

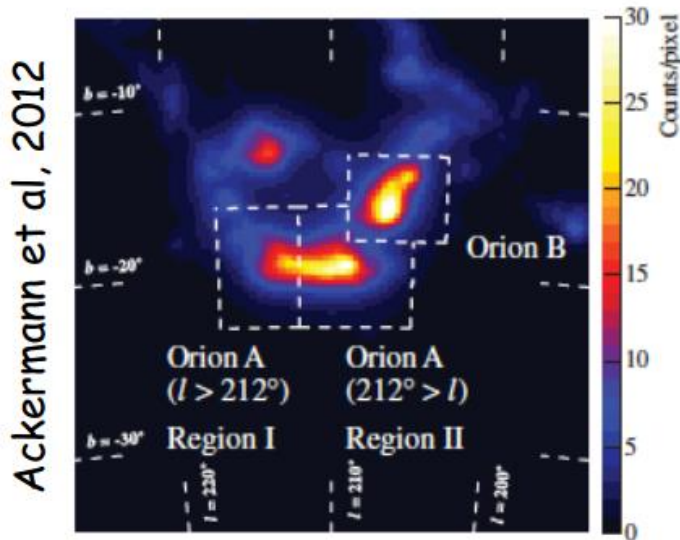
# Самосогласованная модель проникновения космических лучей в молекулярные облака

Чернышов Д.О.

Ивлев А.В., Киселев А.М.

# Молекулярные облака и КЛ

- Гамма-излучение – важнейший (и часто единственный) источник информации о КЛ



Зная массу газа и расстояние, мы можем полностью восстановить спектр КЛ в газе.

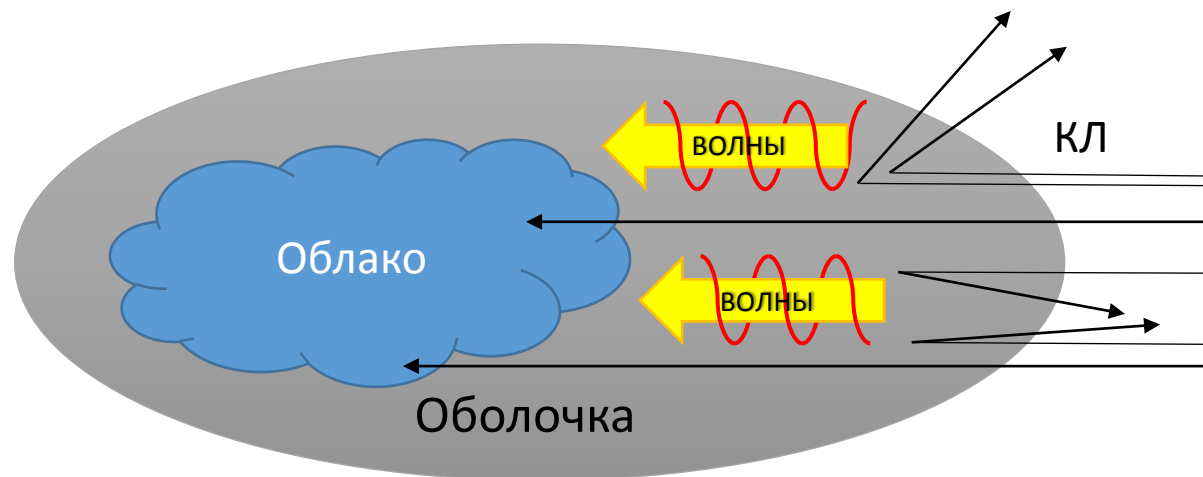
Black & Fazio 1973, Issa & Wolfendale 1981, Aharonian 1991, Casanova et al. 2010

Но совпадает ли спектр с ISM?

- Спектр вторичных КЛ несет информацию о гало КЛ Галактики. Вт. КЛ частично создаются в облаках

# Спектр КЛ в плотных облаках

- Наиболее интересны массивные (и плотные) облака
- При поглощении КЛ проявляется неустойчивость



Skilling & Strong 1976; Cesarsky & Völk 1978; Everett & Zweibel 2011, Morlino & Gabici 2015, Ivlev et al. 2018.

# Спектр КЛ в плотных облаках

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( v_A f - D \frac{\partial f}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial p} (\dot{p} f) = 0$$

$$\gamma_{\text{CR}}(k, z) \simeq -\pi^2 \frac{e^2 v_A}{m_p c^2 \Omega_p} p D \frac{\partial f}{\partial z}$$

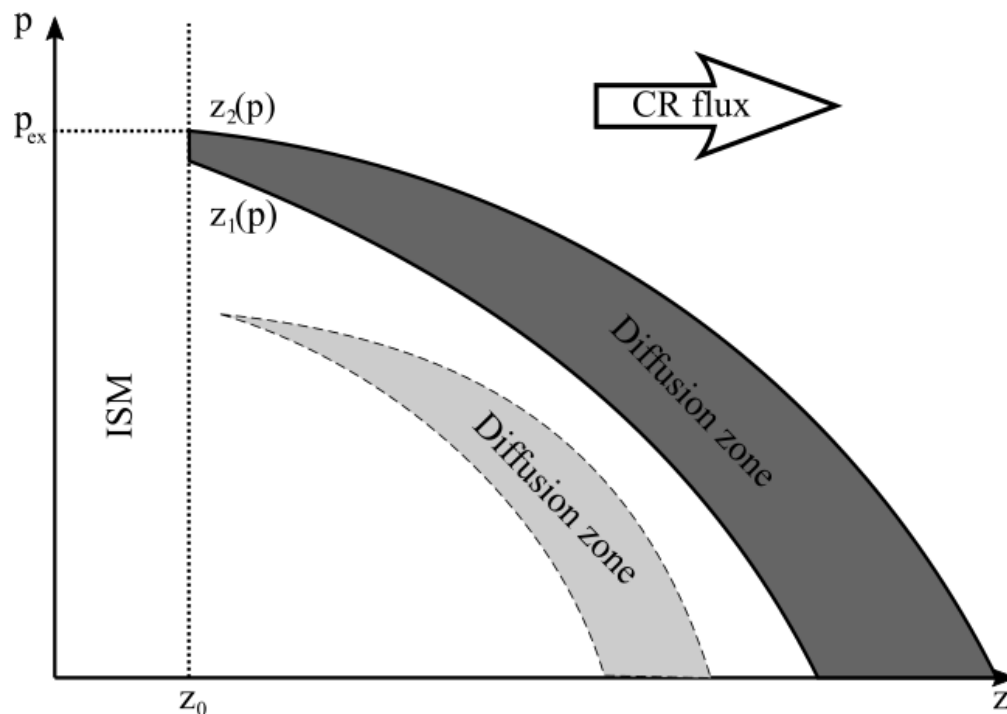
$$\gamma_{\text{CR}} = \nu_{in}$$

Skilling & Strong 1976

# Где происходит модуляция

- Начиная с Skilling & Strong 1976 задача разбивается на «оболочку» постоянной плотности и «ядро»
- Какова плотность оболочки? Результат от нее зависит немонотонно – спектр на разных энергиях реагирует по-разному
- В реальных облаках плотность зависит от координаты
- Устойчивая ситуация – минимум потока на каждой отдельно взятой энергии

# Где происходит модуляция



- Космические лучи сами найдут для себя оптимальное значение плотности!

# Где происходит модуляция

- Гипотеза о минимальности потока подтверждается честным решением для неоднородной оболочки
- Начало зоны турбулентности:  $n_1 = \max(n_0, n_{cr})$

$$n_{cr}(p) \equiv \sqrt{\frac{\pi p f_0(p) n_0 \Omega_i}{12 \xi_i \nu_0}}$$

- Конец:  $n_2(p) = n_1(p) \left[ \mathcal{K} \left( 1 - \frac{v_{A2}}{u} \right) \right]^{2/3}$

$$\mathcal{K}(p) = 3 \left( \frac{n_{cr}(p)}{n_1(p)} \right)^2 + 1$$

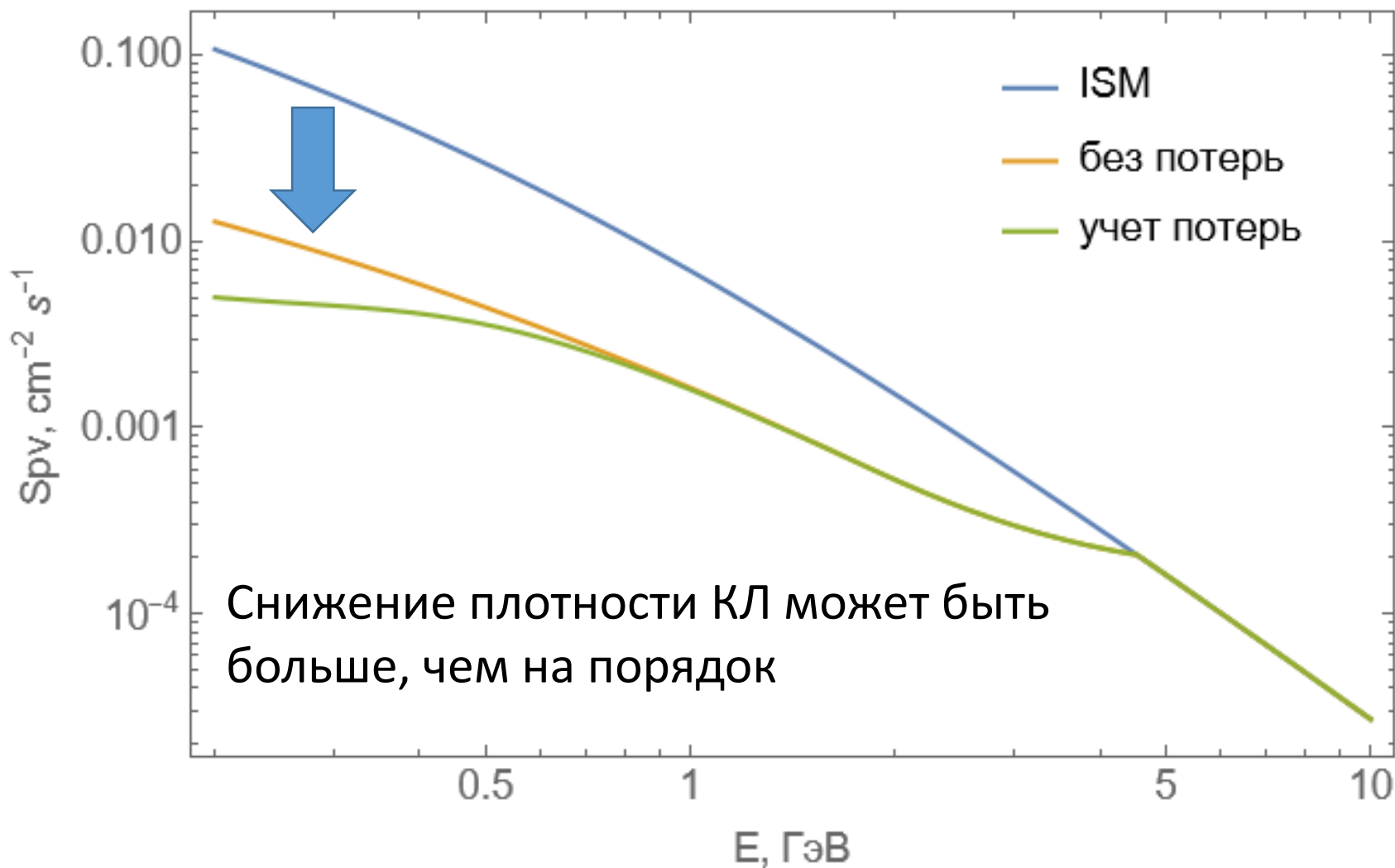
# Где происходит модуляция

- Решение не зависит от распределения плотности в молекулярном облаке  $n(z)$
- Решение не содержит свободного параметра – плотности газа. За исключением  $n_0$  - границы нейтрального газа
- Модуляция происходит в редкой среде,  $n = 0.1 \dots 30 \text{ см}^{-3}$  – в зависимости от энергии
- Поток частиц, проникающих в облако

$$S \propto p^{-1/4} f_0^{3/4}(p)$$

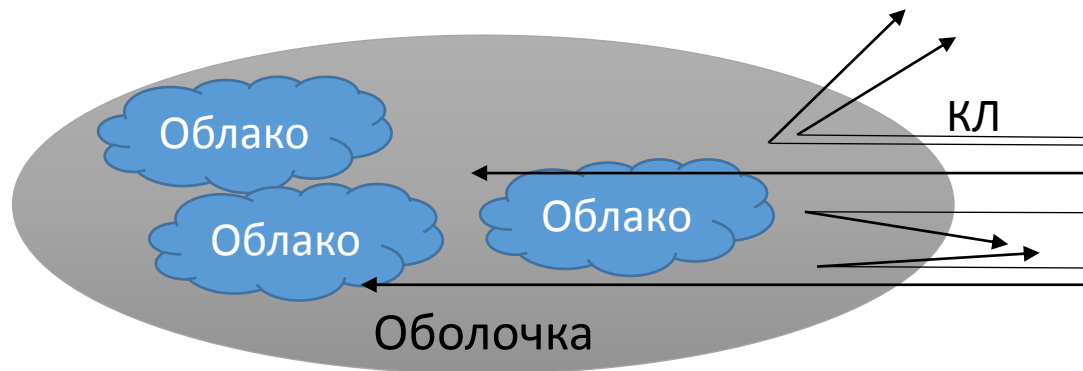


# Спектр КЛ в плотных облаках

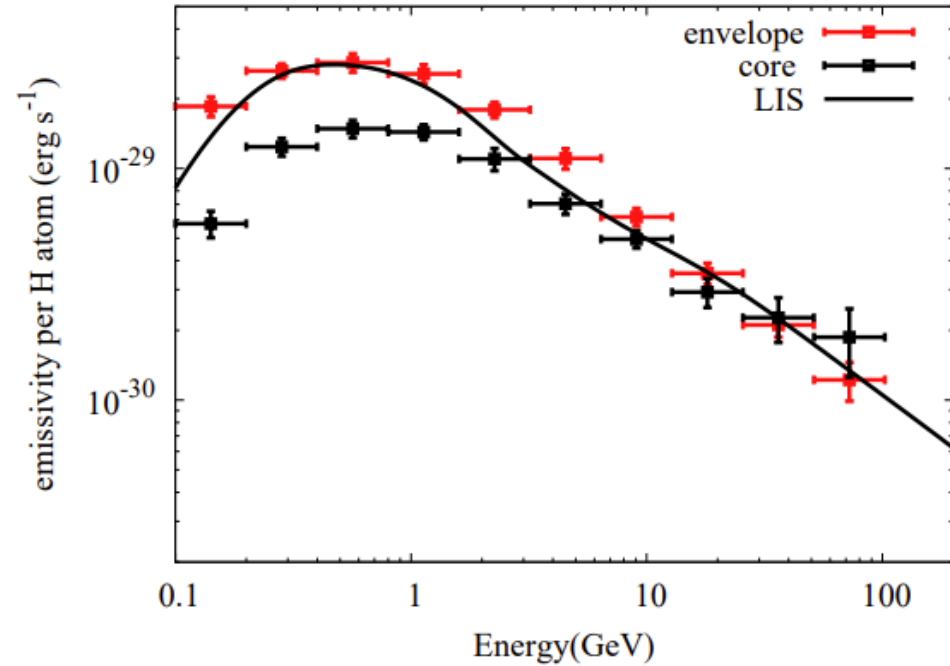
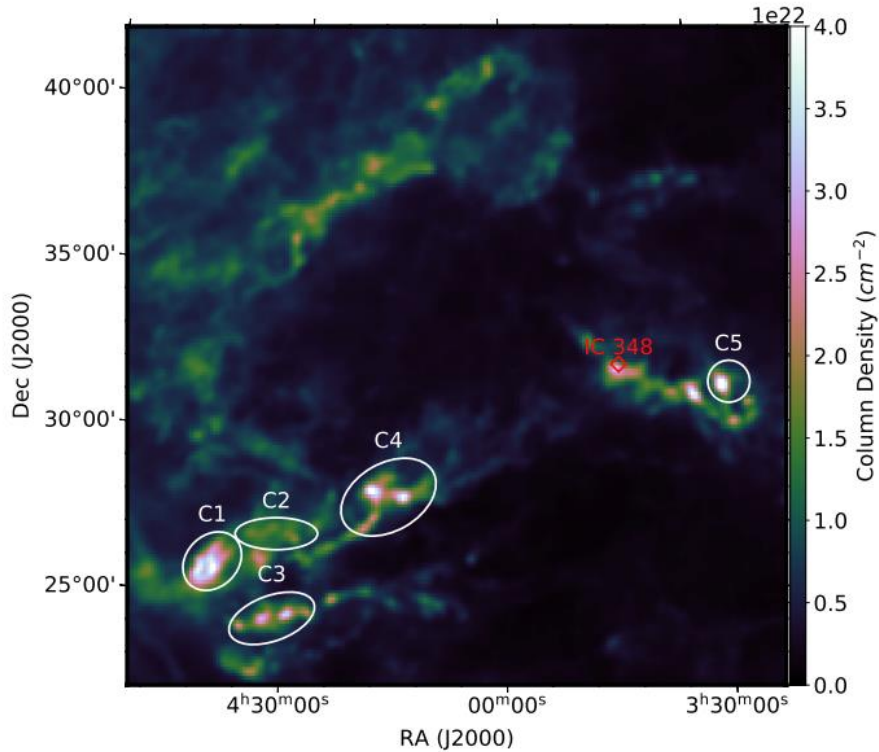


# Спектр КЛ в плотных облаках

- Модуляция происходит в газе малой плотности ( $1 - 30 \text{ см}^{-3}$ ) – фактически  $\text{H I}$ , а не  $\text{H}_2$ .
- Зависит от  $N_{\text{H}}$  облака
- Граница проходит в том месте, где доминирующий ион  $\text{C}^+$  сменяется на  $\text{H}^+$ .
- Возможна кластеризация (суммарный  $N_{\text{H}}$  )

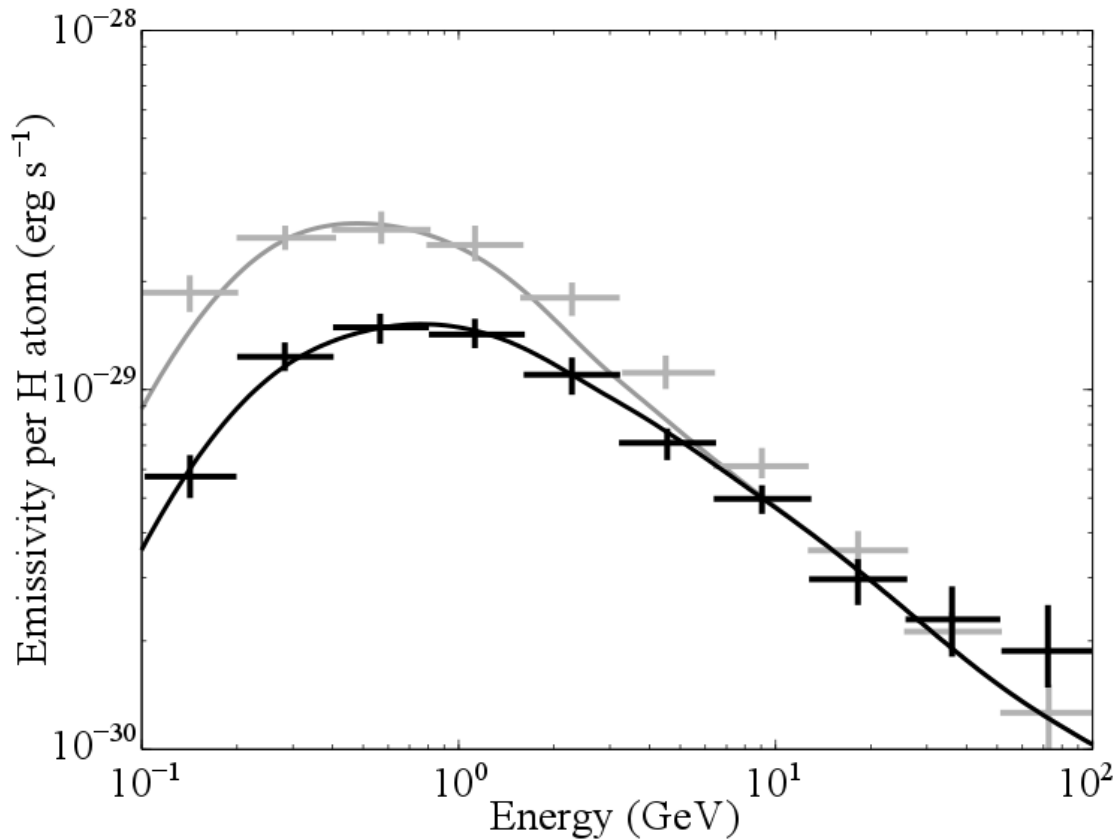


# Экспериментальные данные



Yang+ (2023): Effective Shielding of  $< 10$  GeV Cosmic Rays from Dense Molecular Clumps

# Модулированное гамма-излучение



Наблюдается  
хорошее согласие с  
экспериментальным  
и данными

Параметры задачи  
не являются  
экстремальными

$$NH = 6 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$$

$$B = 3 \text{ мкГс}$$

$$n_0 = 1 \text{ см}^{-3}$$

# Выводы

- Самомодуляция КЛ может влиять на их спектр в молекулярном газе на энергиях ниже 10...100 ГэВ
- Может проявляться в гамма-излучении – дефицит фотонов с энергией ниже нескольких ГэВ
- Затрагивает в основном массивные облака, но может иметь место эффект кластеризации
- Экспериментальные подтверждения пока недостаточны