

# Молодые звездные скопления как источники обогащенных $^{22}\text{Ne}$ галактических космических лучей

<sup>1,2</sup>КАЛЯШОВА М.Е., <sup>1</sup>БЫКОВ А.М., <sup>1</sup>ОСИПОВ С.М.

E-MAIL: [M.KALYASHOVA@GMAIL.COM](mailto:M.KALYASHOVA@GMAIL.COM)

SKYPE: MASHA.KALYASHOVA

---

<sup>1</sup>ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

<sup>2</sup>САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

# Модель: молодые компактные скопления

Предлагаемые источники части галактических космических лучей – **молодые компактные скопления массивных звезд**

В предыдущих работах показано:

- Энергичные частицы могут быть эффективно ускорены до сотен ПэВ на взаимодействующих ударных волнах от сталкивающихся ветров массивных звезд и сверхновых (Bykov et al. 2013)
  - Для 100 ПэВных КЛ анизотропии и потоки согласуются с экспериментальными данными
  - По оценкам, 30-50% ПэВ-ных протонов могут рождаться в молодых массивных звездных скоплениях
- А.М. Bykov et al. High-energy cosmic rays from compact galactic star clusters: Particle fluxes and anisotropy, *Advances in Space Research*, 2019
- А.М. Bykov et al. High-energy cosmic rays from supernovae in young clusters of massive stars, *Rendiconti Lincei*, 2019

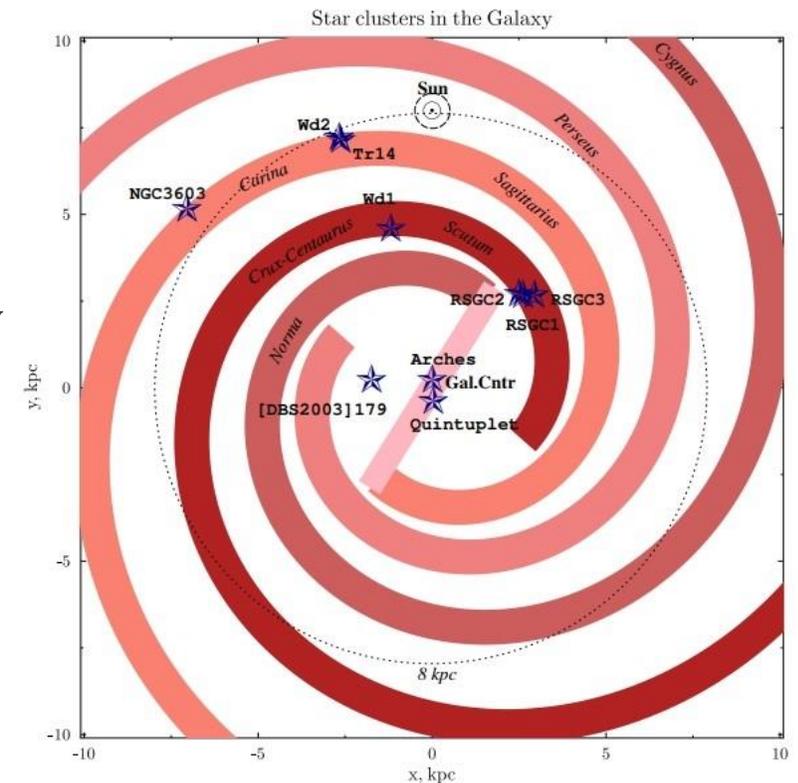


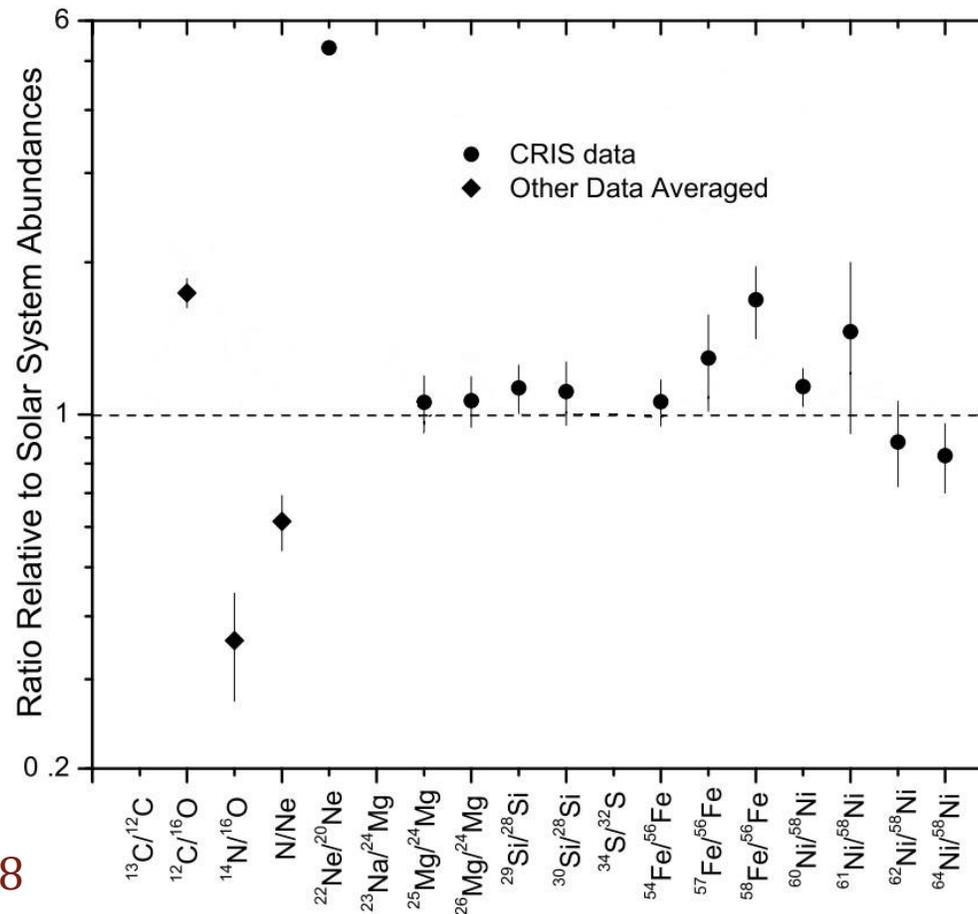
Рис. 1. Молодые массивные звездные скопления в Галактике. Portegies Zwart et al. 2010

# Изотопные отношения в космических лучах и в солнечном ветре

Химический состав галактических 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. Но имеются и различия:  $^{12}\text{C}/^{16}\text{O}$ ,  $^{58}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ ,  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ , последнее из которых было количественно изучено по данным ACE-CRIS в диапазоне энергий  $84 \leq E/M \leq 273$  МэВ/нуклон.

Рис. 2. Экспериментальные данные ACE-CRIS об изотопном составе КЛ

Binns et al. 2005, 2008



# Избыток $^{22}\text{Ne}$

---

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

В ГКЛ:  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}=0.0387 \rightarrow$  обогащение  $^{22}\text{Ne}$  в  $5.3 \pm 0.3$  раз (Binns et al. 2005)

*Возможное объяснение (Casse&Paul):*

Источник избытка  $^{22}\text{Ne}$  – ветры углеродной последовательности звезд Вольфа-Райе.

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

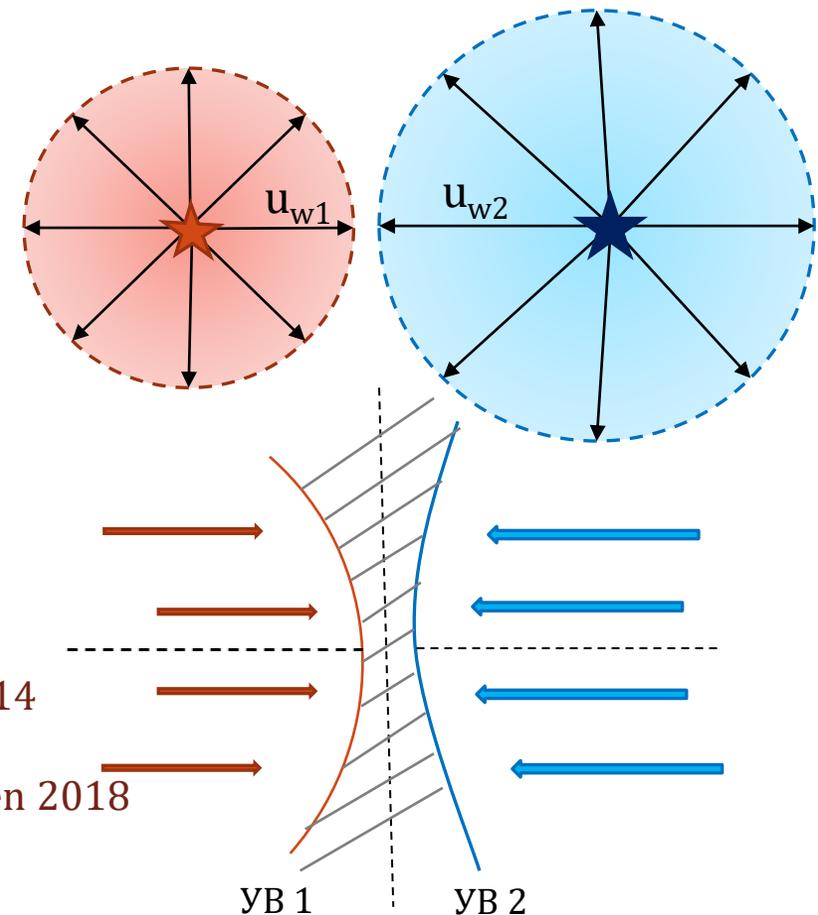
# Ускорение частиц на сталкивающихся ударных волнах

Молодые компактные скопления могут иметь популяцию звезд Вольфа-Райе. Обогащенный  $^{22}\text{Ne}$  материал может ускоряться на сталкивающихся ударных волнах от ветров массивных звезд. Мы строим модель типичного звездного скопления и исследуем зависимость  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  от возраста скопления и начальной функции масс.

Аргументы за:

- Звезды Вольфа-Райе, O- and B-звезды имеют мощные ветры со скоростями 3000-4000 км/с.
- На сильных ударных волнах может иметь место эффективное ускорение частиц.
- Полная мощность ветров O- звезд и звезд Вольфа-Райе оценивается как  $\approx 1.1 \times 10^{41}$  эрг  $\text{с}^{-1}$

Bykov et al. 2014  
Seo et al. 2018  
Ward&Kruijssen 2018



**Рис. 3.** Схематичное изображение ударных волн от двух звездных ветров. Ускорение происходит между ударных волн.

# Модели звездной эволюции

Мы используем модели звездного нуклеосинтеза двух научных групп Geneva и Frascati (Ekstrom et al. 2012, Limongi et al. 2018)

- Начальные массы звезд от 0.8 до  $120 M_{\odot}$
- Металличность  $Z=0.014$
- Скорость вращения (для моделей с вращением)  
 $v = 0.4 v_{crit}$ ,  $v_{crit} = \sqrt{2 GM/3R}$  (Geneva),  $v = 150$  км/с,  $v = 300$  км/с (Frascati)

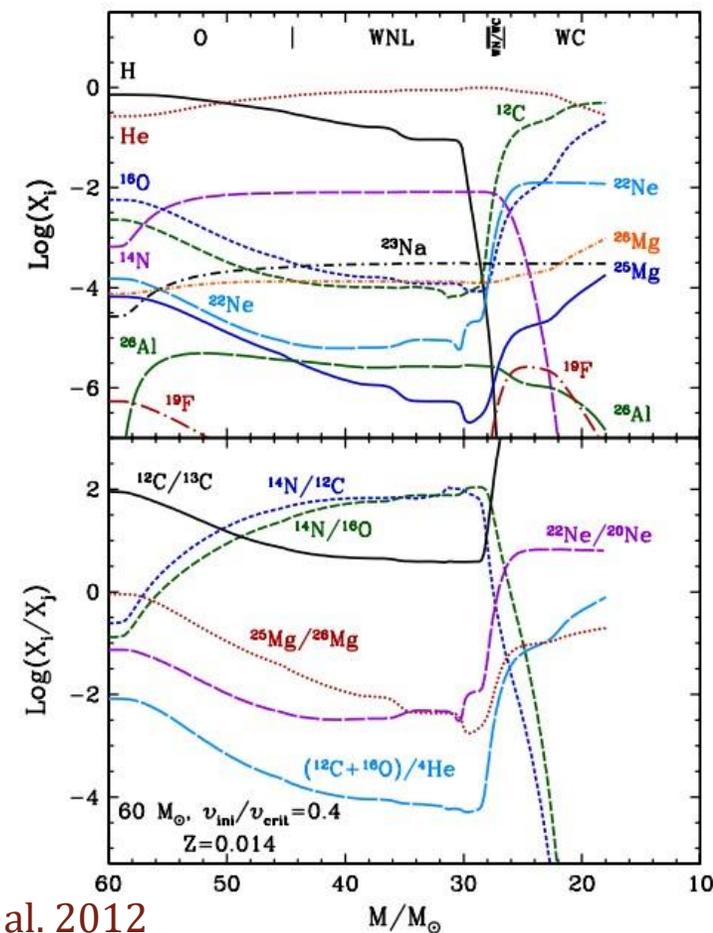
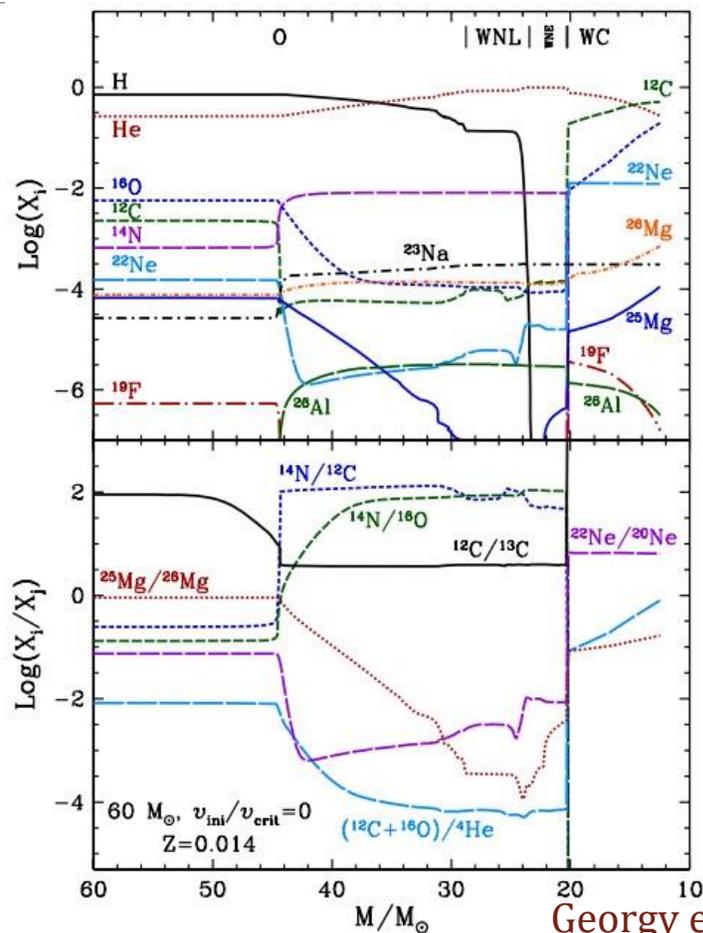


Рис.4. Пример: эволюция поверхностного содержания и изотопных отношений различных элементов как функция массы для звезды с начальной массой  $60 M_{\odot}$  для моделей с вращением (слева) и без вращения (справа) Женевской группы

Georgy et al. 2012

# Модель: изотопное отношение $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в скоплении

---

Из интерполяций моделей звездной эволюции мы берем массовые доли неона в ветре звезды  $\Sigma_{20}(m, t)$  и  $\Sigma_{22}(m, t)$ .

Для единичной звезды с начальной массой  $m$ , полная масса изотопа неона  $i$  ( $i=20, 22$ ), выброшенная к моменту времени  $t$ , равняется:

$$\mu_i(m, t) = \int_0^t \Sigma_i(m, t') \dot{M}(m, t') dt'$$

Для целого скопления мы интегрируем выброшенные массы изотопов неона с начальной функцией масс

$$\chi(m) = A \cdot m^{-\gamma}$$

Отношение выброшенных масс  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{20}\text{Ne}$  из скопления к моменту времени  $t$  равняется

$$\frac{^{22}\text{Ne}}{^{20}\text{Ne}} = \frac{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \mu_{22}(m, t) m^{-\gamma} dm}{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \mu_{20}(m, t) m^{-\gamma} dm}$$

# Параметры

---

Мы интегрируем в диапазоне масс от  $m_{min} = 15 M_{\odot}$  до  $m_{max} = 120 M_{\odot}$ .

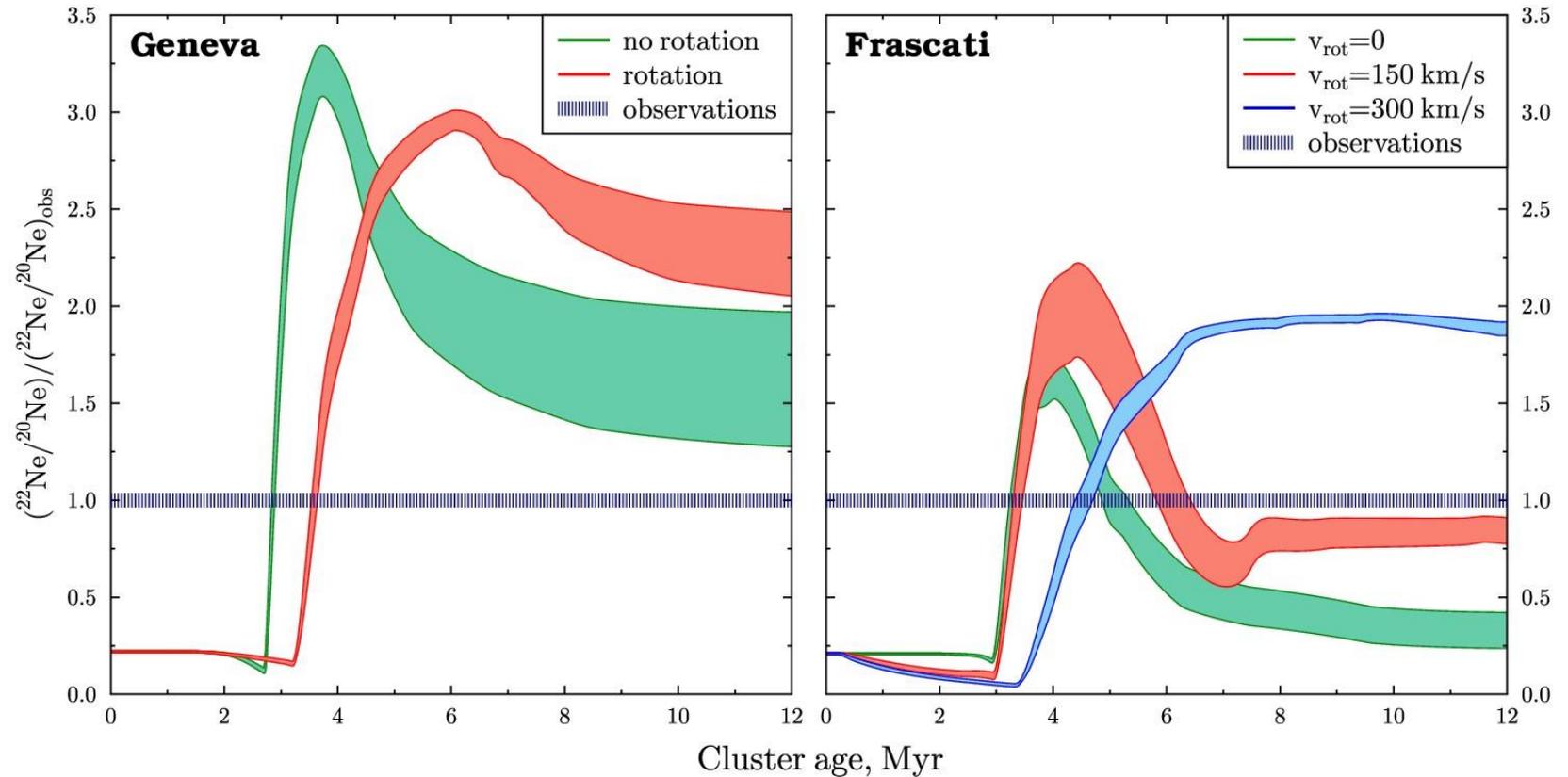
## *Варьирующиеся параметры:*

- Показатель степени начальной функции масс в скоплении:  $\gamma = 1.8 - 2.6$
- **Вращение:** модель без вращения ( $v = 0$ ) и с вращением ( $v = 0.4 v_{crit}$  – Geneva,  $v = 150$  км/с,  $v = 300$  км/с - Frascati)

Kroupa&Boily 2002  
Seo et al. 2018  
Lim et al. 2011  
Hosek et al. 2019

# Результаты

Рис. 5. Зависимость отношения  $(^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne})$ , в веществе, ускоренном в массивном звездном скоплении, к наблюдаемому в КЛ  $(^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne})_{\text{obs}}=0.387$  от возраста звездного скопления для моделей звездной эволюции Geneva и Frascati, 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)



# Расчет энергетики

В работе Seo et al. (2018) приводятся данные по мощности совокупности звездных ветров звезд Вольфа-Райе Галактики  $L_{WR} \approx 4.1 \cdot 10^{40}$  эрг  $\cdot$  с $^{-1}$ . По оценке Rate et al. (2020) доля звезд Вольфа-Райе, находящихся в компактных скоплениях, составляет около 22%, таким образом, мощность ветров звезд Вольфа-Райе в скоплениях равна  $L \approx 9 \cdot 10^{39}$  эрг  $\cdot$  с $^{-1}$ . Найдем поток протонов КЛ на Земле от звезд Вольфа-Райе в массивных скоплениях на энергии 1 ГэВ.

Примем:

- Эффективность конвертации энергии ветра в ускорение КЛ  $\eta \approx 0.1$
- Энергетический спектр ускорения частиц на двух ударных волнах в области низких энергий:  $f(p) \propto p^{-\alpha}$ , где  $p$  – импульс частицы, показатель степени  $\alpha \cong 4 - 5$ .
- Среднее расстояние от источника (массивного звездного скопления) до Земли  $r = 5$  кпк, коэффициент диффузии  $D = 10^{28}$  см $^2 \cdot$  с $^{-1}$ .

Получим поток на Земле  $dN/dE \approx 1.22 \cdot 10^3$  (ГэВ  $\cdot$  м $^2 \cdot$  ср  $\cdot$  с) $^{-1}$ , тогда как наблюдаемый  $dN_{obs}/dE \approx 2 \cdot 10^3$  (ГэВ  $\cdot$  м $^2 \cdot$  ср  $\cdot$  с) $^{-1}$ .

Получим, что максимум ~60% галактических КЛ может быть ускоренным в молодых массивных звездных скоплениях веществом ветров звезд Вольфа-Райе.

# Заключение

---

Рассмотрены звезды Вольфа-Райе в молодых массивных звездных скоплениях как источники обогащенных  $^{22}\text{Ne}$  галактических космических лучей. Показано, что массивное скопление старше 3 млн. лет при некоторых параметрах (высокая скорость вращения, пологая НФМ) может выбрасывать вещество с в 2-3 раза большим отношением  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ , чем наблюдается в космических лучах. Основным источником обогащения КЛ  $^{22}\text{Ne}$  являются звезды Вольфа-Райе – члены скоплений, а ускорение предполагается на взаимодействующих ударных волнах от сталкивающихся ветров массивных звезд. Чтобы удовлетворить наблюдаемому отношению  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$  в КЛ, компактные массивные скопления должны быть источником 30-50% галактических КЛ. Расчет энергетики показывает, что предложенная модель не противоречит наблюдаемым потокам КЛ.

---

Спасибо за внимание!