

Модели фотоядерного сечения при высоких энергиях и содержание мюонов в ШАЛ

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова / г. Москва, 17.02.2025

Н.С. Мартыненко^{1, 2} Г.И. Рубцов^{2, 1} С.В. Троицкий^{2, 1}

¹Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

²Институт Ядерных Исследований РАН

Мюонный избыток

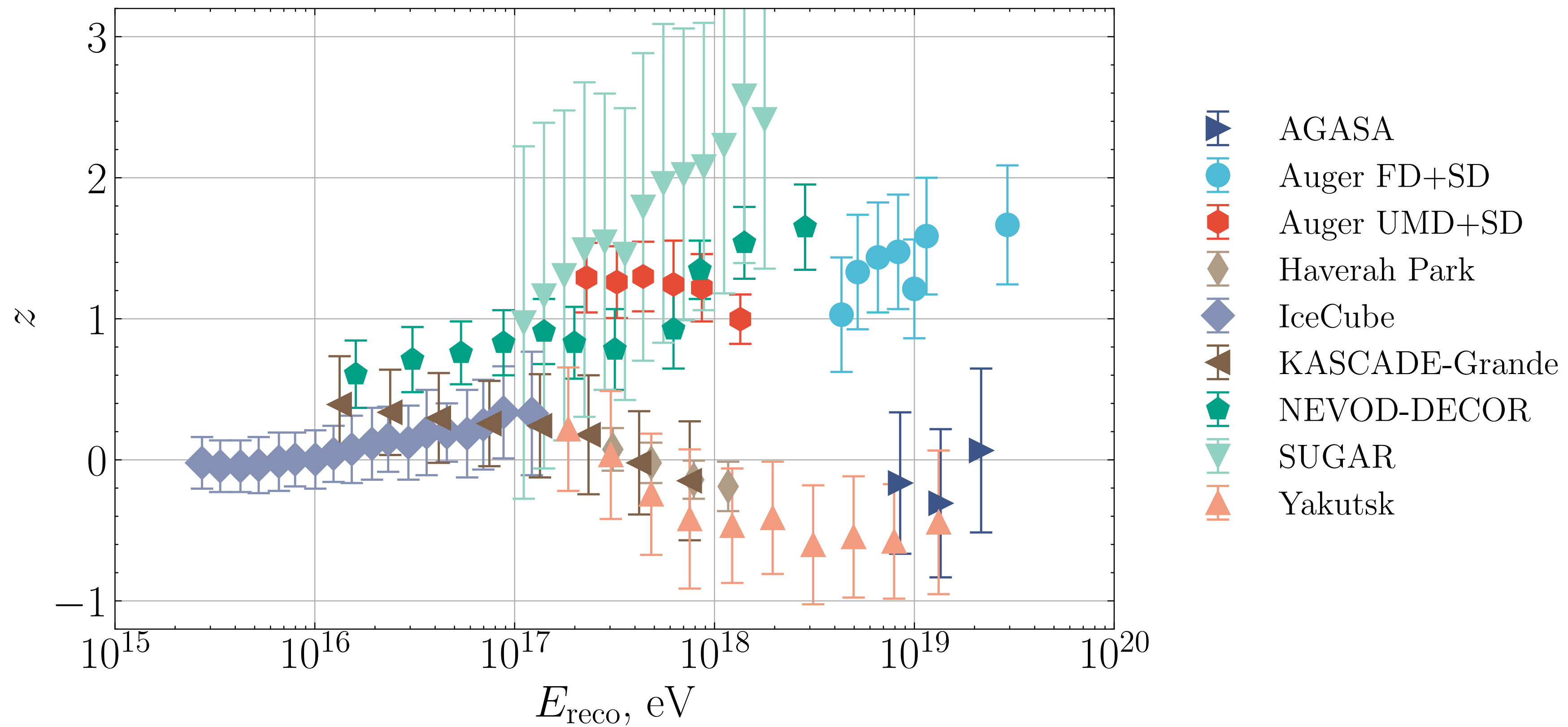
z-мера содержания мюонов в ШАЛ

$$z = \frac{\ln \langle N_{\mu}^{\text{observed}} \rangle - \ln \langle N_{\mu}^{\text{expected}, p} \rangle}{\ln \langle N_{\mu}^{\text{expected}, \text{Fe}} \rangle - \ln \langle N_{\mu}^{\text{expected}, p} \rangle}$$

При любом разумном химическом составе первичных частиц ожидается $0 \leq z \leq 1$

Мюонный избыток

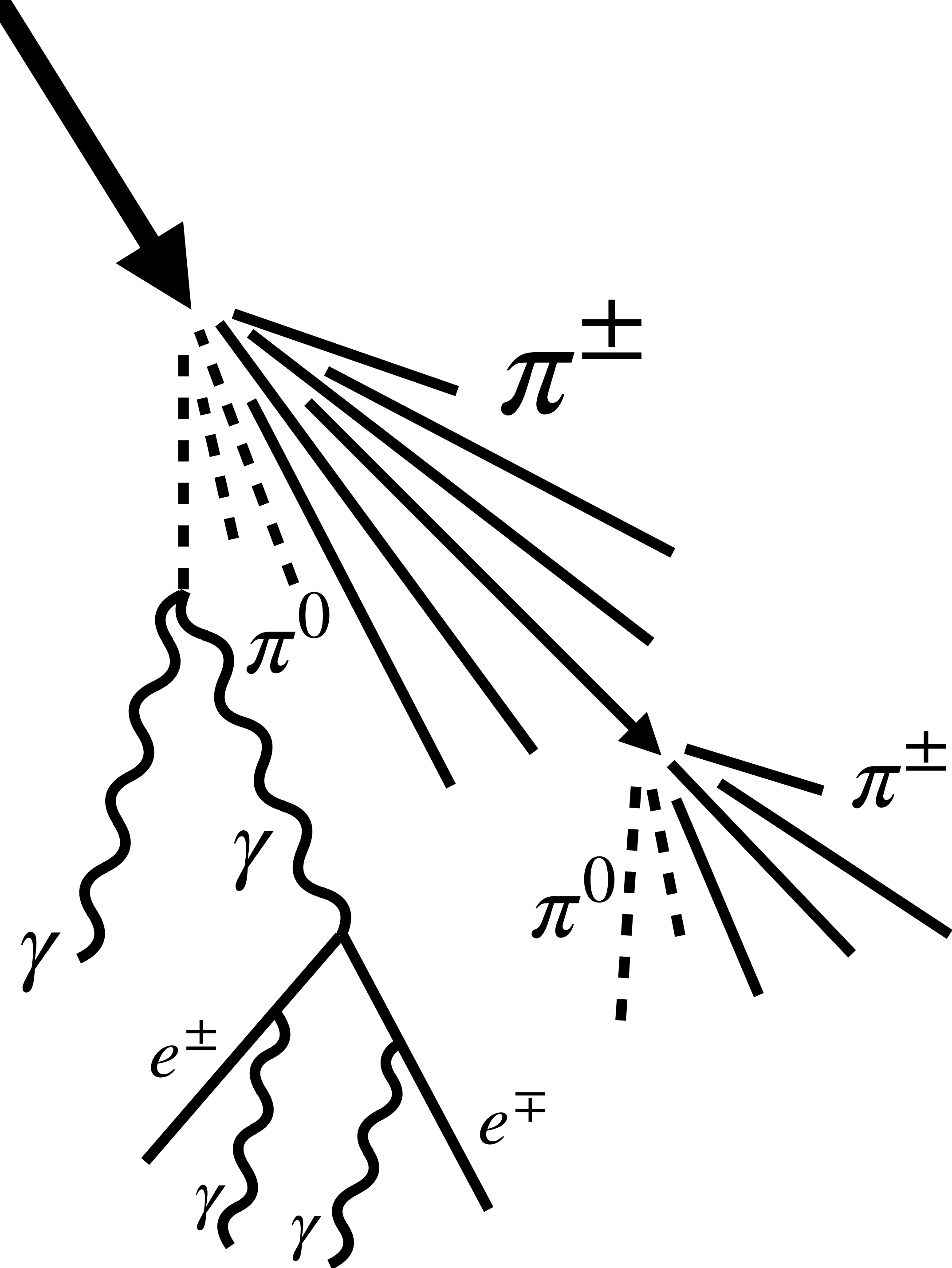
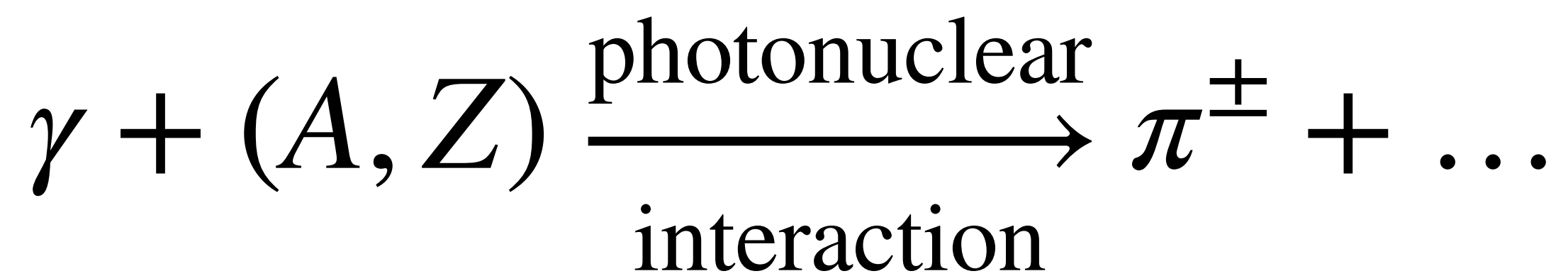
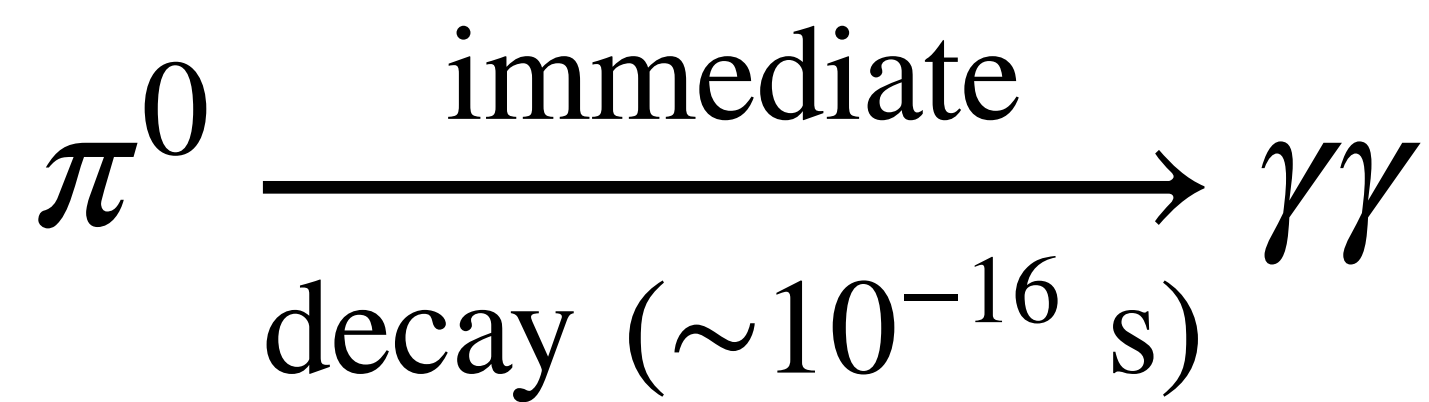
см. детальнее в докладе А.К. Шарофеева



данные: WHISP Collaboration, ICRC'2023; график: Н.С. Мартыенко

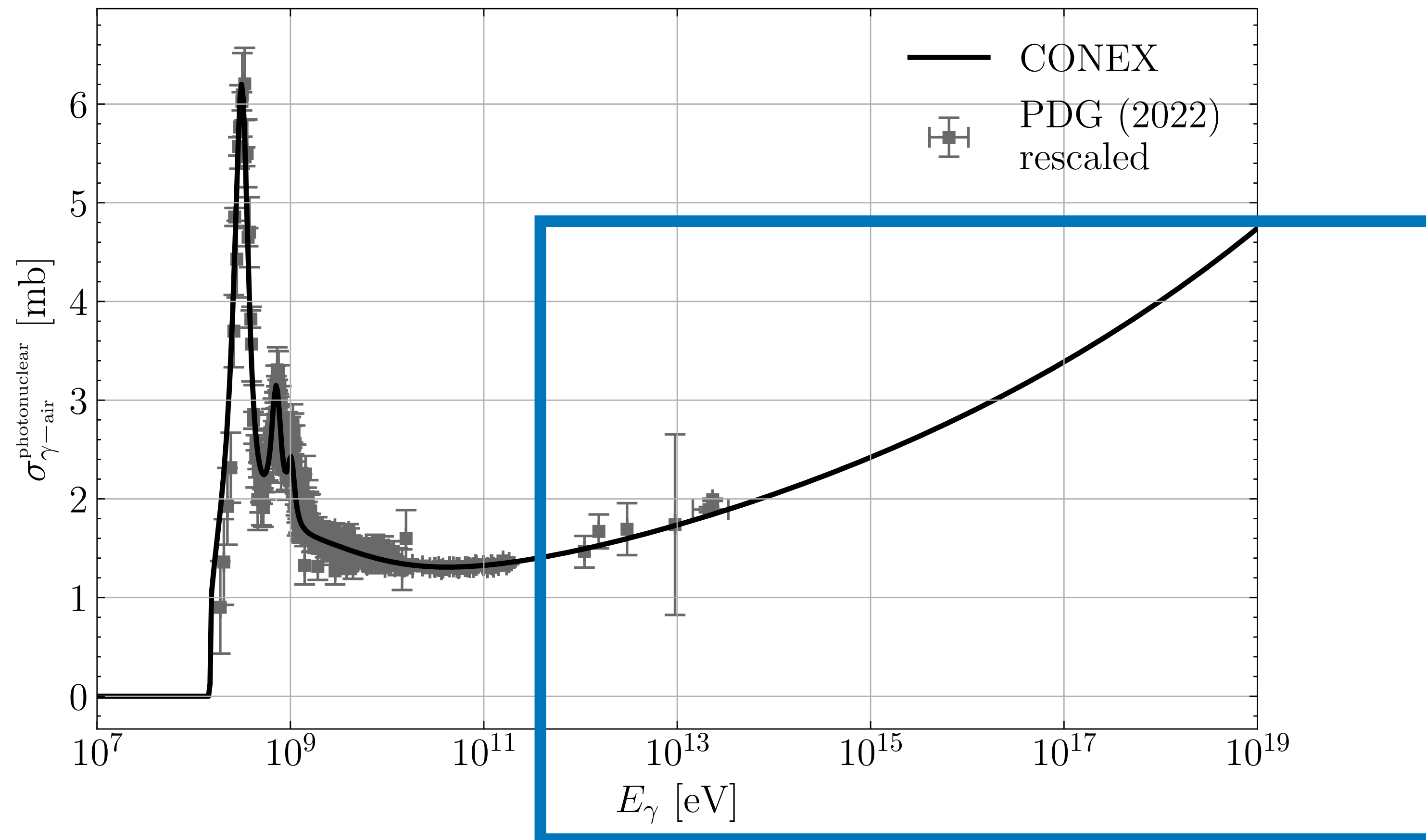
Фотоядерный процесс

субдоминантный источник мюонов



Фотоядерное сечение

в области высоких энергий ограничения слабые!



данные: Particle Data Group (2022); график: Н.С. Мартыненко

Фотоядерное сечение и число мюонов

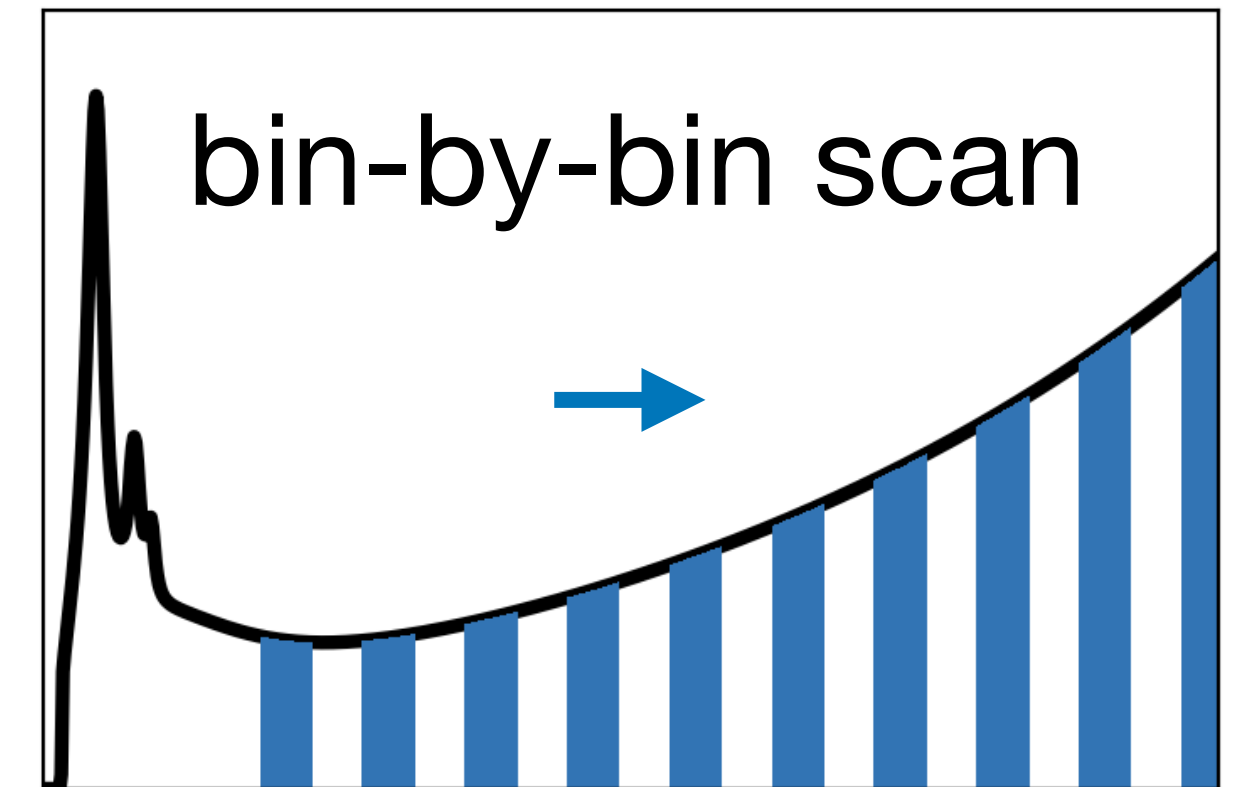
как оценить связь и чем можно пожертвовать?

- **3D MC** = трехмерные Монте-Карло симуляции ШАЛ (CORSIKA) — детальный анализ, но очень долго
- **1D MC+CE** = одномерные Монте-Карло симуляции ШАЛ + каскадные уравнения (CONEX) — меньше деталей, однако всё ещё долго: у нас целый «зоопарк» не исключённых экспериментально моделей!
- **1D semi-analytical** = изучим фотонные ливни отдельно с помощью 1D MC+CE, а затем оценим свойства таких суб-ливней в адронном ШАЛ — совсем мало деталей, но возможен широкий анализ!

Фотоядерное сечение и число мюонов

фит симуляций CONEX аналитической моделью

$$\frac{dN_{\mu}}{d \ln E_{\gamma}} = \frac{\sigma_{\text{air-}\gamma}^{\text{photonuclear}}(E_{\gamma})}{\text{mbarn}} \cdot \mathcal{N}(E, E_{\gamma}) \cdot \mathcal{P}(E, E_{\gamma}, X)$$

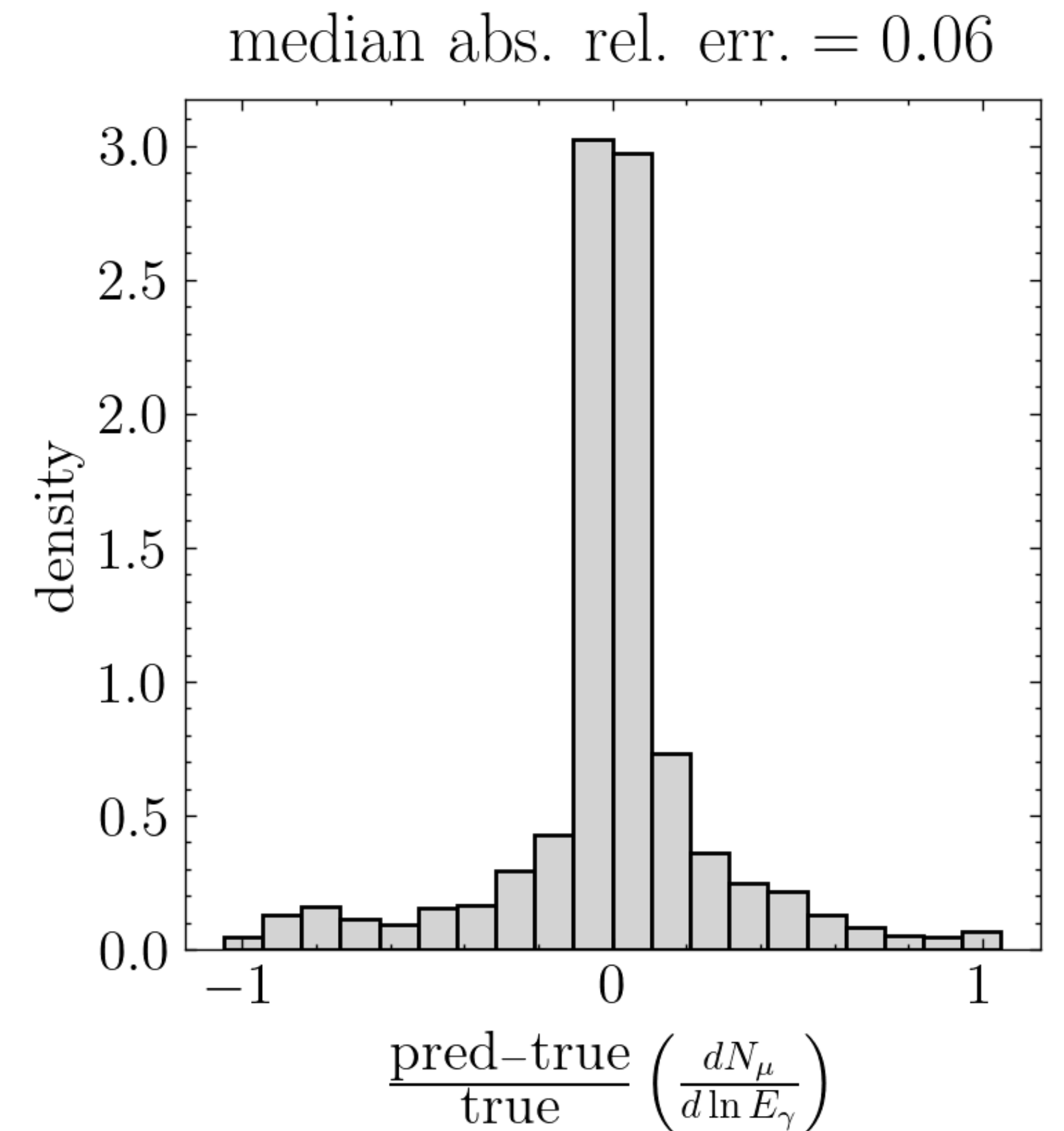
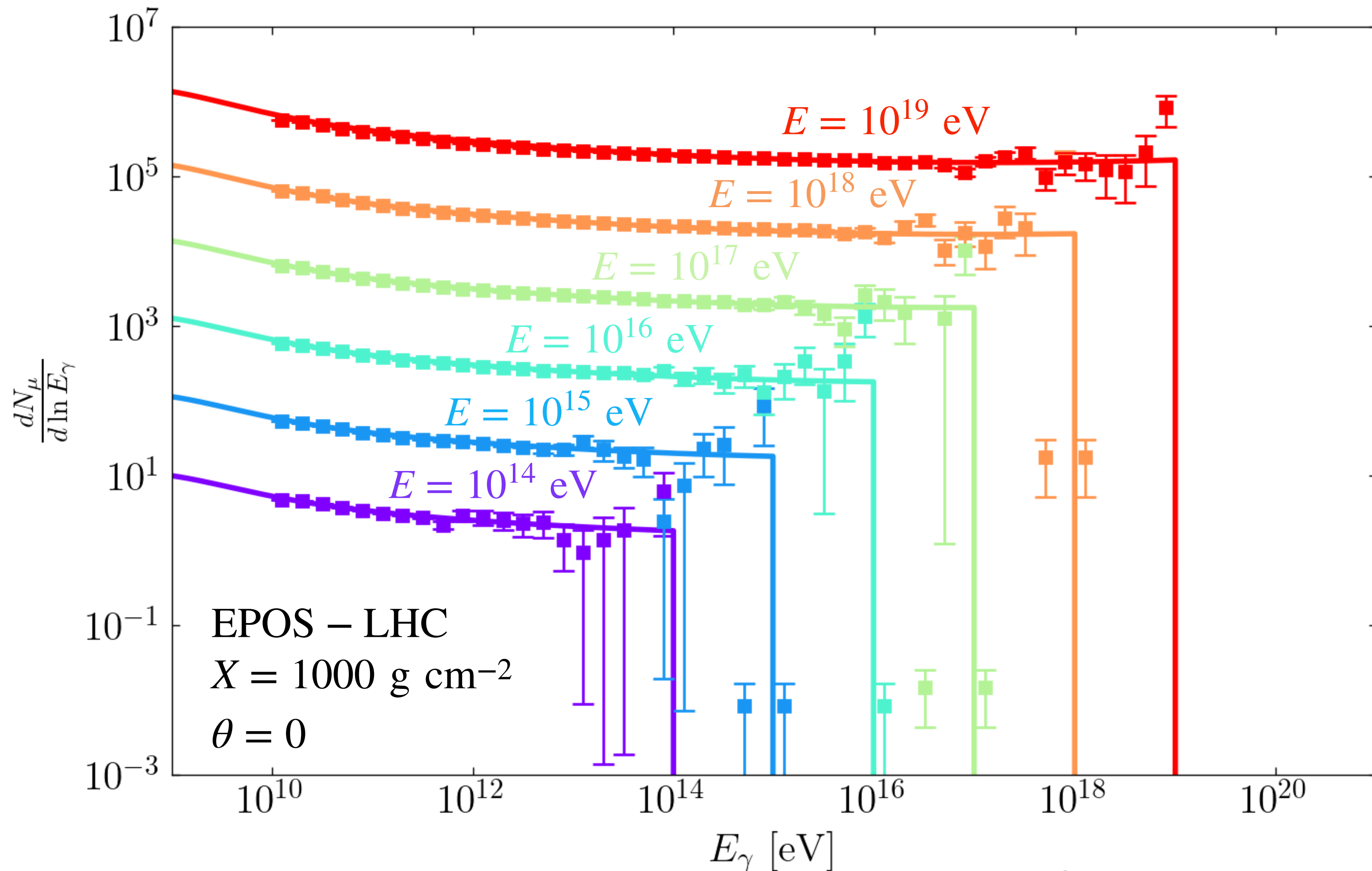


$$\mathcal{N}(E, E_{\gamma}) = \mathcal{H}(E - E_{\gamma}) \cdot \mathcal{N}_0 \cdot \left[\frac{E}{\text{eV}} \right]^{\beta} \cdot \left[\frac{E_{\gamma}}{\text{eV}} \right]^{\beta_{\gamma,1} + \beta_{\gamma,2} \cdot \ln \left[\frac{E_{\gamma}}{\text{eV}} \right]} \quad \mathcal{P}(E, E_{\gamma}, X) = \left[\frac{X}{X_{\mu, \max}} \right]^{\frac{X_{\mu, \max}}{\Lambda}} \exp \left[\frac{X_{\mu, \max} - X}{\Lambda} \right]$$

$$X_{\mu, \max} = x_0 + x \ln \left[\frac{E}{\text{eV}} \right] + x_{\gamma} \ln \left[\frac{E_{\gamma}}{\text{eV}} \right] \quad \Lambda = \sum_{k=0,1,2} \left(\lambda_{k,0} + \lambda_{k,\gamma} \ln \left[\frac{E_{\gamma}}{\text{eV}} \right] \right) \cdot \left[\frac{X}{X_{\mu, \max}} \right]^k$$

Фотоядерное сечение и число мюонов

фит симуляций CONEX аналитической моделью: результат



Адронные ШАЛ

фотонные суб-ливни в (обобщенной)
модели Heitler – Matthews

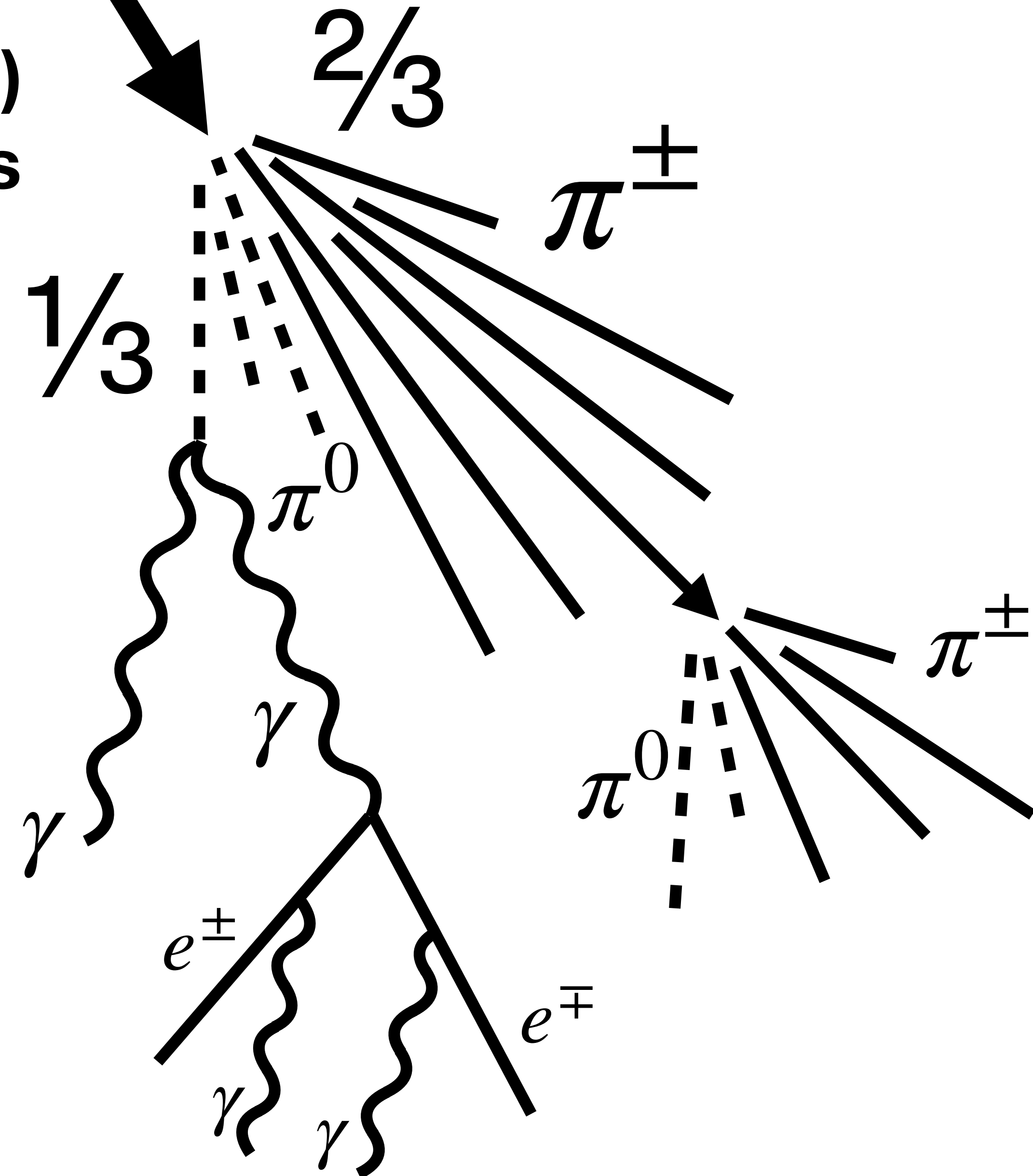
$$\lambda(E_\pi) = [\sigma_{\pi\text{-air}}^{\text{inel}}(E_\pi)]^{-1} m_{\text{air}}$$

$$d \ln E_\pi = - \ln[\mathcal{M}(E_\pi)] \lambda(E_\pi)^{-1} dX$$

$$d \ln N_{\pi^\pm} = + \ln \left[\frac{2}{3} \mathcal{M}(E_\pi) \right] \lambda(E_\pi)^{-1} dX$$

и приближение суперпозиции:

$$(A, Z) \Leftrightarrow p \times (A \text{ шт.})$$

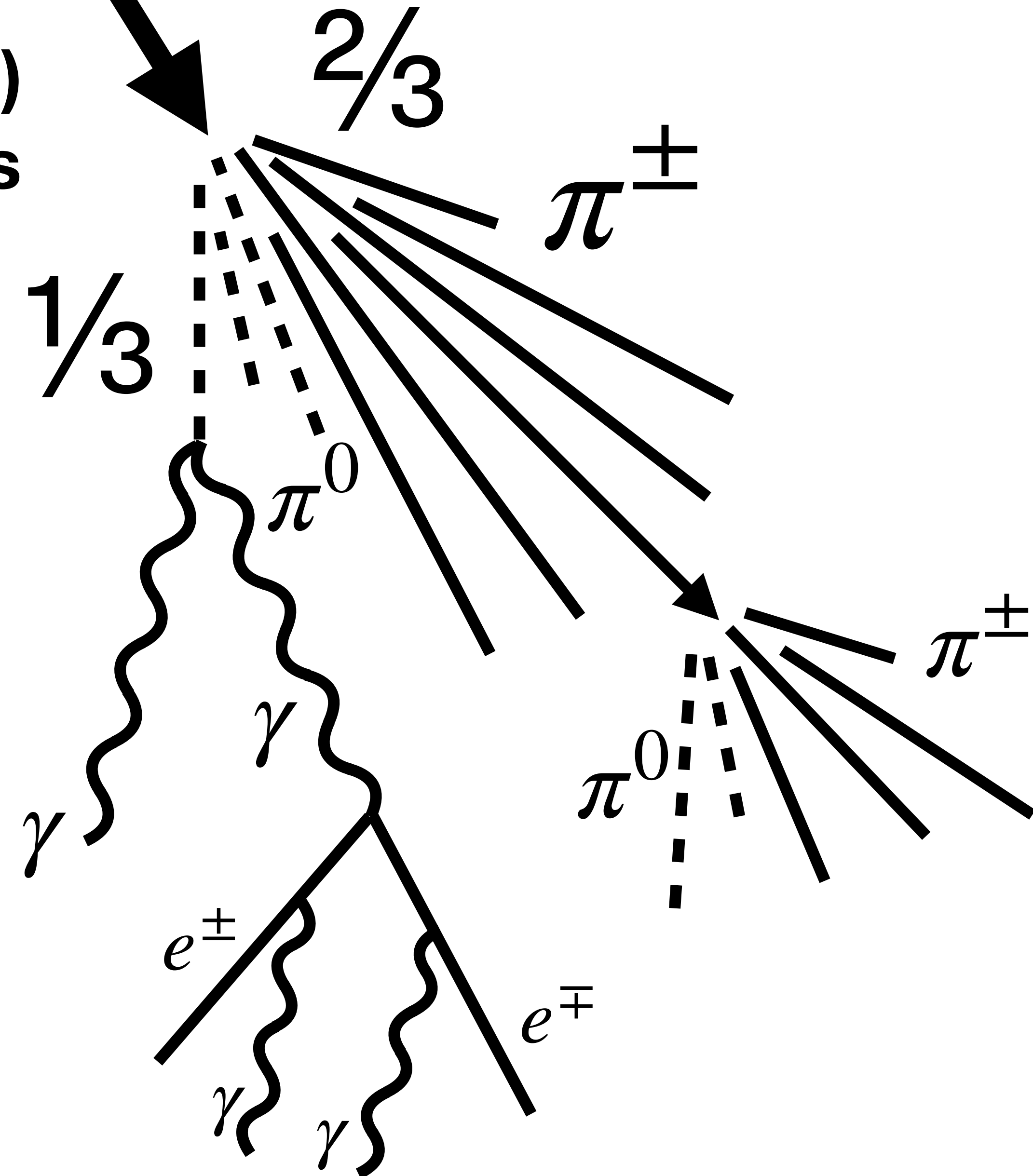


Адронные ШАЛ

фотонные суб-ливни в (обобщенной)
модели Heitler – Matthews

$$dN_\gamma = - \frac{d(N_{\pi^\pm} E_\pi)}{E}; \quad E = \frac{1}{2} E_\pi$$

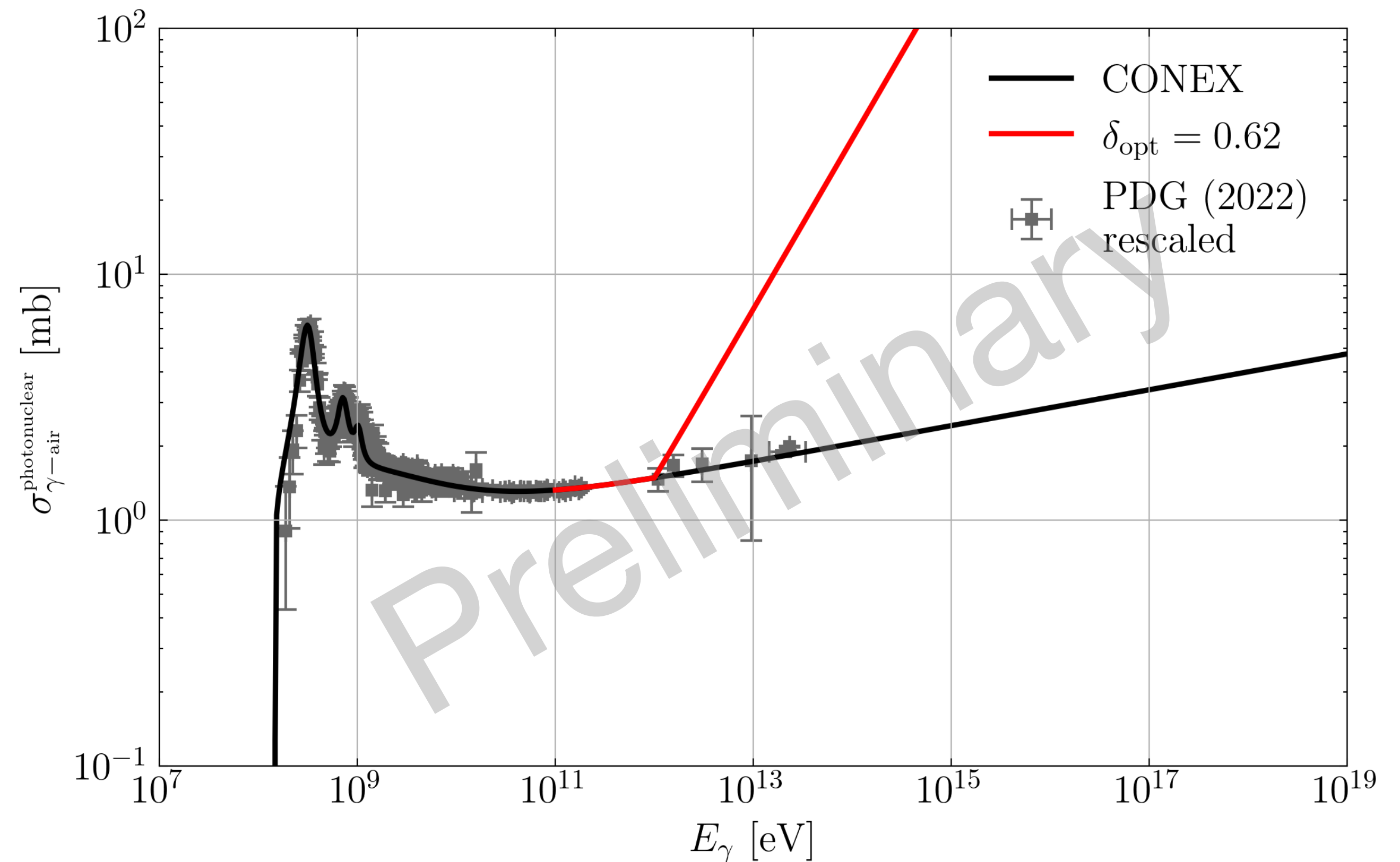
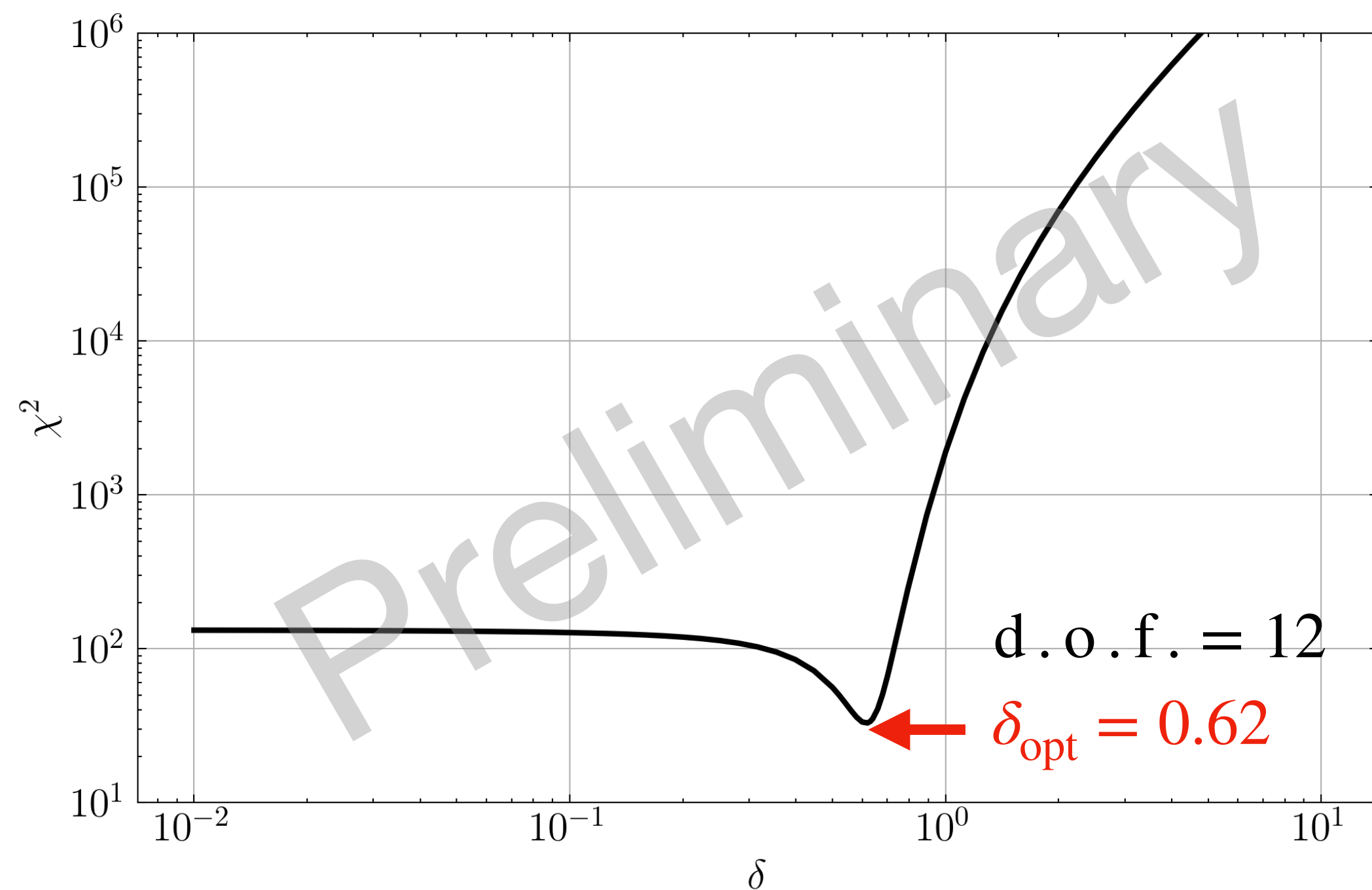
$$\int_{X_0}^{X_{\text{obs}}} dN_\gamma(X) \cdot \int_{\ln E_{\text{thr}}}^{\ln E} d \ln E_\gamma \frac{dN_\mu}{d \ln E_\gamma} (E, E_\gamma, X_{\text{obs}} - X)$$



Адронные ШАЛ: данные Pierre Auger

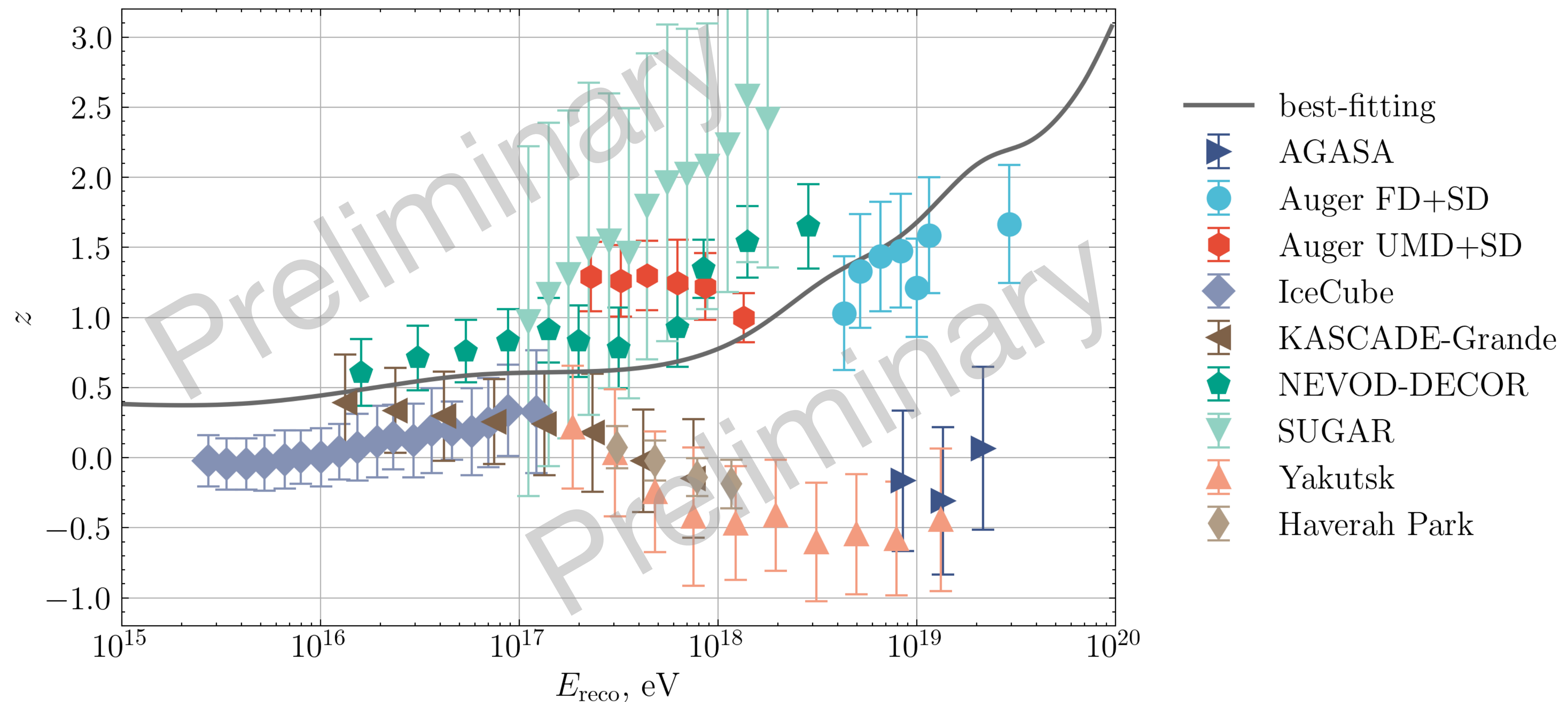
предварительный результат

рассматриваем класс модификаций вида $\times (s / s_{\text{thr}})^\delta$



Адронные ШАЛ: данные Pierre Auger

предварительный результат



Заключительные комментарии

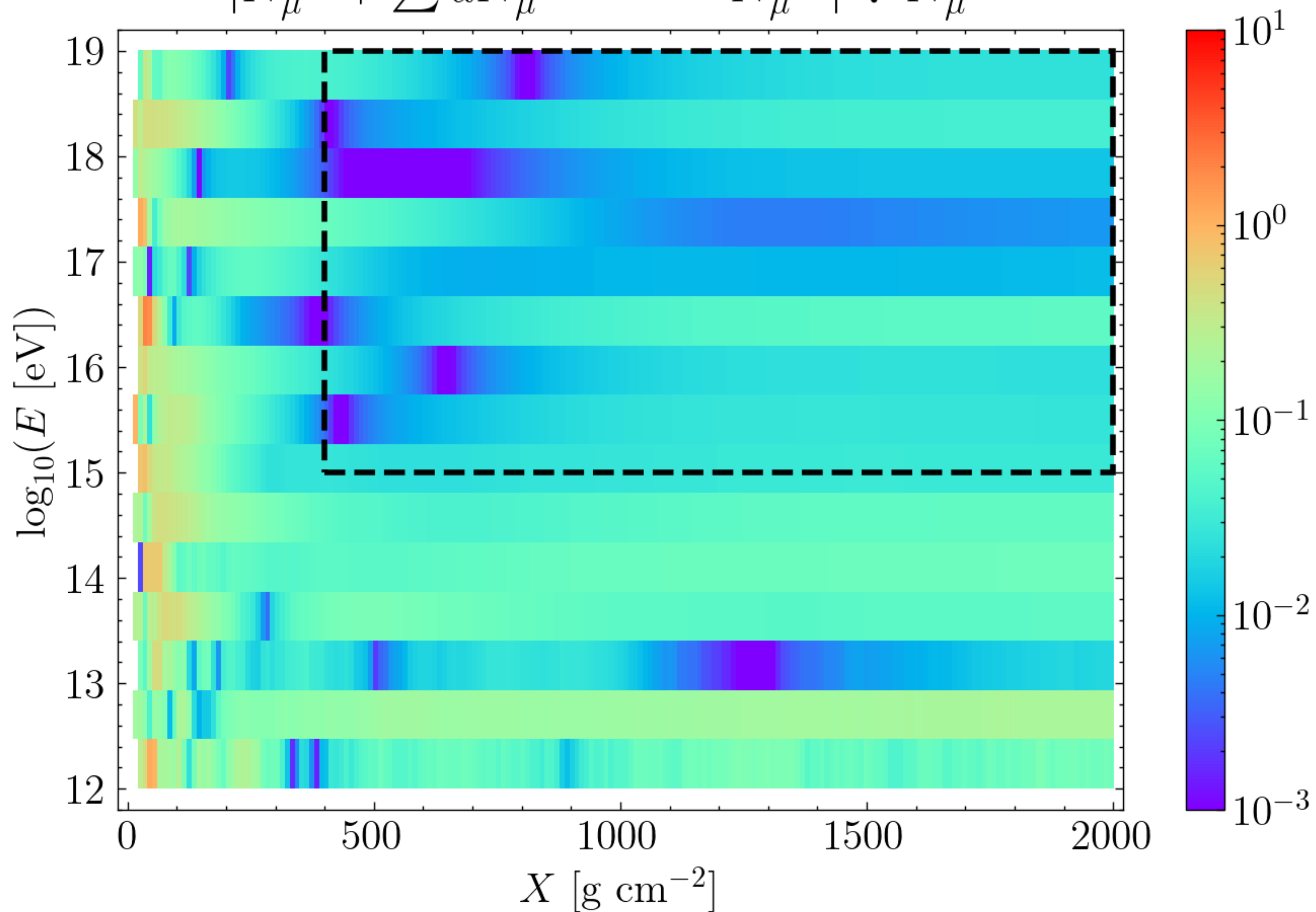
о «фотоядерных» мюонах в ШАЛ

- для **1D MC+CE**: $\mathcal{O}(2...5)$ [sec · EAS⁻¹] · N_{EAS} · $N_{\text{param grid}}$, тогда как для **1D semi-analytical**: $\mathcal{O}(1...2)$ sec · $N_{\text{param grid}}$ — **выигрыш в скорости**
- мюонная проблема при разумных модификациях не решается
- (очень слабое) экспериментальное верхнее ограничение фотоядерного сечения на высоких энергиях
- спектр «дополнительных» мюонов?

Васкир

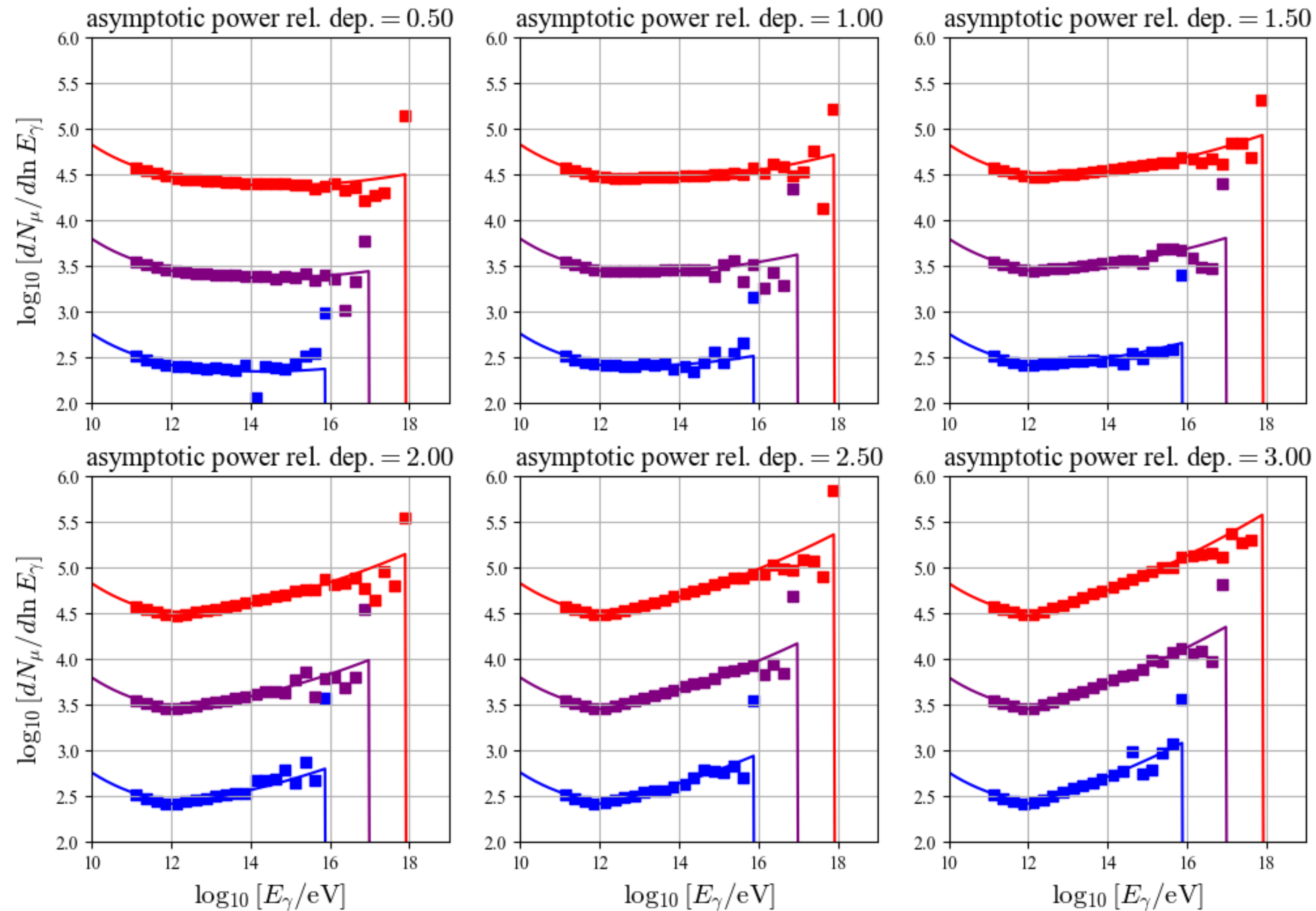
валидация линейности модели при сканировании по dE_γ

$$\left| N_\mu^{\text{pair}} + \sum dN_\mu^{\text{photonuclear}} - N_\mu^{\text{total}} \right| \div N_\mu^{\text{total}}$$



Васкир

валидация модели при различных фотоядерных сечениях



EPOS – LHC
 $X = 1000 \text{ g cm}^{-2}$
 $\theta = \frac{\pi}{6}$