



Экспериментальное изучение потоков галактических космических лучей в области энергий солнечной модуляции

**Д.М.Подорожный, В.В.Калегаев, Д.Е.Карманов, И.М.Ковалев,
А.А.Курганов, А.Д.Панов, М.В.Подзолко, А.Н.Турундаевский.**

Эксперимент по измерению потоков галактических и солнечных космических лучей в диапазоне энергий от 30 до 1000 МэВ/нуклон с учетом солнечной модуляции 1-2 солнечных циклов (11-22 года)

Российская космическая станция (РОС) –

«Модуляция – РОС»

Международная научная лунная станция (МНЛС) –

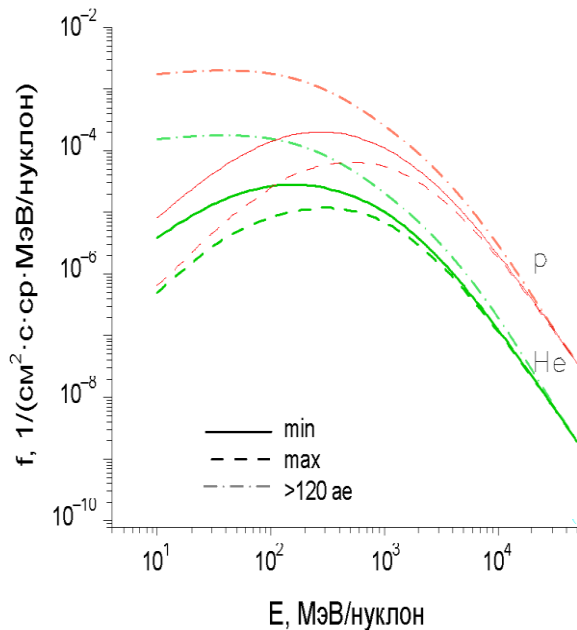
«Луна – Модуляция»

Проекты предполагают создание банка данных ГКЛ и СКЛ за весь цикл солнечной активности. Такой банк необходим для совершенствования (создания новых) численных моделей потоков энергичных гелиосферных частиц в межпланетном и околоземном пространстве.

Имеющиеся к настоящему времени измерения потоков протонов и ядер ГКЛ в диапазоне энергий модуляции:

- GME/IMP-8, 1973–2002, орбита высотой $\approx 22\text{--}45$ радиусов Земли – протоны, He $\approx 50\text{--}500$ МэВ);
- CRIS/ACE, 1997 – н.в., точка либрации L1 Солнце-Земля – ядра с $z \geq 5$ $\approx 50\text{--}500$ МэВ/нуклон;
- ERNIN/SOHO, 1995–2014, точка либрации L1 Солнце-Земля – протоны, He < 50 МэВ/нуклон; протоны 0.3–1.5;
- COSPIN/Ulysses, 1990–2009, – протоны, He 5–320 МэВ/нуклон.
- PAMELA протонов и ядер He ГКЛ с энергиями > 80 и > 200 МэВ/нуклон 2006–2014 гг.
- единичные кратковременные измерения на полярных стратосферных аэростатах: серий BESS

-.....



Модель НИИЯФ МГУ

Измерения потоков частиц в области энергий модуляции, выполненные за последние несколько десятилетий, обладают неполнотой и заметными погрешностями

Методика

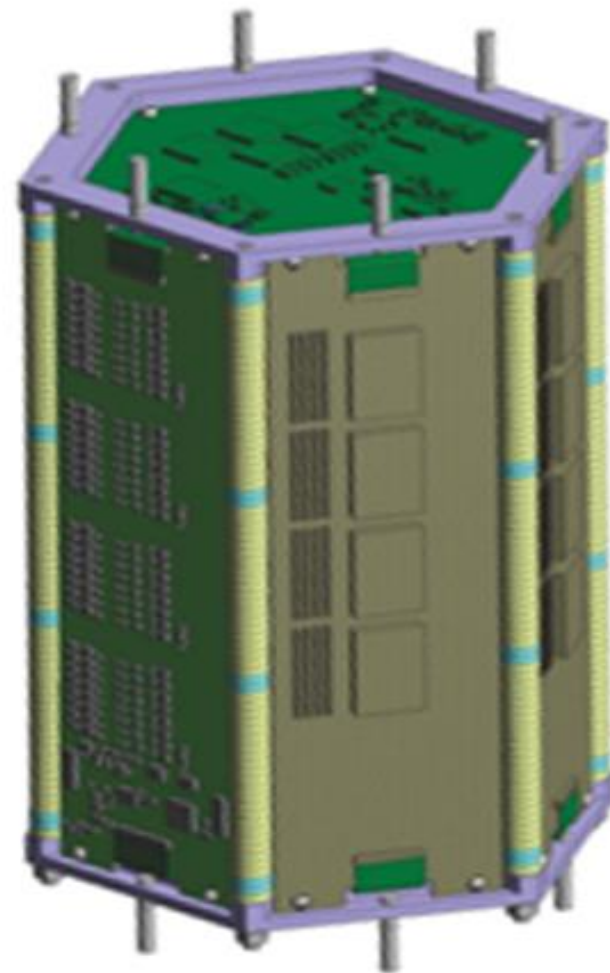
Основная трудность конструкции прибора заключается в широком диапазоне энергий и зарядов исследуемых КЛ.

Известно, что для регистрации ядер применимы различные методы. Эти методы основаны на различных физических эффектах в зависимости от свойств частицы: искривлении траектории магнитным полем, черенковском и нестационарном излучении, прямом измерении скорости времяпролетным методом, ионизационных потерях в веществе. Во многих случаях для одновременного определения заряда, массы и энергии ядра требуется сочетание нескольких методов.

Эти подходы реализованы в PAMELA, AMS и ряде других экспериментов. Установки представляют собой сложные системы, имеющие большую массу и габариты.

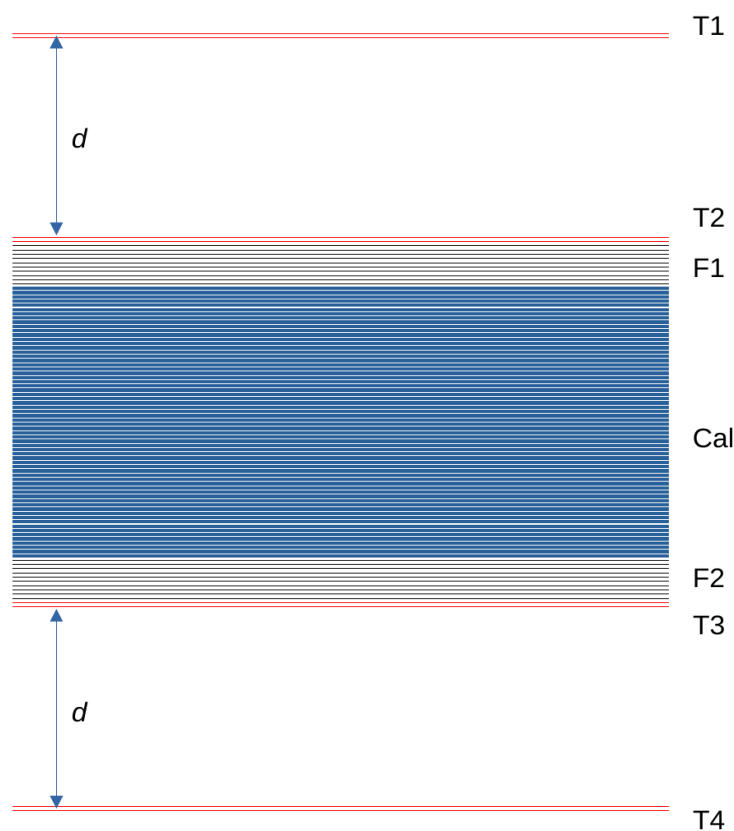
Предлагается новый подход для проведения экспериментов в данной области. Особенности нового подхода являются прецизионность в измерении энергии и зарядов частиц вместе с относительно невысокой массой и стоимостью аппаратуры.

В основу технической реализации спектрометра «Модуляции» легли методики, отработанные на НУКЛОН 2. Аппаратура представляет собой многослойную структуру из микростриповых и палочковых кремниевых детекторов. Эту технологию можно использовать в качестве калориметра для прецизионной регистрации ионизирующего излучения вплоть до полной остановки (брэгговский режим) ядра. Было разработано специальное математическое обеспечение, изготовлен прототип. Проведен цикл испытаний на выведенных пучках ядер от притонов до Рі. Для реализации такого спектрометра тяжелых ядер достаточно глубины кремния порядка 6 см.



Для потоков легких ядер космических лучей в области энергий солнечной модуляции использовать спектрометр НУКЛОН 2 в полной мере невозможно. Например, для полной остановки протона с энергией в 1000 МэВ потребуется спектрометр глубиной более 1 м, что не реально во всех отношениях.

Для моделирования спектрометра «Модуляция» использовались методы наработки, полученные в проекте НУКЛОН 2 с переносом исследований в область СКЛ и обильных ядер ГКЛ в области энергий 30- 1000 МэВ/нуклон и заряды $Z = 1-26$.

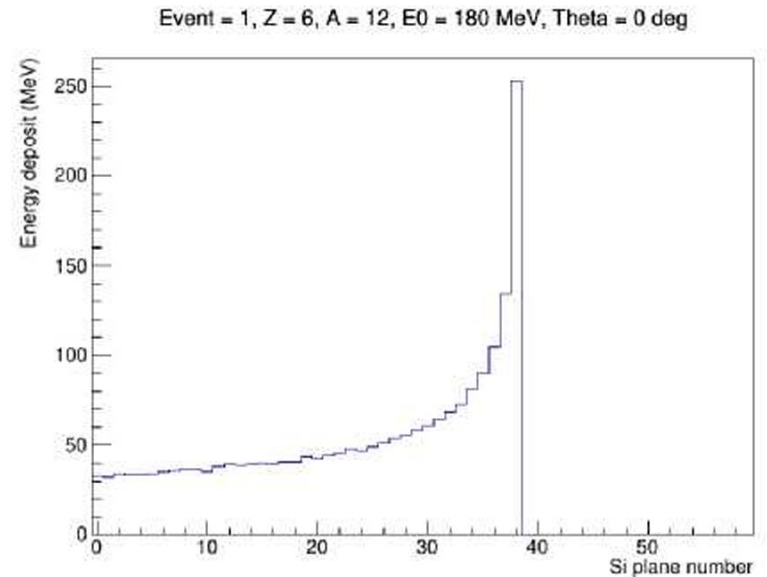


T1 и T2 — два двухслойных кремниевых полосковых трека в верхней части устройства, T3 и T4 — два аналогичных трека в нижней части устройства (красные линии). Ф1 и Ф2 - два тонкослойных кремниевых калориметра (толщина слоя 300 мкм). Cal - базовый кремниевый калориметр с толщиной пластин 1 мм. Общая толщина калориметра F1+Cal+F2 составляет 60 мм.

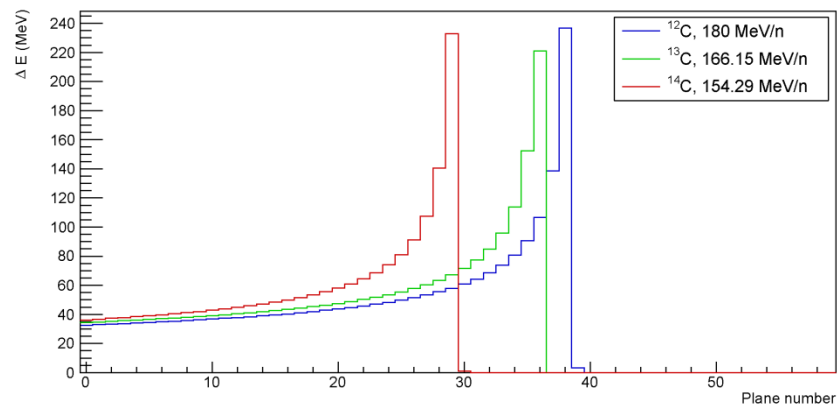
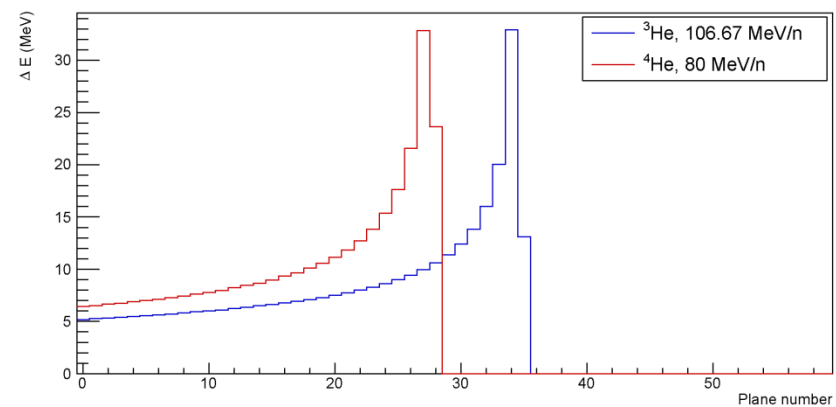
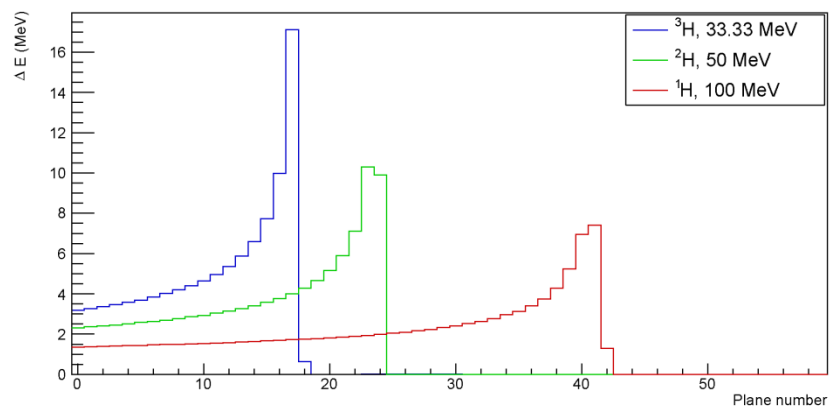
Для низких энергий методика НУКЛОН-2 применяется без модификаций.

Элемент	Z	A	E_{min} MeV	E_{max} MeV
P	1	1	29	121
He	2	4	29	121
Li	3	7	33	140
Be	4	9	39	170
B	5	11	45	196
C	6	12	53	231
N	7	14	58	255
O	8	16	63	276
F	9	19	65	286
Ne	10	20	70	317
Na	11	23	73	326
Mg	12	24	78	355
Al	13	27	81	364
Si	14	28	85	391
P	15	31	88	400
S	16	32	92	426
Cl	17	35	94	435
Ar	18	40	93	430
K	19	39	99	467
Ca	20	40	104	491
Se	21	46	103	477
Ti	22	49	104	487
V	23	51	106	505
Cr	24	52	109	526
Mn	25	55	112	532
Fe	26	56	115	558

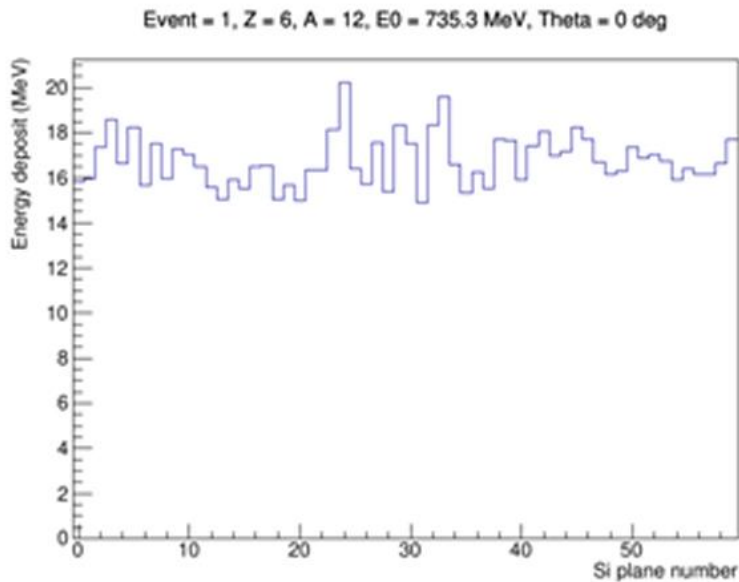
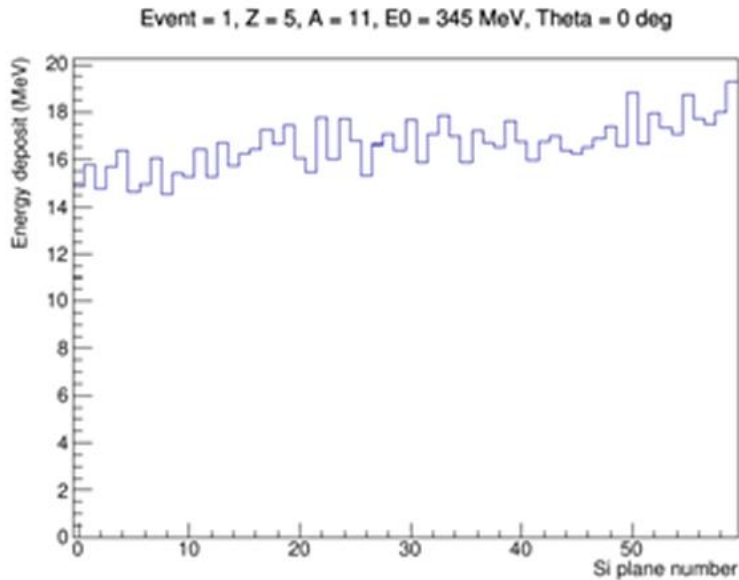
Статистическая погрешность расчета варьируется от 0,13% для протонов до 0,23% для железа.



Пример события полного поглощения. Углерод, 180 МэВ/нуклон. Пик Брэгга



Уверенное разделение не только по зарядам но и по изотопам - пример при энергии 100 МэВ/частица



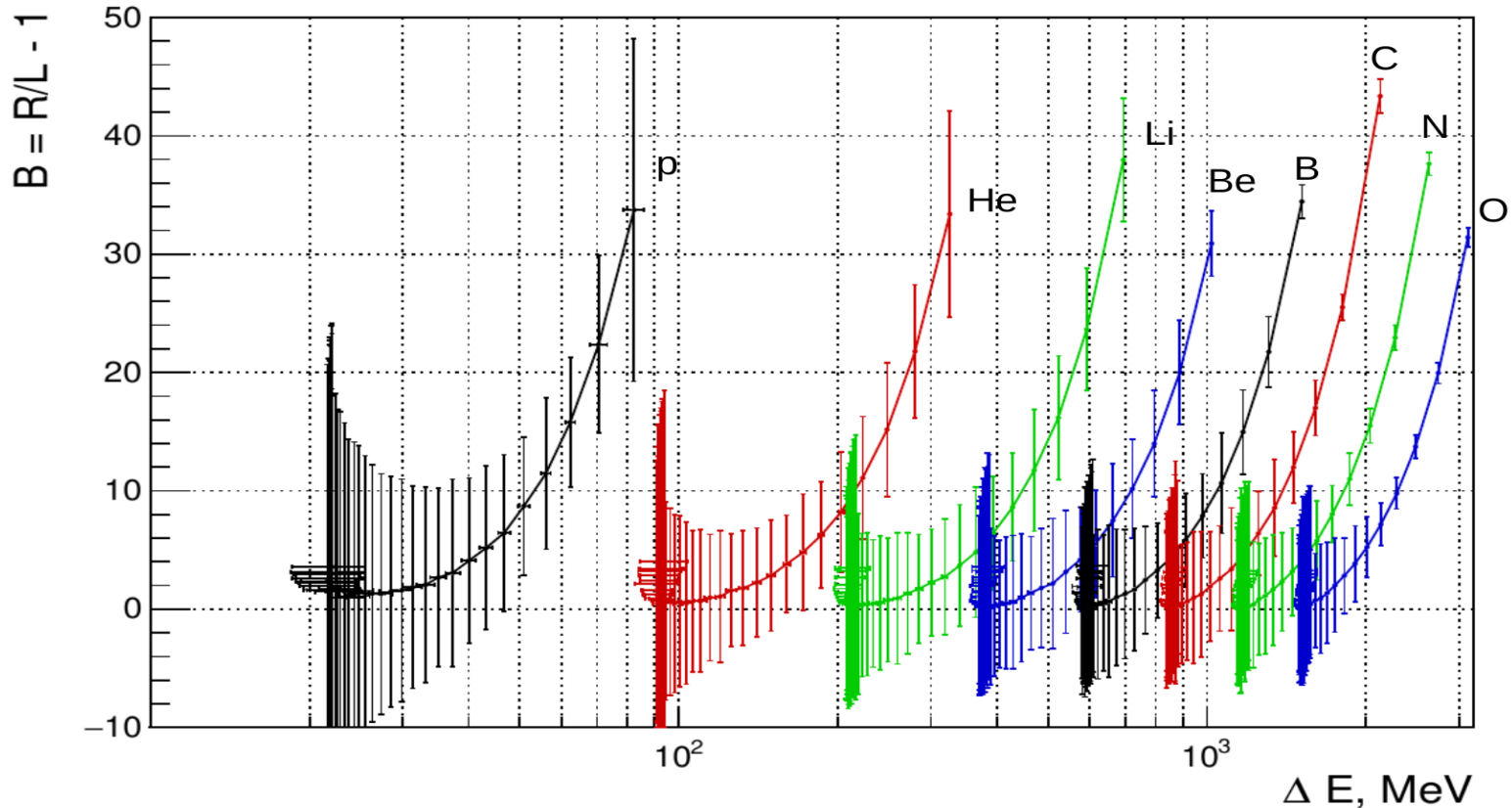
Например, на рисунках показаны каскадные кривые бора и углерода для одного и того же среднего энерговыведения в калориметре $\Delta E = 1000$ МэВ. Даже на глаз можно увидеть разницу в наклонах каскадных кривых.

Поэтому задача состоит в том, чтобы определить тип ядра только при заданной энергии ΔE

В качестве простейшего примера мы можем ввести параметр V .

$$V = (R/L - 1) \cdot 100\%.$$

Где R — ΔE в нижней половине калориметра, а L — в верхней половине.

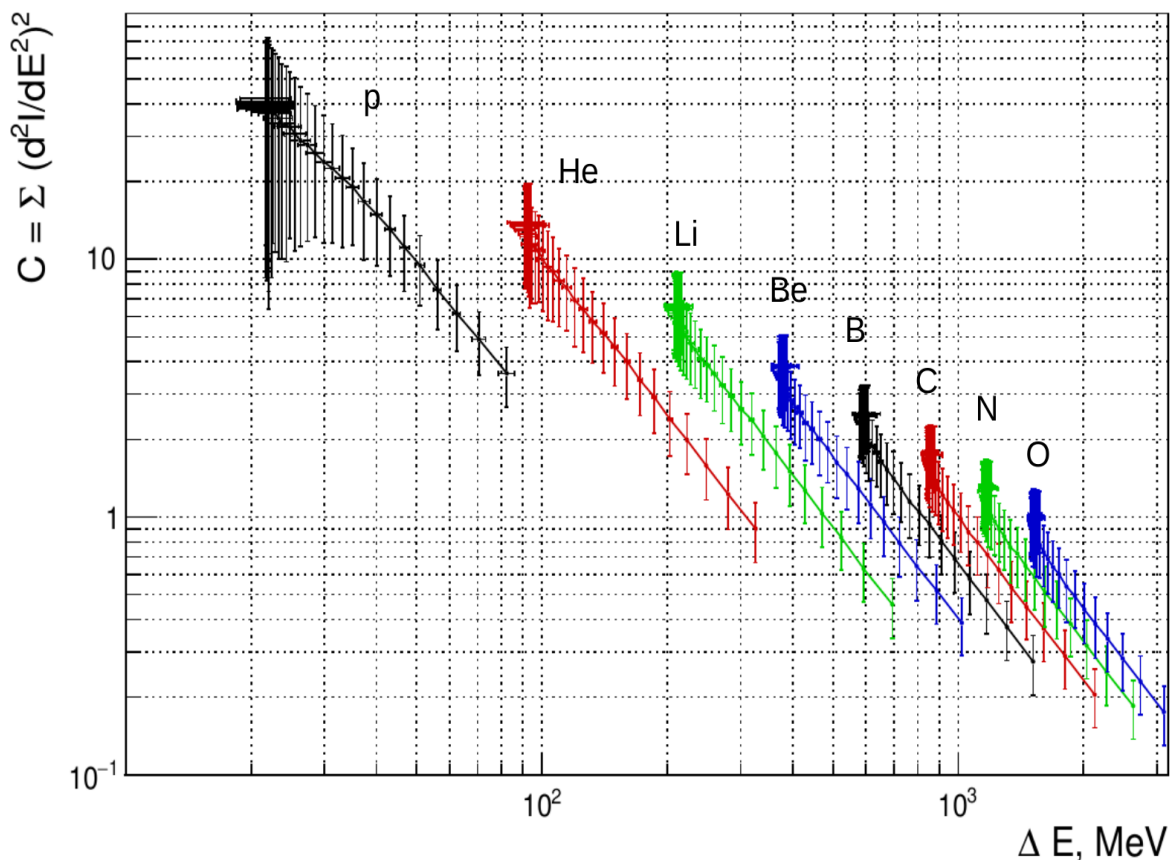


На рисунке представлена зависимость V от ΔE для ядер от протонов до кислорода. Вы можете видеть, что идет уверенное разделение ядер. Вероятность ошибки очень узка, например, перепутать гелий и литий можно в диапазоне энергий от 270 до 320 МэВ/нуклон. Для более тяжелых ядер разделение лучше.

Возможно улучшение исследуемого параметра. Например, ввести параметр C , учитывающий степень флуктуаций в каждом слое калориметра.

$$C = \sum (d^2/dE^2)$$

Где $d = S_{i+1} - 2S_i + S_{i-1}$, S_i — энергия в i -м слое калориметра.



Можно поискать более эффективные параметры.

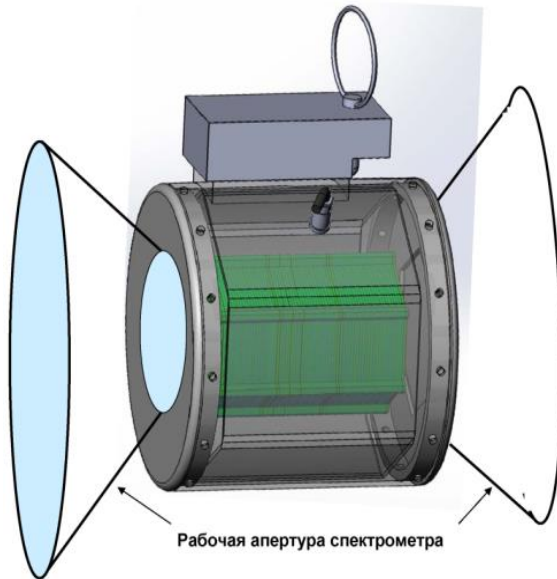
Принцип важен!

В таблице приведены энергетические разрешения (в процентах) для ядер p, He, C, O, Si и Fe для нескольких энергий.

Использовался параметр C

Энергия, МэВ/нуклон	протоны	He	C	O	Si	Fe
200	2.7	1.4	0	0	0	0
400	7.2	3.7	1.0	0.6	0	0
600	12.0	6.8	2.0	1.4	0.6	0
800	19.8	11.1	3.4	2.4	1.2	0.5
1000	30.3	17.3	5.4	4.9	1.9	0.9
1200	-	25.5	7.8	5.9	3.0	1.4
1500	-	-	15.5	12.1	5.8	2.6
2000	-	-	-	15.1	11.1	7.6

Таким образом, энергетический диапазон спектрометра «Модуляция» удовлетворяет требованиям для всех ядер от протонов до железа малыми ресурсами.



Технические характеристики	Значения
Детекторная часть научной аппаратуры - габаритные размеры, мм, не более - масса, кг, не более - потребляемая мощность, Вт	диаметр 300, высота 300 <25 <30
Блок управляющей электроники - габаритные размеры, мм, не более - масса, кг, не более - потребляемая мощность, Вт - объем информации, Гбайт/сутки.	300x300x200 <10 <45 <10

Выводы

Предложен новый подход к регистрации ядер КЛ в области солнечной модуляции.

Такой подход позволяет создавать технику с беспрецедентными характеристиками, используя ограниченные бортовые ресурсы.

Представлен проект «Модуляция» для Российской космической станции и Международной научной лунной станции .

Спасибо за внимание

