

**Эксперимент «НУКЛОН»:
прямые измерения энергетического спектра
и состава космических лучей
в области энергий 100 GeV -1PeV
на КА «Ресурс-П» № 2.**

Запуск: 28.12.2014

Включение:

11.01.2015

Летные испытания:

11.01.-28.02.2015

Начало набора данных:

март 2015



Ткаченко А., ЛЯП ОИЯИ, 21.06.2017



Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелева МГУ, г. Москва



Объединенный институт ядерных исследований г. Дубна, МО.



ФГУП «КБ «Арсенал» им. М.В.Фрунзе, г. Санкт-Петербург



ФГУП «Научно-производственное объединение Автоматики имени академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург



ЗАО Научно-исследовательский институт материаловедения, г. Зеленоград

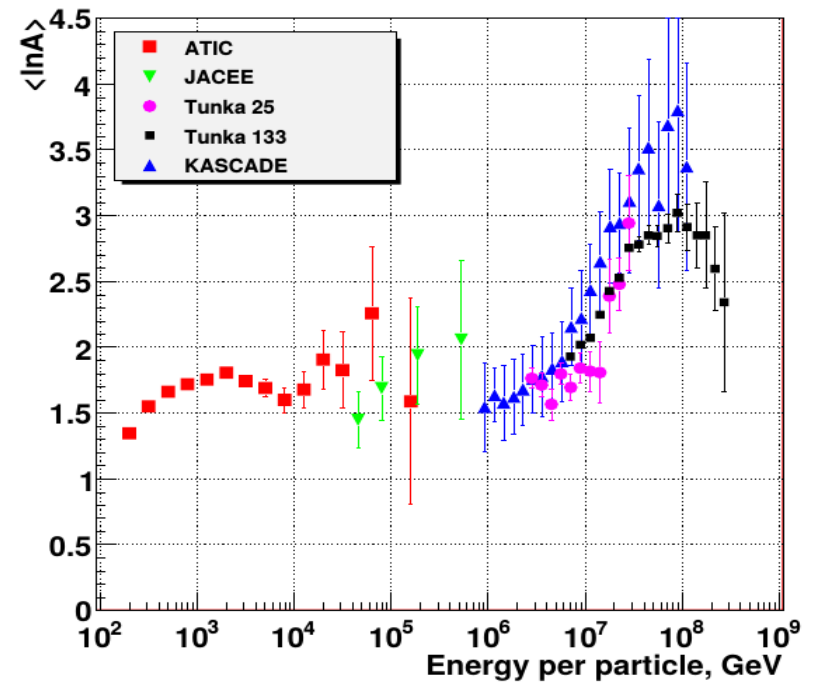
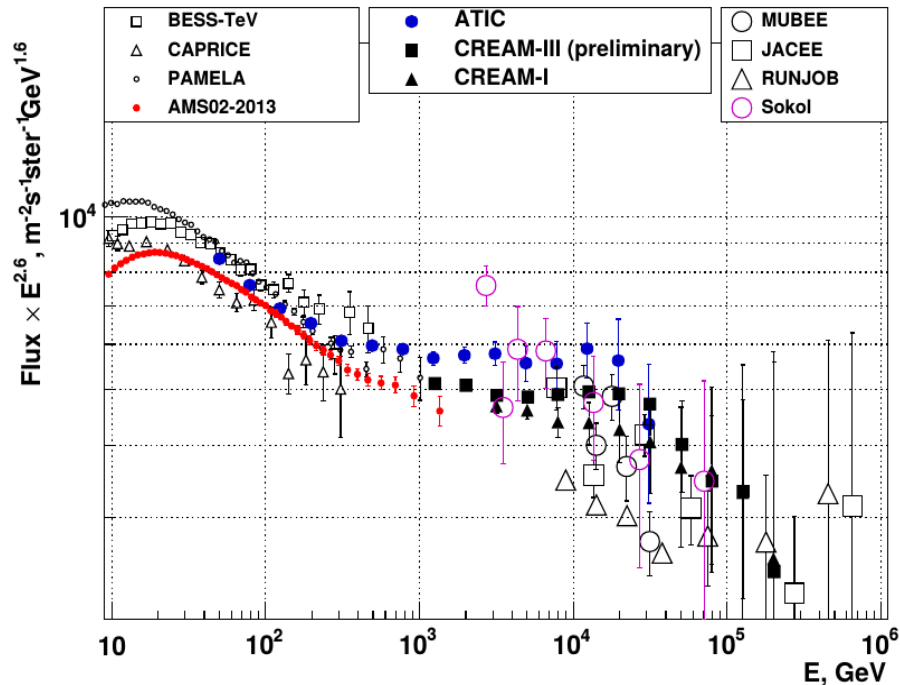


ЗАО Научно-производственное предприятие «САИТ», г. Зеленоград

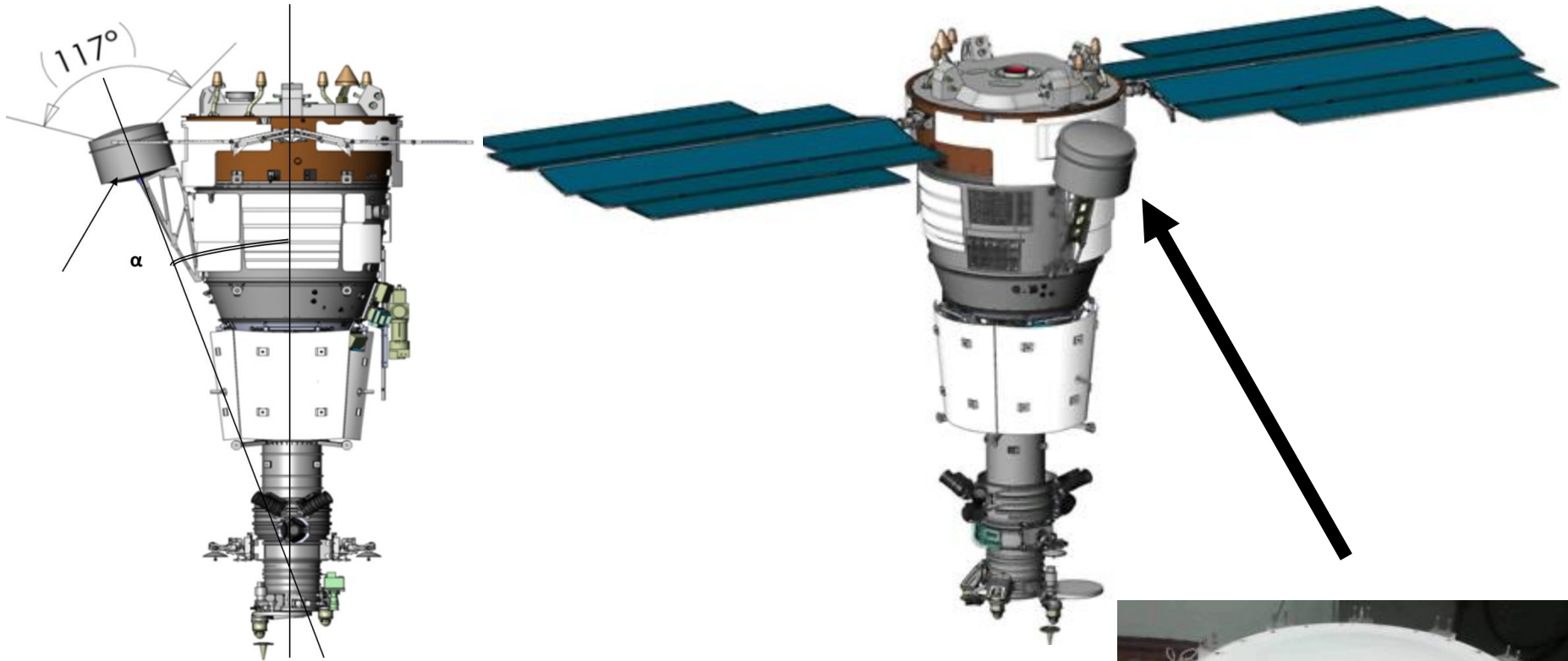
Задачи эксперимента НУКЛОН

Основная - экспериментальное изучение потока космических лучей в области энергий 10^{12} - 10^{15} эВ, с поэлементным зарядовым разрешением.

Дополнительная – выделение из состава космических лучей спектра электронов (позитронов), определение их энергетического спектра в области энергий 300-3000 ГэВ.

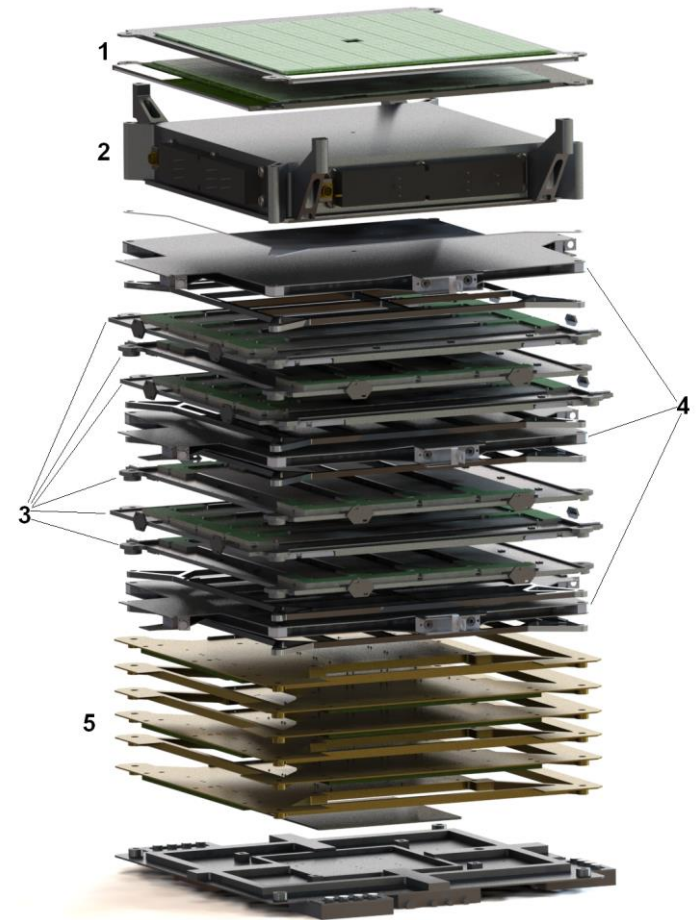
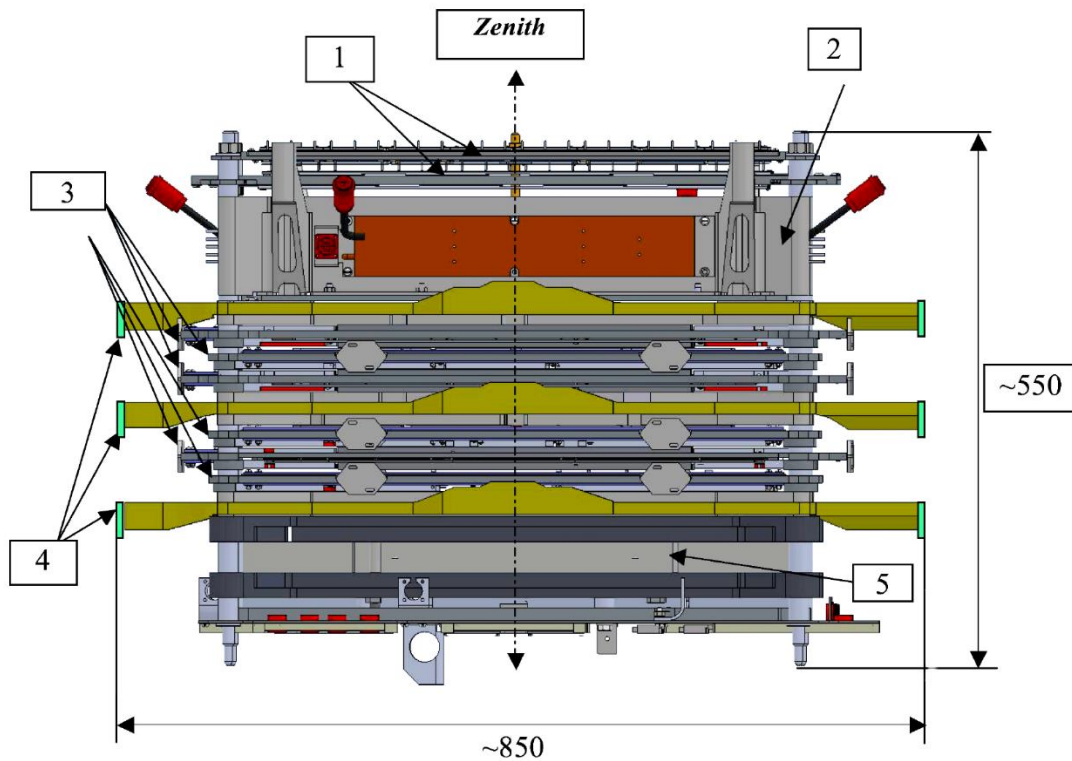


Детектор НУКЛОН на борту КА «Ресурс-П» № 2



Орбита круговая, солнечно-синхронная;
Высота орбиты ~475 км;
Наклонение орбиты ~97 град;
Масса ГК ~ 360 kg;
Энергопотребление ~160 Вт;
Суточный объем ТМ ~10 ГБ;
Срок активной работы: 5 лет.





1. Блок измерения заряда: 4 слоя кремниевых детекторов.
 Размер одного детектора = 2.4 см², толщина = 0.3 мм.
 Число каналов: 4x512 = 2048.

2. Графитовая мишень: толщина 9 см,
 ~ 0.25 яд.д. протонов.

3. Блок измерения энергии: 6 слоев микростриповых детекторов с шагом 0.4 мм + 6
 вольфрамовых слоев толщиной 2 мм (~3 рад.д.). Число каналов: 6x(9x128) = 6x1152 = 6912.

4. Триггерная система: 6 плоскостей сцинтилляторов. Толщина одной плоскости 7.5 мм, ширина
 одного стрипа 31 мм. Число каналов: 6x16 = 96.

5. Микрокалориметр: 6 плоскостей кремниевых детекторов. Толщина слоя 0.4 мм.
 6 вольфрамовых слоев толщиной 8 мм каждый (~0.5 яд.д и ~12 рад.д. суммарно).
 Число каналов: 6x256 = 1536.

Сцинтилляционная система быстрого триггера (ССБТ)

- ❑ Отбор полезных событий в апертуре детектора
- ❑ Подавление событий с низкой энергией

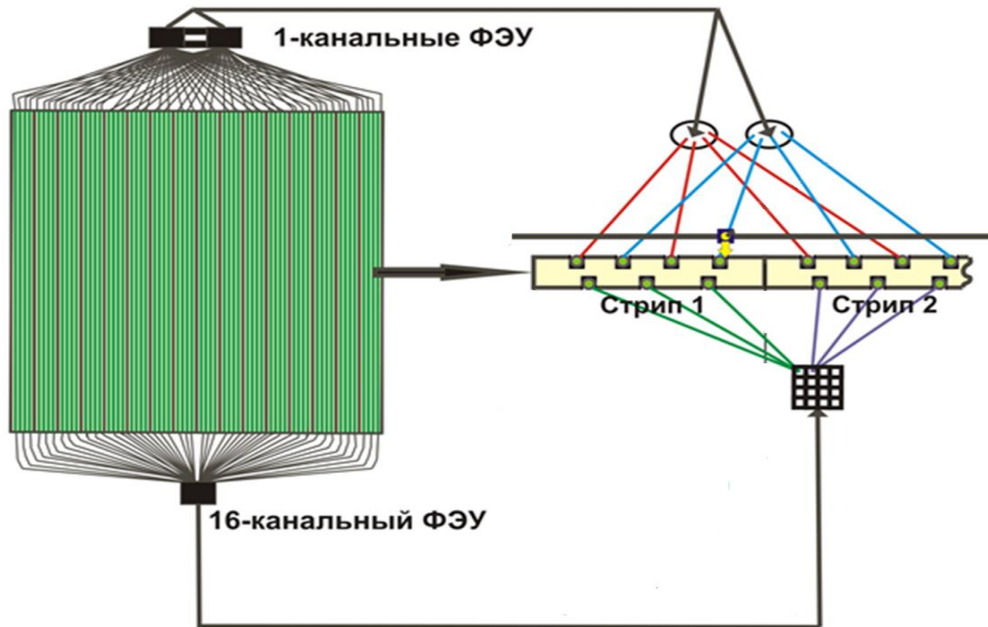
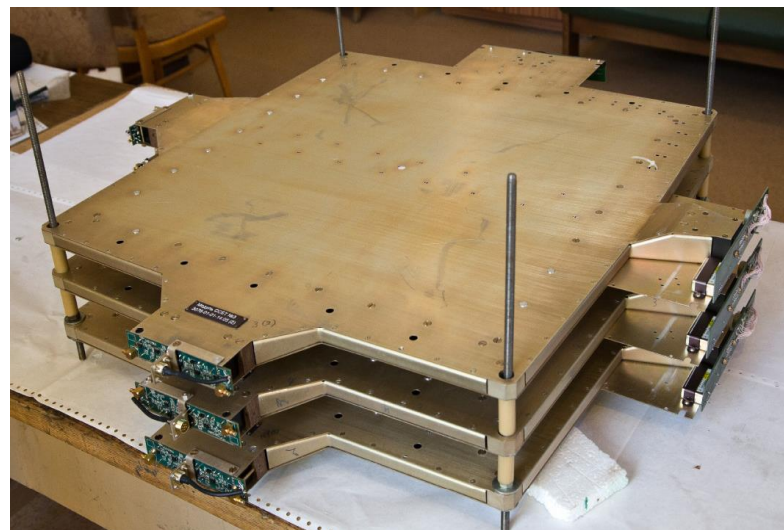
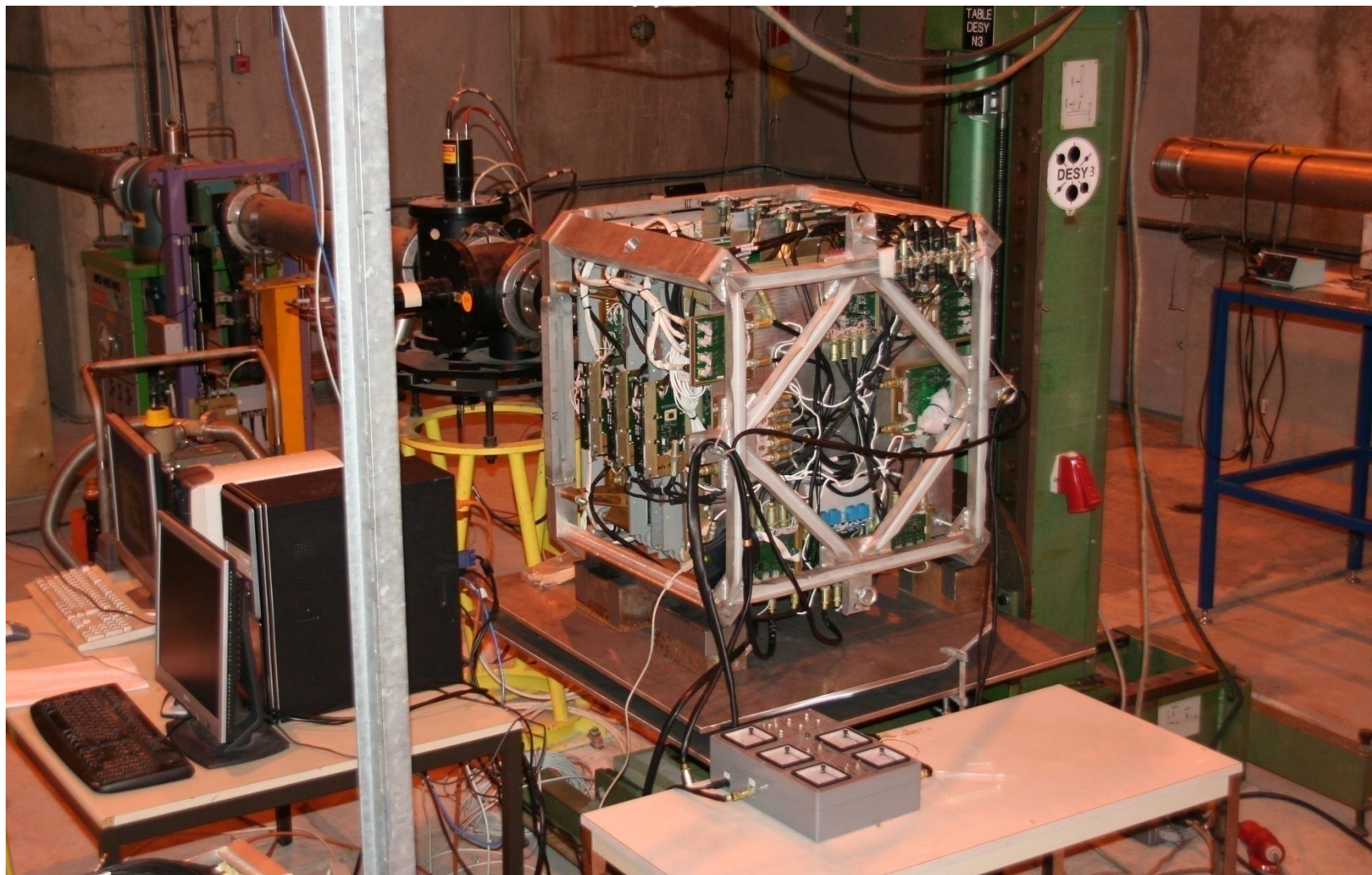


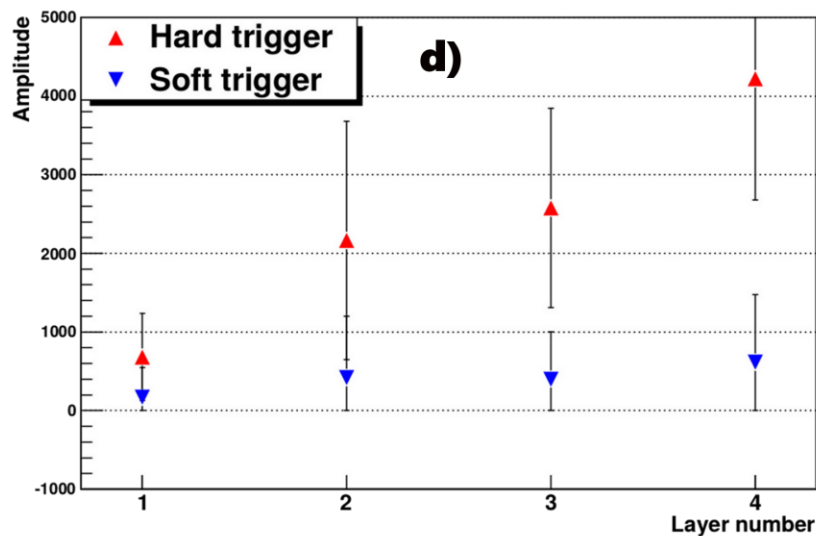
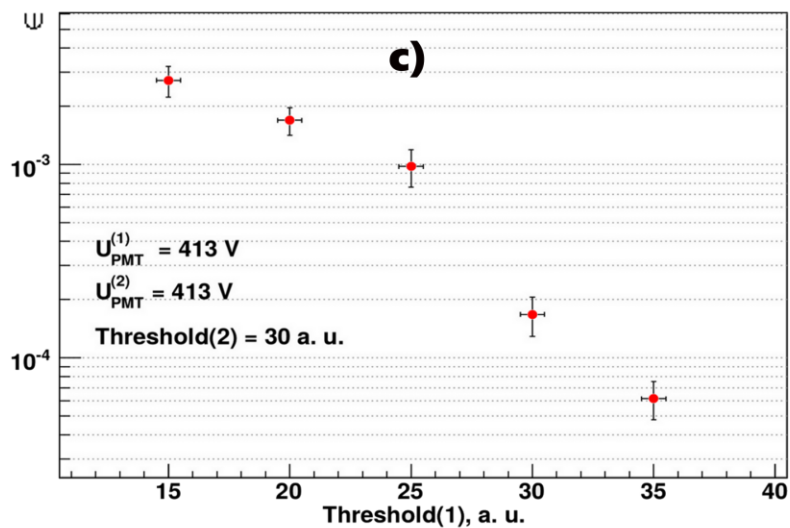
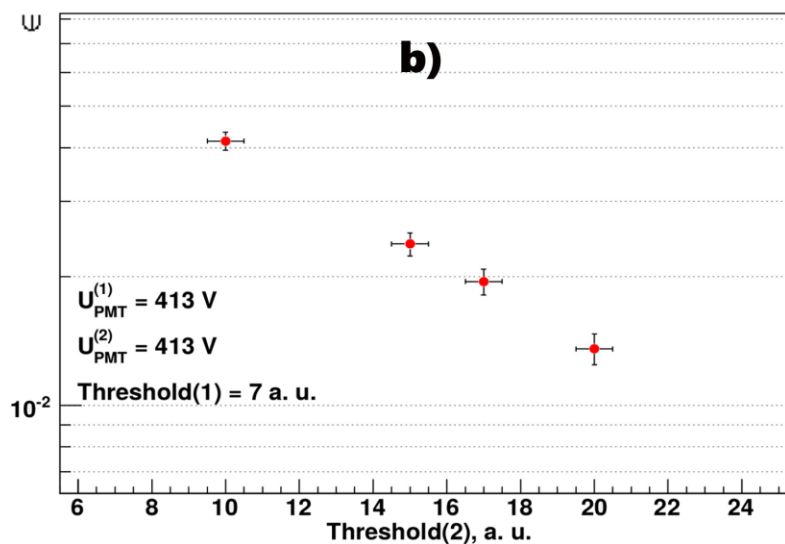
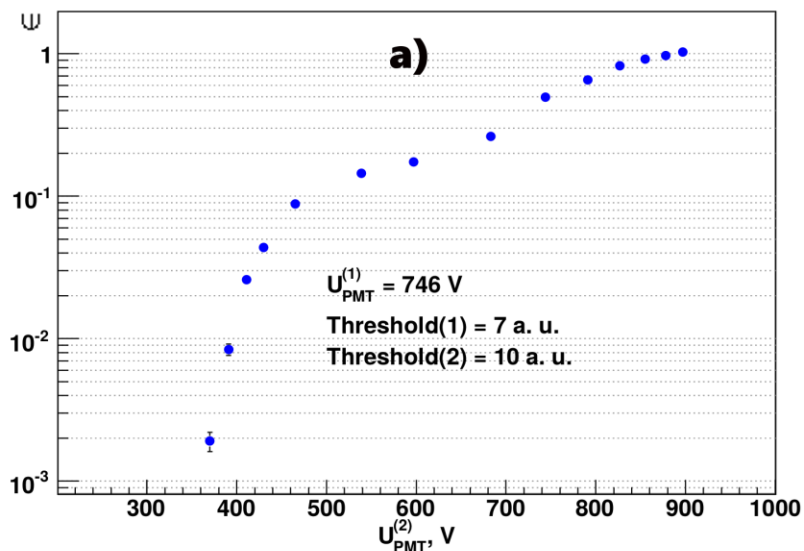
Схема светосбора



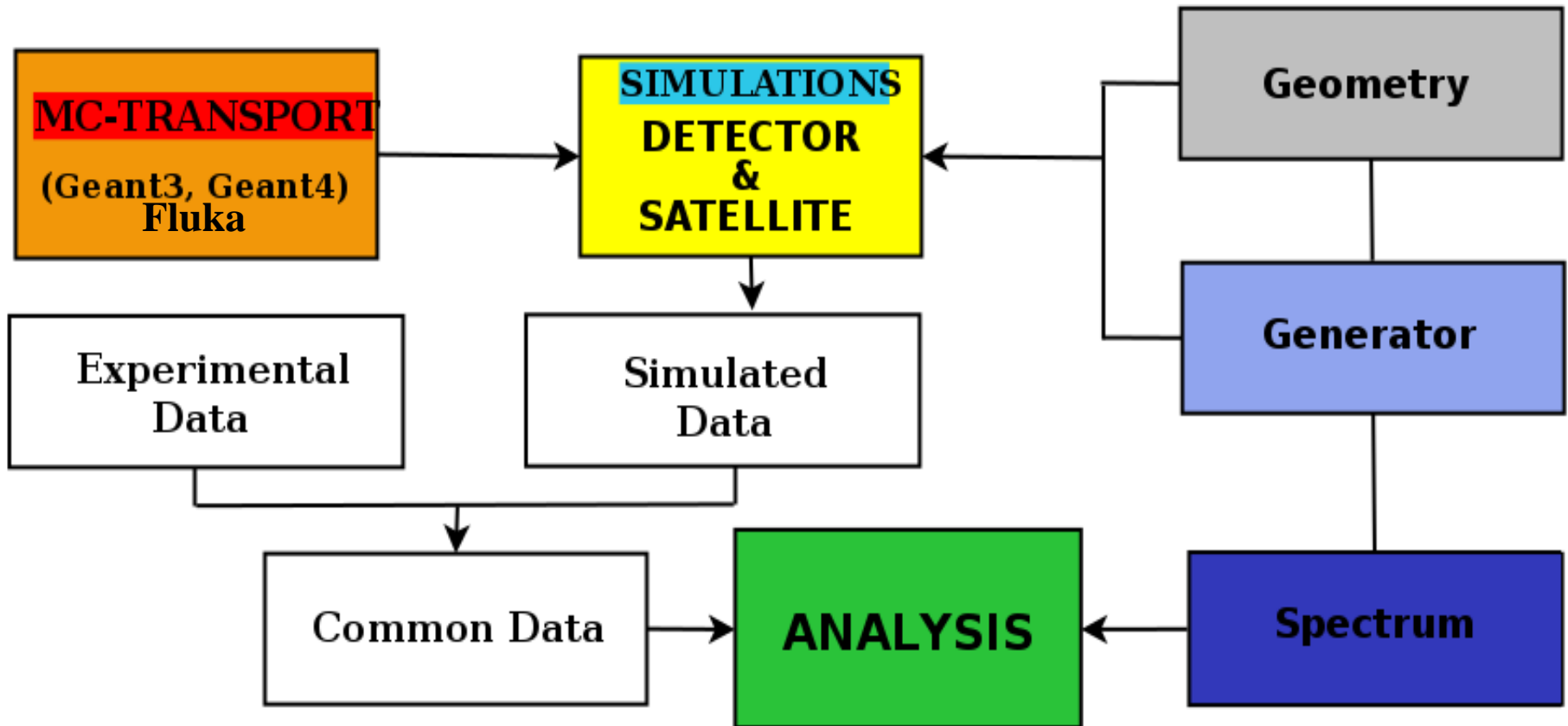
Тестирование полетного варианта детектора НУКЛОН на пучке SPS (CERN)



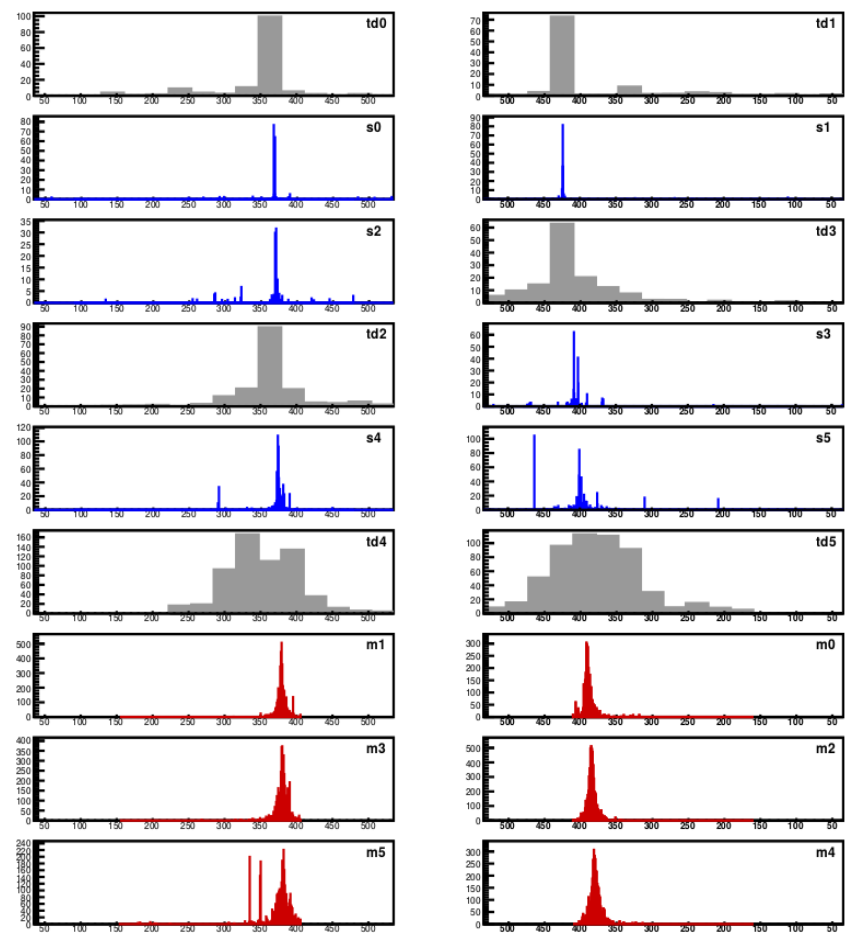
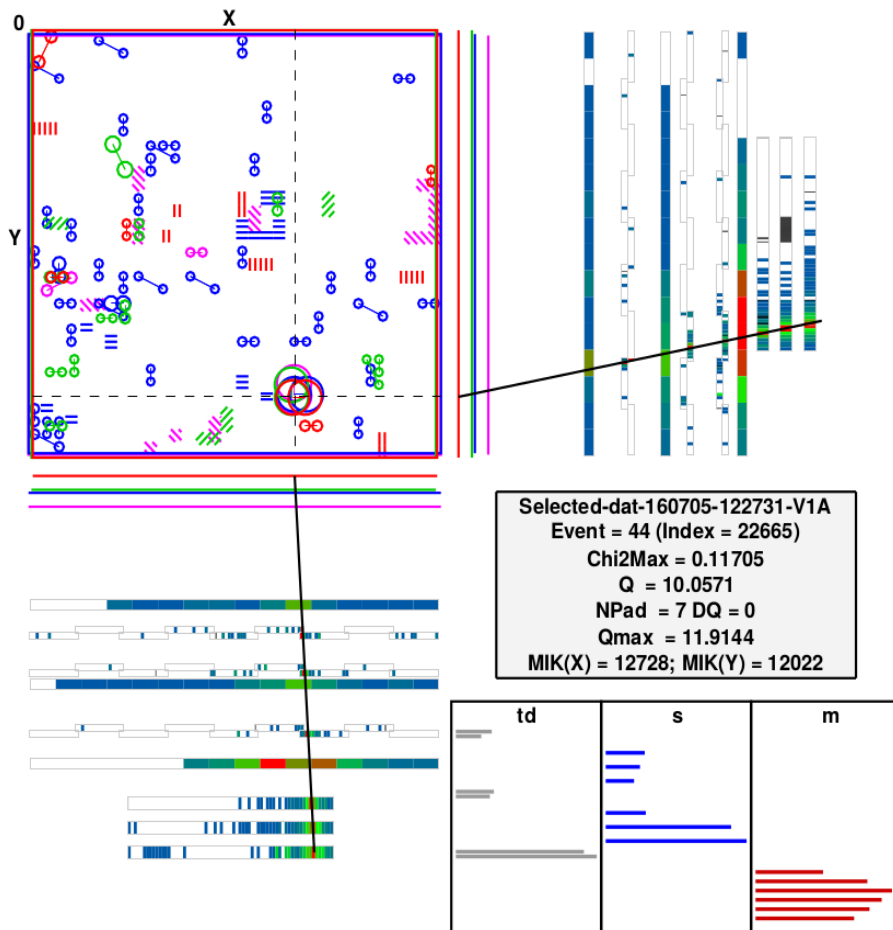
Изучение подавляющей способности ССБТ на пучке SPS (CERN)



MC-моделирование и анализ данных



«Портрет» зарегистрированного события



Энергетический спектр КЛ

$$F(E_i) = \frac{N(\Delta E_i)}{\alpha \cdot \Omega_a \cdot \Delta E_i \cdot \Delta t \cdot \epsilon_i^T \cdot f_i^{(rec)}} \left[sr \cdot m^2 \cdot s \cdot GeV \right]^{-1}$$

Предварительная обработка.

- Восстановление параметров событий (триггер, полетная калибровка).
- Определение уровня шумов (и выделение сигнала).
- Определение неработающих каналов и групп каналов.

Формирование выборки реконструированных событий.

- Реконструкция оси события и отбор апертурных событий.
- Реконструкция заряда.
- В случае удачной реконструкции оси события и заряда частицы определяется энергия первичной частицы.

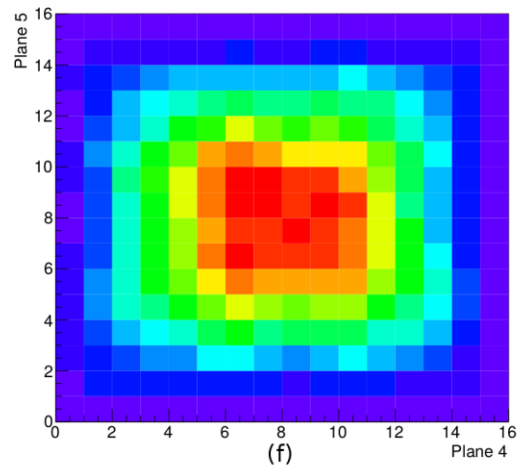
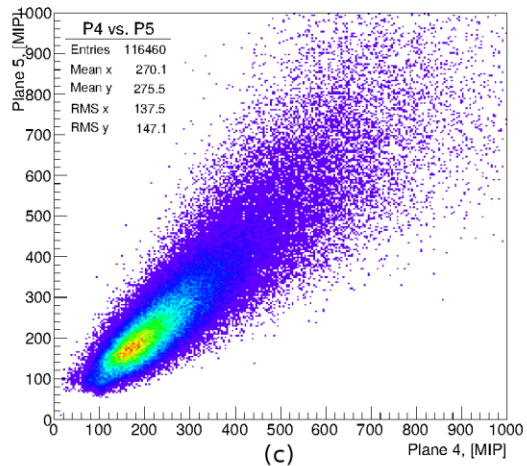
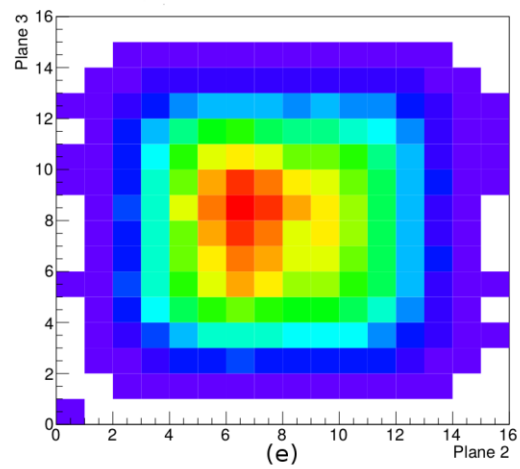
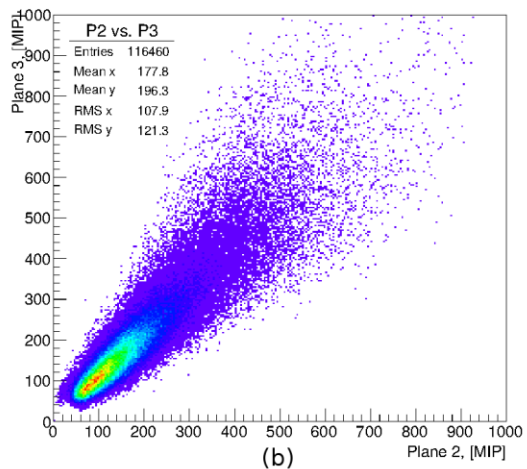
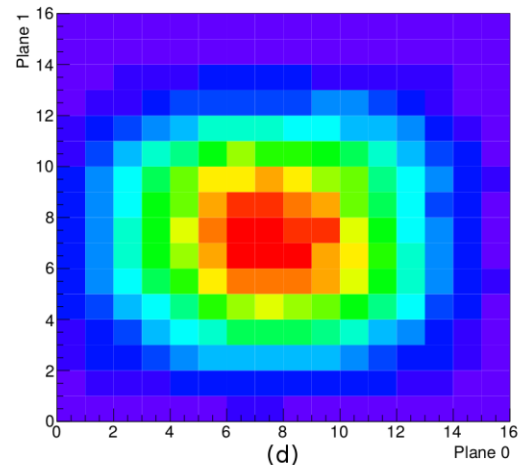
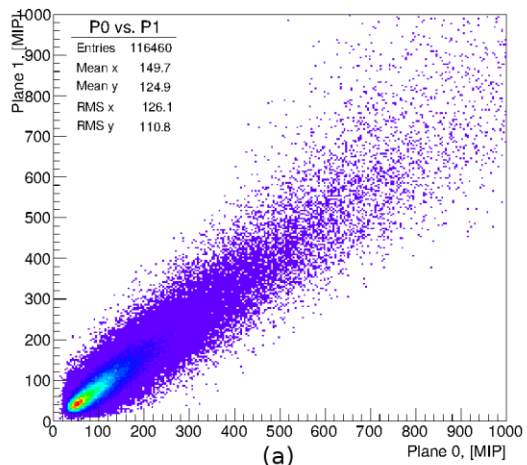
Определение веса выборки реконструированных событий.

- Анализ банка моделированных событий по алгоритму реконструкции с соответствующей «маской».
- Определение веса выборки.
- Получение энергетических спектров, определение ошибок.

ССБТ:

1. Корреляция сигнала в соседних триггерных плоскостях.

2. Реконструкция оси ливня.

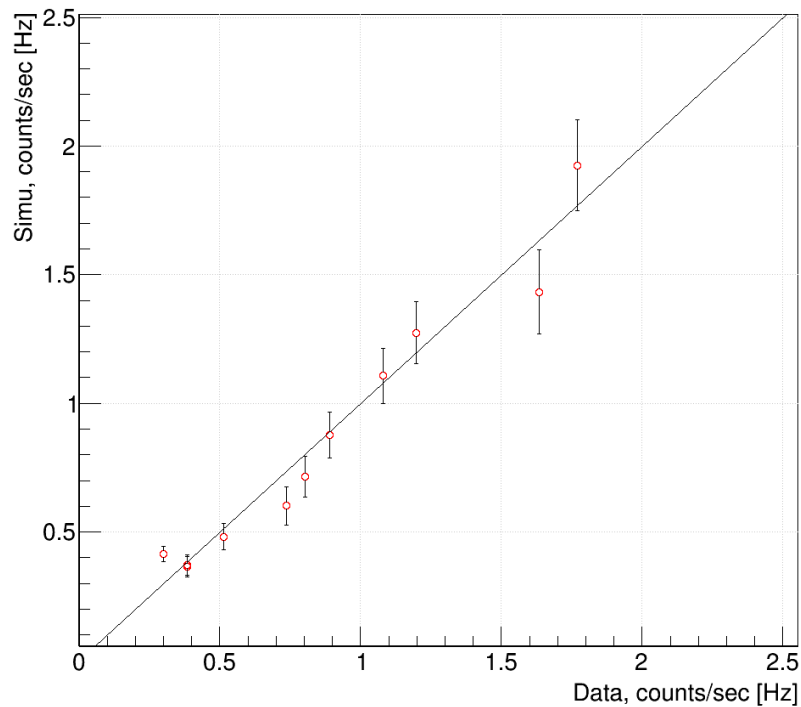


Темп счета и эффективность триггерной системы

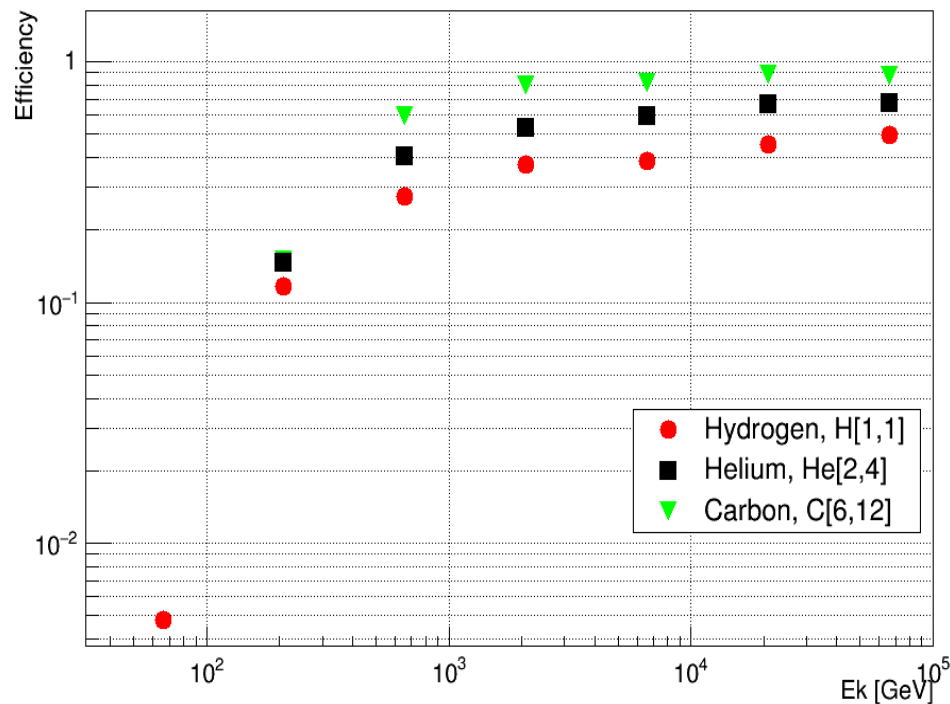
$$\mathcal{N}(\mathbf{T}_j) = \sum_{i=(H),(He),\dots} \int dE d\Omega_S R_i(e_j(E, \Omega_S), \mathbf{T}_j) F_i(E, \Omega_S), \quad d\Omega_S = \sin \theta d\theta d\phi dS,$$

$$F(E, \Omega_S) = \frac{dN_i}{dE d\Omega_S dt}, \quad R(e_j, T_j) = \begin{cases} 0, & e_j \leq T_j \\ 1, & e_j > T_j \end{cases} \quad j = 1, \dots, 6$$

Темп счета триггеров для разном выборе пороговых значений

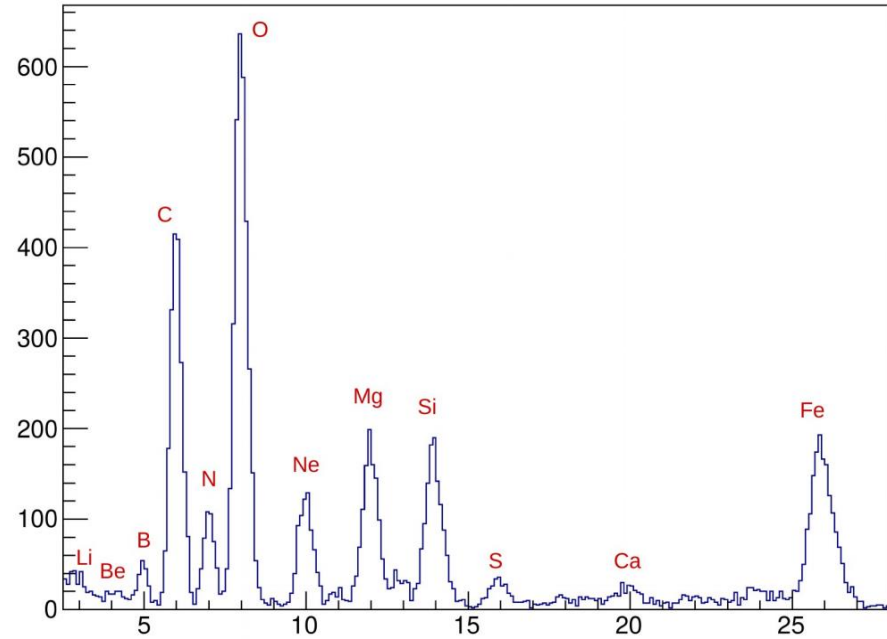
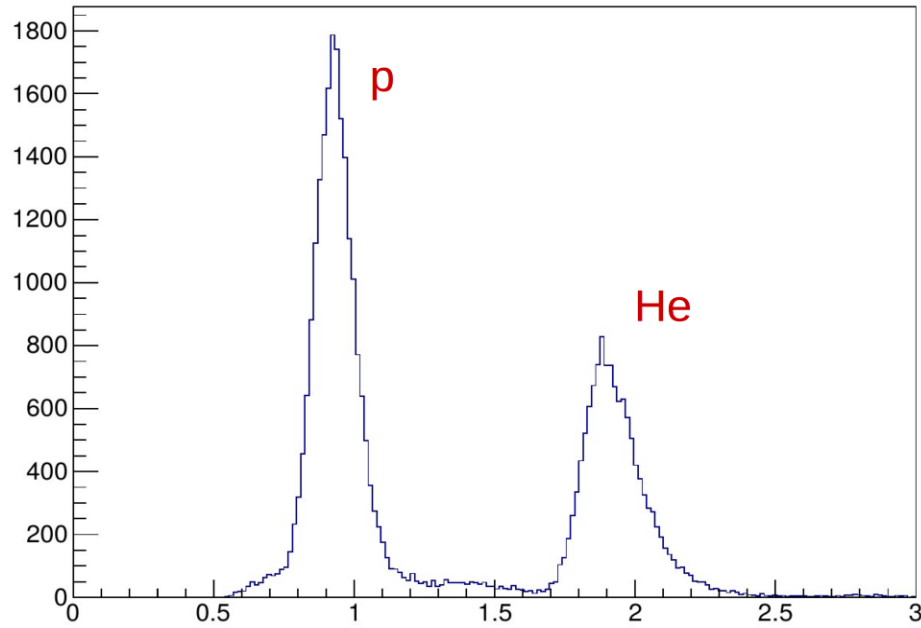


[THRESHOLDS: 35/35 135/135 734/734]



Реконструкция заряда

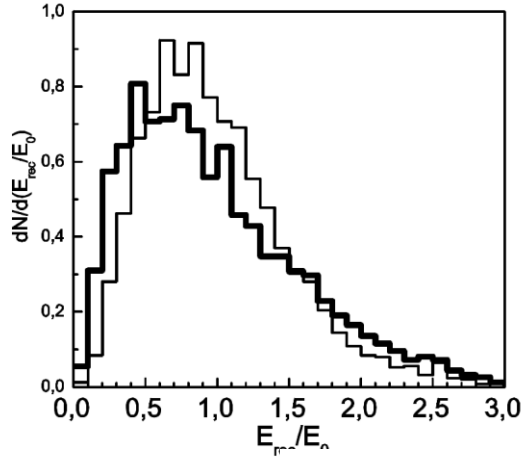
Разрешение < 0.2 зарядовых ед. для CNO-группы



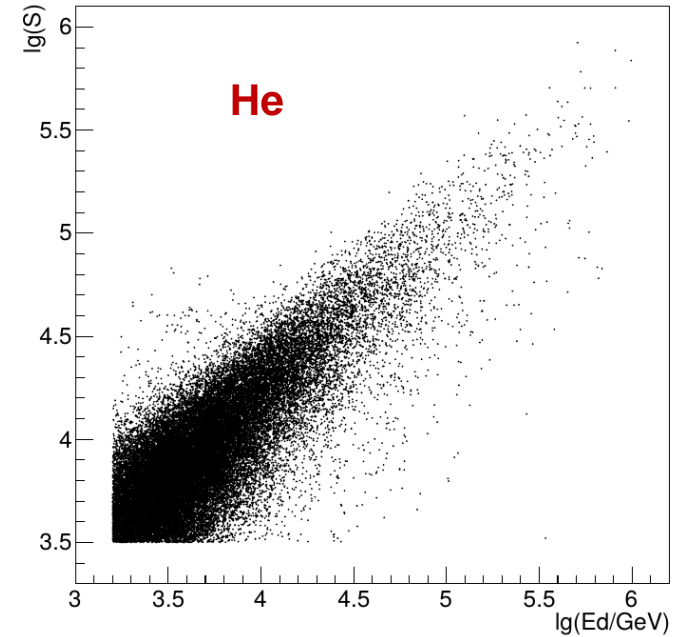
Реконструкция энергии

KLEM:

$$E_{rec}(Z) = a(Z) \cdot S^{b(Z)}, \quad S = \sum_{i=1}^N n_i \eta_i^2, \quad \eta_i = -\ln(r_i/2H)$$

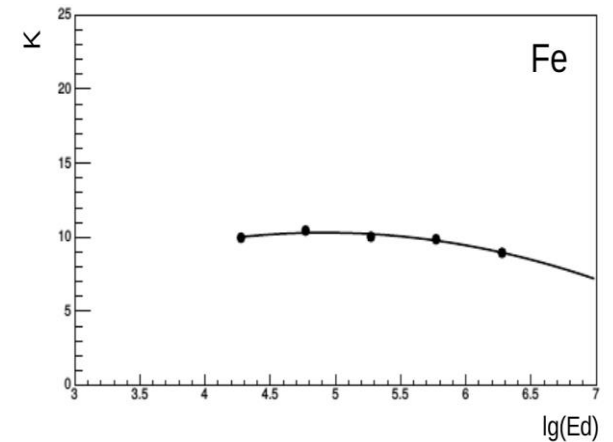
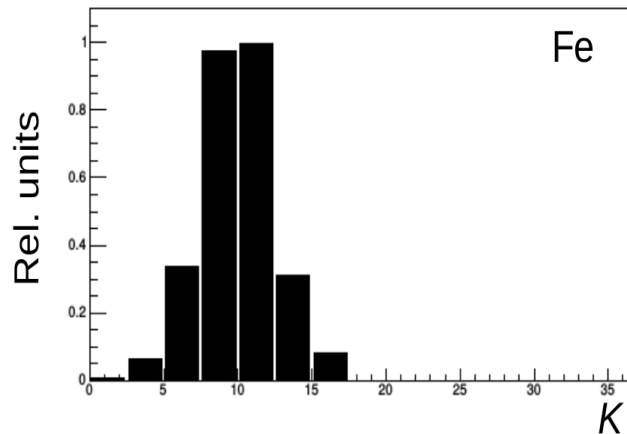
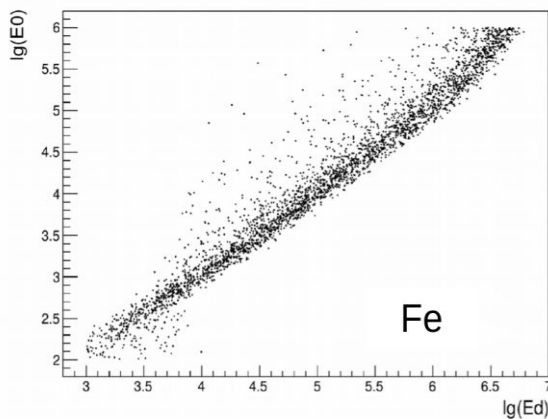


KLEM vs IC



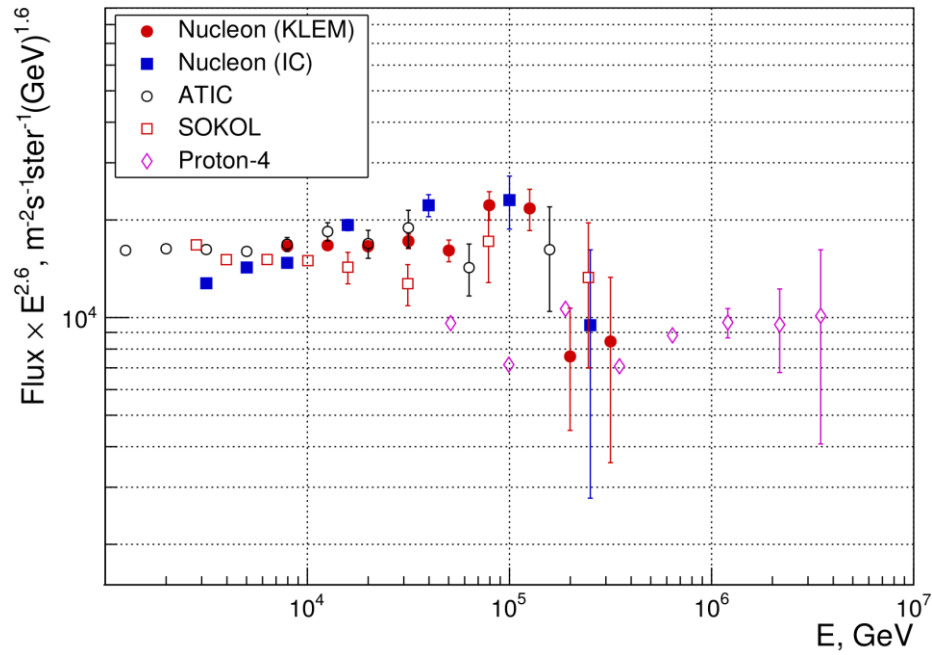
IC:

$$E_{rec}(Z) = K^{-1}(Z, E_d) \cdot E_d(Z)$$

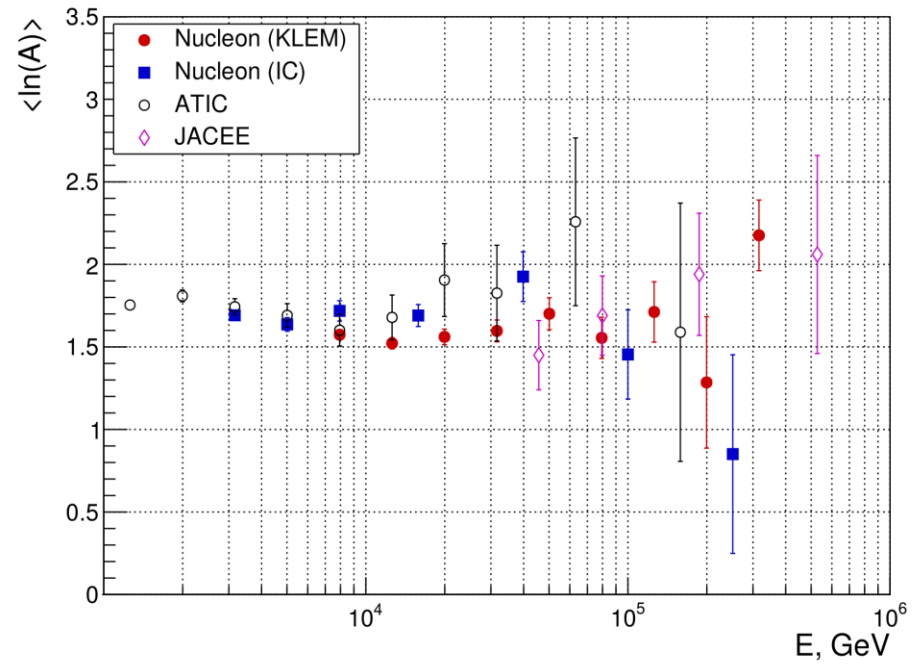


Спектры КЛ

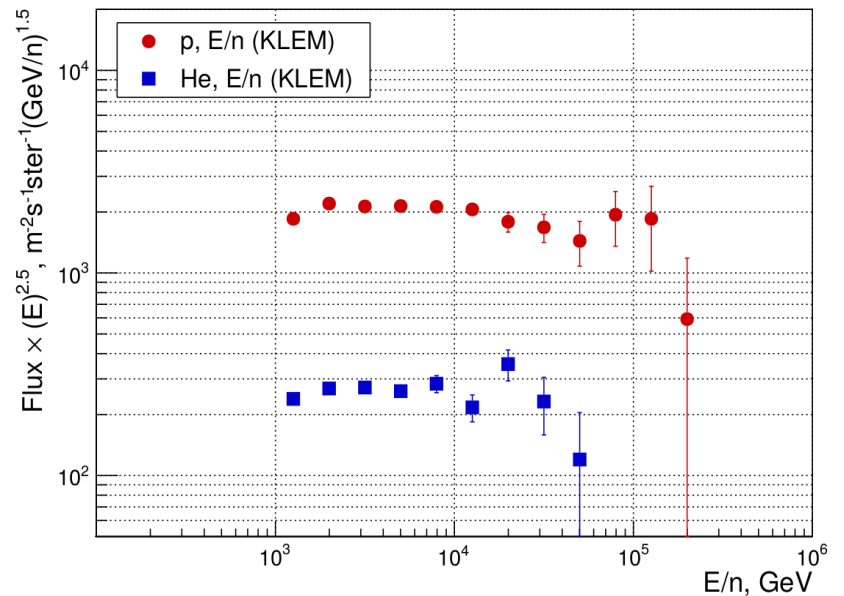
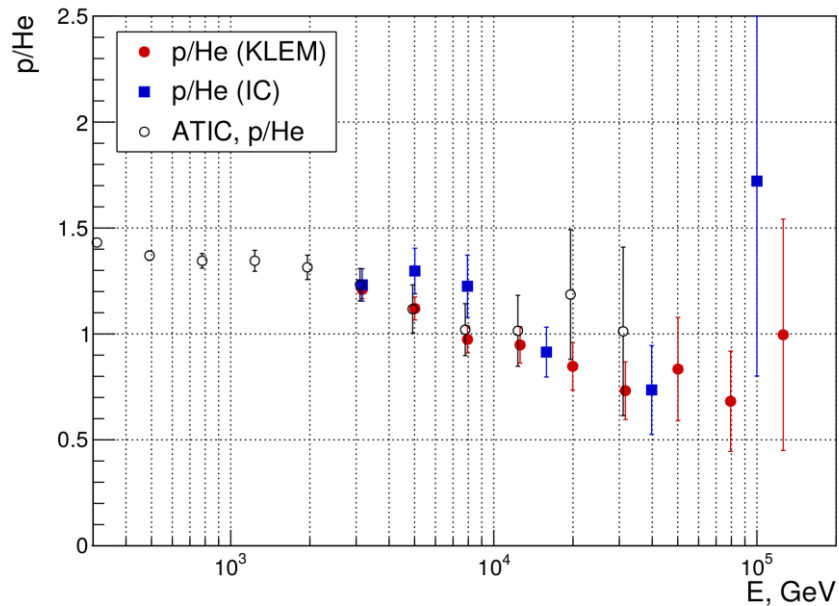
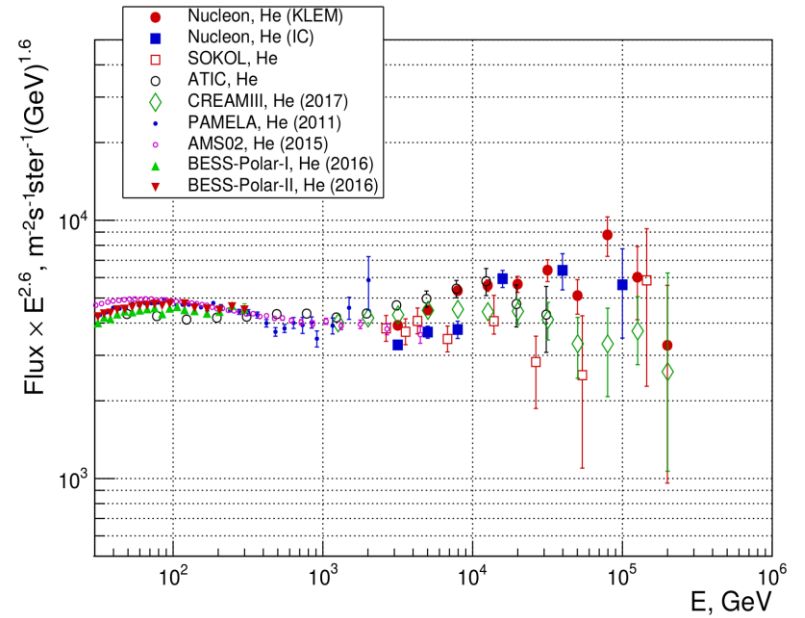
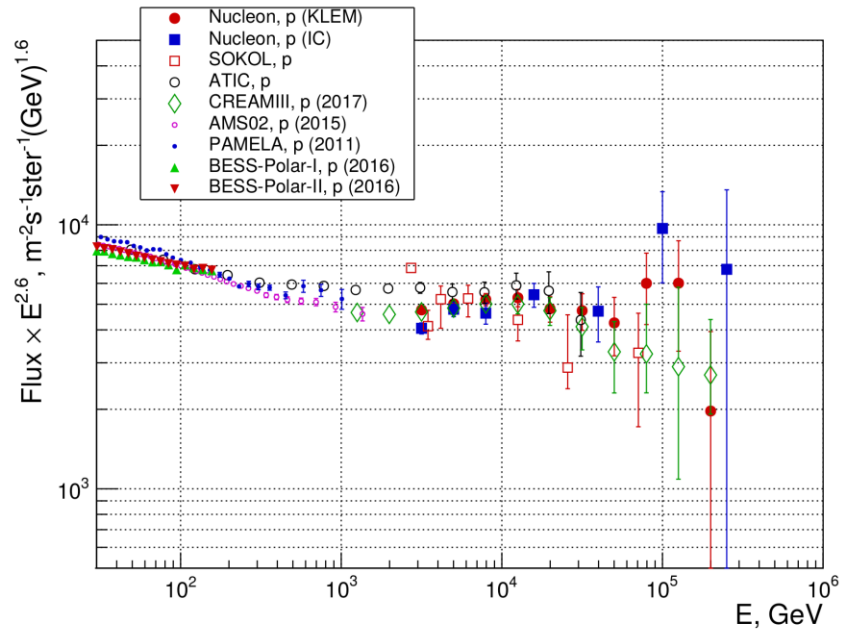
«All-particle»



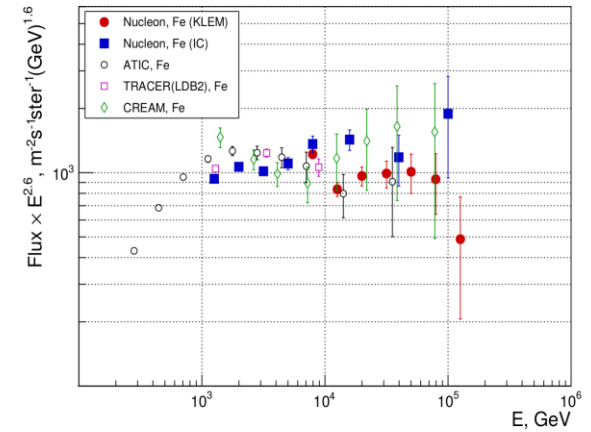
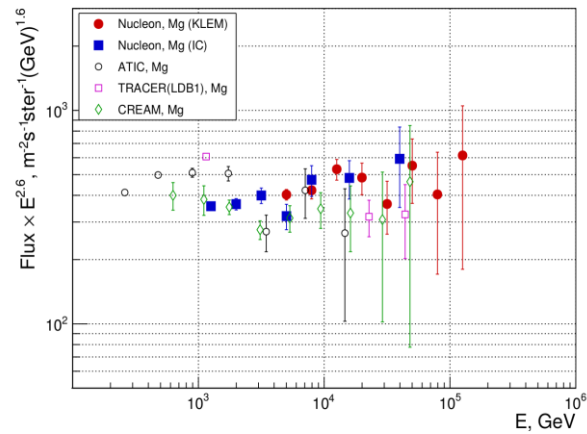
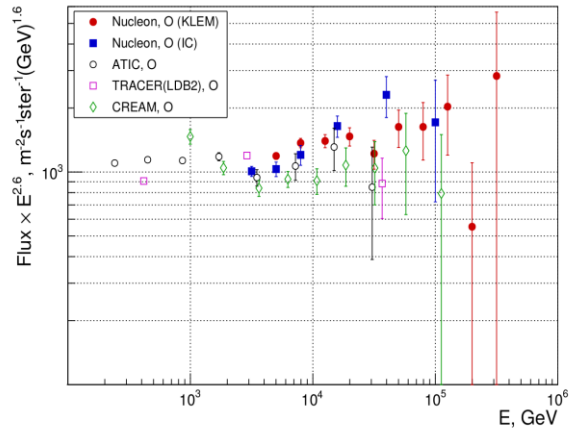
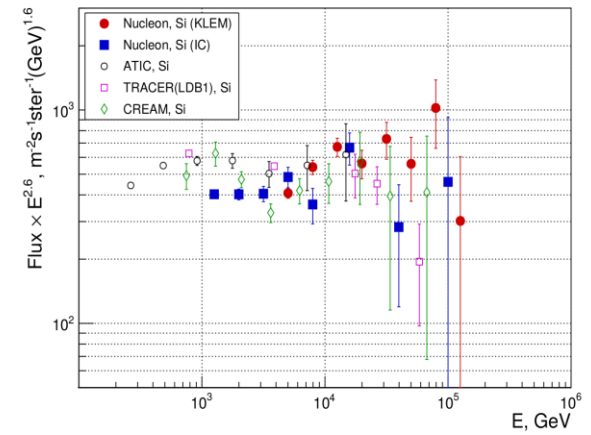
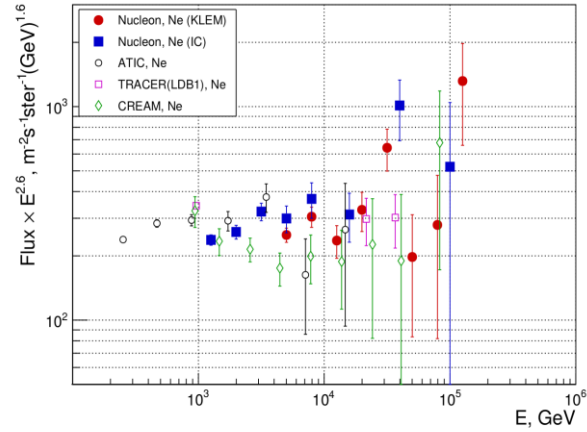
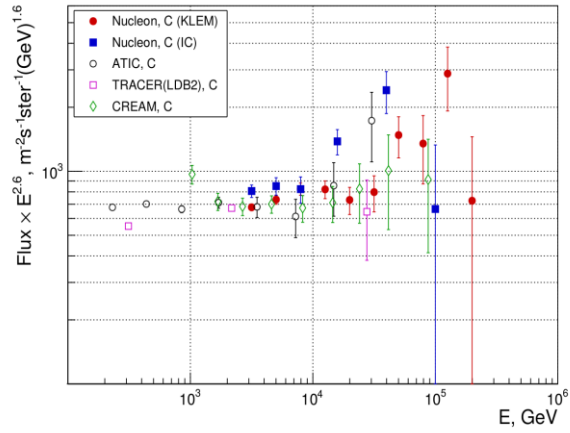
$\langle \ln(A) \rangle$

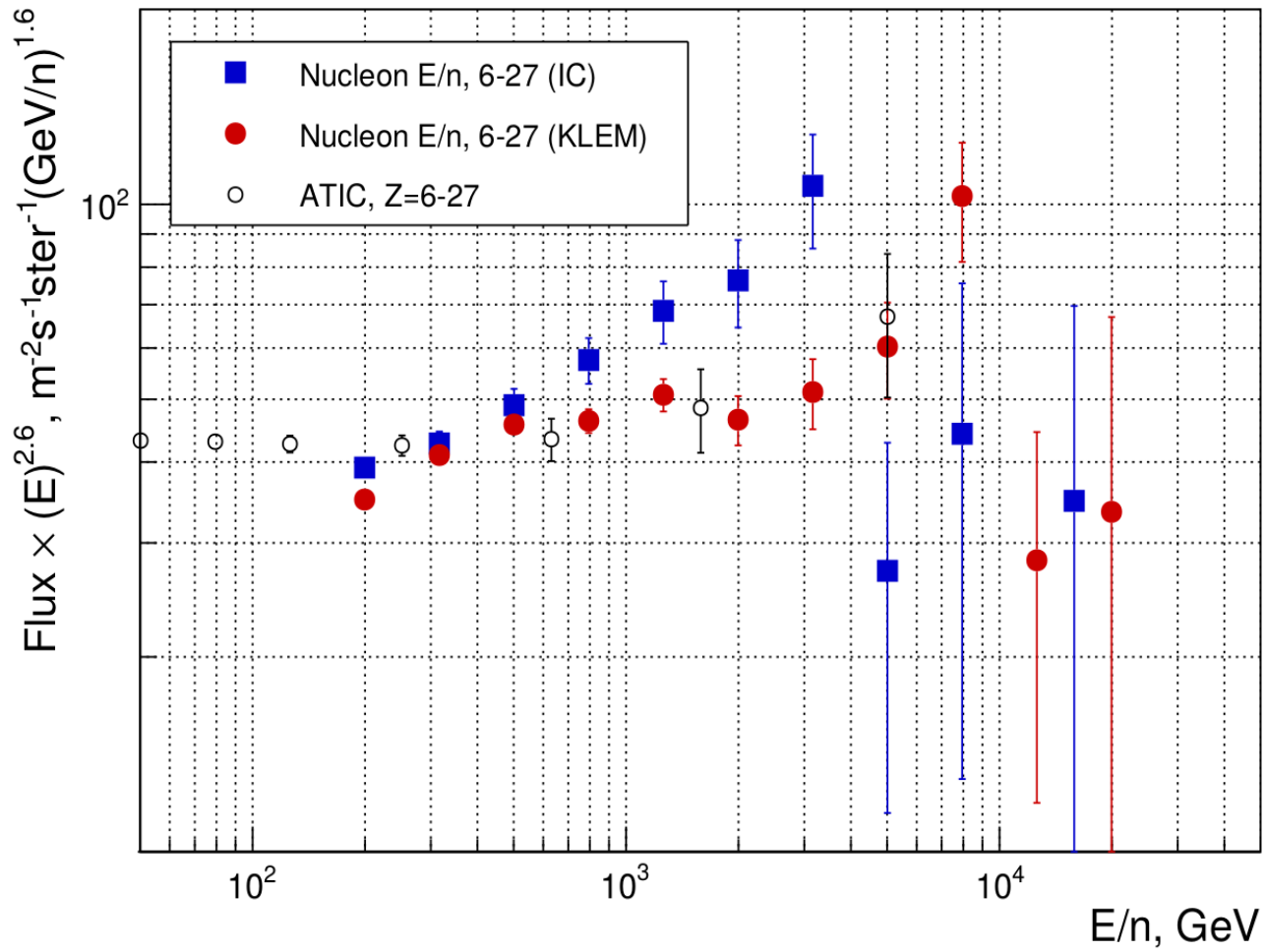


H, He, p/He



C, O, Ne, Mg, Si, Fe





“Separation of the electron component by the shower shape in an ionization calorimeter for the nucleon experiment.” O. A. Vasiliev, D. E. Karmanov, I. M. Kovalyov, Physics of Atomic Nuclei, 77(5):587–594 (2014)

“The NUCLEON space experiment.” E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al., EPJ Web of Conferences 105, 01002 (2015) , Proceeding of Sciences.

“The NUCLEON Space Experiment present status” D.Podorozhny, E.Atkin , V.Bulatov et al., PoS (ICHEP 2016) 295.

“The NUCLEON space experiment for direct high energy cosmic rays investigation in TeV-PeV energy range.”, E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research, A770, 189 (2015).

“Preliminary results of the cosmic ray study in the NUCLEON space experiment.” L.Tkachev* , N.Gorbunov, V.Grebenyuk et al., PoS (ICHEP 2016) 792, Chicago.

“The first preliminary results of the astrophysical experiment NUCLEON.” European Cosmic Ray Symposium (ECRS 2016), Torino, Italy.

“First results of the cosmic ray NUCLEON experiment” E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al., submitted to Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2017). arXiv:1702.2352v1 [astro-ph.HE]

“The cosmic ray nuclei energy spectra in the NUCLEON experiment obtained by the KLEM technique” E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov et al., to be published in Physics of Atomic Nuclei (2017).

Выводы:

- Осуществлен успешный запуск КА «Ресурс –П» №2 с комплексом научной аппаратуры (КНА) НУКЛОН в качестве дополнительной полезной нагрузки.
- КНА НУКЛОН прошел летные испытания в полном объеме
- с положительным результатом.
- С марта 2015 г. начат космический эксперимент.
- Получено свыше 30 000 000 триггеров.

- Предварительный анализ полученных данных:
 - указание, что энергетические спектры основных компонент КЛ имеют сложную структуру в области энергий > 10 ТэВ/частица;
 - наблюдается устойчивое падение интенсивности потока протонов, по отношению к потоку ядер He во всем исследованном энергетическом диапазоне.

-Планы:

Продолжение набора статистического материала, срок активного существования КА и КНА позволит увеличить статистику в несколько раз.

Совершенствование методов обработки полученного материала.

Исследование анизотропии космических лучей.