

**ФОТОЯДЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ И СОДЕРЖАНИЕ
МЮОНОВ В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ**

магистерская диссертация Мартыненко Н.
научный руководитель Троицкий С.В.

Кафедра физики частиц и космологии Физического факультета МГУ

30 мая 2024

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) (A, Z) Мюонный избыток

Мера числа мюонов в ШАЛ:

$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{true}} - \ln N_{\mu}^{\text{pred}} \left(\begin{smallmatrix} A=1 \\ Z=1 \end{smallmatrix} \right)}{\ln N_{\mu}^{\text{pred}} \left(\begin{smallmatrix} A=56 \\ Z=26 \end{smallmatrix} \right) - \ln N_{\mu}^{\text{pred}} \left(\begin{smallmatrix} A=1 \\ Z=1 \end{smallmatrix} \right)}$$

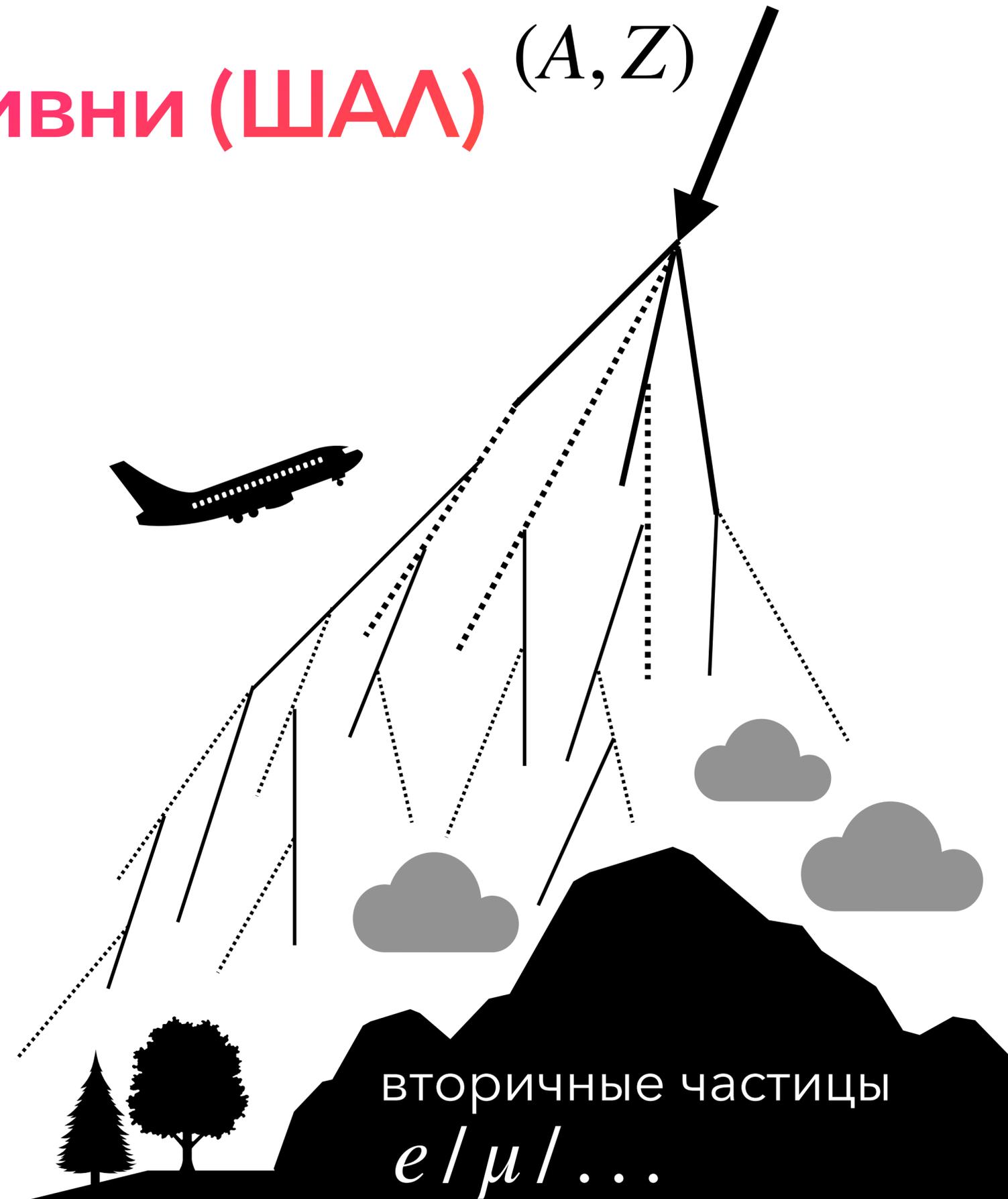
Разумное ожидание: $0 < z < 1$

$z = 0$ – 100% протоны

$z = 1$ – 100% железо

Эксперимент: $z > 1$ (иногда)!

2



Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) (A, Z) Мюонный избыток

Как объяснить $z > 1$?

- очень тяжелый состав
- модель сильных взаимодействий
- фотоядерные взаимодействия
- и еще разные попытки: нарушение Лоренц-инвариантности, бозе-конденсация



Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) (A, Z) Мюонный избыток

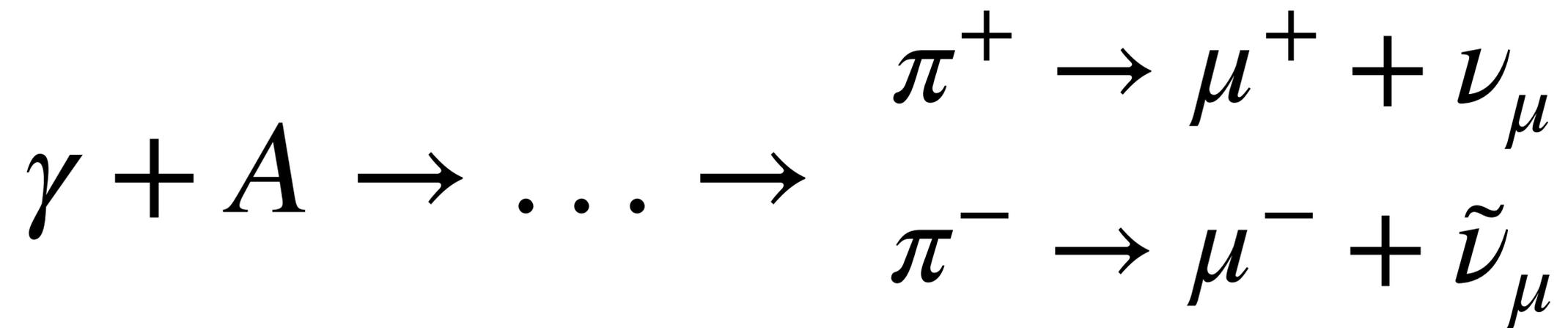
Как объяснить $z > 1$?

- очень тяжелый состав
- модель сильных взаимодействий
- **фотоядерные взаимодействия**
- и еще разные попытки: нарушение Лоренц-инвариантности, бозе-конденсация

4

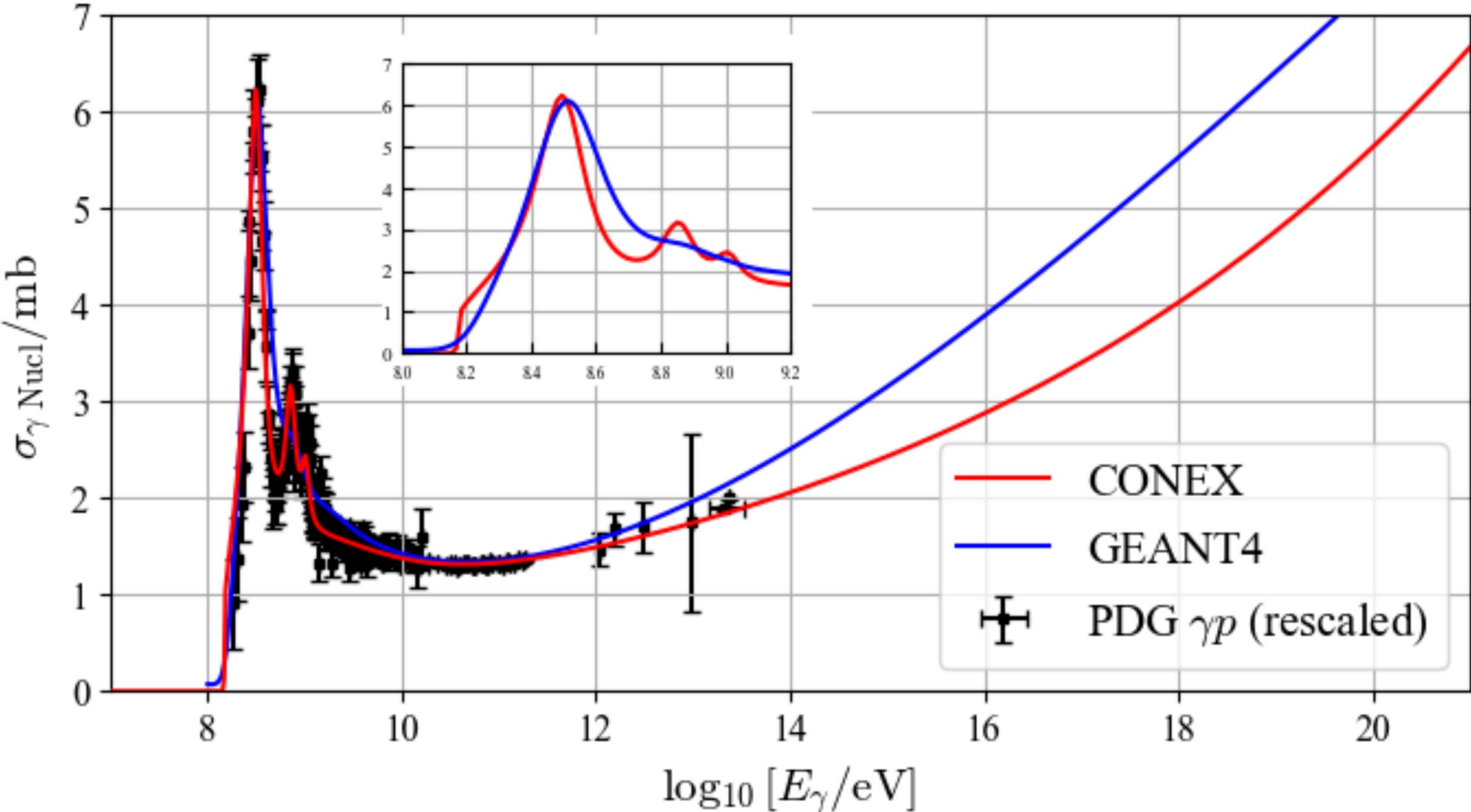


Фотоядерные взаимодействия в ШАЛ



A – ядро атмосферы (^{14}N , ^{16}O , ^{40}Ar)

Фотоядерные взаимодействия в ШАЛ



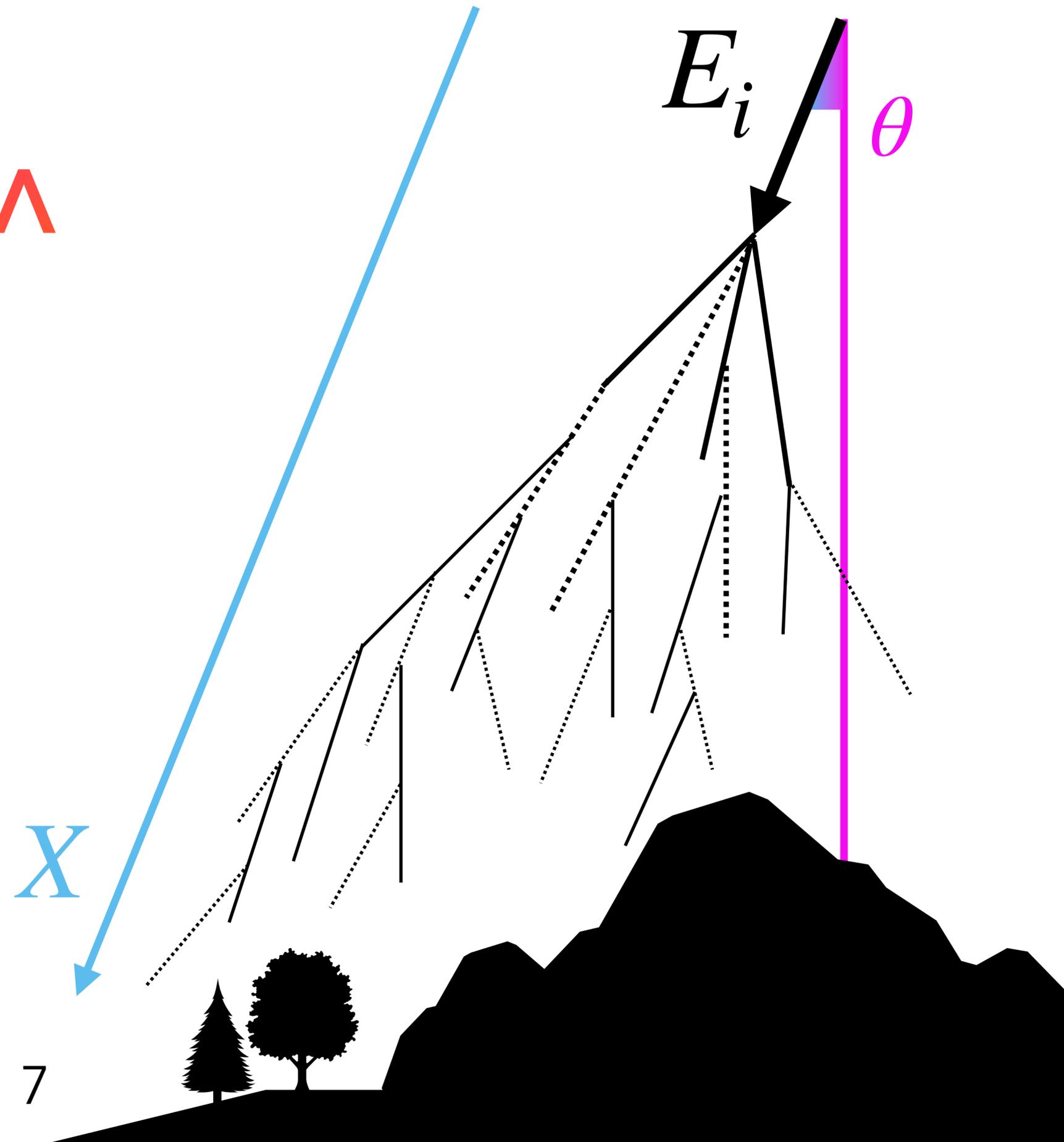
Фотоядерные взаимодействия в ШАЛ

Как изучить «зоопарк» моделей фотоядерного сечения при разных параметрах ШАЛ?

3D+МС – слишком долго

1D+МС+СЕ – все еще долго

Аналитическая формула – можно успеть за время этого доклада!



Аналитическая модель для ШАЛ.

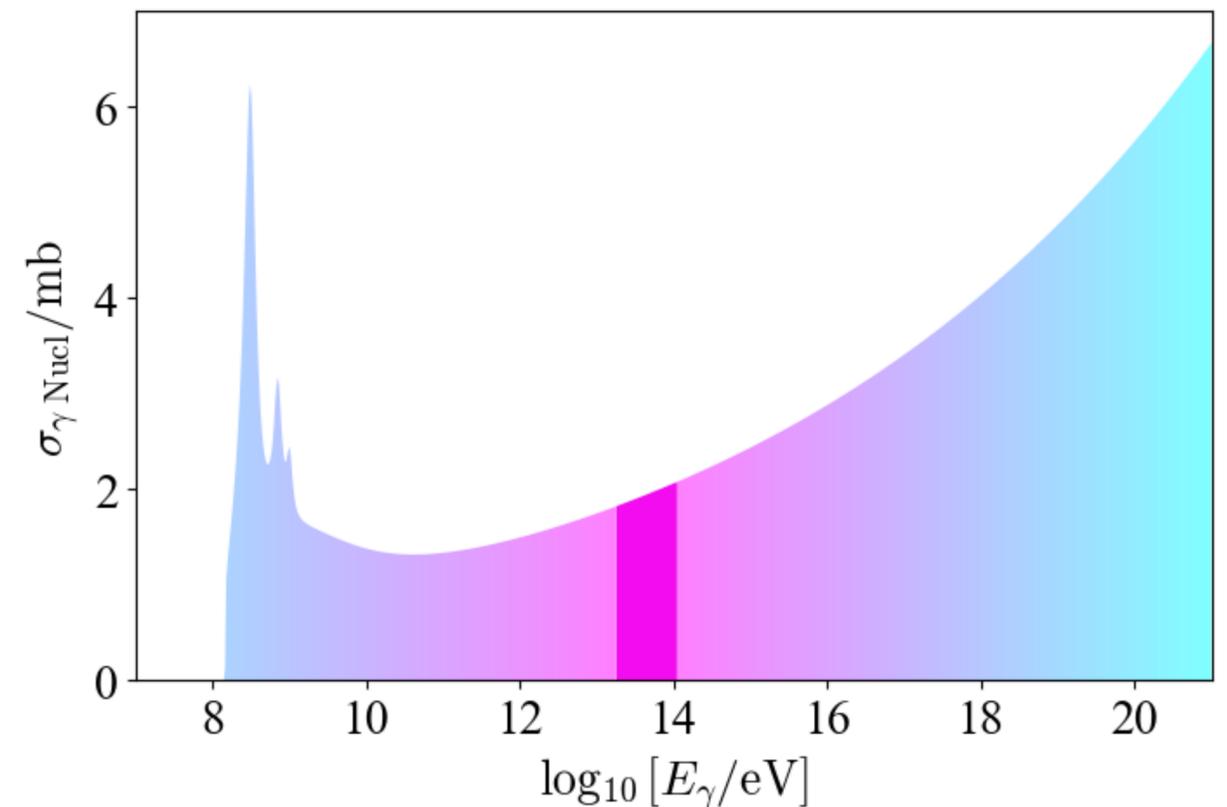
Основные результаты

$$\frac{dN_\mu}{dE_\gamma}(E_\gamma, E_i, X | \sigma_\gamma \text{Nucl}) = \left(\frac{\sigma_\gamma \text{Nucl}(E_\gamma)}{\text{mb}} \right) \times N_0 \left(\frac{E_\gamma}{\text{eV}} \right)^{-\gamma_1 + \gamma_2 \ln\left(\frac{E_\gamma}{\text{eV}}\right)} \left(\frac{E_i}{\text{eV}} \right)^i \times$$

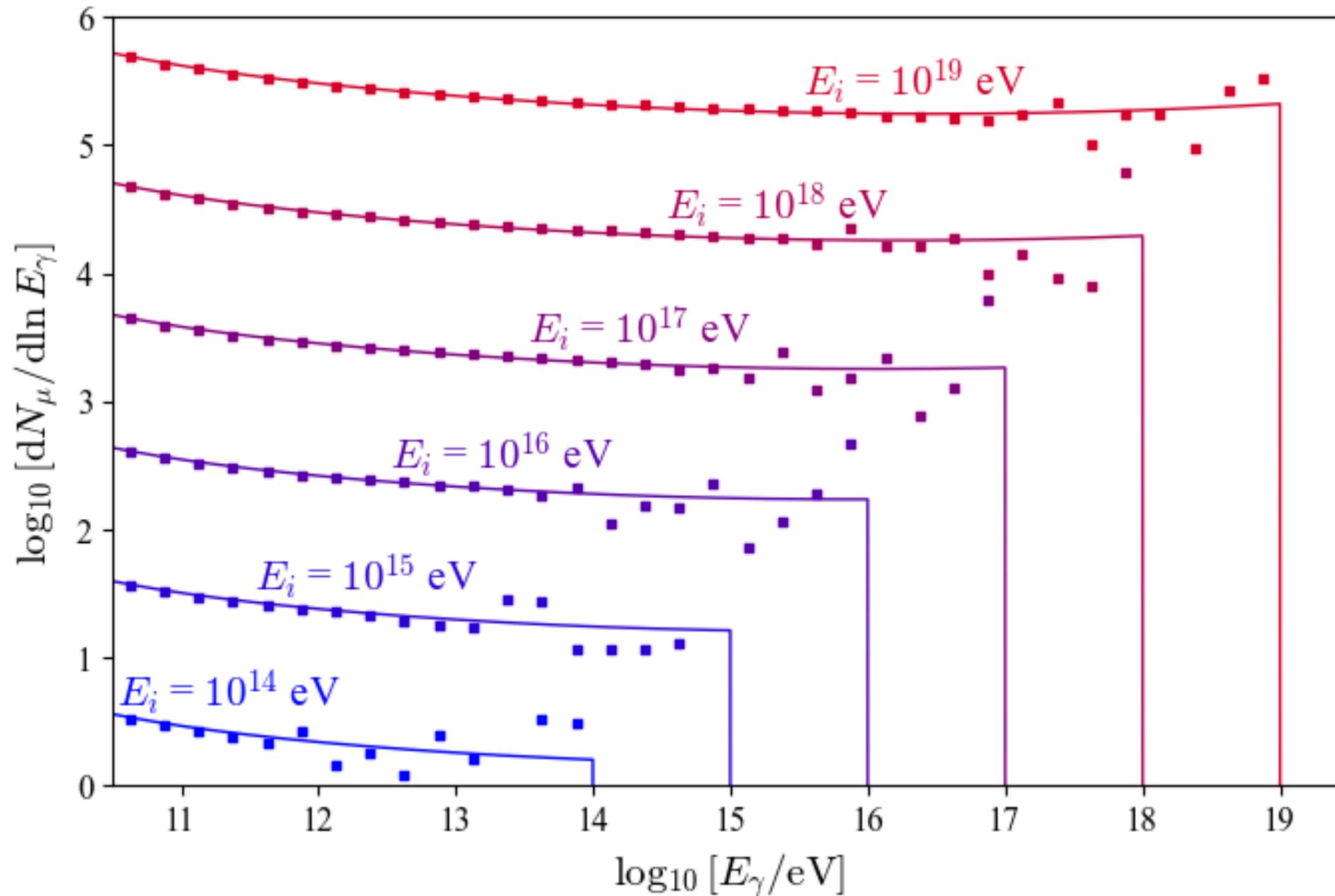
$$\times \left(\frac{X}{X_{\text{max}}} \right)^{\frac{X_{\text{max}}}{\Lambda\left(\frac{X}{X_{\text{max}}}, E_\gamma\right)}} \exp \left[\frac{X_{\text{max}} - X}{\Lambda\left(\frac{X}{X_{\text{max}}}, E_\gamma\right)} \right] \times \Theta(E_i - E_\gamma)$$

$$X_{\text{max}} = -X_0 + X_\gamma \ln\left(\frac{E_\gamma}{\text{eV}}\right) + X_i \ln\left(\frac{E_i}{\text{eV}}\right),$$

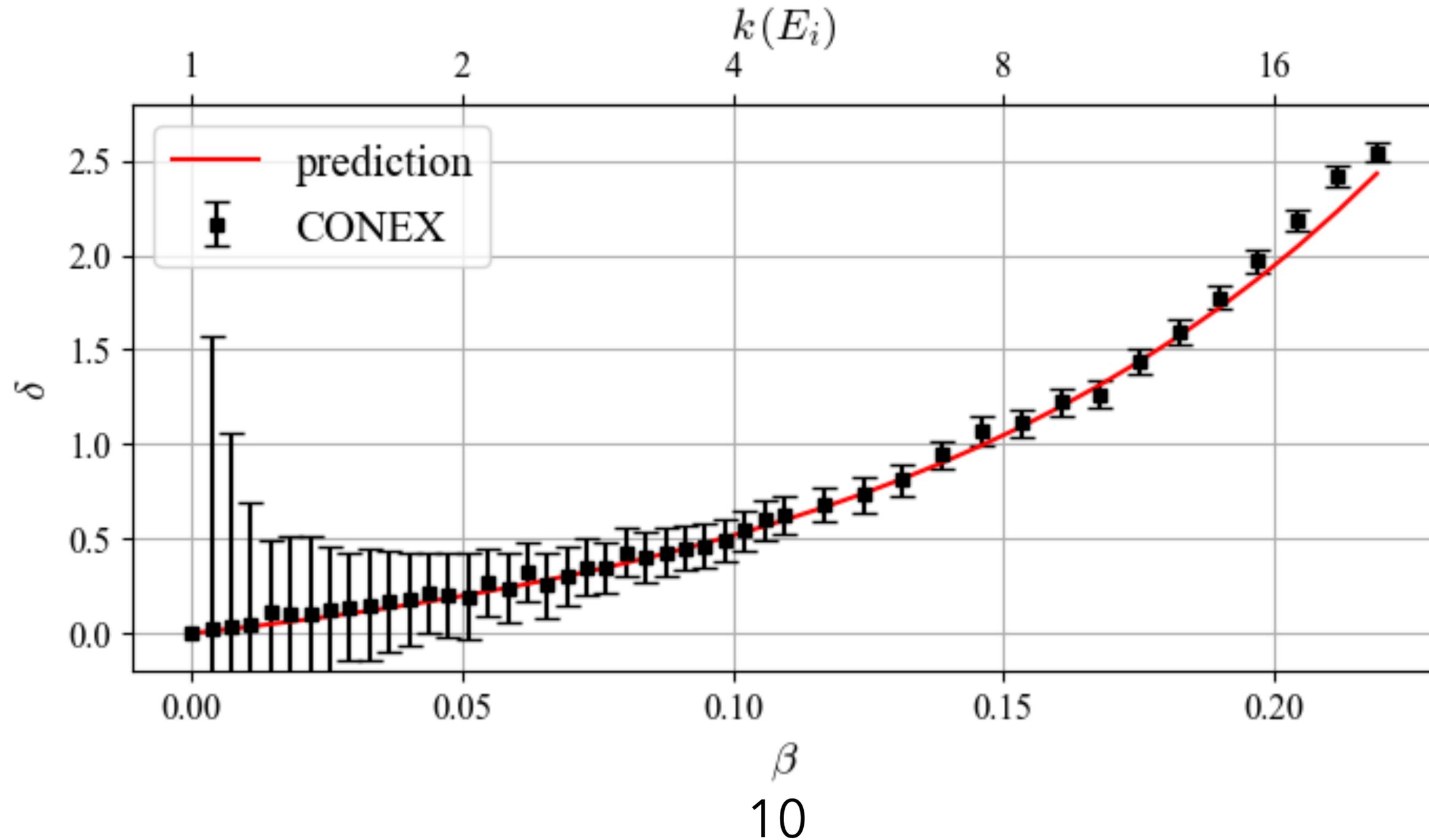
$$\Lambda(\xi) = -(\Lambda_0 - \Lambda_1 \xi + \Lambda_2 \xi^2) + \ln\left(\frac{E_\gamma}{\text{eV}}\right) \times (\lambda_0 - \lambda_1 \xi + \lambda_2 \xi^2)$$



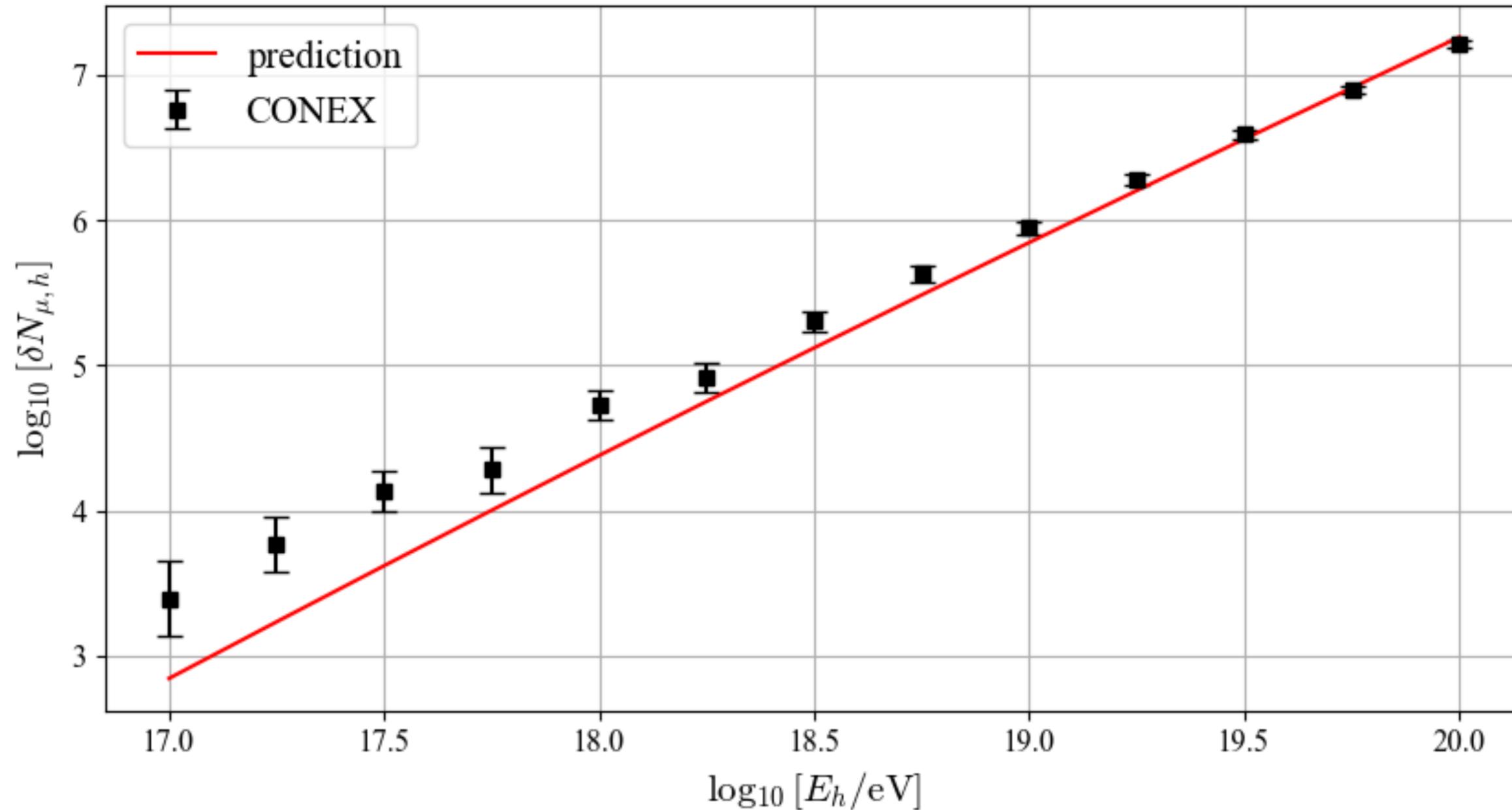
Аналитическая модель для ШАЛ. Фотонные ливни (training set)



Аналитическая модель для ШАЛ. Фотонные ливни (test set)



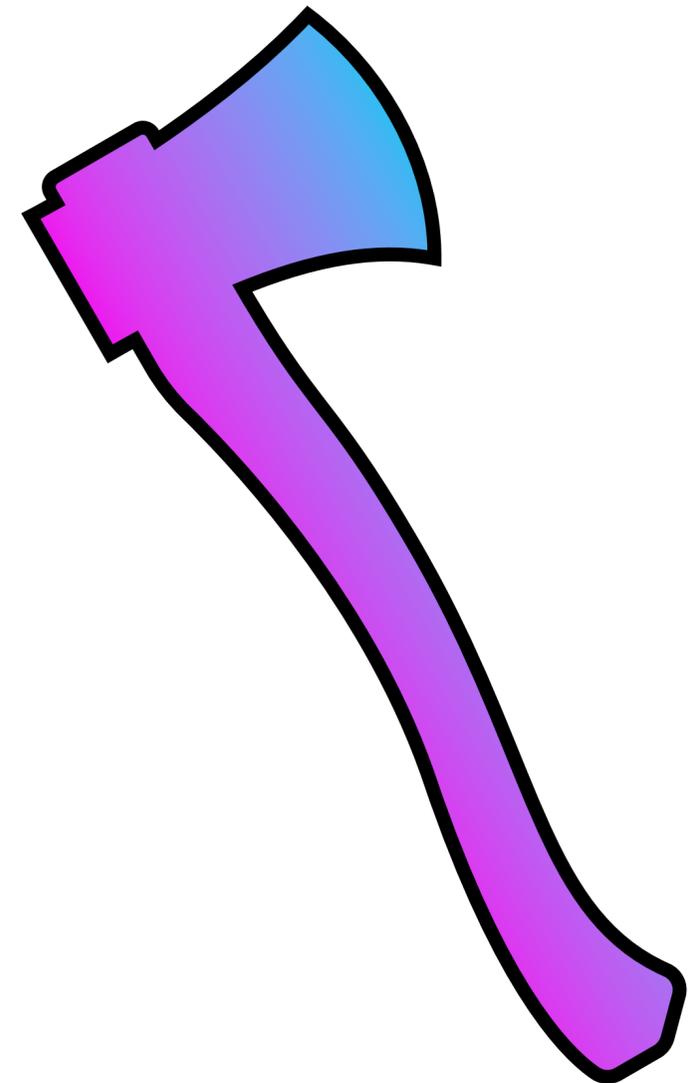
Аналитическая модель для ШАЛ. Адронные ливни – оценка



Заключение.

Основные результаты

- Модель позволяет оценивать δN_μ в зависимости от выбранной модели фотоядерного сечения в широком диапазоне моделей
- Приемлемый результат как для фотонных, так и для протонных ШАЛ
- Разработан грубый инструмент для быстрой оценки результата – можно легко обрубать бесперспективные модели. Детальный анализ – следующий шаг!



Backup

