

Исследование состава космолучей на данных эксперимента KASCADE

Никита Петров, для КМУ'24

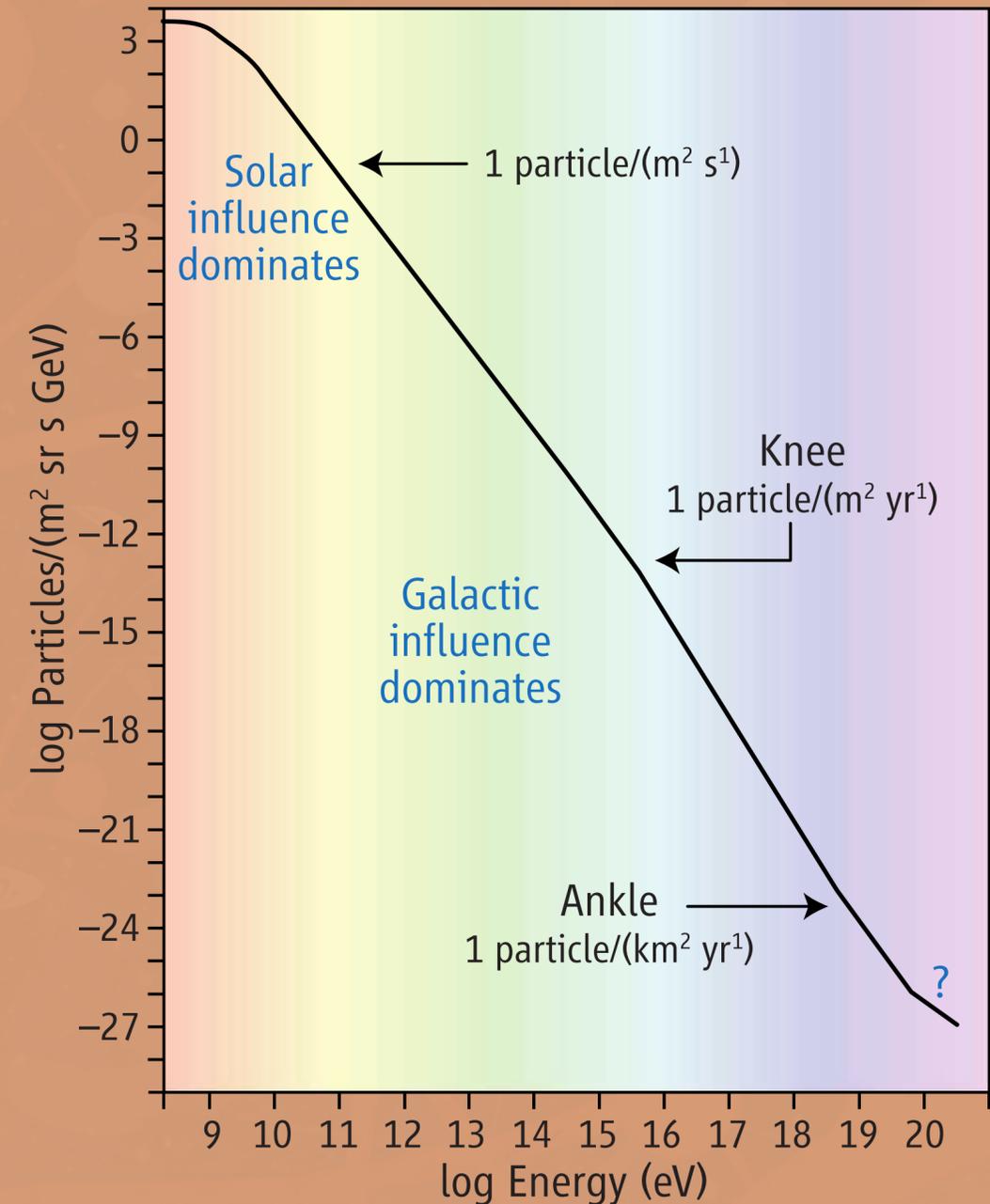
План выступления

1. Космические лучи
2. Мотивация
3. Анализ и результаты
4. Заключение



Космические лучи

- Космические лучи – это высокоэнергичные частицы, которые прибывают из космоса
- Широкие атмосферные ливни (ШАЛы) – это каскады субатомных частиц и ионизированных ядер, родившихся в атмосфере в результате взаимодействия с ней первичной частицы
- KASCADE регистрирует космические лучи через широкие атмосферные ливни



Спектр космических лучей
(рис. из статьи [doi:10.1126/science.1134046](https://doi.org/10.1126/science.1134046))

Эксперимент KASCADE

KASCADE — эксперимент по изучению космических лучей, в Карлсруэ, Германия (1996 – 2013)

KASCADE array: 252 станции, оборудованные сцинтилляционными детекторами, расположенные в прямоугольной сетке на площади $200 \times 200 \text{ м}^2$

Энергетический диапазон:
~ 500 ТэВ – 100 ПэВ

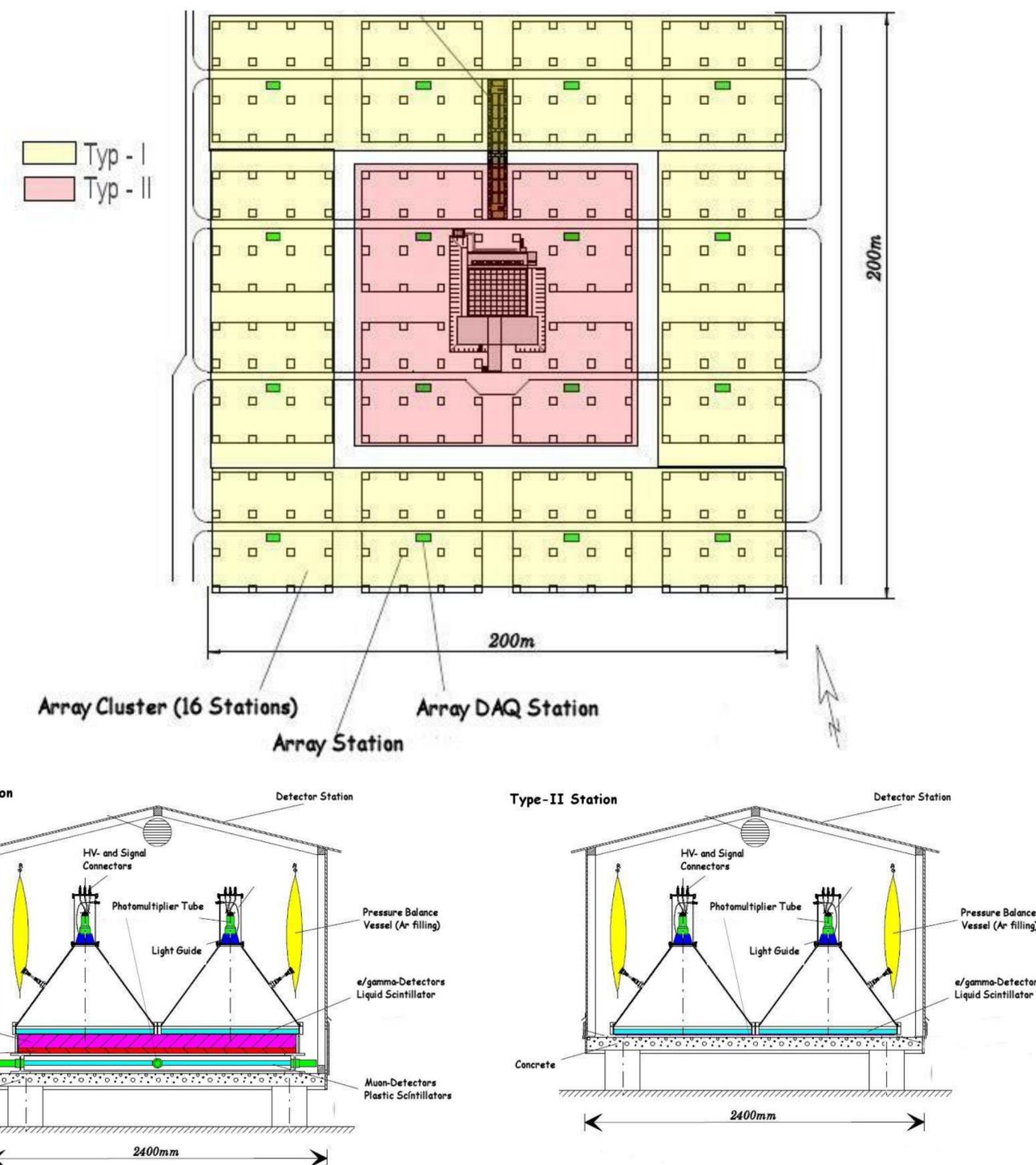


Схема KASCADE Array (сверху), схемы отдельных станций KASCADE Array типа I и II (снизу)

Цель работы

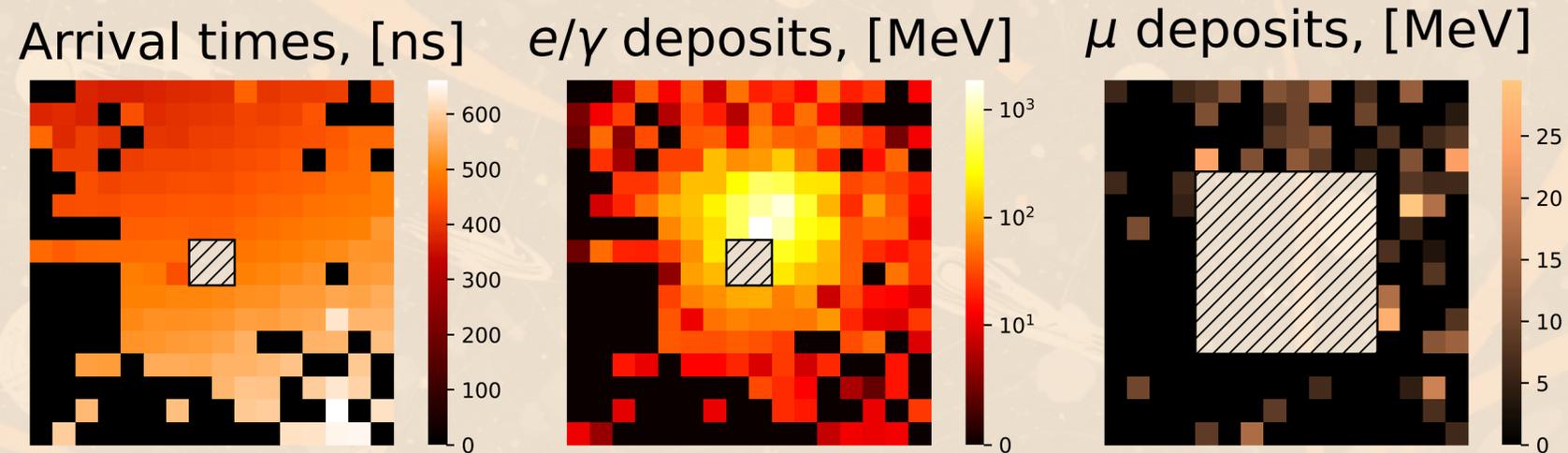
Восстановить энергетические спектры пяти массовых компонент (p, He, C, Si, Fe) космических лучей в диапазоне энергий 1 – 100 ПэВ, используя архивные данные эксперимента KASCADE

Мотивация

- новые (post-LHC) адронные модели
- большой объём качественных данных KASCADE*, сравнимый с современными экспериментами
- несогласие между экспериментами в этом диапазоне энергий
- широкое распространение методов машинного обучения

* Данные предоставлены KCDC: A.Haungs et al;
Eur. Phys. J. C (2018) 78:741;(doi: [10.1140/epjc/s10052-018-6221-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6221-2))

Эксп. данные и Монте-Карло



- $\log_{10}(E/eV) = 15.45$
- $\log_{10} Ne = 5.15$
- $\log_{10} N\mu = 4.52$
- $s = 1.09$
- $\theta = 19.37^\circ$
- $\varphi = 354.8^\circ$
- $x = 13.7 \text{ m}$
- $y = 28.2 \text{ m}$

Пример экспериментального события.
(В центральной части KASCADE
детекторы отсутствуют)

- $\theta < 18^\circ$
- $\log_{10} Ne > 4.8$
- $\log_{10} N\mu > 3.6$
- $\sqrt{(x^2 + y^2)} < 91 \text{ m}$
- $0.2 < s < 1.48$

Использованы критерии отбора,
рекомендованные KASCADE

Экспериментальные данные

~ $8.5 \cdot 10^6$ событий (после отборов)
20:80 разбиение (случайным образом
по заходам) на открытую/закрытую
(unblind/blind) части

Монте-Карло

(CORSIKA + симуляция детектора)

QGSJet.II-04 (~ $1.8 \cdot 10^5$ событий)

EPOS-LHC Sibyll 2.3c

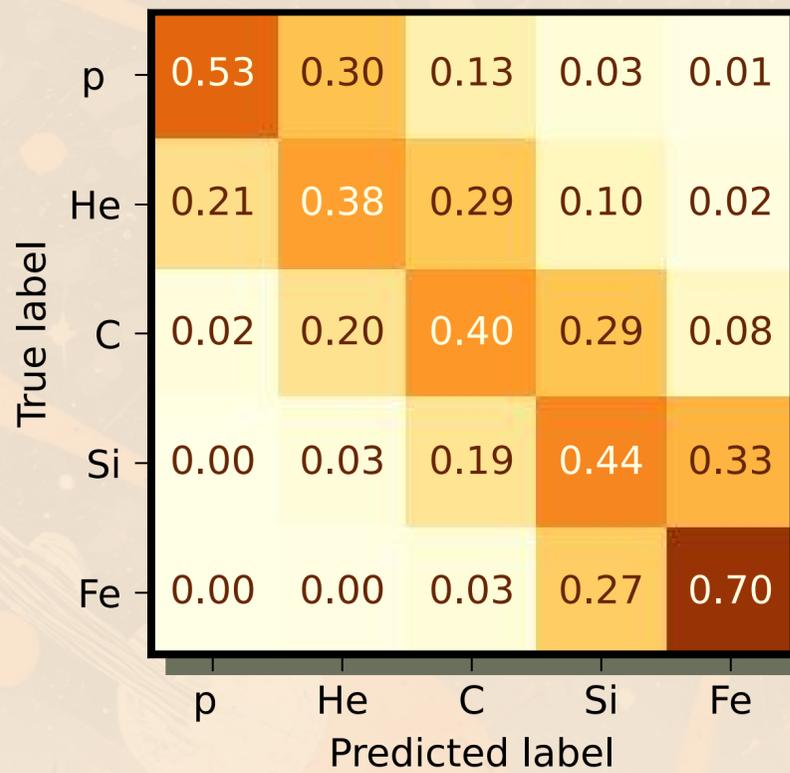
QGSJet.II-02

Классификатор типа первичной частицы

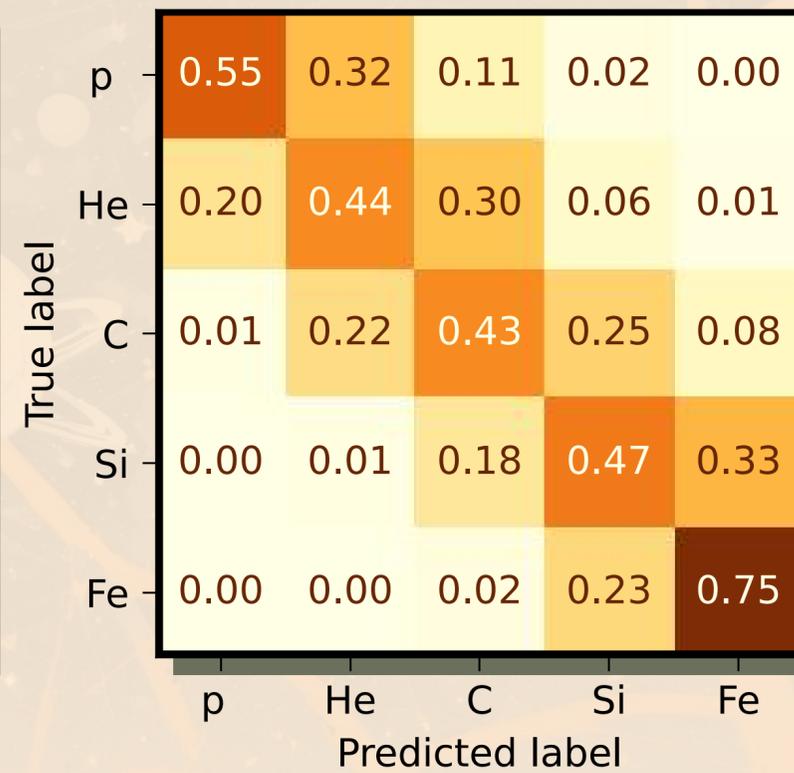
Convolutional Neural Network

простая архитектура (~30тыс. параметров)
принимает: депозиты (как двухканальное изображение 16x16) + N_e , N_μ , θ , s

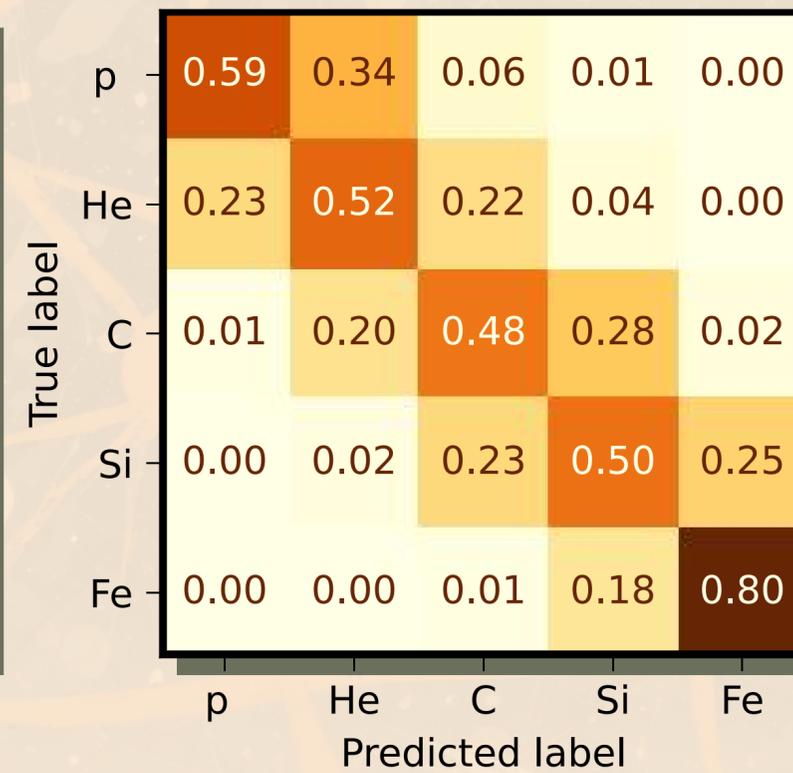
15.15 < $\lg E$, [eV] < 15.50



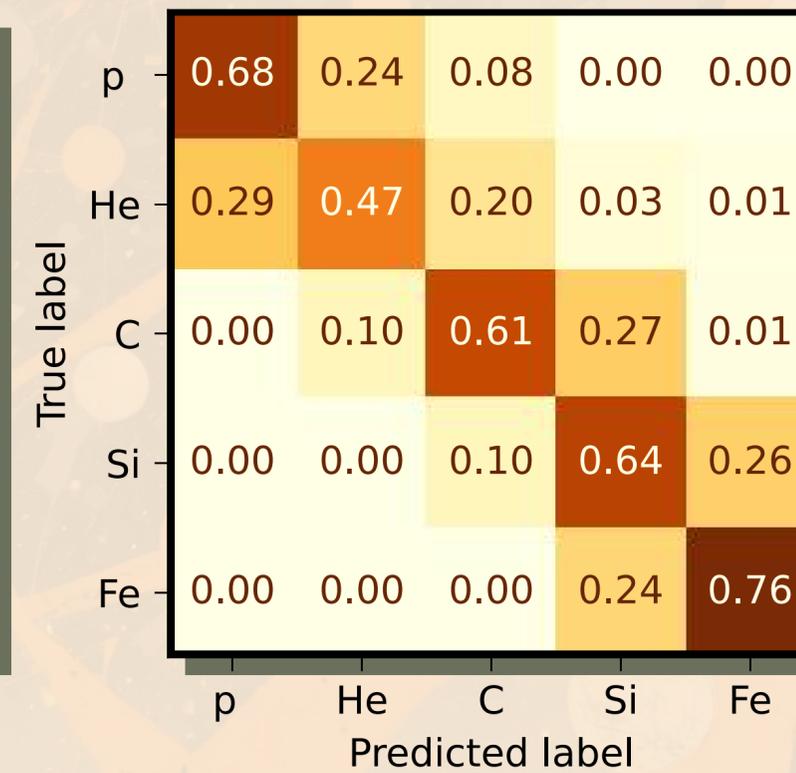
15.50 < $\lg E$, [eV] < 16.00



16.00 < $\lg E$, [eV] < 16.25



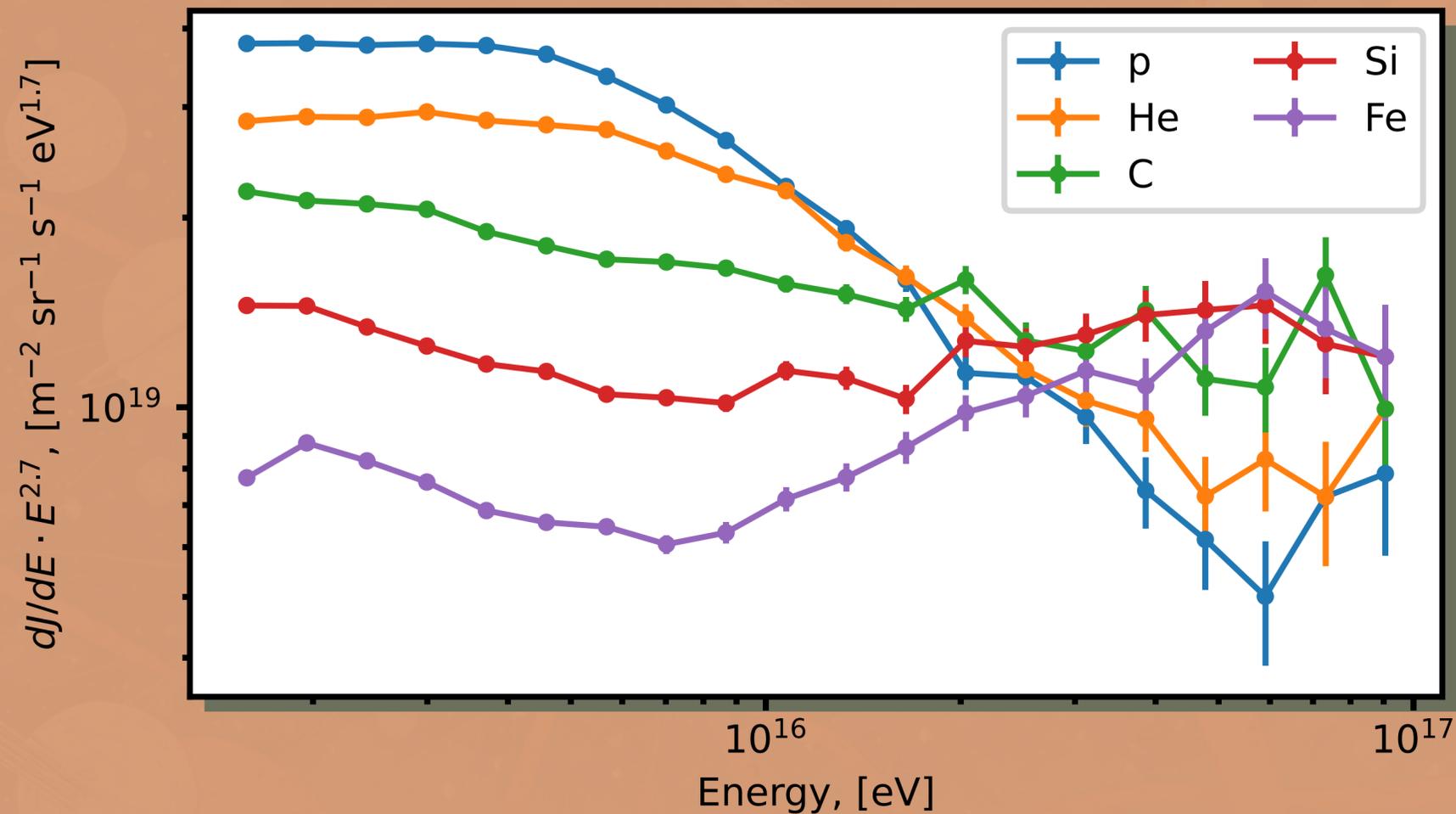
16.25 < $\lg E$, [eV] < 17.00



Матрицы смешивания в различных энергетических диапазонах для CNN на адронной модели QGSJet-II.04

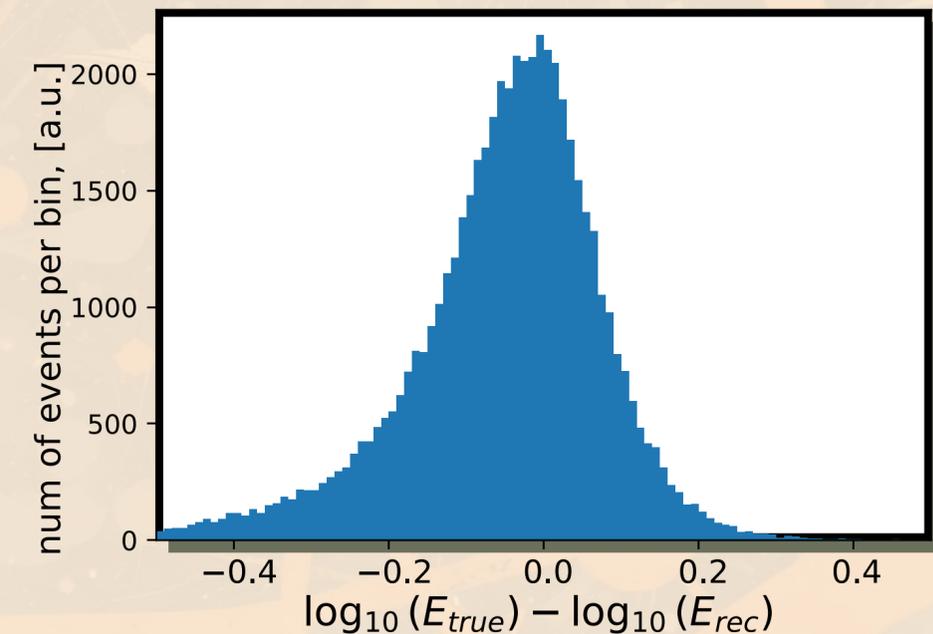
Метод восстановления

- Folded спектры получены прямым предсказанием классификатора (CNN)



Спектры (folded) массовых компонент в зависимости от энергии

- Далее выполняется анфолдинг (байесовский итерационный метод) по энергии и типу первичной частицы



Энергетическое разрешение стандартной реконструкции KASCADE для адронной модели QGSJet-II.02

Погрешности

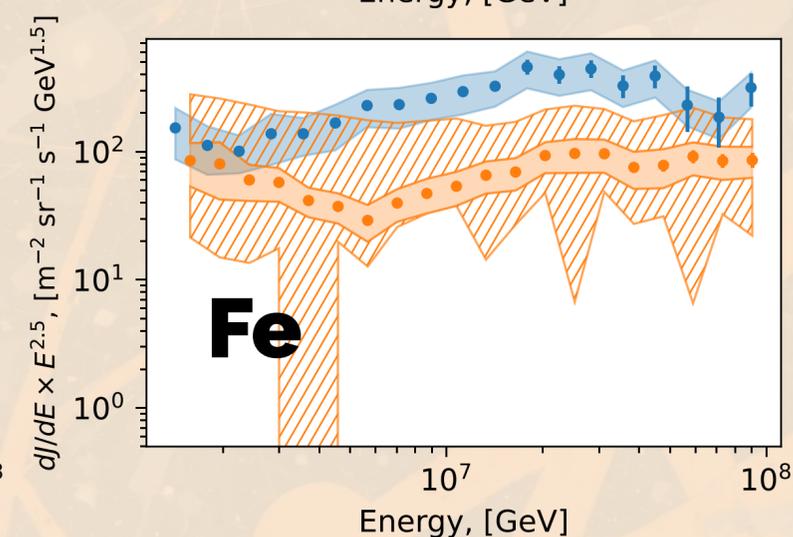
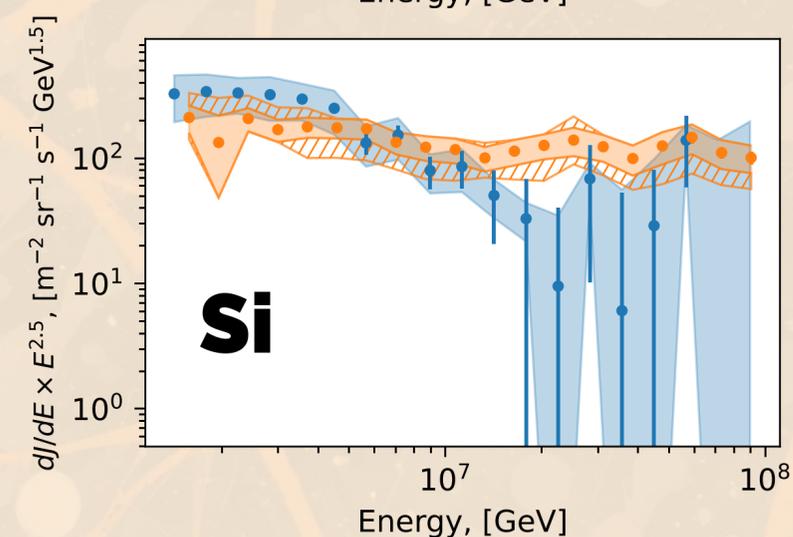
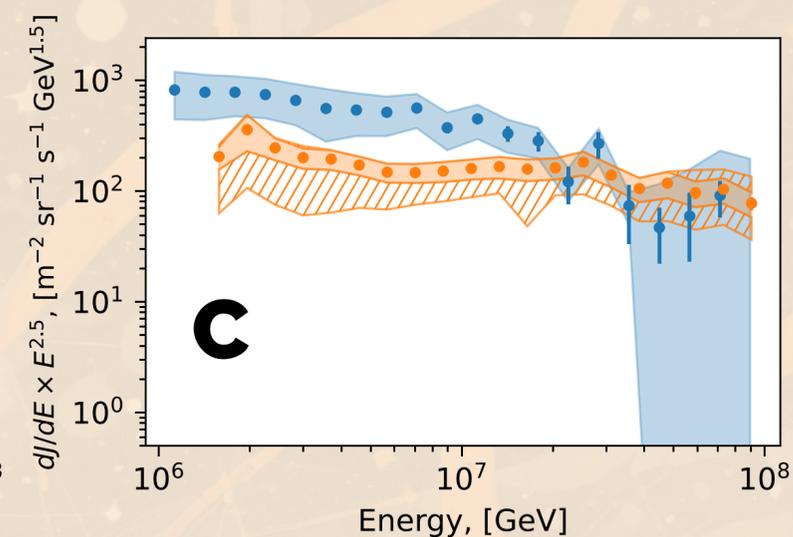
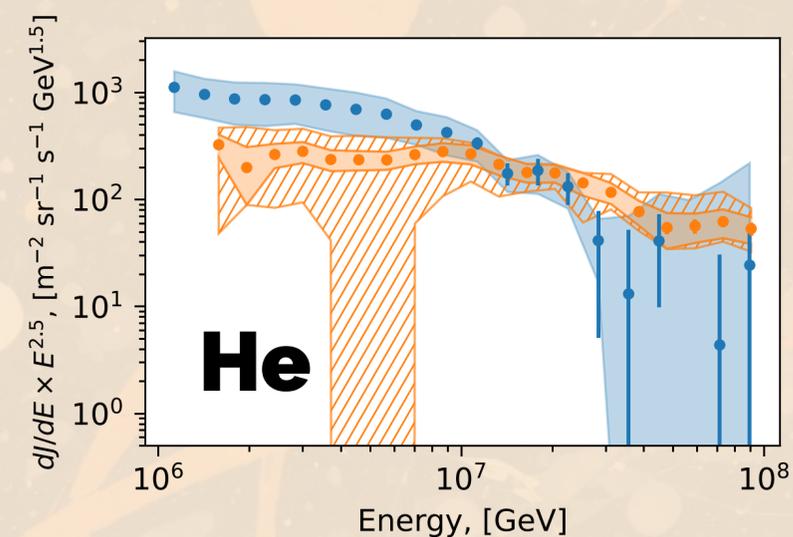
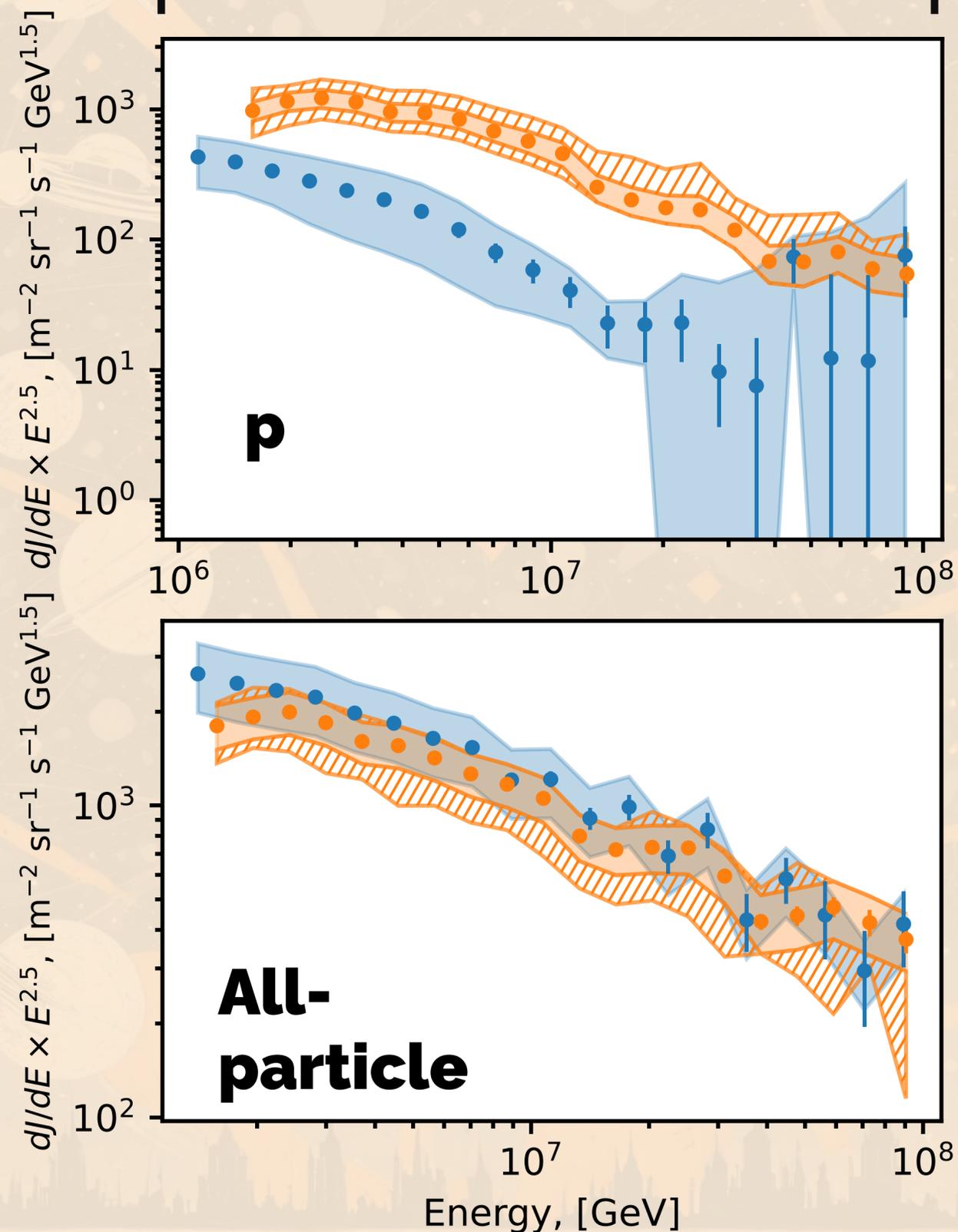
Таблица с “базовыми” систематическими погрешностями для QGSJet-II.04

Неработающие детекторы	5 – 18 %
Массовый состав МС	13 – 16 %
Ограниченное количество МС	8 – 25 %
Спектральный индекс МС	до 4 %
Регуляризация анфолдинга	1 – 24 %
Последовательный анфолдинг по энергии и типу частицы	до 8 %

Проводим анфолдинг для трёх post-LHC адронных моделей:
QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c

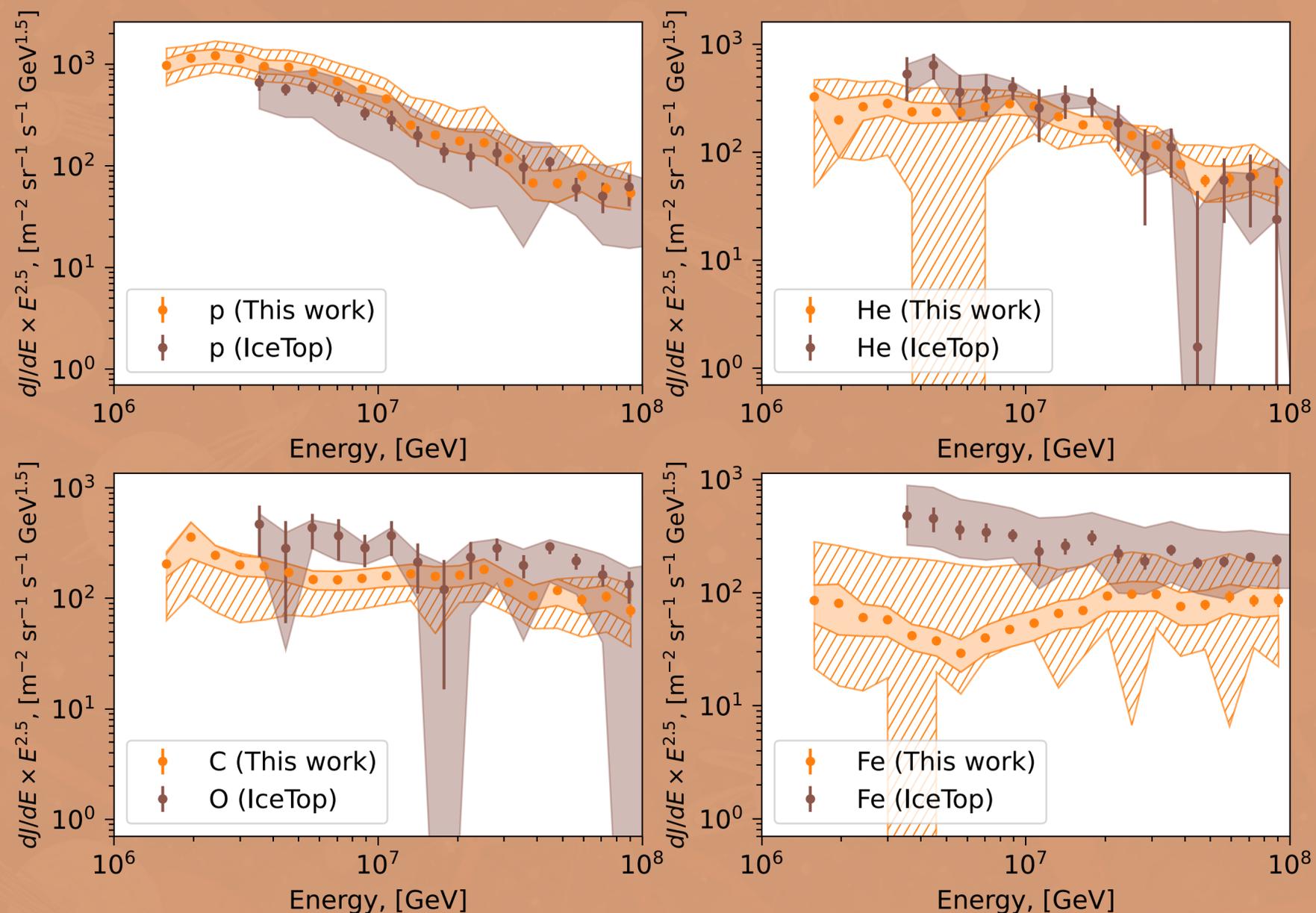
Диапазон от минимального до максимального значения в каждом энергетическом бине считаем “теоретической” неопределённостью

Энергетические спектры массовых компонент



Сравнение спектров, полученных в данной работе (оранжевый) с учётом “теоретической” неопределённости (штриховка), полосы для QGSJet-II.04, и спектров оригинального KASCADE (QGSJet-II.02)

Сравнение с другими экспериментами



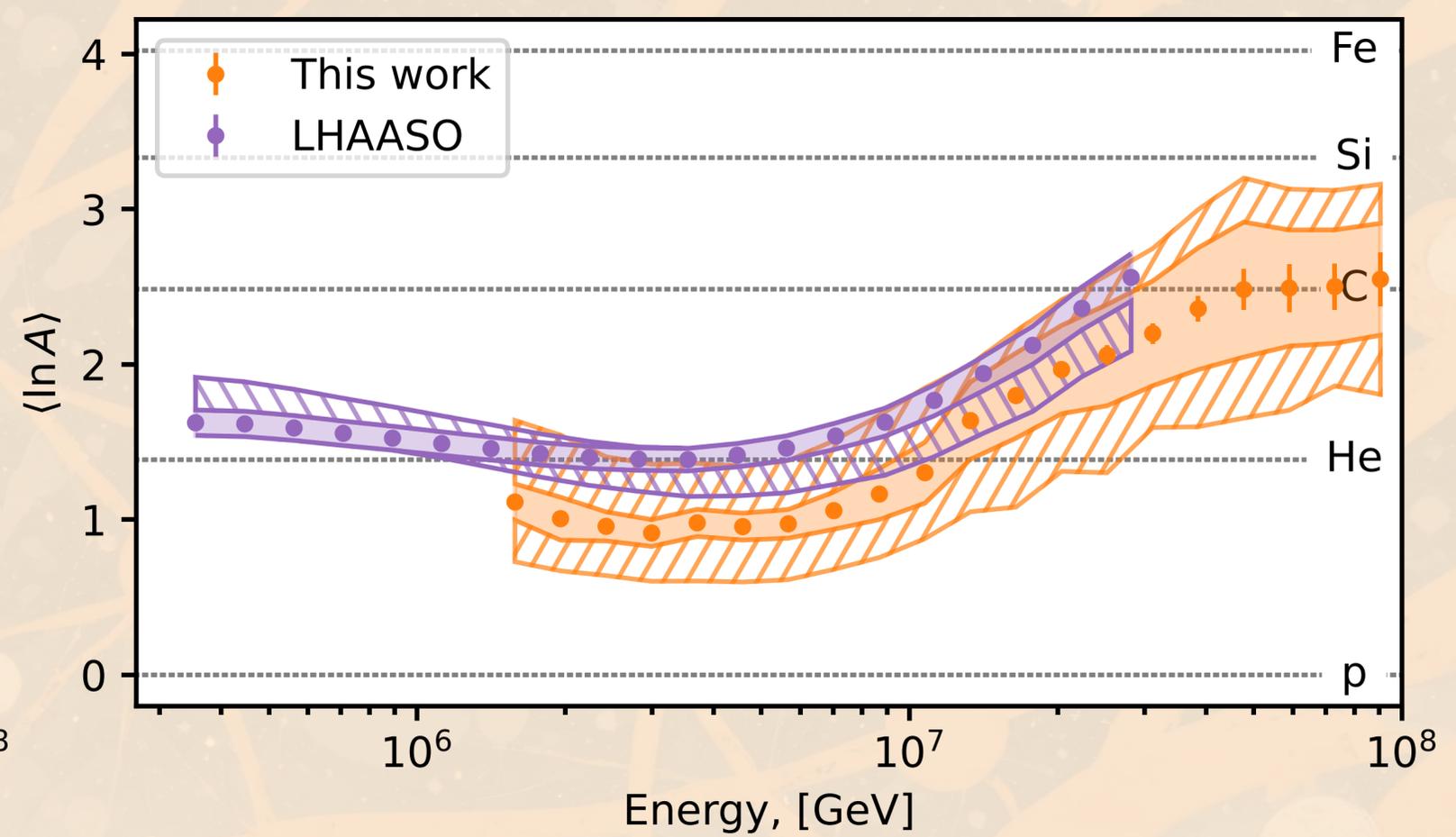
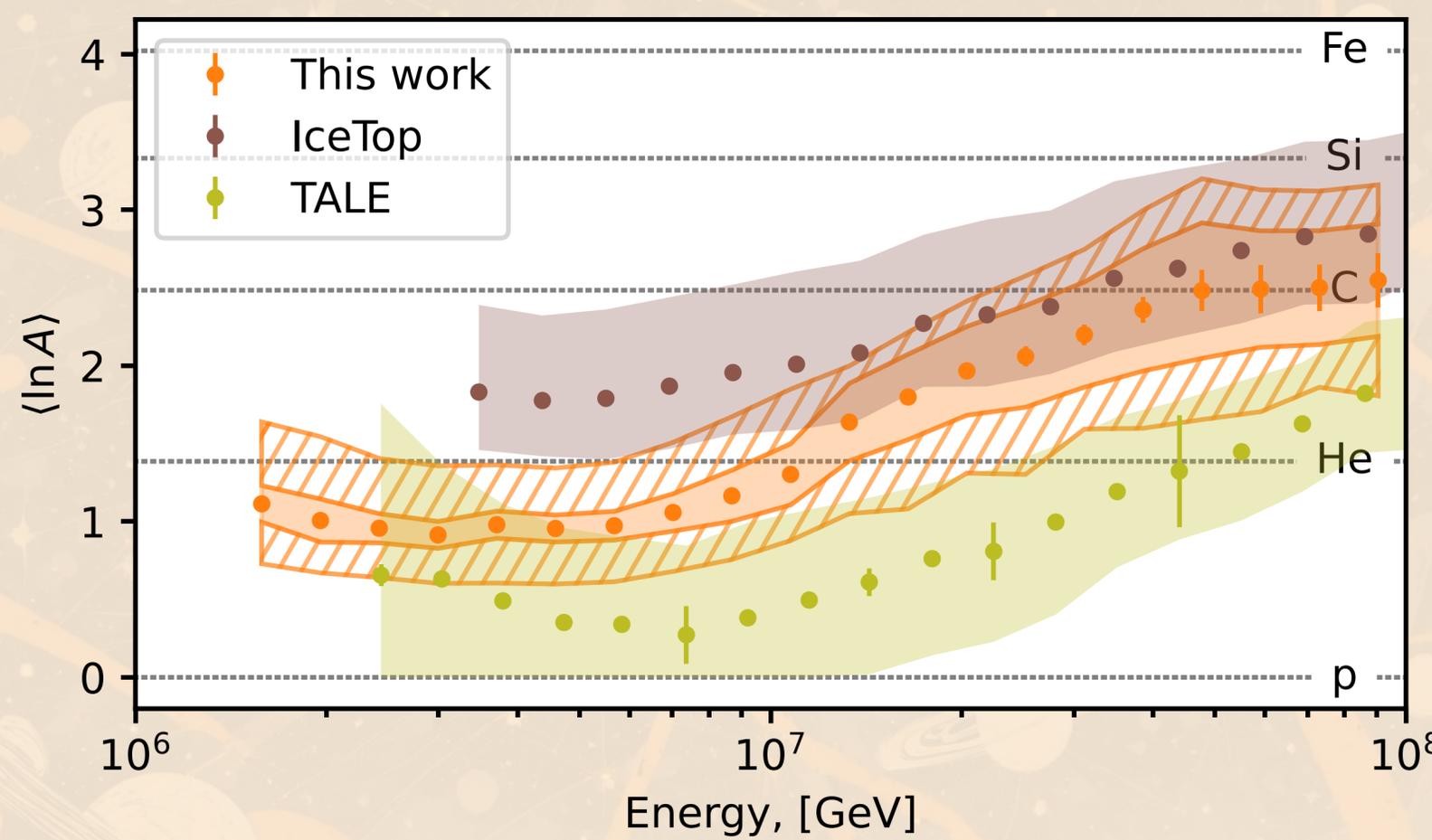
- Результаты в пределах “теоретических” неопределённостей согласуются с IceTop
- Точность с учётом “теоретических” неопределённостей сравнима с IceTop (без неё)

Сравнение покомпонентных спектров, полученных в данной работе (оранжевый) с учётом “теоретических” неопределённостей (штриховка), для QGSJet-II.04 (заливка) и результатов IceTop для Sibyll 2.1 (коричневый)

$$\langle \ln A \rangle = \sum_{i=1}^5 f_i \ln A_i$$

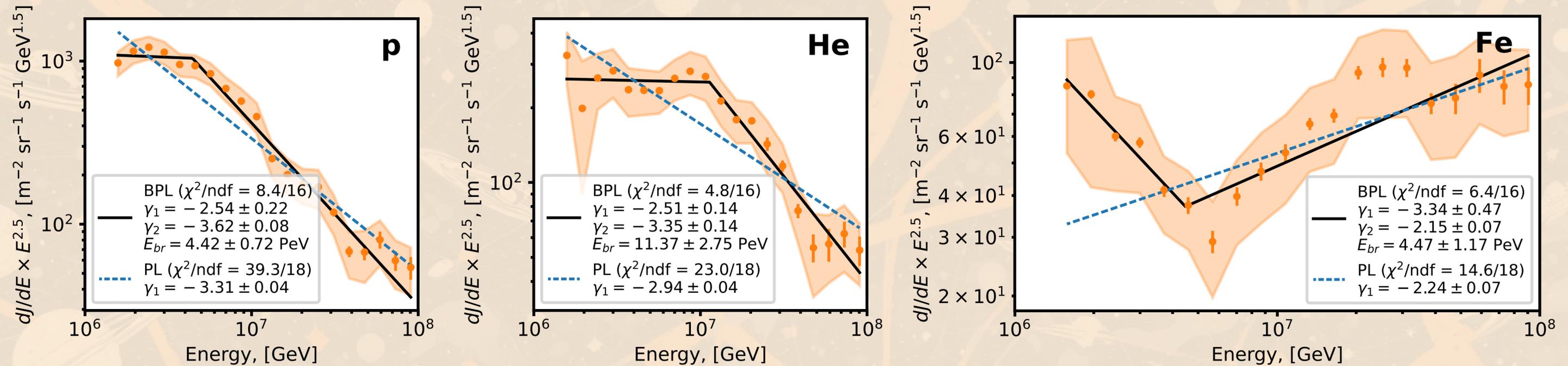
Средний логарифм массы

Результаты работы с учётом “теоретических” неопределённостей согласуются с IceTop, TALE и LHAASO, причём наш результат EPOS-LHC тяготеет к TALE, а Sibyll 2.3c — к IceTop



Сравнение зависимости среднего логарифма массы от энергии первичной частицы для результатов данной работы (оранж.) с учётом “теоретической” неопределённости (штриховка), заливка — сист. погр. для GSJet-II-04; IceTop (коричн., адронная модель Sibyll 2.1), TALE (оливк., EPOS-LHC), LHAASO (син., QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3d)

Поиск изломов в индивидуальных спектрах



Энергетические спектры протонной (слева), гелиевой (центр) и железной (справа) массовых компонент, аппроксимации power-law (PL, синяя линия) и broken power-law (BPL, чёрная линия)

- Коленоподобная структура в спектрах протонной и гелиевой массовых компонент (5.2σ и 3.9σ соответственно)
- Указание на излом в спектре железной компоненты (2.4σ)

Заключение

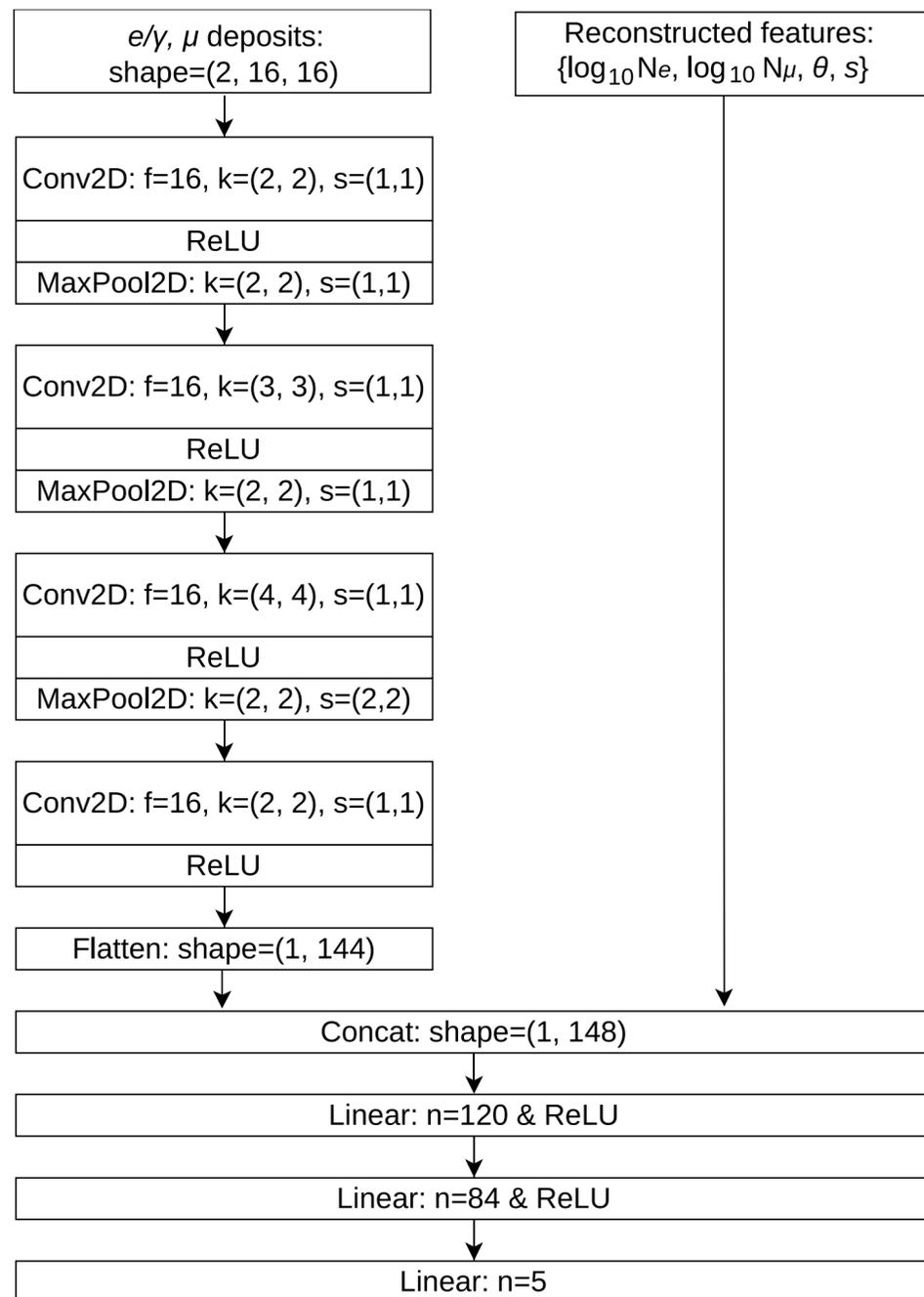
- Проанализированы данные эксперимента KASCADE
- Восстановлены спектры массовых компонент для трёх post-LHC адронных моделей (QGSJet-II.04, EPOS-LHC, Sibyll 2.3c) и учтены неопределённости от их использования
- Неопределённости разработанного метода ниже чем в оригинальной реконструкции KASCADE
- Обнаружено доминирование протонной компоненты в сравнении с оригинальными результатами KASCADE
- Представлены результаты в виде зависимости $\langle \ln A \rangle$ от энергии, где наблюдаем согласие результатов (с учётом неопределённостей) с IceTop, TALE и LHAASO
- Обнаружена коленоподобная структура в спектрах p и He компонент, а также указание на излом в Fe спектре
- Опубликованы результаты* в научных журналах

Спасибо за внимание!

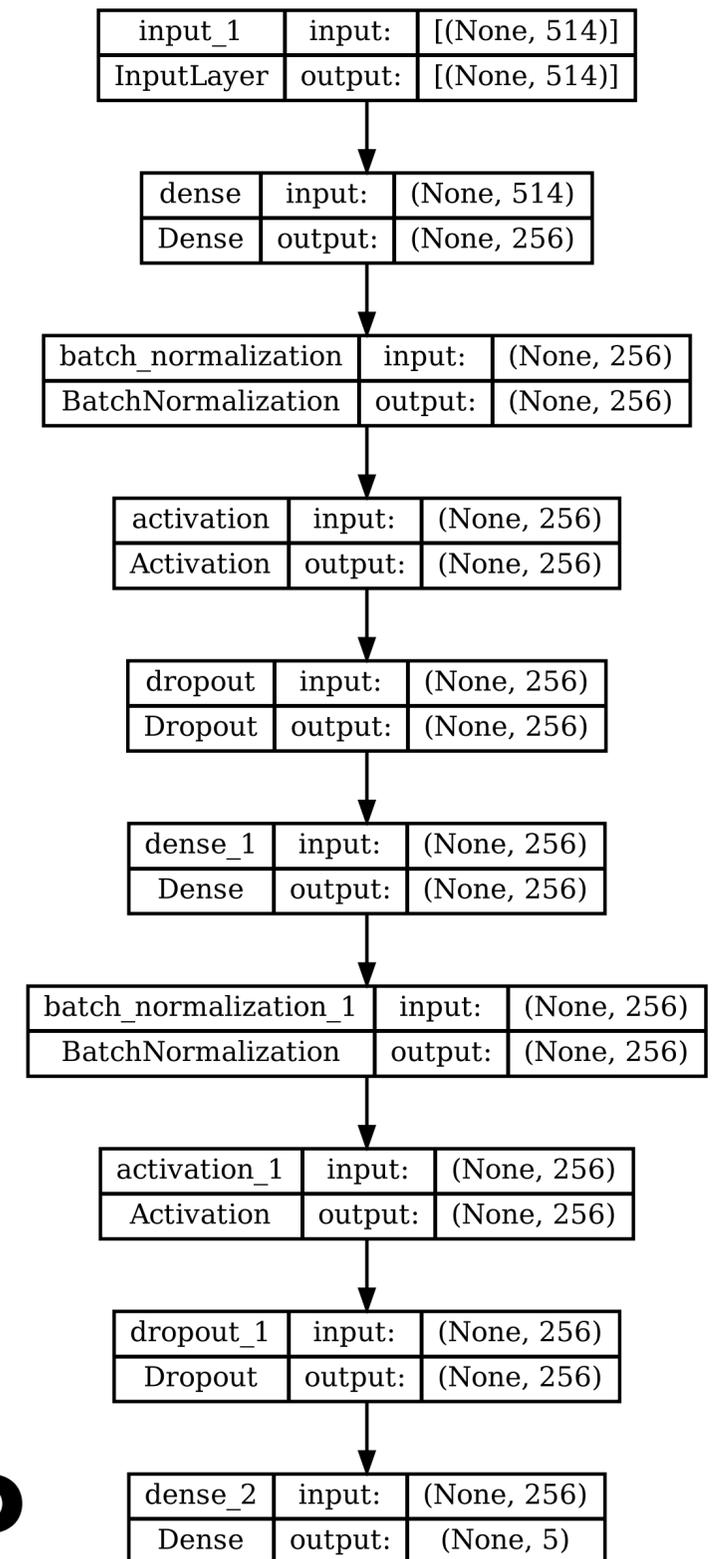
* Methods of machine learning for the analysis of cosmic rays mass composition with the KASCADE experiment data
Energy spectra of elemental groups of cosmic rays with the KASCADE <...> – принято к публикации в JCAP.



backup / ML architectures

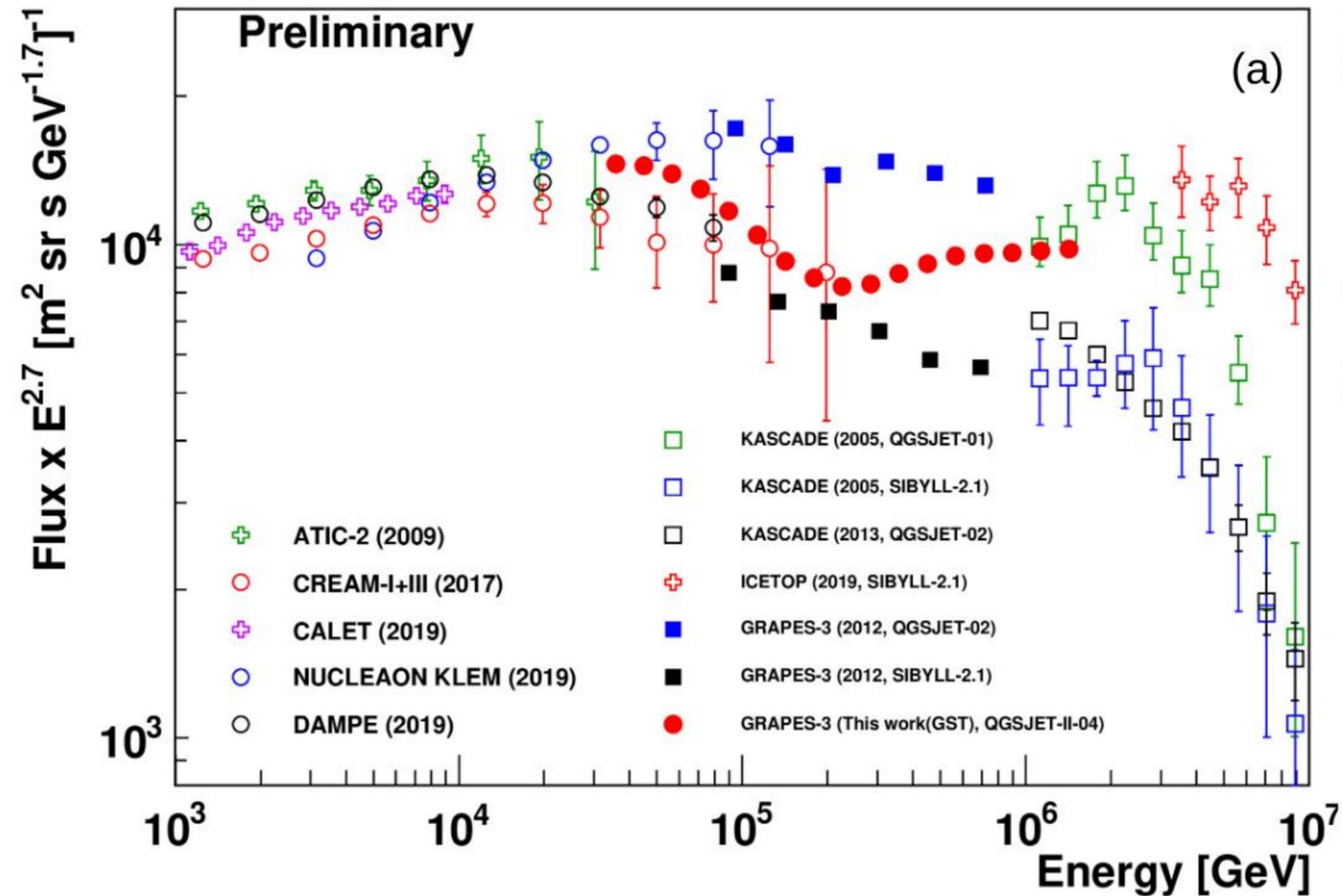


CNN



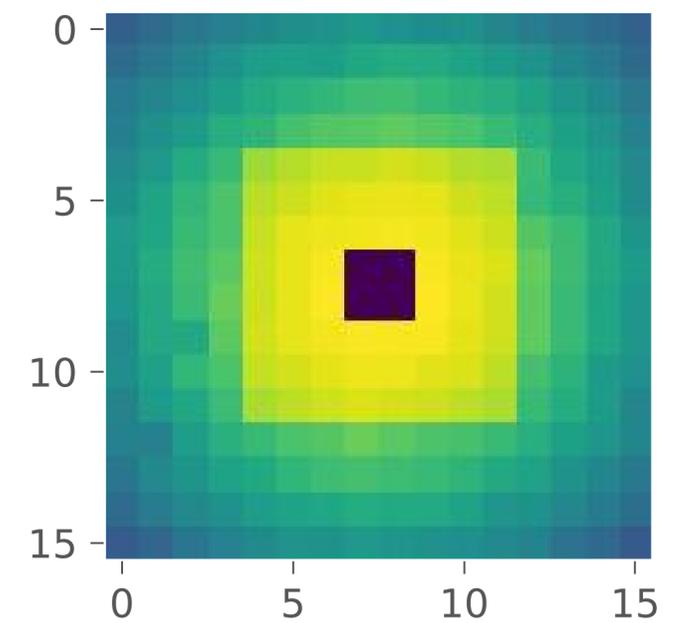
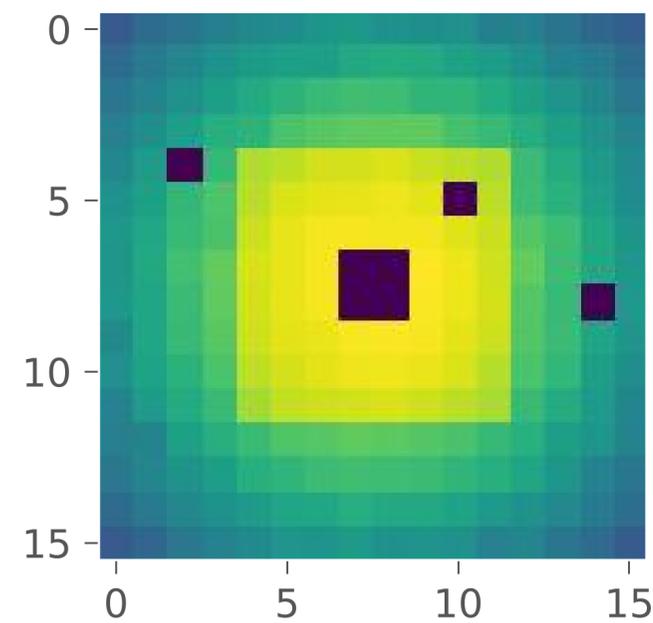
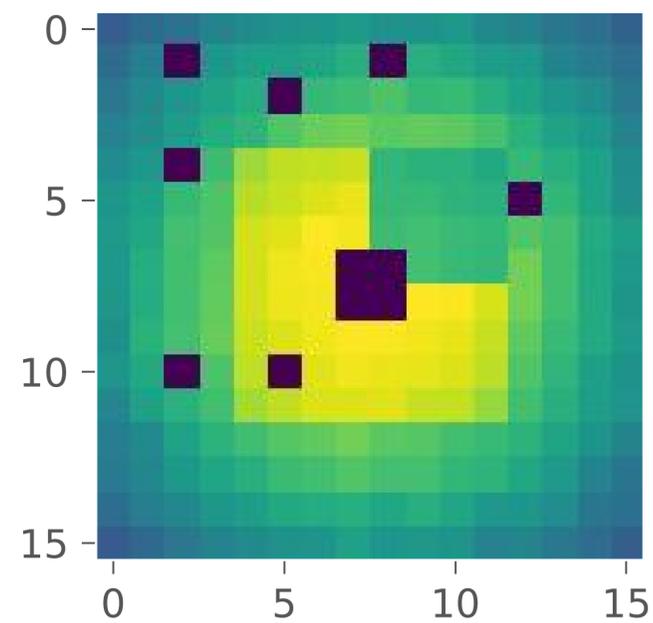
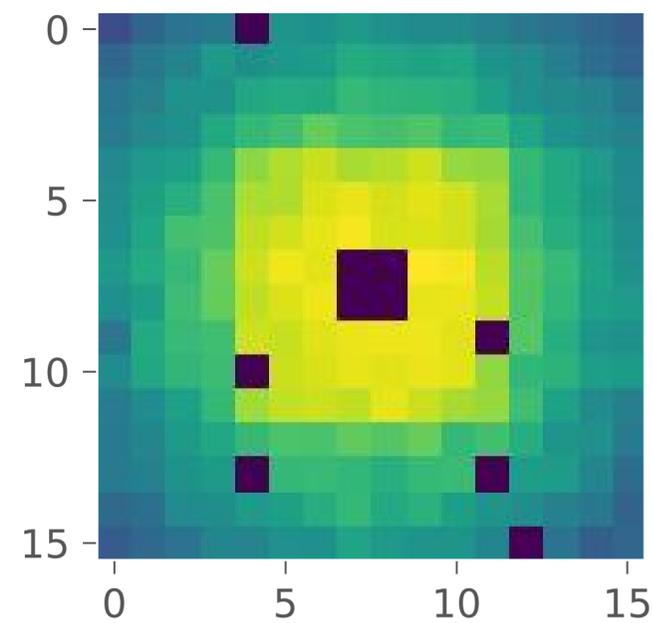
MLP

backup / GRAPES hadrening



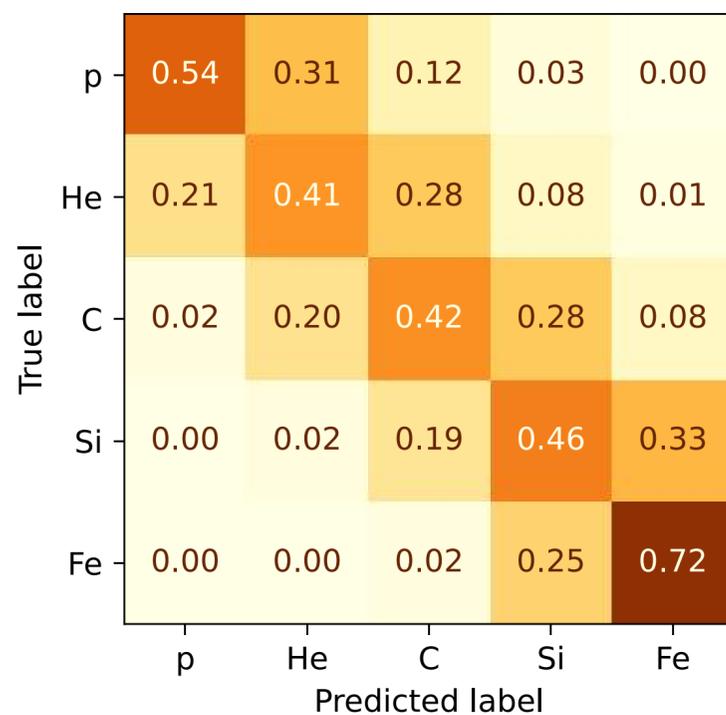
Энергетический спектр протонной компоненты в различных экспериментах: [doi:10.21468/SciPostPhysProc.13.021](https://doi.org/10.21468/SciPostPhysProc.13.021)

баскир / неработающие детекторы

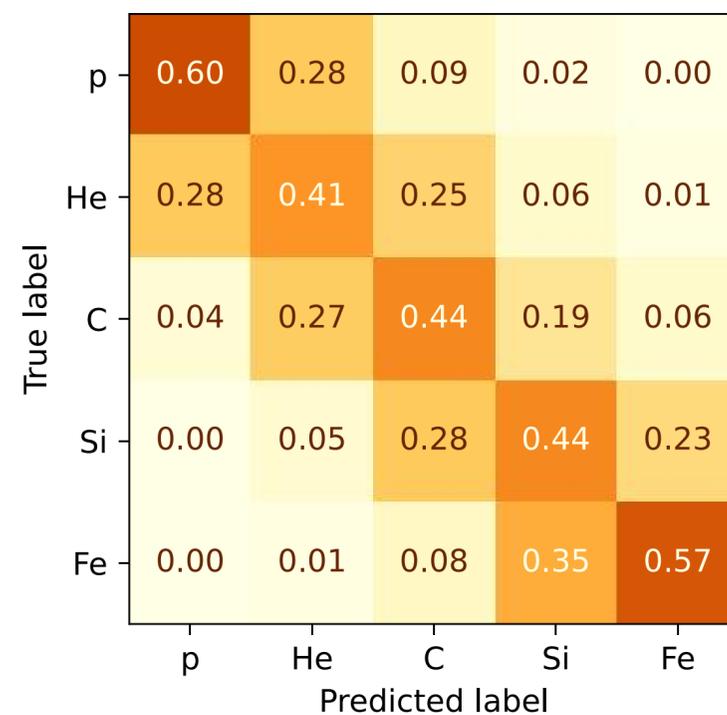


Усреднённое по заходам e/γ энерговыведение в детекторах KASCADE. Примеры заходов с нерабочими детекторами (три левых), и со всеми рабочими детекторами (справа)

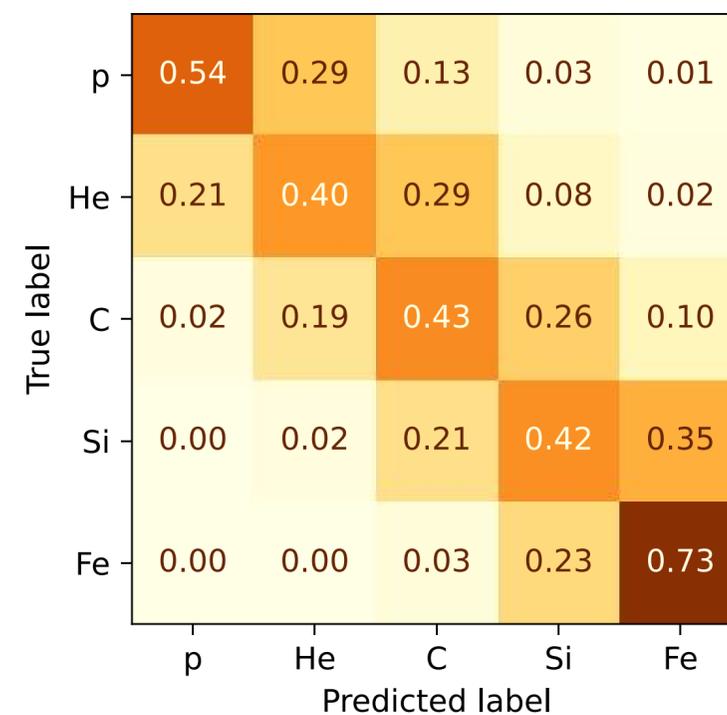
backup / Ablation study



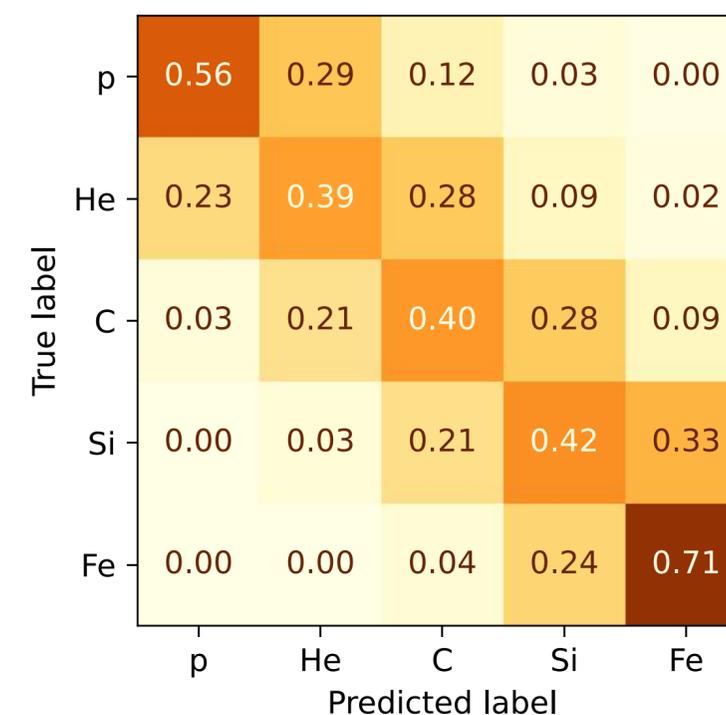
стандартная CNN



только депозиты



только рек.фичи



депозиты + зен.угол

backup / $\langle \ln A \rangle$

