

Ускорение космических лучей  
ударными волнами в Галактическом  
гало

В.Н.Зиракашвили, В.С.Птускин, С.И.Роговая

ИЗМИРАН

## Fermi and eRosita bubbles (Predehl et al. 2020)

Наиболее вероятно связаны с активностью  
сверхмассивной черной дыры десятки млн.  
лет назад

$$W \sim 10^{56} - 10^{57} \text{ erg},$$
$$L \sim 10^{41} - 10^{42} \text{ erg /sec}$$

Сравнима с мощностью сверхновых – могут  
давать вклад в спектр КЛ

Ускорение КЛ в галактическом  
центре

Fan 1951

Kulikov, Fomin, Khristiansen

1969 - сверхвысокие энергии

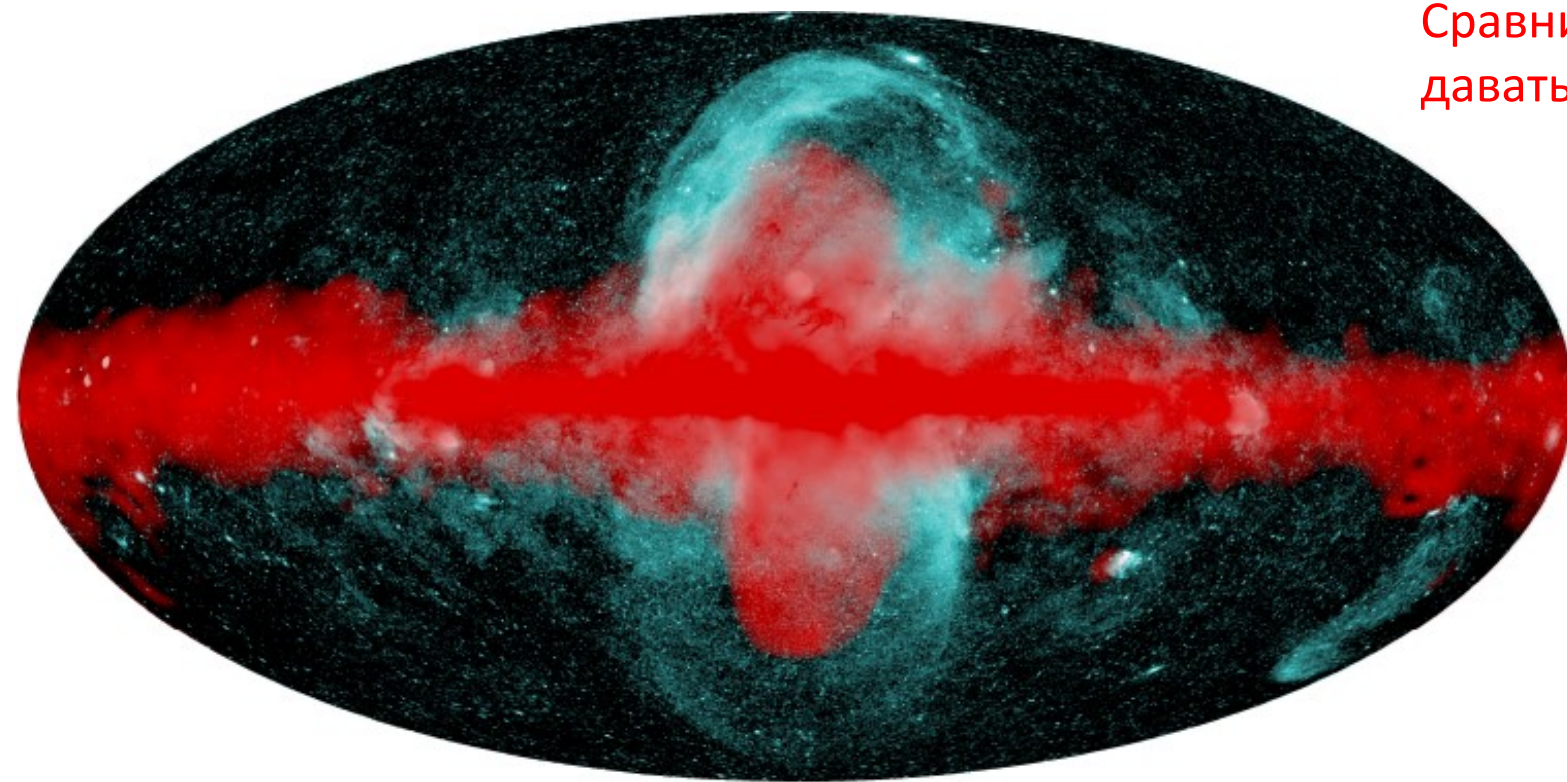
Wayland 1972

Ptuskin & Khazan 1981

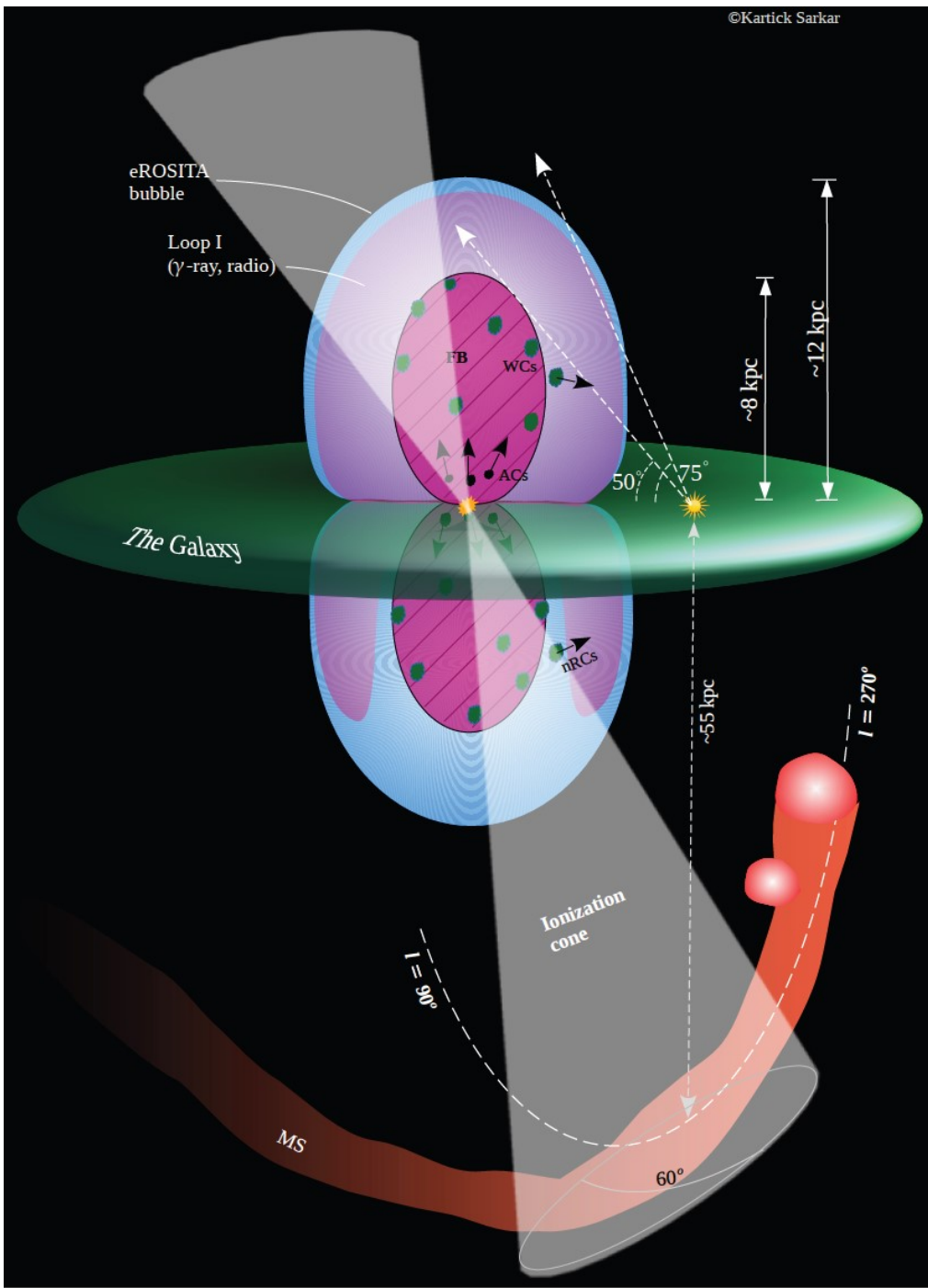
Giler 1983

Istomin 2014

Fujita et al. 2017



# Энергетика Галактического центра (Sarkar 2024)



Activity	Scale	Rates	Power [erg s <sup>-1</sup> ]
Star formation	~ 100 pc	0.07, 0.2 – 0.8 M <sub>⊙</sub> yr <sup>-1</sup>	10 <sup>40.3</sup> , 10 <sup>40.9–41.5</sup>
AGN (Current)	~ 10 <sup>-6</sup> pc	10 <sup>-8</sup> M <sub>⊙</sub> yr <sup>-1</sup>	10 <sup>38–38.7</sup>
AGN (~ 100 yr ago)	~ 10 <sup>-6</sup> pc	~ 10 <sup>-5</sup> to <sup>-4</sup> M <sub>⊙</sub> yr <sup>-1</sup>	10 <sup>41–42</sup>
AGN (~ 1-3 Myr ago)	~ 10 <sup>-6</sup> pc	-	10 <sup>43.7–44.7</sup>

Для сверхмассивной черной дыры в  
Галактическом центре  
 $L_{\text{Edd}} = 5 \cdot 10^{44}$  erg/sec

Оценка максимальной энергии для остатков сверхновых  
(нерезонансная потоковая неустойчивость (Bell 2004))

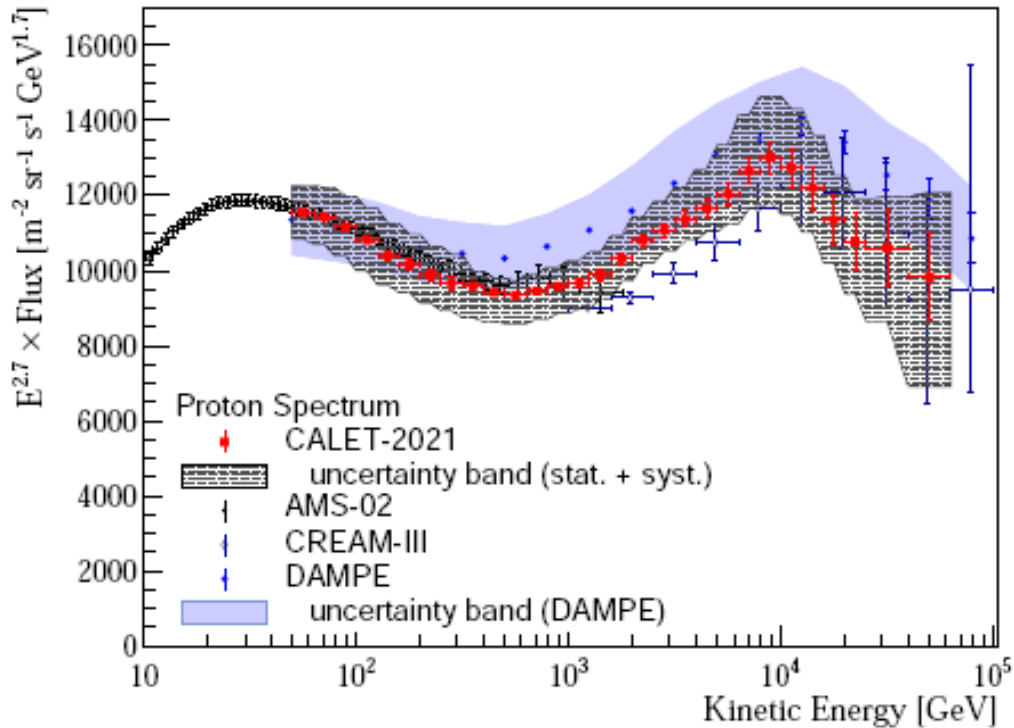
$$E_{max} = (0.1 \div 0.8) \text{ПэВ} \frac{E_{SN}}{10^{51} \text{эрг}} \left( \frac{M_{ej}}{M_{solar}} \right)^{-2/3} n_H^{1/6}$$

При одинаковых скоростях расширения  $E_{max} \sim E_{SN}^{1/3}$

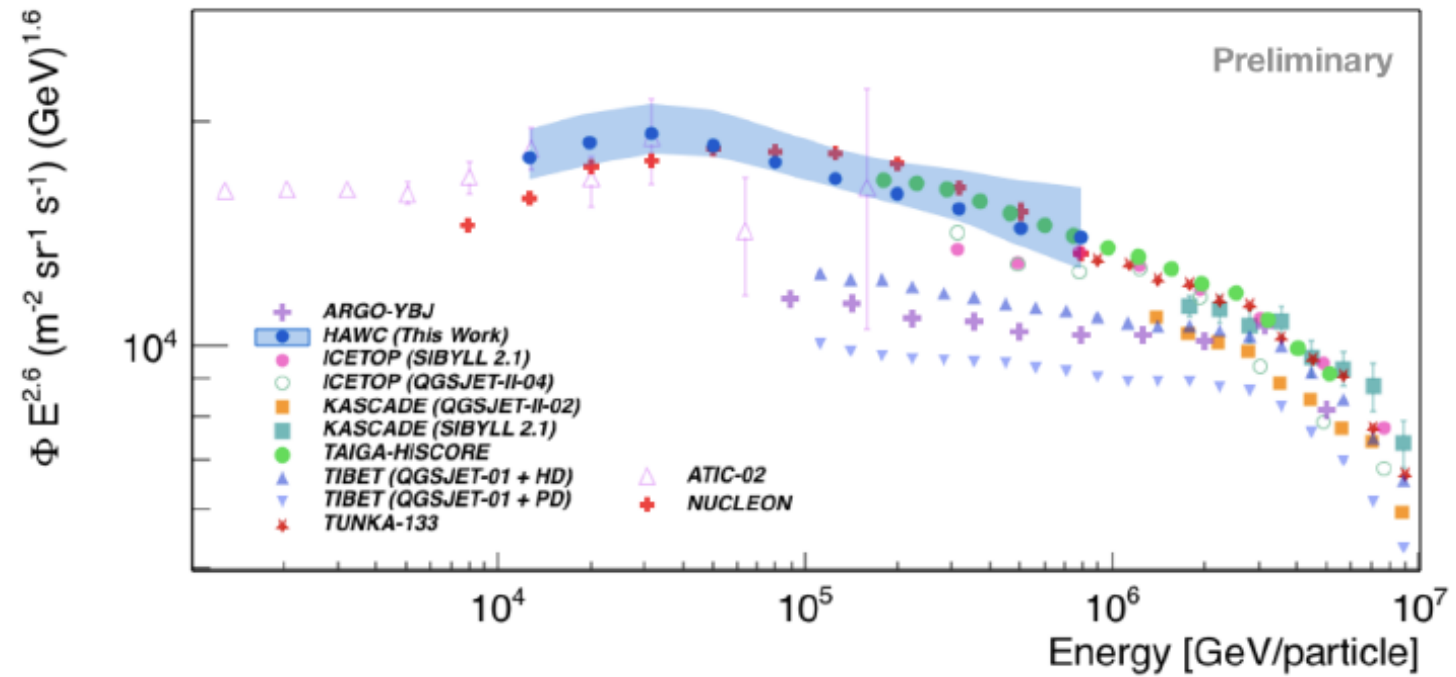
Ожидаемая максимальная энергия для ударных волн eRosita в 100 раз больше, чем для остатков сверхновых

# Особенности в спектре при ТэВ-ных энергиях

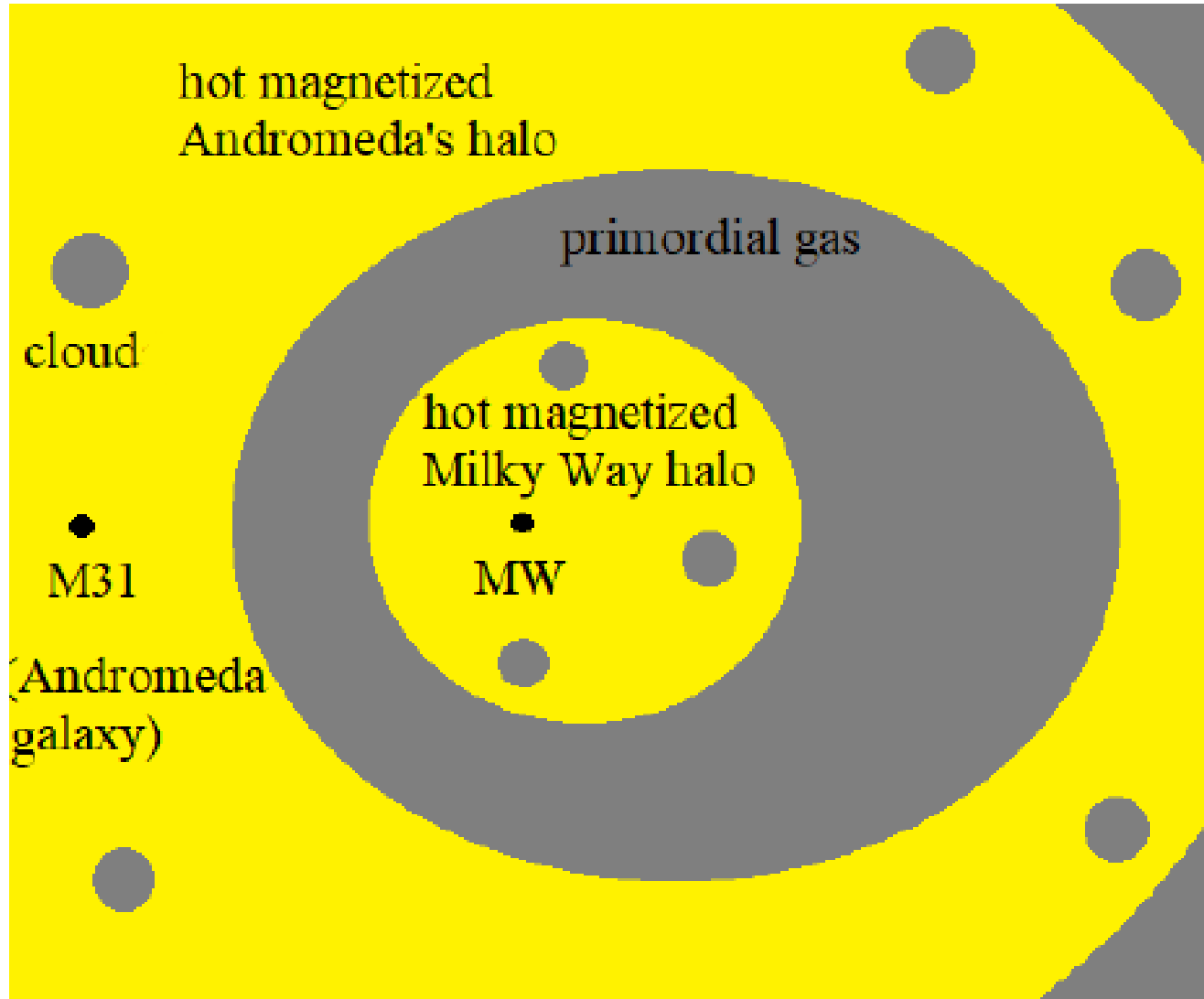
Adriani et al.  
2022



HAWC Collaboration 2022



# Предполагаемые протяженные гало вокруг нашей Галактики и галактики Андромеда (Zirakashvili et al. 2023)

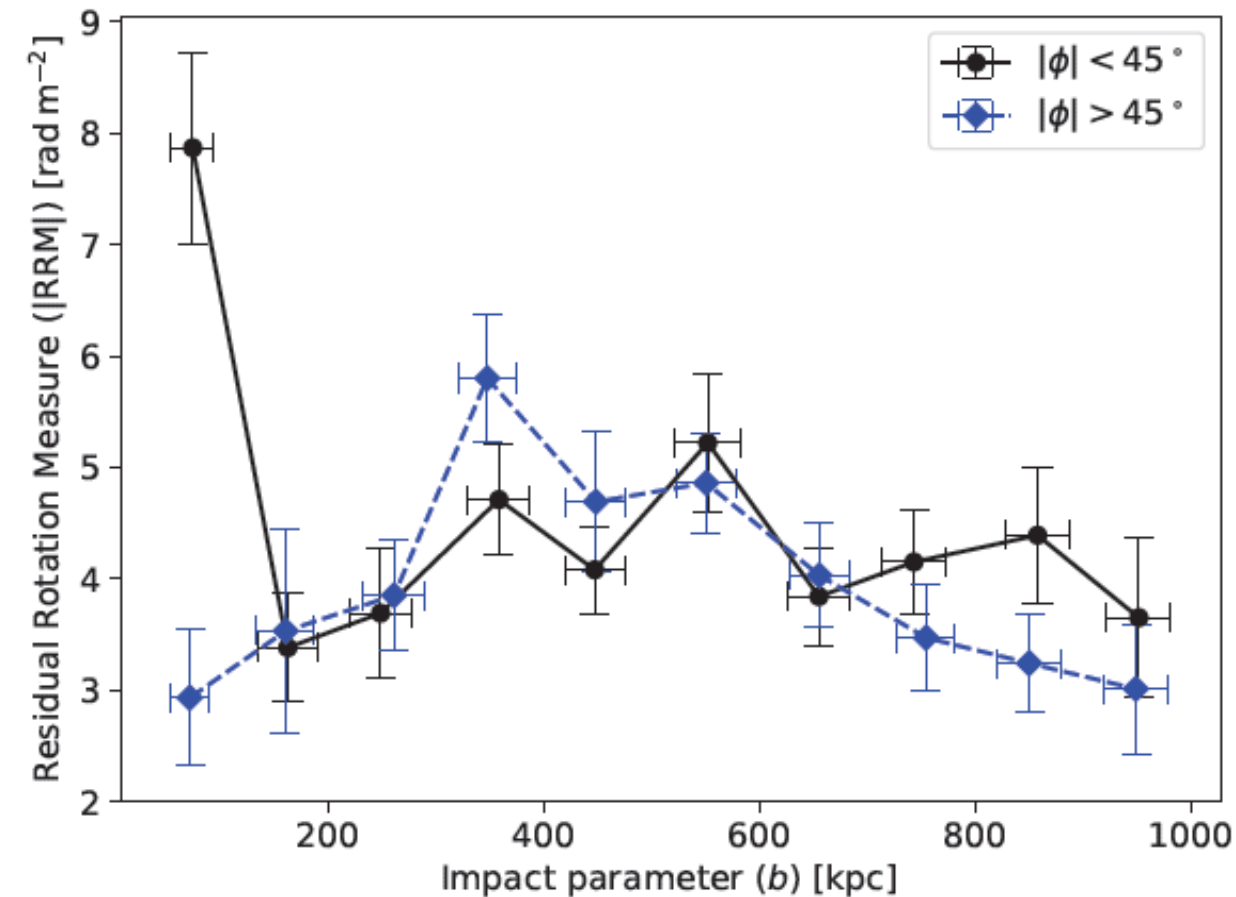
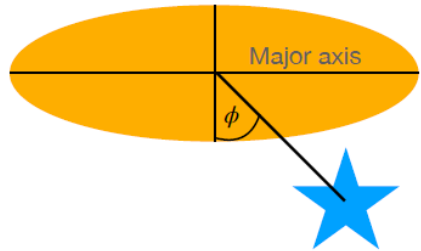


Образовались за счет энергии активного звездообразования и аккреции на центральную черную дыру 9-13 миллиардов лет назад

**Непродолжительное время – миллионы лет могут удерживать даже КЛ сверхвысоких энергий**

Горячий газ этих гало наблюдается в окрестности нашей Галактики, а также в других галактиках

# Эффект Фарадея в протяженных гало (Heesen et al. 2023, Böckmann et al. 2023)



$$\text{RM} = 0.81 \int_{\text{LoS}} \left( \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}} \right) \left( \frac{dr}{\text{pc}} \right) \text{rad m}^{-2}$$

$$B_{\parallel} \sim 0.5 \mu\text{G}, \quad n_e = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$$

Микрогауссные магнитные поля  
наблюдаются на расстояниях порядка  
100 кпк в других галактиках



# Ускорение на паре ударных волн

$$r = R(t) \rho \sin \theta, \quad z = R(t) (1 + \rho \cos \theta), \quad z > 0$$

$$V = \dot{R}(1 + \cos \theta)$$

$$\dot{R} = 8000 \text{ км/с}, \quad r < 6 \text{ кпк}, \quad \dot{R} = 8000 \text{ км/с} \sqrt{\frac{6 \text{ кпк}}{R}}, \quad R > 6 \text{ кпк}$$

Возраст  $T = 16$  миллионов лет

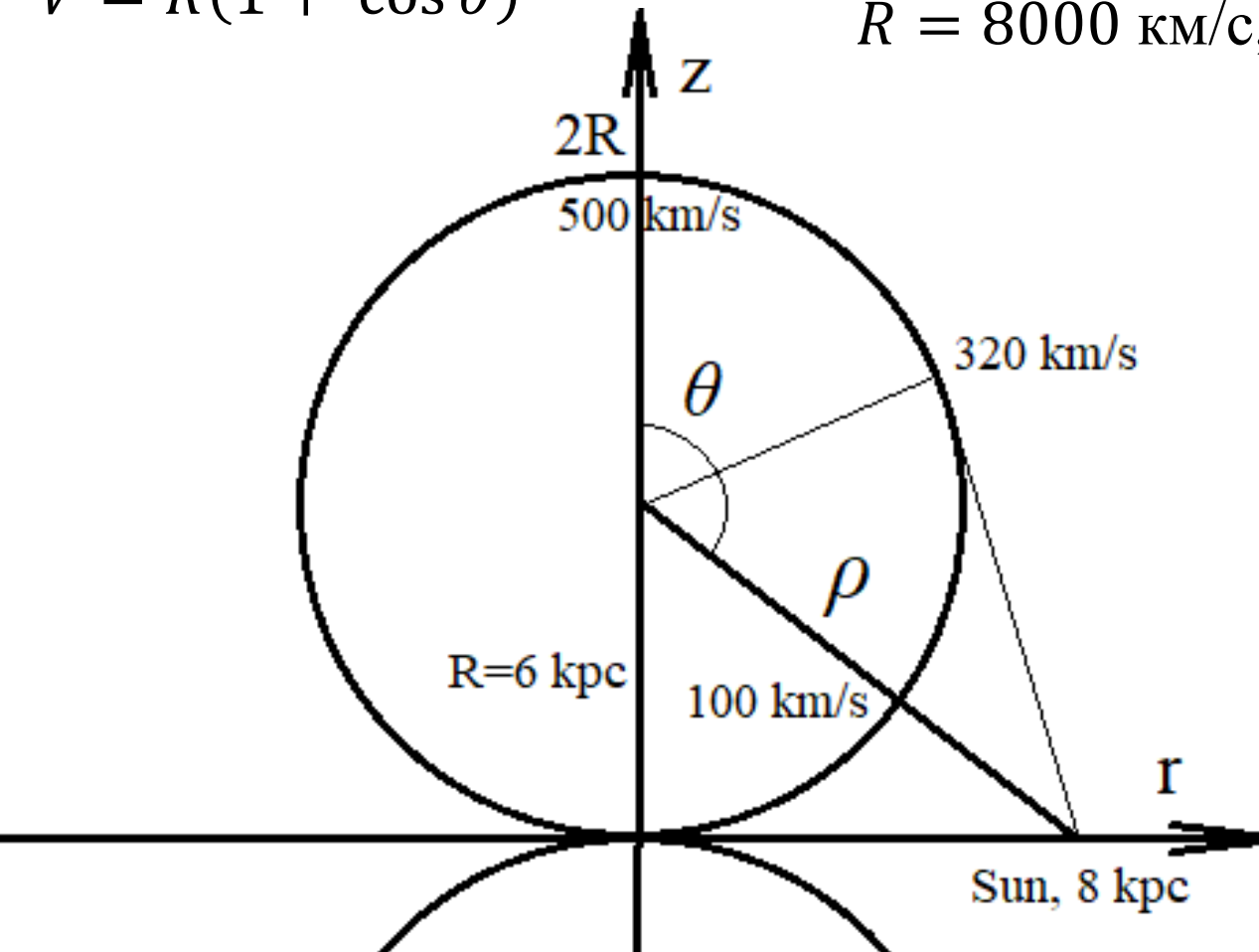
Профиль плотности

$$n_H = 10^{-3} \text{ см}^{-3} \left( \frac{z}{6 \text{ кпк}} \right)^{-2}$$

Поле скоростей за фронтом при  $\rho < 1$

$$\frac{u_\rho}{\dot{R}} = \left( 1 - \frac{1}{\sigma} \right) \left( \rho + (1 + \rho^2) \frac{\cos \theta}{2} \right),$$

$$\frac{u_\theta}{\dot{R}} = \left( 1 - \frac{1}{\sigma} \right) (\rho^2 - 1) \frac{\sin \theta}{2}.$$





# Основные уравнения

Уравнение для протонов

$$R \frac{\partial N}{\partial R} + \left( \frac{u_\rho}{\dot{R}} - \rho - \cos \theta \right) \frac{\partial N}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{u_\theta}{\dot{R}} + \sin \theta \right) \frac{\partial N}{\partial \theta} + \frac{p}{3\dot{R}} \frac{\partial N}{\partial p} \left( \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho^2 u_\rho + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta u_\theta \right) = \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho^2 \frac{D}{R\dot{R}} \frac{\partial N}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{D}{R\dot{R}} \frac{\partial N}{\partial \theta}$$

Уравнение для МГД волн, на которых рассеиваются частицы

$$D = D_B \frac{B^2}{4\pi w}, \quad D_B = \frac{p v c}{3qB}$$

$$R \frac{\partial w}{\partial R} + \left( \frac{u_\rho}{\dot{R}} - \rho - \cos \theta \right) \frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{u_\theta}{\dot{R}} + \sin \theta \right) \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{3w}{2\dot{R}} \left( \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho^2 u_\rho + \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta u_\theta \right) = \frac{4\pi V_a c p^4}{3\dot{R}} \sqrt{\left( \frac{\partial N}{\partial \rho} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{\partial N}{\partial \theta} \right)^2} - 2 \Gamma (w - w_b)$$

$$\Gamma = \frac{V_a k}{\sqrt{kL}}, \quad k = \frac{qB}{pc},$$

Затухание волн из-за фоновой турбулентности (Farmer & Goldreich (2004), Yan & Lazarian (2004))

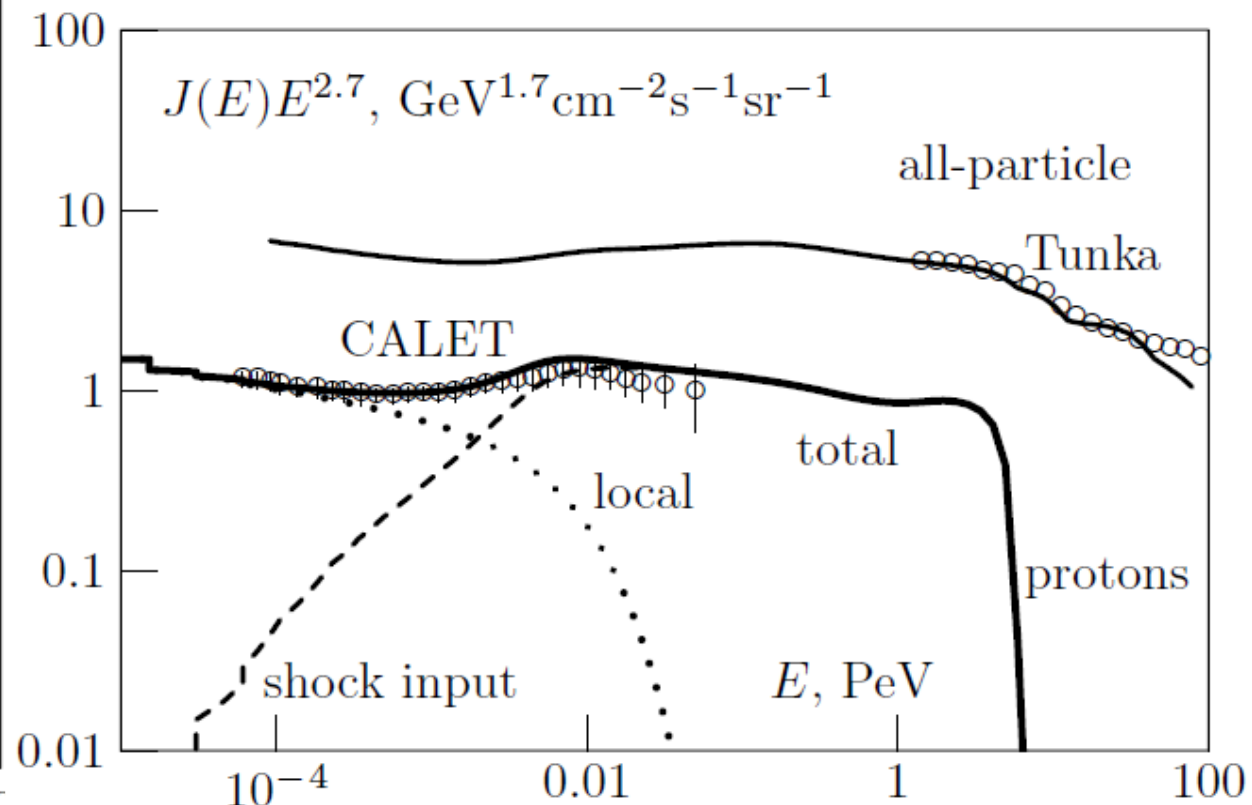
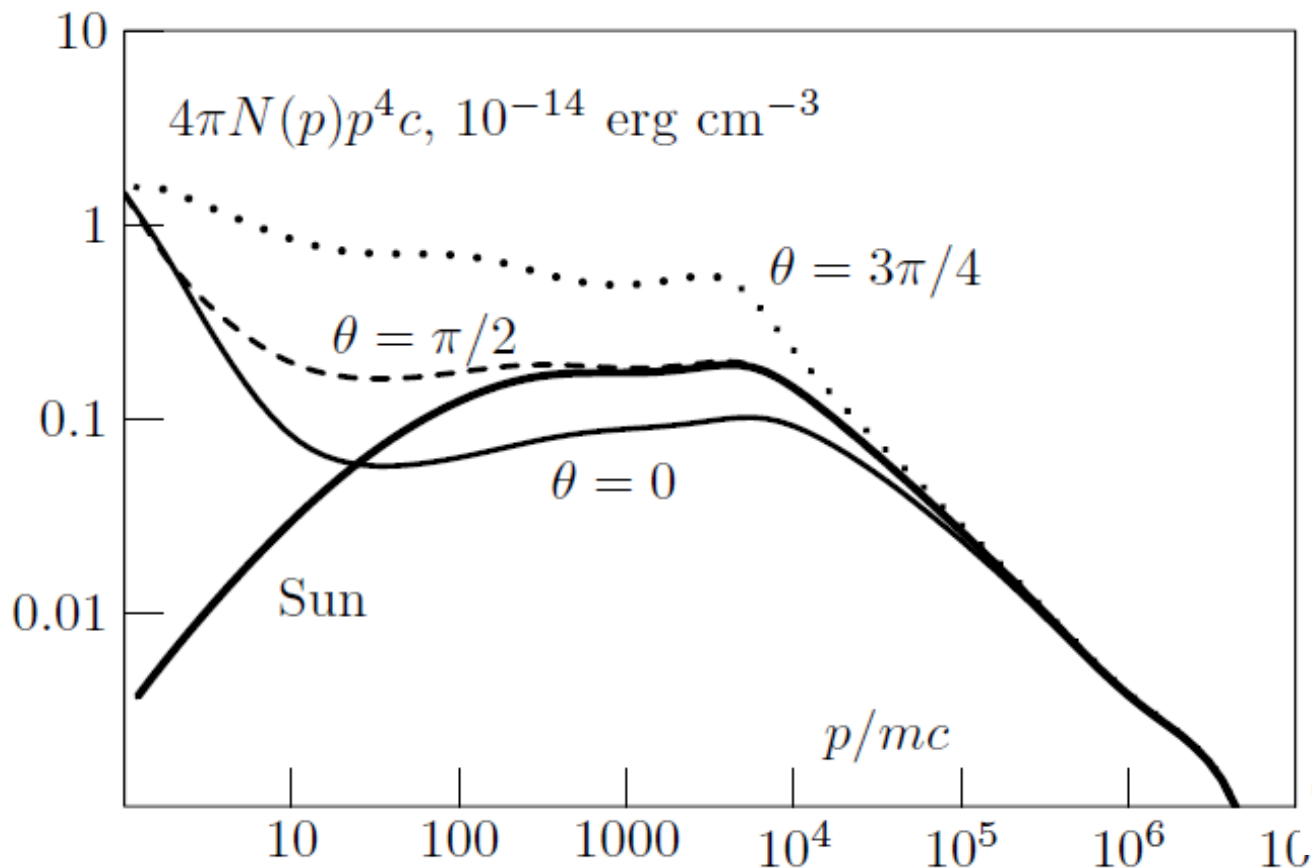
# Численные результаты

$$B = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гс}, \quad D_b = 9 \cdot 10^{28} \left( \frac{p}{mc} \right)^{1/3} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \quad \text{Фоновый коэффициент диффузии}$$

$$E_{cr} = 4 \cdot 10^{55} \text{ эрг} \quad \text{Полная энергия КЛ, ускоренных ударными волнами}$$

Спектры протонов на разных участках фронта УВ и у Земли

Сравнение с наблюдаемыми спектрами



# Выводы

1. Ударные волны пузырей eRosita имеют мощность, сравнимую с мощностью ударных волн в остатках сверхновых, но могли ускорять протоны КЛ до больших энергий порядка нескольких ПэВ в прошлом.
2. Энергии этих волн достаточно для объяснения спектра КЛ при энергиях 10 ТэВ и выше. При меньших энергиях происходит переход к КЛ, вероятно произведенным в остатках сверхновых.
3. Джет или релятивистский ветер в Галактическом центре, приведшие к образованию ударных волн пузырей eRosita, вероятно также произвели дополнительные компоненты ускоренных частиц при энергиях выше 100 ПэВ (Zirakashvili et al. 2023).