

# Обогащение космических лучей $^{22}\text{Ne}$ в МОЛОДЫХ КОМПАКТНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Каляшова М.Е., Быков А.М., Бадмаев Д.В.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе*

*СПбПУ Петра Великого*

`m.kalyashova@gmail.com`

*ВККЛ-2022, МГУ, 27 июня-02 июля 2022 г.*

# Неоновая проблема

- Химический состав космических лучей (КЛ) изучался в рамках нескольких экспериментов - IMP-7, ISEE, Voyager, ACE-CRIS. Установлено, что распространенности изотопов большинства химических элементов в солнечной системе и в космических лучах совпадают.
- Изотопное отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  изучено ACE-CRIS в диапазоне энергий  $84 \leq E/M \leq 273$  МэВ/нуклон.

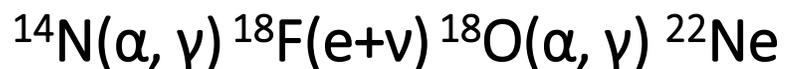
В солнечном ветре:  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}=0.07$

Binns et al. 2005, 2008

В ГКЛ:  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}=0.387 \rightarrow$  обогащение  $^{22}\text{Ne}$  в 5.3 раз

## *Возможное объяснение(Casse & Paul):*

Источник избытка  $^{22}\text{Ne}$  – ветры углеродной последовательности звезд Вольфа-Райе (WC). Во время горения гелия в звезде Вольфа-Райе почти весь  $^{14}\text{N}$  превращается в  $^{22}\text{Ne}$  через цепь ядерных реакций :



Casse&Paul 1982

Prantzos et al. 1987

Maeder&Meynet 1993

# Молодые компактные скопления

$R \approx 1-2$  пк

$M \gtrsim 10^3 M_{\odot}$

- Содержат популяции звезд WR (22.3% WR  $\Rightarrow$  скопления)
- Звезды WR, O-, B-звезды имеют мощные ветры со скоростями 1500-3000 км/с
- В скоплении могут эффективно ускоряться КЛ на сталкивающихся ветрах массивных звезд

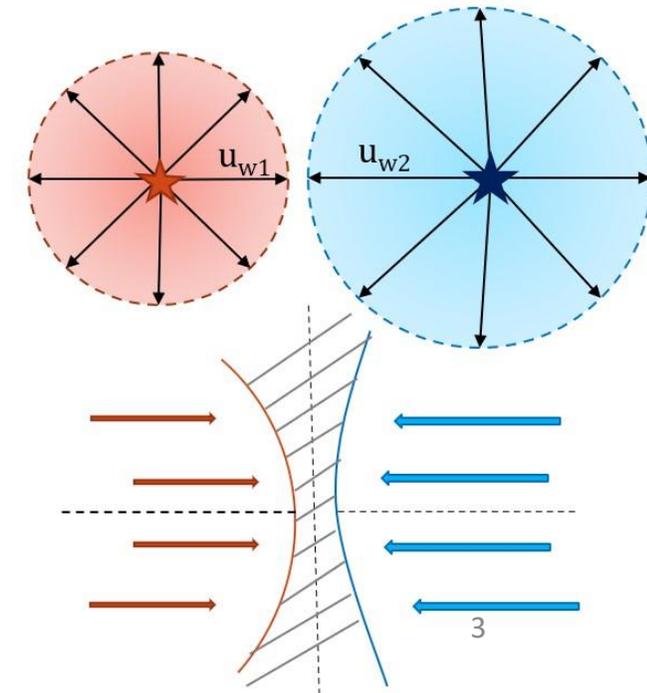
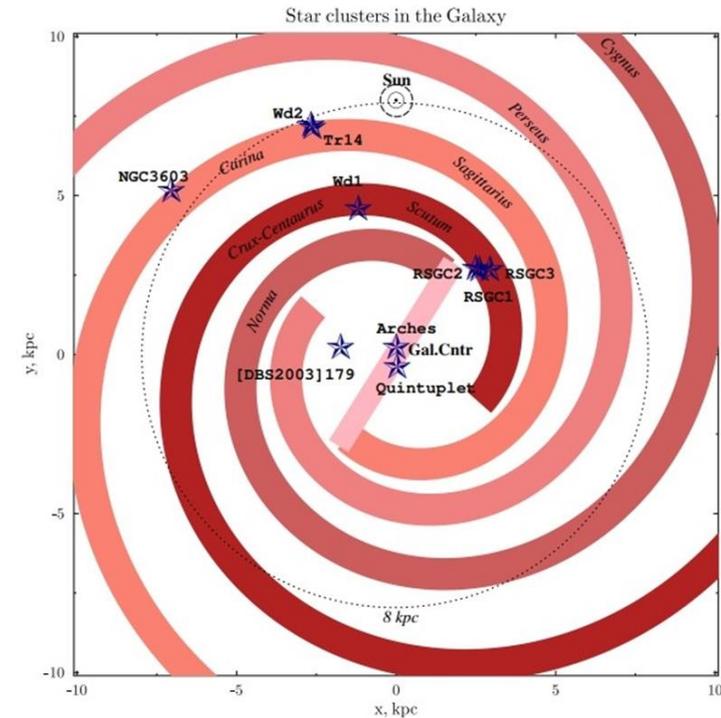
Предлагаемый источник неоновой аномалии – популяция звезд Вольфа-Райе в молодых компактных скоплениях.

Bykov et al. 2014

Ward&Kruijssen 2018

Rate et al. 2020

Portegies Zwart et al. 2010



# Модель и параметры

Kalyashova et al. 2019, JPCS

Bykov et al. 2020, SSRv

Kalyashova et al. 2021, JPCS

Используются модели звездного нуклеосинтеза двух научных групп Geneva (ранее) и **Frascati** (сейчас – возможно учесть сверхновые) (Ekstrom et al. 2012, Limongi et al. 2018)

➤ Начальные массы звезд от 15 до 120  $M_{\odot}$

➤ Металличность солнечная ( $Z=0.02$ )

➤ Учтены **вспышки сверхновых** + исследуется влияние массы, выше которой звезда коллапсирует прямым в черную дыру

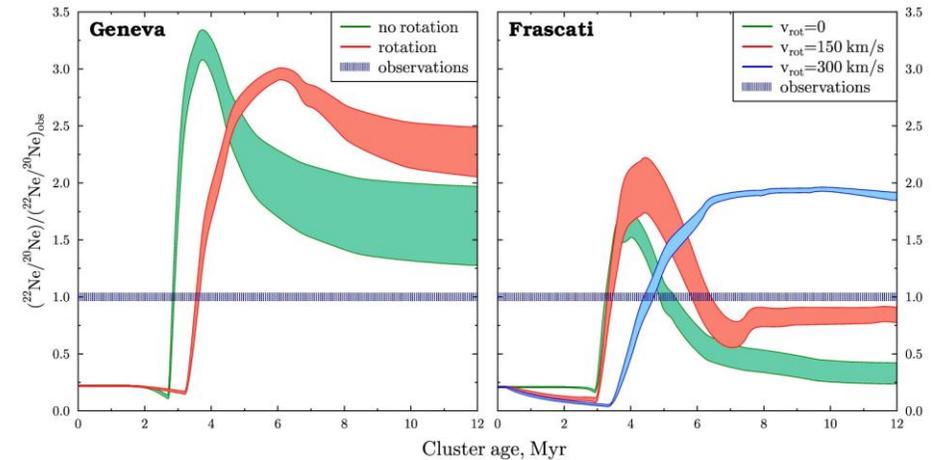
## Параметры модели:

➤ Показатель степени начальной функции масс в скоплении:  $\gamma = 1.8 - 2.6$

➤ **Вращение:** модель без вращения (начальная скорость вращения  $v = 0$ ) и с вращением ( $v = 150$  км/с,  $v = 300$  км/с)

➤  $M_{\text{BHcut}} - 25, 30, 40 M_{\odot}$

## Сравнение моделей Geneva и Frascati



# Распределение вещества

Badmaev et al. 2021, JPCS  
Badmaev et al. 2022 (in prep.)

гидродинамический код PLUTO

40 O, 15 WR, 5 RSG/YSG

(пример - Westerlund 1)

R= 1 пк/15 пк

## Результаты:

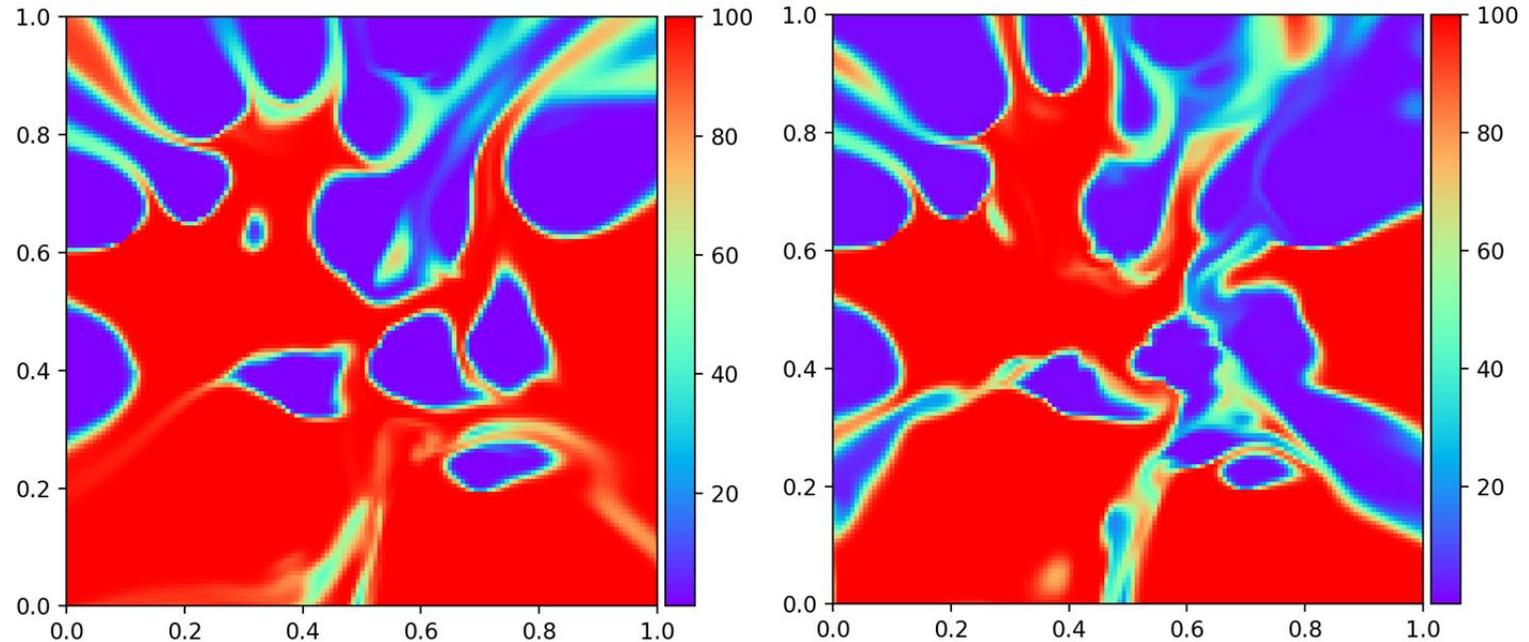
Объемная доля WR – 78%/69%

Объемная доля RSG/YSG – ~5%

Массовая доля WR/O – ~5.37/ ~ 4.5  
(при  $\dot{M}_{WR}/\dot{M}_O=4.5$ )  $\Rightarrow$  в компактных  
скоплениях задерживается в 1.2 раза

больше вещества WR

Массовая доля RSG/YSG -  $\gtrsim 90\%$



Распределение вещества звезд Вольфа-Райе (красным) и O-звезд (синим) в компактном скоплении (слева) и OB-ассоциации (справа)

Метки: **1** - O/RSG/YSG, **100** - WR

**Вывод:** На стадиях RSG/YSG звезда выбрасывает большую массу вещества, но оно сосредоточено в ограниченной области пространства (5%)  $\Rightarrow$  ускоряется гораздо менее эффективно  $\Rightarrow$  исключаем эти стадии из моделирования

# Расчет отношения $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$

Используются интерполяции модели Frascati на весь диапазон масс 15-120  $M_{\odot}$

Среднее отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ , в КЛ, ускоренных в одном массивном скоплении к моменту времени  $t$ :

$$\frac{^{22}\text{Ne}}{^{20}\text{Ne}} = \frac{1}{t} \int_0^t dt' \frac{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} (\dot{M}_{22}(m, t') + M_{22}^{SN}(m) \delta(t' - t^{SN}(m))) m^{-\gamma} dm}{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} (\dot{M}_{20}(m, t') + M_{20}^{SN}(m) \delta(t' - t^{SN}(m))) m^{-\gamma} dm}$$

$m$  – начальная масса звезды

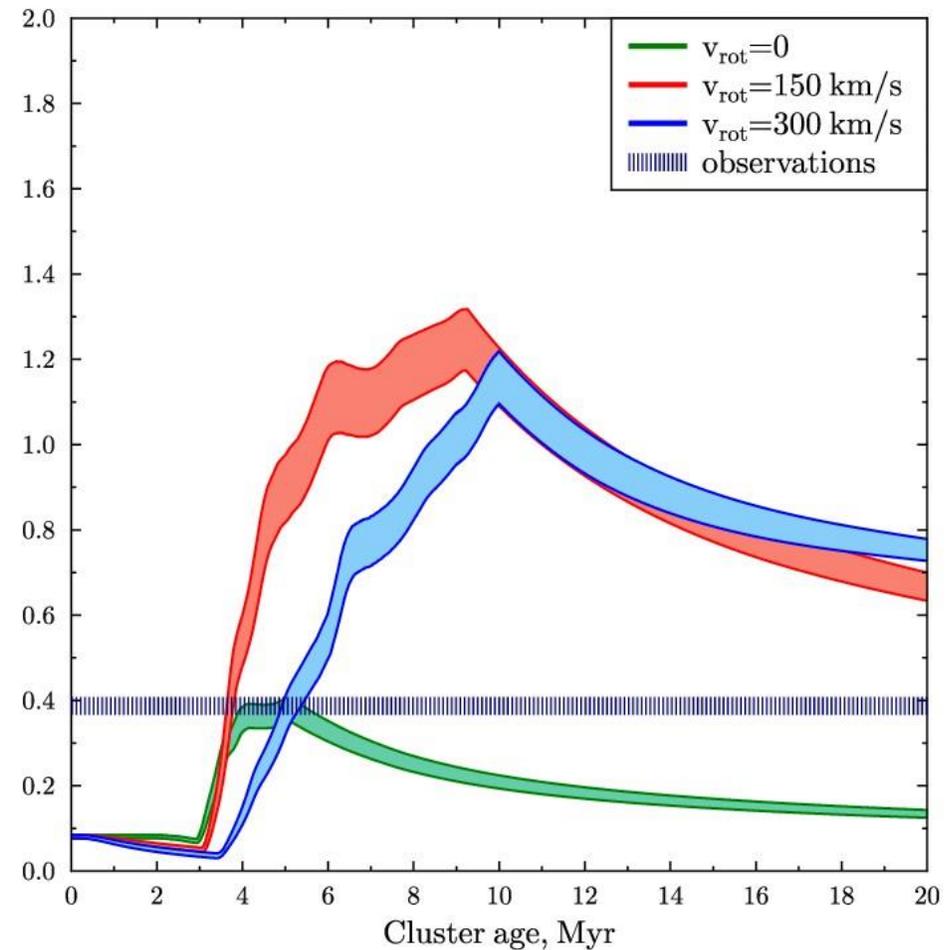
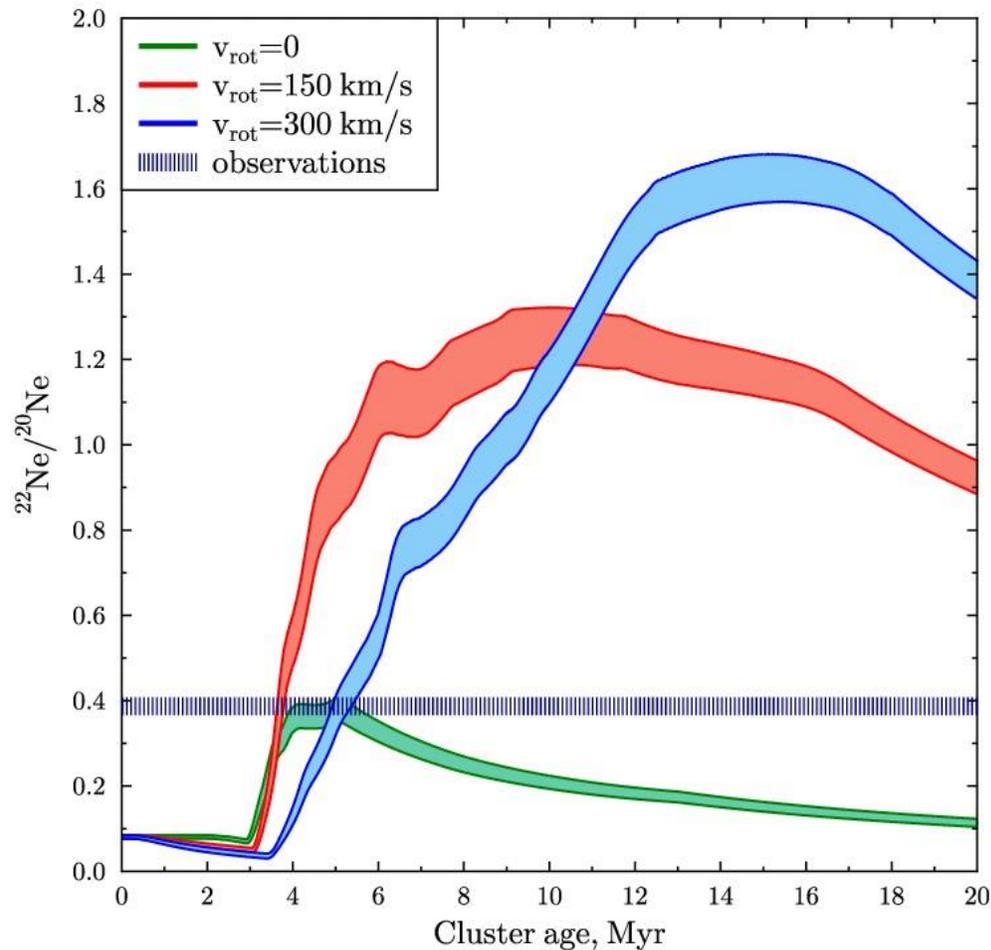
$\dot{M}$  - массы изотопов неона в звездном ветре в момент времени  $t'$

$M^{SN}$  - массы изотопов неона в веществе сверхновой

$t^{SN}$  - время вспышки сверхновой

$\gamma$  - показатель степени начальной функции масс звезд в скоплении

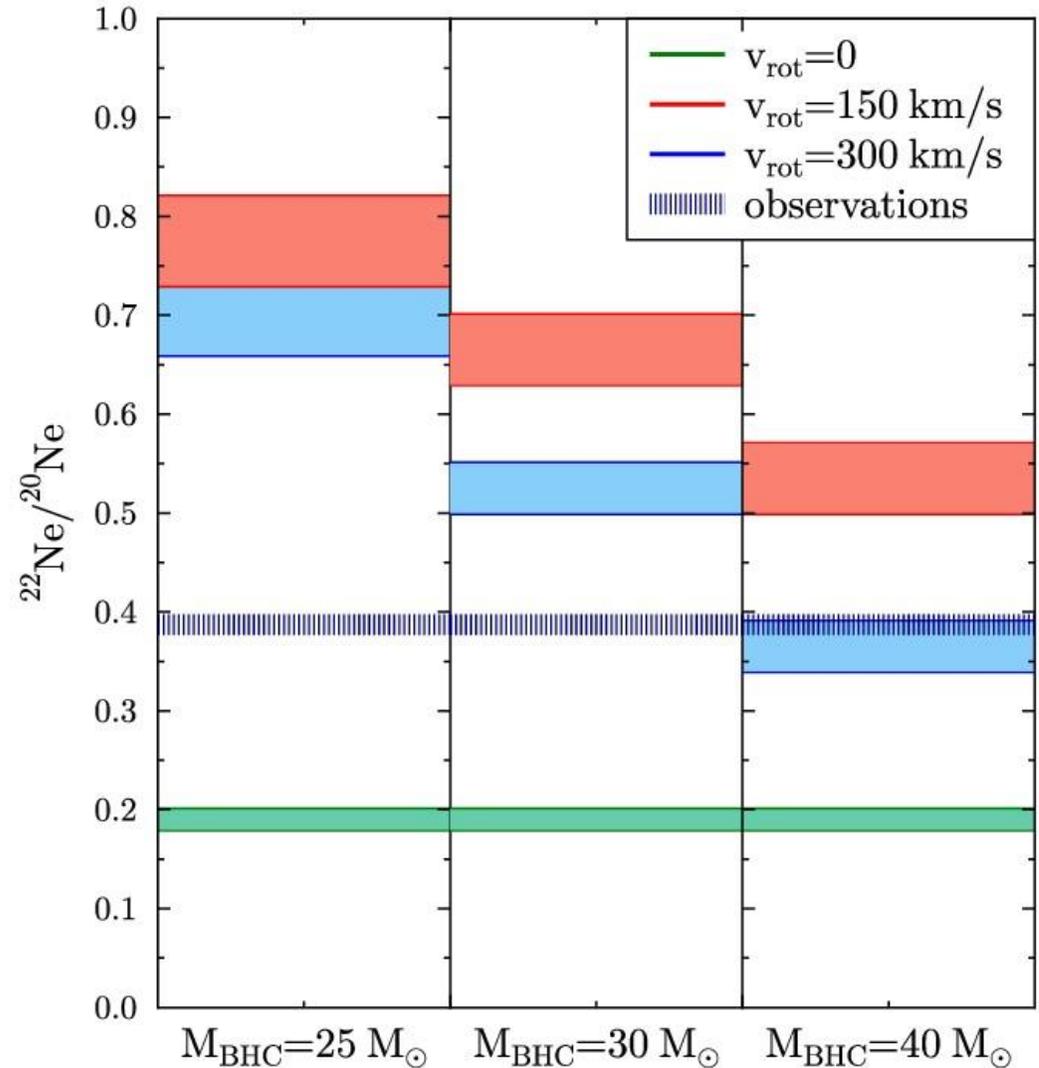
# Результаты



Слева: Отношение ( $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ ), в веществе, ускоренном в одном звездном скоплении с рождения до текущего возраста с учетом различных скоростей вращения звезд и для интервала показателей степени начальной функции масс в скоплении 1.8-2.6 (верхний предел содержания  $^{22}\text{Ne}$  соответствует более пологой начальной функции масс). Справа: то же, с учетом вспышек сверхновых,  $V_{\text{Hcut}}=25 M_{\odot}$ .

# Усреднение по возрасту КЛ

Чтобы получить среднее отношение  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в Галактических КЛ, необходимо усреднить изотопное отношение КЛ, ускоряемых в одном скоплении по времени порядка возраста КЛ ( $\sim 15$  млн. лет). Было смоделировано распределение скоплений со случайными возрастами (0-20 млн. лет) и посчитан их усредненный вклад в  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ .



# Энергетика

- Мощность ветров массивных звезд  $\simeq 1.1 \times 10^{41}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  (Seo et al. 2018)
- В компактных скоплениях и OB-ассоциациях  $\simeq 7 \times 10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$
- Для  $M_{\text{BHcut}} = 25 M_{\odot}$  среднее  $E_{\text{W}}/(E_{\text{W}}+E_{\text{SN}}) \simeq 0.7 \Rightarrow L_{\text{CL}} \simeq 1 \times 10^{41}$  эрг  $\text{с}^{-1}$
- Эффективность ускорения КЛ  $\sim 0.1$ , при параметрах  $v=150$  км/с,  $\Upsilon_{\text{НФМ}} \sim 2$ ,  $M_{\text{BHcut}} = 25 M_{\odot}$  **43%** ГКЛ должно ускоряться в скоплениях  $\Rightarrow L_{\text{CR}} \simeq 2.5 \times 10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$
- Оценка мощности КЛ из наблюдений  $\approx 6-8 \times 10^{40}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  – **выше в 2-3 раза**

## Возможные объяснения:

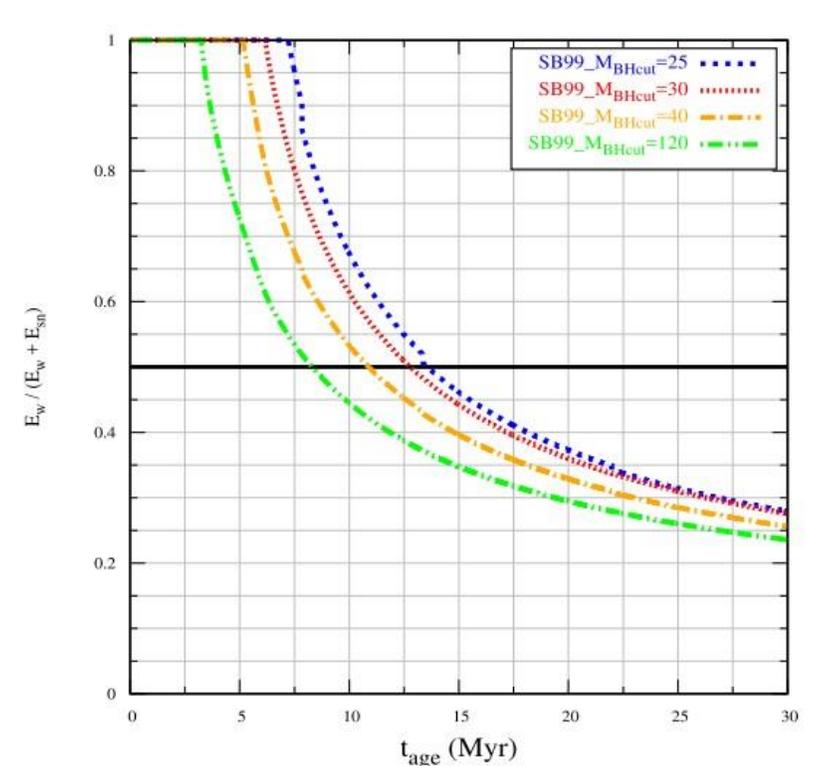
- Эффективность ускорения КЛ в скоплениях массивных звезд может достигать  $\simeq 0.3$  (Bykov 2001)
- Вклад от локальных источников
- Заниженные оценки мощности галактических ветров массивных звезд
- Заниженные оценки  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  (по модели Geneva было больше!)

Доля массивных звезд, являющихся членами звездных скоплений

Доля звезд	O	WR
Скопления	42%	22.3%
OB-ассоциации	30%	2.9%

Rate et al. 2020 (Gaia DR2)

Maiz Apellaniz et al. 2013 (GOSC)



Gupta et al. 2020

STARBURST99 - Leitherer et al. 1999

# Заключение

- Рассмотрена модель обогащения космических лучей  $^{22}\text{Ne}$  в молодых массивных звездных скоплениях. Источниками обогащенного  $^{22}\text{Ne}$  являются звезды Вольфа-Райе – члены скоплений, а ускорение предполагается на взаимодействующих ударных волнах от сталкивающихся ветров массивных звезд.
- Показано, что массивное скопление старше 3 млн. лет при определенных параметрах (наличие вращения,  $M_{\text{ВНcut}} < 30 M_{\odot}$ ) может выбрасывать вещество с отношением  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в 2-3 раза большим, чем наблюдается в КЛ.
- Показано, что в компактных скоплениях доля вещества WR чуть выше, чем в разреженных.
- Чтобы удовлетворить наблюдаемому отношению  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в КЛ в однородной модели, молодые звездные скопления должны быть источником  $\gtrsim 43\%$  галактических КЛ. Другая возможность – определяющий вклад локальных источников.

Спасибо за внимание!

