

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

Б.С. Ишханов, С.В. Рогожин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КРЕМНИЕВОМУ ВЕРШИННОМУ  
ДЕТЕКТОРУ ЭКСПЕРИМЕНТА CLAS12**

Препринт НИИЯФ МГУ №2011-6/870

Москва, 2011

Б.С. Ишханов, С.В. Рогожин  
e-mail: rogozhin@silab.sinp.msu.ru

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КРЕМНИЕВОМУ ВЕРШИННОМУ ДЕТЕКТОРУ ЭКСПЕРИМЕНТА CLAS12**

Препринт НИИЯФ МГУ №2011-6/870

### Аннотация

Кремниевый вершинный детектор является ключевым элементом модернизации детекторного комплекса экспериментального зала В Лаборатории имени Джефферсона (Jefferson Lab) для проведения эксперимента CLAS12. В настоящей работе описана конструкция кремниевого детектора, проанализированы экспериментальные требования к диапазону углов регистрации, пространственному разрешению и быстродействию; показано, что детектор удовлетворяет этим требованиям.

B.S. Ishkhanov, S.V. Rogozhin  
e-mail: [rogozhin@silab.sinp.msu.ru](mailto:rogozhin@silab.sinp.msu.ru)

## **EXPERIMENTAL REQUIREMENTS FOR THE CLAS12 SILICON VERTEX TRACKER**

Preprint MSU SINP №2011-6/870

### Abstract

The silicon vertex tracker is a key element of the detector complex upgrade for the CLAS12 experiment in Jefferson Lab Hall B. This paper describes the design of the tracker, summarizes the requirements concerning acceptance, spatial resolution and performance. The silicon vertex tracker is shown to fulfill these requirements.

© Б.С. Ишханов, С.В. Рогожин  
© НИИЯФ МГУ, 2011

## Введение

НИИЯФ МГУ активно участвует в эксперименте CLAS, проводимом в Jefferson Lab (Ньюпорт-Ньюс, США) на электронном ускорителе CEBAF с непрерывным пучком энергией 6 ГэВ. В настоящий момент проводится модернизация эксперимента CLAS, получившая название CLAS12. В ходе модернизации энергия пучка будет увеличена с 6 до 12 ГэВ, а светимость возрастёт до  $10^{35}$   $1/с \cdot см^2$ . Значительные изменения претерпит также экспериментальное оборудование.

Ключевым элементом модернизации детектирующей установки эксперимента CLAS12 является кремниевый вершинный детектор, разрабатываемый при участии НИИЯФ МГУ. Детектор (Рис. 1) состоит из цилиндрической и дисковой частей. Цилиндрическая часть представляет собой четыре суперслоя (каждый суперслой – два односторонних микроstriповых кремниевых сенсора, составленные «спина к спине») радиусами 5, 8, 12 и 16 см, состоящие из 8, 12, 18 и 24 секторов, соответственно. Дисковая часть состоит из трёх суперслоёв, расположенных на расстояниях 23,8, 25,3 и 26,8 см от мишени. Внешний радиус дисков – 18,8 см, внутренний – 2,3 см. Каждый диск разделён на двадцать два сектора.

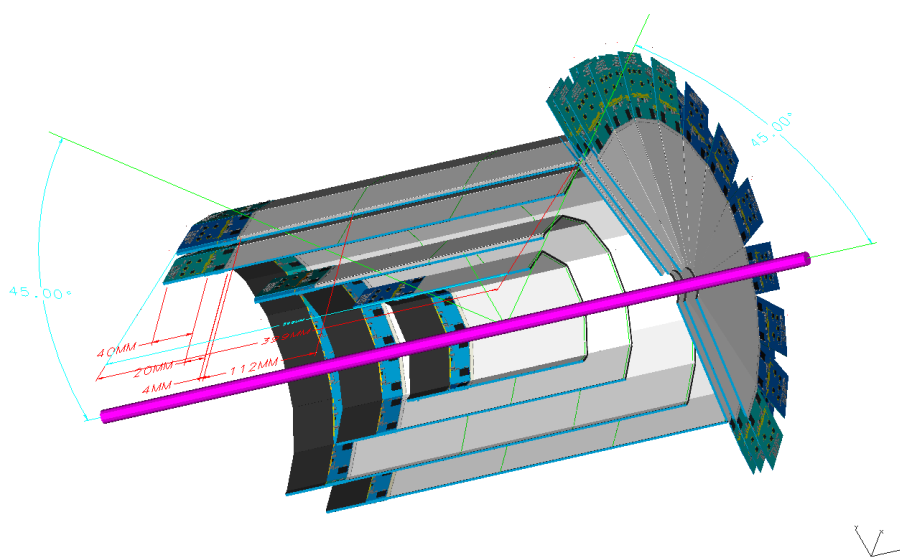


Рис. 1. Кремниевый вершинный детектор.

Детектор составлен из типовых односторонних кремниевых сенсоров толщиной 300 мкм с шагом считывания 150 мкм. Основные требования, которым должен удовлетворять кремниевый вершинный детектор, таковы:

- Возможность регистрации продуктов реакции в широком диапазоне полярных углов для наблюдения эксклюзивных реакций
- Обеспечение приемлемого координатного разрешения для точного определения импульсов частиц

- Достаточное быстродействие для работы при ожидаемых высоких нагрузках
- В этой работе проведён анализ всех изложенных требований.

## Характеристики кремниевого вершинного детектора

### 1. Диапазон углов регистрации

Кремниевый вершинный детектор способен детектировать заряженные частицы в диапазоне полярных углов от  $5^\circ$  до  $135^\circ$  в лабораторной системе координат. Углы от  $5^\circ$  до  $35^\circ$  перекрывает дисковая часть; углы от  $35^\circ$  до  $135^\circ$  – цилиндрическая. Моделирование показывает, что большой диапазон углов необходим для наблюдения эксклюзивных реакций, т.к. часть продуктов реакции регистрируется в задней полусфере.

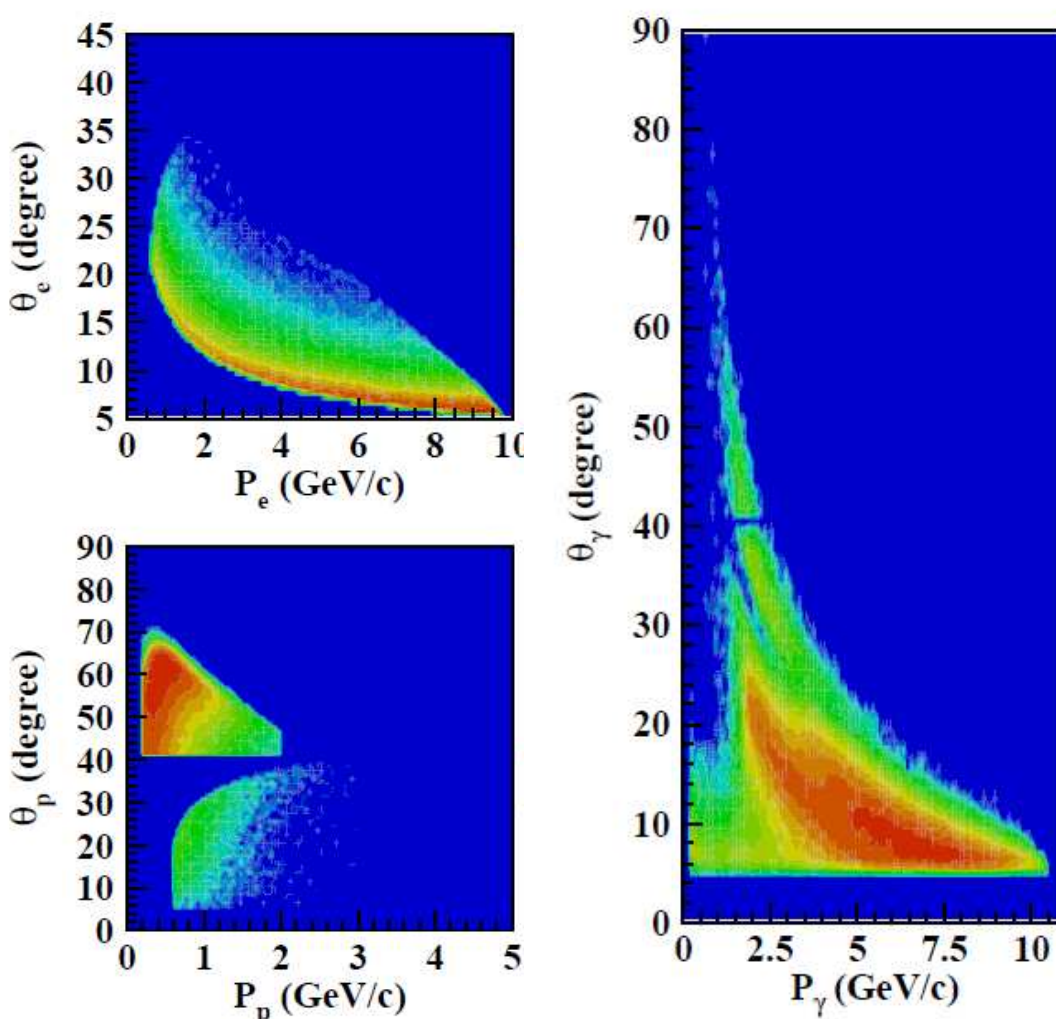


Рис. 2. Углы вылета и импульсы электронов, протонов и гамма-квантов.

В [1] приведена модель реакции глубоковиртуального комптоновского рассеяния  $ep \rightarrow e\gamma p$  при энергии пучка 11 ГэВ. Как показано на Рис. 2, большинство рассеянных электронов и рождённых гамма-квантов с большими импульсами будут регистрироваться в передней части детектора, в то время как протоны отдачи с импульсом порядка 1 ГэВ/с в основном попадают в детекторы цилиндрической части.

В [2] сделан расчёт реакции глубоковиртуального рождения мезона  $ep \rightarrow ep\pi^0$  в диапазоне  $Q^2$  от 1 ГэВ до 10 ГэВ. Получено (Рис. 3), что большинство протонов отдачи имеют импульс около 1 ГэВ/с и вылетают под полярным углом около  $50^\circ$ . На графике учтён нечувствительный зазор между дисковой и цилиндрической частями детектора.

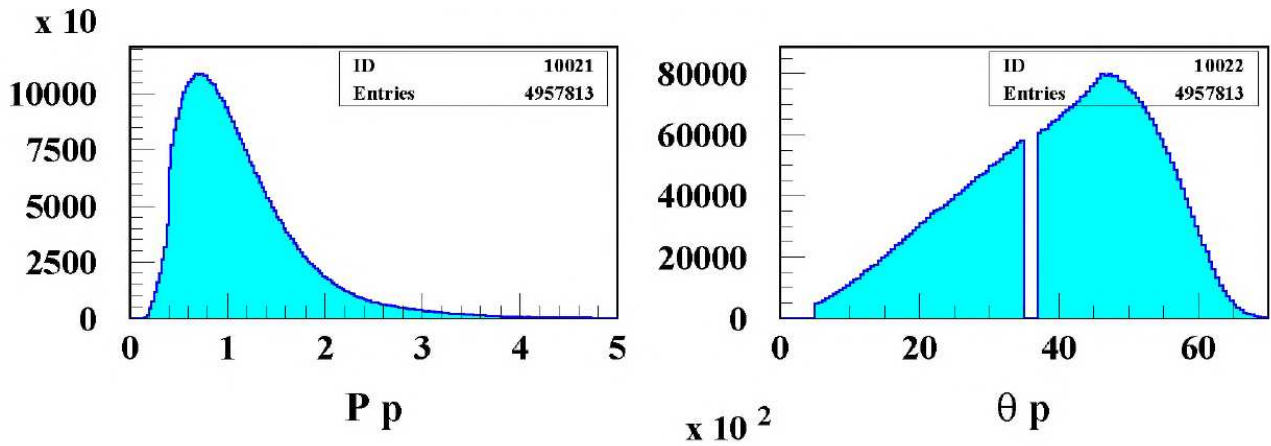
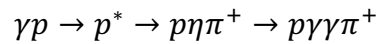


Рис. 3. Распределение протонов по импульсу и углу вылета в реакции  $ep \rightarrow ep\pi^0$ .

В [3] проведено моделирование реакции возбуждения протона с последующим рождением двух мезонов и распадом  $\eta$ -мезона на два гамма-кванта при энергии пучка 11 ГэВ:



Сплошными линиями на Рис. 4 представлено распределение рождённых частиц, пунктирными – детектированных, точками – частиц, принадлежащих к полностью восстановленным событиям. На распределении  $\pi^+$  опять же виден зазор между цилиндрической и дисковой частями детектора; значительная часть  $\pi^+$  регистрируется в полярных углах более  $35^\circ$ .

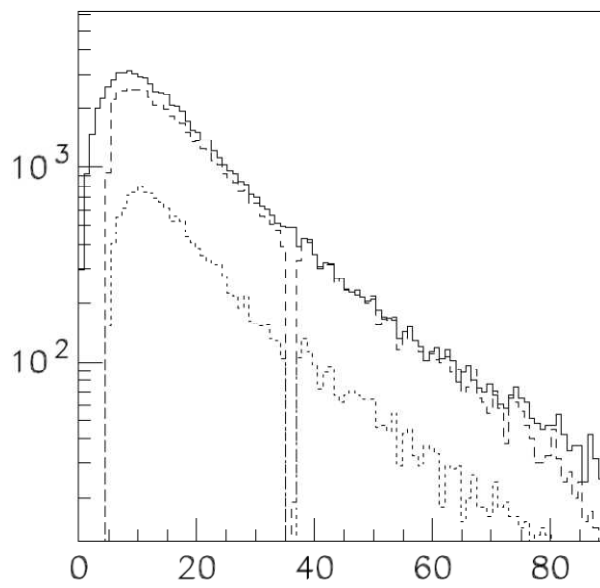
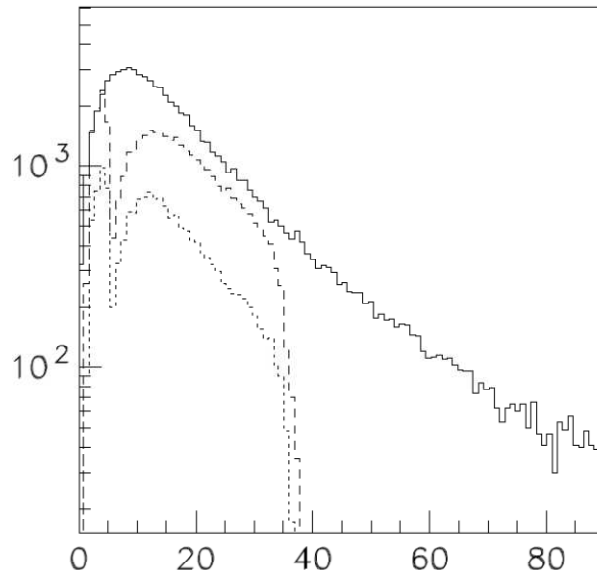
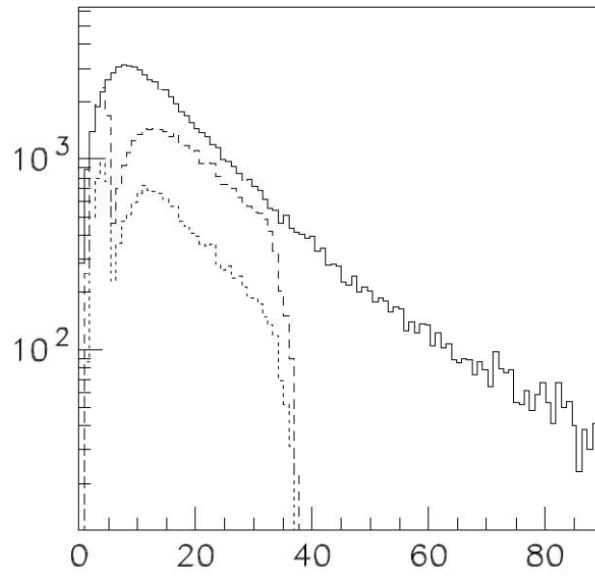


Рис. 4. Распределение по углам вылета  $\theta_{\gamma_1}, \theta_{\gamma_2}, \theta_{\pi^+}$  в реакции  $\gamma p \rightarrow p^* \rightarrow p \eta \pi^+ \rightarrow p \gamma \pi^+$ .

## 2. Пространственное и импульсное разрешение

Нижняя граница координатного разрешения детектора определяется многократным рассеянием в материале сенсоров. Среднеквадратичный угол рассеяния  $\theta$  определяется по расчётной формуле

$$\sqrt{\theta^2} = \sqrt{0,157 \frac{Z(Z+1)}{A} \frac{z^2 x \rho}{(pv)^2} \ln \left( 1,13 \cdot 10^4 \frac{Z^{4/3}}{A} \frac{z^2 x \rho}{\beta^2} \right)},$$

где  $\rho$  - плотность вещества (для кремния  $\rho = 2,33$  г/см<sup>3</sup>),  $x$  - путь, пройденный в нём частицей, в сантиметрах, произведение  $pv$  выражено в МэВ,  $z$  - заряд частицы в единицах заряда электрона,  $A$  и  $Z$  – атомная масса в а.е.м. и заряд ядра, соответственно. Как видно из формулы, угол рассеяния преимущественно определяется импульсом частицы. Отклонение рассеянного электрона или заряженного мезона с импульсом 5 ГэВ/с после прохождения слоя кремния толщиной 600 мкм составит  $2,7 \cdot 10^{-4}$  рад - или в среднем ошибку определения координаты порядка 15 мкм. Для протона отдачи с импульсом 1 ГэВ/с 600 мкм кремния будут вносить погрешность  $1,4 \cdot 10^{-3}$  рад, что соответствует погрешности в определении координаты порядка 100 мкм.

В кремниевом вершинном детекторе используются сенсоры с шагом считывания 150 мкм, что соответствует разрешению около 40 мкм. Таким образом, разрешение сенсоров достаточно хорошо согласуется с вносимыми многократным рассеянием погрешностями. Пространственное разрешение связано с импульсным разрешением формулой:

$$\frac{\delta P}{P} = \frac{27 \delta S P}{L^2 B},$$

где  $L$  - длина (в метрах) дуги или, соответственно, траектории частицы в детекторе,  $B$  - величина магнитного поля в Тесла, импульсы – в ГэВ/с. При поле 5 Тл, длине траектории 20 см и пространственном разрешении 100 мкм разрешение по импульсу частицы составит 0,5%. Это подтверждает моделирование [4] (Рис. 5-7). Точность определения импульса протона и пионов в реакции  $ep \rightarrow ep\pi^+\pi^-$  при энергии электронного пучка от 5 до 10 ГэВ. Импульсное разрешение для протонов составляет 1,4%, для пионов 1-1,5% вне зависимости от импульса.

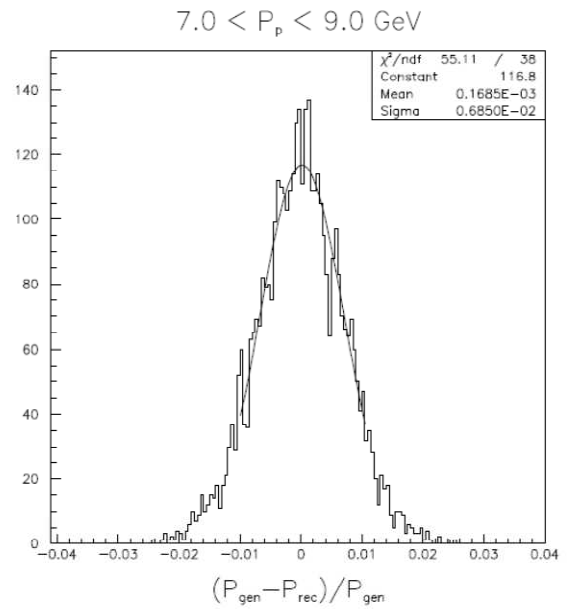
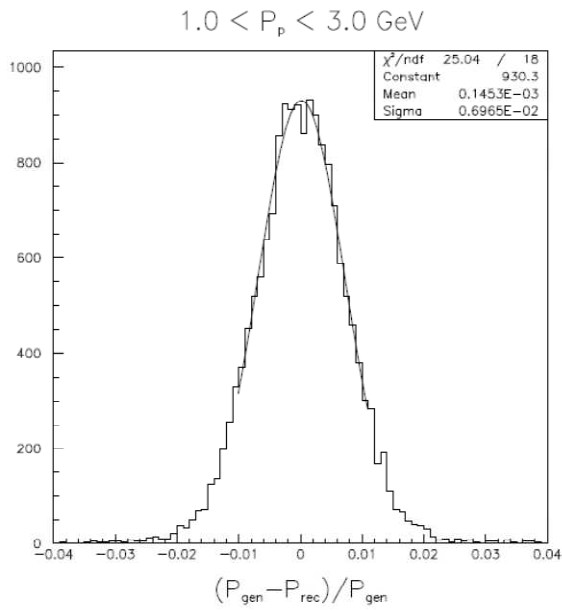


Рис. 5. Погрешность определения импульса протона.

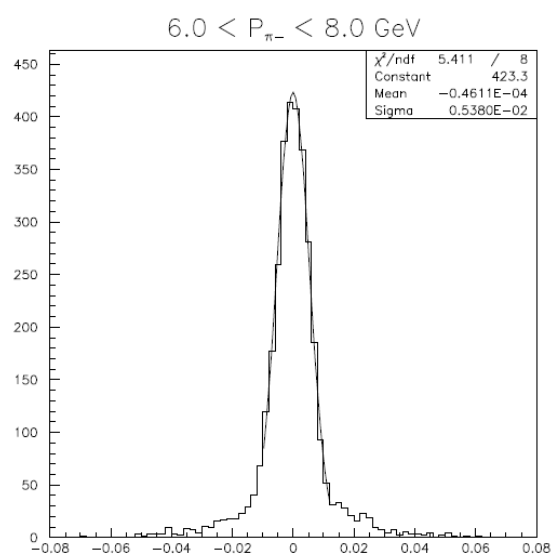
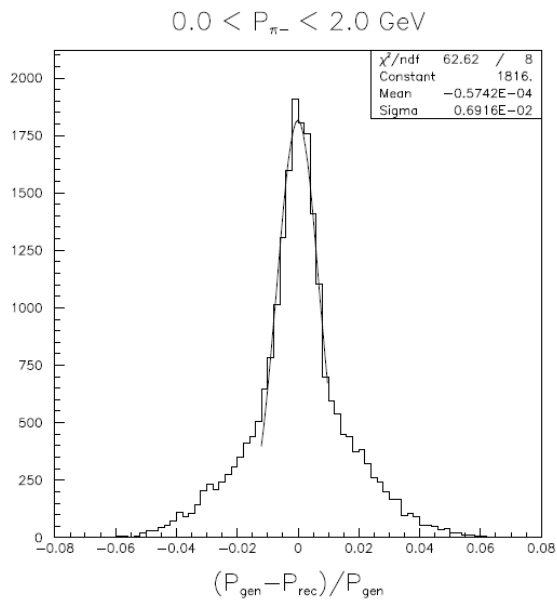


Рис. 6. Погрешность определения импульса  $\pi^-$ -мезона.



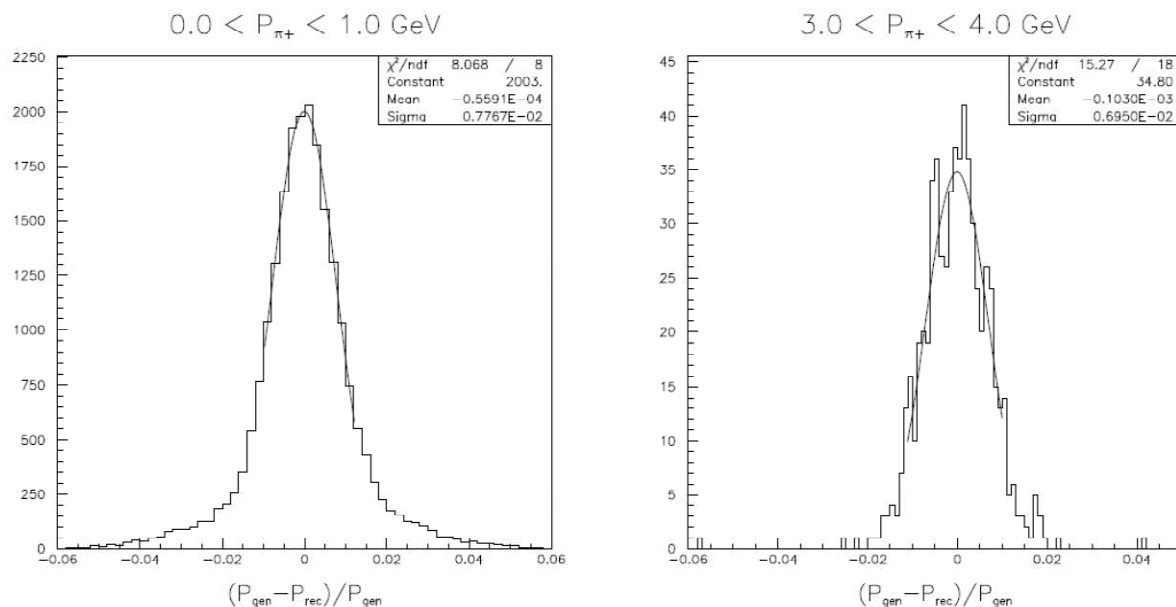


Рис. 7. Погрешность определения импульса  $\pi^+$ -мезона.

В [3] проведено моделирование точности восстановления азимутального и полярного углов для рассеянных электронов с энергией от 50 МэВ до 5 ГэВ. Полученные значения:  $2,9^\circ$  для  $\varphi$  и 1,7% для  $\theta$  (Рис. 8).

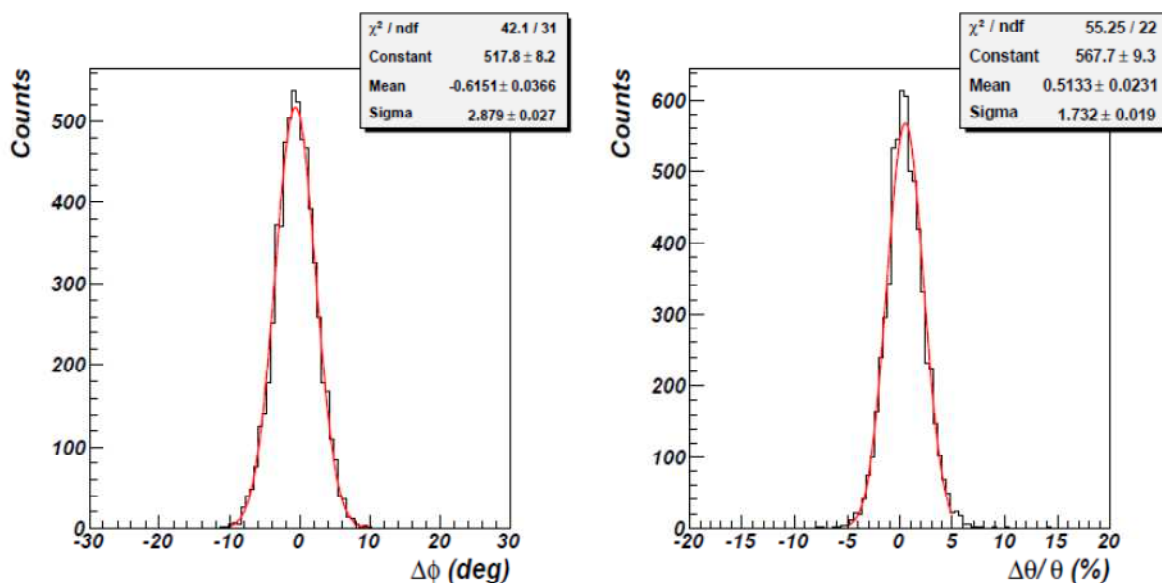


Рис. 8. Погрешность определения азимутального (слева) и полярного (справа) углов рассеяния электронов.

### 3. Быстродействие

С учётом повышения светимости до  $10^{35}$   $1/\text{с} \cdot \text{см}^2$  важным становится вопрос быстродействия. Было проведено моделирование [5] загрузок при нижнем пороге регистрации 20 кэВ (Табл. 1). Моделирование проведено для предыдущей конструкции детектора, в которой было только три цилиндрических суперслоя; в таблице приведены загрузки для шести цилиндрических и шести дисковых слоёв от внутреннего (1-1) до

внешнего (3-2). Моделирование проводилось для максимальной светимости  $10^{35}$   $1/c \cdot \text{см}^2$  и при полной величине магнитного поля (5 Тл).

Слой	Общая нагрузка (МГц)	Адронная нагрузка (МГц)
Цилиндр 1-1	3,69	2,71
Цилиндр 1-2	3,57	2,58
Цилиндр 2-1	4,94	3,21
Цилиндр 2-2	4,57	2,94
Цилиндр 3-1	5,19	3,21
Цилиндр 3-2	4,75	2,95
Диск 1-1	7,95	3,68
Диск 1-2	5,44	3,55
Диск 2-1	5,99	3,42
Диск 2-2	5,27	3,30
Диск 3-1	5,63	3,22
Диск 3-2	5,23	3,15

Табл. 1. Загрузки в различных слоях кремниевого вершинного детектора.

Внутренний слой детектора состоит из 8 сенсоров, каждый из которых считывается двумя микросхемами, таким образом, ожидаемые загрузки составляют менее мегагерца на микросхему. Используемые микросхемы FSSR2 архитектуры «data-driven» [6] вполне способны обработать подобные загрузки.

### Список литературы

- [1] The Hall B 12 GeV Upgrade Preconceptual Design Report
- [2] The CLAS12 Collaboration, Hard exclusive electroproduction of  $\pi^0$  and  $\eta$  with CLAS 12: Proposal to PAC30.
- [3] The CLAS12 Collaboration, Meson Spectroscopy with low  $Q^2$  electron scattering in CLAS12: Proposal to PAC37.
- [4] The CLAS12 Collaboration, Nucleon Resonance Studies with CLAS12: Proposal to PAC34.
- [5] Degtiarenko P.V., Elouadrhiri L., Mestayer M.D. et al.//CLAS'NOTE 2006–020
- [6] Воронин А.Г., Карманов Д.Е., Меркин М.М., Рогожин С.В. // ПТЭ. 2010. №6,. 2010, С. 34.

**Борис Саркисович Ишханов**  
**Станислав Вадимович Рогожин**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КРЕМНИЕВОМУ ВЕРШИННОМУ  
ДЕТЕКТОРУ ЭКСПЕРИМЕНТА CLAS12**

Препринт НИИЯФ МГУ №2011-6/870

Работа поступила в ОНТИ 17.10.2011