

УДК 539.13

КАЛИБРОВКА ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР И КАЛОРИМЕТРА СПЕКТРОМЕТРА BIGBITE

С.Л. АБРАМЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван

(Поступила в редакцию 3 июня 2011 г.)

Приведена методика калибровки калориметра и дрейфовых камер спектрометра BigBite, использованного в эксперименте по измерению электрического форм-фактора нейтрона. Спектрометр BigBite обеспечивал измерение направления и импульса рассеянного электрона путем измерения траектории электрона после его прохождения через магнитное поле. Калибровка детекторного пакета спектрометра имела важное значение для успеха эксперимента.

1. Введение

Для выполнения эксперимента GEN [1] были спроектированы и построены электронное и нейтронное плечи. Электронное плечо основано на магнитном спектрометре BigBite с большим телесным углом. В состав спектрометра входят дипольный магнит (интегральное магнитное поле 1.0 Т) и набор детекторов. Последний включает 15 слоев многопроволочных дрейфовых камер, годоскоп пластмассовых сцинтилляционных счетчиков и двухслойный многоканальный калориметр (рис.1).

Спектрометр BigBite обеспечивает измерение направления и импульса рассеянного электрона путем измерения траектории электрона после его прохождения через магнитное поле, а также время прохождения частицы. Магнит для спектрометра BigBite [2] разработан в НИКНЕФ и имеет свойства, близкие к свойствам идеального дипольного магнита. Тем не менее, поле содержит заметные отклонения от идеального, которые можно наблюдать в данных. Непосредственные измерения поля по всему объему магнита не проводились, однако, используя свойства магнита и применяя эмпирические поправки к отклонениям от модели эффективной плоскости, может быть получена достаточно точная реконструкция импульса и отклонения электрона. Обновленный набор детекторов был разработан с участием различных институтов (JLab, Budker, ITEP, UVA, YefPhI) и позволил на 6 порядков увеличить максимальную светимость. Для успешного проведения измерения была необходима точная калибровка детекторов, входящих в спектрометр.

2. Набор детекторов спектрометра BigBite

Набор детекторов [3] спектрометра BigBite включает в себя три много-

проволочные дрейфовые камеры, годоскоп пластмассовых сцинтилляционных счетчиков и многоканальный калориметр (рис.1).

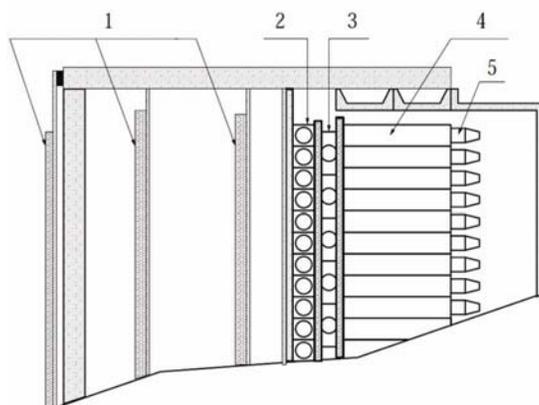


Рис.1. Схематический вид детекторов спектрометра BigBite:
1 – три многопроволочные дрейфовые камеры; 2 – радиатор;
3 – сцинтилляционные счетчики; 4 – поглотитель; 5 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-110.

В спектрометре BigBite имеется 15 плоскостей дрейфовых камер, скомпонованных в три дрейфовые камеры – передняя, средняя и задняя. Передняя камера имеет апертуру $37 \times 150 \text{ см}^2$, а средняя и задняя камеры имеют апертуру $50 \times 200 \text{ см}^2$.

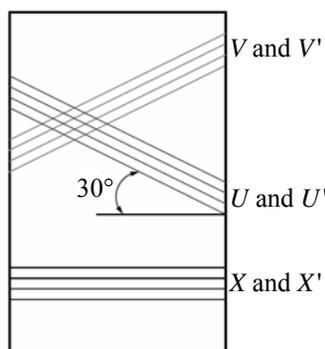


Рис.2. Схематическое изображение проволочек в плоскостях дрейфовых камер в спектрометре BigBite.

Средняя камера состоит из трех типов плоскостей – U , V и X . Передняя и задняя камеры в дополнение включают в себя плоскости U' , V' и X' . Сигнальные проволочки плоскостей V и U имеют наклон 30° и -30° , соответственно, относительно горизонтальной оси. Сигнальные проволочки плоскостей X параллельны горизонтальной оси (рис.2). Сигнальные проволочки плоскостей U' , V' и X' смещены на 5 мм относительно плоскостей U , V и X , соответственно.

Сцинтилляционный годоскоп состоит из 13 сцинтилляционных счетчиков. Каждый счетчик изготовлен из сцинтилляционных пластмасс размером $5 \times 17 \times 63 \text{ см}^3$. К каждому торцу приклеены трапециевидальный световод и ФЭУ марки ХР 2282/В. Как видно из рис.1, сцинтилляционный годоскоп помещён между предливневым и ливневым детекторами и предназначен для определения времени попадания частиц. Выбранное расположение годоскопа (после предливневого детектора) позволило уменьшить чувствительность годоскопа к частицам низких энергий и, таким образом, многократно понизить скорость счета годоскопа. Во время эксперимента временное разрешение годоскопа составило 0.25 нс.

Многоканальный калориметр [3] на базе свинцового стекла использован для формирования триггера, а также для режекции пионов. Калориметр состоит из двух частей – предливневого детектора (радиатора) и ливневого детектора (поглотителя). Предливневый детектор сделан в виде матрицы 2×27 из блоков свинцового стекла марки F8 размером $8.5 \times 8.5 \times 34 \text{ см}^3$, толщиной 8.5 см в направлении движения частиц.

3. Калибровка дрейфовых камер

Многопроволочные дрейфовые камеры [3] – одна из основных составляющих, и наиболее сегментированный элемент детектора спектрометра BigBite. Камеры служат для точного определения электронного трека после прохождения частиц через область магнитного поля. Как и другие многоканальные детекторы, многопроволочные камеры требуют калибровки.

Каждая сигнальная проволочка дрейфовых камер подключена к ВЦП (время-цифровой преобразователь), с общим стоп-сигналом. Таким образом, время, считываемое с каждого канала ВЦП, представляет собой сумму реального времени дрейфа, используемого для последующего вычисления координаты, и некоего постоянного для данной проволочки сдвига, определяемого несколькими факторами:

$$t_{\text{TDC}} = t_{\text{drift}} + t_{0,i}. \quad (1)$$

Смещения $t_{0,i}$ для каждой проволочки при анализе считываются из базы данных. Величина этого смещения определяется тремя факторами: временем распространения сигнала от проволочки до ВЦП, временем пролета электрона от дрейфовых камер до триггерного детектора и временем, необходимым для формирования стоп-сигнала для ВЦП, после прохождения частицы в триггерном детекторе.

В свою очередь, координата на камере определяется суммой дрейфового расстояния, являющегося функцией времени дрейфа и координаты данной сигнальной проволочки:

$$x_{\text{hit}} = x_{0,i} + f(t_{\text{drift}}). \quad (2)$$

Таким образом, калибровка трекового детектора включает в себя опре-

деление координат каждой сигнальной проволочки ($x_{0,i}$), а также определение номера канала ВЦП, соответствующего минимальному времени дрейфа в каждой дрейфовой ячейке ($t_{0,i}$).

Решение обеих этих задач оказывается возможным благодаря высокой статистике треков и количеству сигнальных плоскостей. Во время анализа значительная часть треков имеет срабатывание во всех 15 плоскостях. Это означает, что координаты и направление трека определяются с хорошей точностью. Анализ расхождения между координатой трека в данной плоскости, определённой по треку в целом, и координатой в этой же данной плоскости, определённой исходя из срабатывания проволочек в этой плоскости, позволяет уточнить координаты каждой проволочки.

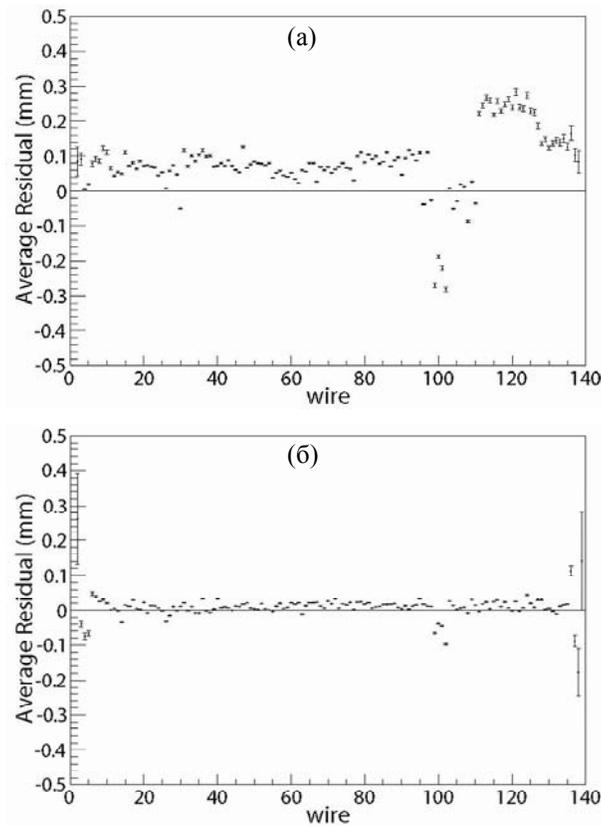


Рис.3. Значение величины R в зависимости от номера проволочки для плоскости $U1$ (а – до оптимизации, б – после оптимизации величин $t_{0,i}$ и $x_{0,i}$).

Основной подход к калибровке проволочных камер основан на использовании треков частиц высокой энергии. Поскольку камеры расположены вне магнитного поля, то такие треки можно рассматривать как прямые. Большое количество плоскостей дрейфовых камер позволяет измерить смещения реаль-

ных положений проволочек относительно их идеального положения. Из этих же данных удастся определить минимальное время дрейфа для каждой сигнальной проволочки.

Алгоритм оптимизации, использующий трековую информацию для определения координат проволочек и минимальных времен дрейфа, заключается в вычислении и последующей минимизации суммы квадратов отклонений трека от координат в индивидуальных плоскостях и минимизации этой суммы путем оптимизации координат проволочек и минимальных времен дрейфа:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} (d_i - f_i)^2, \quad (3)$$

где d_i – координата в плоскости i , измеренная по времени дрейфа, f_i – координата точки пересечения трека с плоскостью i , а σ_i – разрешение в плоскости i . Величина $R = d_i - f_i$ используется для определения качества проведенной оптимизации и конечного разрешения.

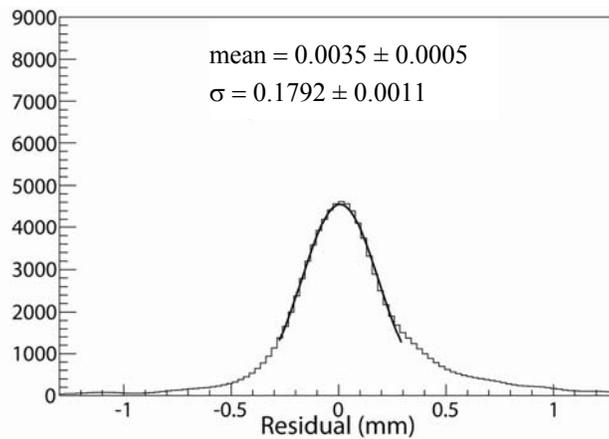


Рис.4. Усредненное по всем проволочкам плоскости $U1$ значение величины R .

В результате проведенной оптимизации было получено разрешение 0.18 мм. Эта величина, однако, включает в себя эффект многократного рассеяния, после учета которого было получено, что разрешение камер не превышает 0.15 мм. На рис.3 и 4 представлены величины R для одной из 15 плоскостей. На рис.3 представлена зависимость величины R от номера сигнальной проволочки до и после оптимизации. Рис.4 представляет величину R , усредненную по всем проволочкам одной из плоскостей.

4. Калибровка калориметра

Ливневый и предливневый детекторы составляют электромагнитный калориметр спектрометра BigBite, который также обеспечивает дополнительные возможности для идентификации частиц [3]. Калориметр играет принципиальную роль в триггере спектрометра BigBite, поэтому тщательное выравнивание

амплитудного отклика отдельных счетчиков является важной задачей. Решение этой задачи разбивается на два этапа. На первом этапе калориметр калибруется с использованием космических лучей. Амплитудная калибровка отдельных модулей может быть проведена с точностью не хуже 10%. Следующий этап калибровки калориметра использует события электронного рассеяния. В каждом событии энергия электрона определяется по углу поворота его траектории магнитным полем BigBite. Отбор чистых электронных событий (режекция пионов) проводится с использованием амплитуды в предливневом детекторе.

Сумма амплитуд по всем ФЭУ в обоих детекторах пропорциональна полной энергии, которую несет рассеянный электрон. Эта сумма зависит от индивидуальных коэффициентов, которые определяются с использованием известной энергии частиц. В эксперименте E02-013 после космической калибровки, для калибровки использовались упругие события на водородной мишени. Энергия, выделенная в блоке калориметра, предполагается линейной относительно суммы интегрированных зарядов, измеренных в АЦП (аналого-цифровой преобразователь) ливневого и предливневого детекторов:

$$E_{\text{block}} = C \left(A_{\text{block}}^{\text{PMT}} - A_{\text{block}}^{\text{ped}} \right) = C A_{\text{block}}, \quad (4)$$

где E_{block} – энергия, выделенная в блоке, C – коэффициент пропорциональности, единица измерения которого МэВ на канал, величина $A_{\text{block}}^{\text{PMT}}$ пропорциональна интегрированной амплитуде АЦП для данного блока, а $A_{\text{block}}^{\text{ped}}$ является значением пьедестала для данного блока – постоянное смещение, которое может быть измерено сбором данных без сигнала, A_{block} – амплитуда за вычетом пьедестала.

Значения высоких напряжений на фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) для ливневого и предливневого массивов калориметра были подобраны так, чтобы обеспечить одинаковые значения для коэффициентов пропорциональности. Это было сделано путем выбора таких значений высоких напряжений, при которых спектры амплитуд, за вычетом пьедестала, для каждого блока будут одинаковы. Хотя коэффициенты пропорциональности для различных областей калориметра различны, это не было учтено в данном анализе: для всех блоков калориметра используется одинаковый коэффициент пропорциональности. Для получения коэффициентов пропорциональности, была проведена подгонка методом минимального χ^2 для суммы линейных вкладов от амплитуд ливневого и предливневого детекторов, за вычетом пьедестала, используя данные, полученные на космических лучах. В результате подгонки было получено следующее выражение для полной энергии, выделенной в калориметре:

$$E = \left(3.57 \times 10^{-4} \text{ GeV/channel} \right) A_{\text{ps}} + \left(5 \times 10^{-4} \text{ GeV/channel} \right) A_{\text{sh}}, \quad (5)$$

где A_{ps} – сумма амплитуд, за вычетом пьедестала, в предливневом детекторе по всем блокам предливневого массива калориметра, а A_{sh} – сумма амплитуд, за вычетом пьедестала, в ливневом массиве калориметра (обе величины в единицах каналов). Разрешение калориметра можно получить подгонкой спектра раз-

ницы между значением энергии, полученным из калориметра, и значением энергии, определенным при помощи оптики спектрометра BigBite. Полученное значение для разрешения калориметра $\sigma_{dE/E} = 8.5\%$ (рис.5).

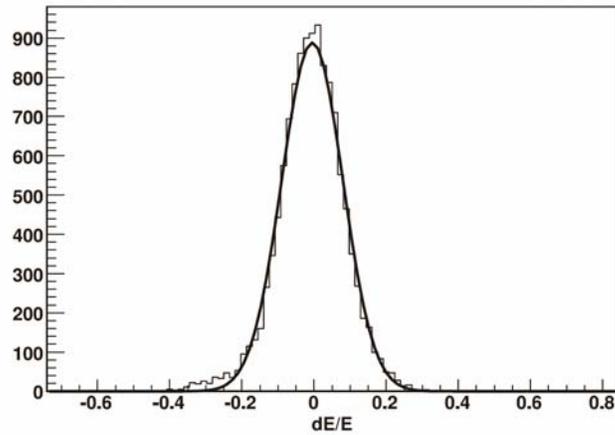


Рис.5. Относительный разброс измеренной энергии. Аппроксимация представленного распределения функцией Гаусса позволяет определить энергетическое разрешение $\sigma = 8.5\%$.

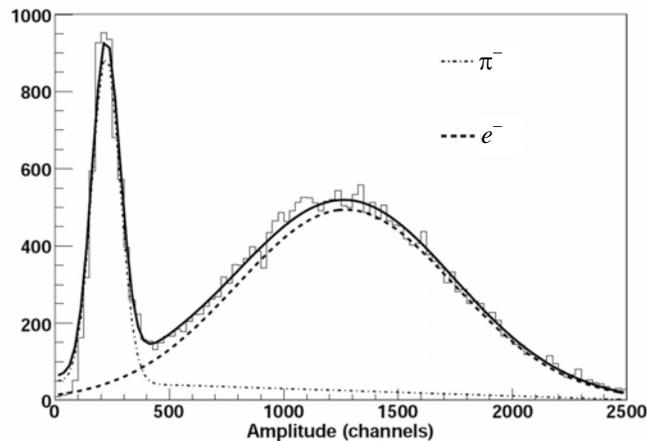


Рис.6. Распределение энергии, выделенной в предливневом детекторе калориметра, разложенное на распределения, ассоциированные с пионами и электронами.

Определение координат трека может быть проведено взвешенным по амплитудам суммированием координат блока. Однако в данном анализе эта техника не использовалась и вместо этого в качестве координаты трека выбиралась координата центра блока с наибольшей амплитудой.

Идентификация электрон/пион может быть проведена, анализируя сигнал в предливневом детекторе. События с малыми значениями выделенной энергии идентифицированы как пионы, в то время как большие значения энер-

гии соответствуют электронам. Электронное распределение становится более выраженным, если провести отбор событий по упругому пику в распределении импульса; чистое пионное распределение было получено отбором положительно заряженных частиц по направлению отклонения в магнитном поле (рис.6). Полученное распределение подтверждено симуляцией методом Монте-Карло.

Большинство пионов в данных может быть удалено отбором событий со значением энергии, выделенной в предливневом детекторе, превышающим 500 каналов. Этот критерий отбора использовался для выделения электронов. Такой критерий приводит к потере приблизительно 7% электронных данных.

5. Заключение

В данной работе описаны методики калибровки калориметра и дрейфовых камер магнитного спектрометра, примененные при анализе данных эксперимента по измерению форм-фактора нейтрона.

В эксперименте трековый детектор расположен в объеме, свободном от магнитного поля, что позволило достичь светимости $L \sim 10^{37}$, что на 5–6 порядков превышает ранее достигнутую на открытом спектрометре.

Проведение измерения при высокой светимости требует высокоточной калибровки набора детекторов. Описанные методы позволили провести калибровку дрейфовых камер и калориметра. В результате было достигнуто энергетическое разрешение 8.5% для калориметра. Координатное распределение дрейфовых камер составило ~ 0.2 мм. Высокое разрешение используемых детекторов позволило впервые получить значения электрического форм-фактора нейтрона для значений переданного импульса выше $2 \text{ ГэВ}^2/c^2$.

Автор благодарен руководителям эксперимента GEN – Б. Войцеховскому, Г. Кейтсу, Н. Лианаге, а также всем участникам проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **B.Wojtsekhowski et al.** Jefferson Lab experiment E02-013, Dec. 3, 2001, 56 pp.
2. **D.J.J. de Lange et al.** Nucl. Instr. and Meth. **A**, **406** 182 (1998).
3. **А.С. Шагинян**, Изв. НАН Армении, Физика, **43**, 364 (2008).
4. **S.Riordan, S.Abrahamyan, B.Craver, A.Kelleher, A.Kolarkar, J.Miller, G.D.Cates, N.Liyanage, B.Wojtsekhowski, et al.** Phys. Rev. Lett., **105**, 262302 (2010).

CALIBRATION OF BIGBITE SPECTROMETER DRIFT CHAMBERS AND CALORIMETER

S.L. ABRAHAMYAN

Calibration method of BigBite spectrometer drift chambers and calorimeter is presented. BigBite spectrometer was utilized in the neutron electric form-factor experiment. The momentum and direction of scattered electron were determined in BigBite spectrometer by measuring its trajectory after passing through the magnetic field. Performed BigBite spectrometer calibration procedure plays important role in experiment success.