

Взаимодействие космических лучей с молекулярными облаками

Д.О.Чернышов

K.S.Cheng, В.А.Догель, А.В. Ивлев,
С.М.Ко

Почему молекулярные облака?

- Они плотные (x1000 ISM)
 - Все процессы, пропорциональные плотности, идут быстрее
- Они холодные (10 – 100 K)
 - Тепловые процессы в низкоэнергетичной области
 - Все высокоэнергетичные процессы – внешние источники
- Космические калориметры

Определение плотности КЛ с помощью облаков

$$L_\gamma = n_{gas} N_{CR}(14E_\gamma) \sigma_{pp} c V_{cl} \propto M_{cl} N_{CR}(14E_\gamma)$$

Предполагая $N_{CR} = N_0 E^{-\delta}$

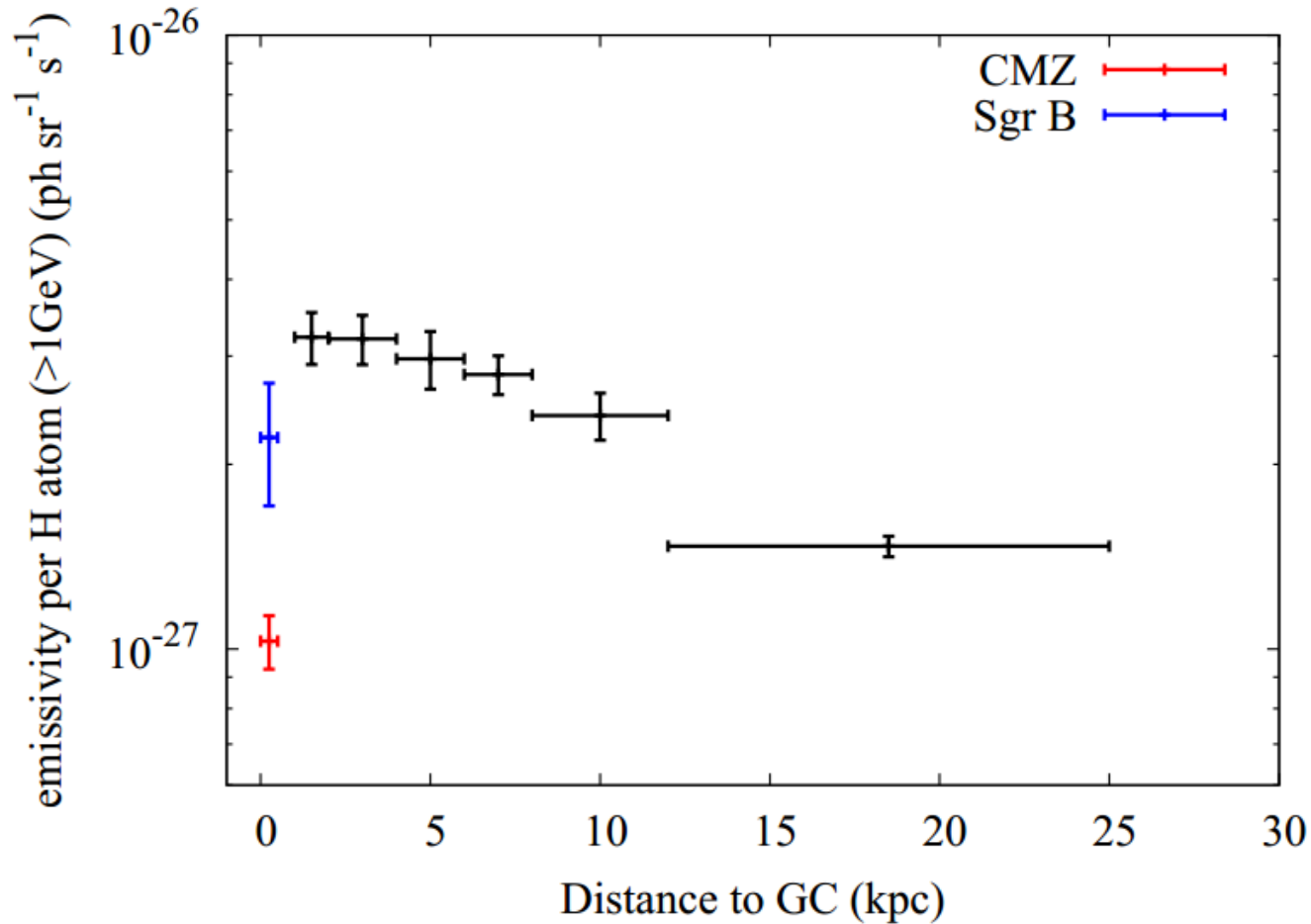
$$F_\gamma = f(\delta) N_0 E_\gamma^{-\delta} \left(\frac{M_{cloud}}{d^2} \right)$$

Gamma-rays

Radio, IR

Black & Fazio 1973, Issa & Wolfendale 1981, Aharonian 1991, Casanova et al. 2010

Градиент плотности КЛ в Галактике

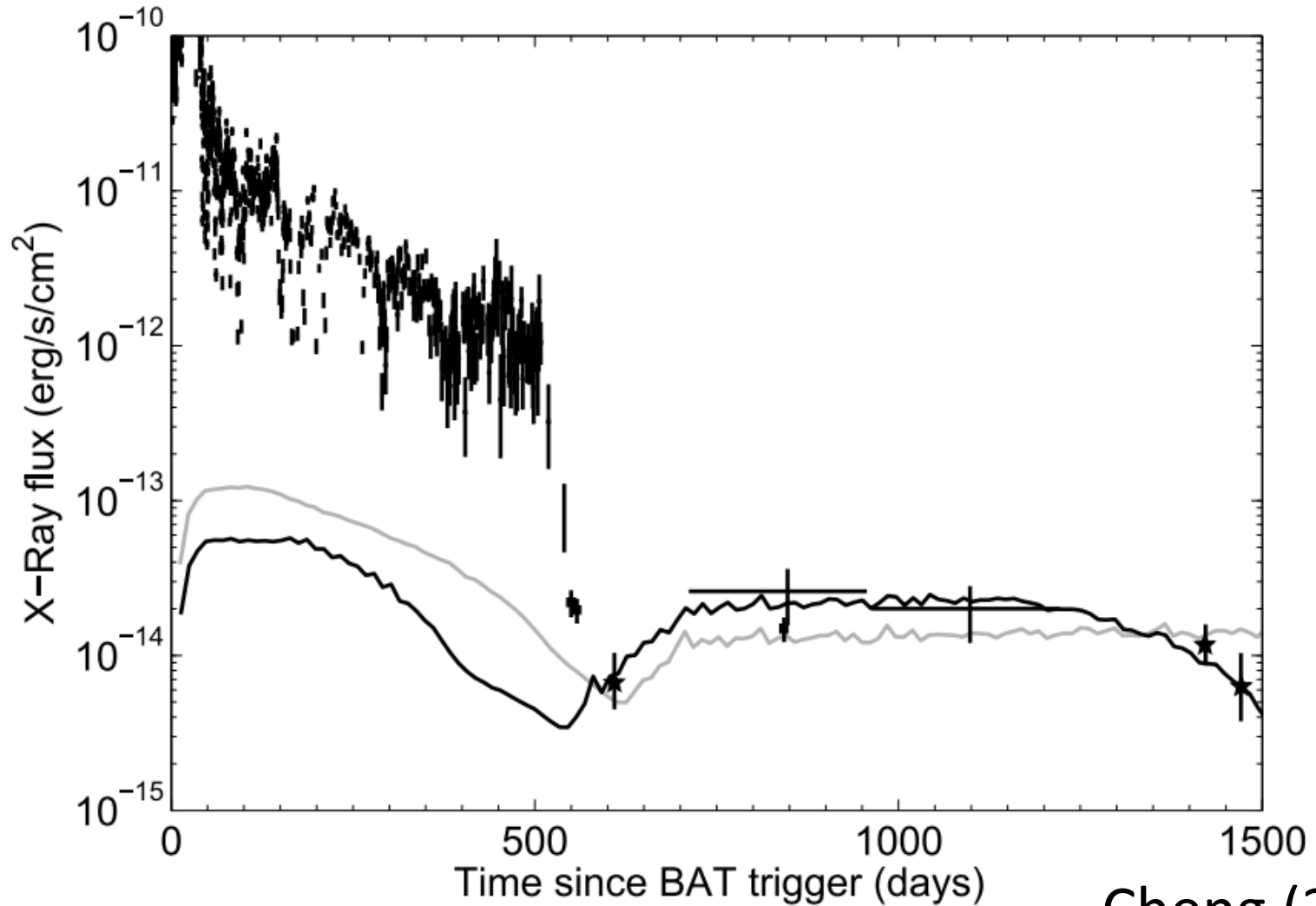


Yang+ (2015)

Плотность субрелятивистской компоненты КЛ

- Излучение попадает в рентгеновский диапазон
- Ревнивцев (2009): излучение из диска Галактики – точечные источники
- Галактический центр? Сюняев (1993), Коуата (1996) – отраженный рентген
– Необходимо найти стационарную компоненту!

SWIFT J1644+57: комптоновское эхо на космологических расстояниях?



Cheng (2016)

Плотность субрелятивистской компоненты КЛ

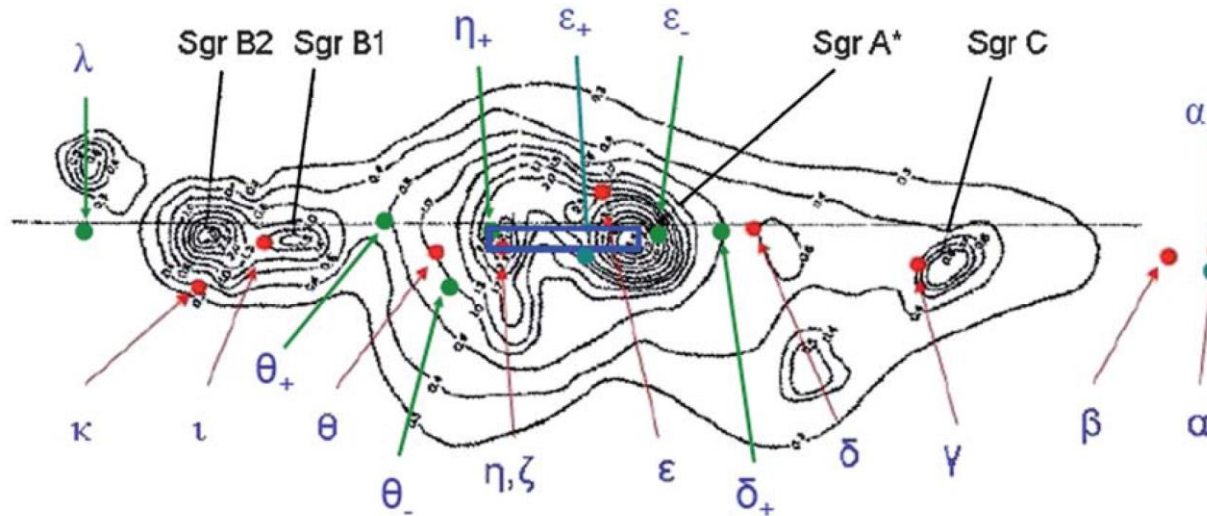


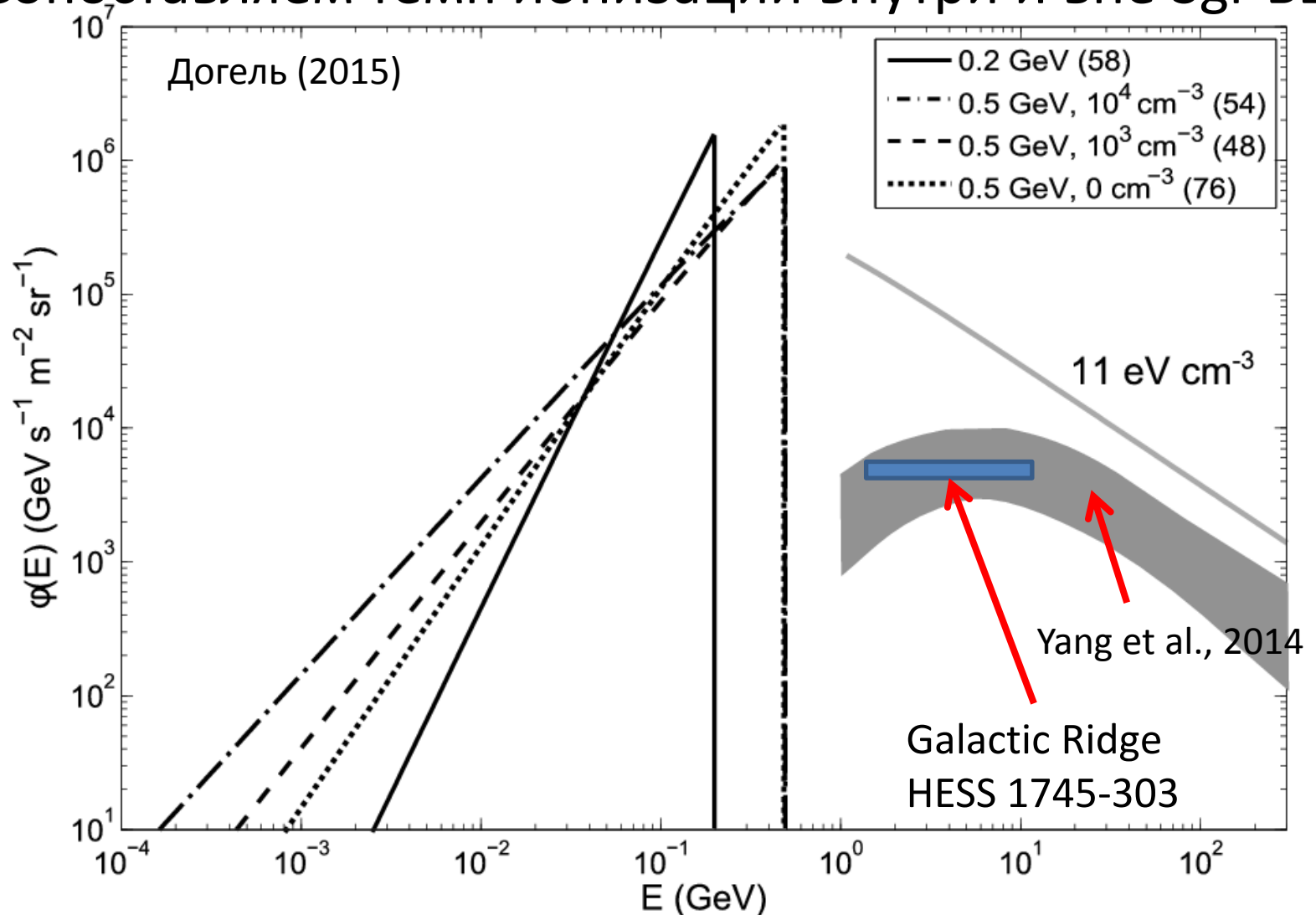
Fig. 8 19 newly found bright dust embedded stars qualified for the H_3^+ spectroscopy from 140 pc West (α) to 120 pc East (λ). The distances are on the assumption of the Galactic center distance of 8 k pc. The central blue box indicates the location of 15 stars from the center to 30 pc East previously observed.

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

На порядок выше, чем в диске!

Плотность субрелятивистской компоненты КЛ

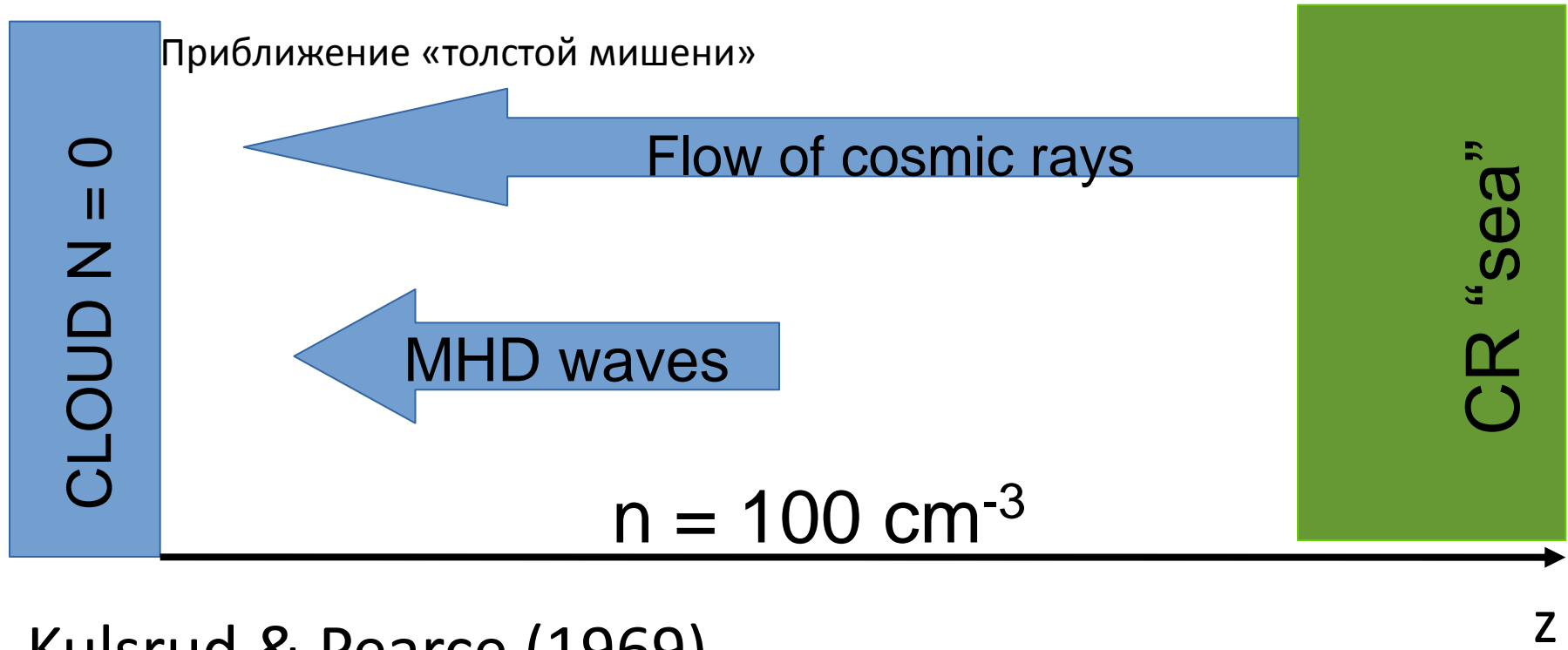
Сопоставляем темп ионизации внутри и вне Sgr B2



Прозрачность облака для КЛ

- Облако выступает поглотителем КЛ
- Формируется ненулевой поток КЛ в облако
- Поточковая неустойчивость
- Skilling & Strong (1976) Cesarsky & Volk (1978)
– протоны ниже 100 МэВ
- Morlino&Gabici (2015): низкоэнергетичные частицы захвачены волнами, распространяются с альвеновской скоростью

Распространения КЛ вблизи облака



Kulsrud & Pearce (1969)

В частично ионизованной среде



Уравнения для частиц и волн

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D(z, E) \frac{\partial N}{\partial z} - v_A N \right) + \left[\frac{\partial}{\partial E} \left(\frac{dE}{dt} N \right) \right] = 0$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + v_A \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{k W(k)}{T_{nl}} \right) = 2(\Gamma_{CR} - \nu_{in}) W,$$

$$\Gamma_{cr} \simeq \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\pi}{4} \Omega_{Hi} \frac{N(> p_{res})}{n_i} \left(\frac{u_0}{v_A} - 1 \right)$$

- Скорость вне интеграла! Однако мы предполагаем, что волны возбуждаются в узком диапазоне
- Данное выражение лучше справляется с $W = 0$

Уравнения для частиц и волн

На случай превышения скорости света

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \text{div } S + \left(\frac{\partial}{\partial E} \frac{dE}{dt} f \right) = 0$$

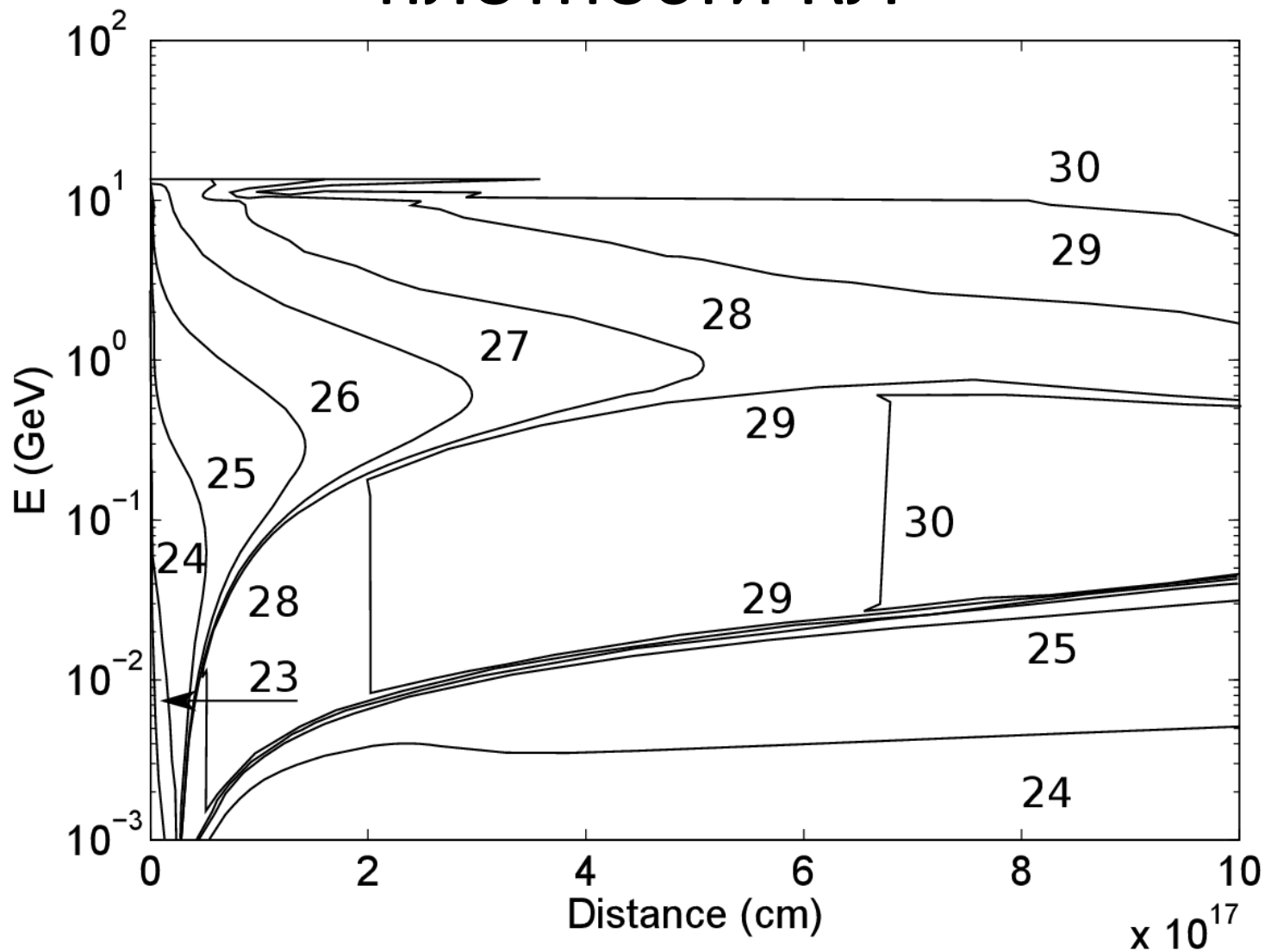
$$S = \min \{ -D \nabla f, v \cdot f \} ,$$

$$D(E) = \frac{v H^2}{12 \pi k_{res}^2 W(k_{res})}$$

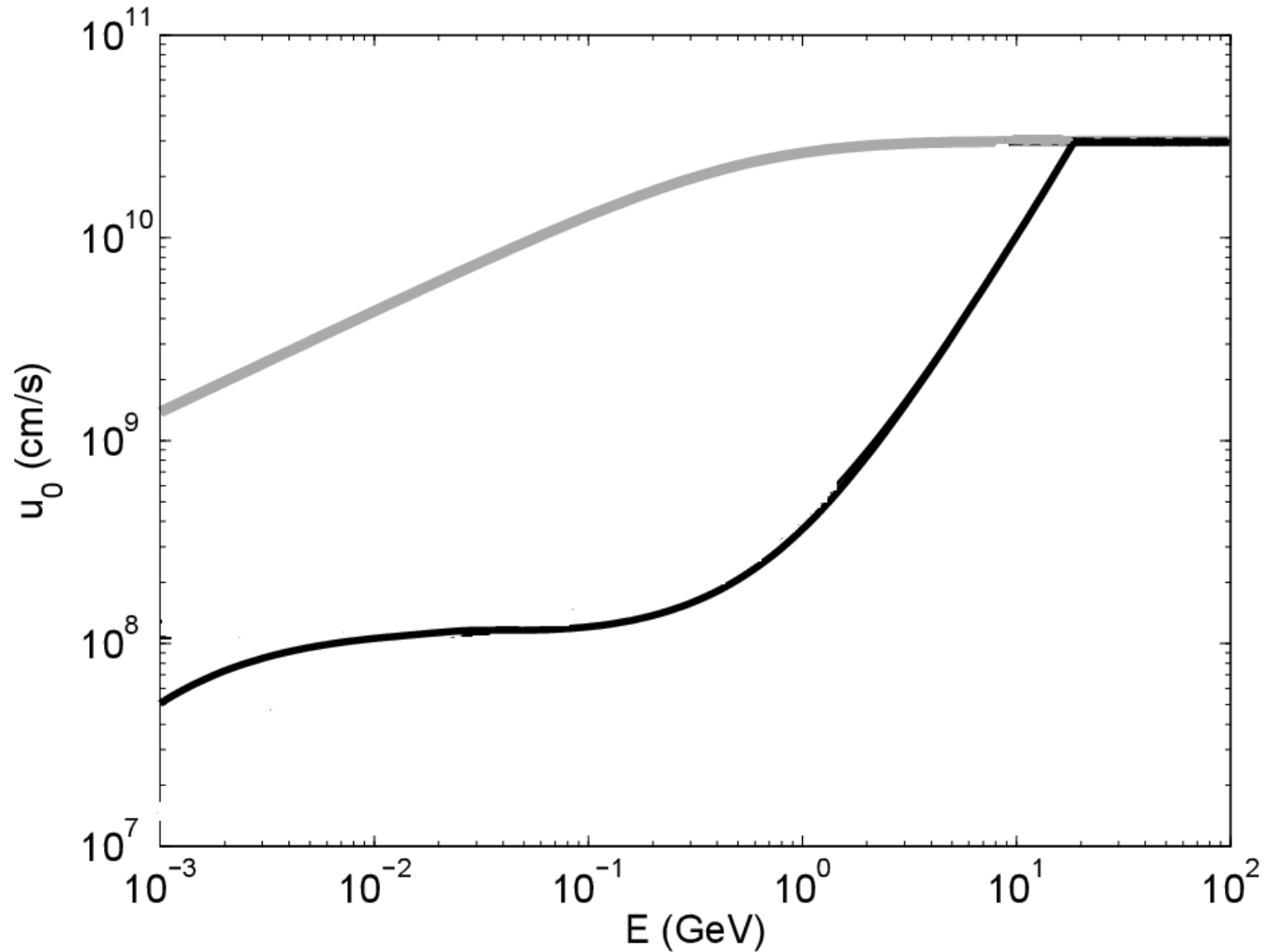
$$\frac{dE}{dt} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\pi}{4} \frac{\Omega_{Hi}}{n_i} \int_{k_{res}}^{k_{max}} W \left(\frac{u_0}{v_a} - 1 \right) dk$$

Потери на возбуждение волн не входят в уравнение диффузии – за рамками приближения

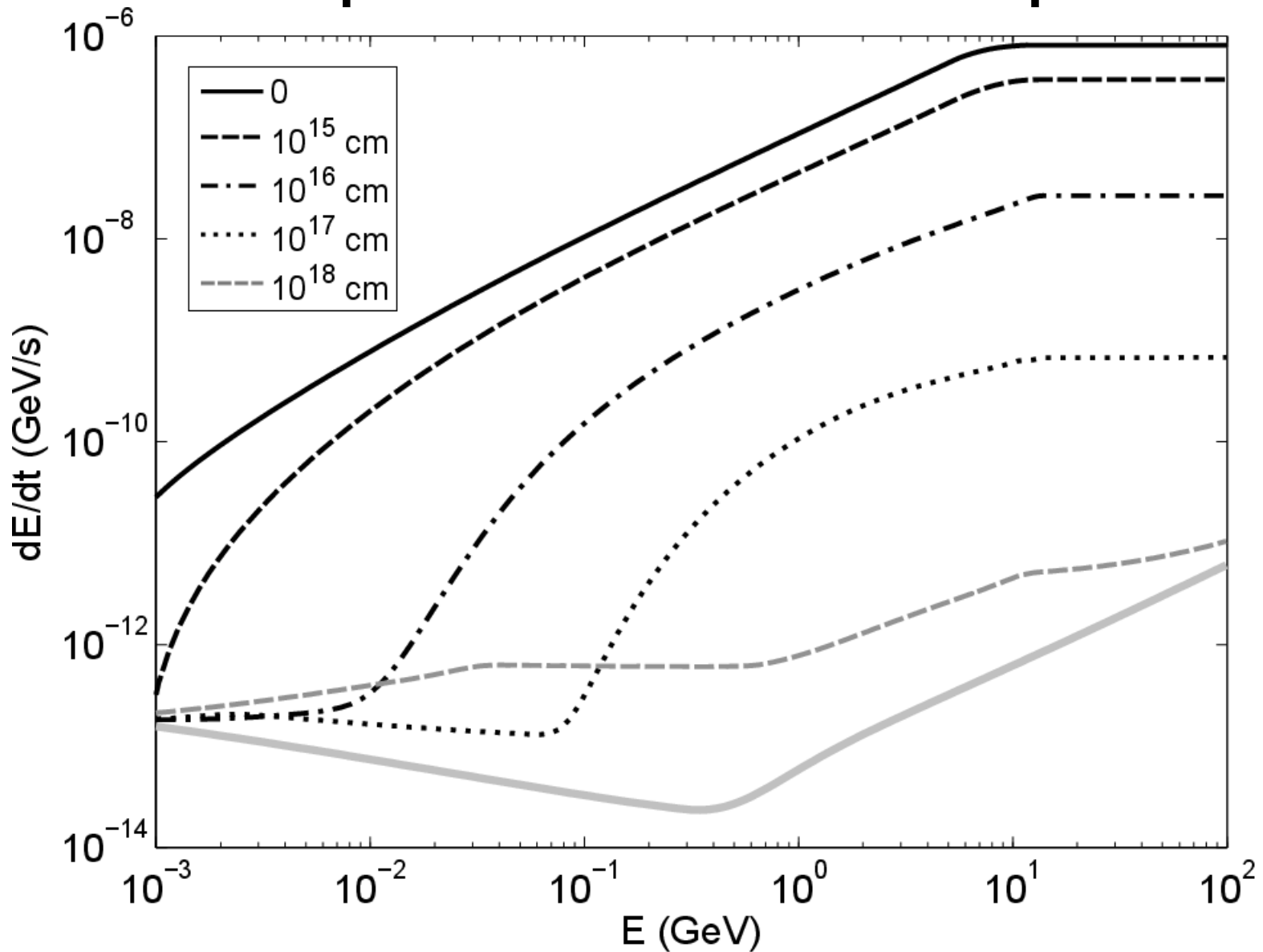
Коэффициент диффузии для земной плотности КЛ



Средняя потоковая скорость



Энергетические потери



Выводы

- Распространение субрелятивистских частиц сильно модифицируется потоковой неустойчивостью
- Потери на волны большие – мы выходим за рамки диффузионного приближения
- Значительная энергия в волнах, которые затухнут в самом облаке – разогрев+ионизация