

ALICE



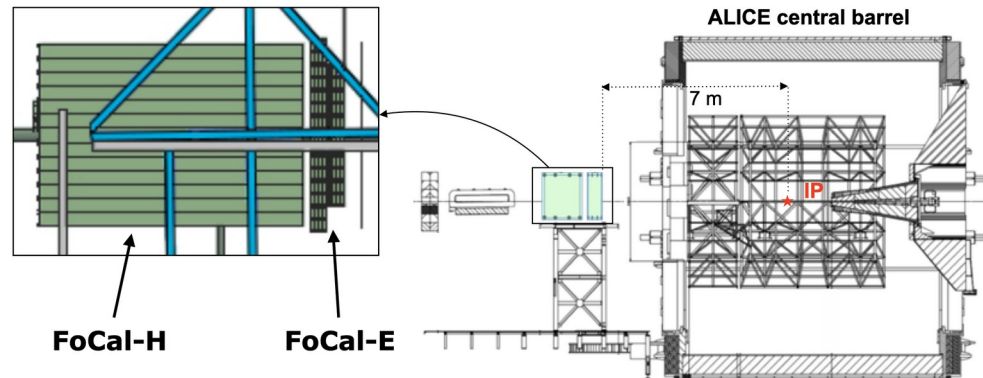
# Изследване на прототипи на калориметъра FoCal-H на експеримента ALICE

Радослав Симеонов

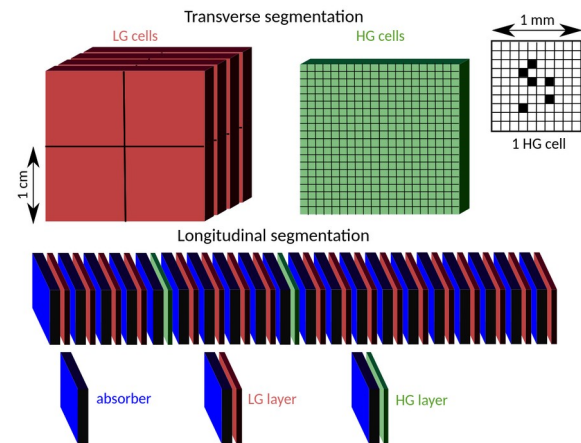
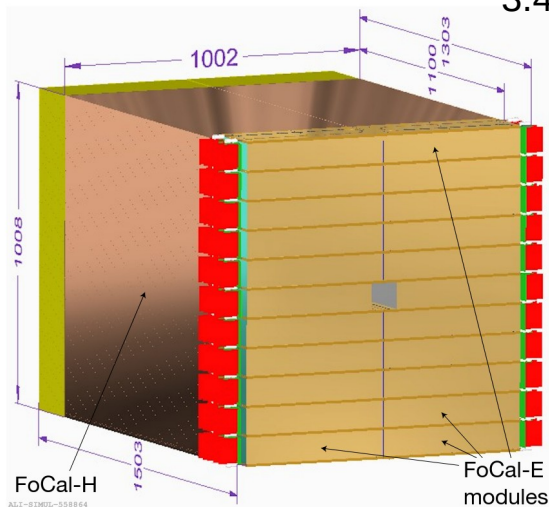
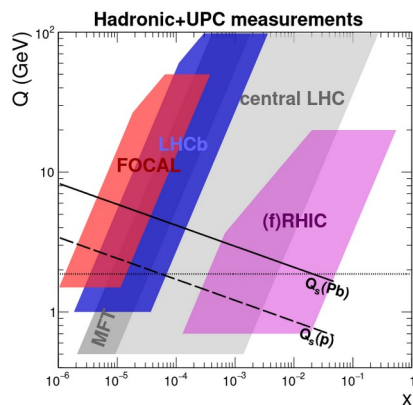
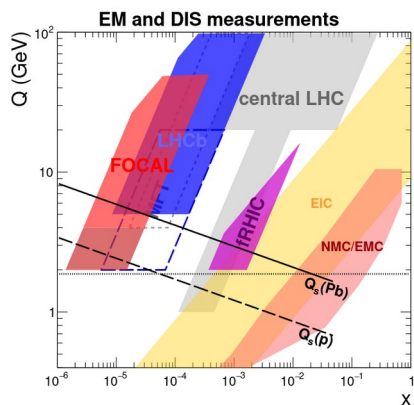
Софийски Университет "Св. Климент Охридски"  
Катедра Атомна Физика

# Дизайн на FoCal

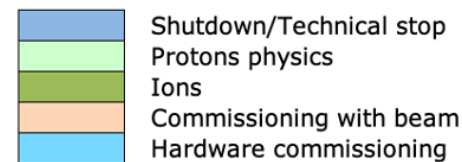
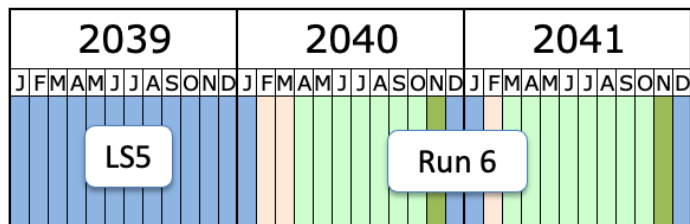
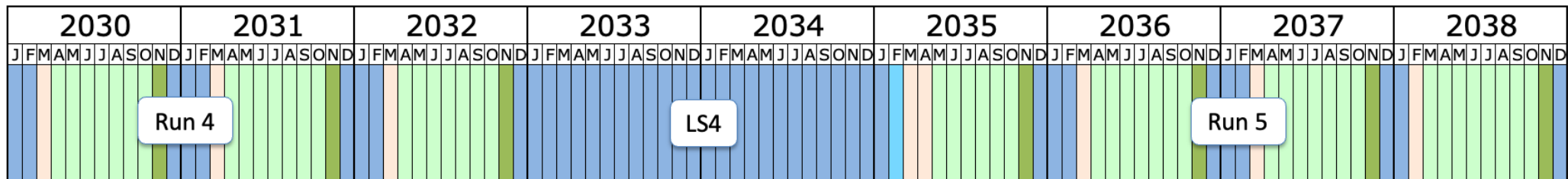
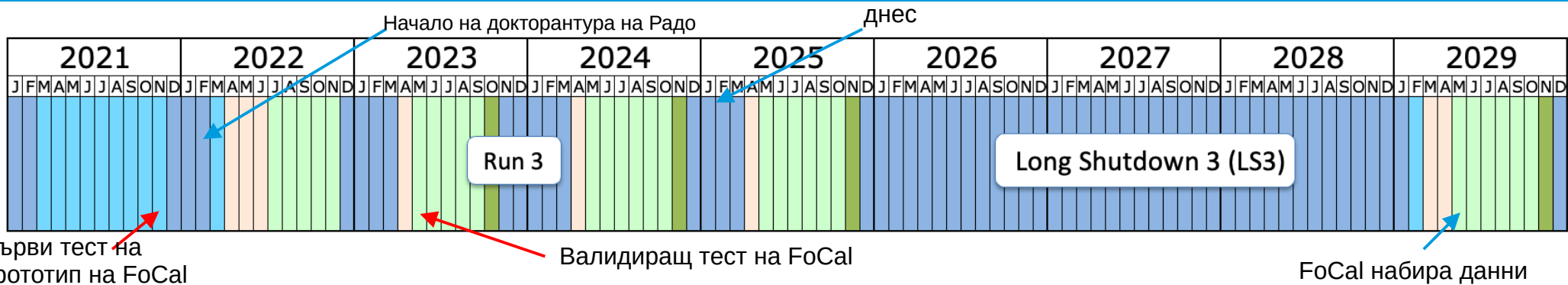
- Изследване на партонната структура при малки Бьоркен -  $x \sim 10^{-6}$
- Измерване на директни фотони
- Идентификация на  $\pi^0$  и други неутрални мезони
- Измервания на адронни струи и корелации струя+ $\gamma$ , ди-струи
- Корелации адрон +  $\gamma$
- Измервания на  $J/\psi$  и възбудените му състояния



$3.4 < \eta < 5.8$



# Планирани интервенции



Last update: April 2023

# Експериментална зала

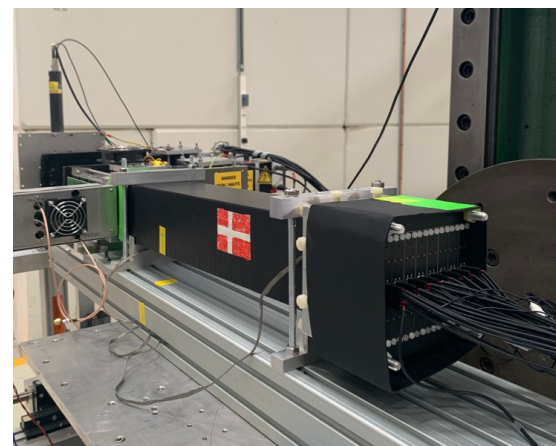
EHN1 (building 887, Preveessin site)



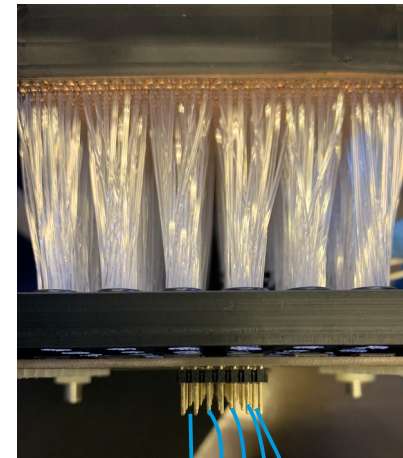
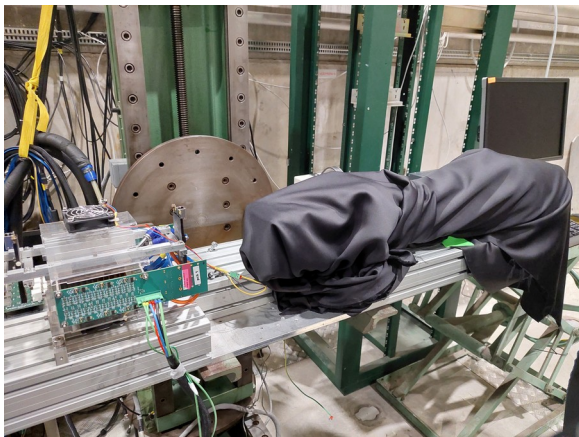
Ускорителна линия	Мишена	Чистота на електронен сноп	Енергия първични прото-ни	Енергия вто-рични адрони
H2	T2	10 - 99.5 %	400 GeV	10 - 360 GeV
H4	T2	10 - 99.5 %	400 GeV	10 - 330 GeV
H6	T4	10 - 99 %	–	10 - 205 GeV
H8	T4	10 - 99 %	400 GeV	10 - 360 GeV

# Прототип 1 на адронен калориметър FoCal - H

- Калориметър изграден от тръбички и сцинтилационни влакна
- Форма на паралелепипед с размери 10 cm x 10 cm x 55 cm
- Медни тръбички с размери: външен диаметър - 2.5mm, вътрешен диаметър – 1.2mm
- Сцинтилационни влакна с диаметър 1.0 mm
  - Общ брой  $36 \times 40 = 1440$  влакна
- Onsemi MICROFC-60035-SMT-TR1 SiPMs с 35  $\mu\text{m}$  пиксел



# Първи набор на данни на H6 на SPS



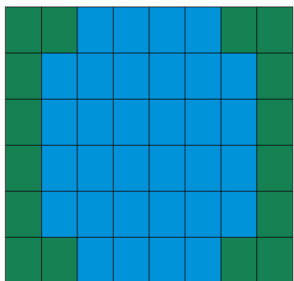
- Набор на данни с енергия на снопа 20 – 80 GeV
- FEBDAQMULT software
- 2 x CAEN A1702
- 12 bit, Weeroc CITIROC ASIC

CAEN 1702 board a 32 channels

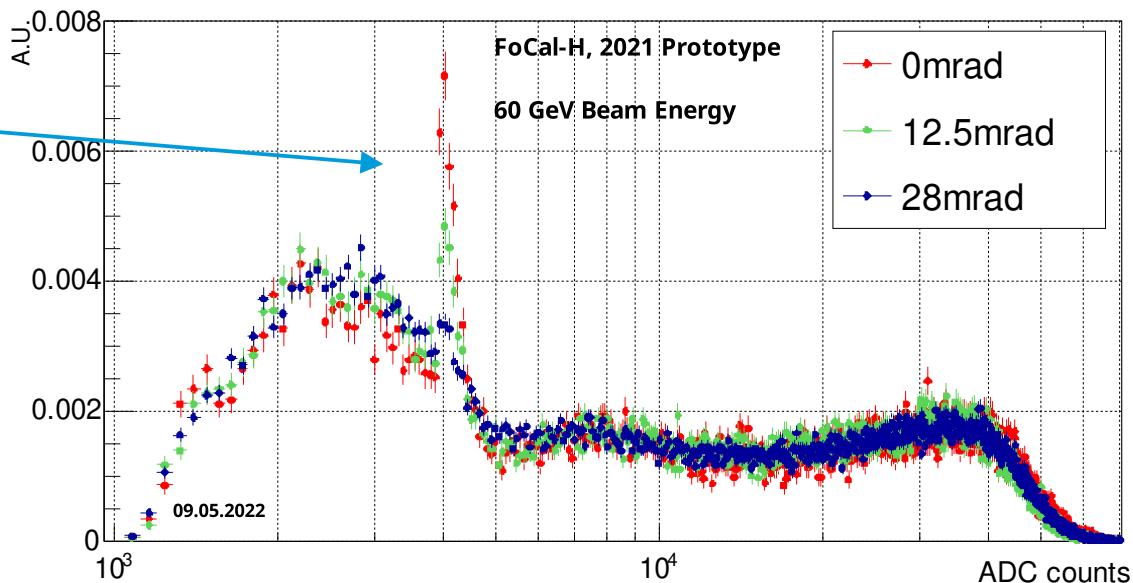


# Първи индикации на проблеми

- Частици, които не преминават през медните тръбички
- Завъртане на детектора
- Очакван ефект  $3.4 < \eta < 5.8$
- Загуба на синхронизация на двете платки...



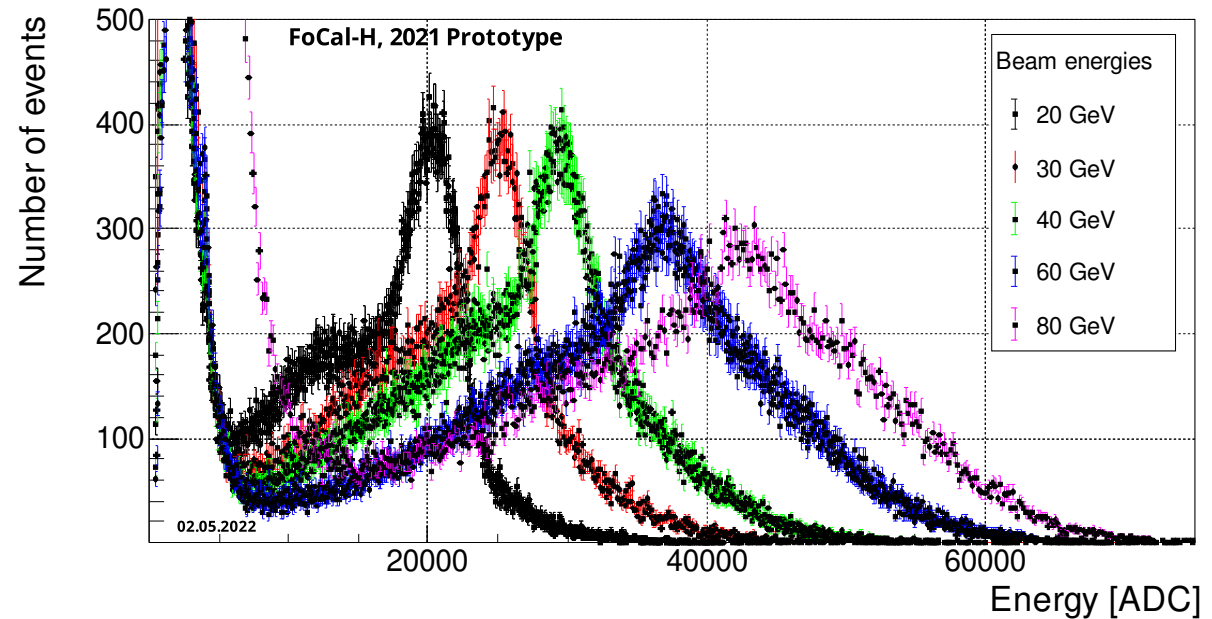
$$Q_1 = \sum_{i=1}^{32} q_i^1 ; \quad Q_2 = \sum_{j=1}^{16} q_j^2 ; \quad Q_{all} = Q_1 + Q_2$$



Решени още в рамките на набора на данни!

# Разпределения по заряд за сноп 20 – 80 GeV

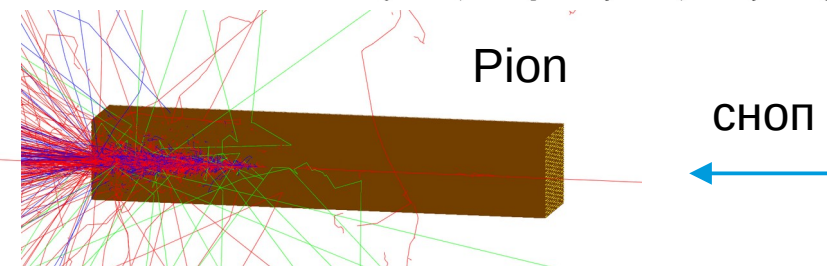
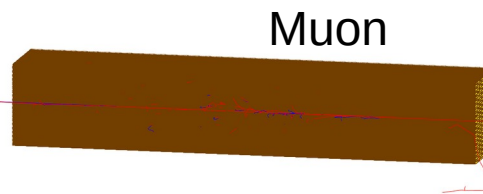
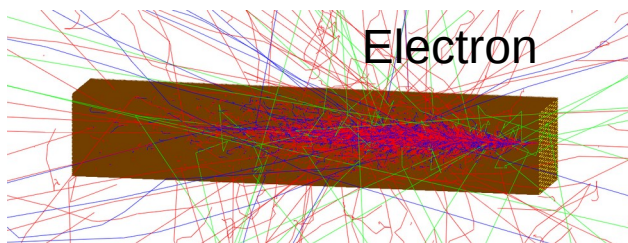
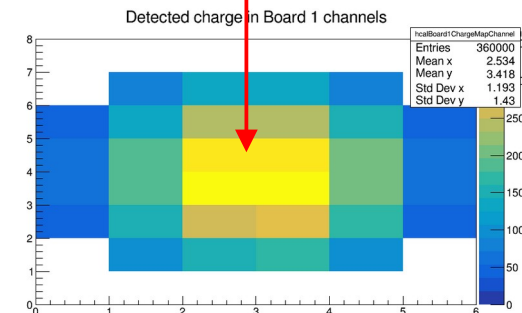
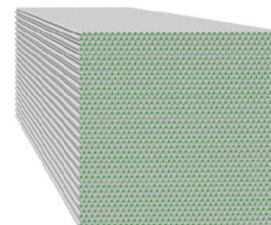
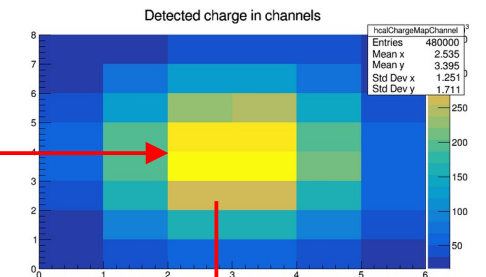
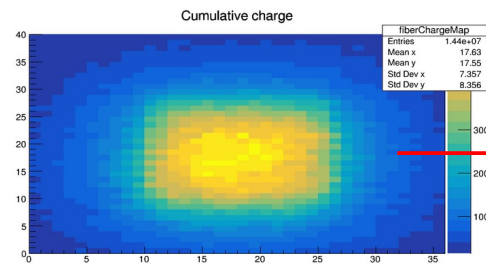
- Разпределенията по реконструиран заряд следват очакваното поведение
- Пикът вляво е определен като MIP
- Първият набора на данни показва, че такъв калориметър може да работи!





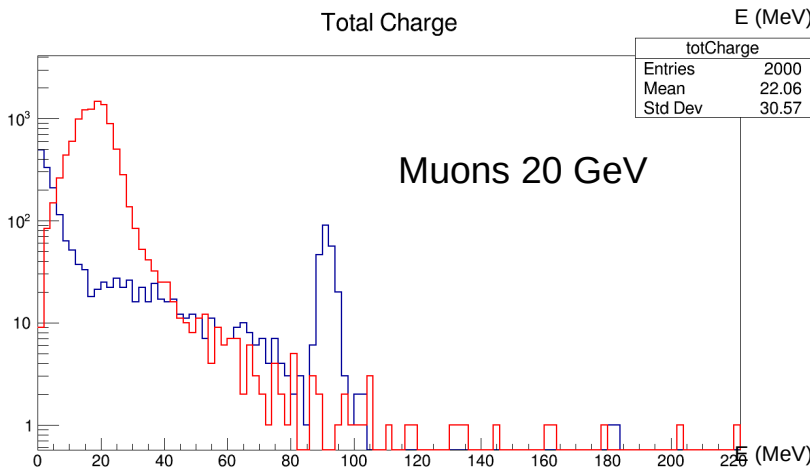
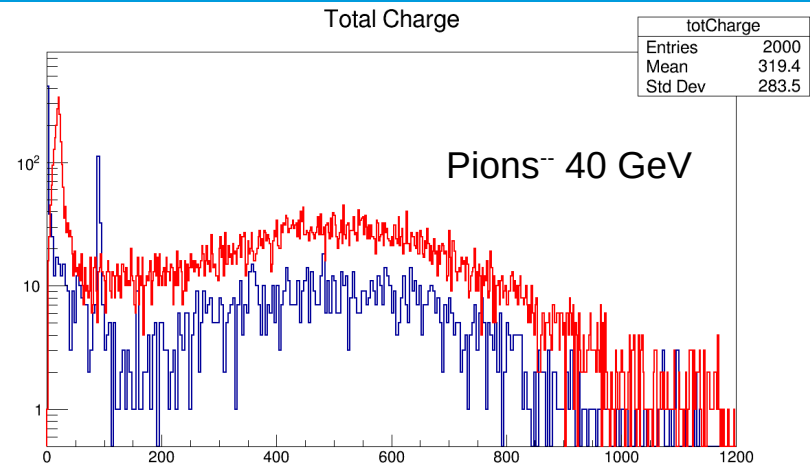
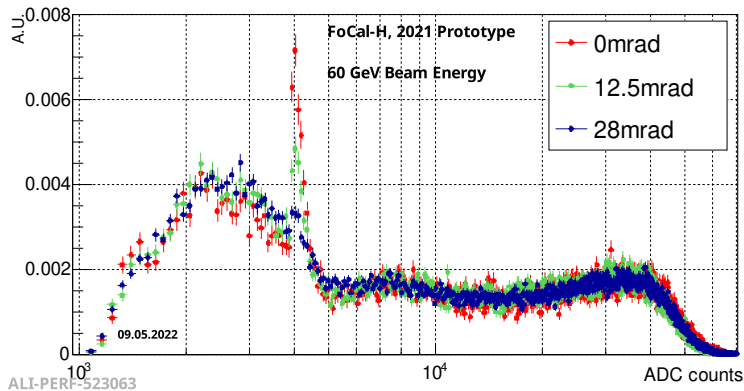
# Имплементиране на Monte Carlo модел

- Въвеждане на точната геометрия на прототипа
- Създаване на софтуер за анализ на данните от симулации
- Въвеждане на групиране на влакна
- Физични списъци: FFTP\_BERT и QGSP\_BERT
- Сигнал: депозирана енергия в пластмасово сцинтилационно влакно
- Сцинтилации, разпространение на светлината, отклик на SiPM, дигитализация – не са отчетени



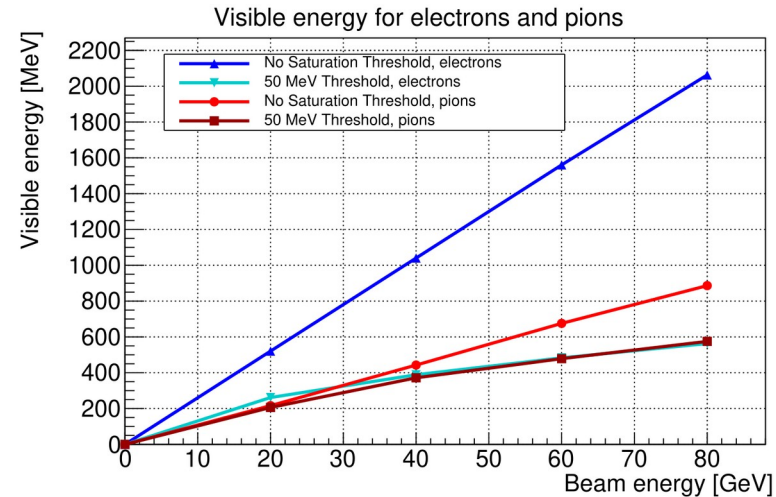
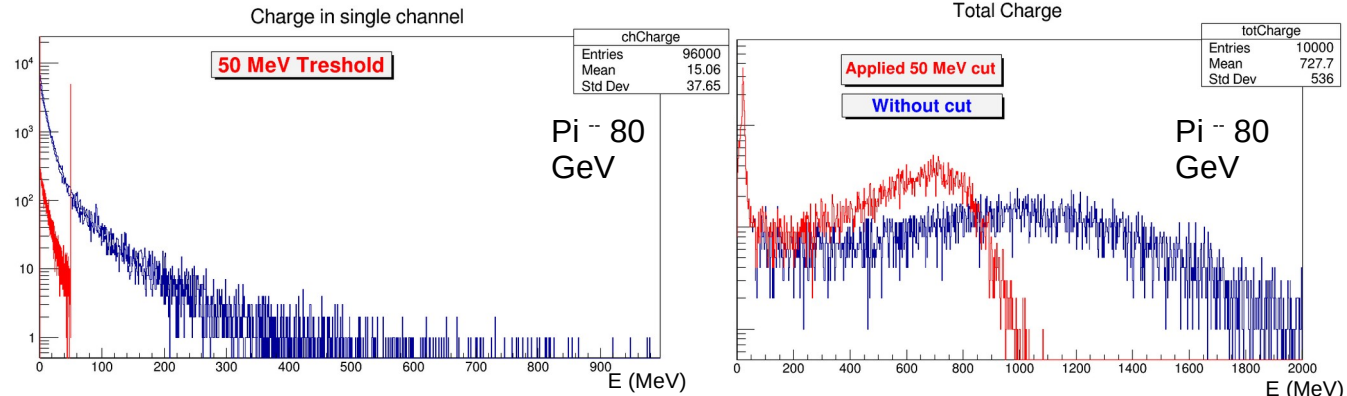
# Симулиране на ефекта на завъртане

- Преди и след прилагане на ефекта на завъртане
- Сливане на 2 пика
- Отправна точка за метод на калибровка



# Ефект на насищане

- Предполагаме насищане на електрониката – твърде високо обратно напрежение подавано на SiPM
- Имплементиране в симулационния пакет
- Изследване на прага на насищане



# Окончателни резултати

- Прототип 1 беше успешно тестван!
- Много близките стойности на параметрите  $a$  и  $b$  показват доброто описание на данните от МС модела
- Състав на снопа - параметризация

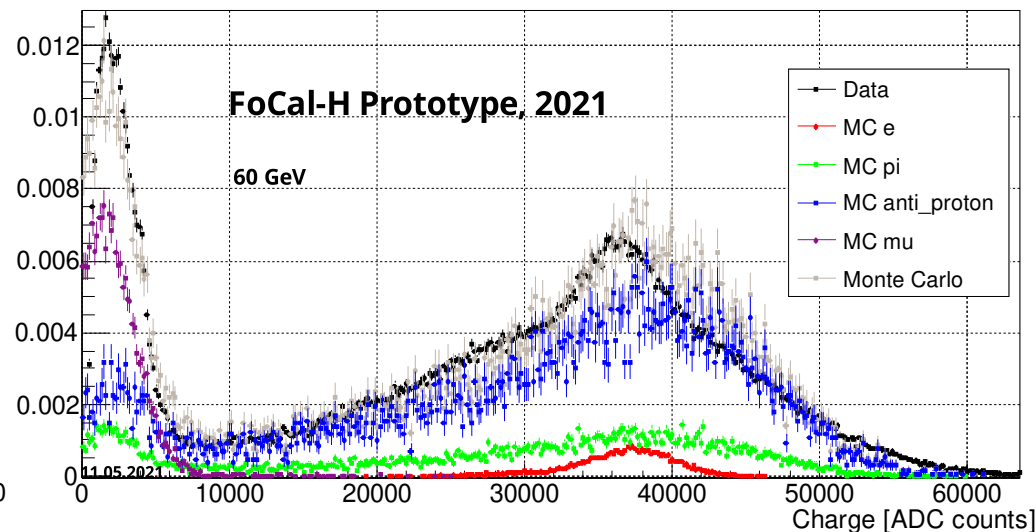
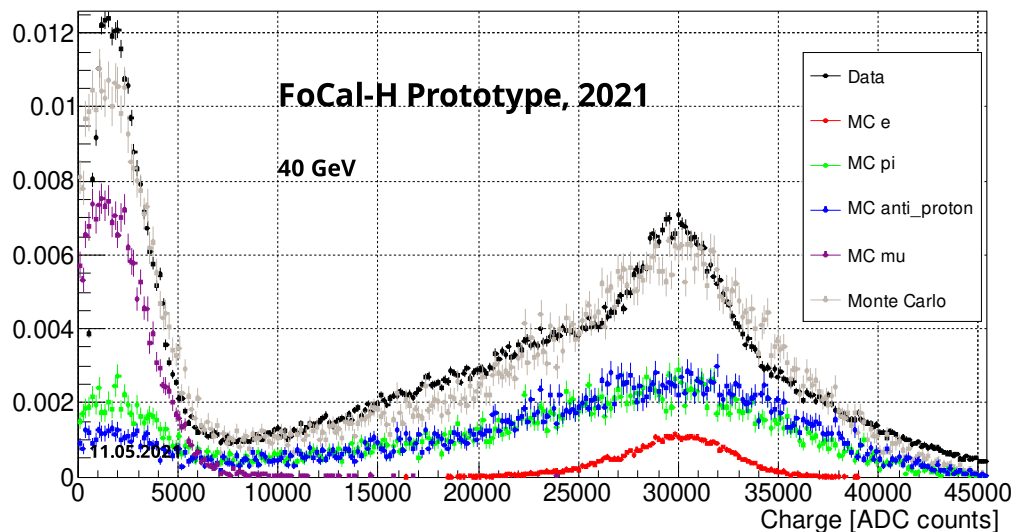
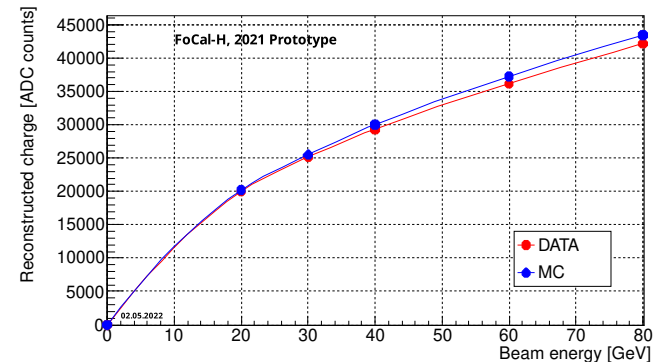
$$f(x) = a \cdot x^b$$

За данни:

$a = 4043.52$ ,  $b = 0.54$

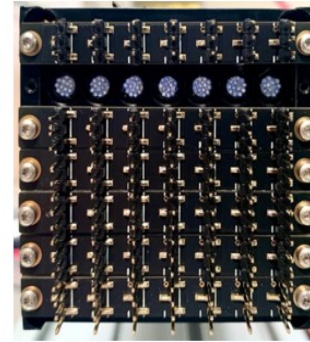
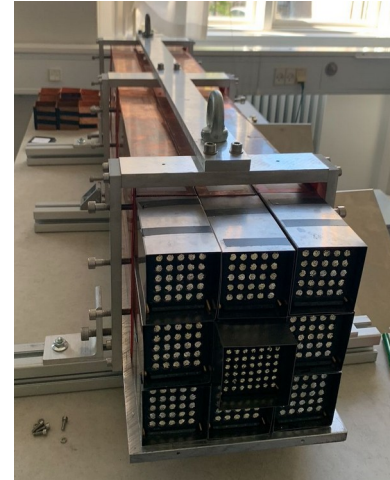
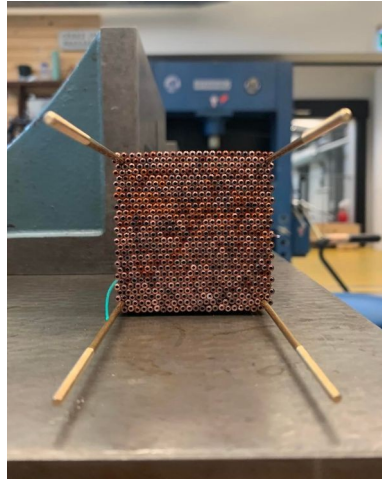
• за симулации:

$a = 4031.86$ ,  $b = 0.54$

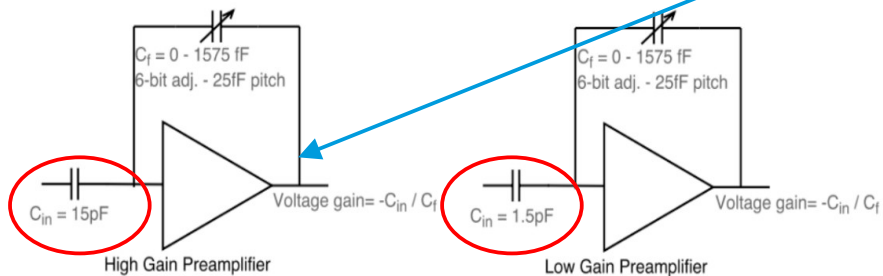
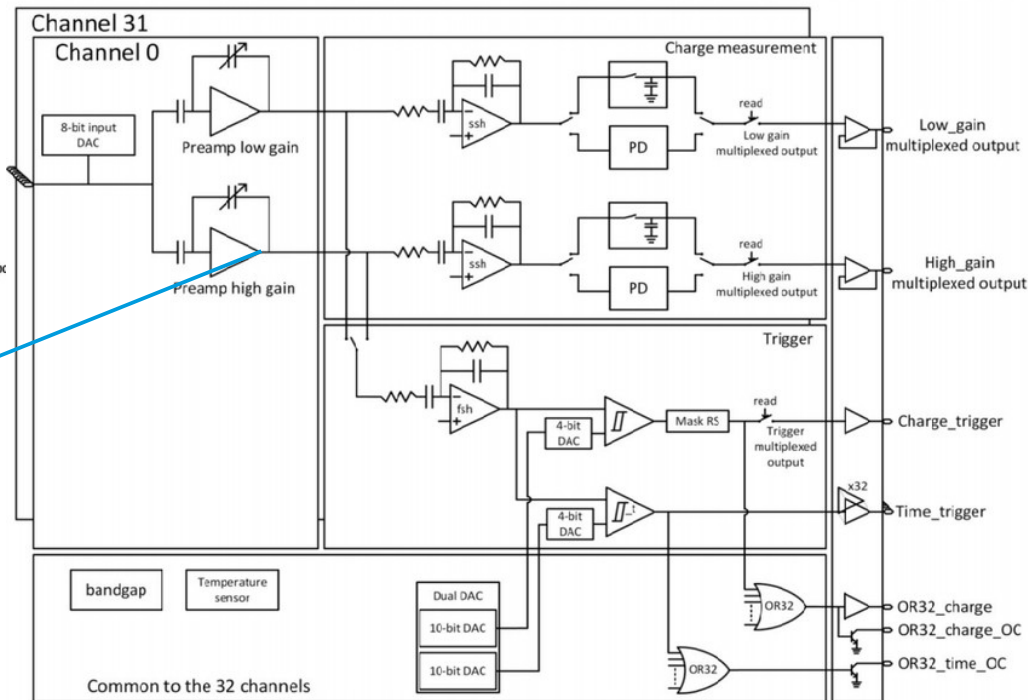
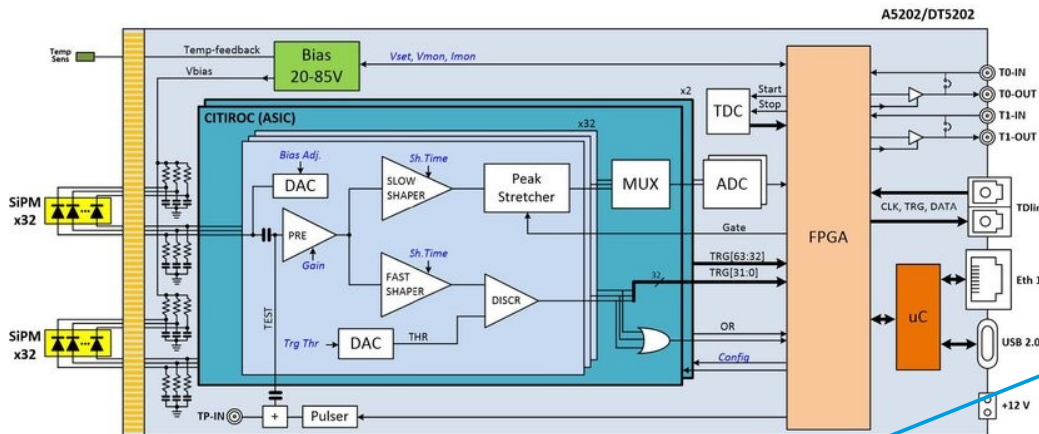


# Прототип 2 на FoCal-H

- 9 модула с размери  $6.5 \times 6.5 \times 110 \text{ cm}^3$
- 3x3 модула, 668 тръбички всеки, 4 монтажни пръта
- 1.1 mm вътрешен диаметър
- VCF 12 сцинтилационно влакно, 1mm дебелина
- Hamamatsu SiPM S13360-6025PE
- CAEN DT5202



# DT5202 отвътре



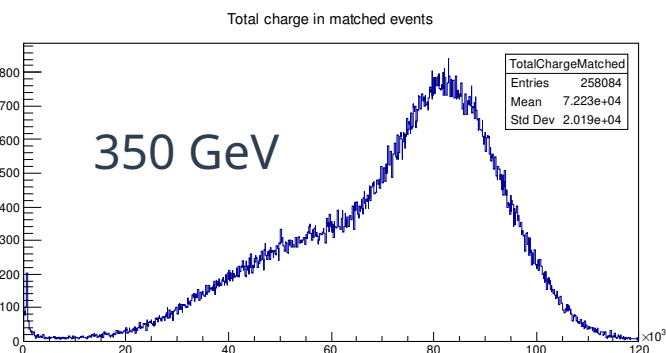
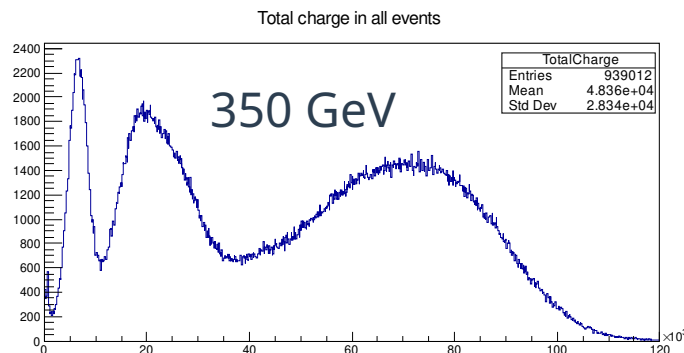
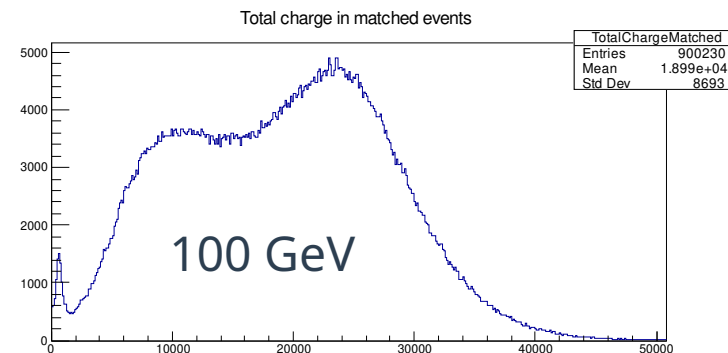
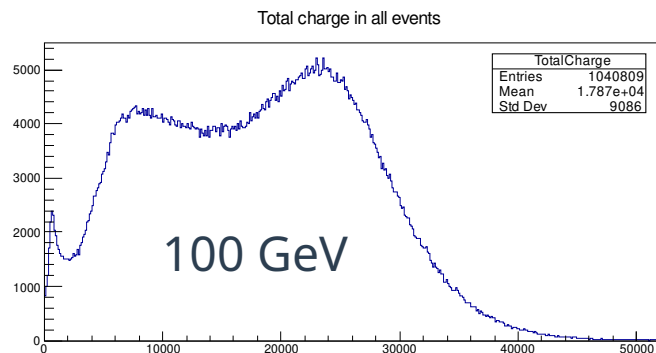
- 1 платка – 64 канала
- 2 Citiroc-1A

2 вериги с различно усилване!



# Ефекти от сглобяване на събития

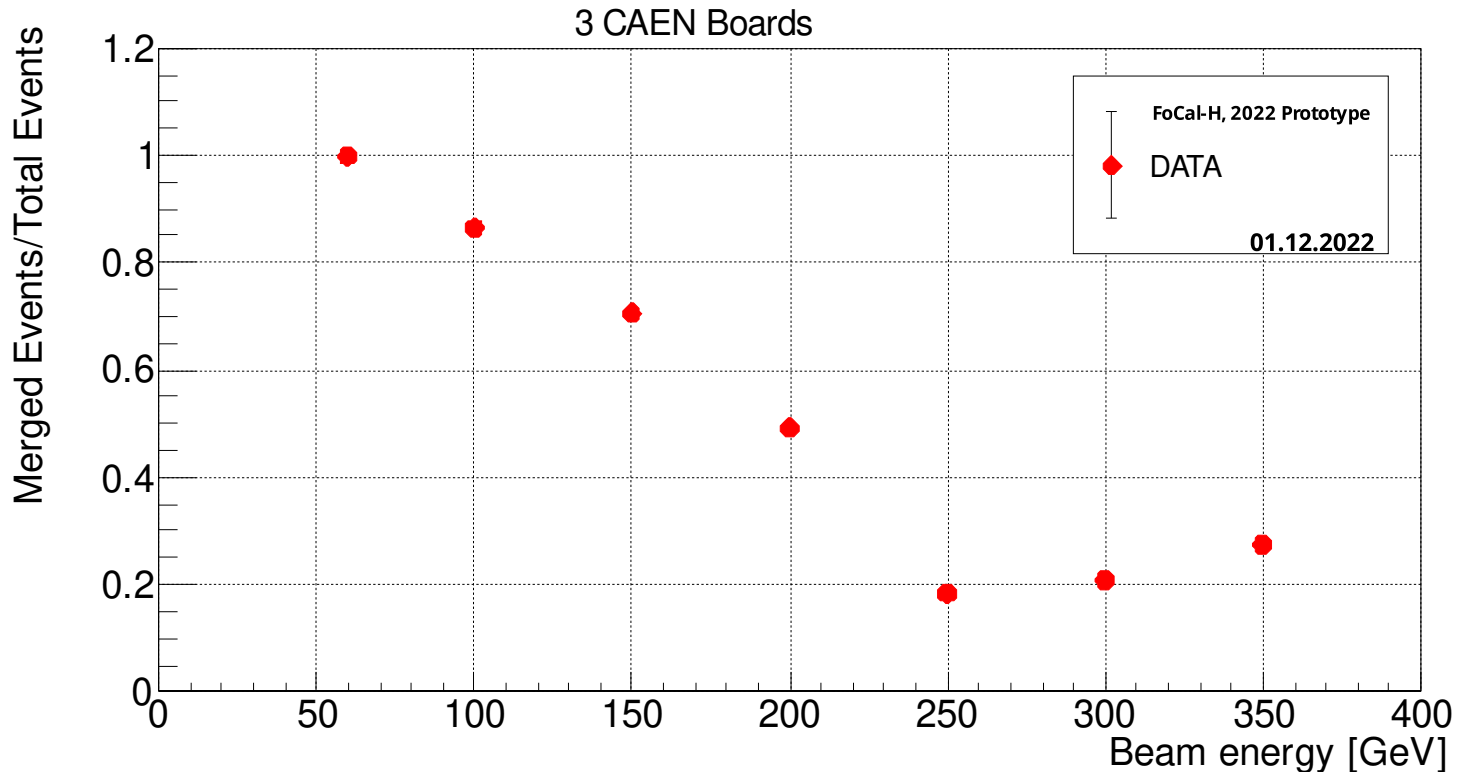
- Събития, за които даден Trigger ID номер е записан само в 1 или 2 от платките се отстраняват
- 2 допълнителни пика
- Загуба на събития при високи енергии





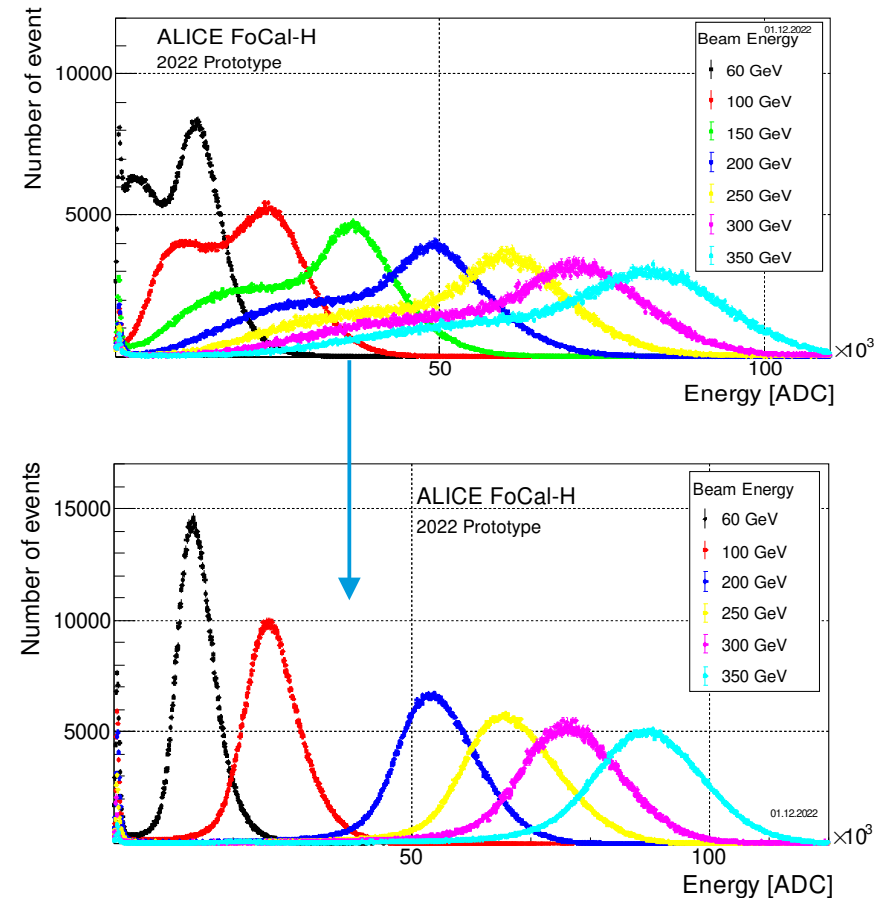
# Оценка на загубите на събития

- Изчисление на отношението на сглобени събития/пълнен брой събития (по trigger ID)
- Над 200 GeV повече от половината събития се губят
- Времеемък набор на данни



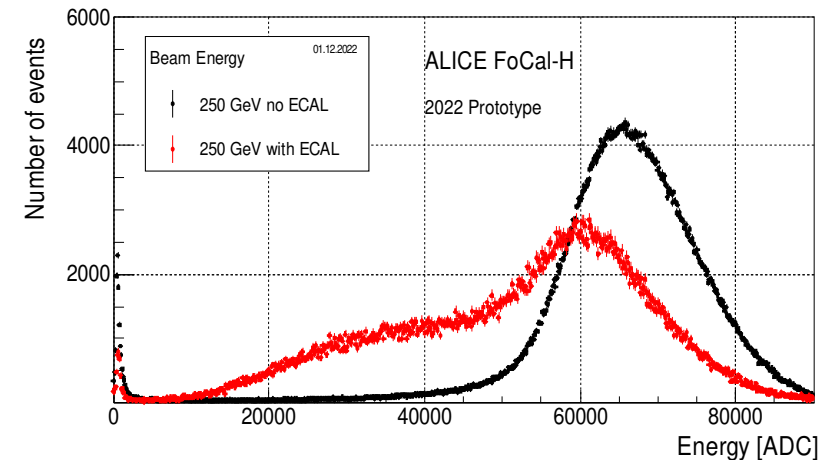
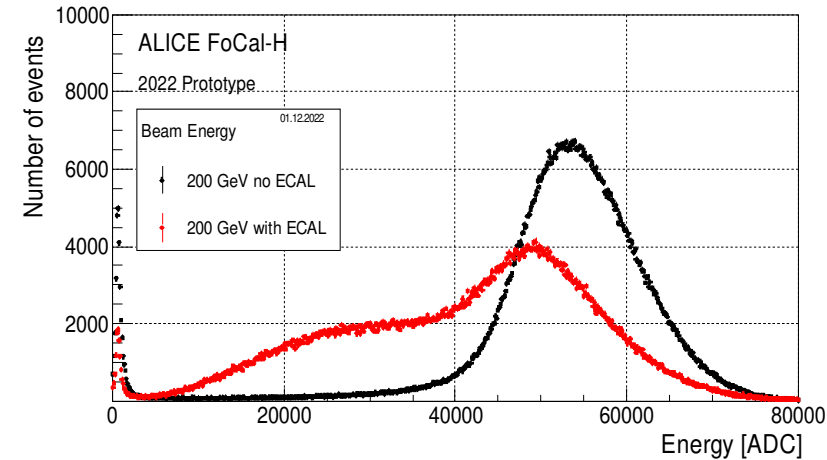
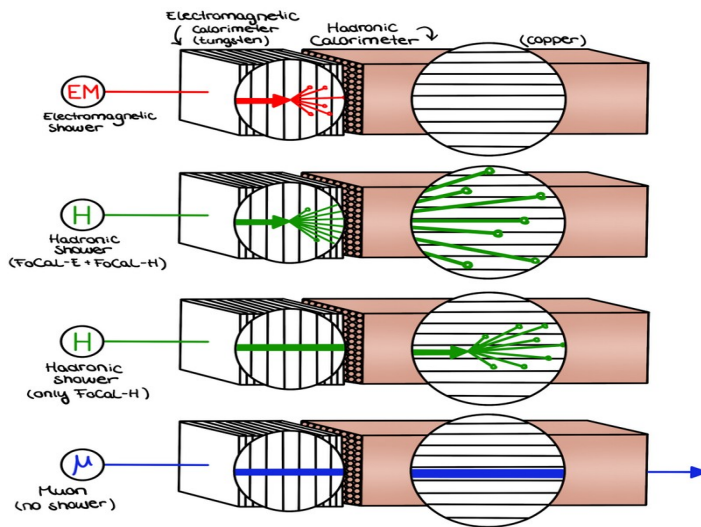
# Реконструкция по заряд при енергии на адронен снопа от 60 до 350 GeV

- Резултатът показва очакваната зависимост
- Сходни разпределения бяха получени и през септември 2022 г. с 2 платки CAEN
- Забелязва се силно изразена лява опашка
- Конфигурация на FoCal-E с 20 W плочи, лавини могат да стартират преди обема на FoCal-H
- За определяне на разделителната способност на FoCal-H са необходими данни в конфигурация без W



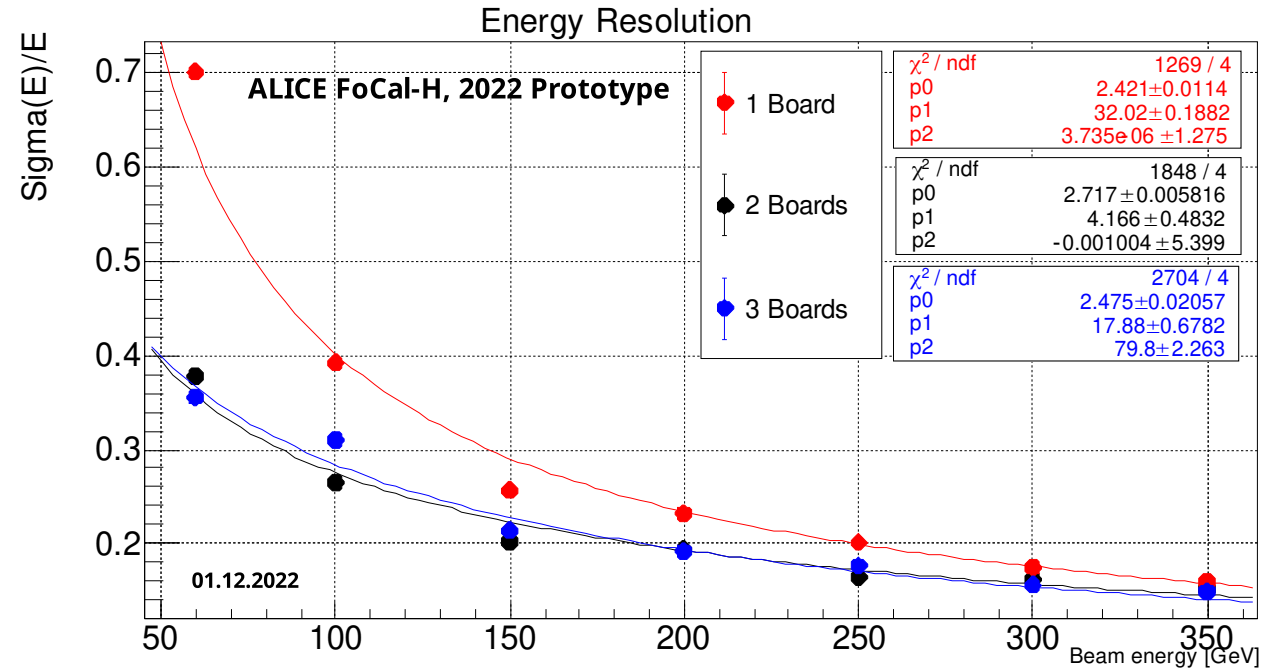
# Разпределение по реконструиран заряд

- При наличие на 20 W плочи, лавини могат да стартират преди обема на FoCal-H
- След отстраняването им, сигналът се изчиства
- Средната стойност на гаусов фит се измества с около 10% при отстраняване на плочите



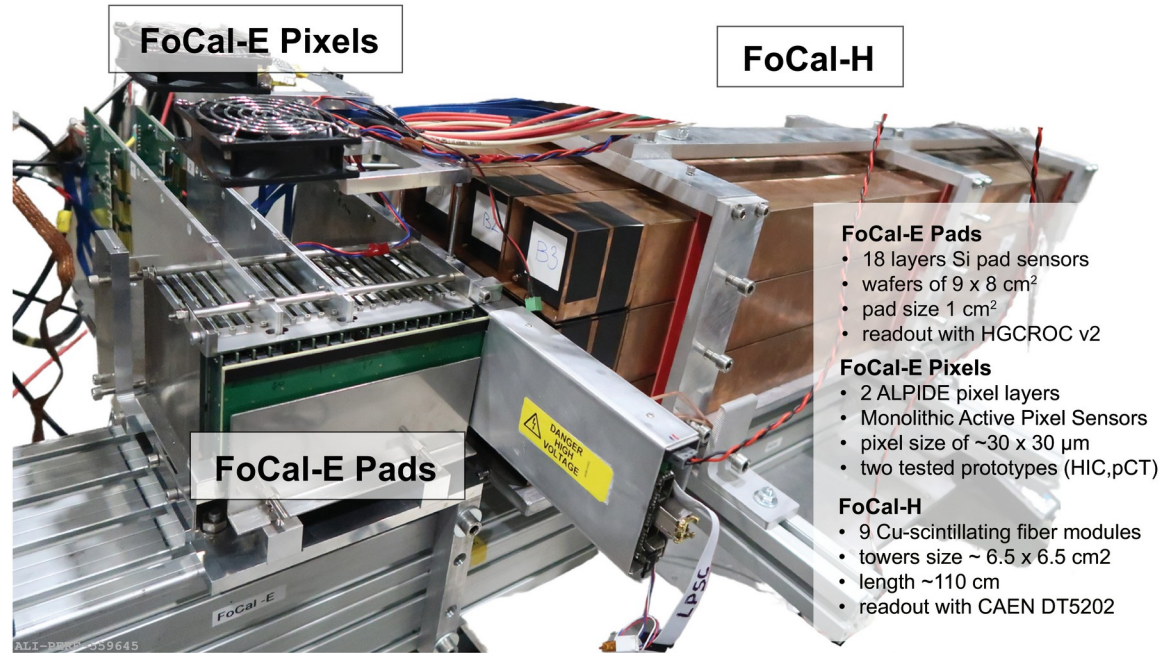
# Определяне на разделителна способност по енергия с данните от ноември 2022

- Получените разпределения по реконструиран заряд са апроксимирани с гаусова функция
- От фита са взети параметрите на средна стойност и стандартно отклонение
- Построени са получените зависимости



# Валидиращ набор на данни май 2023 г.

- CERN SPS NA H2
- FoCal-H P2 с 4 платки CAEN DT5202

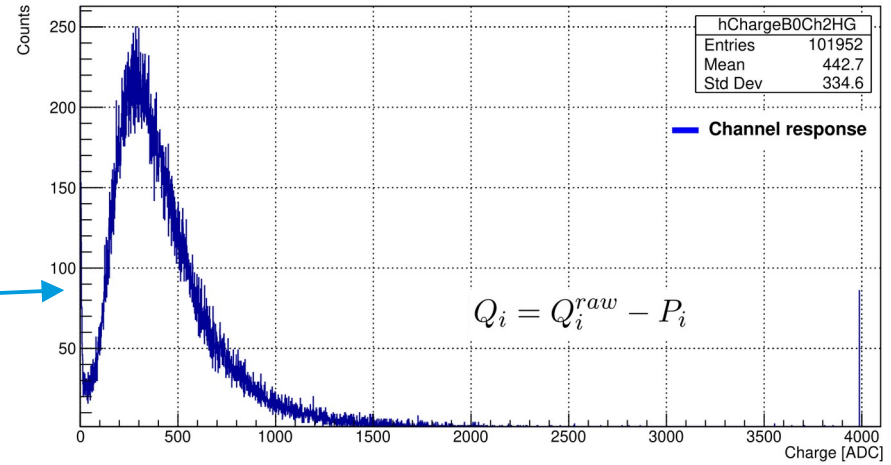
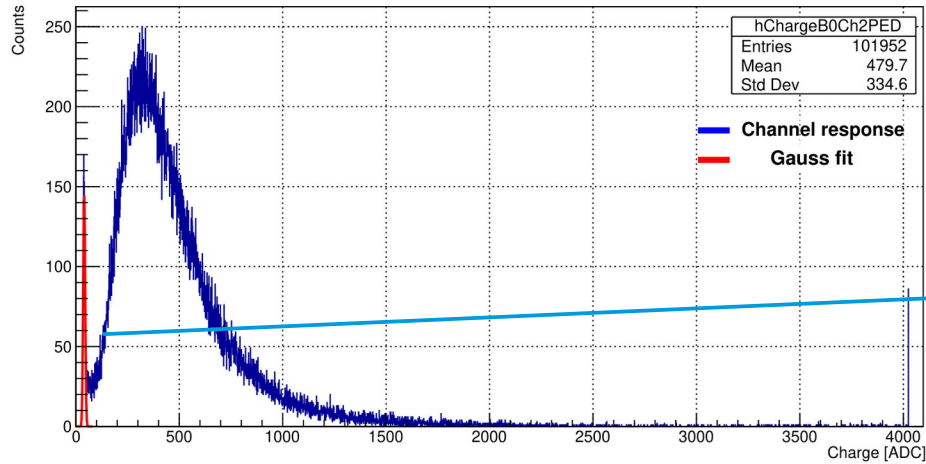


- FoCal-E Pads**
  - 18 layers Si pad sensors
  - wafers of 9 x 8 cm<sup>2</sup>
  - pad size 1 cm<sup>2</sup>
  - readout with HGCROC v2
- FoCal-E Pixels**
  - 2 ALPIDE pixel layers
  - Monolithic Active Pixel Sensors
  - pixel size of ~30 x 30  $\mu$ m
  - two tested prototypes (HIC,pCT)
- FoCal-H**
  - 9 Cu-scintillating fiber modules
  - towers size ~ 6.5 x 6.5 cm<sup>2</sup>
  - length ~110 cm
  - readout with CAEN DT5202

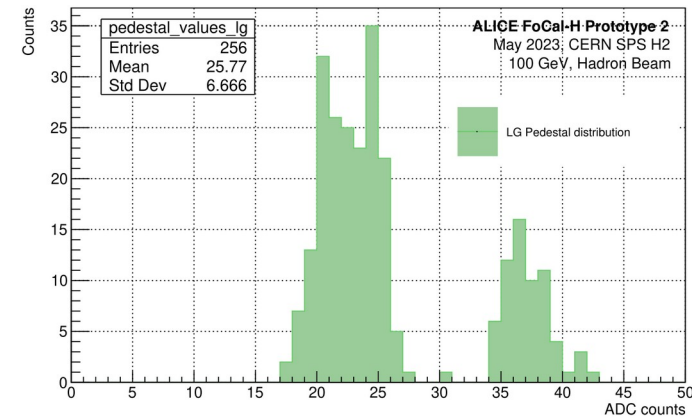
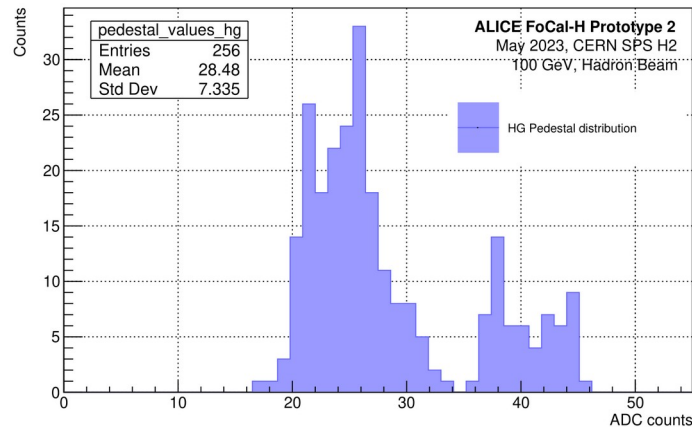
Енергия на снопа от 60 до 350 GeV за адрони  
Анализ фокусиран върху конфигурация без плочи W



# Отстраняване на пиедестали



- Фитиране в широк диапазон с гаусова функция (10 – 70 ADC)
- Фитиране в  $\mu \pm 2\sigma$



# Софтуер за апроксимации

- Много стъпков алгоритъм
- Фитиране с гаус в широк интервал
- Фитиране с гаус в интервал  $\mu \pm 2\sigma$
- Фитиране с гаус или crystal ball функция в избран интервал
- Зависимостта от избора на фит – систематика

$$f(x; \alpha, n, \bar{x}, \sigma) = N \cdot \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right), & \text{for } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} > -\alpha \\ A \cdot (B - \frac{x-\bar{x}}{\sigma})^{-n}, & \text{for } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases}$$

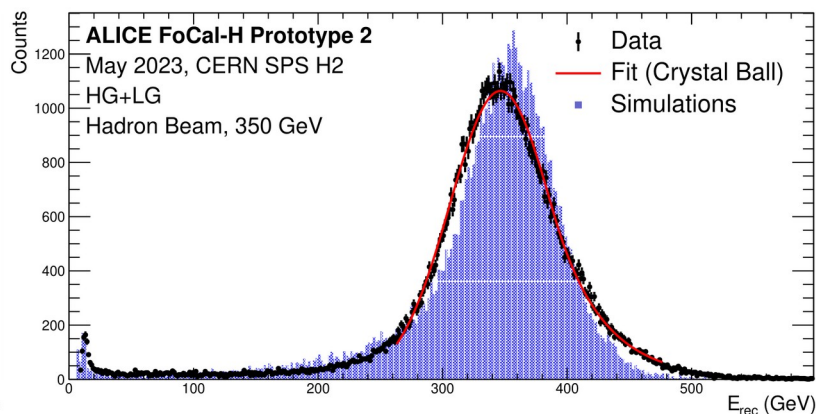
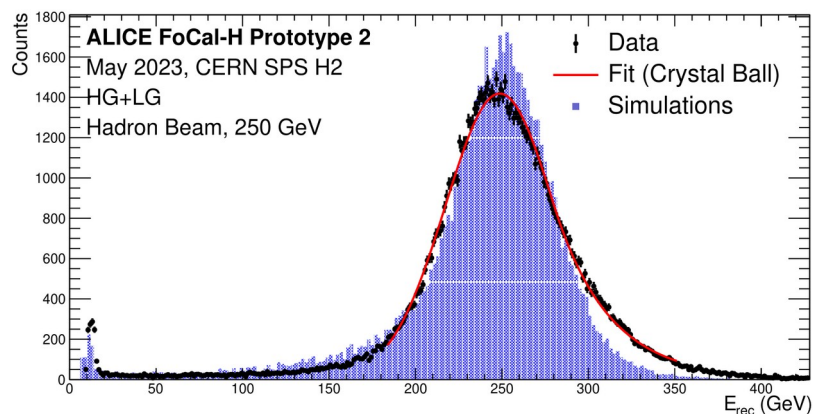
$$A = \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{2}\right),$$

$$B = \frac{n}{|\alpha|} - |\alpha|,$$

$$N = \frac{1}{\sigma(C+D)},$$

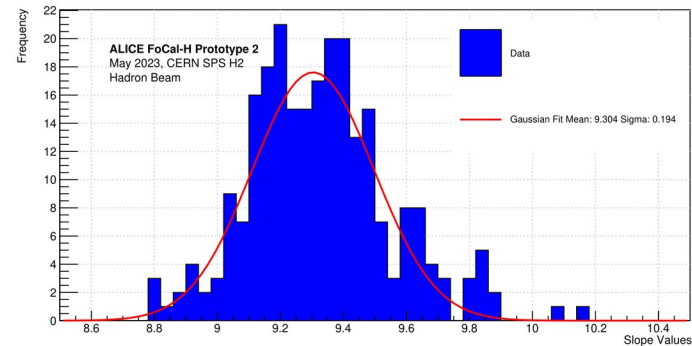
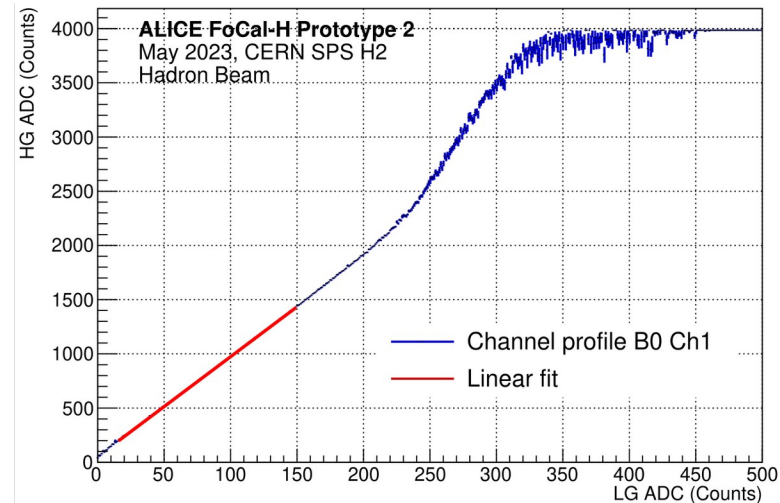
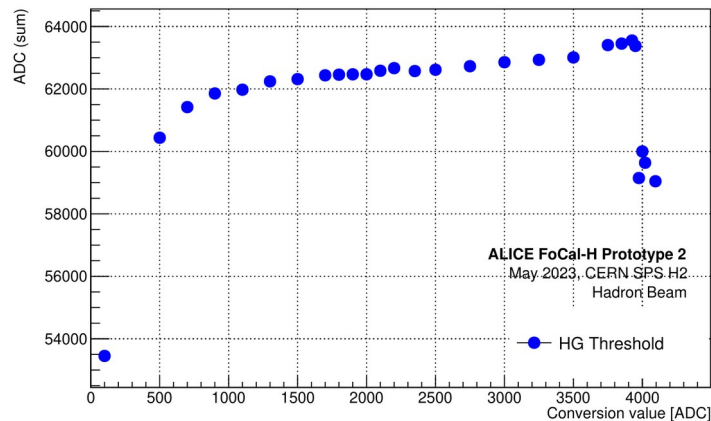
$$C = \frac{n}{|\alpha|} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{2}\right),$$

$$D = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{|\alpha|}{\sqrt{2}}\right)\right).$$



# Изследване на ефекта на насищане

- Разработване на метод за възстановяване на заряд
- Изследване на конверсионна стойност
- Тест на метода

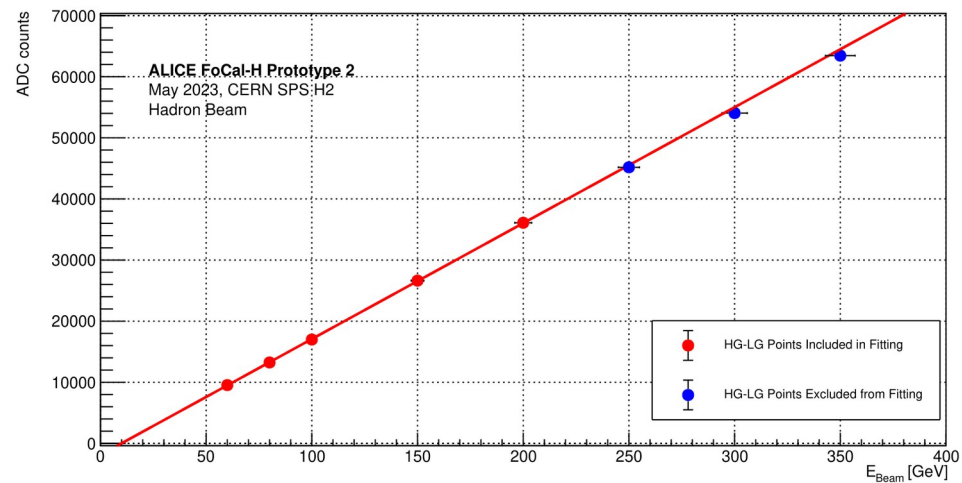
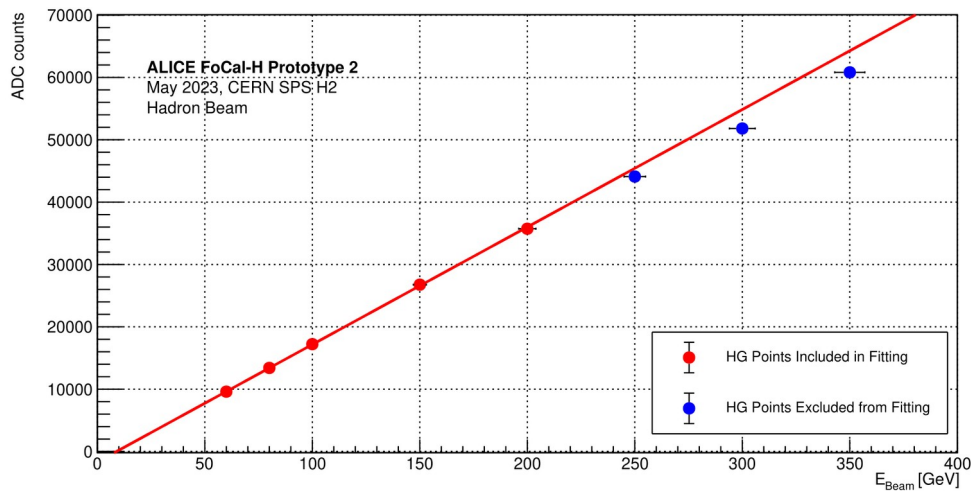
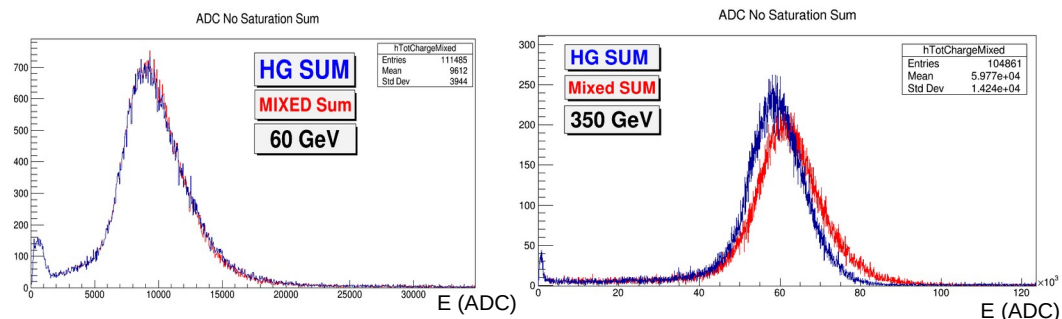


$$Q^{HG} = \begin{cases} Q^{HG}, & \text{ако стойността на } Q^{HG} < Q_{thresh}^{HG} \\ f(Q^{LG}), & \text{ако стойността на } Q^{HG} > Q_{thresh}^{HG}, \text{ където } f(Q^{LG}) = aQ^{LG} + b. \end{cases}$$



# Изследване на ефекта на насищане

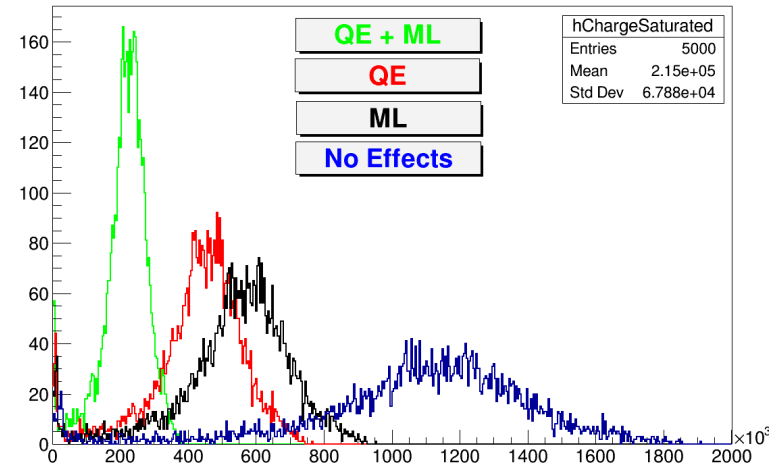
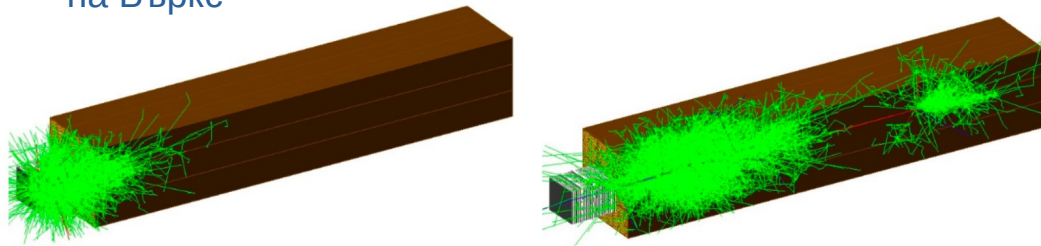
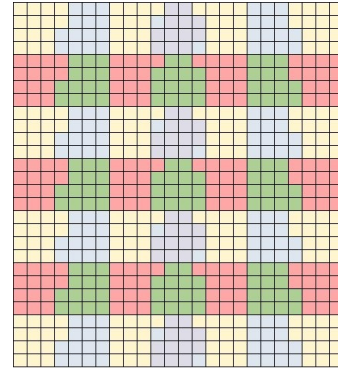
- Построяване на зависимостта на реконструиран заряд от енергия на снопа
- Валидация на метода на смесване на заряда
- Повишаване на събрания заряд с  $\sim 7\%$  при 350 GeV



# Монте Карло

- Изследвани ефекти
- 8000 фотона на MeV, BCF 12
- Затихване на светлина – брой фотони коригиран с  $e^{-(\Delta L/\Lambda)}$ ,  $L$  – разстояние до позицията на депозиране,  $\Lambda = 2.7$  m
- Загуби заради среда – влакно/SiPM 0.5m (ML)
- Ефективност за регистрация на фотони (QE) – 40%
- Отчетени още – ъгъл на ПВО, фотони придвижващи само една посока на влакно (2.5%)
- Поасоново разпределение
- Корекция на депозираната енергия в сцинтилатора според закона на Бъркс

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{\left(1 + k_B \cdot \frac{dE}{dx}\right)}$$



# Параметризация на Атертън

PRECISE MEASUREMENTS OF PARTICLE PRODUCTION  
BY 400 GeV/c PROTONS ON BERYLLIUM TARGETS

H.W. Atherton, C. Bovet, N. Doble, G. von Holtey, L. Piemontese,  
A. Placci, M. Placidi, D.E. Plane, M. Reinharz and E. Rossa

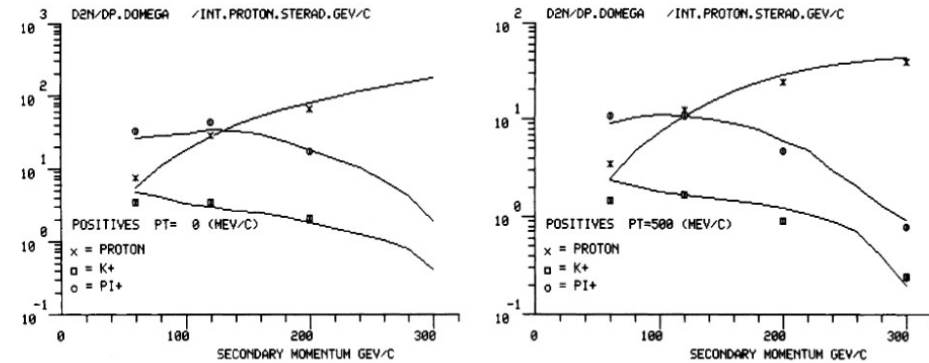
$$\frac{d^2N}{dpd\Omega} = A \left[ \frac{B}{p_0} e^{-Bp/p_0} \right] \left[ \frac{2Cp^2}{2\pi} e^{-C(p/p_0)^2} \right]$$

$$\frac{d^2N}{dpd\Omega} = A \left[ \frac{(B+1)}{p_0} \left( \frac{p}{p_0} \right)^B \right] \left[ \frac{2Cp^2}{2\pi} e^{-C(p/p_0)^2} \right]$$

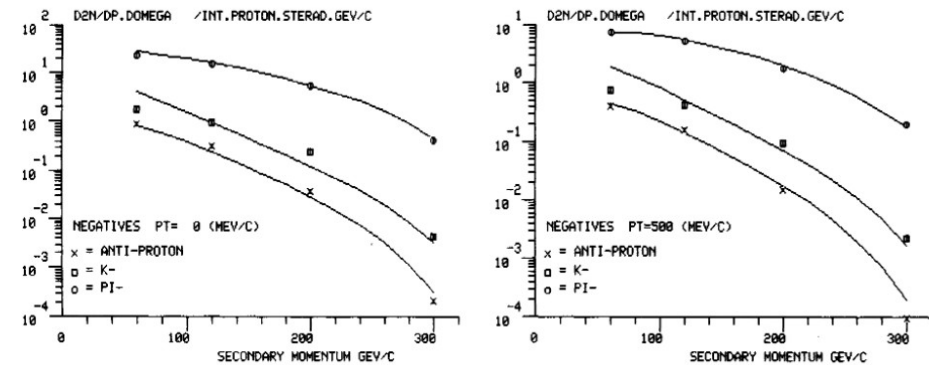
	A	B	C
$\pi^+$	1.2	9.5	5.0
$\pi^-$	0.8	11.5	5.0
$K^+$	0.16	8.5	3.0
$K^-$	0.10	13.0	3.5
$\bar{p}$	0.06	16.0	3.0

	A	B	C
p	0.8	-0.6	3.5

Fig. 10 Empirical formulae used to simulate the production results, compared to the measurements of p-Be collisions



a) Positives



b) Negatives

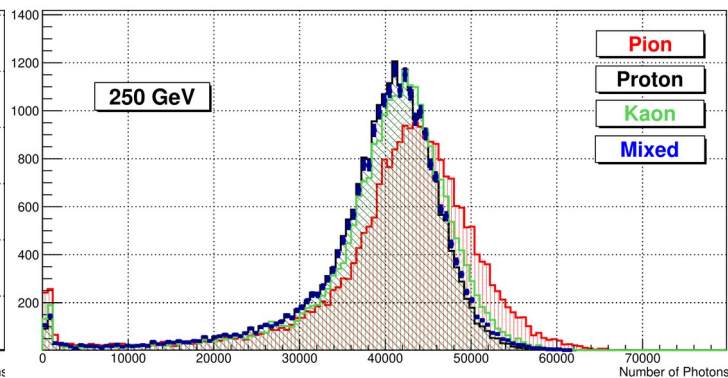
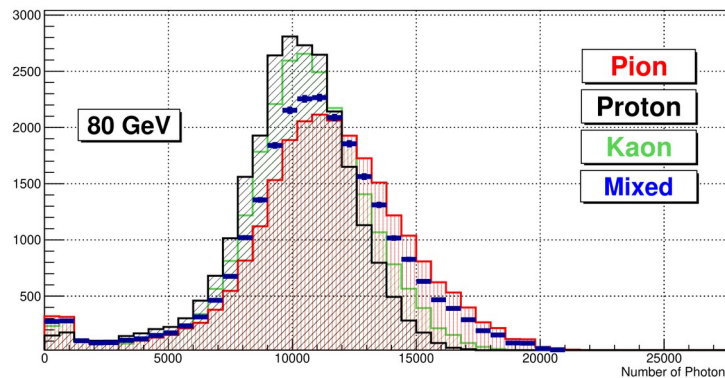
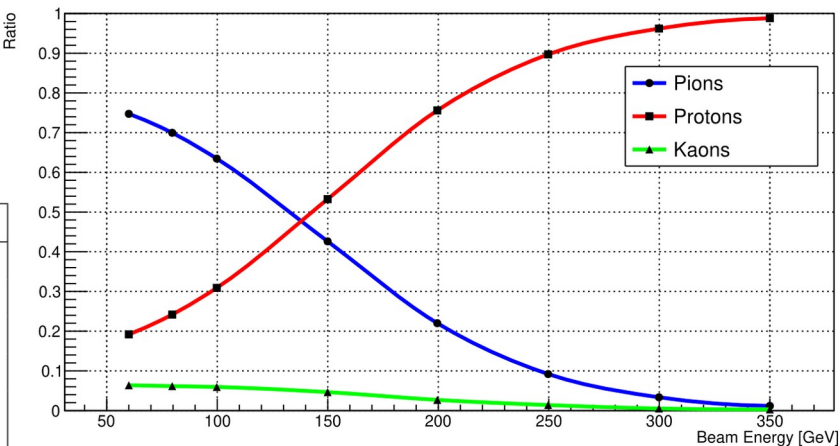
# Прилагане на метода в действие

- Симулации с равен брой събития с енергия на снопа в интервала 60 – 350 GeV
- Получени са отношенията на частиците за всяка енергия
- При ниски енергии ( $E < 120$  GeV) пионите са водещи, докато при  $E > 200$  GeV снопът е съставен предимно от протони

$$\frac{d^2 N}{dp d\Omega} = A \left[ \frac{(B+1)}{p_0} \left( \frac{p}{p_0} \right)^B \right] \left[ \frac{2Cp^2}{2\pi} e^{-C(p\theta)^2} \right]$$

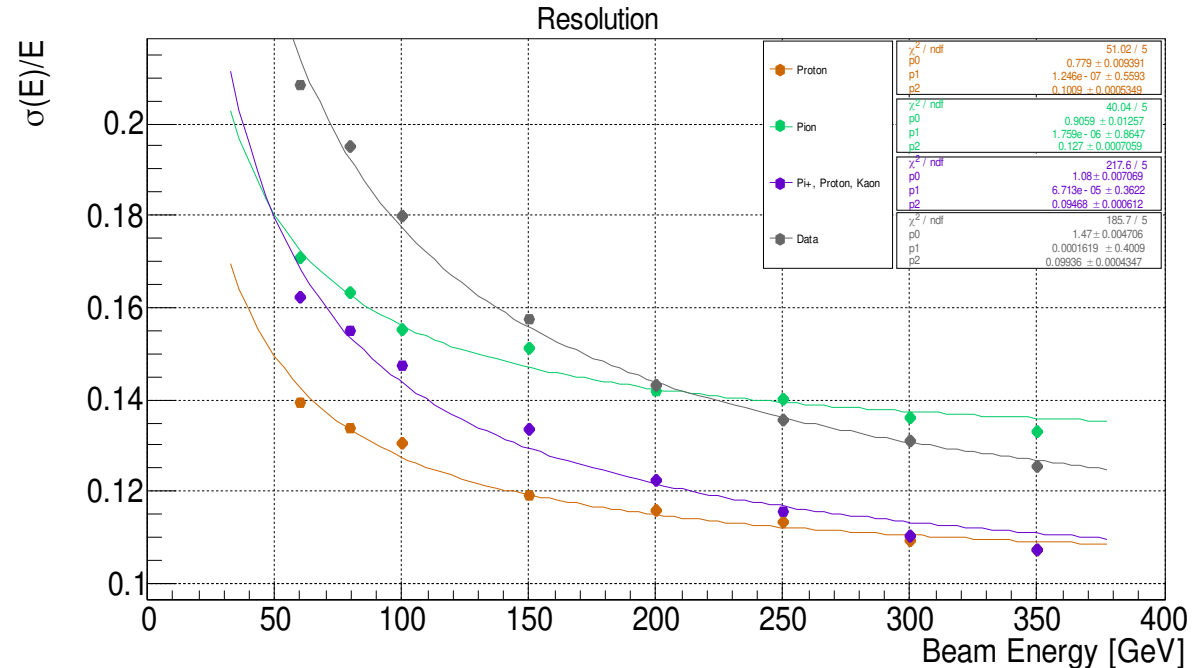
$$\frac{d^2 N}{dp d\Omega} = A \left[ \frac{B}{p_0} e^{-B \frac{p}{p_0}} \right] \left[ \frac{2Cp^2}{2\pi} e^{-C(p\theta)^2} \right],$$

Частича	A ( $GeV^{-2}$ )	B	C ( $GeV^{-2}$ )
p	0.8	-0.6	3.5
$\bar{p}$	0.06	16.0	3.0
$\pi^+$	1.2	9.5	5.0
$\pi^-$	0.8	11.5	5.0
$K^+$	0.16	8.5	3.0
$K^-$	0.10	13.0	3.5



# Една малка частица за човека...

- смесени (по частица...) разпределения по реконструиран брой фотони
- Получаване на разделителни способности
- Съставът на снопа е определящ!

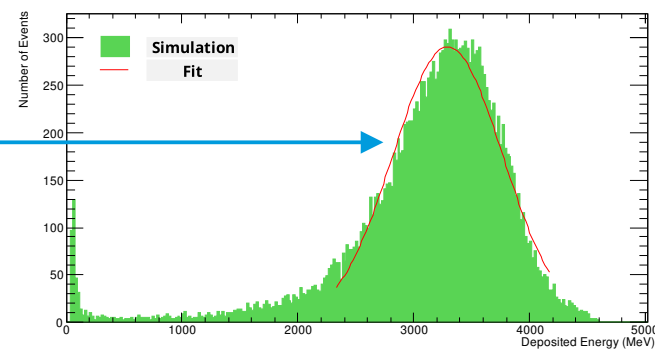
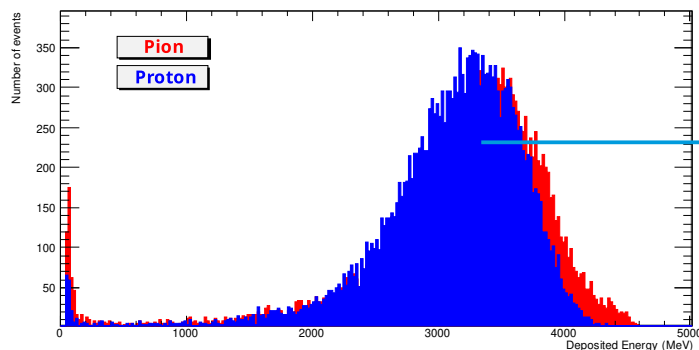
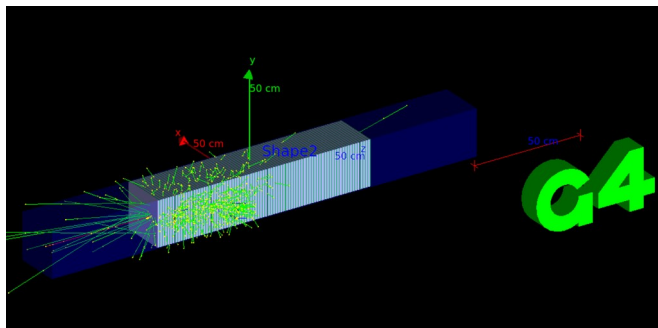
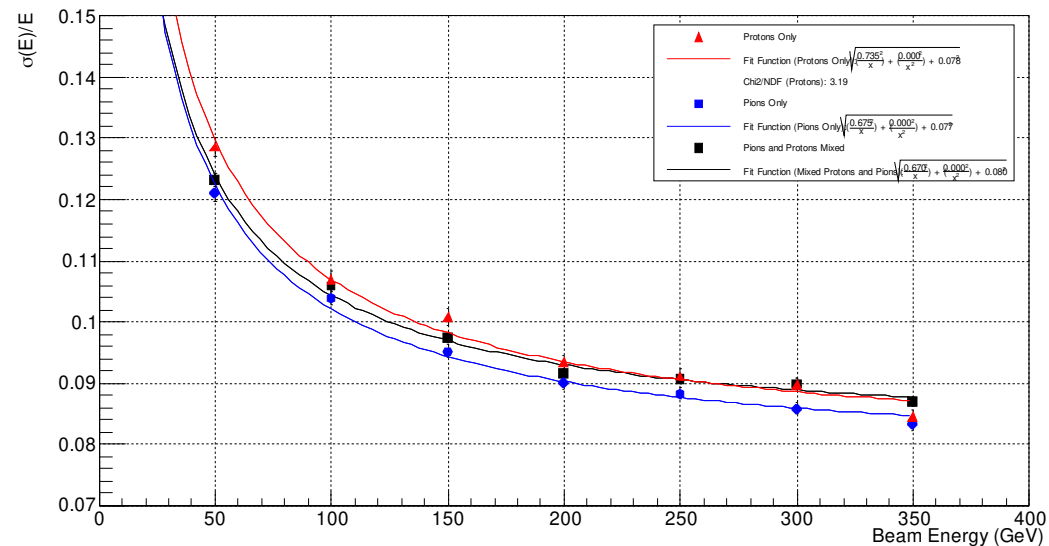


$$\frac{\sigma E}{E} = \frac{\sigma_{\text{stoch.}}}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus \sigma_{\text{const.}} \oplus \frac{\sigma_{\text{noise}}}{E/\text{GeV}}$$

Една голяма крачка за анализа...

# Нещо повече

- Metal hAdronic Calorimeter (MACA)
- 1 м дължина, 100 плочи, променливи отношения сцинтилатор/абсорбер
- Сандвич тип калориметър
- Отново сходен резултат!



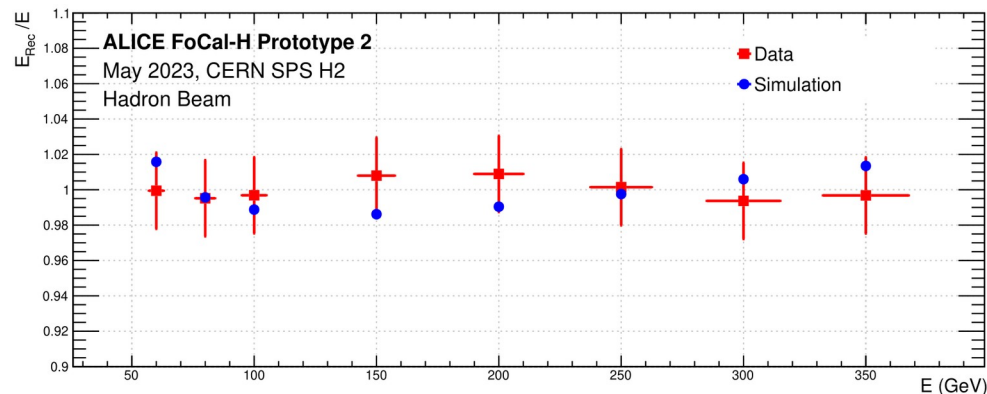
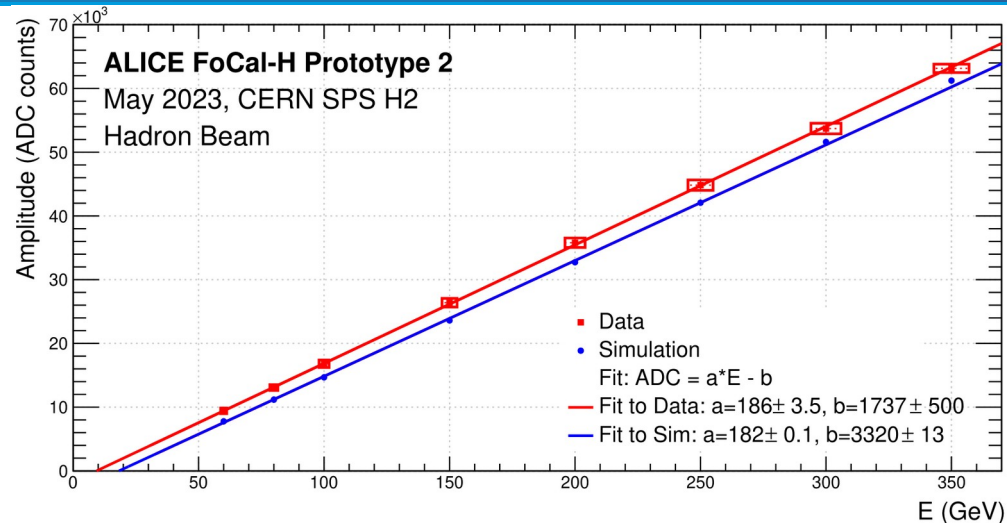
# Реконструирана сума на заряд

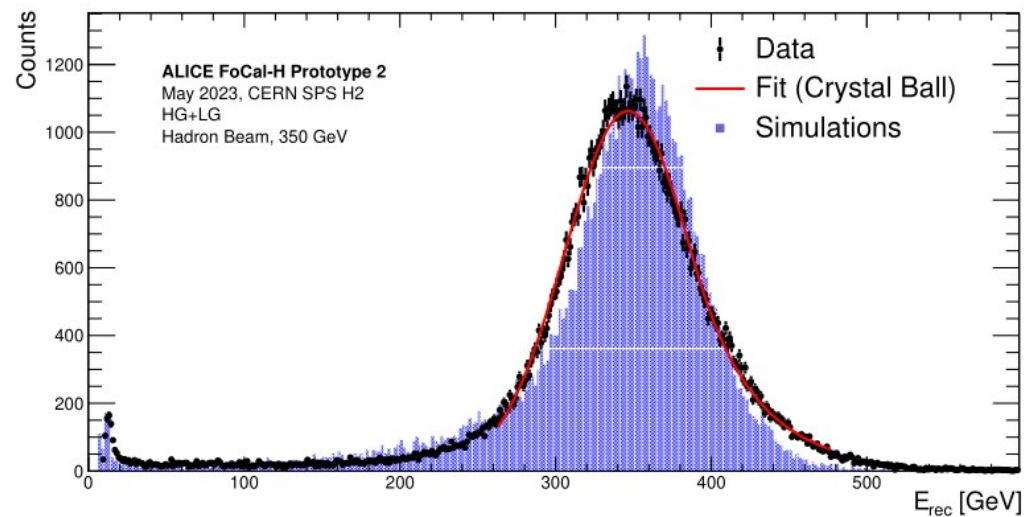
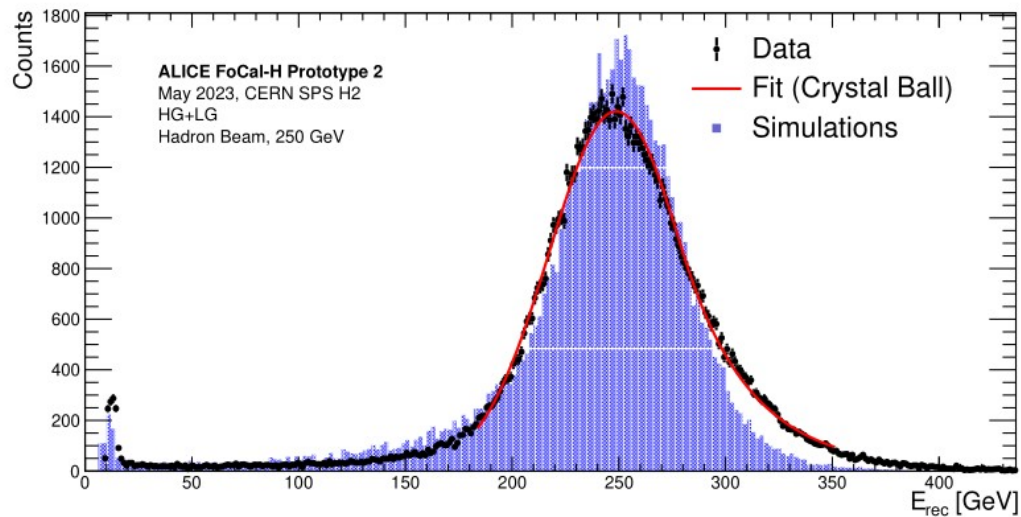
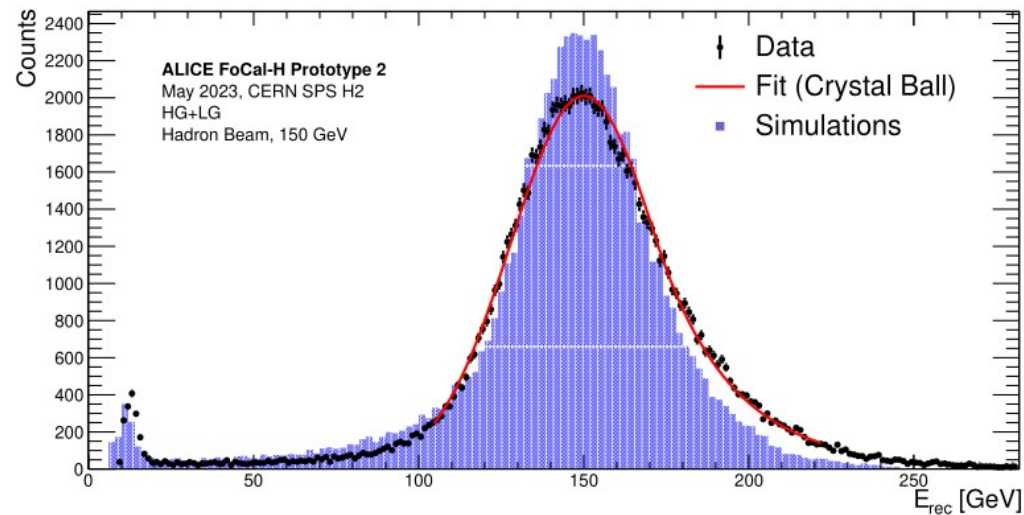
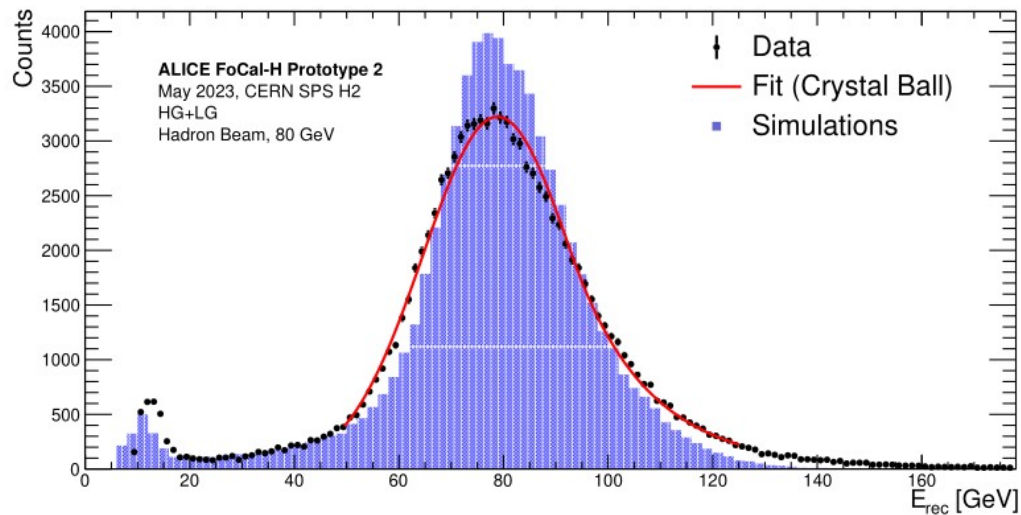
- Систематикки:
  - Употреба на гаус/crystal ball
  - Праг на конверсия
  - Граници на фита  $\mu \pm n\sigma$ ,  
 $n = 1, 2, 3$  (разлики  $Q_{\max} - Q_{\min}$ )

$$a = 186 \pm 3.5 \quad b = 1737 \pm 500$$

$$a = 182 \pm 0.1 \quad b = 3320 \pm 13$$

$$E = \frac{Q_{tot}^{mix} - b}{a} \quad \delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \delta b\right)^2}$$







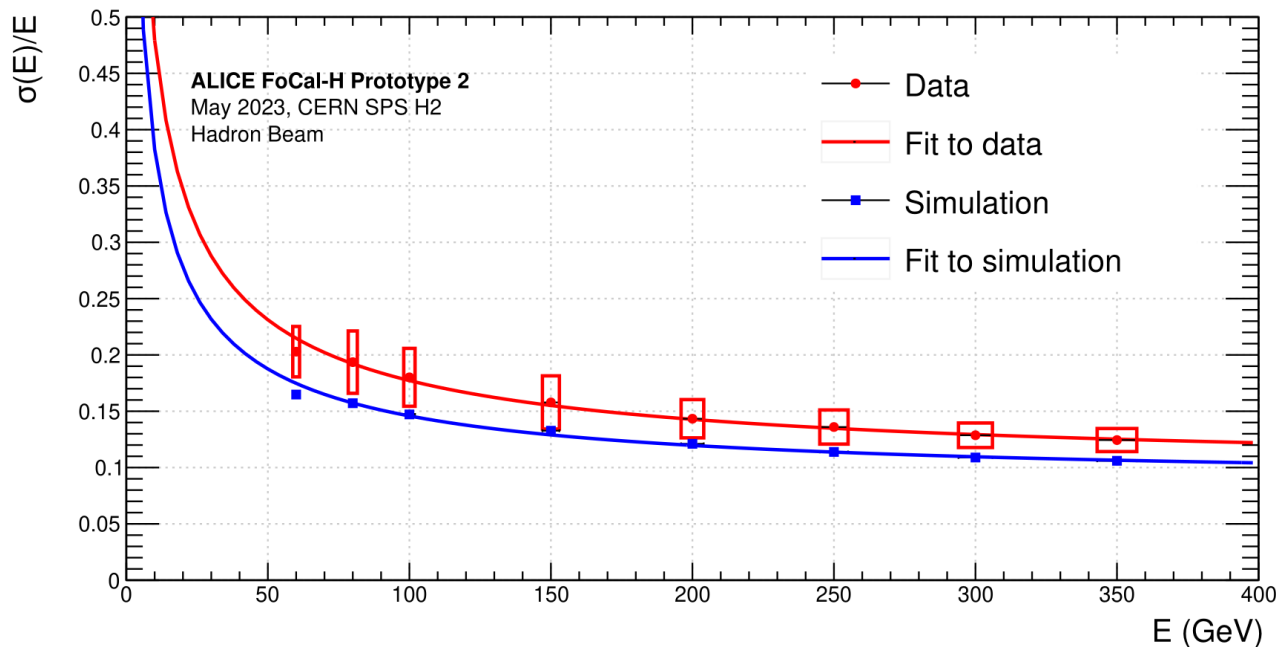
# Разделителна способност

Systematic effect	$\Delta a$	$\Delta c$
Fit range	0.02	0.001
Line shape	0.10	0.005
HG-LG matching	0.05	0.003
Gain choice	0.20	0.002
Global energy scale	0.04	0.003
Total (added in quadrature)	0.22	0.007

$$\sigma_{\text{stoch.}} \equiv a = (148 \pm 2_{\text{stat}} \pm 22_{\text{syst}})\%$$

$$\sigma_{\text{const.}} \equiv c = (10.0 \pm 0.13_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{syst}})\%$$

- $\sigma \sim 10\%$  е определящ при високи енергии  
Тази стойност отговаря на изискванията  
на експеримента и валидира  
технологията на FoCal-H!



$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{\sigma_{\text{stoch.}}}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus \sigma_{\text{const.}} \oplus \frac{\sigma_{\text{noise}}}{E/\text{GeV}}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{FWHM/2.355}{\mu}$$

# Заклучение

- Планираният ъпгрейд на експеримента ALICE включва инсталирането на нов калориметър за малки ъгли - FoCal
- Сглобени и тествани успешно са 2 прототипа на адронен калориметър FoCal-H с дизайн от медни тръбички и сцинтилационно влакно
- В рамките на 3 години са извършени множество набори на данни и са изследвани характеристиките на 2 прототипа на FoCal-H
- Разработените софтуери за анализ и симулация спомогнаха за разбирането на ключови детайли за работния режим на детектора
- Получените резултати валидират технологията на детектора
- През 2024 г. Бе даден официален старт на конструирането на детектора FoCal!

# Научни публикации

- **1. Design and Test-Beam Results of the FoCal-H Demonstrator Prototype**  
ALICE Collaboration • **Radoslav Simeonov (Sofiya U.)** for the collaboration. e-Print: 2211.14791 [physics.ins-det] DOI: 10.3390/instruments6040070 Published in: Instruments 6 (2022) 4, 70, Instruments 6 (2022), 70
- **2. The forward calorimeter of the ALICE experiment at CERN LHC**  
ALICE Collaboration • **Radoslav Simeonov (Sofiya U.)** for the collaboration. DOI: 10.1088/1742-6596/2668/1/012007 Published in: J.Phys.Conf.Ser. 2668 (2023) 1, 012007
- **3. Performance of the electromagnetic and hadronic prototype segments of the ALICE Forward Calorimeter**  
M. Aehle (Kaiserslautern U.), J. Alme (Bergen U.), C. Arata (LPSC, Grenoble), I. Arsene (Oslo U.), I. Bearden (Copenhagen U.), **R. Simeonov (Sofia U.)** et al. e-Print: 2311.07413 [physics.ins-det] DOI: 10.1088/1748-0221/19/07/P07006 Published in: JINST 19 (2024) 07, P07006
- **4. Influence of beam content composition on testbeam studies of hadron calorimeters**  
**R. Simeonov (Sofia U. (main))**, V. Kozhuharov (Sofia U. (main)) DOI: 10.1088/1742-6596/2794/1/012002 Published in: J.Phys.Conf.Ser. 2794 (2024) 1, 012002

# Научни приноси

- *Научните и научно-приложните приноси в представения дисертационен труд са както следва:*
- Оценена е работоспособността на адронен калориметър изграден от медни тръбички със сцинтилационни влакна. Това е извършено посредством излагането му на сноп от заредени частици достигащи енергия до 350 GeV
- Предложена е методология за изследвания на сигнали от прототип 1 на адронния калориметър FoCal-H. При нея са разработени два независими метода за калибровка
- Предложена е методология за изследвания на сигнали от прототип 2 на адронния калориметър FoCal-H. Показана е зависимостта на разделителната способност по енергия на калориметъра от състава на снопа частици
- Предложен е метод за възстановяване на заряд от канали, при които е наблюдавано насищане на прилежащата електроника
- Получените резултати в настоящата дисертация верифицират технологията на адронния калориметър FoCal-H и доведоха до официалния старт на конструирането му