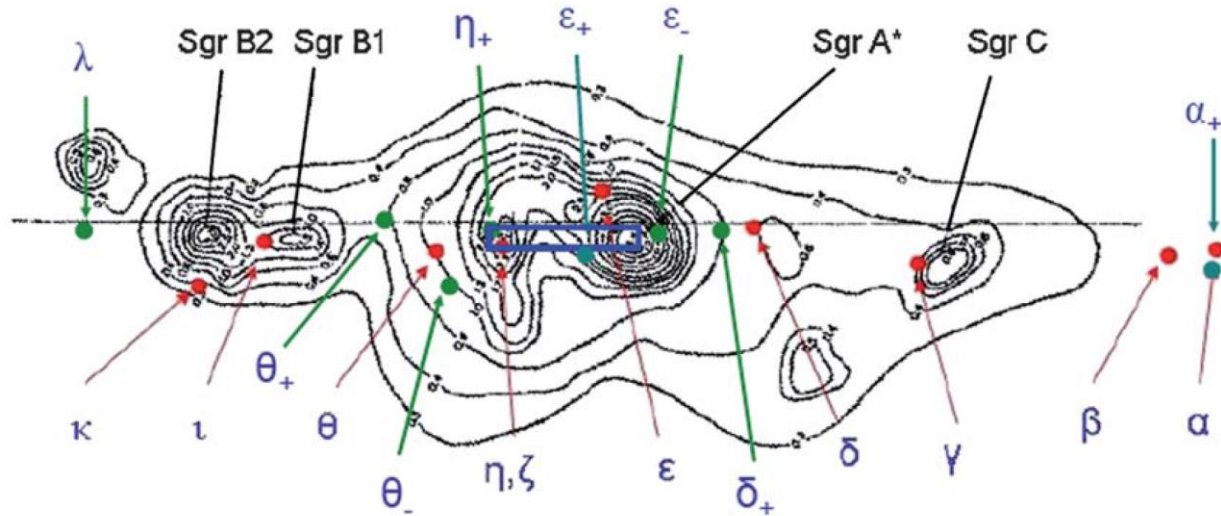
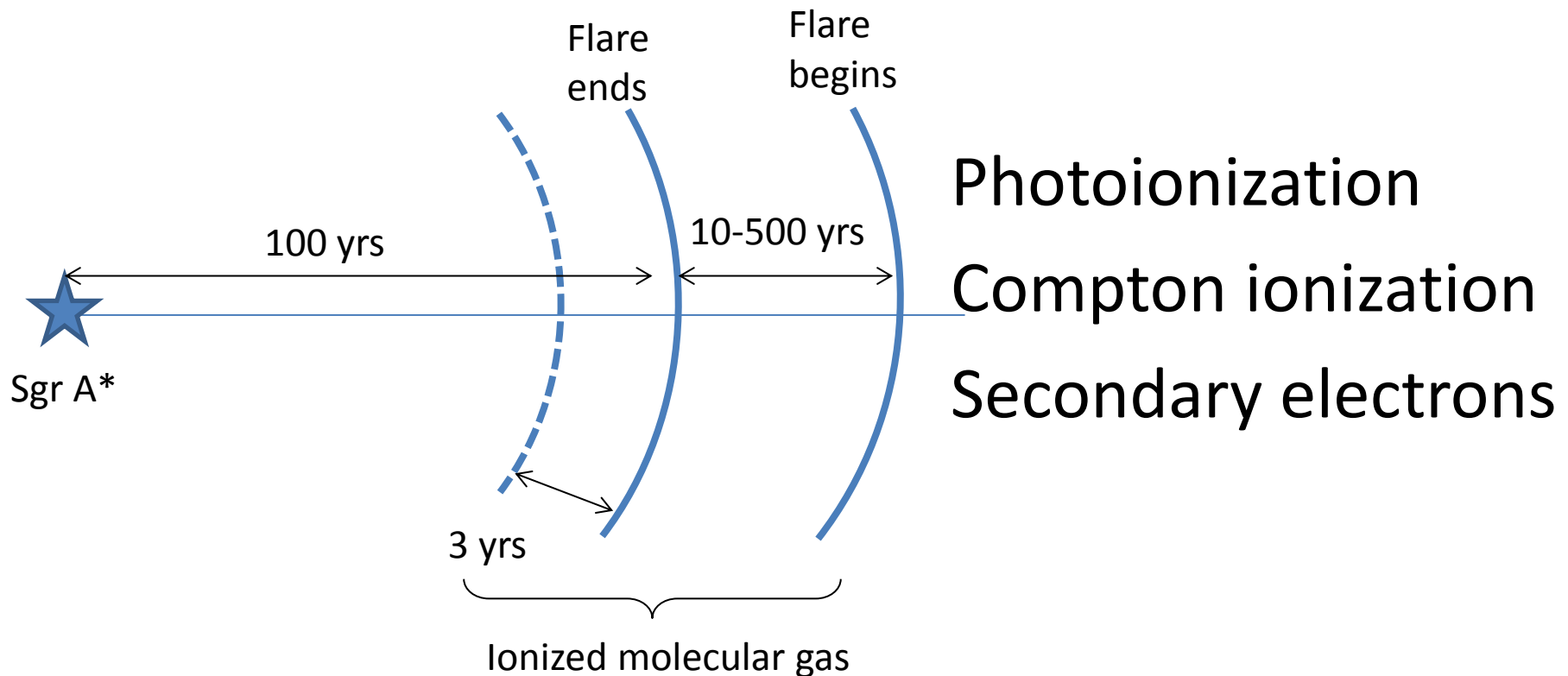


Fig. 8 19 newly found bright dust embedded stars qualified for the H₃⁺ spectroscopy from 140 pc West (α) to 120 pc East (λ). The distances are on the assumption of the Galactic center distance of 8 k pc. The central blue box indicates the location of 15 stars from the center to 30 pc East previously observed.

$$\zeta \sim (1 - 3) \times 10^{-15} \text{ s}^{-1} \text{ (Oka et al. 2005)}$$

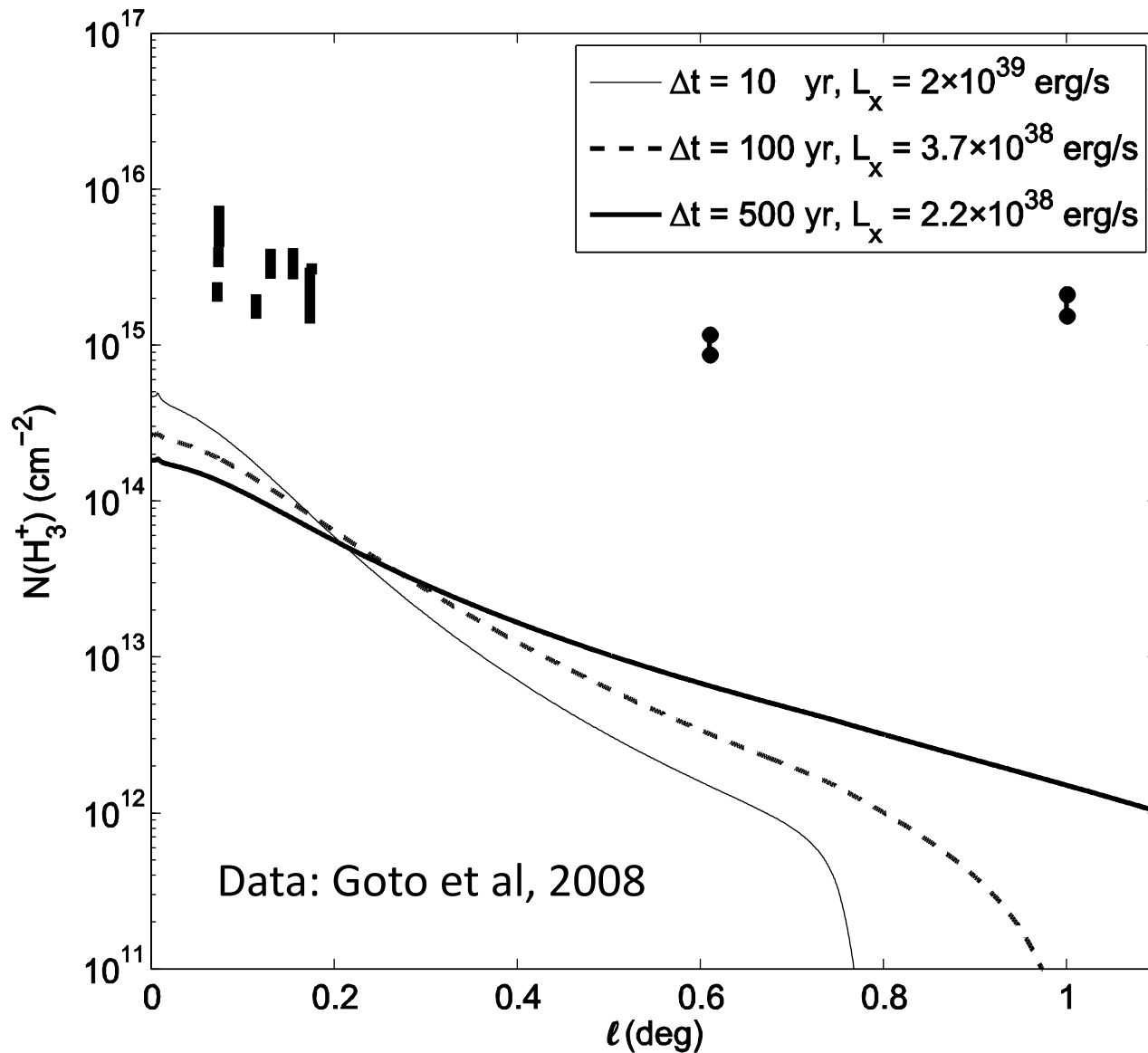
На порядок выше, чем в диске!

Ионизация излучением

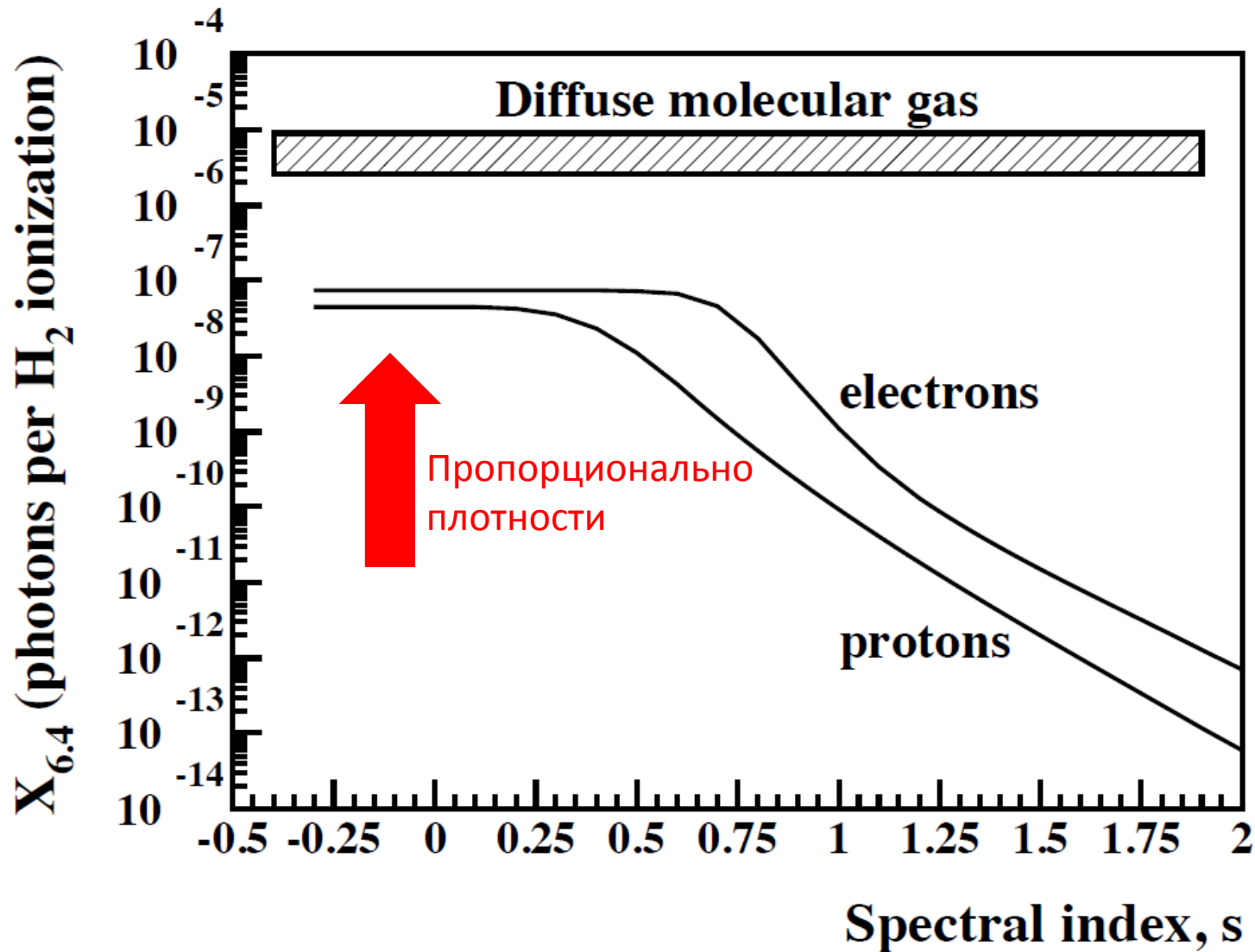


Поглощение важно. Внутренние «невидимые» 100 св. лет поглотят все, что ниже 1 кэВ => степенной спектр

Ионизация излучением



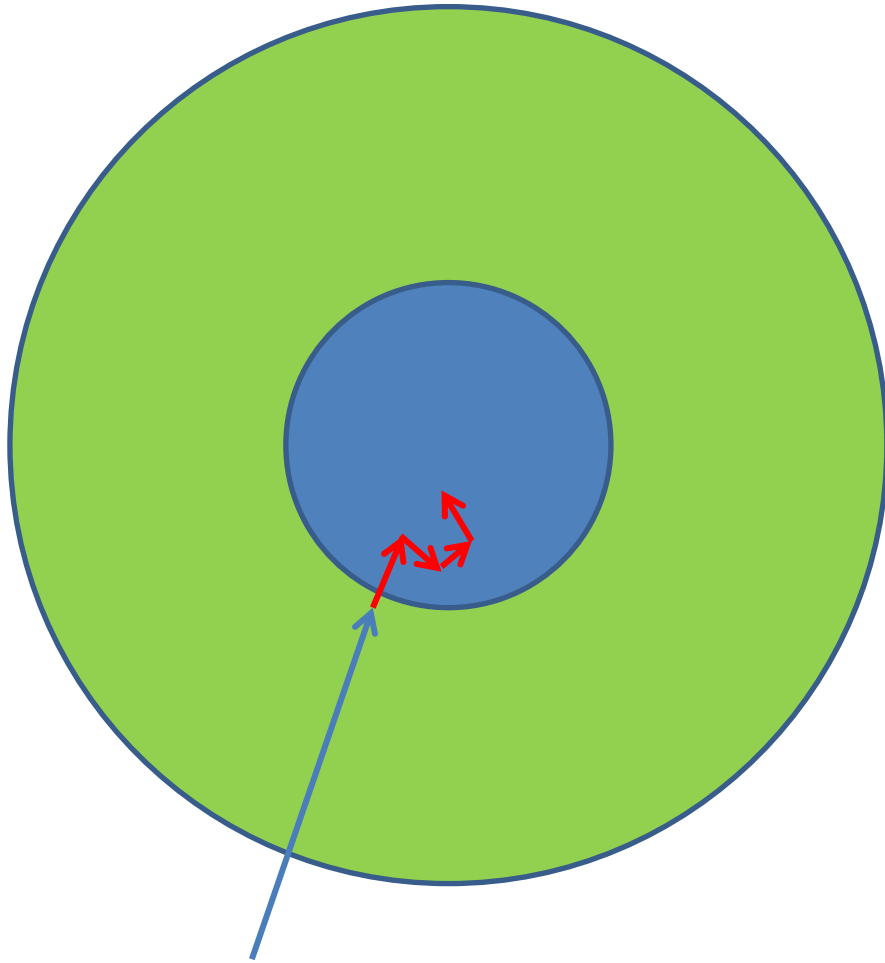
Вклад заряженных частиц



Ионизация и гамма-излучение

- Излучение из внутренних 100 пк - протоны
- Масса $1.3 \times 10^7 M_{\odot}$, спектральный индекс -2 (начальный, не модифицирован убеганием):
 - $E > 1 \text{ GeV}$: $6 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$
 - $E > 10 \text{ MeV}$: $2 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$
 - $E > 1 \text{ MeV}$: $4 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$
- Не модифицировано потерями?
- Степень по энергии! По импульсу хуже
- Нужна еще одна компонента!

Sgr B2



Внешняя оболочка: $M = 0..10^7 M_{\odot}$
Ионизация $3 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$
Без рассеяния

Внутр. оболочка: $M = 2 \times 10^5 M_{\odot}$
Ионизация $4 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$
(осторожно: H_3O^+)
Диффузия с $L_c = 0.4 \text{ pc}$

Sgr B2

- Внешняя оболочка $c\beta(E)\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial E} \left(\left(\frac{dE}{dt} \right)_i N \right) = 0$

- Решения и граничное условие для внутр.:

$$N_c(E) = K \left(\frac{E}{E_0} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{E}{E_0} \right)^2 + \frac{a(R - r_0)\sqrt{m}}{E_0^2} \right]^{-\frac{\delta+0.5}{2}} \theta(E_{max}^2 - E^2 - a(R - r_0)\sqrt{m})$$

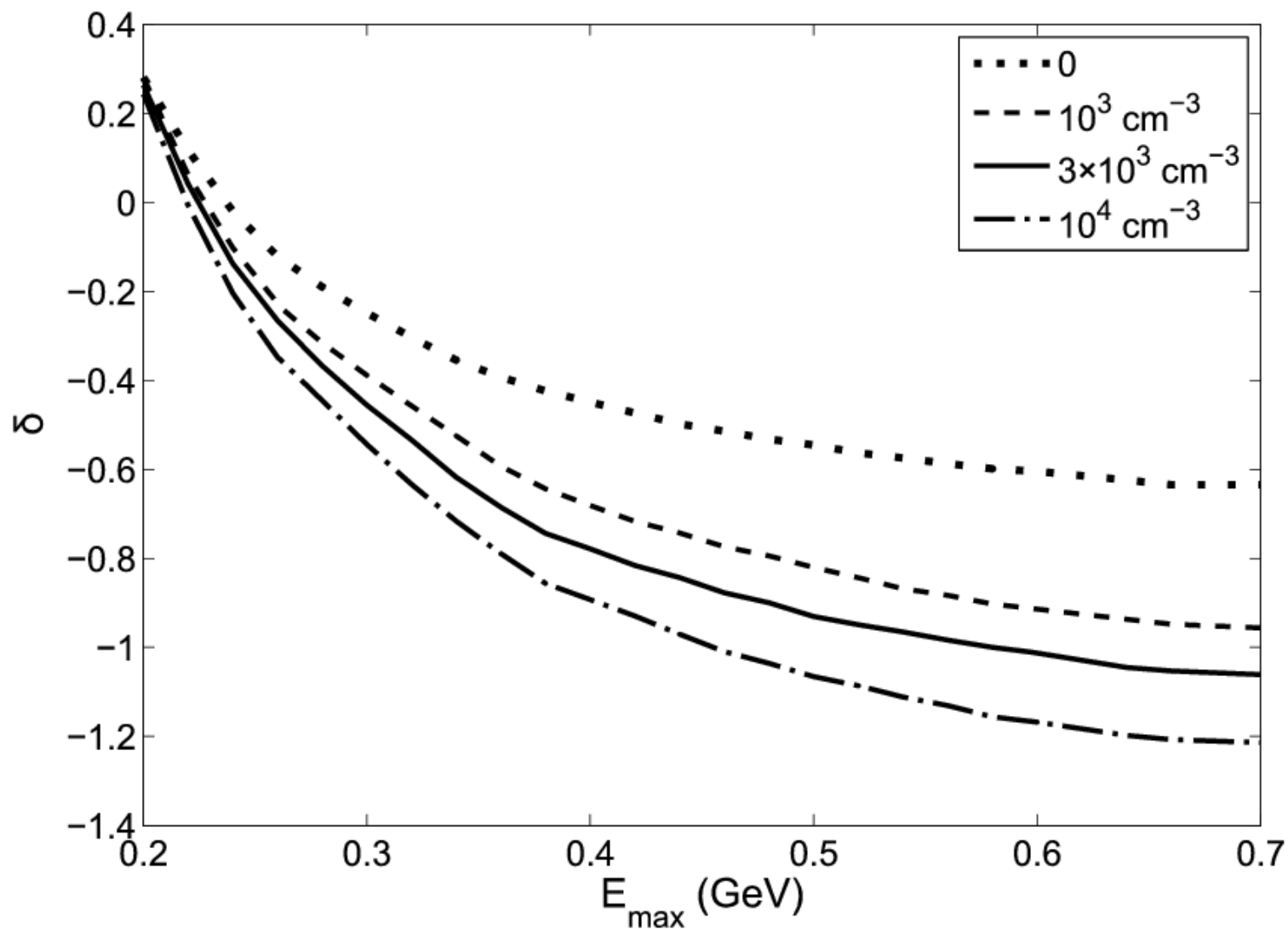
- Внутренняя оболочка

$$-\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_c \frac{\partial N_c}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial E} \left[\left(\frac{dE}{dt} \right)_i N_c \right] = 0$$

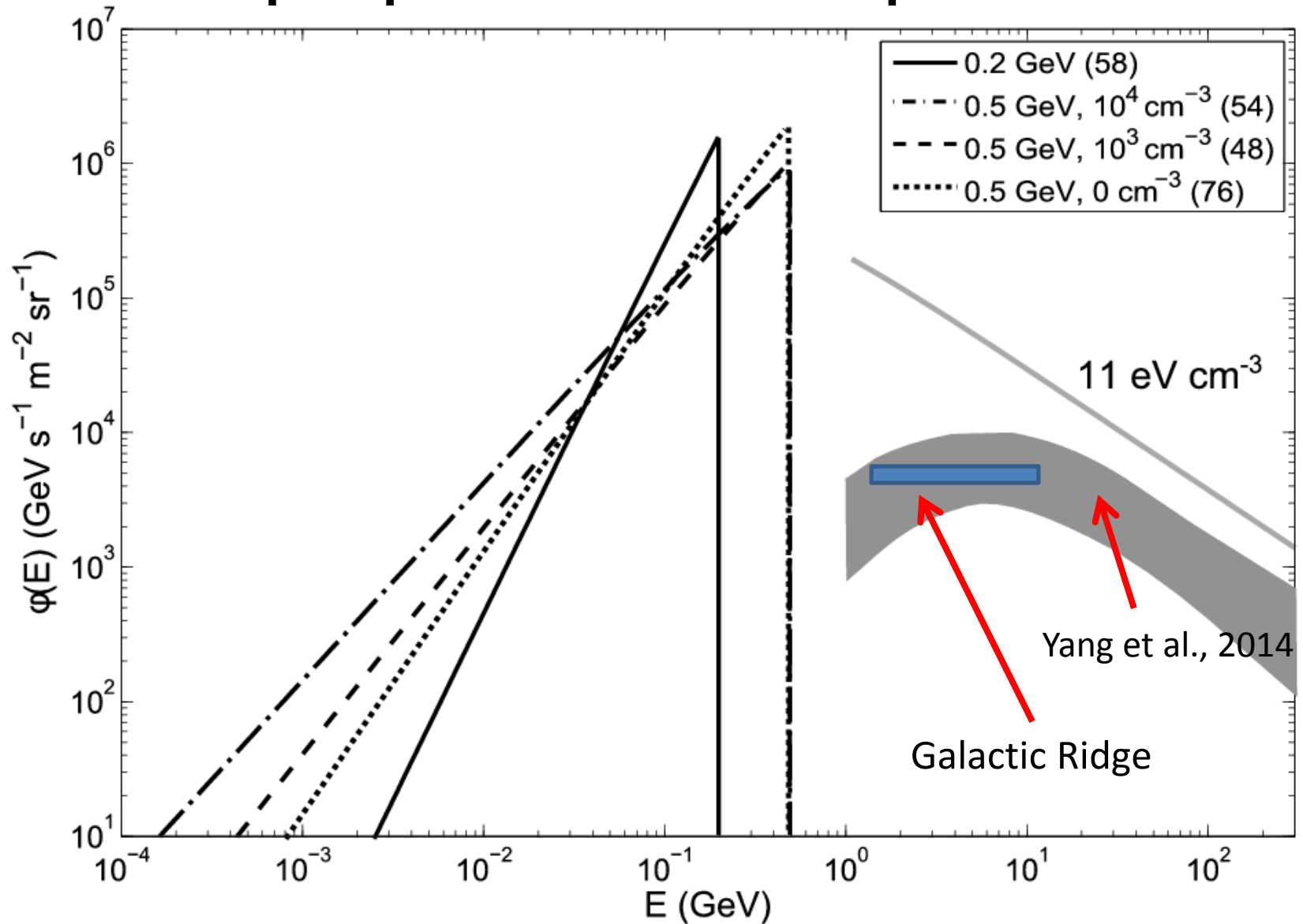
- Подбираем спектр так, чтобы отношение ионизаций составляло нужную величину

$$\frac{\zeta}{\zeta_c} \simeq \frac{r_0}{(R - r_0)} \frac{\int_{r_0}^R dx \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE N(x, E) \sigma_i(E) u(E)}{\int_0^{r_0} dr \int_{E_{min}}^{E_{max}} dE N_c(r, E) \sigma_i(E) u(E)}$$

Параметры спектра



Спектр протонов в окрестности



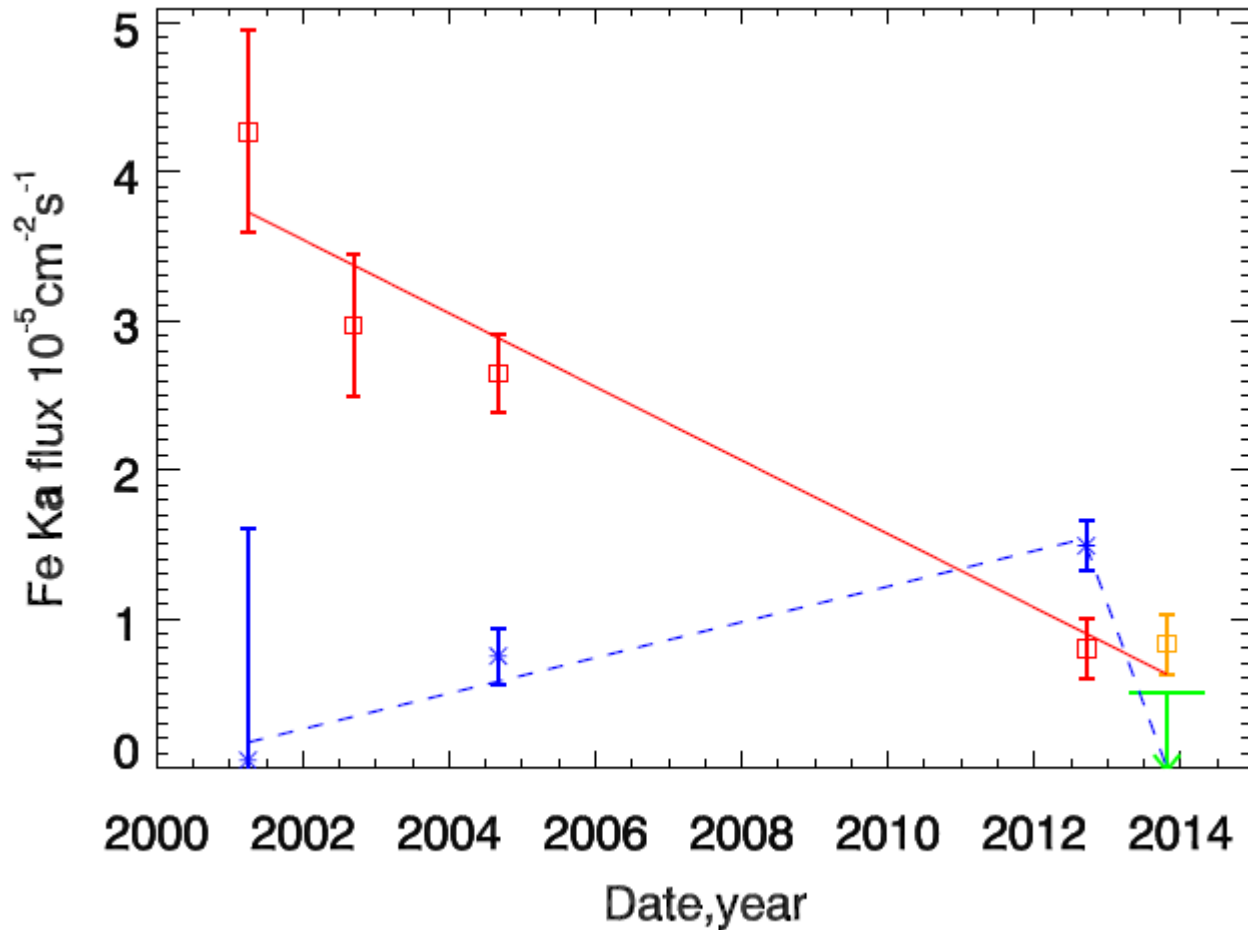
Электроны

- Должны иметь энергию > 10 МэВ, чтобы проникнуть в облако
- Сильное тормозное излучение

$$F_x = \frac{(\epsilon_{ep} + \epsilon_{ee})M_H}{4\pi m_p R_{GC}^2} \approx 1.7 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \times \left(\frac{M_H}{10^6 M_\odot} \right)$$

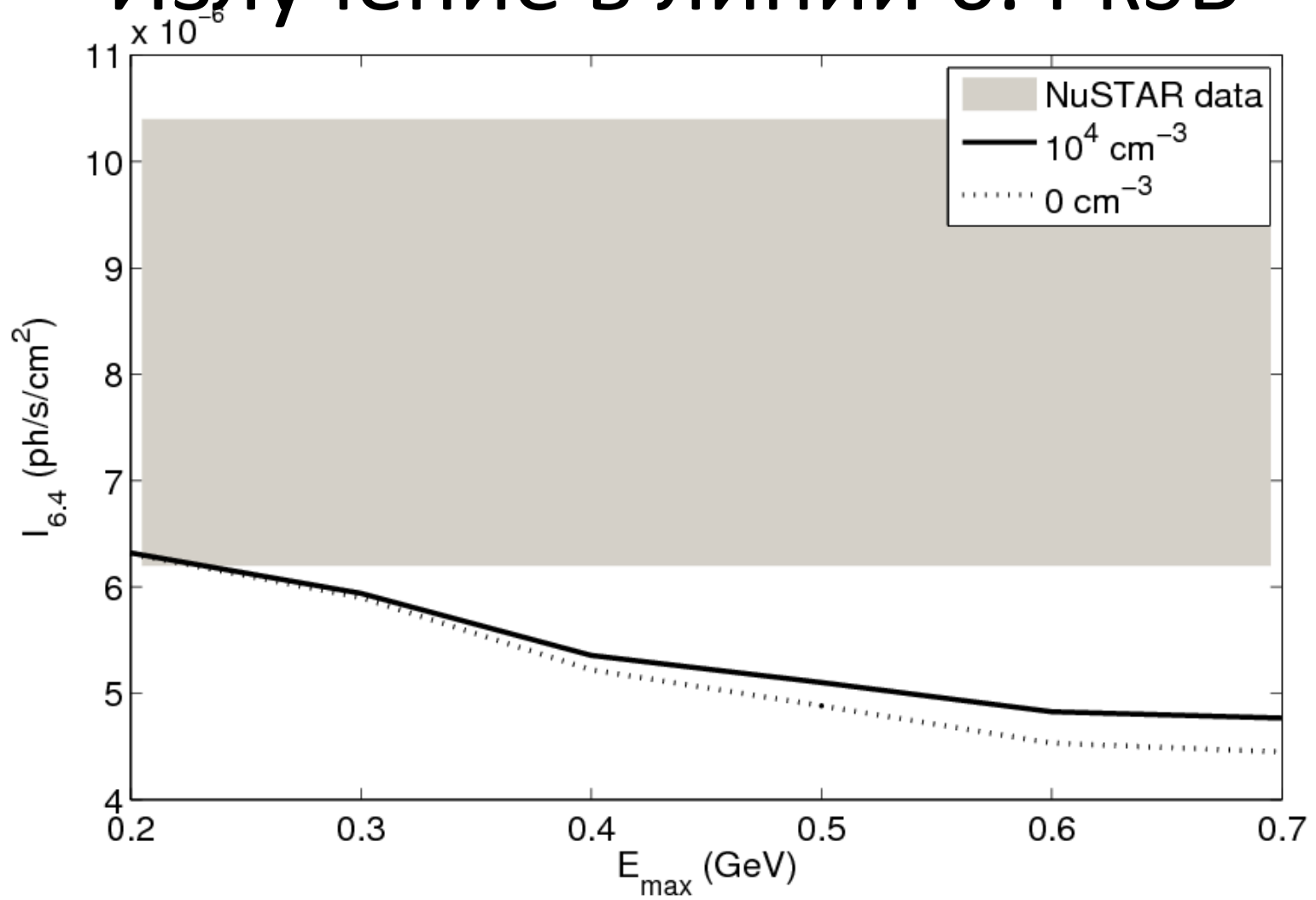
- Текущий предел NuSTAR сопоставим. Он является переменным!

Излучение в линии 6.4 кэВ



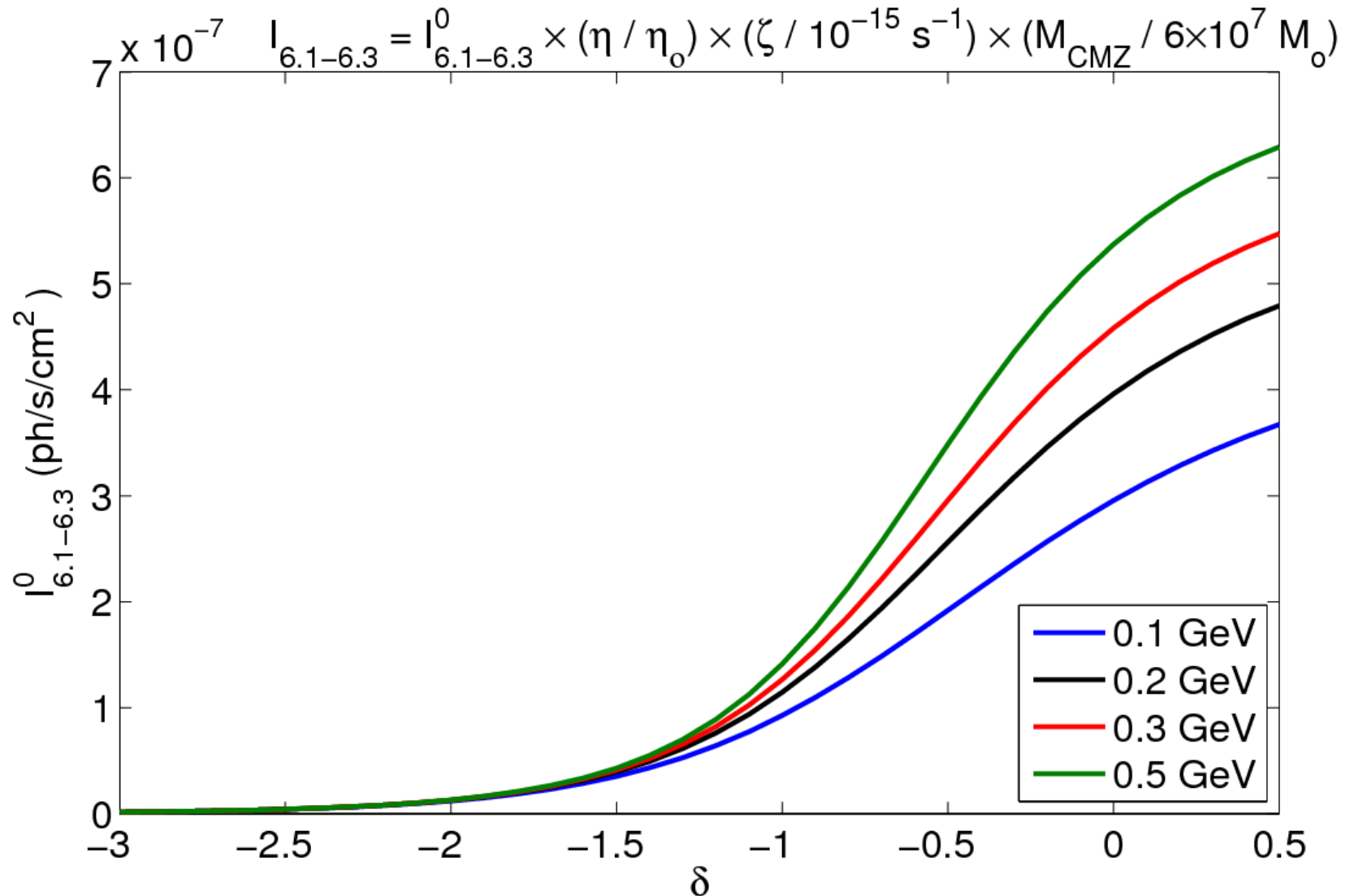
Данные XMM-Newton и NuSTAR (Zhang et al., 2015)
В 3 раза меньше, чем дает Suzaku!

Излучение в линии 6.4 кэВ

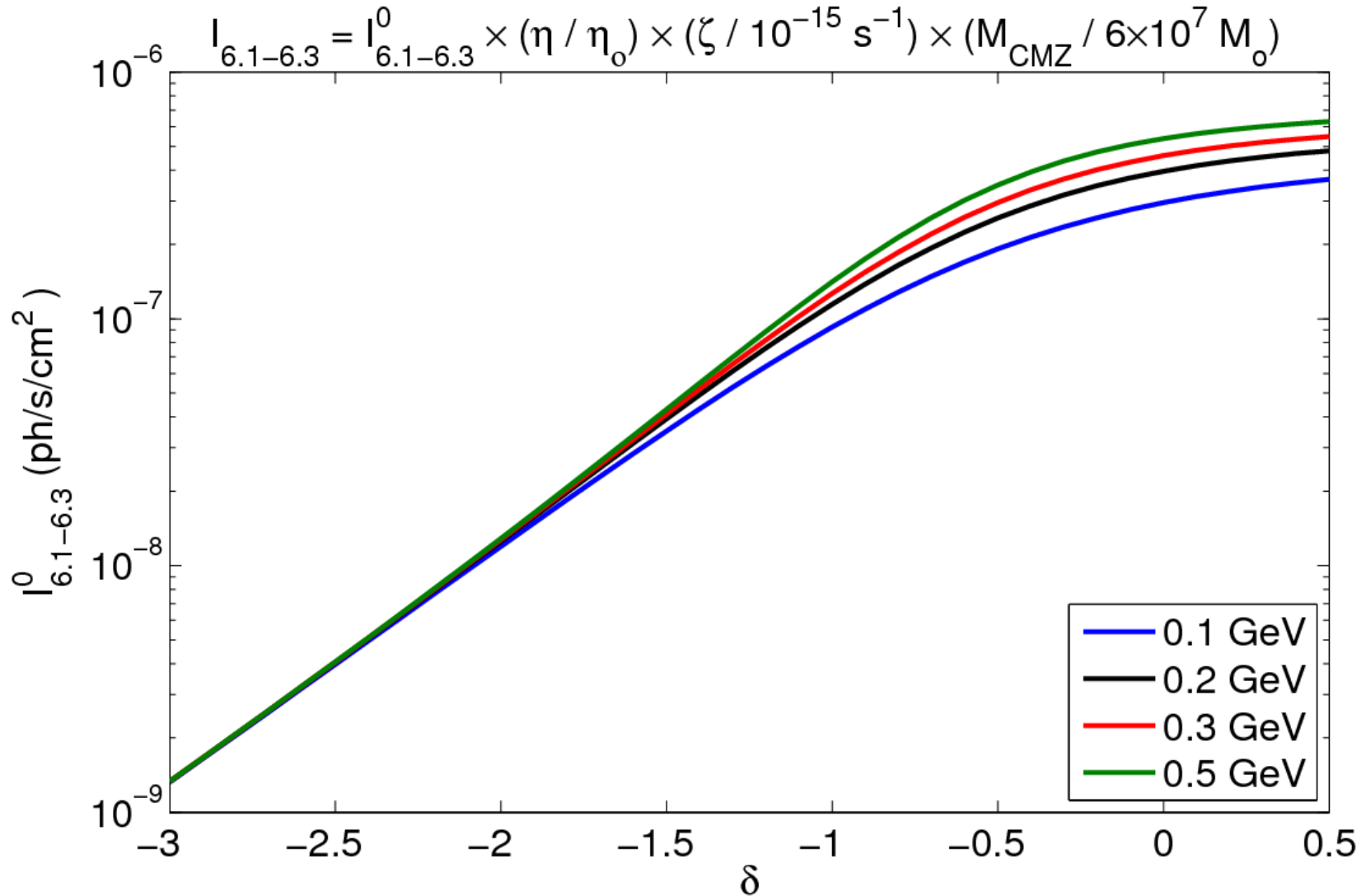


HESS 1745-303 => может быть описано почти на 100%

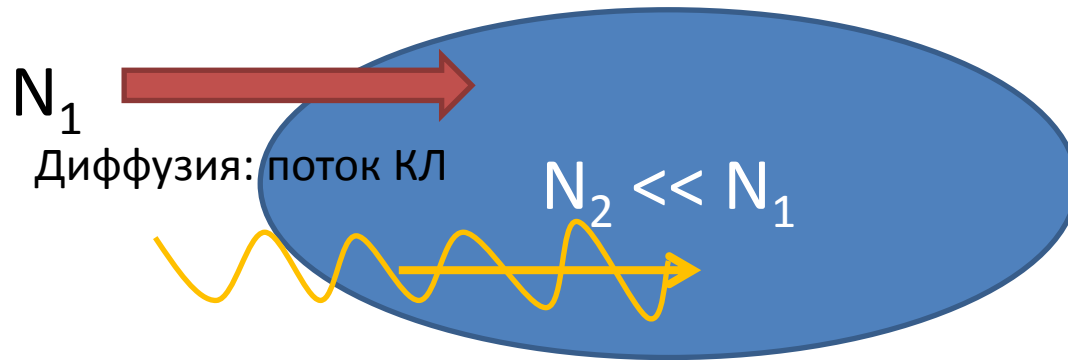
CMZ: излучение в линиях ядер



CMZ: излучение в линиях ядер



Проникновение частиц в облака



Потоковая неустойчивость – волна

Затухание – взаимодействие ионов и нейтралов

- Все параметры заданы – нужно только посчитать
- Не работает для релятивистских частиц, но может сильно поменять ситуацию для нерелятивистских

Заключение

- Плотность релятивистских протонов в окрестности ГЦ порядка 3 эВ/см^3
 - Соответствует GALPROP только при низком гало
 - Соответствует ГэВ-излучению из GR
- Суб-релятивистская и релятивистская части спектра не стыкуются
 - Разная природа?
 - Можно уточнить по стационарному потоку 6.4 кэВ
 - Нужен телескоп для МэВной области
 - Взаимодействие с молекулярными облаками!