

Исследование нетеплового рентгеновского излучения *Westerlund 2* по данным *SRG/ART-XC* и *Chandra*

Быков А. М., Уваров Ю. А., Каляшова М. Е., Бадмаев Д. В., Лапшов И. Ю. , Лутовинов А. А.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН

ИКИ РАН

e-mail: m.kalyashova@gmail.com

Молодые звездные скопления

- Возраст < 20 млн. лет
- Популяции звезд O-, B-, Вольфа-Райе
- Кинетическая мощность $>10^{37} - 10^{38}$ эрг/с
- Масса $> 10^3 - 10^5 M_{\odot}$

Мотивация:

- Являются гамма-источниками на энергиях ГэВ-ТэВ \Rightarrow процессы ускорения частиц
- Возможные источники КЛ с энергиями $>ПэВ$

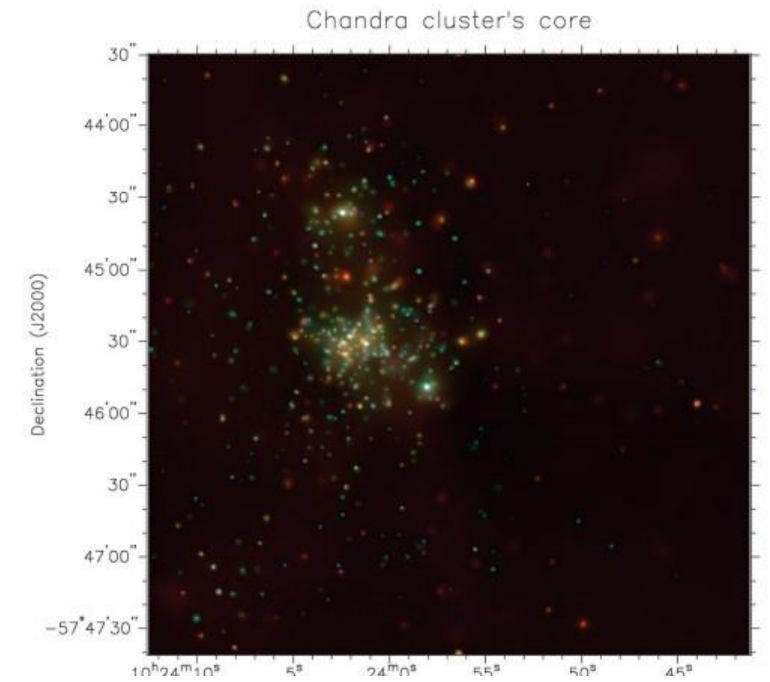
Westerlund 2 (Wd2)

- Компактное скопление массивных звезд
- Находится в области звездообразования RCW 49 на расстоянии $\sim 4-5$ кпк
- Радиус ~ 2 пк
- Возраст ~ 2 млн. лет
- Кинетическая мощность $\sim 2 \times 10^{38}$ эрг/с
- Гамма- и рентгеновский источник

Wd2 в рентгене

Chandra

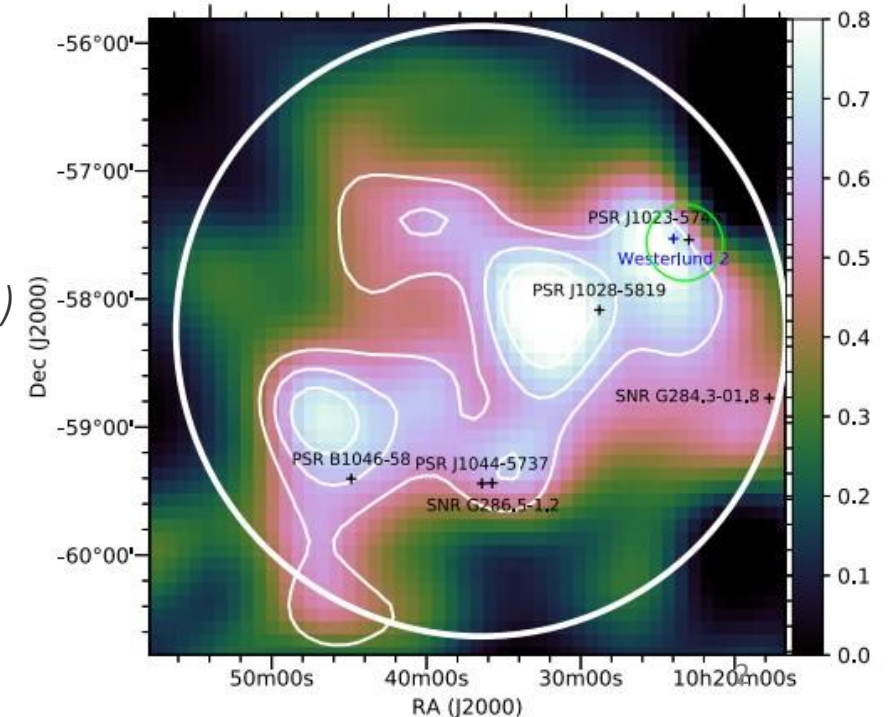
Naze et al. 2007



Wd2 в гамма

(Fermi LAT, HESS)

Yang et al. 2018



Westerlund 2 и RCW 49: рентгеновские наблюдения

- *Chandra* (Townesley et al. 2005, 2018, Naze et al. 2008) – 0.5-8 кэВ
- *Suzaku* (Fujita et al. 2009) ~0.6-7 кэВ

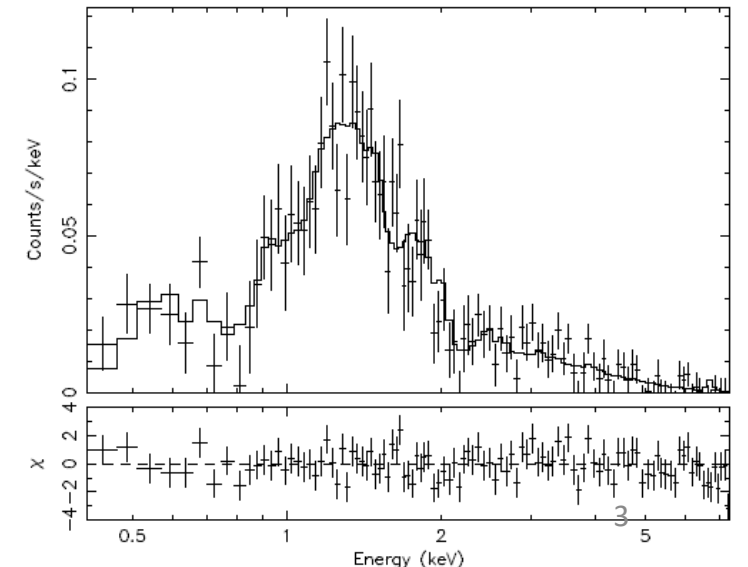
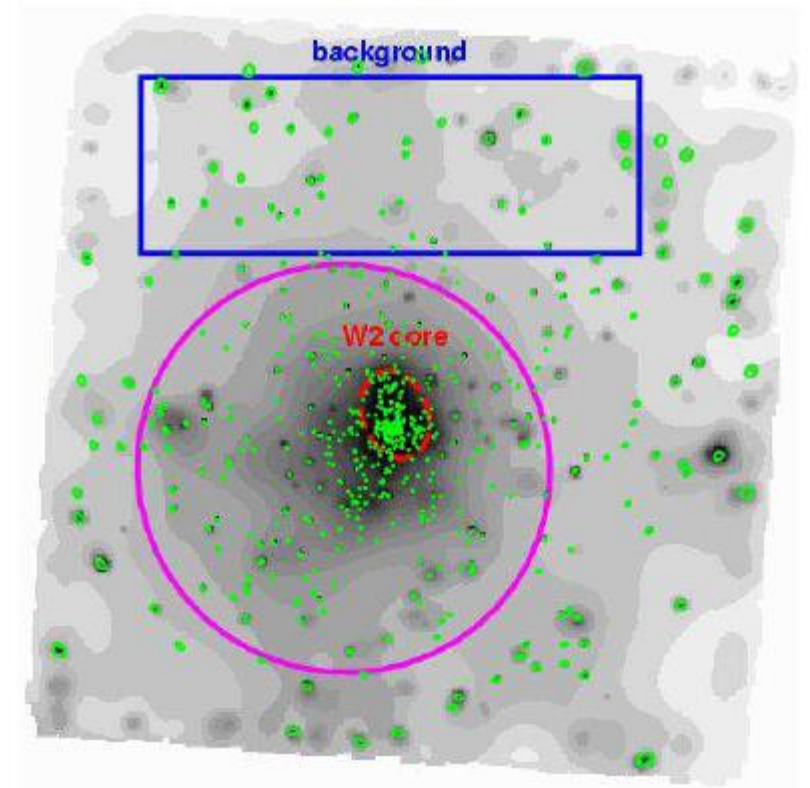
Результаты фитирования спектра (Chandra):

| | 3 тепловые компоненты | 2 тепловые + степенная |
|------------|-------------------------------------|------------------------|
| T_1 | 0.1 кэВ | |
| N_H^I | $4 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ | |
| T_2 | 0.8 кэВ | |
| T_3 | 3.1 кэВ | - |
| Γ | - | 2.3 |
| N_H^{II} | $12 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ | |

Предположительно foreground

По данным наблюдениям невозможно отдать предпочтение модели с 3-й тепловой или нетепловой компонентой

Карта и спектр излучения региона RCW 49, полученные Townesley (Chandra)



Наблюдения Chandra

- Архивные наблюдения (2018, PI: Laura Lopez), экспозиция 260 ксек
- Диапазон энергий 0.4-8 кэВ
- PSF (ART-XC) \gg PSF (Chandra) \Rightarrow нельзя вычесть все точечные источники из центрального региона
- Поэтому для анализа было выбрано **кольцо 2'-3'**, из которого были вычтены несколько регионов скоплений точечных источников

Карта источника Chandra на энергиях 2-7 кэВ

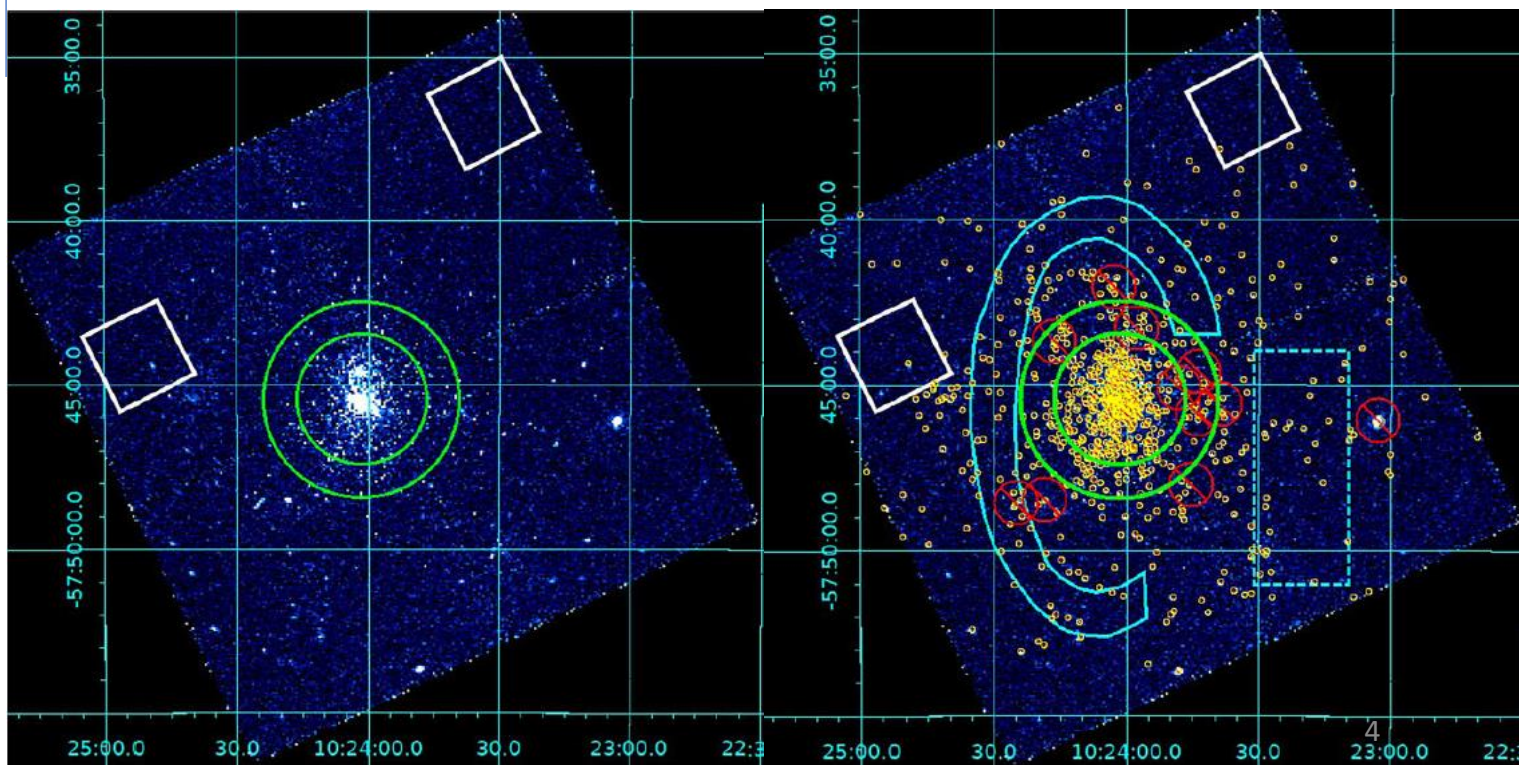
Зеленый: регион 2'-3', откуда брался спектр

Белый: регион, откуда брался фон

Желтый: вычтенные из данных Chandra точечные источники

Красный: вычтенные из данных обоих телескопов регионы скопления точечных источников

Голубой: дополнительные регионы для исследования



Анализ спектра Chandra (XSPEC)

Модель 3Т: тепловая компонента с фиксированной $T=0.1$ кэВ + 2 тепловые компоненты

Модель 2ТР: тепловая компонента с фиксированной $T=0.1$ кэВ + тепловая компонента + степенная компонента

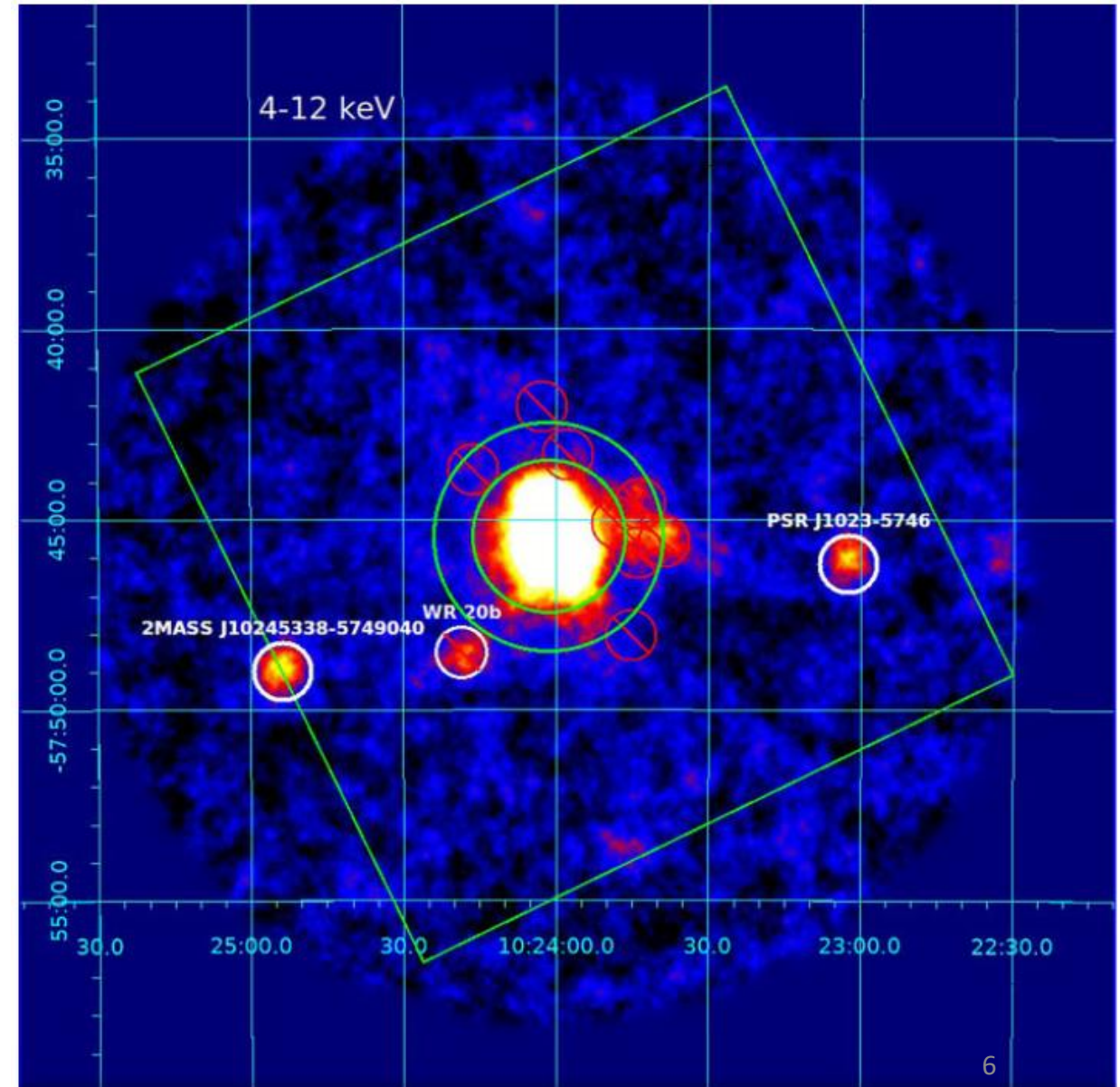
Исходя из анализа новых данных Chandra все еще невозможно доказать или опровергнуть наличие нетепловой компоненты

| Model | 3T: $tbabs_1 \times apec_1 + tbabs_2 \times (apec_2 + apec_3)$ | 2TP: $tbabs_1 \times apec_1 + tbabs_2 \times (apec_2 + pow)$ |
|--|--|--|
| parameters | | |
| N_H^I (10^{22} cm^{-2}) | $0.1^{+0.7}_{-0.1}$ | $0.13^{+0.67}_{-0.13}$ |
| T_1 (keV, fixed) | 0.1 | 0.1 |
| $F_{T_1}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $1.0^{+11.6}_{-0.9} \times 10^{-13}$ | $1.6^{+14.4}_{-1.5} \times 10^{-13}$ |
| N_H^{II} (10^{22} cm^{-2}) | 1.5 ± 0.3 | $1.6^{+0.25}_{-0.35}$ |
| T_2 (keV) | $0.85^{+0.25}_{-0.35}$ | $0.9^{+0.3}_{-0.2}$ |
| T_3 (keV) | $3.8^{+8.2}_{-1.3}$ | – |
| Γ (power-law index) | – | $1.9^{+0.5}_{-0.7}$ |
| $F_{T_2}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $4.0^{+2.3}_{-2.4} \times 10^{-13}$ | $5.0^{+2.9}_{-3.0} \times 10^{-13}$ |
| $F_{T_3}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $2.0^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{-13}$ | – |
| F_{pow}^{**} ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | – | $2.0^{+1.2}_{-0.7} \times 10^{-13}$ |
| degrees of freedom | 69 | 69 |
| $\chi^2/\text{degrees of freedom}$ | 1.11 | 1.16 |

Наблюдения ART-XC

- Наблюдения в июне-июле 2022 г.
- Экспозиция 320 ксек
- Диапазон 4-12 кэВ (>12 кэВ нет значимого детектирования)
- **Зеленый:** кольцо 2'-3', выбранное для анализа
- **Красный:** вычтенные регионы скоплений точечных источников

Карта источника ART-XC на энергиях 4-12 кэВ



Совместный анализ Chandra и ART-XC

Модель 3T: тепловая компонента с фиксированной $T=0.1$ кэВ + 2 тепловые компоненты

Модель 2TP: тепловая компонента с фиксированной $T=0.1$ кэВ + тепловая компонента + степенная компонента

Что нового?

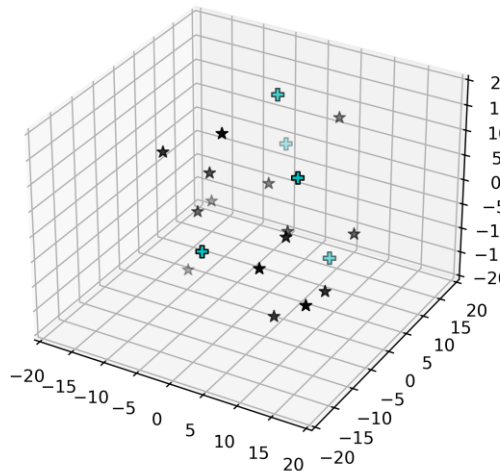
- T_3 повышается до ~ 5 кэВ
- Выбрать между 3-й температурой и степенью все так же нельзя

| Model | 3T: $tbabs_1 \times apec_1 + tbabs_2 \times (apec_2 + apec_3)$ | 2TP: $tbabs_1 \times apec_1 + tbabs_2 \times (apec_2 + pow)$ |
|--|--|--|
| parameters | | |
| N_{H}^{I} (10^{22} cm^{-2}) | $0.1^{+0.7}_{-0.1}$ | $0.18^{+0.75}_{-0.18}$ |
| T_1 (keV, fixed) | 0.1 | 0.1 |
| $F_{T_1}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $1.0^{+9.0}_{-0.9} \times 10^{-13}$ | $1.8^{+16.2}_{-1.6} \times 10^{-13}$ |
| N_{H}^{II} (10^{22} cm^{-2}) | $1.5^{+0.3}_{-0.2}$ | 1.5 ± 0.3 |
| T_2 (keV) | $0.9^{+0.2}_{-0.3}$ | $0.9^{+0.4}_{-0.2}$ |
| T_3 (keV) | $4.7^{+13.3}_{-1.9}$ | – |
| Γ (power-law index) | – | $2.1^{+0.3}_{-0.4}$ |
| $F_{T_2}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $5.0^{+2.4}_{-2.4} \times 10^{-13}$ | $4.0^{+2.3}_{-2.4} \times 10^{-13}$ |
| $F_{T_3}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $1.8^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{-13}$ | – |
| F_{pow}^{**} ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | – | $2.2^{+1.0}_{-0.7} \times 10^{-13}$ |
| A^{***} | $1.85^{+0.85}_{-0.65}$ | $1.95^{+0.85}_{-0.60}$ |
| degrees of freedom | 82 | 82 |
| $\chi^2/\text{degrees of freedom}$ | 1.16 | 1.15 |

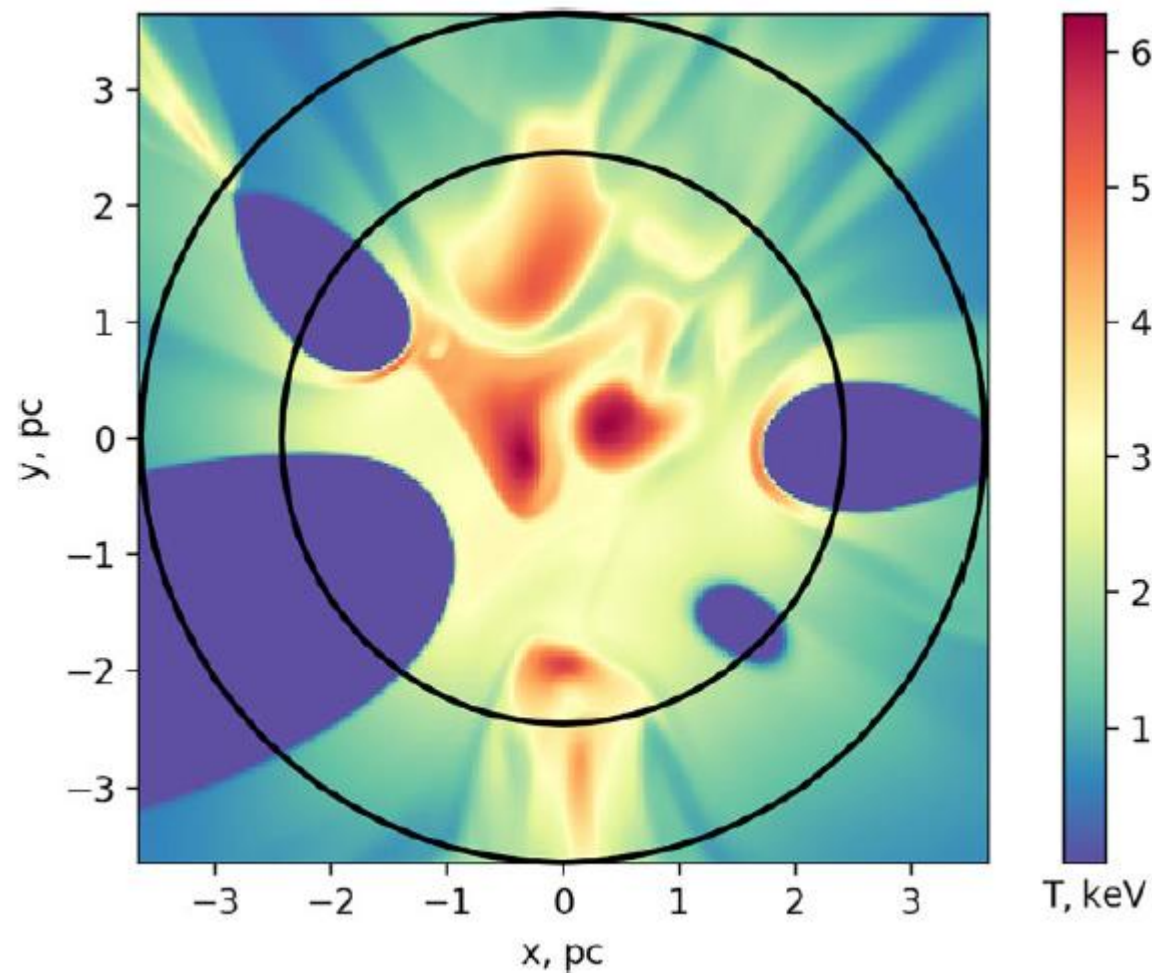
МГД моделирование

3D МГД Моделирование
взаимодействия ветров
массивных звёзд в
компактном скоплении – код
PLUTO

20 массивных звезд с общей
мощностью ветров
 2×10^{38} эрг/с
 $R = 2$ пк



Badmaev, Bykov, Kalyashova (2022, 2024)



- На основе полученных напрямую из МГД моделирования данных о распределении температуры в скоплении, построена модель в XSPEC, имитирующая тепловую компоненту диффузного излучения скопления.
- Получены значения магнитных полей в скоплении, что понадобится для моделирования нетепловой компоненты

Карта температуры центрального сечения МГД модели скопления Westerlund 2. Черным показана область спектрального анализа – кольцо 2'-3'.

Совместный анализ Chandra и ART-XC

Из МГД-моделирования:

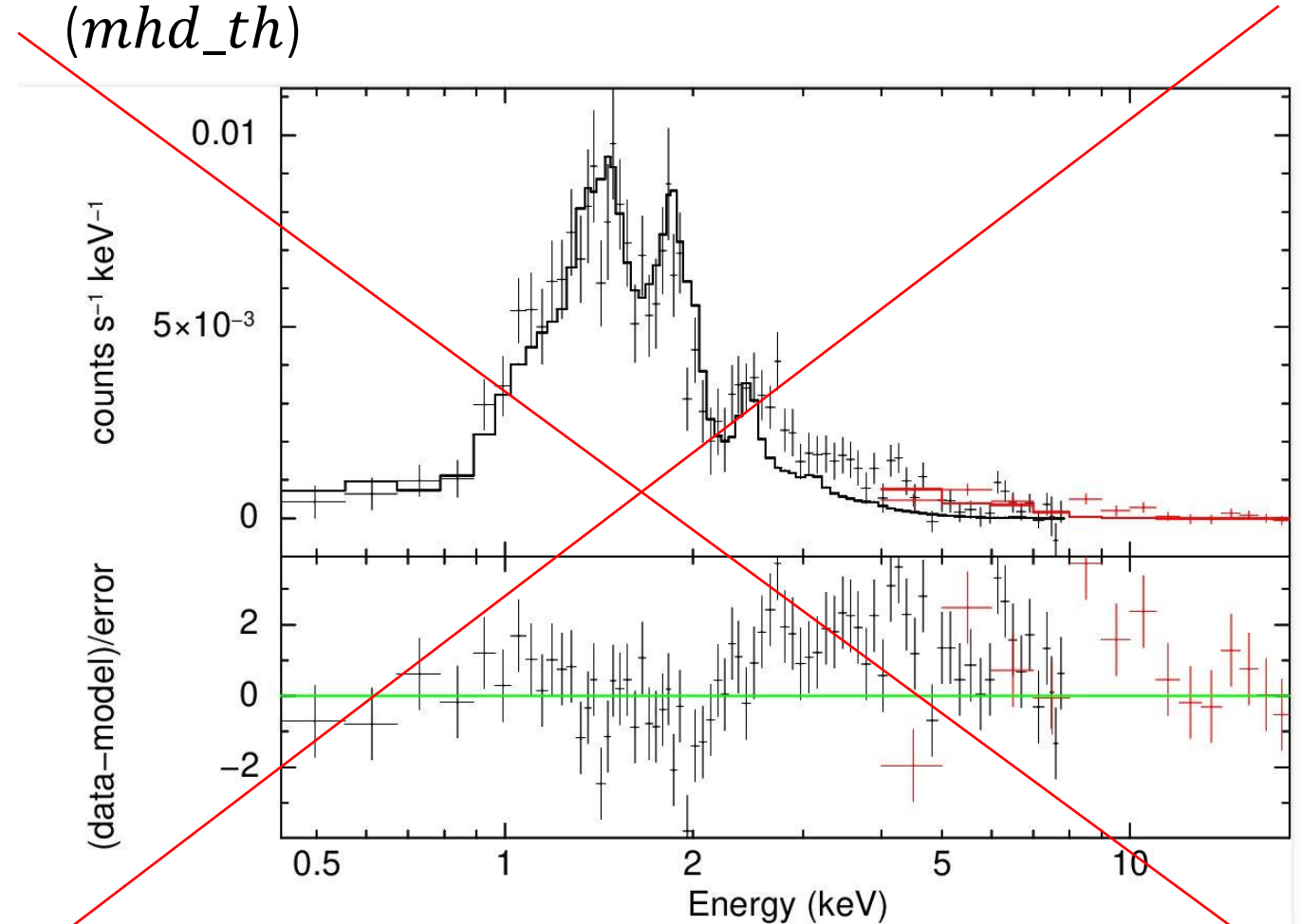
- Тепловая компонента, примерно соответствующая $T_e \sim \text{кэВ}$
- Нормировка (поток) этой тепловой компоненты $\approx 1.3 \times 10^{-13}$ эрг/см²/сек

Фит не получается!

$$\frac{\chi^2}{dof} > 2.5$$

+ требуется увеличение нормировки 2-й компоненты в ~ 40 раз

Модель ТМ: **тепловая** компонента с фиксированной $T=0.1$ кэВ (*ares₁*) + **тепловая** компонента, взятая из **МГД** моделирования (*mhd_th*)

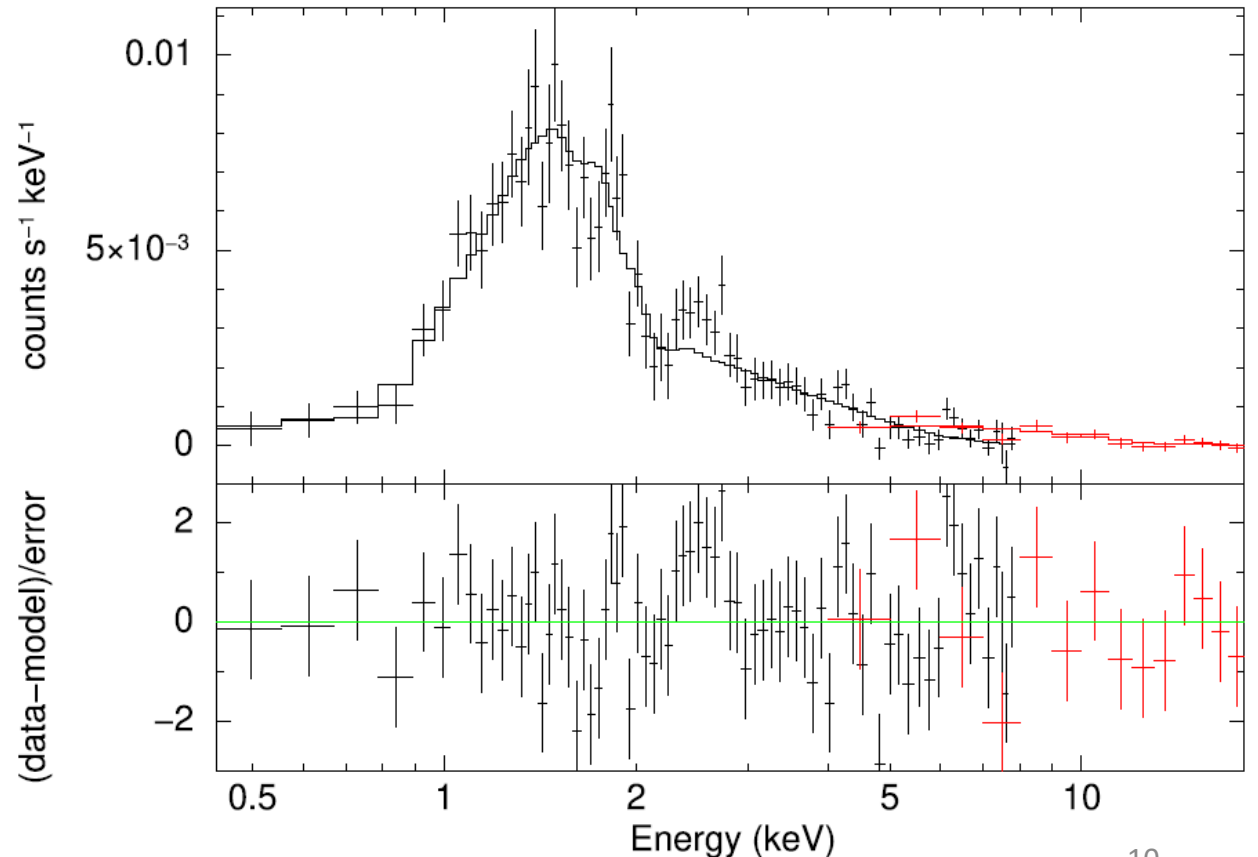


Совместный анализ Chandra и ART-XC

Попробуем включить
нетепловую компоненту

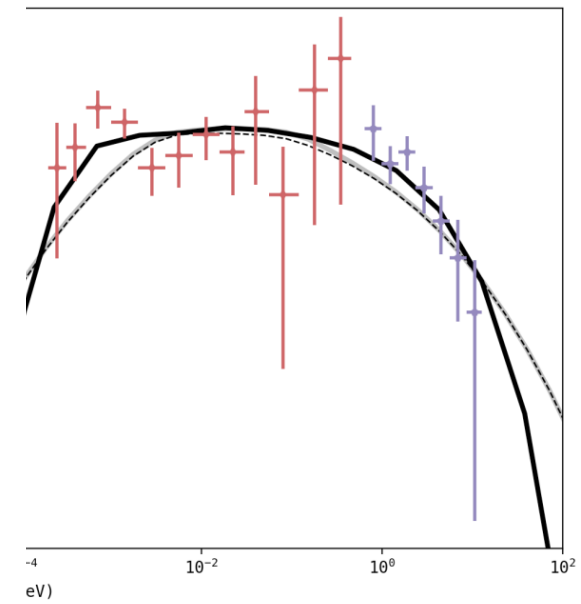
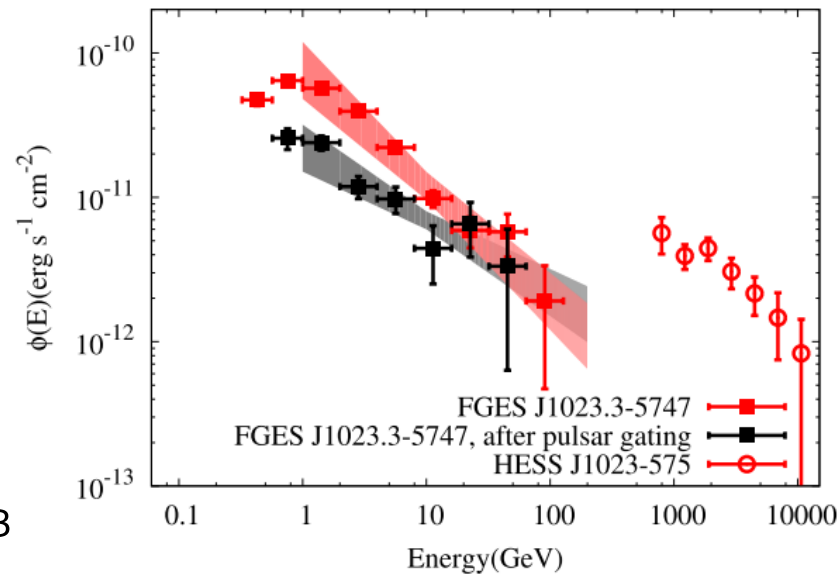
| Model | TMP: $tbabs_1 \times$ $apec_1 +$ $tbabs_2 \times$ $(mhd_th + pow)$ |
|--|--|
| parameters | |
| N_{H}^{I} (10^{22} cm^{-2}) | 0.15* |
| T_1 (keV, fixed) | 0.1 |
| $F_{T_1}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $(1.5 \pm 1.3) \times 10^{-13}$ |
| N_{H}^{II} (10^{22} cm^{-2}) | 0.9 ± 0.2 |
| Γ (power-law index) | 2.4 ± 0.2 |
| $F_{mhd_th}^{**}$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | 1.3×10^{-13} |
| F_{pow}^{**} ($\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) | $3.3^{+0.6}_{-0.4} \times 10^{-13}$ |
| A^{***} | $2.1^{+0.7}_{-0.5}$ |
| degrees of freedom | 85 |
| $\chi^2/\text{degrees of freedom}$ | 1.24 |

Модель TMP: тепловая компонента с фиксированной $T=0.1$ кэВ ($apec_1$) + тепловая компонента, взятая из МГД моделирования (mhd_th) + нетепловая степенная компонента (pow)



Wd2 в гамма-лучах

- Наблюдения: GeV - Fermi LAT, TeV - HESS
- Гамма-спектр может быть объяснен в рамках кинетической модели ускорения и распространения частиц в турбулентной плазме с ударными волнами (Bykov & Kalyashova 2020)
- Предлагаемый механизм излучения – адронный – за счет распада π^0 -мезонов, образовавшихся в результате р-р взаимодействия.
- Из гамма-спектра можно извлечь функцию распределения ускоренных протонов \Rightarrow находим пропорциональную ей ($\sim 10\%$) функцию распределения ускоренных электронов



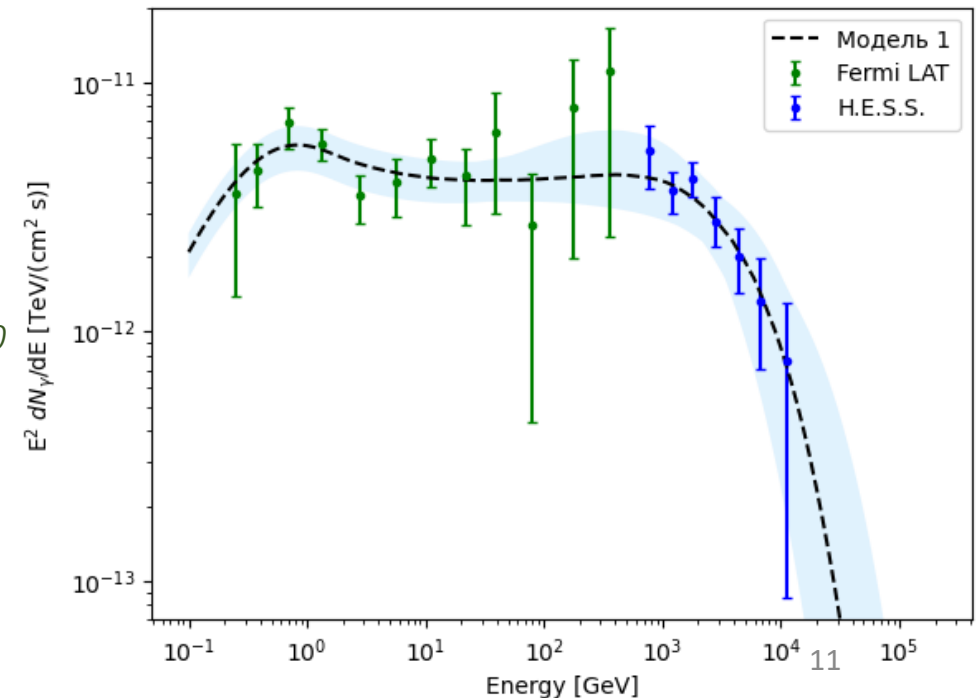
Ackermann et al. 2017

HESS Collaboration. 2011

Yang et al. 2018

Mestre et al. 2021

Bykov & Kalyashova 2020



Нетепловая компонента

Функция распределения ускоренных электронов
(из гамма-наблюдений)

+

Распределение магнитных полей в скоплении
по величине
(из МГД-моделирования)

⇓

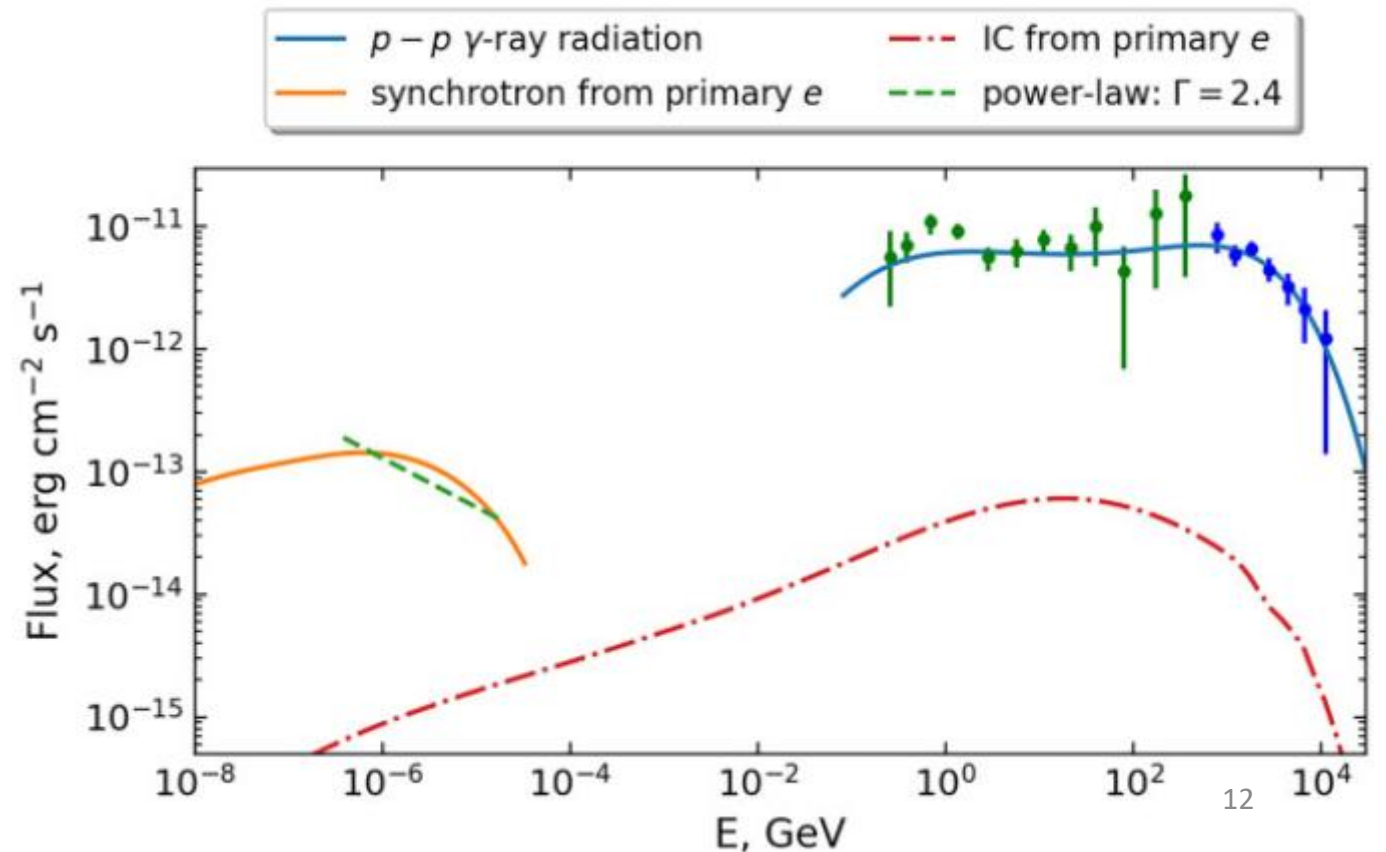
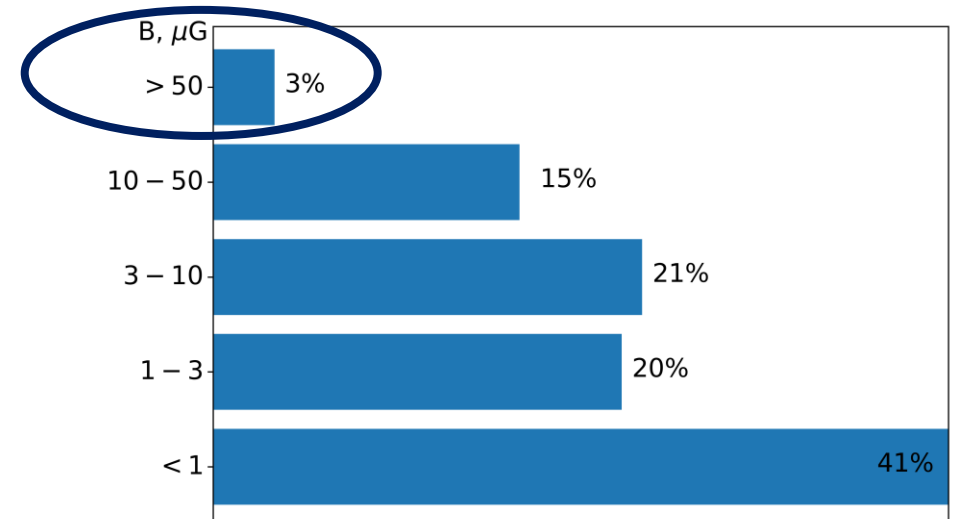
Синхротронное нетепловое излучение
ускоренных в скоплении частиц

⇓

Моделирование **нетепловой компоненты**,
полученной в XSPEC

- Также рассчитано **обратное Комptonовское** излучение той же популяции лептонов (не подходит)
- Вторичные $e^- e^+$ дают очень малый вклад

Образуются области с высоким м.п. >50 мкГс вплоть до 300 мкГс



Заключение

1. Проведены наблюдения региона Westerlund 2 телескопом ART/ХС, которые позволяют **продлить рентгеновский спектр источника до 12 кэВ** по сравнению с архивными данными Chandra.
2. Выполнено МГД-моделирование звездного скопления Wd2: найдены температуры и магнитные поля в скоплении. Построена новая модель в XSPEC, которая воспроизводит модельное **тепловое диффузное излучение скопления**.
3. Выполнено фитирование в XSPEC совместных спектров Chandra и ART/ХС моделями с тепловыми и нетепловыми компонентами. Установлено, что для того, чтобы удовлетворить наблюдениям, **недостаточно тепловой компоненты, полученной в моделировании**. Однако, при добавлении **нетепловой степенной компоненты с $\Gamma \sim 2.4$** , можно получить хороший фит.
4. Построена модель **синхротронного излучения** скопления, позволяющая объяснить полученную нетепловую компоненту.



Спасибо за внимание!

Bykov, A. M. ; Uvarov, Yu A. ; Kalyashova, M. E.; Badmaev, D. V.; Lapshov, I. Yu ; Lutovinov, A. A. ; Mereminskiy, I. A.; Semena, A. N.

«X-ray emission from Westerlund 2 detected by SRG/ART-XC and Chandra: search for radiation of TeV leptons»
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 525, Issue 1, pp.1553-1561 (2023)

Credit: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), A. Nota (ESA/STScI), and the Westerlund 2 Science Team