

Фотоядерные реакции (ФЯР) высоких энергий и мюоны в ШАЛ

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН / 10–13 марта 2026, Новосибирск

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

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-12-00333).
Докладчик выражает благодарность фонду «Базис» за стипендию №24-2-10-39-1

Введение / *Метод* / *Результаты* / *Заключение*

- проблема мюонного избытка в ШАЛ*
- сечение ФЯР при высоких энергиях: статус*
- вклад ФЯР в число мюонов в ШАЛ*

Мотивация работы: проблема мюонного избытка

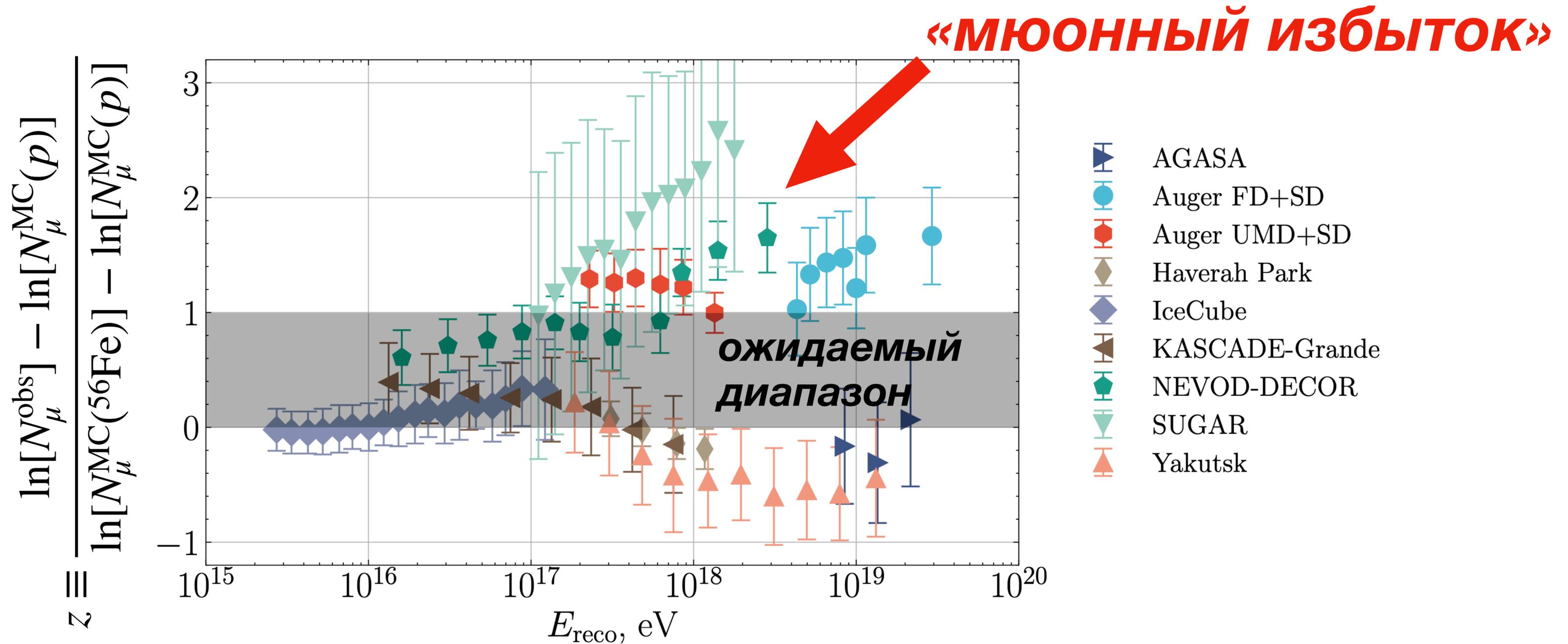
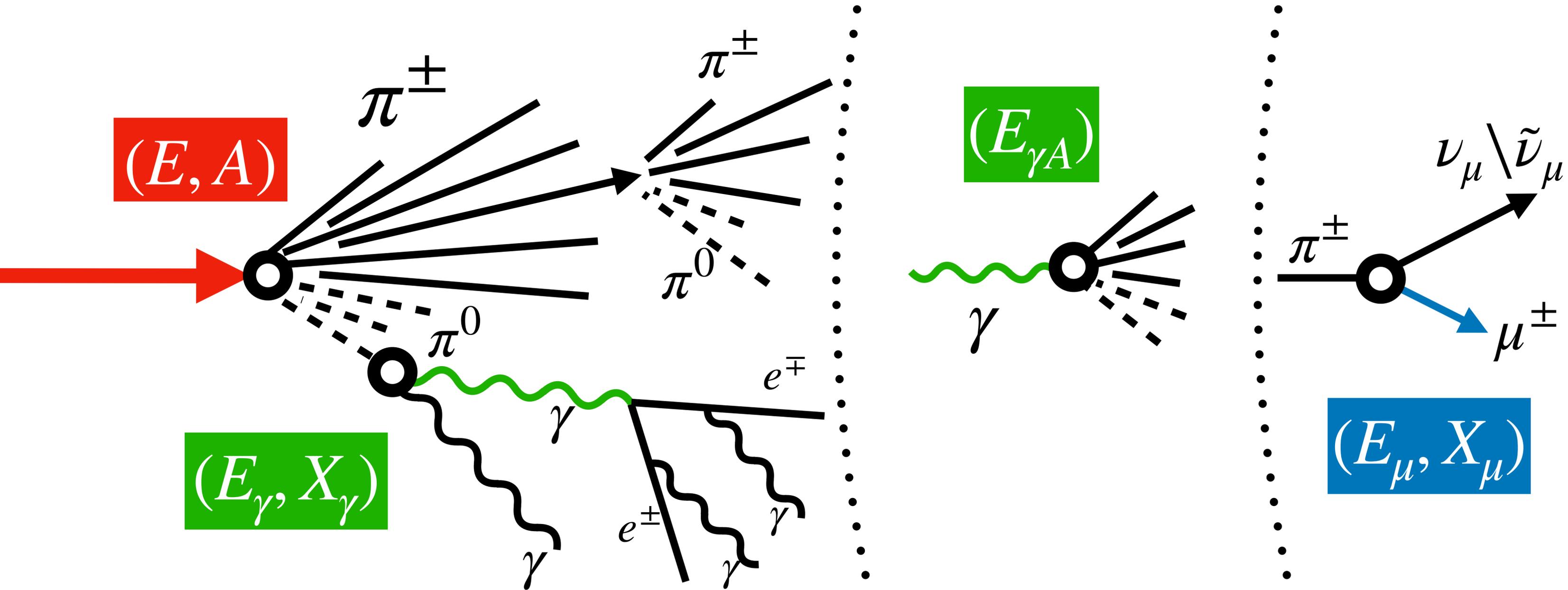
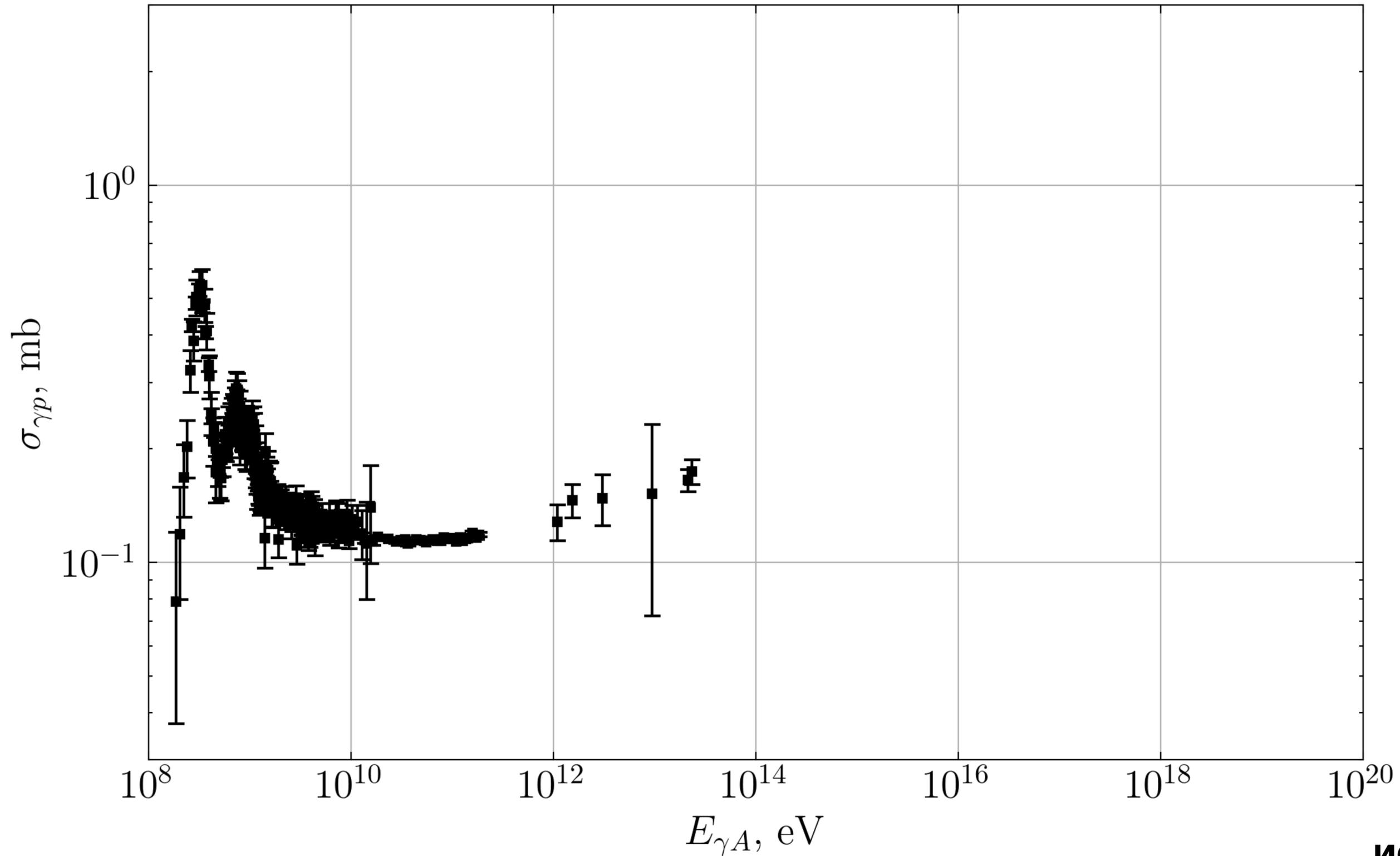


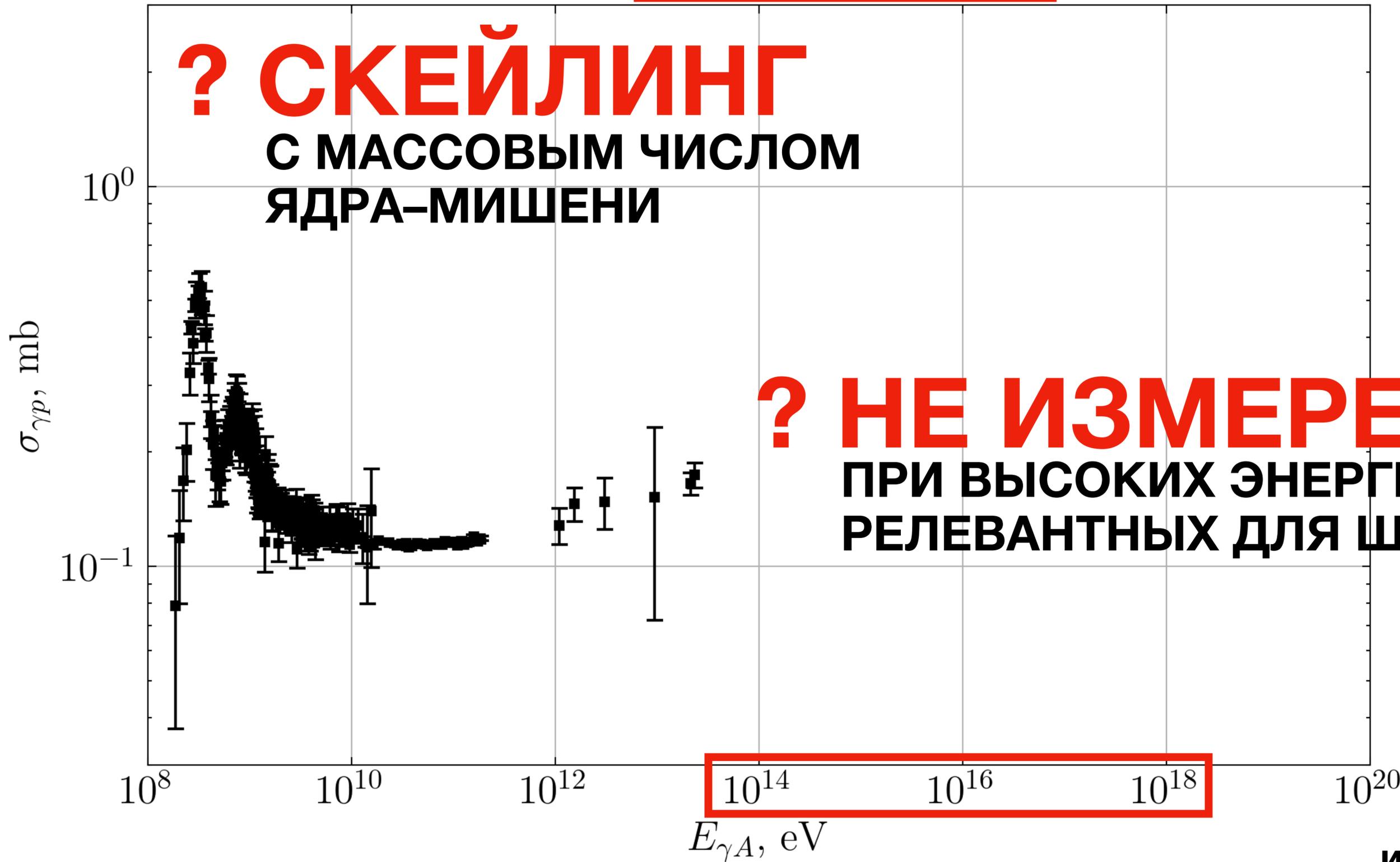
Схема вклада ФЯР в число мюонов в ШАЛ. Ключевые этапы и параметры



Сечение ФЯР: измерения для протонной мишени



Сечение ФЯР: измерения для **протонной мишени**



? СКЕЙЛИНГ
С МАССОВЫМ ЧИСЛОМ
ЯДРА-МИШЕНИ

? НЕ ИЗМЕРЕНО
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ,
РЕЛЕВАНТНЫХ ДЛЯ ШАЛ

/ Метод / Результаты / Заключение

- построение линейной по сечению ФЯР модели***
- параметризация и фит под симуляции CONEX***
- валидация метода на тестовых симуляциях***

Метод оценки вклада систематической ошибки ФЯР в ошибку N_μ

$$\frac{dN_\gamma}{d \ln E_\gamma dX_\gamma}$$

Распределение числа вторичных фотонов, образующих эл.-маг. каскады внутри адронных ШАЛ — функция $(E, A, E_\gamma, X_\gamma)$

$$\frac{dN'_{\mu(\leftarrow\gamma A)}}{d \ln E_{\gamma A}}$$

Распределение числа мюонов на данной глубине, родившихся в результате (пра)^Nродительской ФЯР — функция $\Gamma(E_\gamma, E_{\gamma A}, X_\mu - X_\gamma) \cdot \sigma_{\gamma A}(E_{\gamma A})$

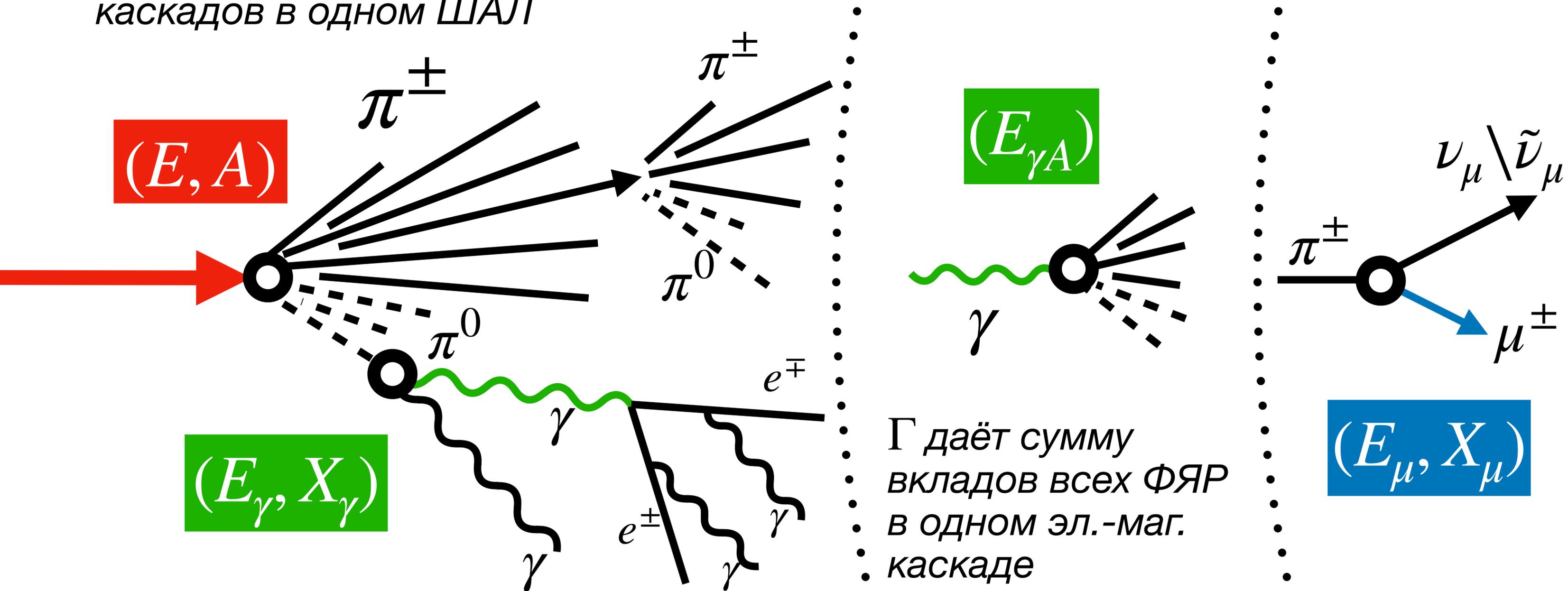
$$\frac{dN_{\mu(\leftarrow\gamma A)}}{d \ln E_{\gamma A}} = \int_{\ln E_{\gamma A}}^{\ln E} d \ln E_\gamma \int_0^{X_\mu} dX_\gamma \left[\frac{dN_\gamma}{d \ln E_\gamma dX_\gamma} \times \frac{dN'_{\mu(\leftarrow\gamma A)}}{d \ln E_{\gamma A}} \Big|_{X_\mu - X_\gamma} \right]$$

$$=: G(E, A, E_{\gamma A}, X_\mu) \cdot \sigma_{\gamma A}(E_\gamma)$$

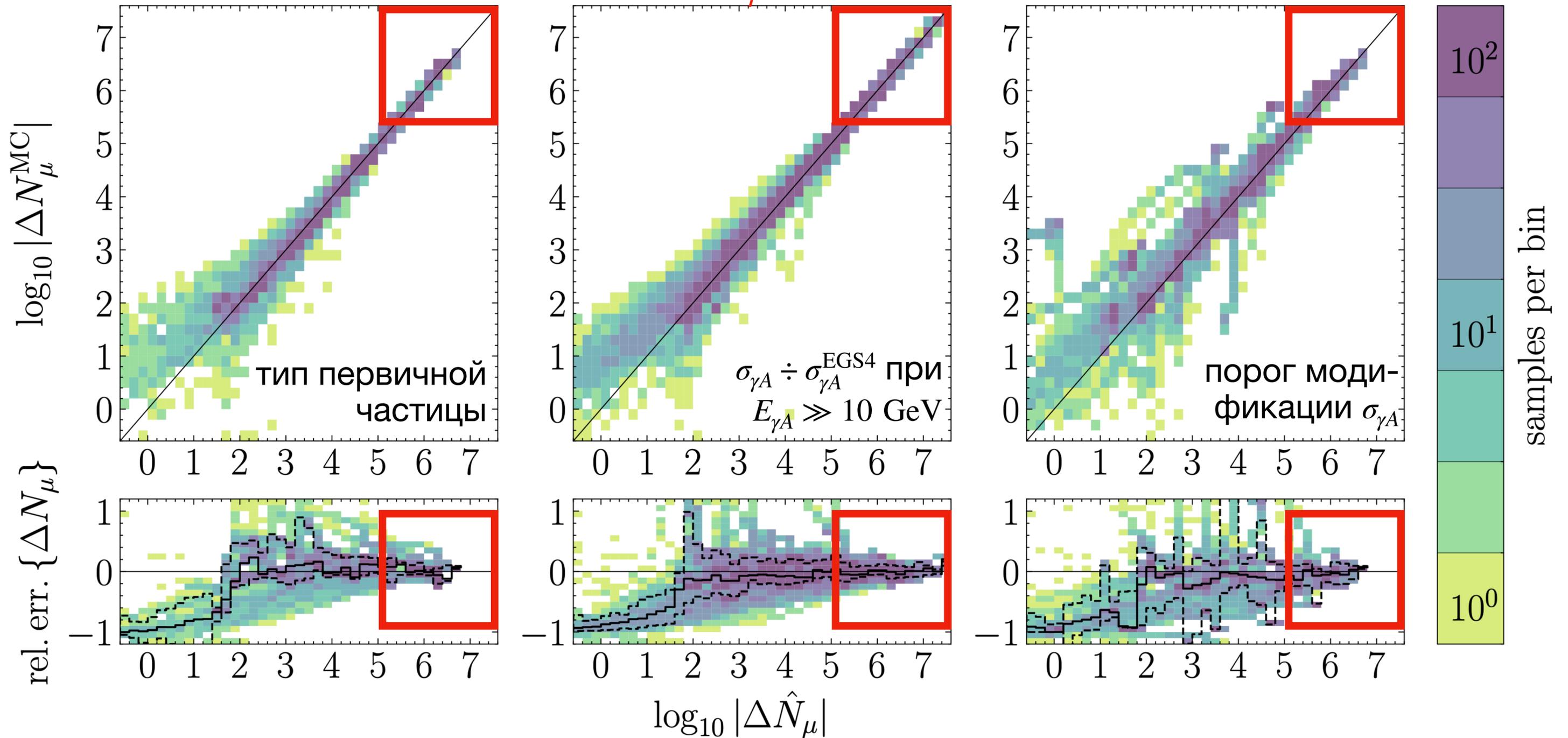
модель суперпозиции $\longrightarrow A \cdot G(E/A, 1, E_{\gamma A}, X_\mu) \cdot \sigma_{\gamma A}(E_\gamma)$

Метод оценки вклада систематической ошибки ФЯР в ошибку N_μ / Пояснение

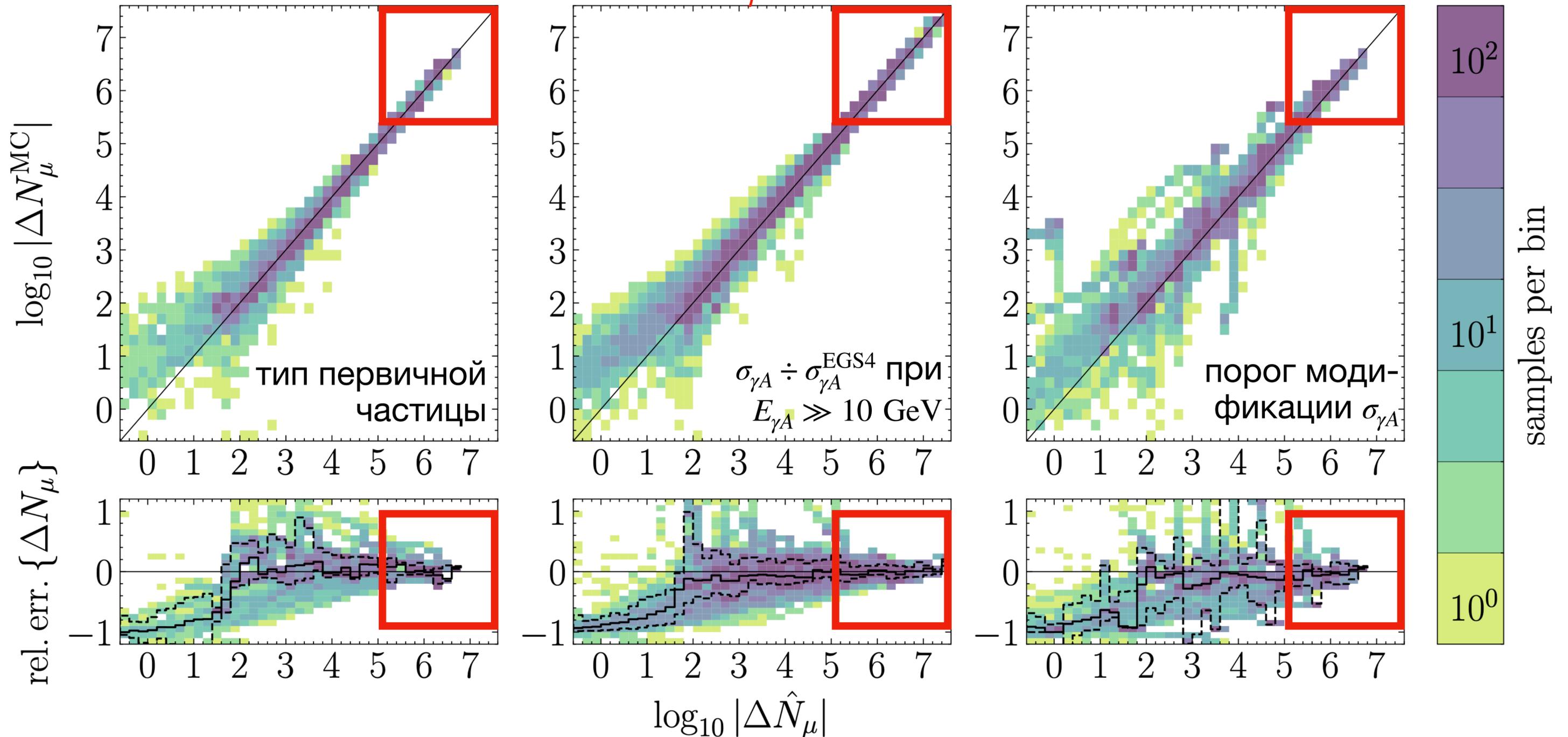
G даёт сумму вкладов всех эл.-маг. каскадов в одном ШАЛ



Метод оценки вклада систематической ошибки ФЯР в ошибку N_μ / Валидация
при больших ΔN_μ точность метода около 10–20%



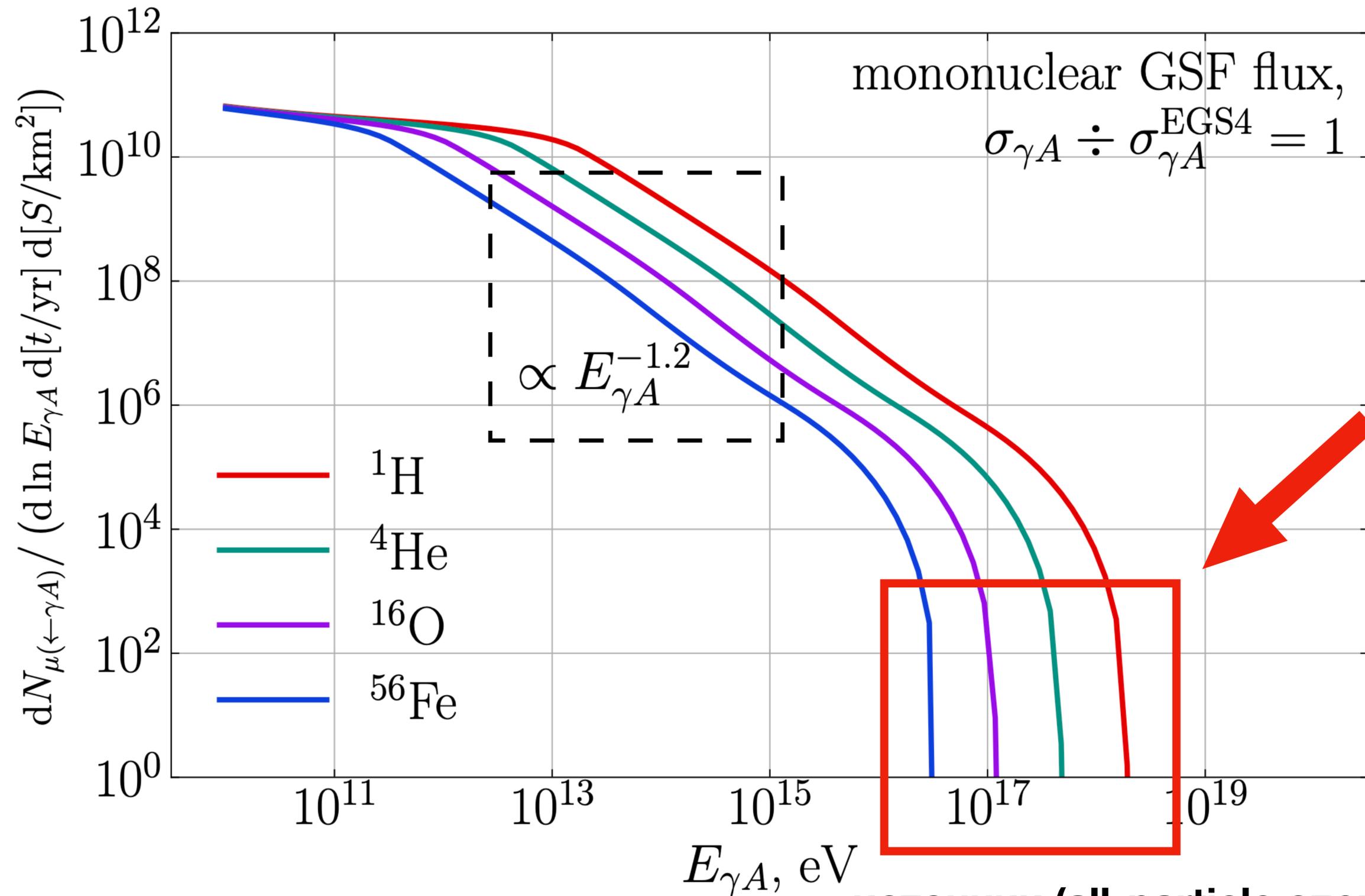
Метод оценки вклада систематической ошибки ФЯР в ошибку N_μ / Валидация
при больших ΔN_μ точность метода около 10–20%



/ Результаты / Заключение

- какие ФЯР дают потомство в адронных ШАЛ?*
- можно ли вылечить мюонный избыток?*
- поиск фотонов \neq поиск маломюонных событий!*

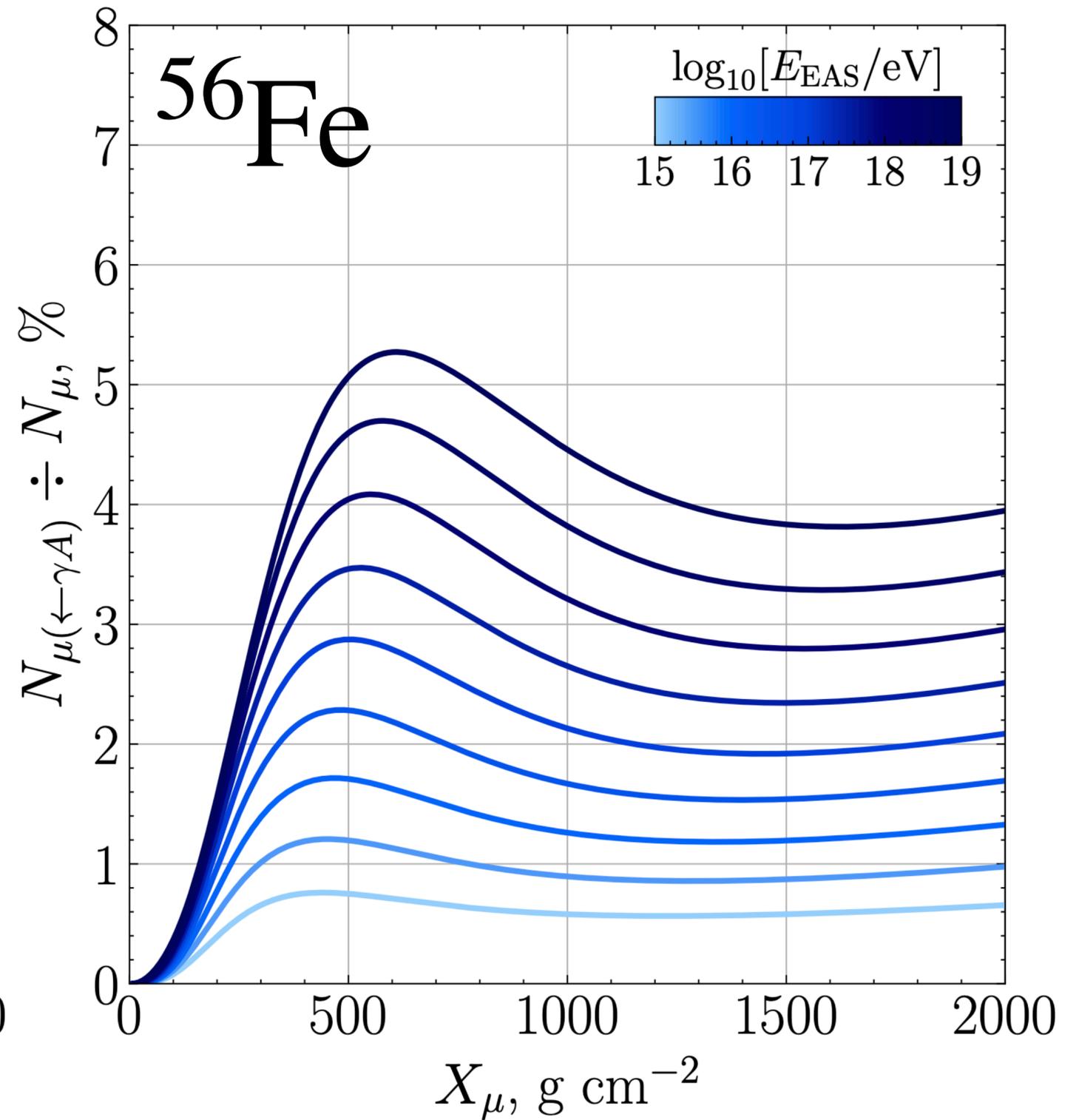
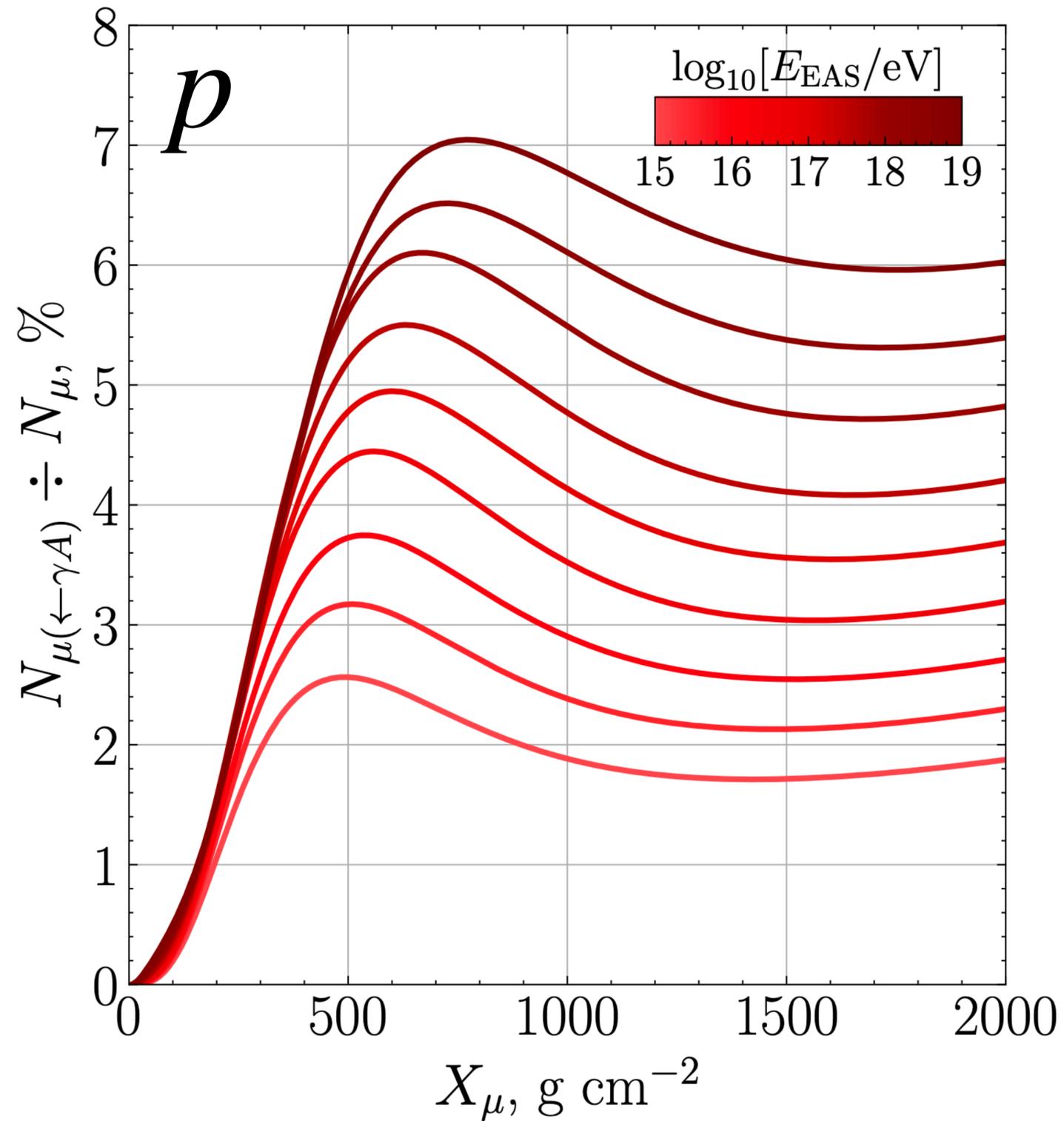
Распределение мюонов от ФЯРВЭ на глубине 1000 г см⁻²



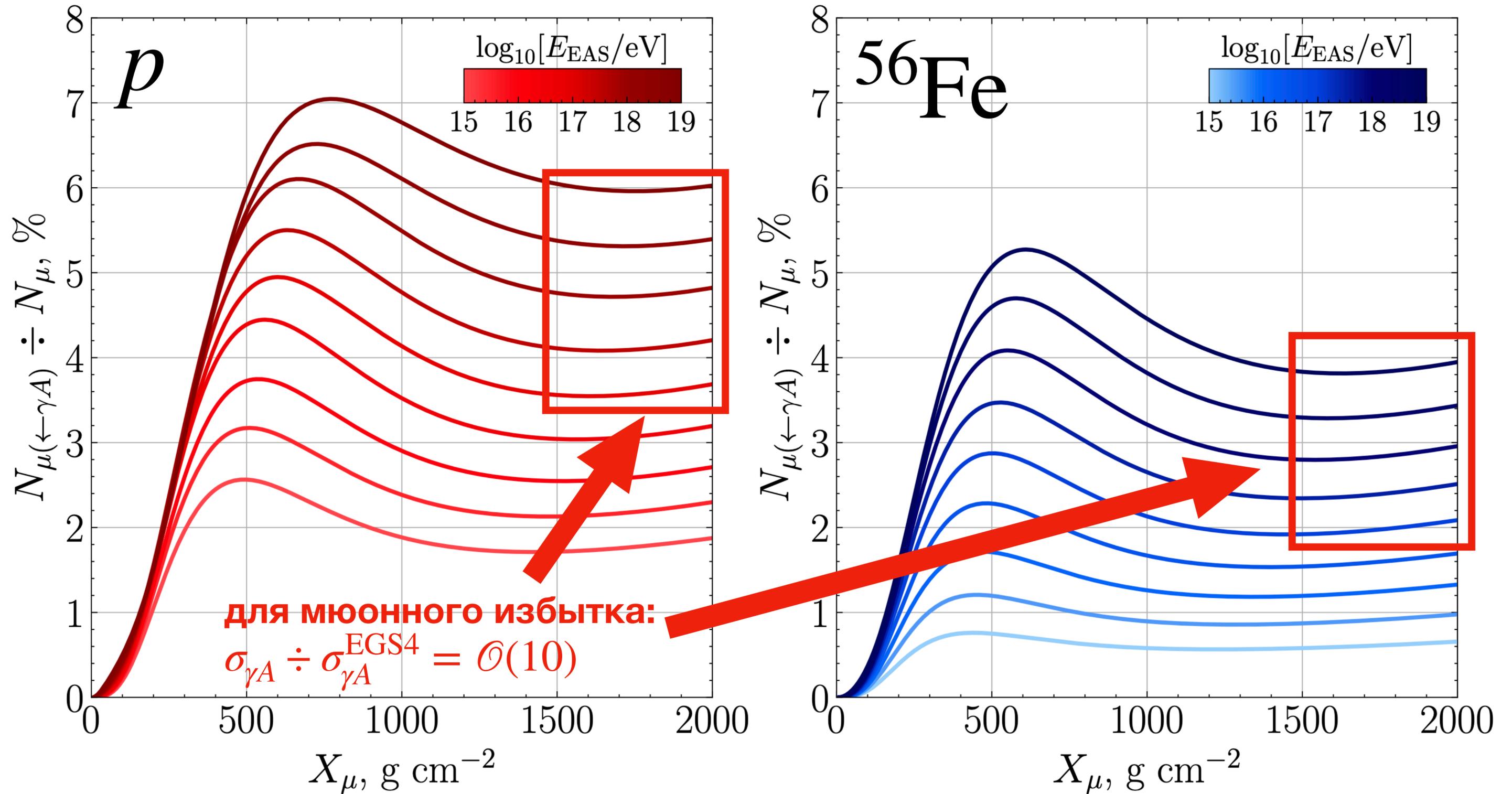
При любых разумных моделях сечения ФЯР не продвинемся по энергии налетающего фотона дальше $\sim 10^{18}$ эВ

*Важно помнить, что восстанавливаемые спектр и состав КЛ зависят от сечения ФЯР

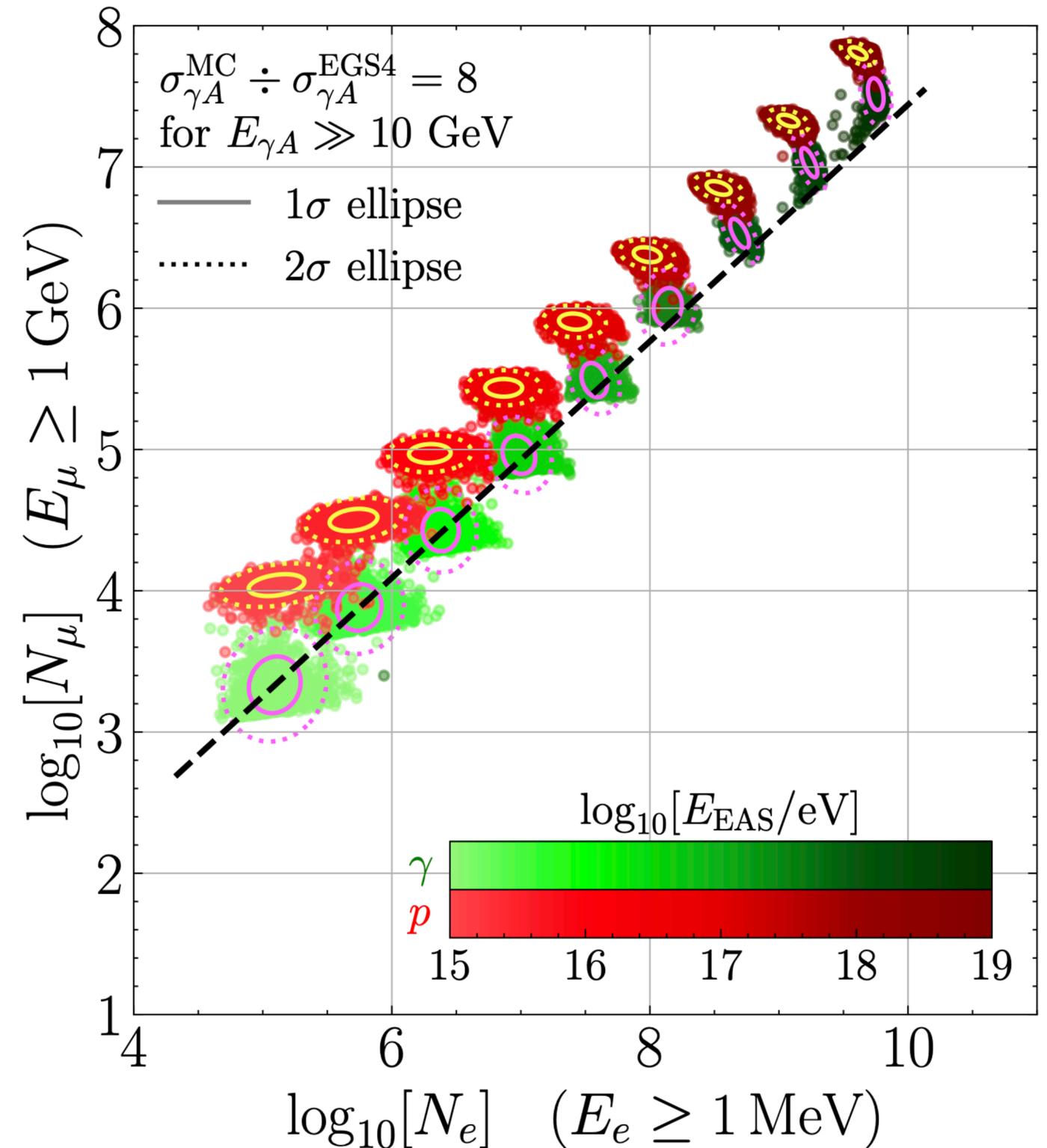
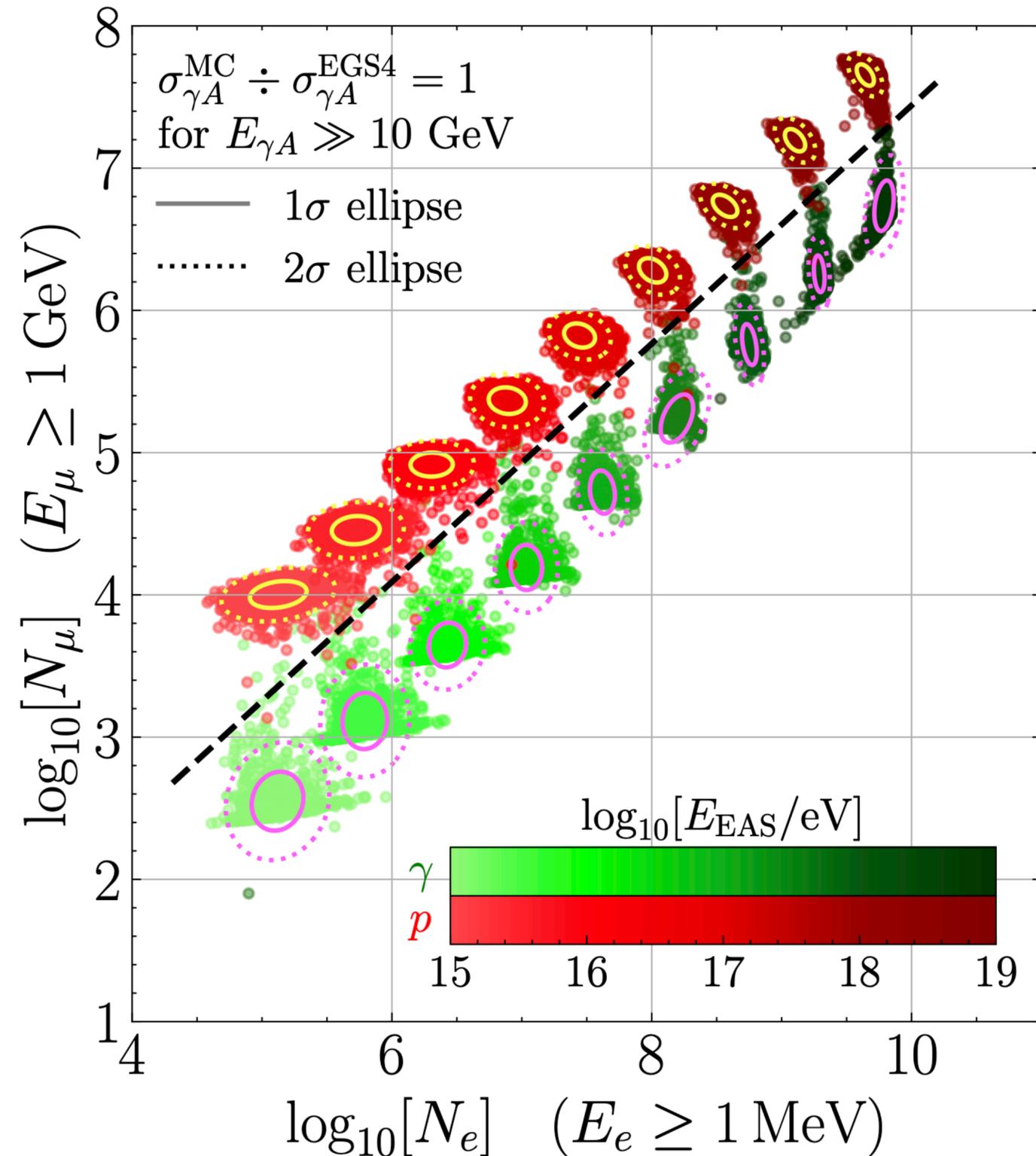
Профиль доли мюонов от ФЯРВЭ в адронных ШАЛ при $\sigma_{\gamma A} \div \sigma_{\gamma A}^{\text{EGS4}} = 1$



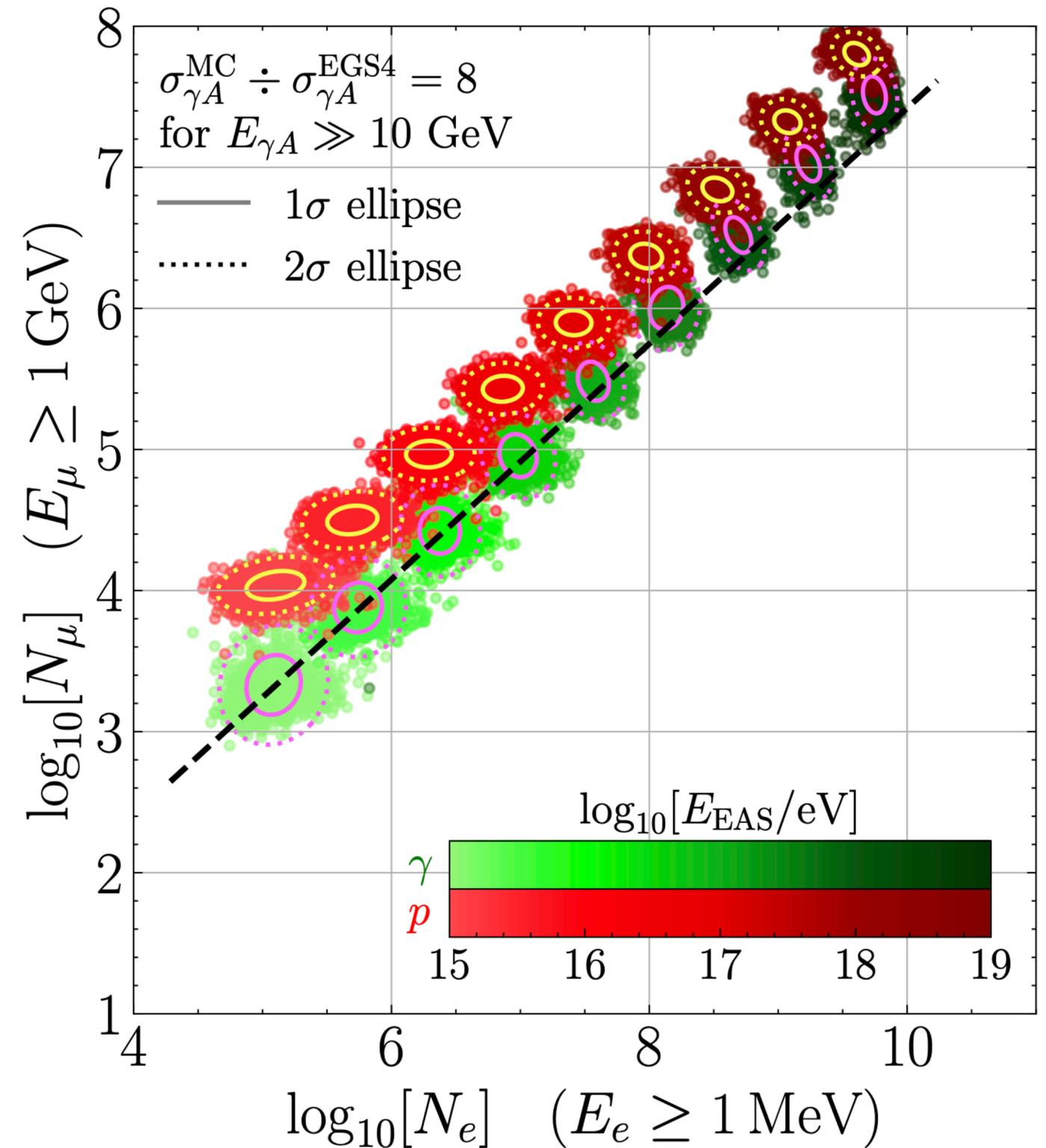
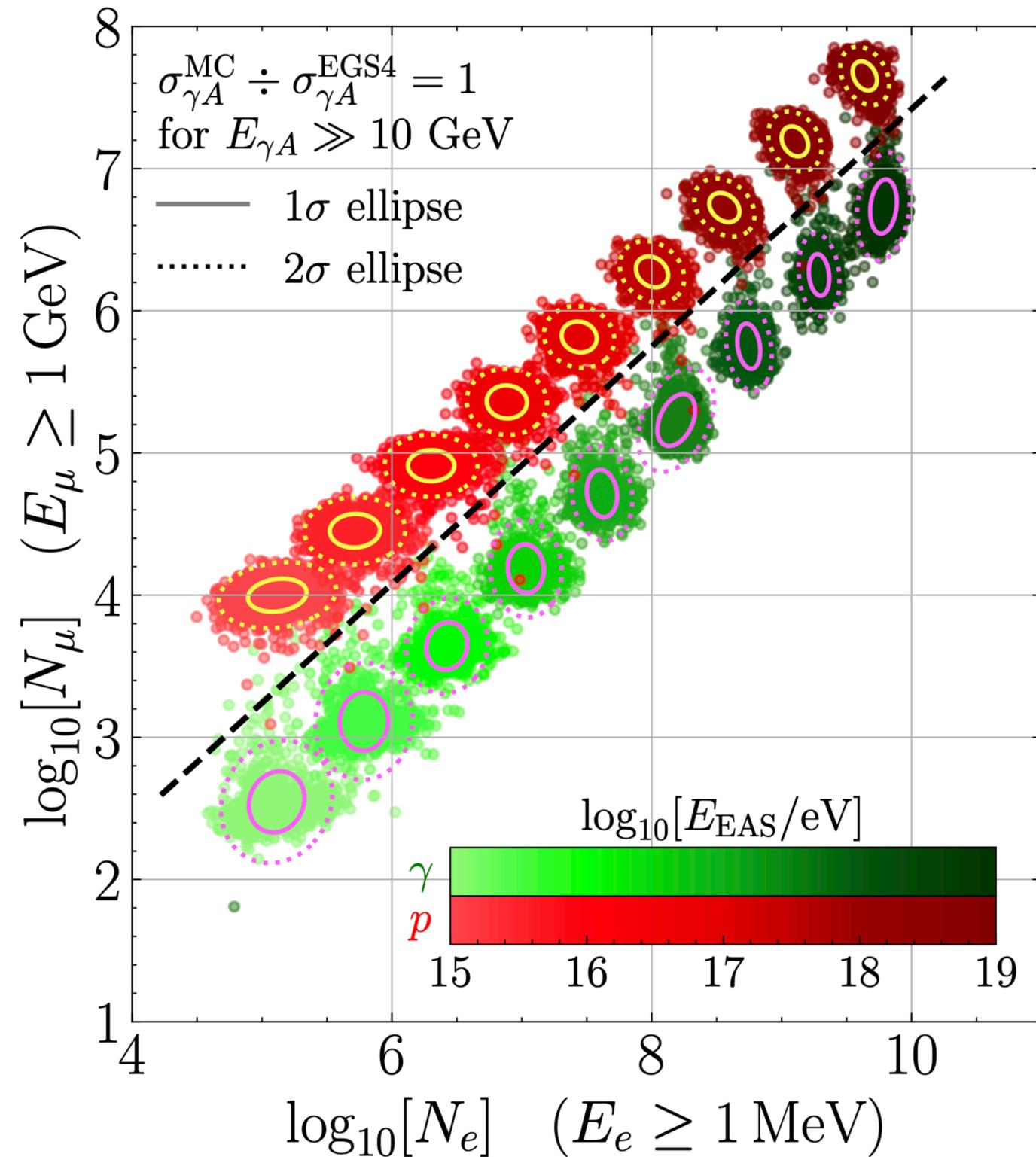
Профиль доли мюонов от ФЯРВЭ в адронных ШАЛ при $\sigma_{\gamma A} \div \sigma_{\gamma A}^{\text{EGS4}} = 1$



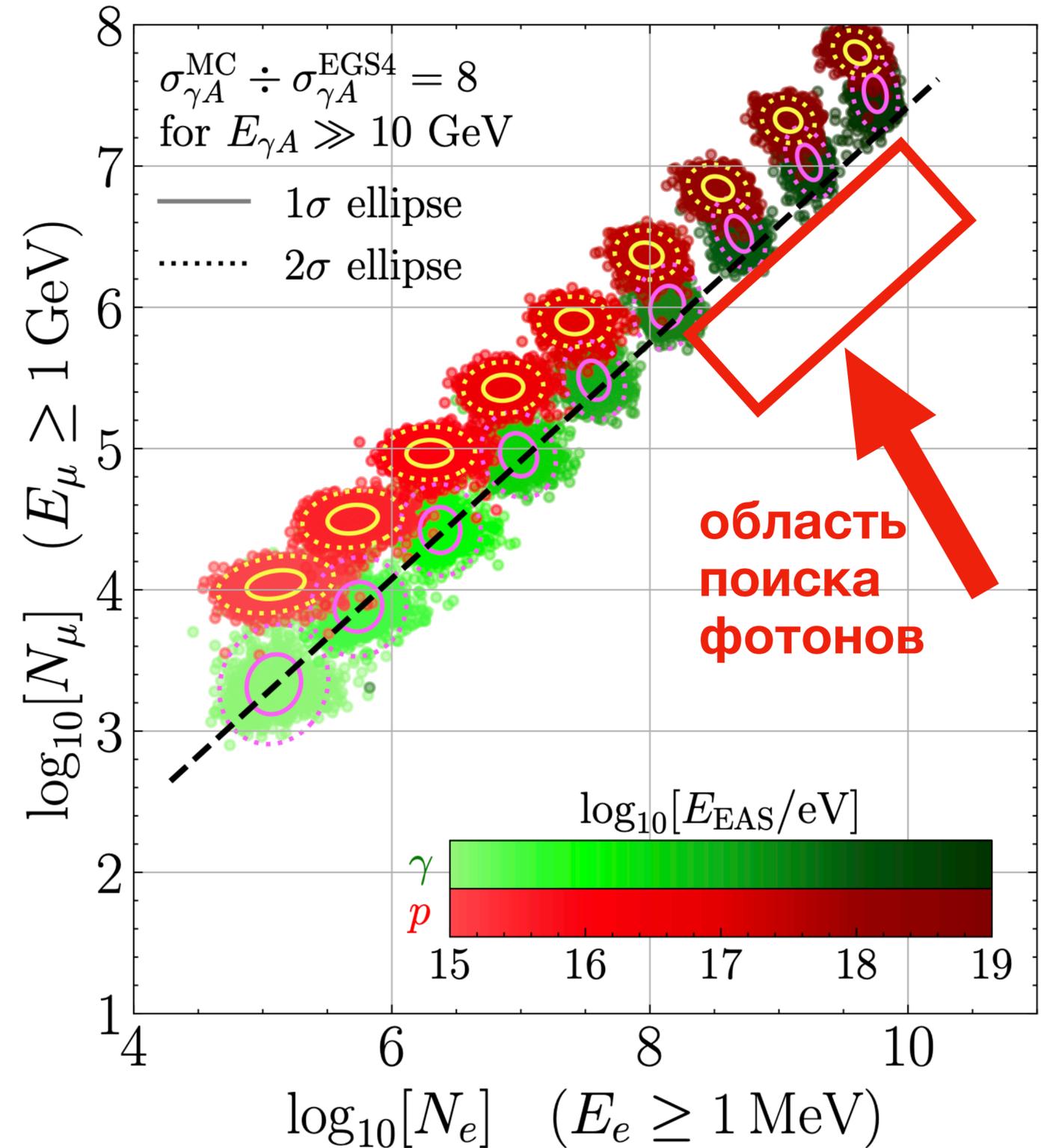
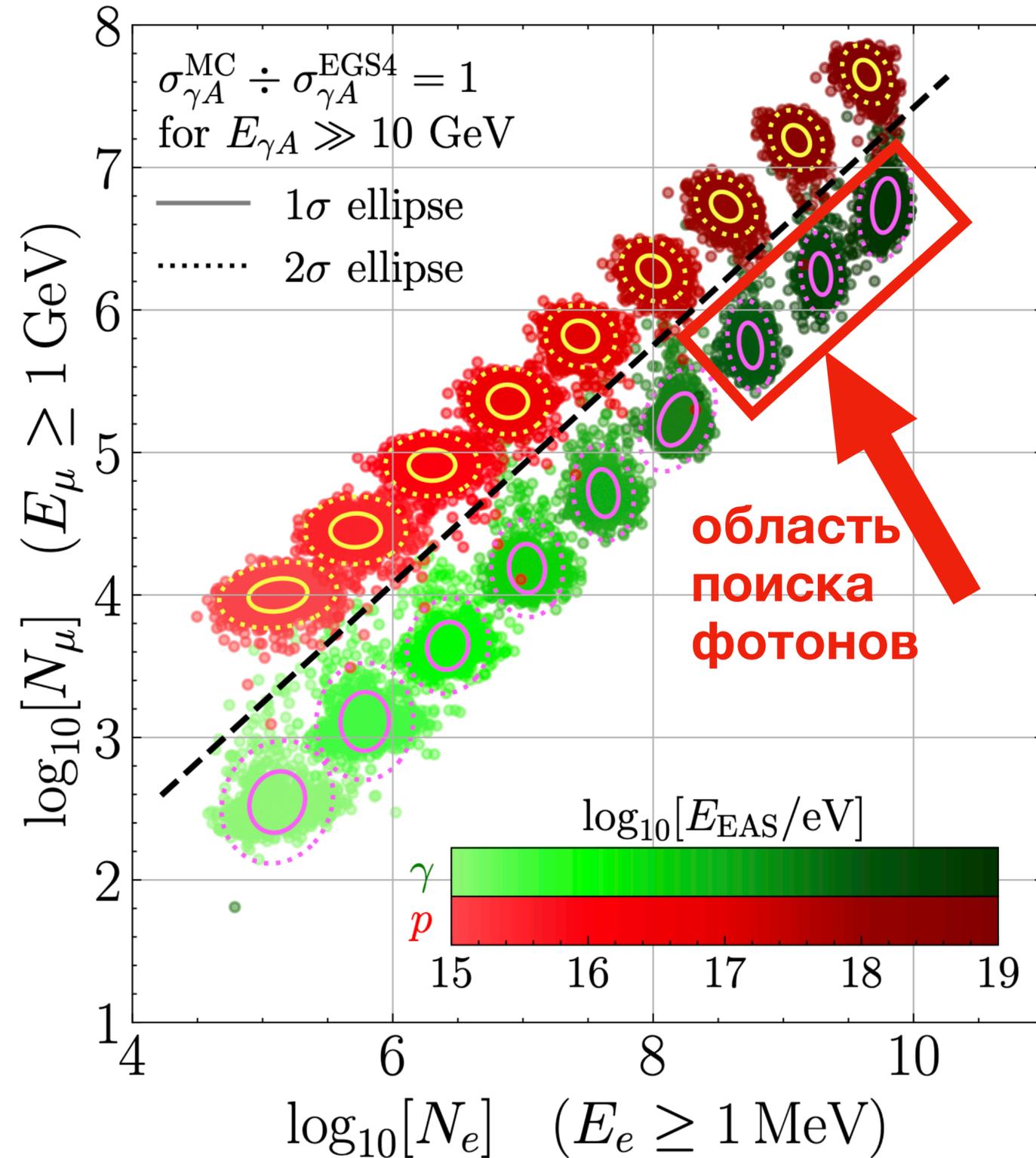
Монте-Карло (N_e, N_μ) на глубине 1000 г см⁻²



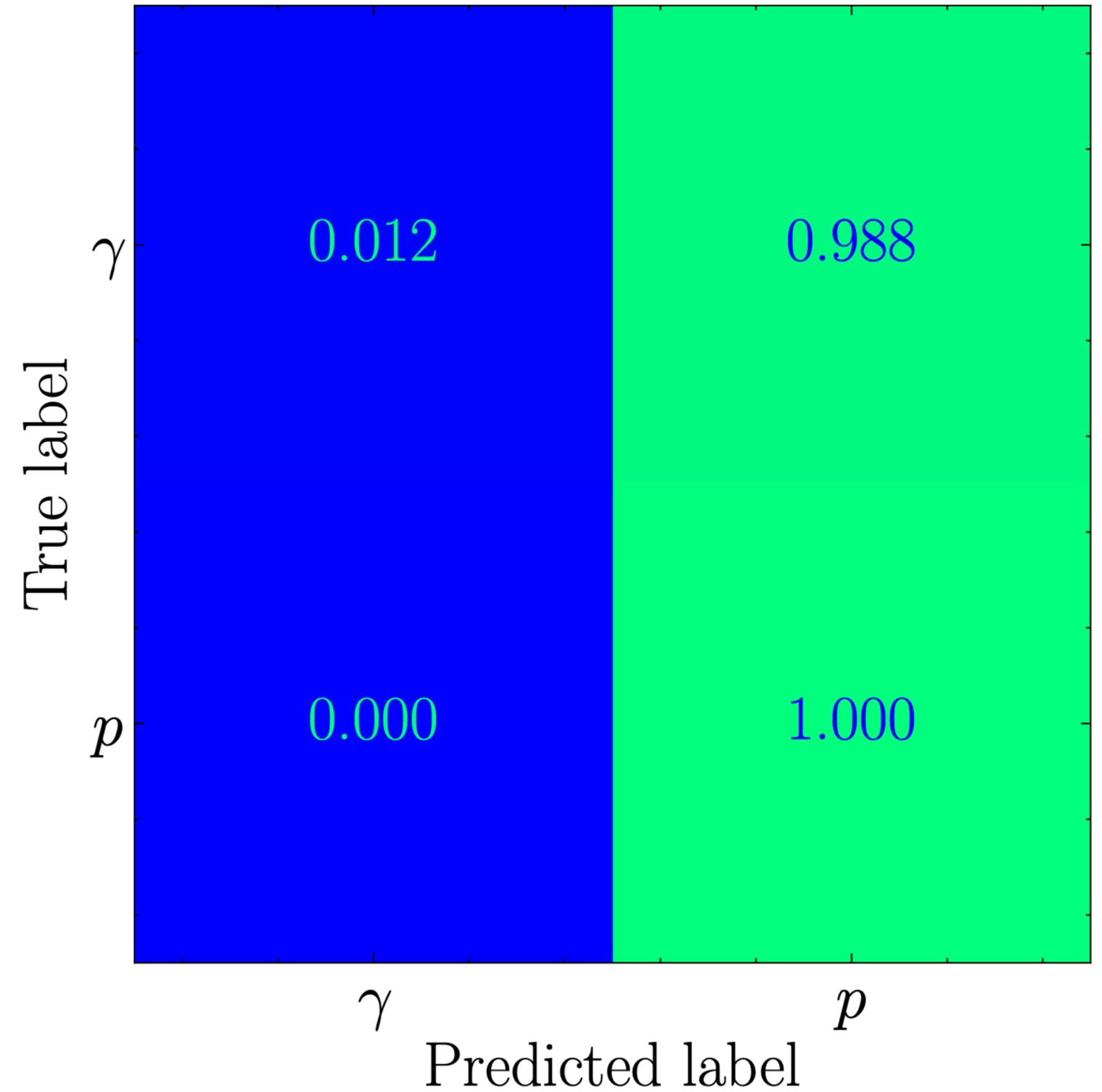
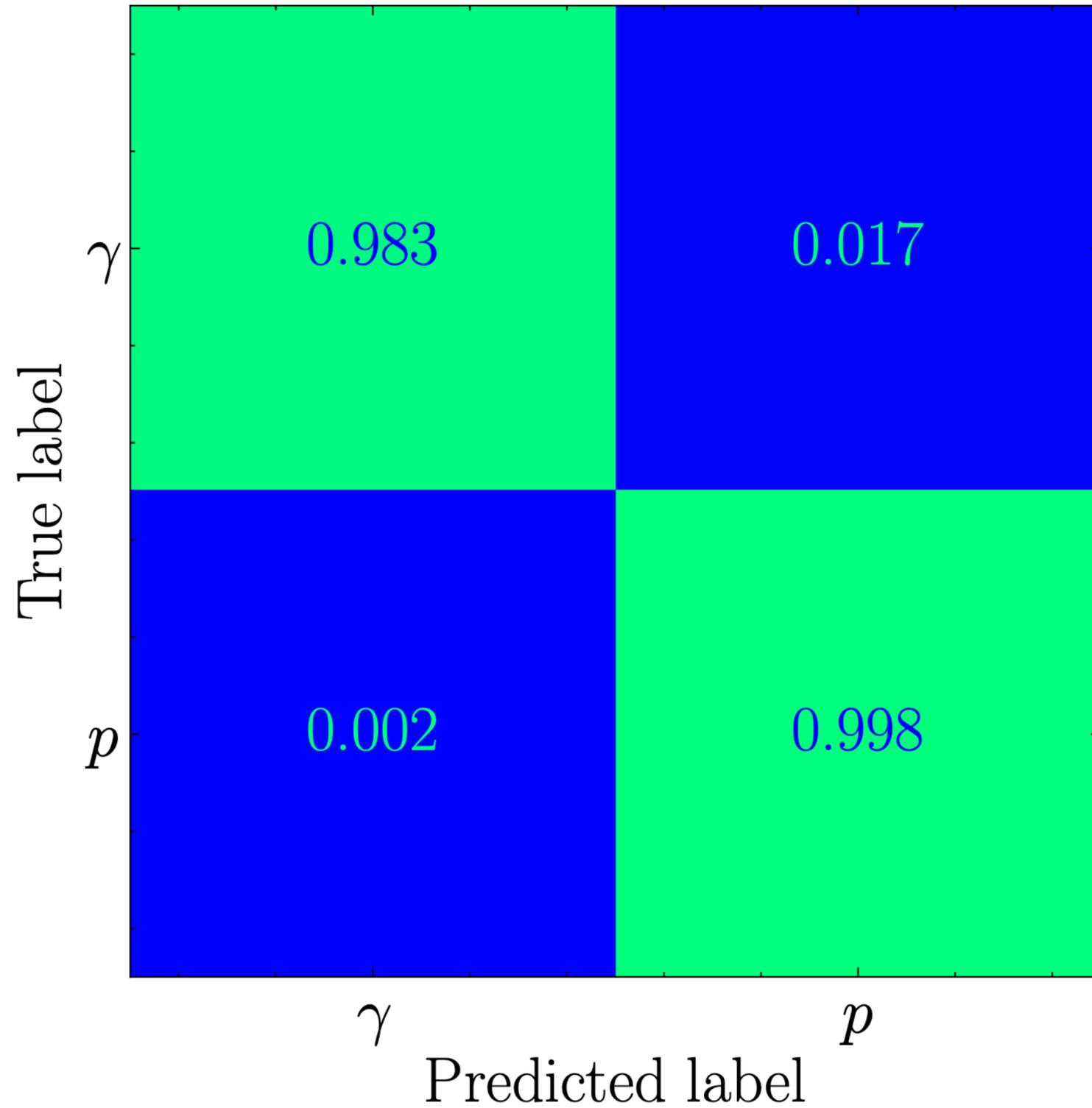
Монте-Карло (N_e, N_μ) + нормальный шум 15% на глубине 1000 г см⁻²



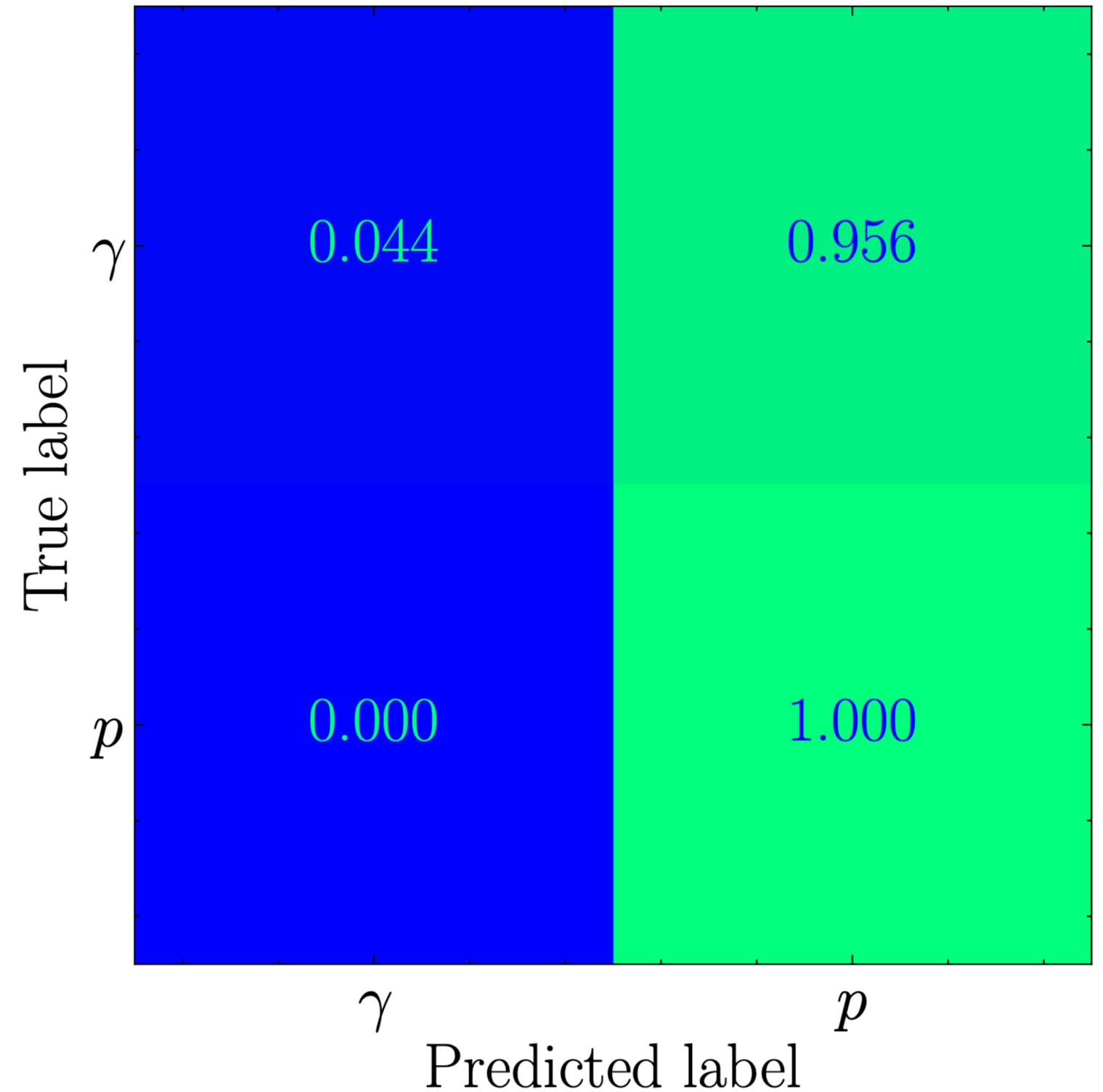
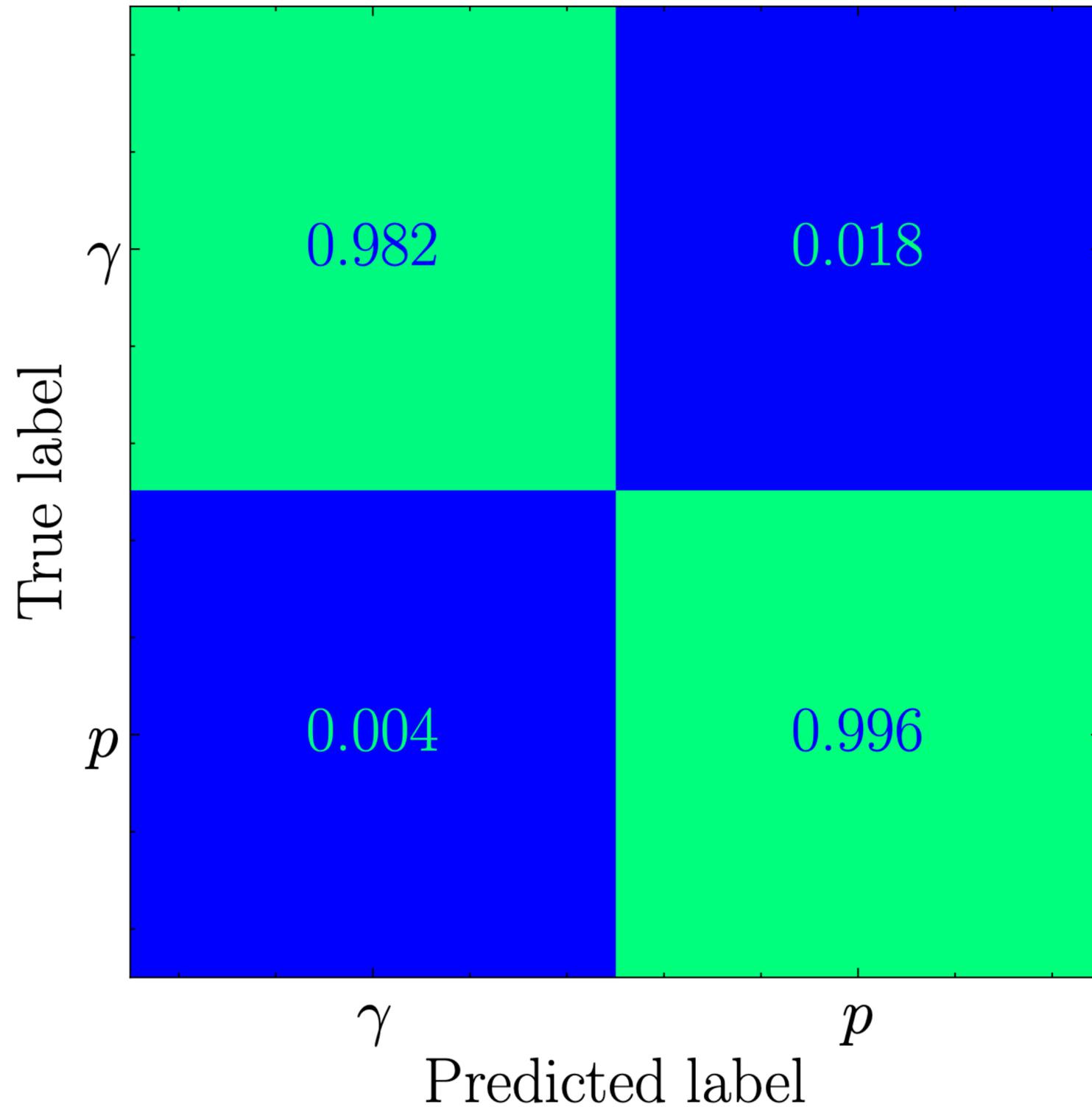
Монте-Карло (N_e, N_μ) + нормальный шум 15% на глубине 1000 г см⁻²



Матрица ошибок (без шума) для выделения фотонных ШАЛ с энергией $\geq 10^{18}$ эВ



Матрица ошибок (с шумом) для выделения фотонных ШАЛ с энергией $\geq 10^{18}$ эВ



/ Заключение

- теперь легче изучать «зоопарк» сечений ФЯР***
- пока упускаем из виду множество деталей...***
- но даже так можем сделать важные выводы:***

- > с помощью адронных ШАЛ можно прозондировать сечение ФЯР не далее чем до $\sim 10^{18}$ эВ**
- > для решения мюонного избытка необходимо сечение ФЯРВЭ порядка 100 мбарн**
- > сечение ФЯР в области высоких энергий критически влияет на дискриминацию между фотонными и адронными ливнями в области энергий ливня $\geq 10^{18}$ эВ**