



Тестовый эксперимент по μ p-рассеянию в ЦЕРНе

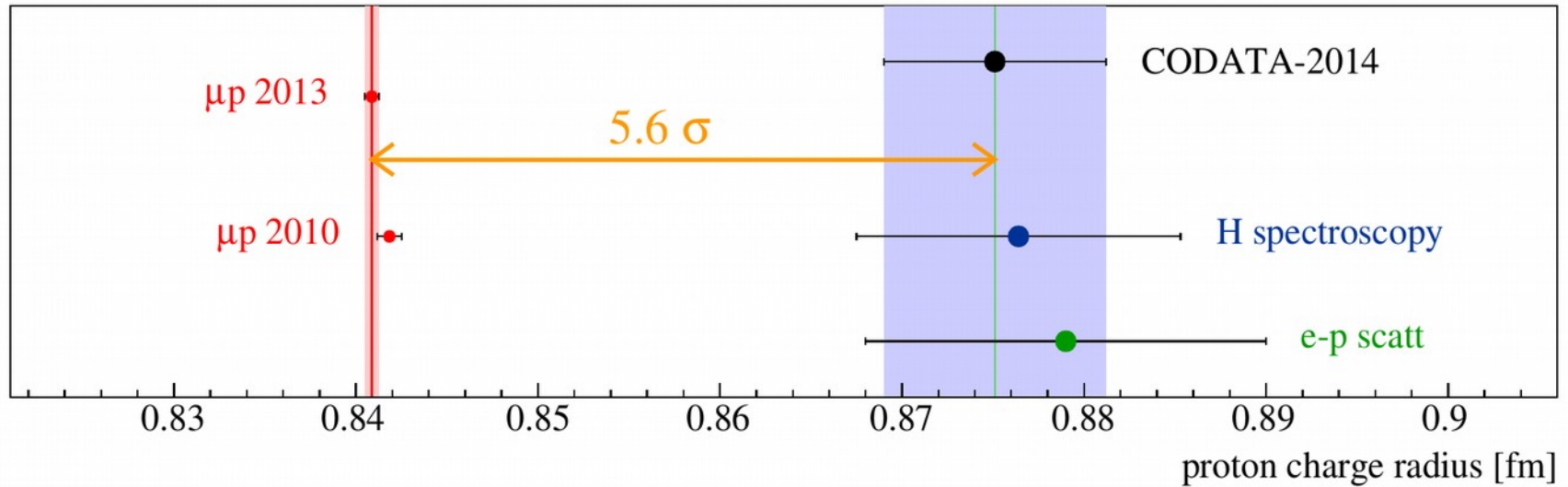
А. Инглесси

18.12.2018 • Семинар ОФВЭ ПИЯФ НИЦ КИ

Содержание

- Мотивация
 - Загадка радиуса протона
 - Эксперименты по ер- и μ р-рассеянию
- Тестовый эксперимент в COMPASS
 - Общее описание
 - Экспериментальная установка
 - Электроника, DAQ
- Результаты
 - Загрузки
 - Генераторное разрешение (в т. ч. в пучке)
 - Калибровка, контроль чистоты газа
 - Отбор треков, энергетические спектры и корреляции
 - Кремниевый трекер
 - Совмещение событий
- Перспективы, заключение

Загадка радиуса протона



CODATA: e-p-рассеяние, H- и D-спектроскопия

Эсперименты по упругому ер- и мр-рассеянию

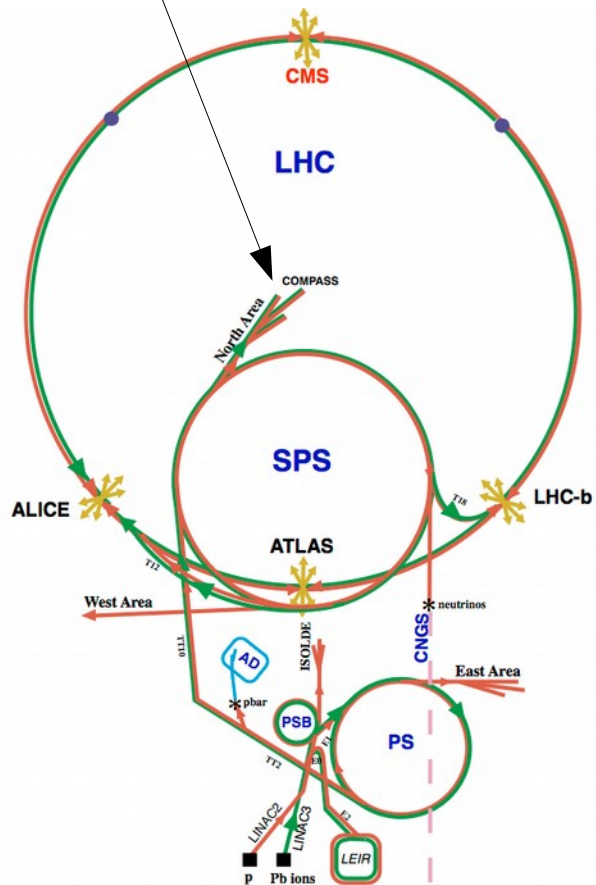
- Пучок: e^- (МАМІ, Майнц)
- $E = 720$ МэВ
- H_2 , $p = 20$ атм
- $0,5-20$ МэВ
($-t = 0,001-0,04$ ГэВ²/с²)
- $40-260$ мрад
- Пучок: μ (ЦЕРН)
- $E = 100$ ГэВ
- H_2 , $p = 20$ атм
- $0,5-20$ МэВ
($-t = 0,001-0,04$ ГэВ²/с²)
- $0,3-2$ мрад

Преимущества:

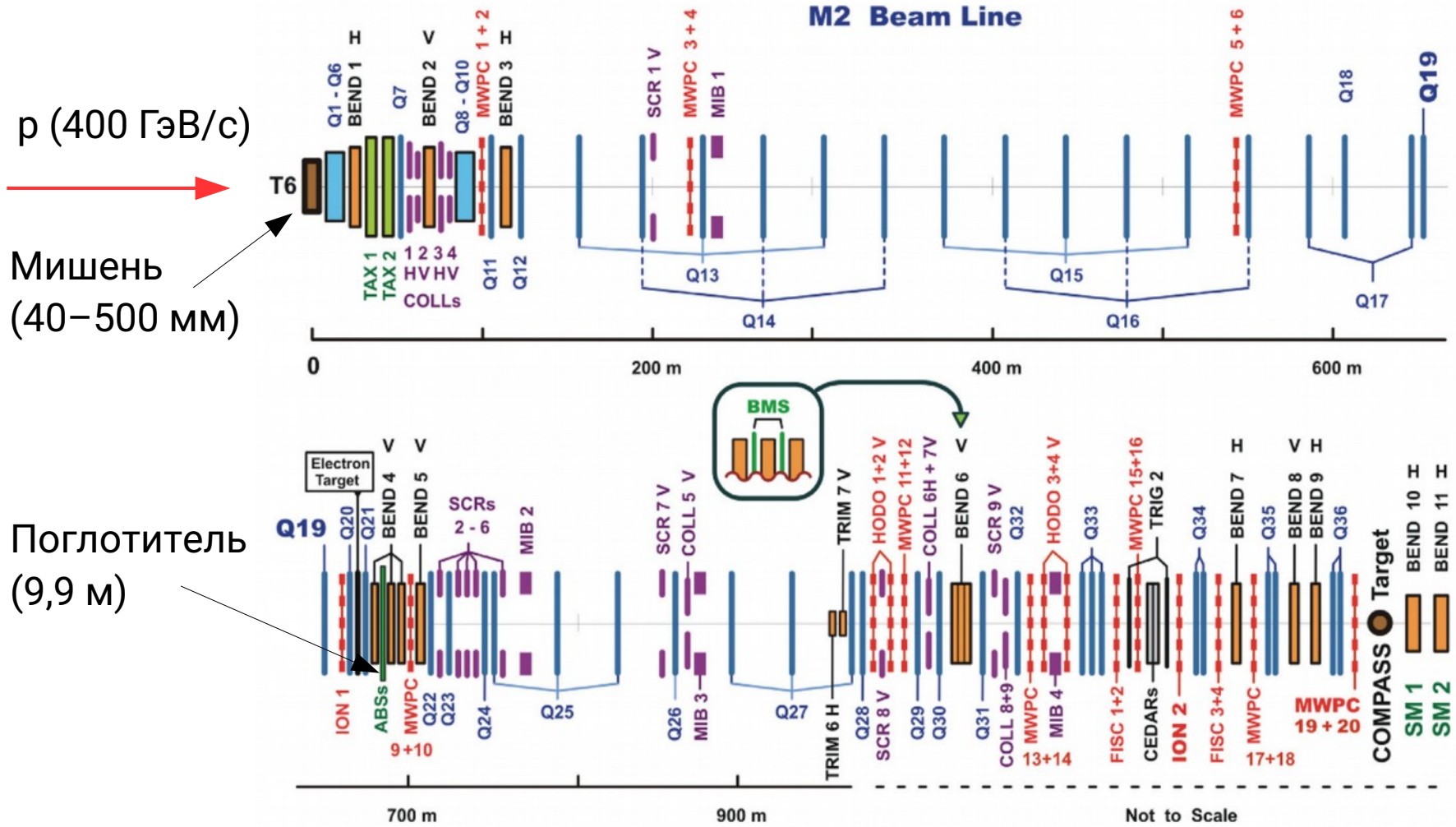
- активная мишень — регистрация протонов отдачи малой энергии
- регистрация угла рассеяния пучковой частицы

COMPASS (NA58)

SPS North Area
Превесен
зд. 888



Распадный канал

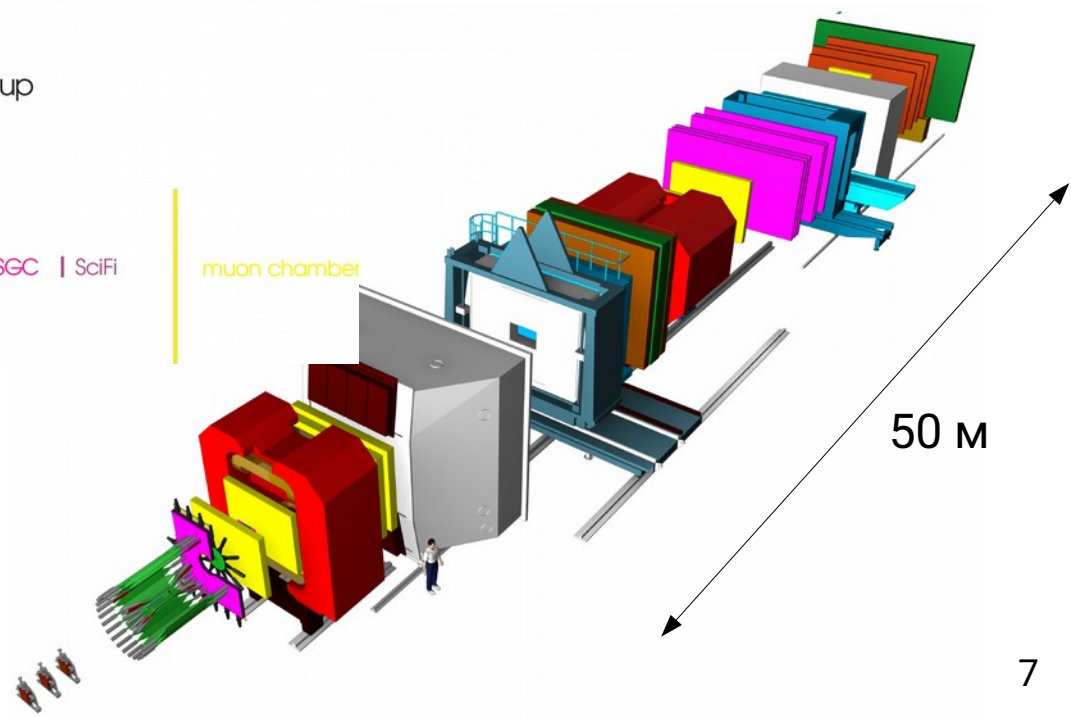
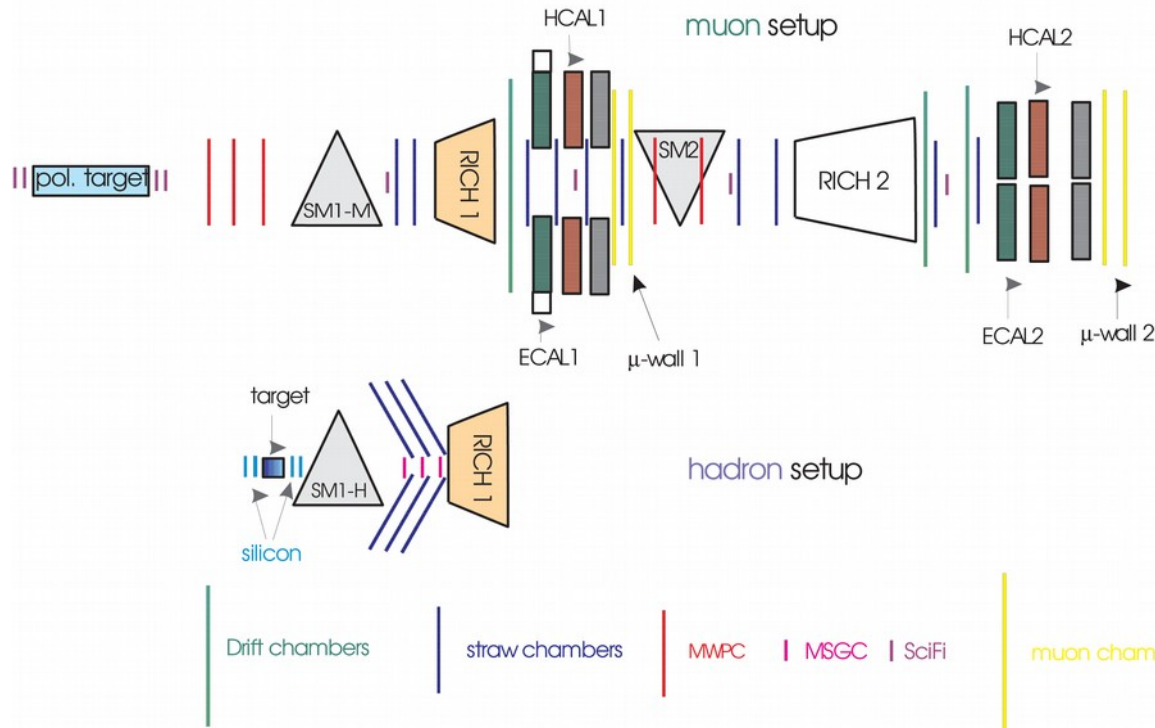


p (400 ГэВ/с)
 Мишень
 (40–500 мм)

Поглотитель
 (9,9 м)

Схема установки NA58

COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy



$E_{\mu} = 190 \text{ ГэВ}$

Широкий пучок (RMS $\approx 20 \text{ см}$)

Duty cycle: $\sim 20\%$ (spill – 5 с)

Транспортировка, наладка, эксперимент



21 марта 2018 г.

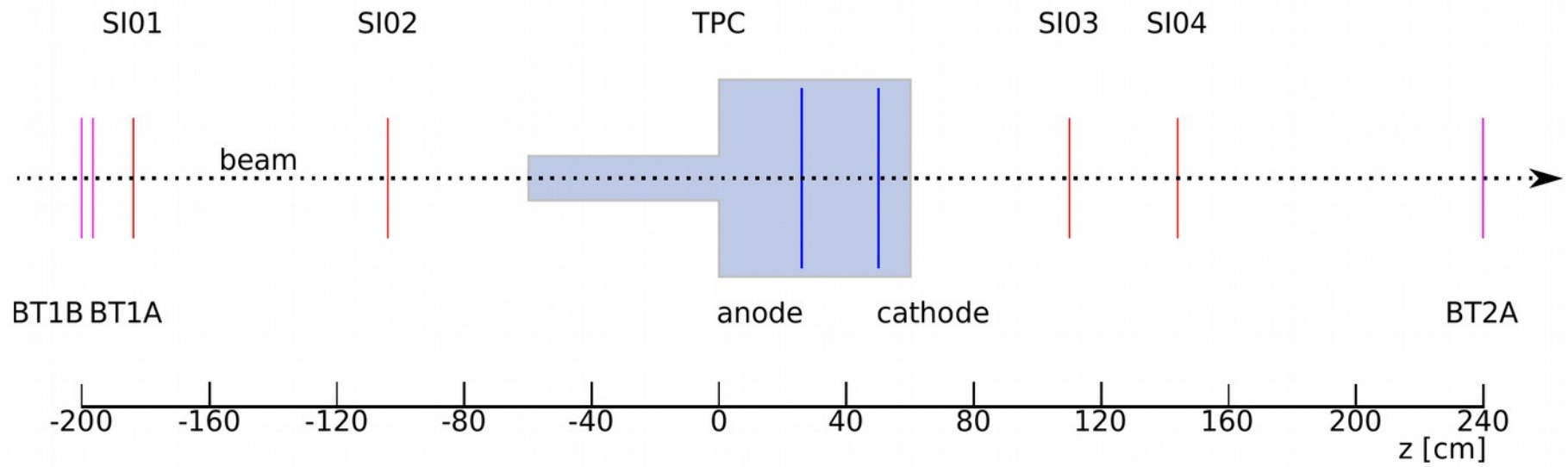


Работа на пучке:
9 апреля – 15 мая



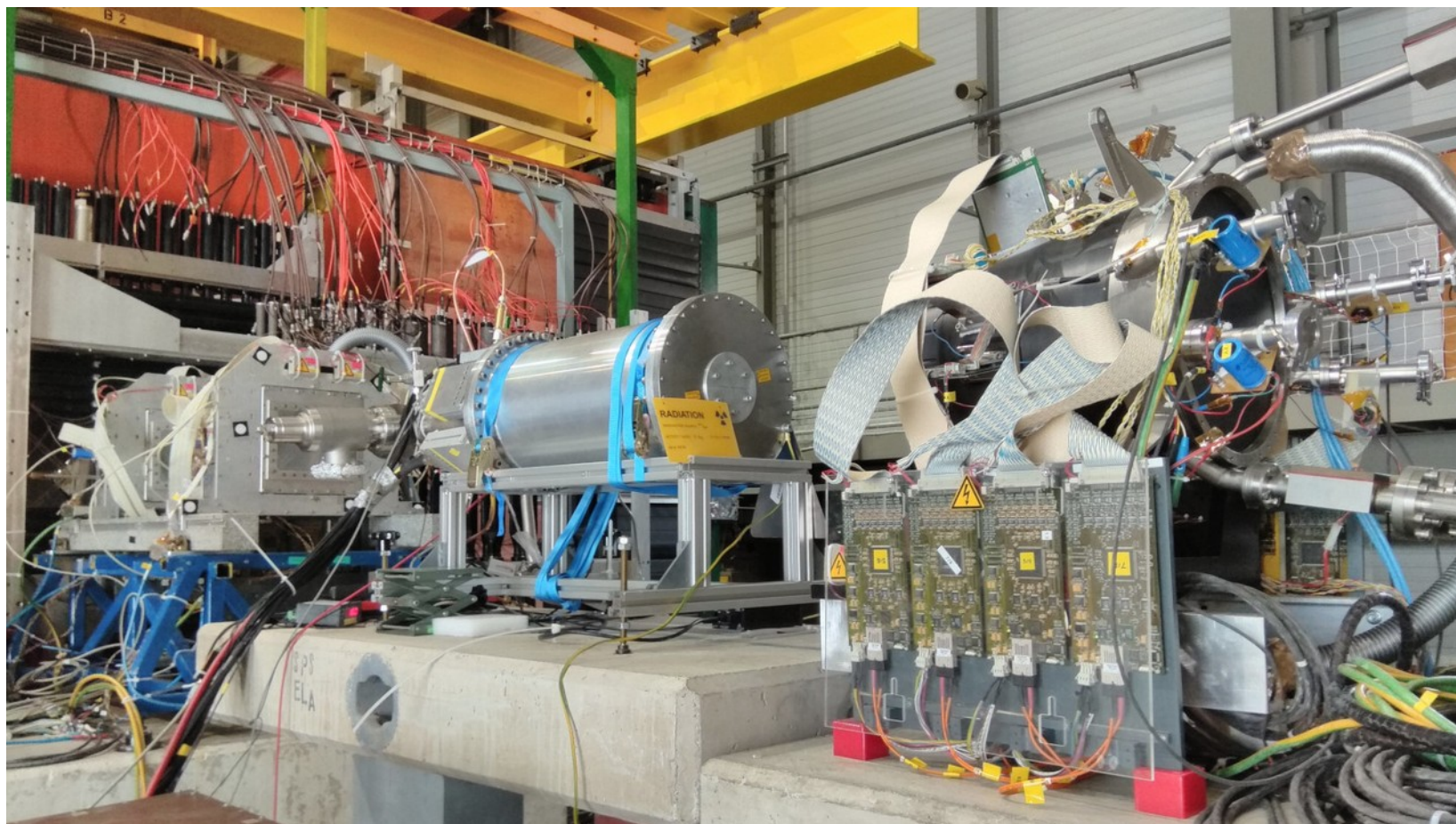
16 мая 2018 г.

Экспериментальная установка

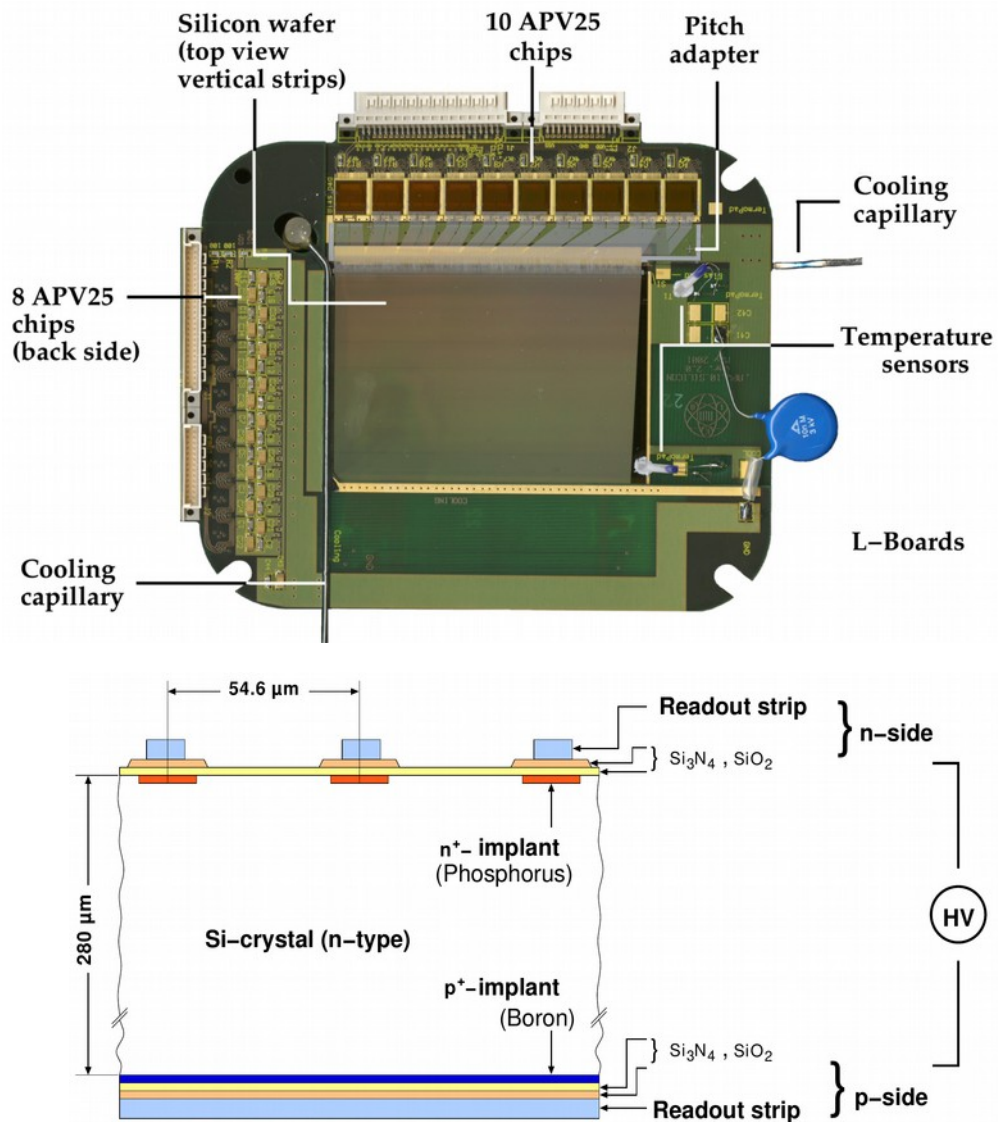


- Активная мишень $D = 200$ мм (TPC)
- Сцинтилляторы (BT) 64×48 мм $\times 3$
- Кремниевый мультистриповый детектор (SI) 70×40 мм $\times 4$

Экспериментальная установка



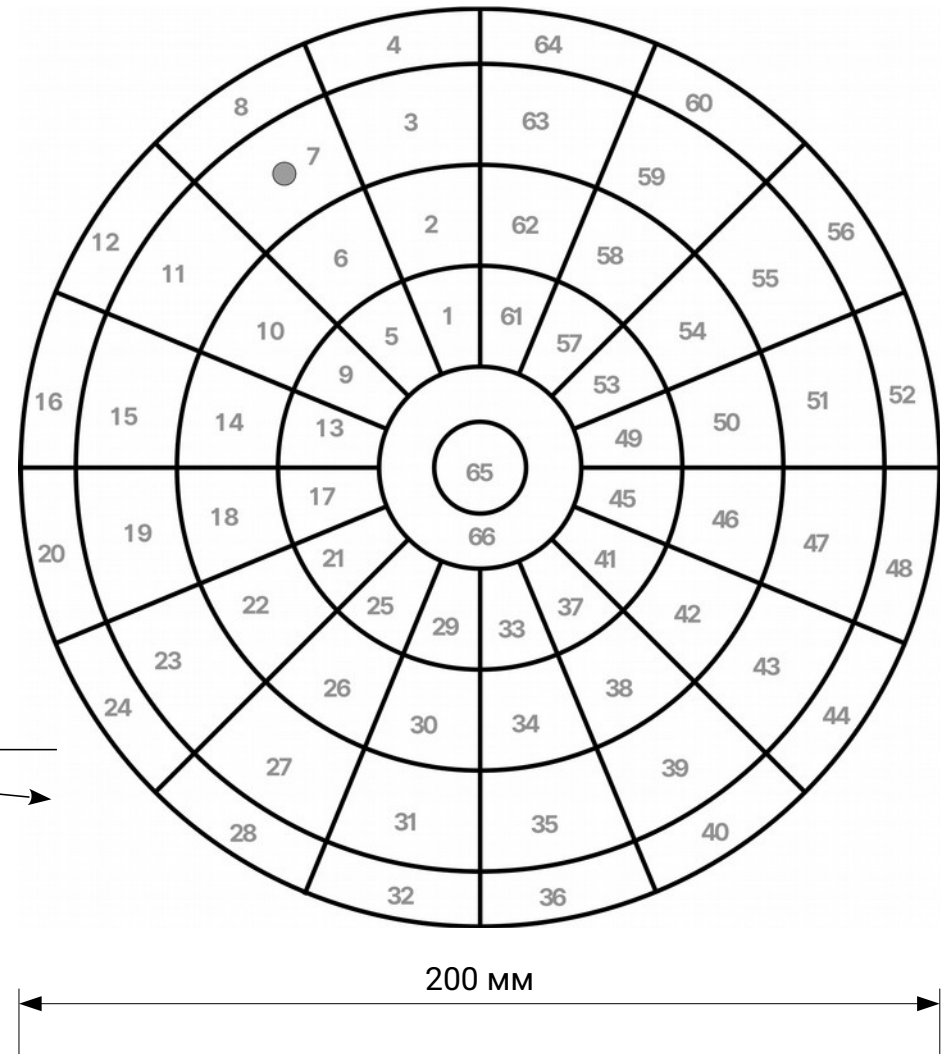
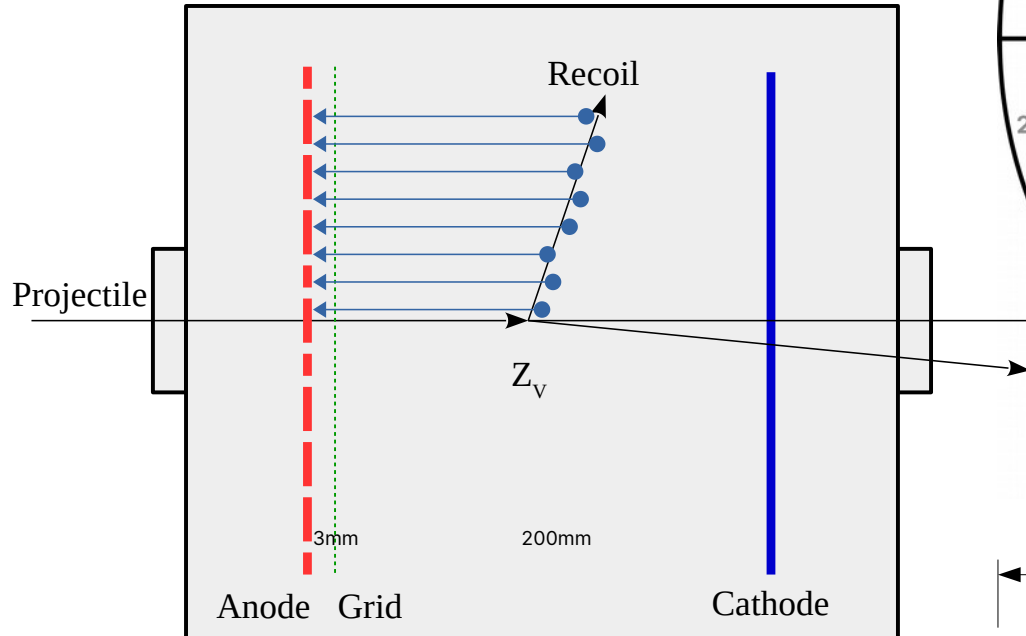
Кремниевый микростриповый трекер



- Триггер: совпадение сцинтилляторов в начале и конце установки
- Размер: 70×40 мм
- Толщина: 280 мкм (2 плоскости)
- 4 плоскости на станцию: U/V X/Y, плоскость UV повернута на +2.5°, плоскость XY – на -2.5°
- Шаг: ~50 мкм
- Временное разрешение: ~1.5–2.5 нс
- Пространственное разрешение: ~5–8.5 мкм
- Плоскость U/X: 1280 стрипов
- Плоскость V/Y: 1024 стрипов
- Чтение: чипы APV → ADC
- Предельная скорость записи: ~40 кГц

Активная мишень (ТРС)

- Газ: H_2
- $p = 8$ атм
- $L_{CG} = 220$ мм
- $V_C = 18$ кВ
- $V_G = 1$ кВ
- $t_{CG} \approx 60$ мкс



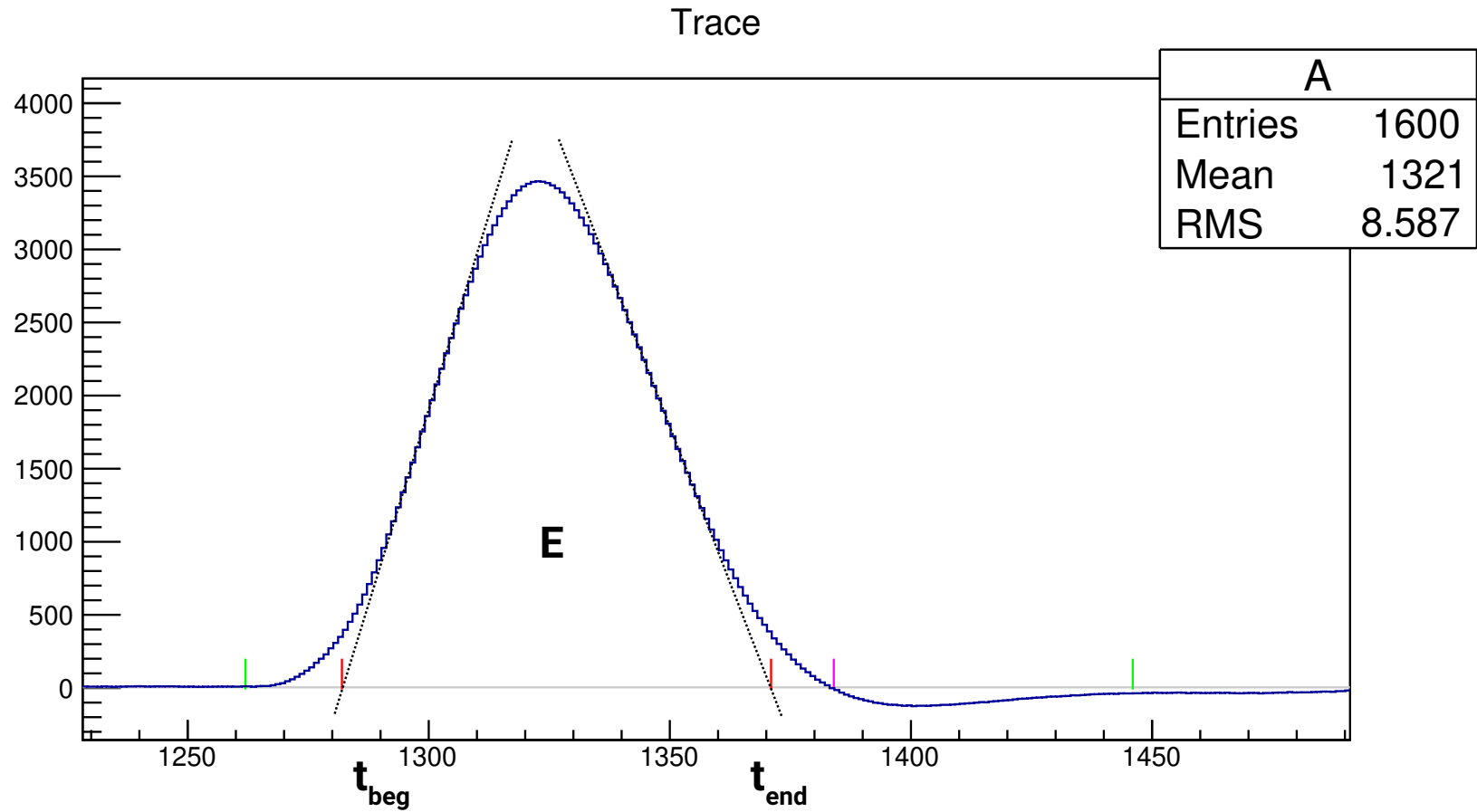
Считывающая электроника



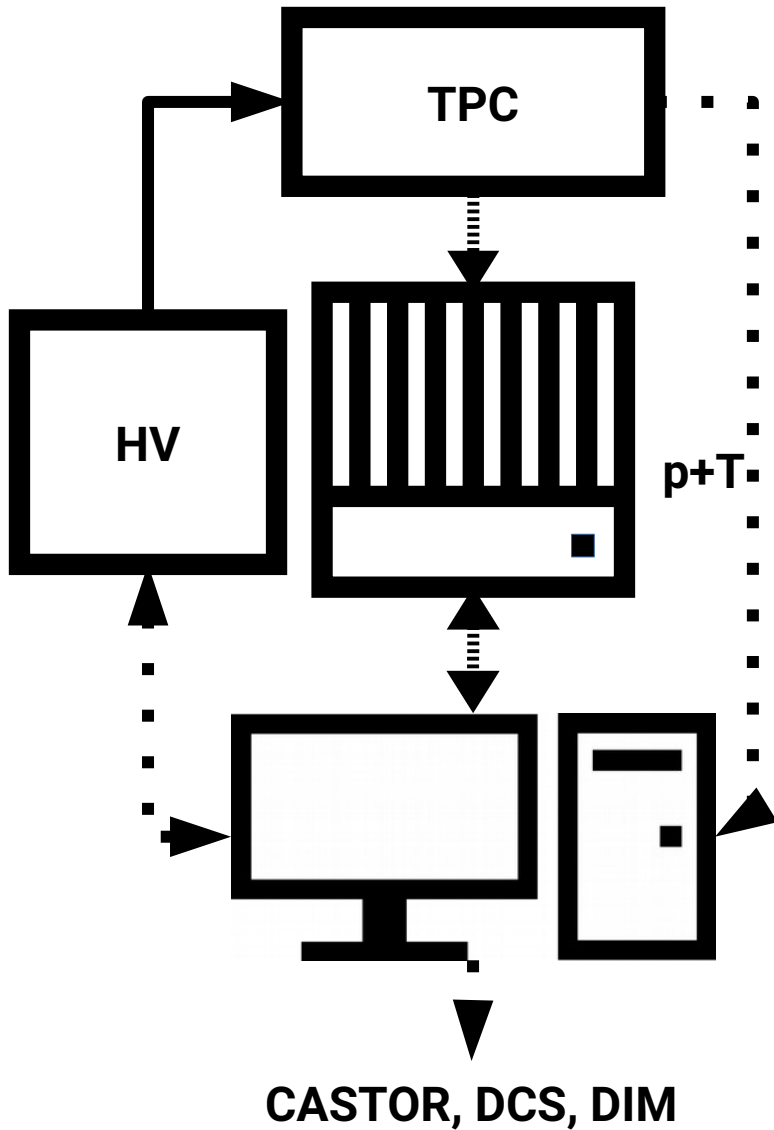
Struck SIS3316 VME FADC

- 14-бит @25 МГц, 5×16 каналов
- Диапазон: -2,5–2,5 В
- Режим: самозапуск
- Порог: 300/200 кэВ
(скользящая средняя)
- Окно чтения: 108 мкс

Оффлайн-анализ сигналов



Электроника, DAQ



TPC

- Frontend (усилители)

Крейт VME

- RIO4 (LynxOS, MBS)
- VULOM (BM, триггер)
- 5× FADC

x86 ПК

- LynxOS boot
- Slow control (HV, p, T)
- HDD → CASTOR
- DIM, DCS (EPICS)



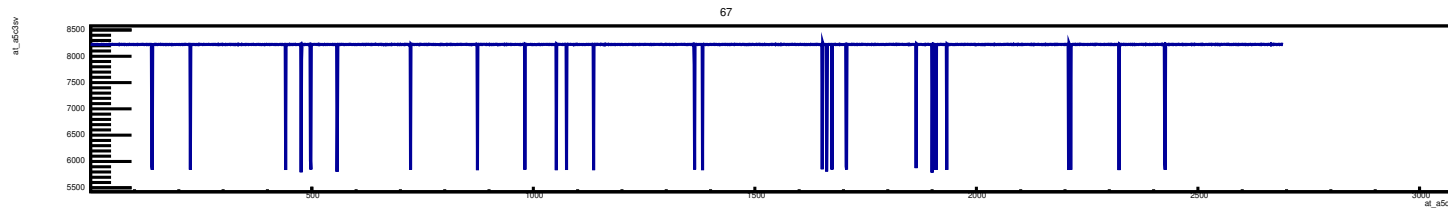
Загрузки

<i>В пучке</i>	TPC	S^*	S_e	Si^*
Средняя	16 Гц	64 кГц	640 кГц	22 кГц
Максимальная	46 Гц	370 кГц	3.7 МГц	43 кГц

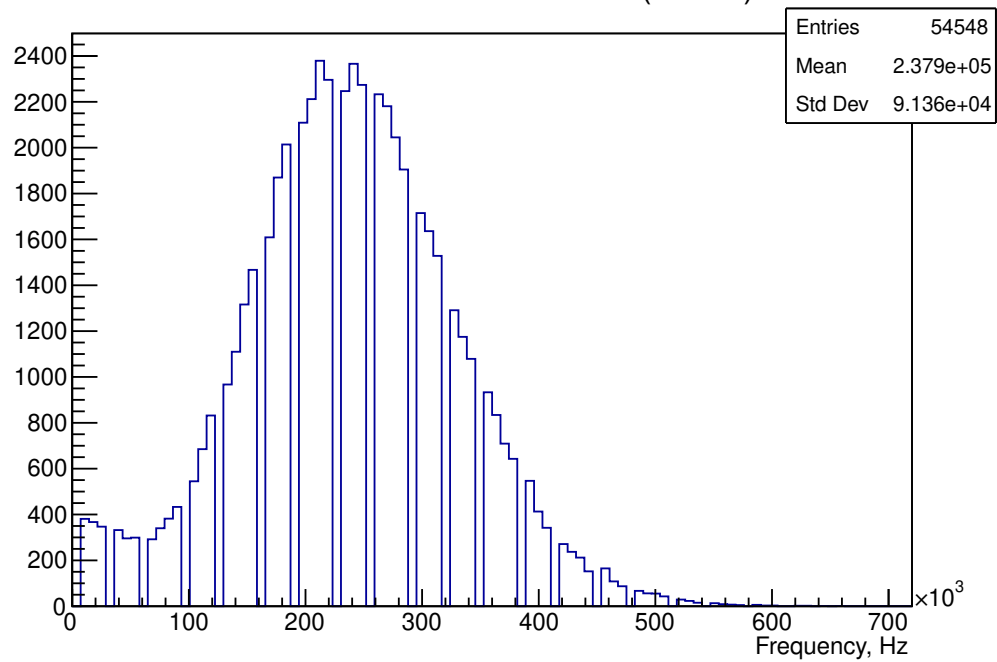
Всего событий: 4 600 000	
порог 300 кэВ: 1 100 000	порог 200 кэВ: 3 500 000
8 атм: 4 290 000	4 атм: 310 000

* площадь – 10% от полной площади анода TPC

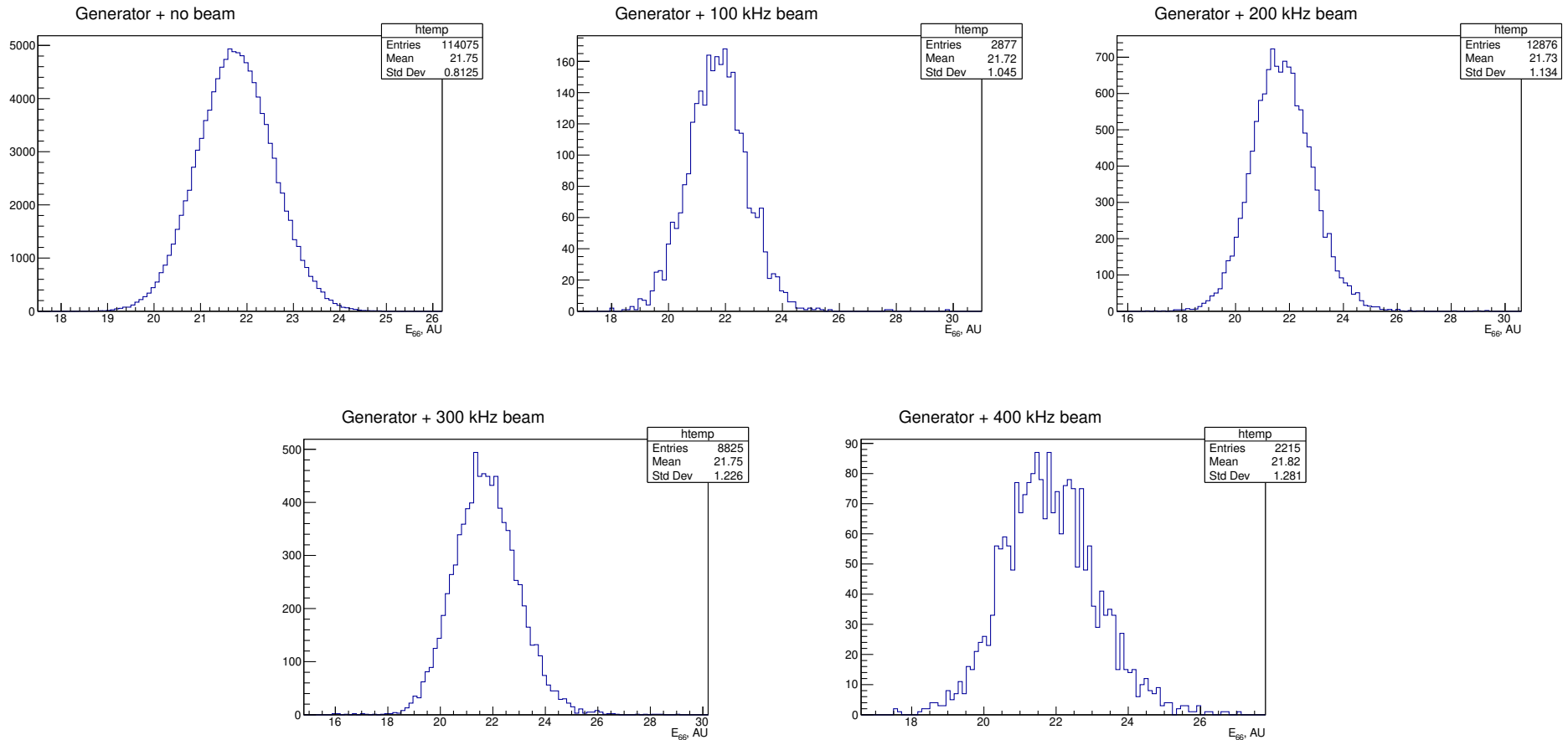
Временная структура пучка (генератор)



Scintillator counts (FADC)

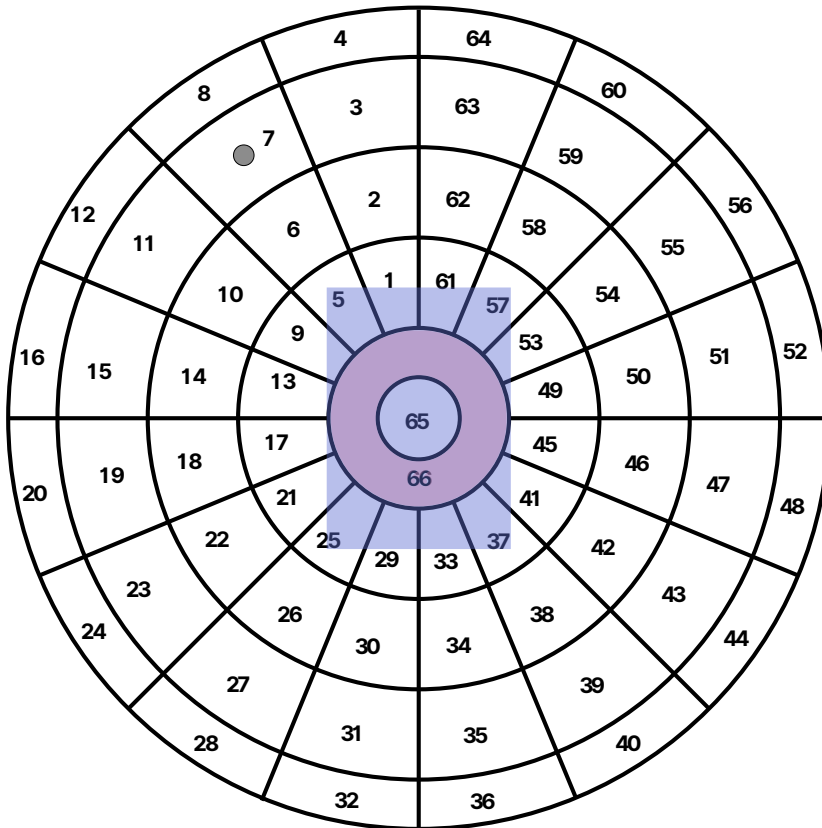


Зависимость σ_E от интенсивности пучка



- А66 – центральный анод-кольцо
- Генератор подавался на все аноды одновременно

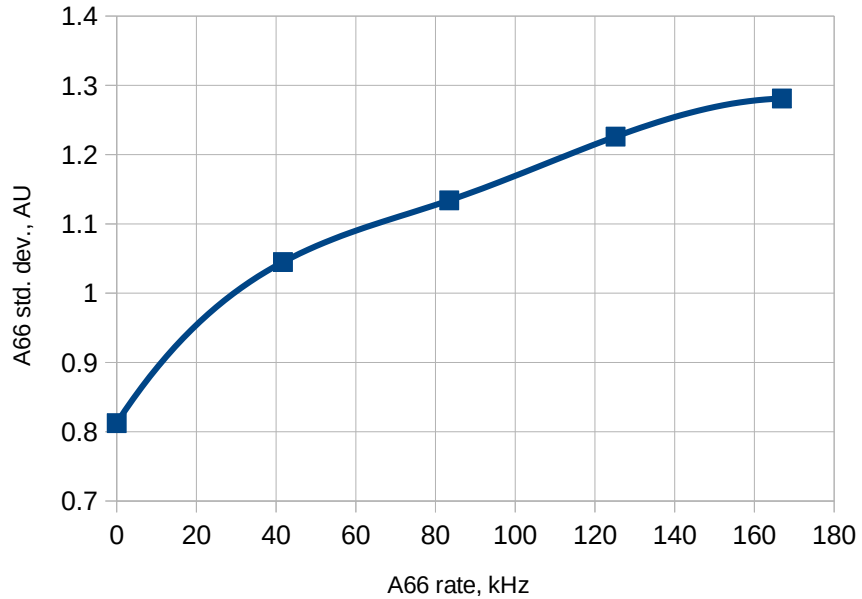
Пересчет площади



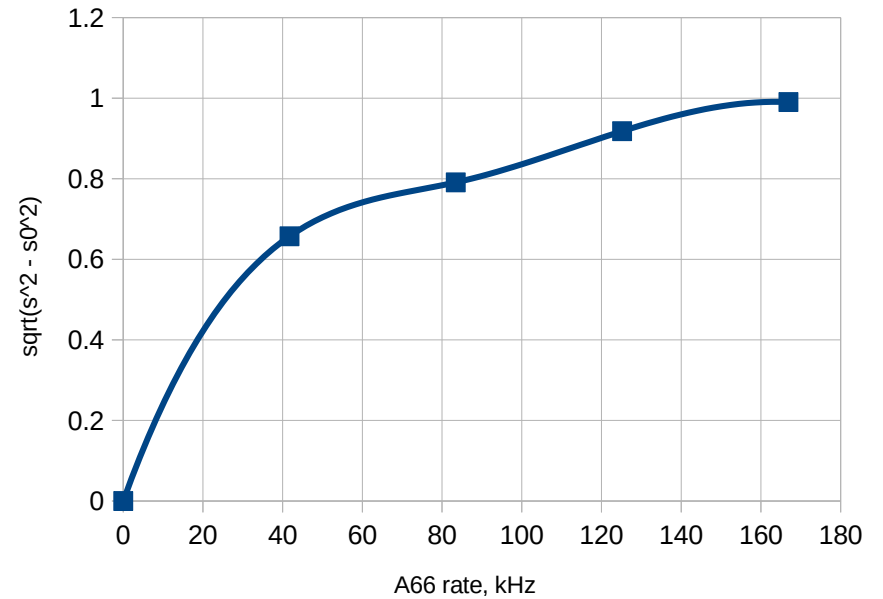
- $A_{\text{TPC}} \approx 320 \text{ cm}^2$
- $A_{\text{scint}} \approx 30,7 \text{ cm}^2$
(10% of A_{TPC})
- $A_{66} \approx 12,8 \text{ cm}^2$
(42% of A_{scint})

Энергетическое разрешение в пучке

Generator energy resolution

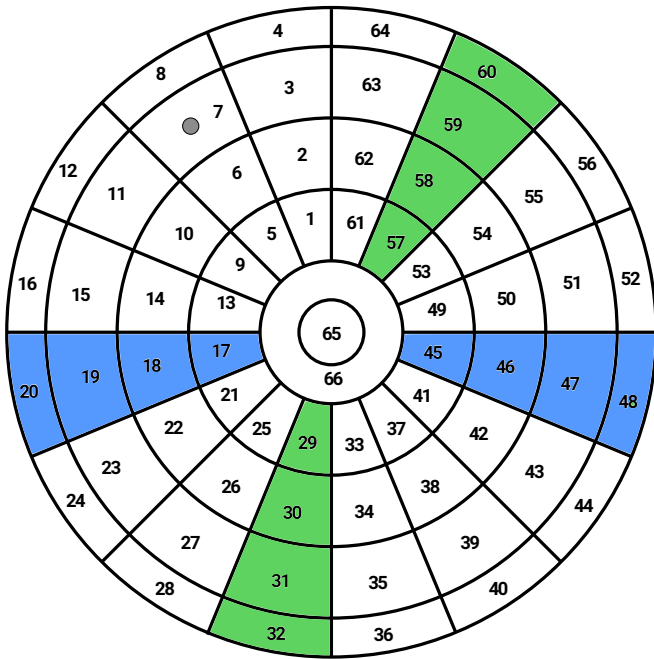


Generator energy resolution, corrected

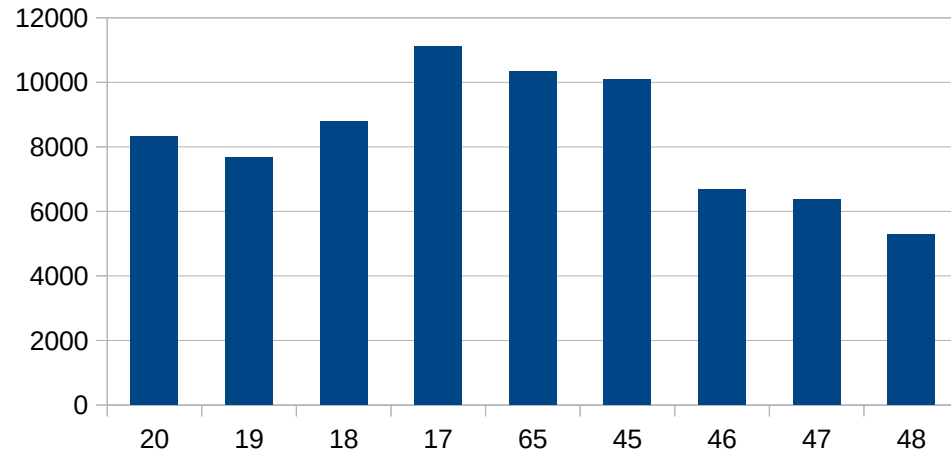


1 AU \approx 28 кэВ

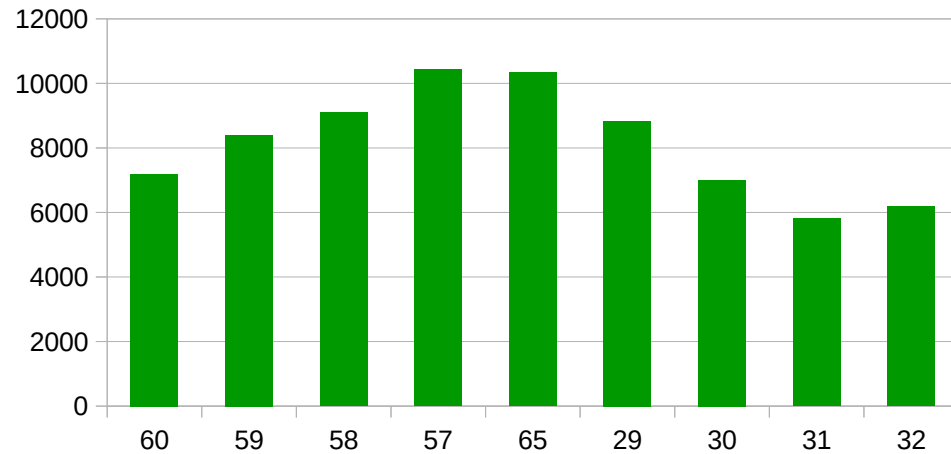
«Профиль» пучка



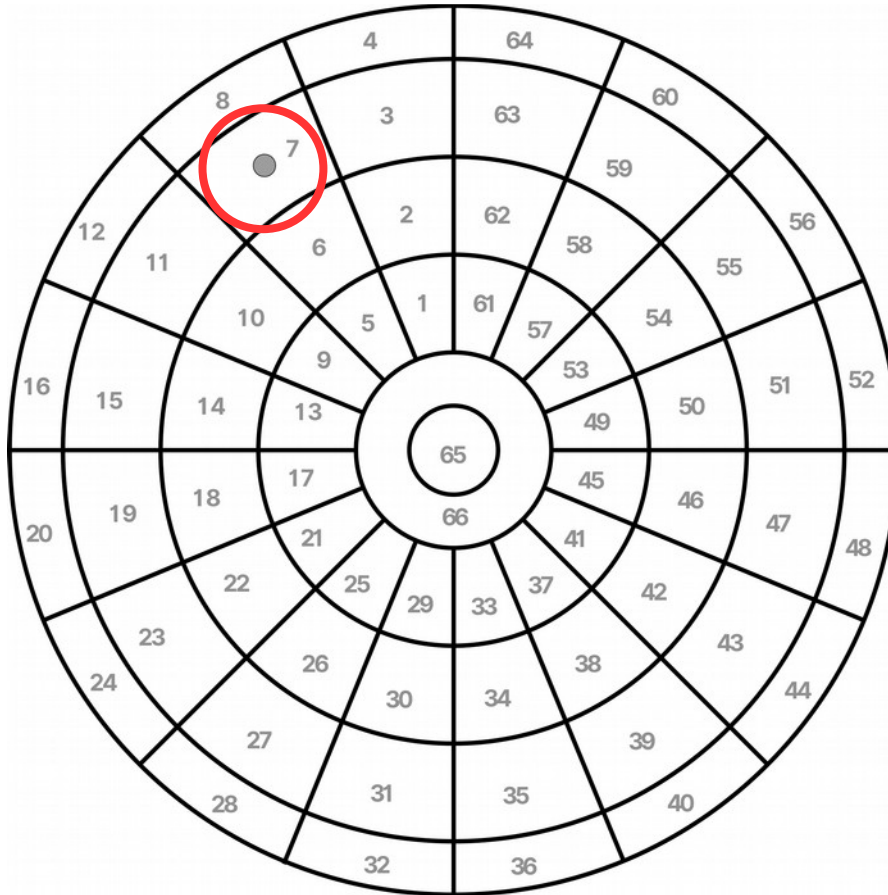
Effective count ("horizontal")



Effective count ("vertical")

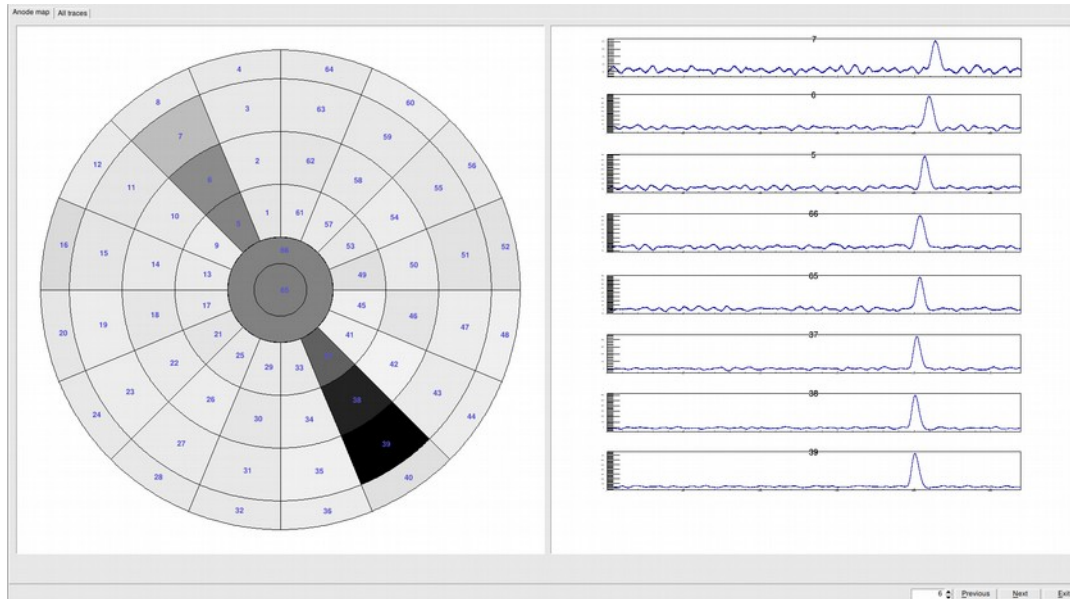


Калибровка, контроль чистоты газа

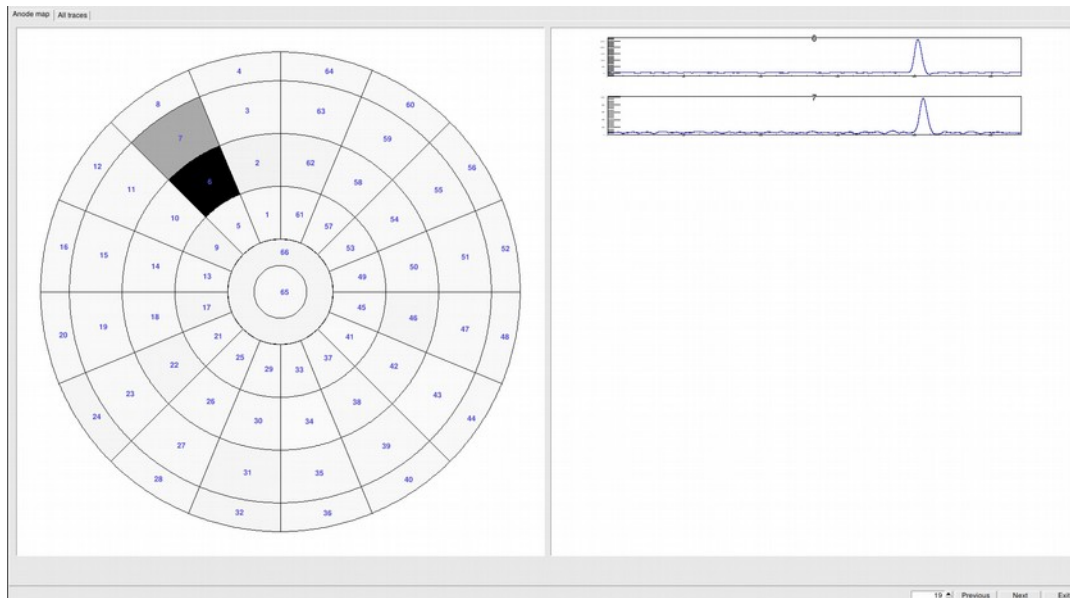


- Газ: 99.9999%
- ^{241}Am
 E_{α} : 5.486 МэВ

Сигнал от альфа-частицы

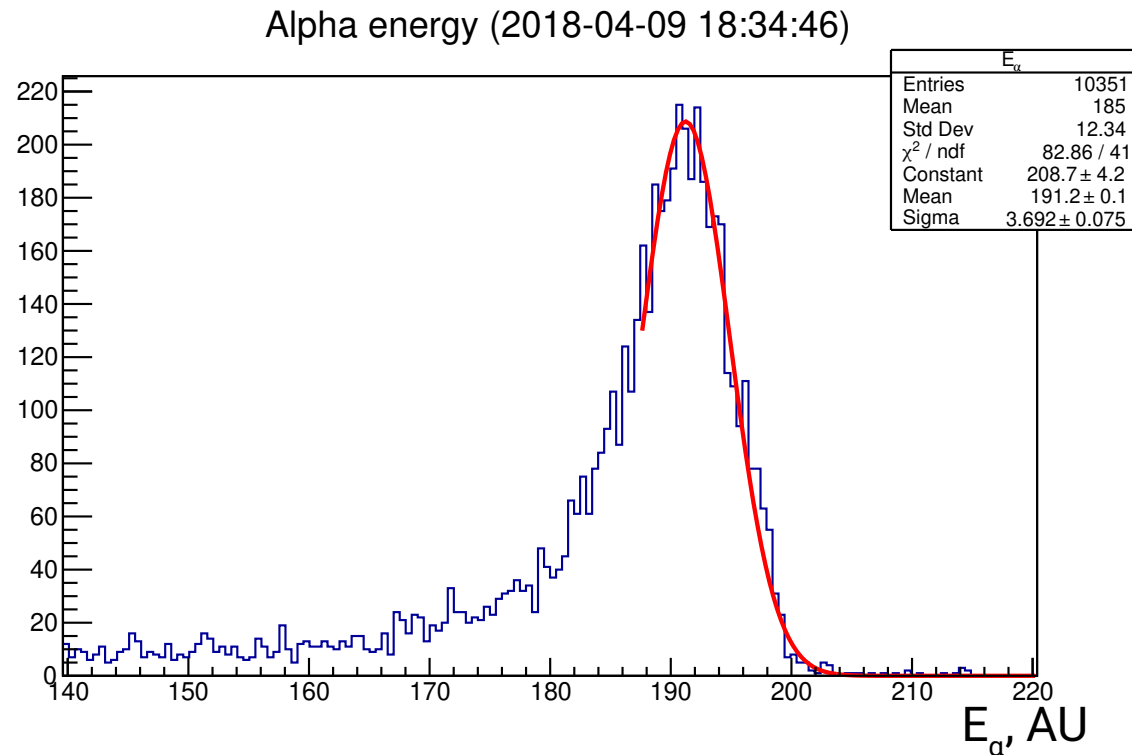


He, 1 атм



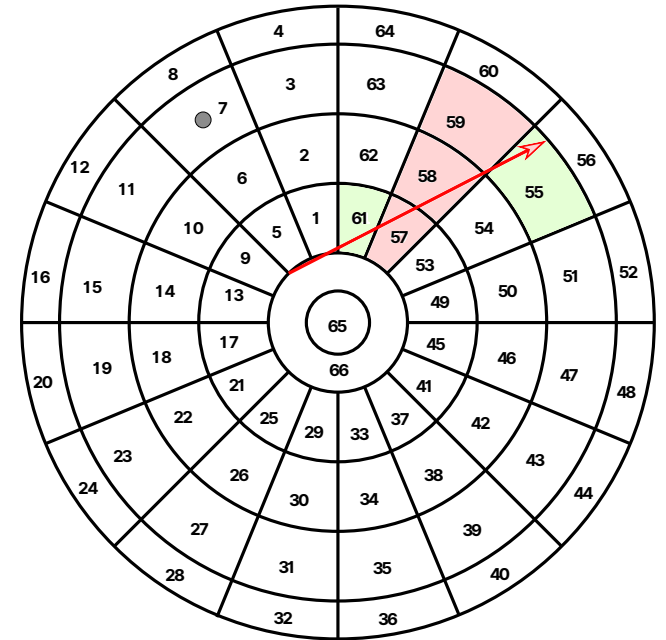
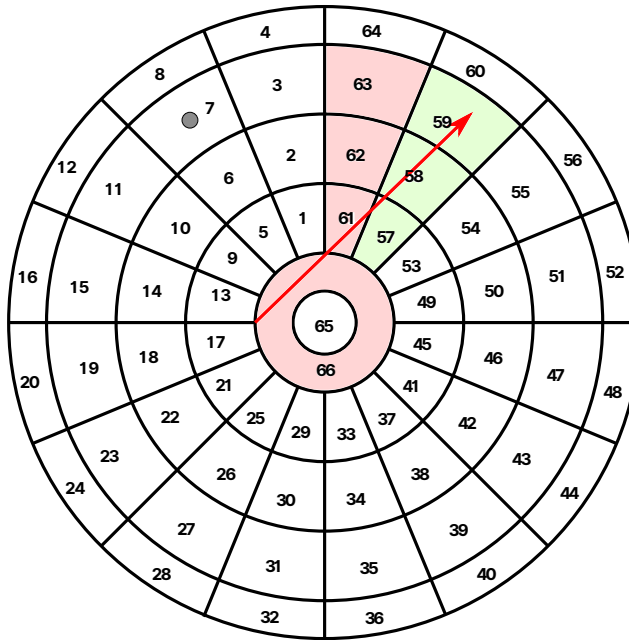
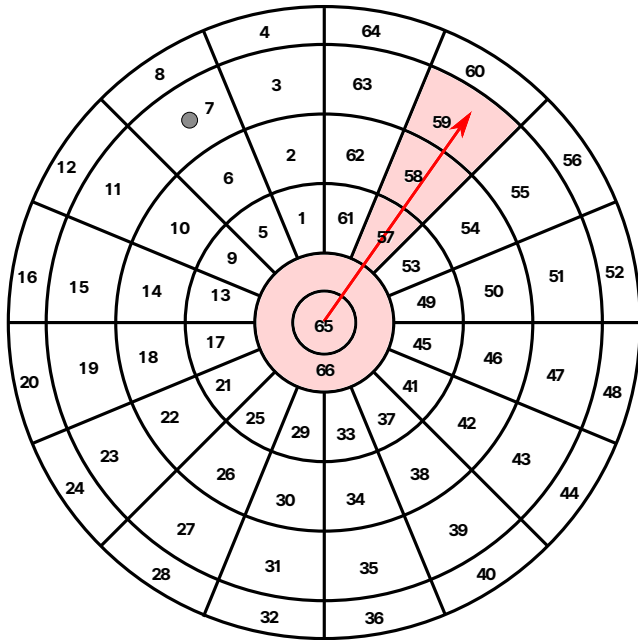
H₂, 8 атм

Суммарный спектр энергии альфа-частицы



- Измерялся регулярно на протяжении эксперимента
- Сдвиг α-линии ~1%/день
(~1 ppm O₂)
- Переполнение – раз в неделю

Отбор треков: алгоритм



1

2

3

Порог: 5 AU (~150 кэВ)

-90%

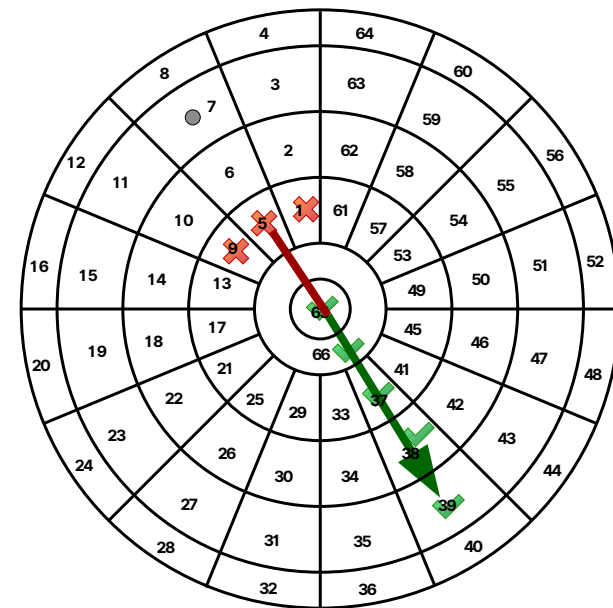
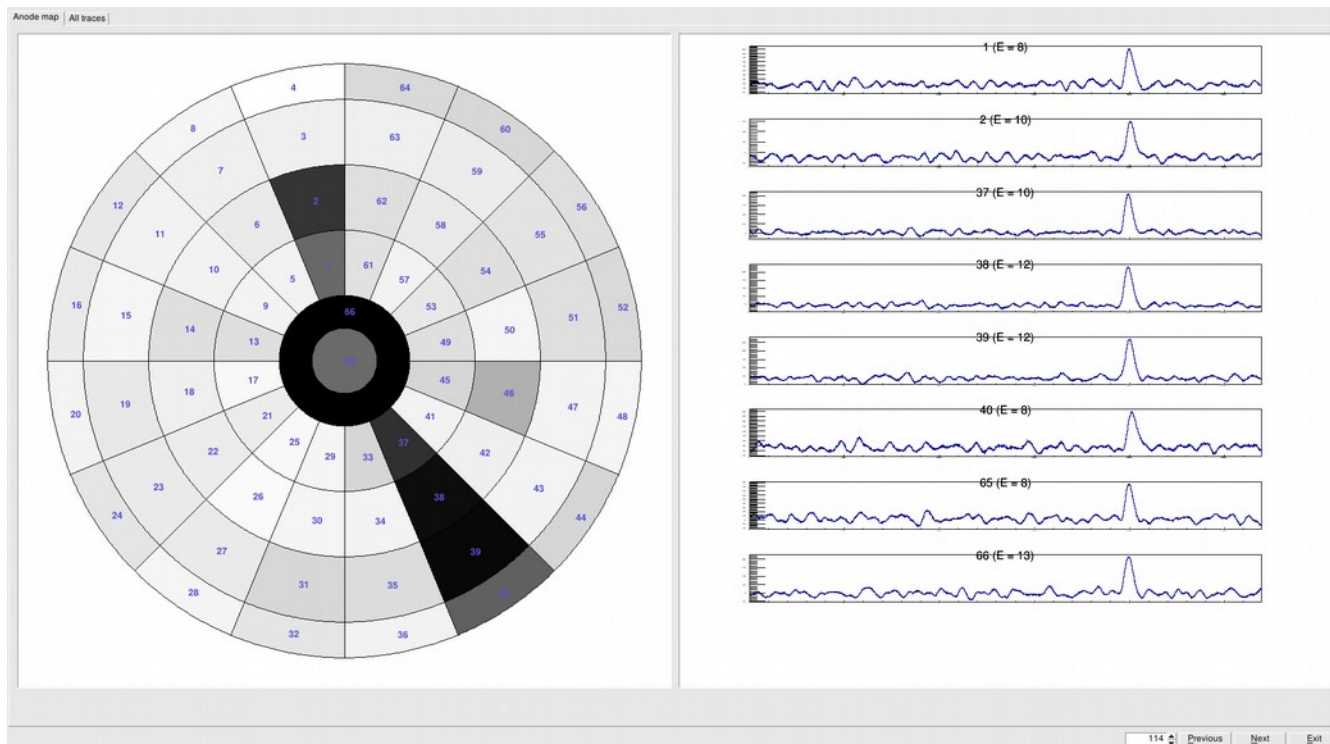
Длина сигнала: 30–210 каналов (1.2–8.4 мкс)

Предельная разница времен пары колец: 30 каналов (1.2 мкс)

Предельная разница времен последовательных колец: 200 каналов (8 мкс)

Предельный разброс времен соседних анодов: 34 каналов (1.36 мкс)

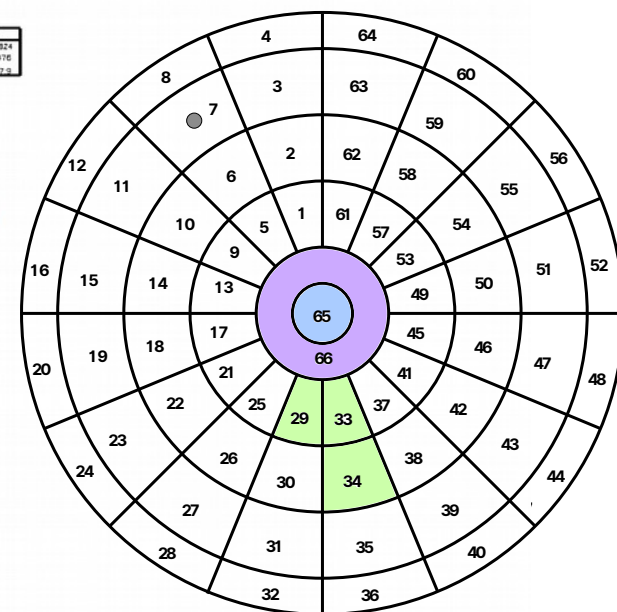
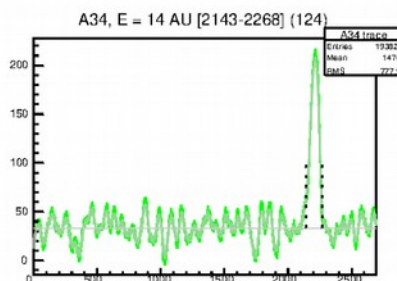
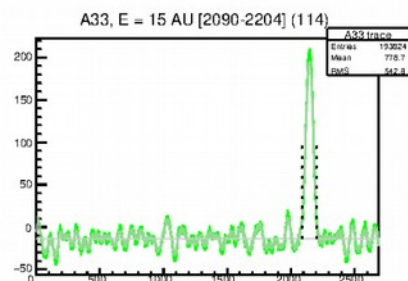
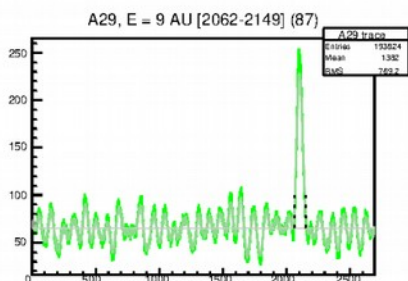
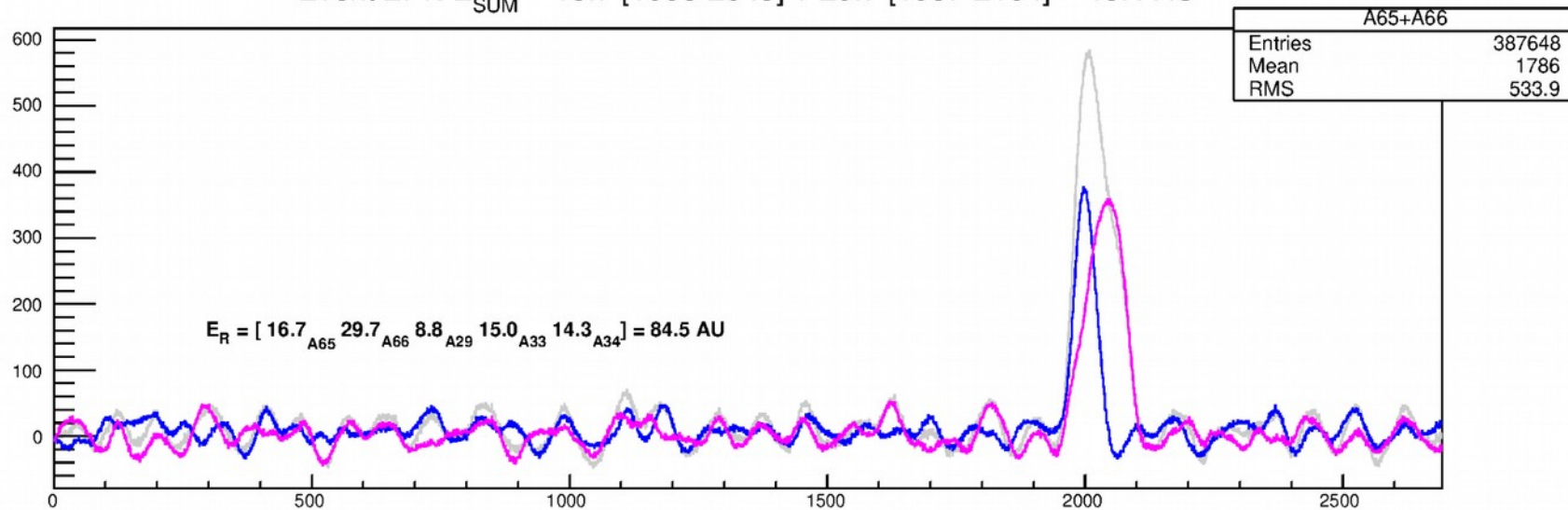
Отбор треков: дополнительные условия



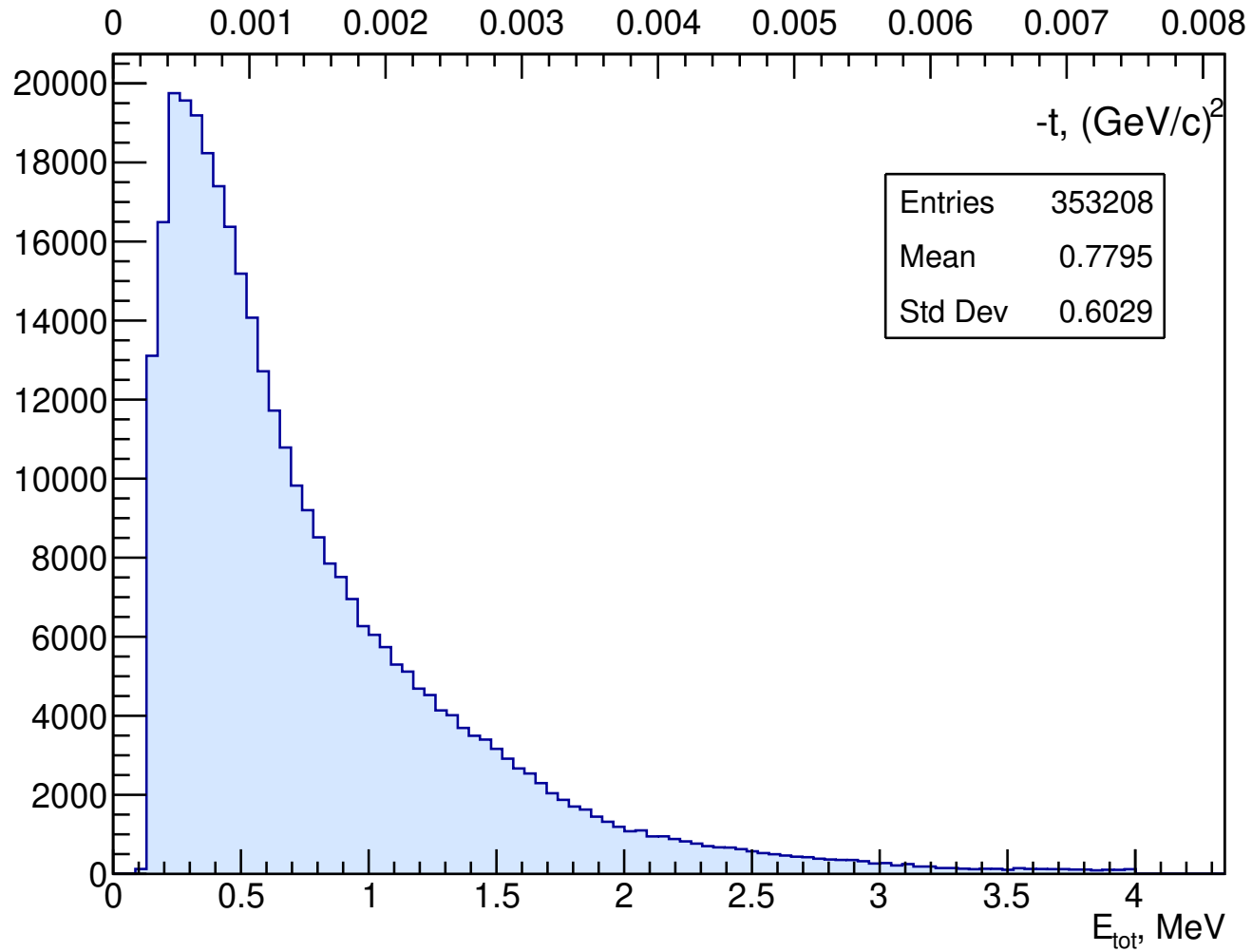
-18%

Отбор треков: пример сигналов

Event 271: $E_{\text{SUM}} = 16.7 [1956-2043] + 29.7 [1967-2104] = 46.4 \text{ AU}$



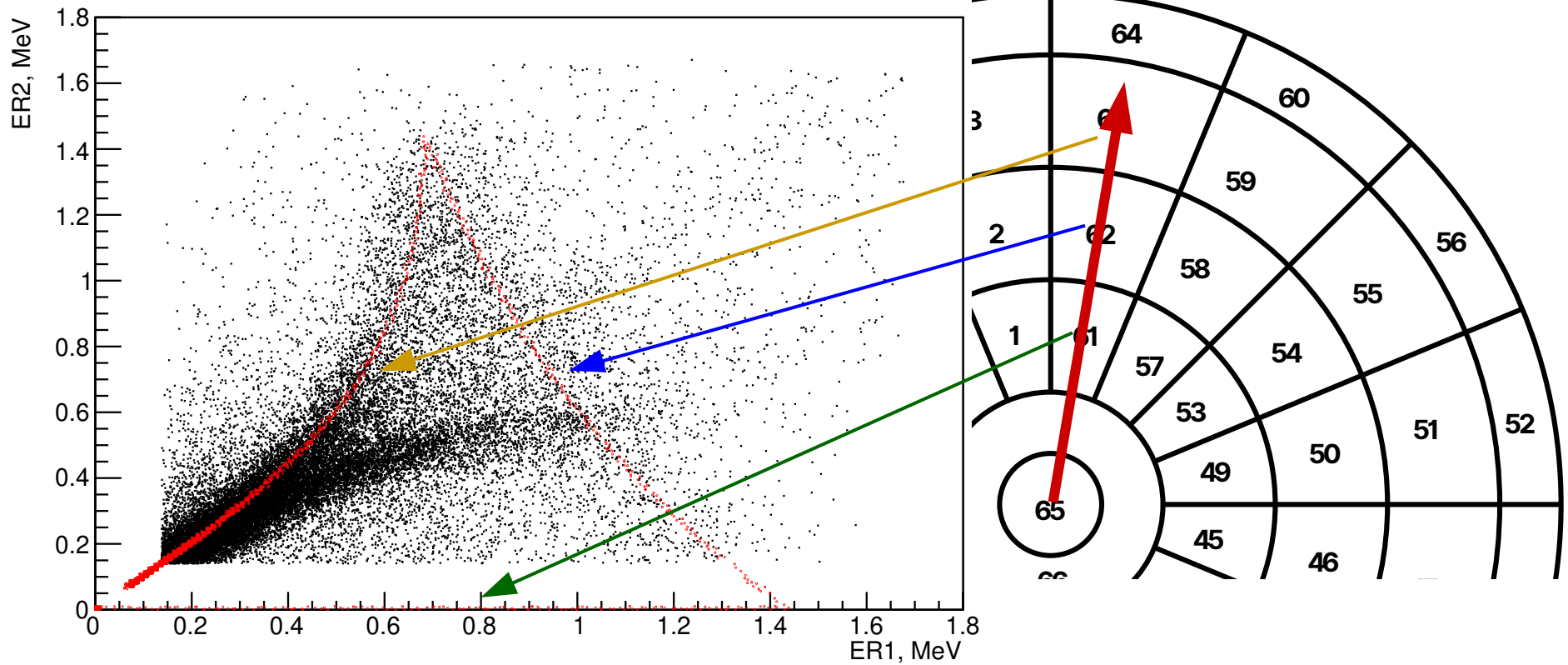
Энергетический спектр



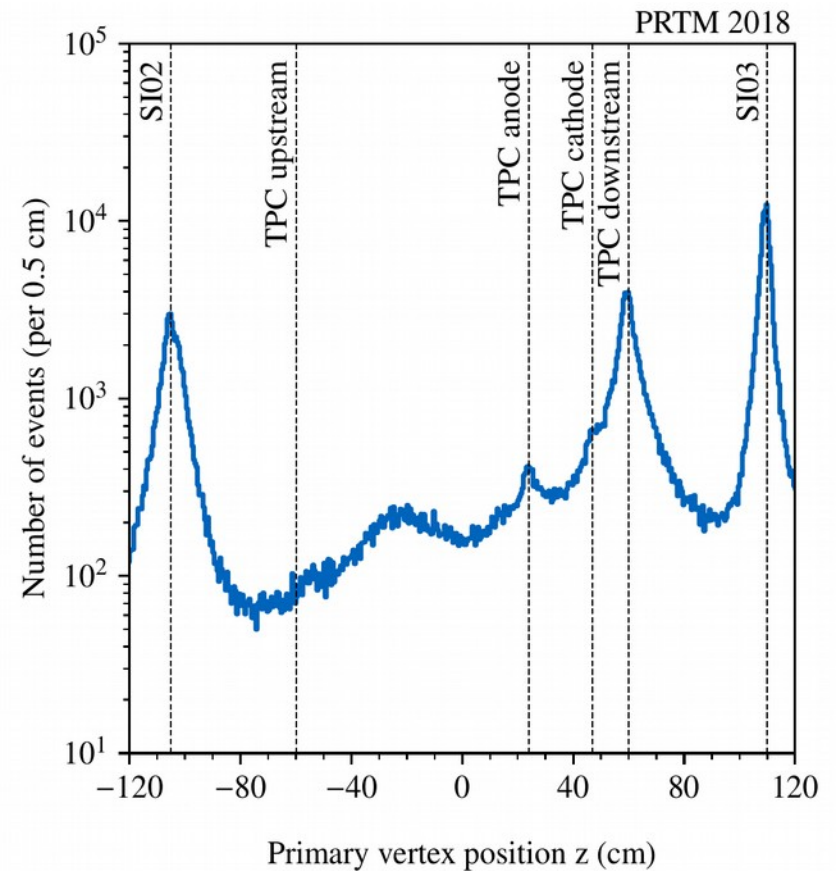
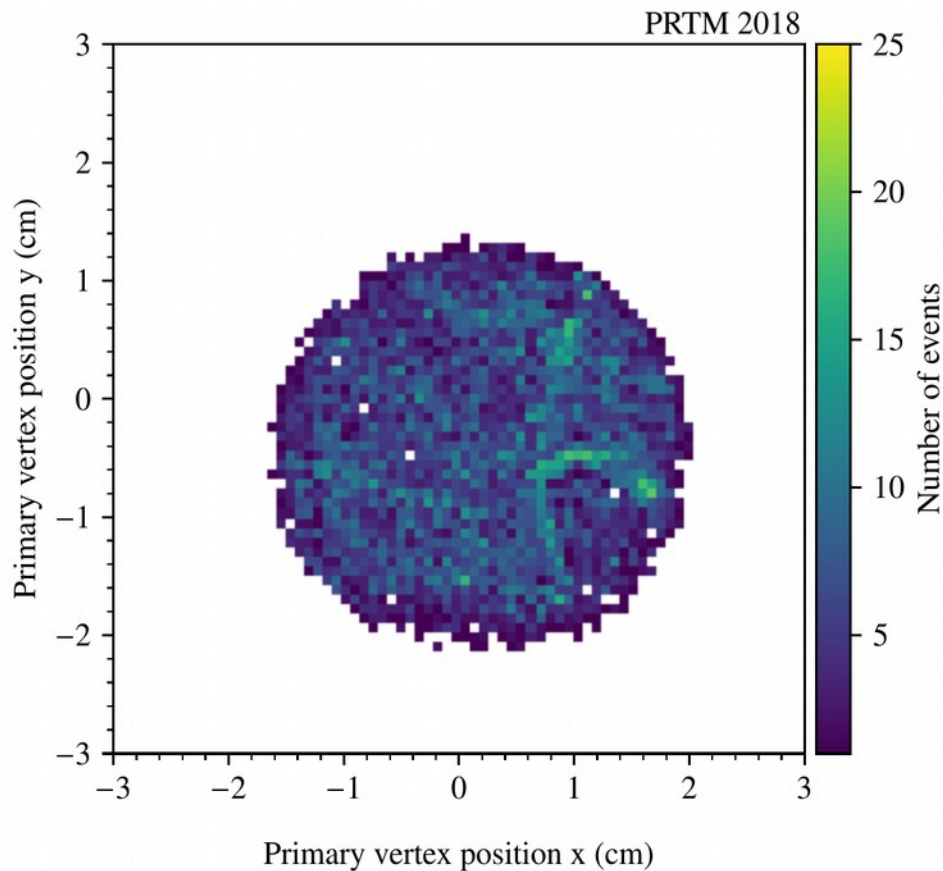
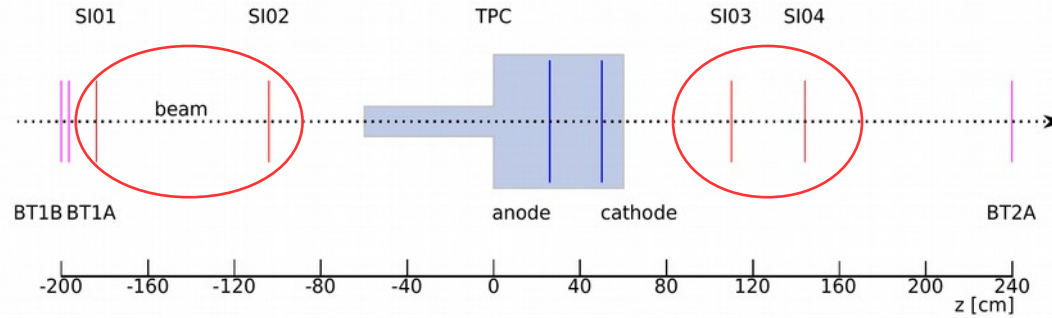
Полная энергия протона отдачи, $E_{R4} = 0$

Корреляции энергий по кольцам

Ring 1 & 2 energies (data + simulation)

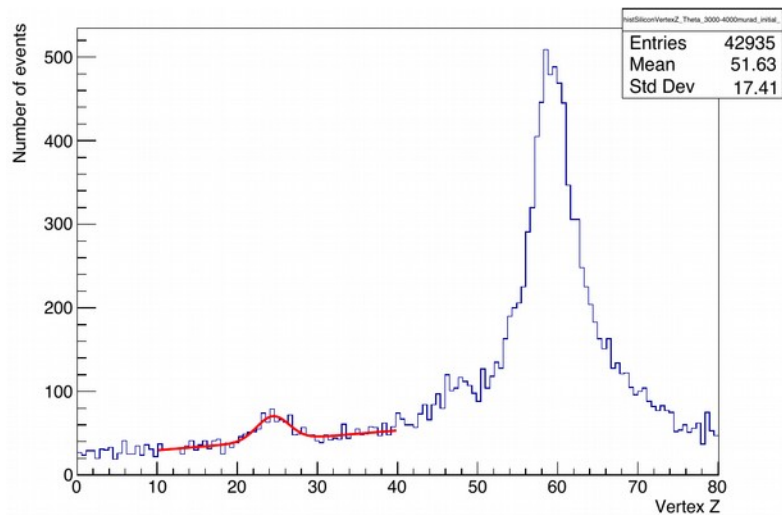


Анализ данных кремниевого трекера

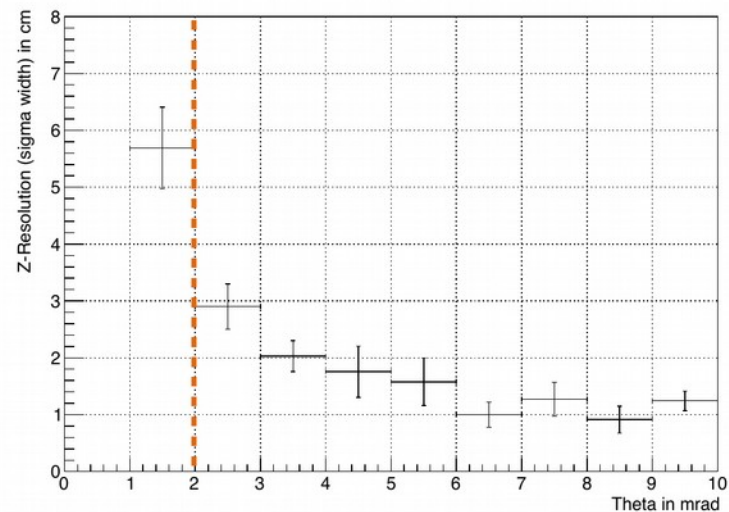


Отборы точки взаимодействия по трекеру

- Радиальный: центральная часть камеры (\varnothing 40 мм)
- По Z: центр камеры (24–46 см)

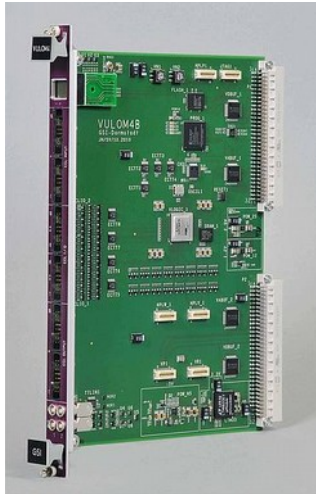
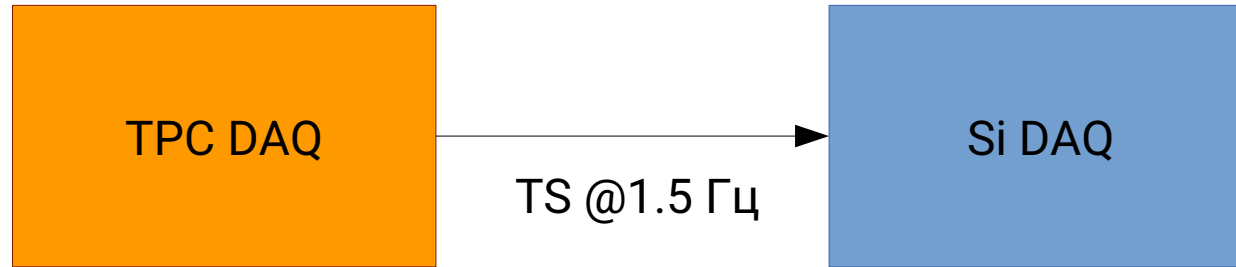


fit of TPC anode



z-resolution

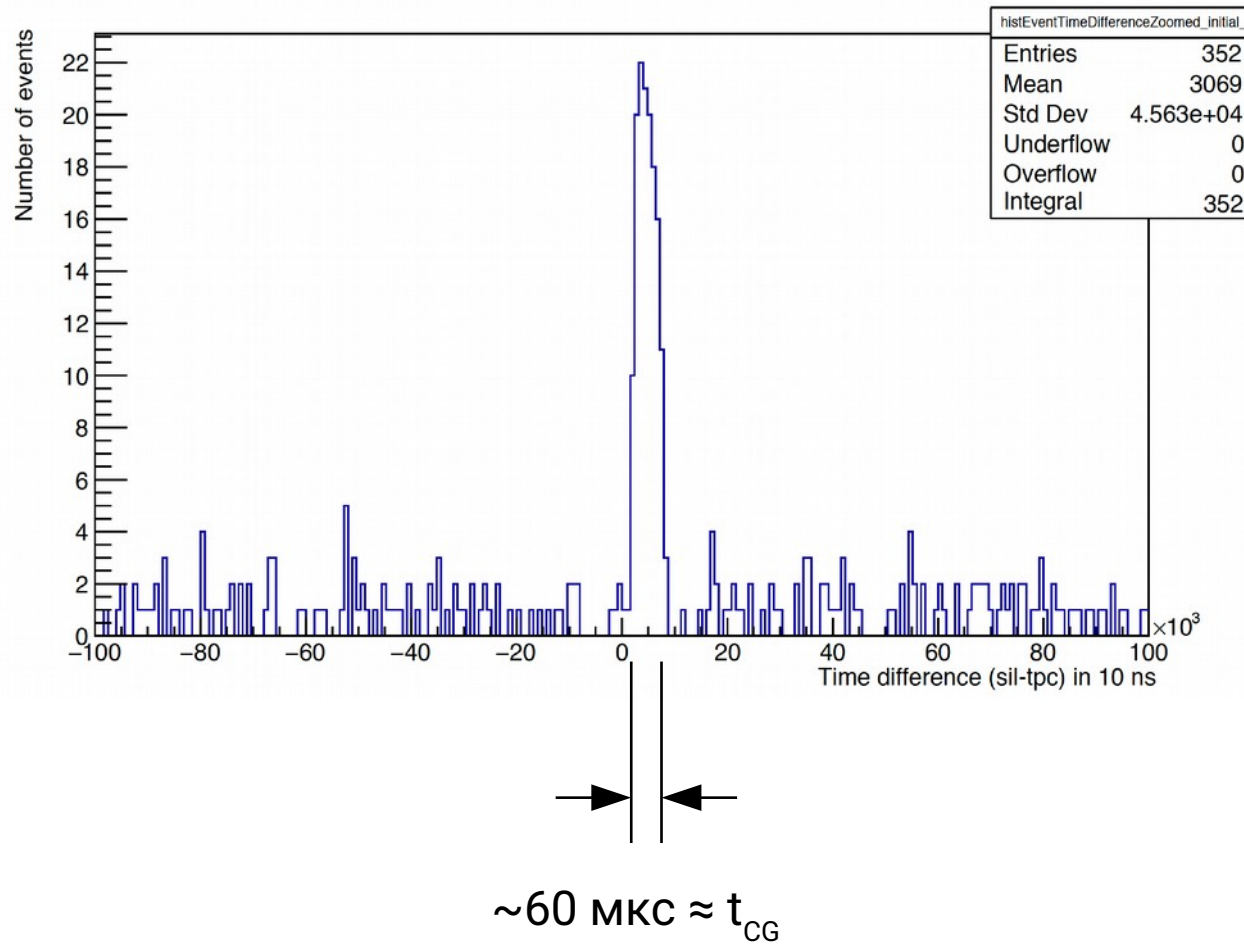
Синхронизация — временные метки



VULOM4B

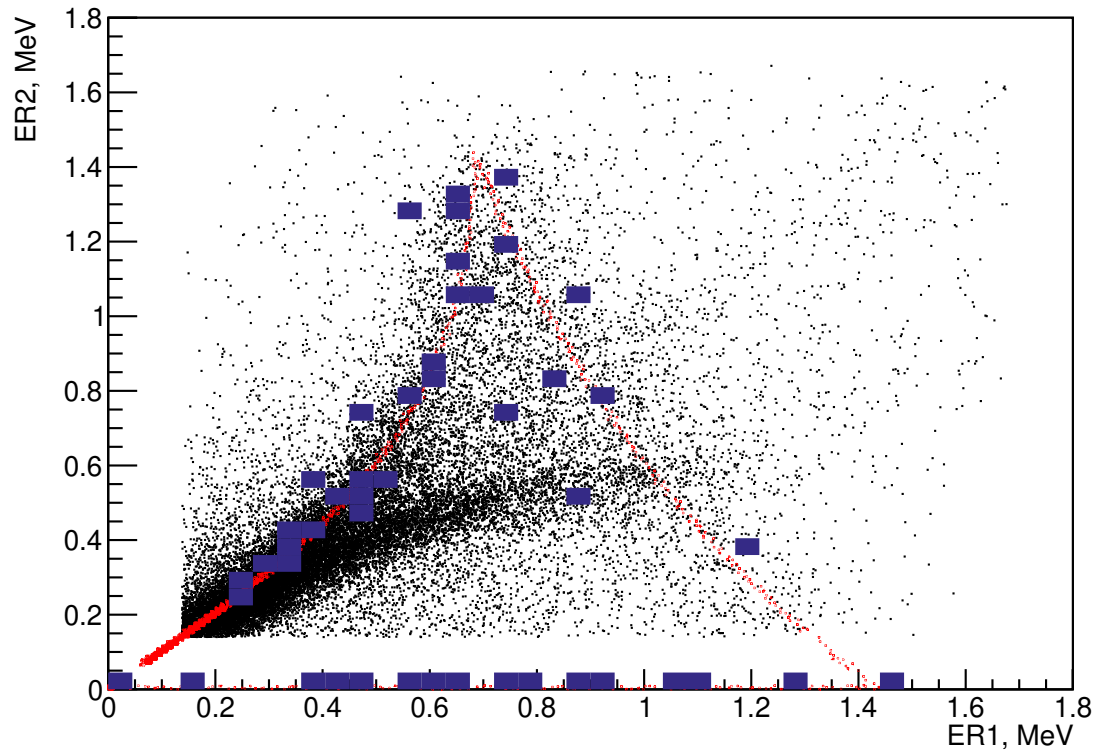
- 32-битные «часы» @100 МГц
- синхронизация через временные метки (timestamps)
- Si: линейная экстраполяция между метками
- совмещение абсолютных времен событий Si и TPC

Совмещение событий ТРС и трекера



Совмещение событий ТРС и трекера

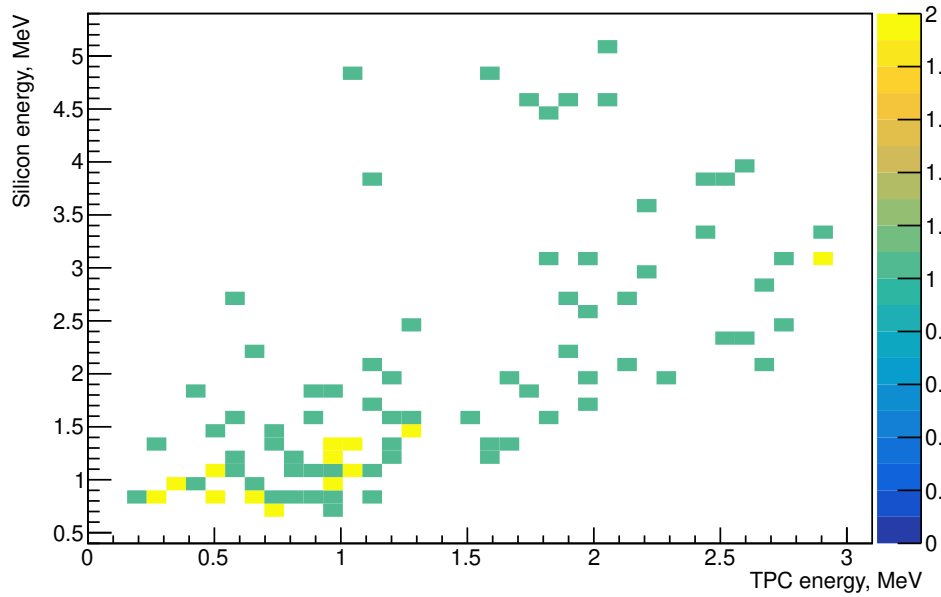
Ring 1 & 2 energies (data + simulation)



- Симуляция
- Данные ТРС
- Совмещенные события

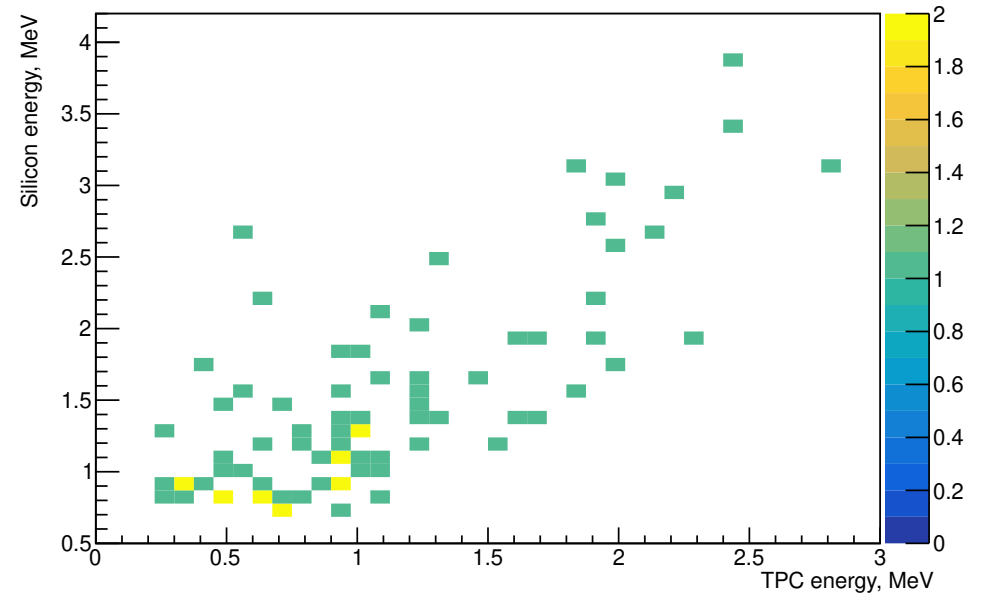
Энергия: камера и трекер

E_{Si} vs. E_{TPC}



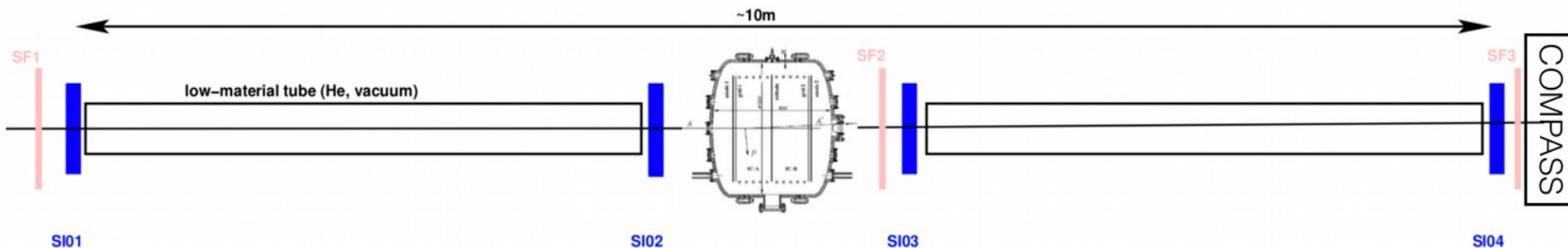
Без отбора:
99 событий

E_{Si} vs. E_{TPC}



Нет сигнала на кольце 3:
79 событий

Перспективы



- Размер пучка: $\sigma \approx 8$ мм
- Энергия пучка: 100 ГэВ
- Углы рассеяния мюонов: 0.3–2 мрад ($Q^2 = 0.001–0.04$ ГэВ²/c²)
- База: 5 метров – отклонение на 1.5–10 мм
- Кремниевые детекторы с разрешением $\Delta x < 10$ мкм ($\Delta\theta < 2$ мкрад на 5 м)
- Новая быстрая электроника для чтения кремниевых детекторов
- Триггер от рассеянной частицы («kink trigger» – SciFi?)
- Активная мишень: увеличенный диаметр – 800 мм, 20 атм H₂
- Интенсивность пучка: $2 \cdot 10^6$ μ /с – 1 год (2022 г.)

Заключение

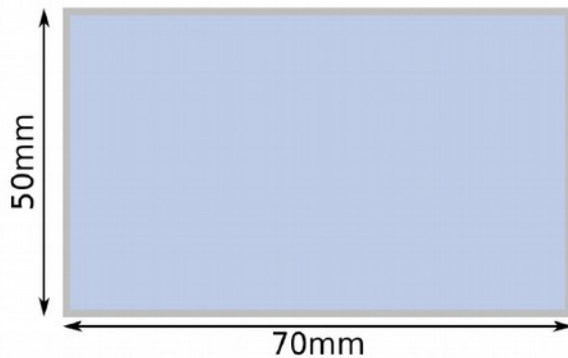
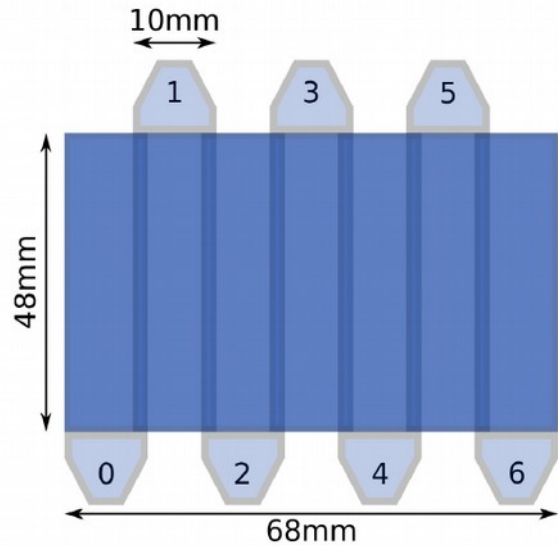
- Проведен эксперимент по рассеянию мюонов на водородной активной мишени
 - Автономная экспериментальная установка
 - Обеспечено соответствие требованиям безопасности
- Измерено энергетическое разрешение ТРС на пучке, получены первые энергетические распределения
- Успешно протестировано совмещение событий с помощью временной метки

Спасибо за внимание!

COMPASS

- Hadron Program
 - Pion and Kaon Polarizabilities
 - Exotic States and Spectroscopy
 - Charmed Baryons
- Muon Program
 - Gluon Polarization
 - Longitudinal Spin Structure Functions
 - Transverse Spin Distributions
 - Lambda Polarization
- Generalized Parton Distributions
- Drell-Yan

Сцинтилляторы



- BT1A/2A - Monolithic counter 70x50 mm [BC408], XP2090 PMT readout
- BT1B - Vertical segmented counter 7x 10 mm → 64x48 mm [BC408], R7400 PMT readout

Триггер кремниевого детектора:
совпадение BT1B и BT2A

ФЭУ

39 mm (1 1/2") tubes

		XP2072B	XP2090B
Key features		good linearity, good PHR	fast
Dynode structure / number of stages		focused/10	focused/10
Cathode luminous sensitivity (μA/lm)	typ.	85	90
8Cathode blue sensitivity (μA/lmF)	min	9	10
	typ.	11	11.5
Cathode radiant sensitivity (mA/W)	typ. at (nm)	85 mA/W 290 420 650	90 mA/W 270 420 650
	Gain	typ. 6.5x10 ⁵	6.5x10 ⁵
Supply voltage	typ.	1 100	850
	min. (V)	900	700
	max. (V)	1250	950
Anode dark current	typ. (nA)	2	2
	max. (nA)	10	10
Anode dark counts	typ. (cps)	---	---
	max. (cps)	---	---
Max. anode pulse current for linearity 2% (mA)		150	80
Time response	rise (ns)	2.8	2.9
	FWHM (ns)	7	4.5
PHR (%)		7.2	7.5
Maximum ratings	supply voltage (V)	1600	1 500
	gain	1x10 ⁷	1x10 ⁷
Accessories	Voltage divider	VD200K	VD200K
	Socket	FE1012	FE1012
	Mu-metal shields	MS170	MS170

PHR: for radiation source ¹³⁷Cs, NaI Tl scintillator, Ø 32 mm, h25 mm; Transit time spread at 1250V for XP2090B: 2 ns.
XP20C2 is the 8-stage variant of XP20A2.
XP2090B transit time spread at 1250V is 2ns.

Монолитный:
Photonis XP2090B
rise time 2.9 ns

Сегментированный:
Hamamatsu R7400U
rise time 0.78 ns

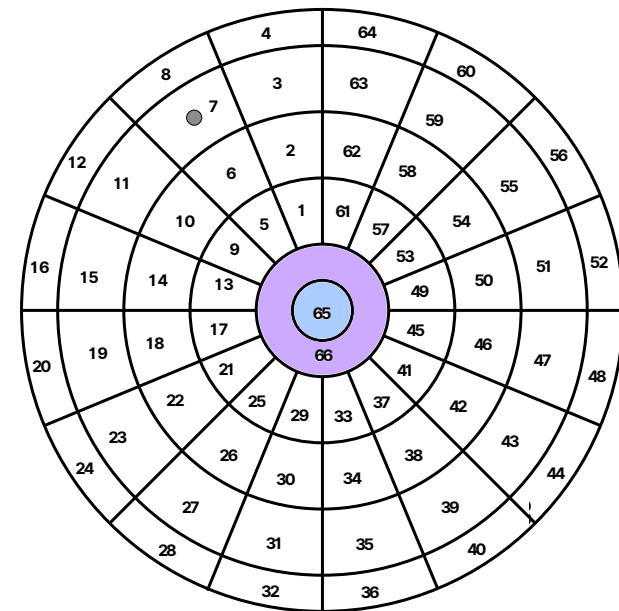
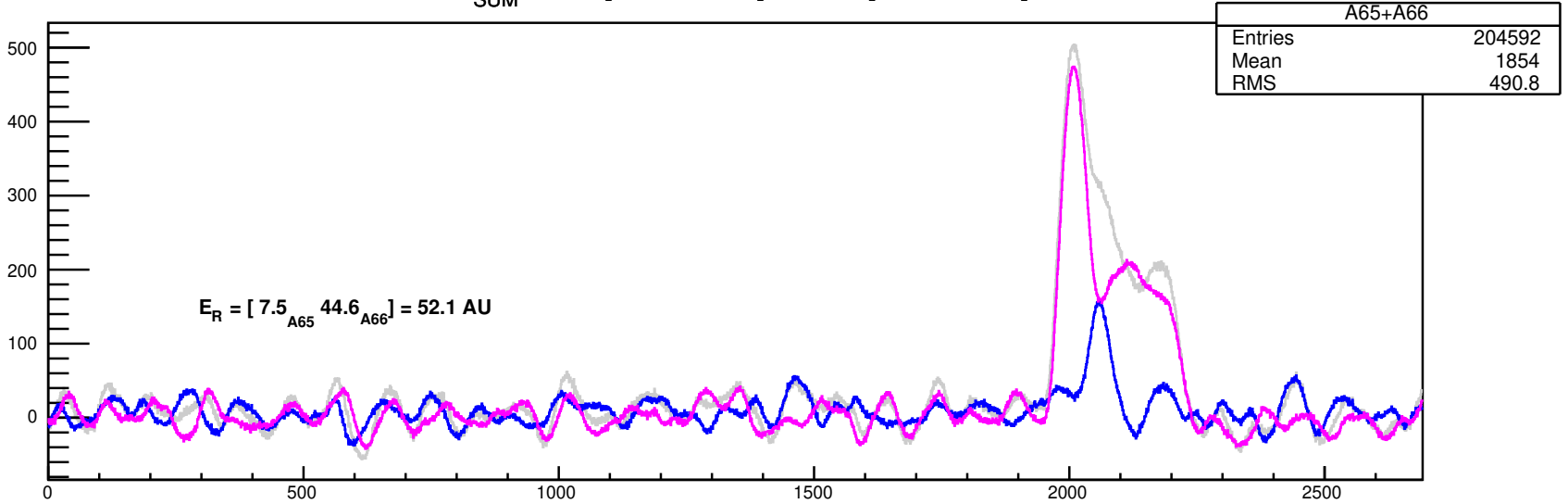
CHARACTERISTICS (at 25 °C)

Type No.	Remarks	Spectral Response		Photo-cathode Material	Window Material	Out-(a) line No.	Maximum Ratings		Cathode Characteristics				
		Range (nm)	Peak Wave-length (nm)				Anode to Cathode Voltage (V)	Average Anode Current ^(b) (mA)	Min. (μA/lm)	Typ. (μA/lm)	Blue Sensitivity Index (CS 5-58) Typ.	Red/White Ratio (R-68) Typ.	Radiant Typ. (mA/W)
R7400U-09	Solar Blind	160 to 320	240	Cs-Te	Synthetic silica	②	1000	0.01	—	—	—	—	10 ^(c)
R7400U	Visible	300 to 650	420	Bialkali	Borosilicate glass	①	1000	0.1	40	70	8	—	62
R7400U-03	UV to Visible	185 to 650	420	Bialkali	UV glass	①	1000	0.1	40	70	8	—	62
R7400U-06	UV to Visible	160 to 650	420	Bialkali	Synthetic silica	②	1000	0.1	40	70	8	—	62
R7400U-01	Visible to Near IR	300 to 850	400	Multialkali	Borosilicate glass	①	1000	0.1	80	150	—	0.20	60
R7400U-02	Visible to Near IR	300 to 880	500	Multialkali	Borosilicate glass	①	1000	0.1	200	250	—	0.25	58
R7400U-20	Visible to Near IR	300 to 920	630	Multialkali	Borosilicate glass	①	1000	0.1	350	500	—	0.45	78
R7400U-04	UV to Near IR	185 to 850	400	Multialkali	UV glass	①	1000	0.1	80	150	—	0.20	60
R7401	With Lens	300 to 650	420	Bialkali	Borosilicate glass	③	1000	0.1	40	70	8	—	62
R7402	With Lens	300 to 850	400	Multialkali	Borosilicate glass	③	1000	0.1	80	150	—	0.20	60
R7402-02	With Lens	300 to 880	500	Multialkali	Borosilicate glass	③	1000	0.1	200	250	—	0.25	58
R7402-20	With Lens	300 to 920	630	Multialkali	Borosilicate glass	③	1000	0.1	350	500	—	0.45	78

(a): See figure 11. (b): Averaged over any interval of 30 seconds maximum. (c): Measured at 254 nm. (d): Measured after 30 minutes storage in darkness.
(e): Measured at 410 nm, at -800 V, with an input pulse width less than 30 ps. (f): Measured at a gain of 10⁵.

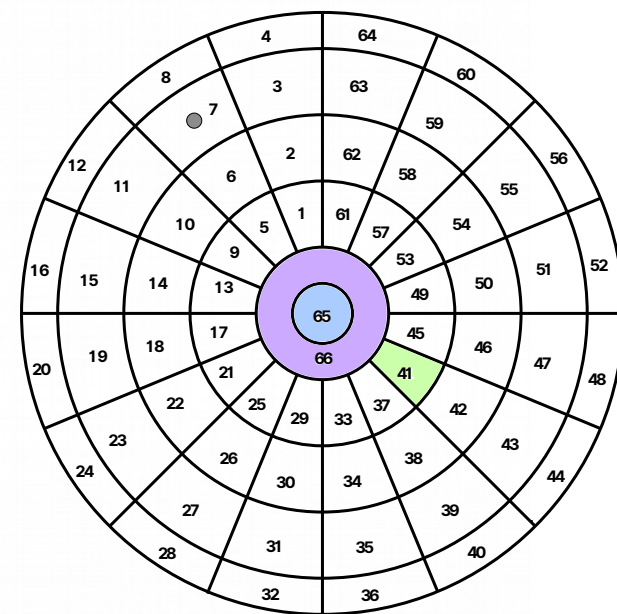
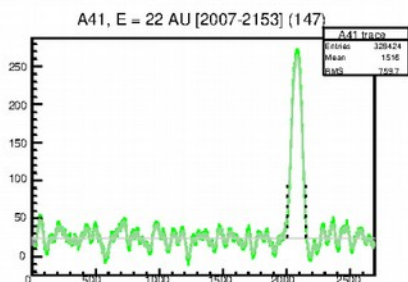
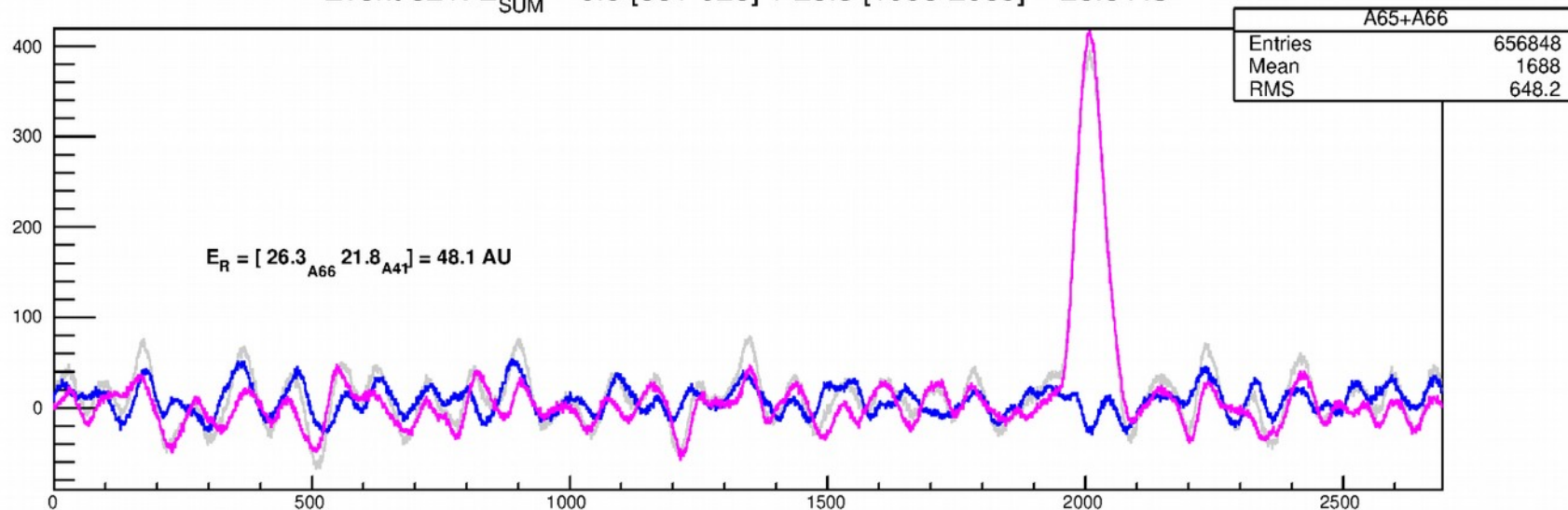
Отбор треков: алгоритм

Event 237: $E_{\text{SUM}} = 7.5 [2013-2101] + 44.6 [1959-2071] = 52.1 \text{ AU}$

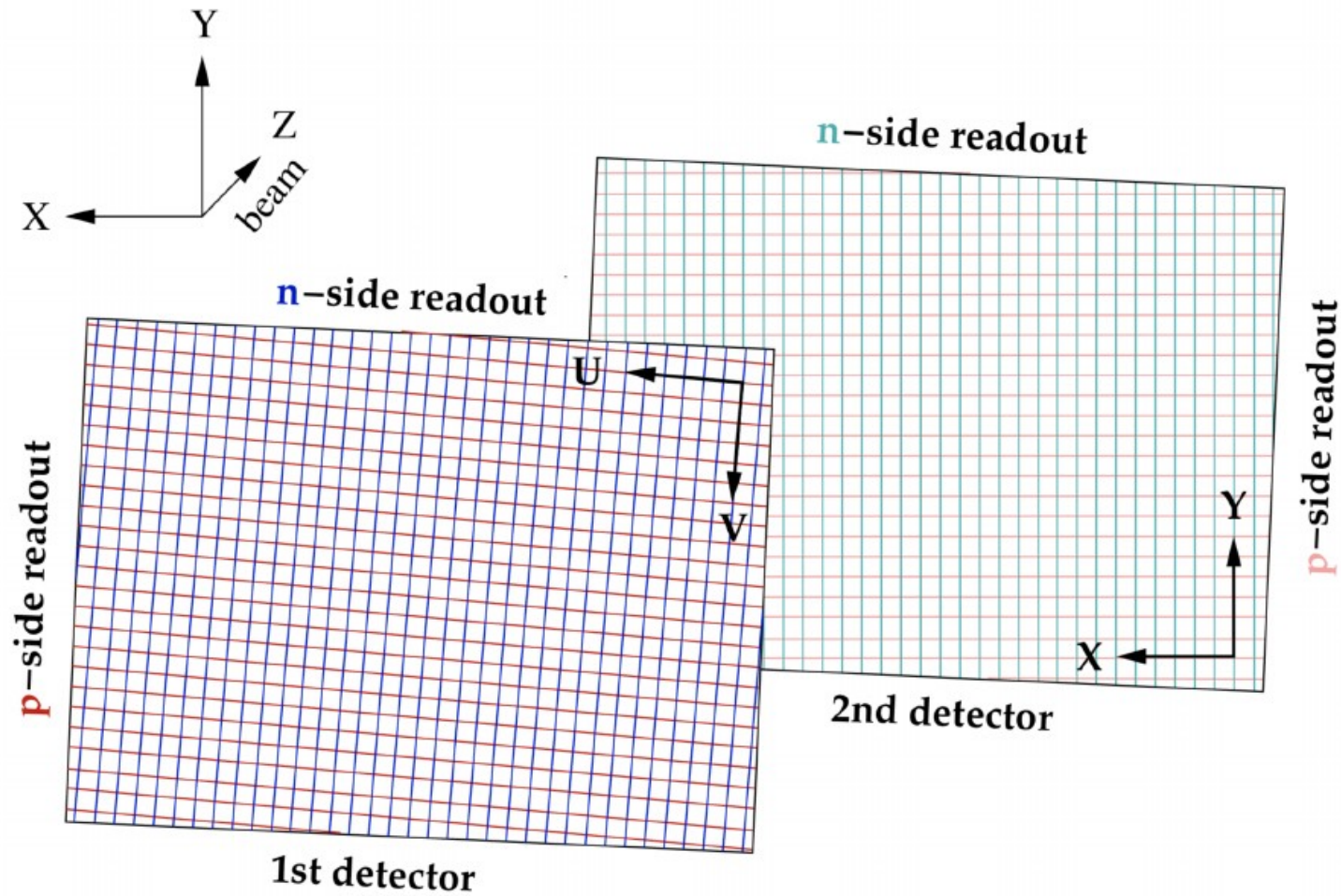


Отбор треков: алгоритм

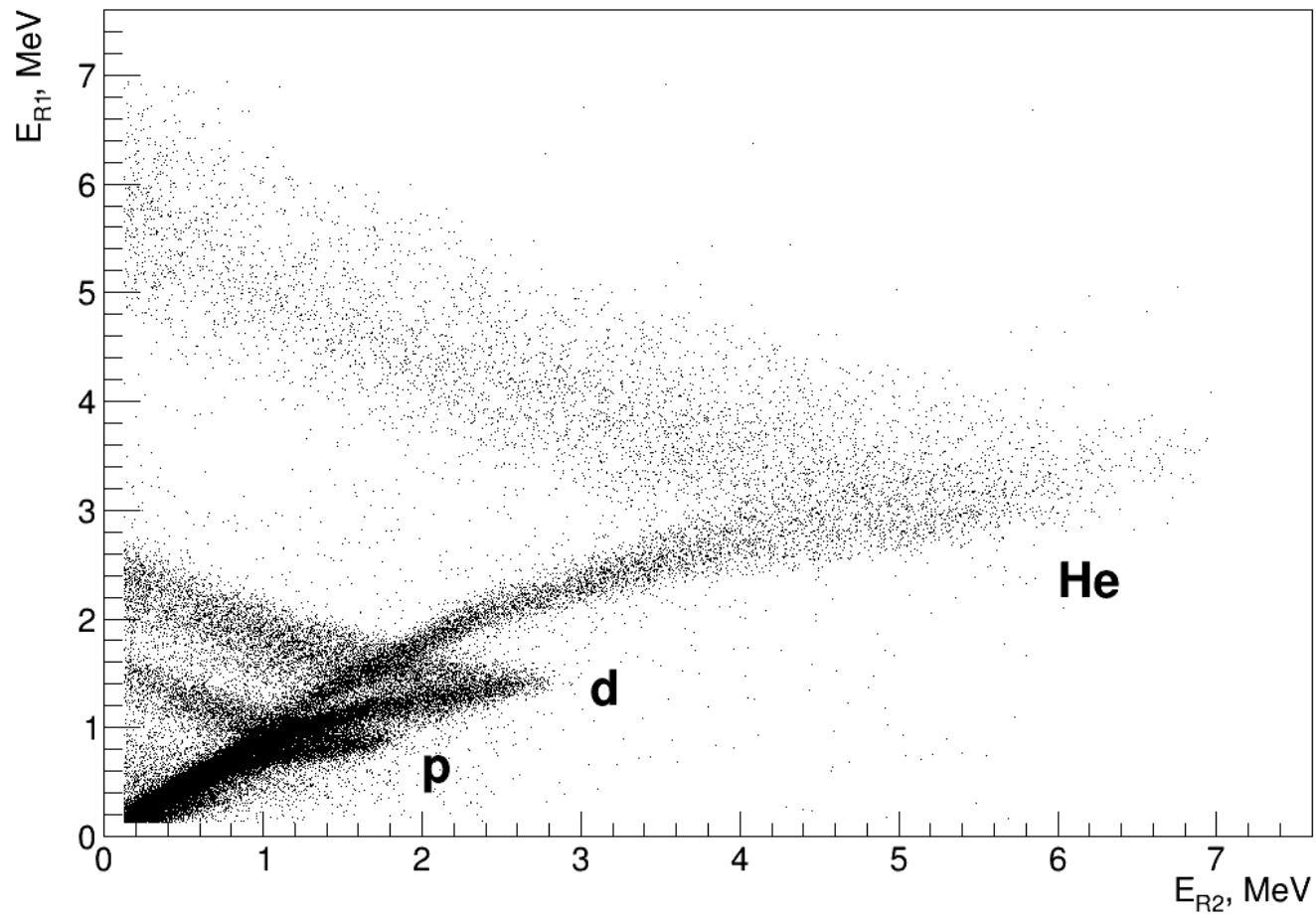
Event 321: $E_{\text{SUM}} = 0.5 [861-926] + 26.3 [1956-2065] = 26.8 \text{ AU}$



Кремниевый трекер



Энергия на кольцах (пучок e^- , He)



Пробег протона в водороде

