**Мониторирование сталкивающихся пучков и определение светимости в точке взаимодействия на MPD/NICA**

С.П.Авдеев1,2, С.Г.Бузин1, М.Г.Буряков1, В.М.Головатюк1, А.И.Малахов1,2, Г.Д.Мильнов1,2,\*, А.Б.Курепин3, А.Г.Литвиненко1,2 , Е.И.Литвиненко1, Б.Отгонгэрэл1,4, М.Совд1,4

1ОИЯИ, Дубна, Россия

2Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

3ИЯИ РАН, Москва, Россия

4Институт физики и технологии, МАН

[\*milnov@jinr.ru](mailto:*milnov@jinr.ru)

PACS: 29.20.db; 29.40.Mc

**Beams collision monitoring and luminosity measurements in the interaction point at MPD/NICA**

S.P.Avdeev1,2, S.G.Busin1, M.G.Buryakov1, V.M.Golovatyuk1, A.I.Malakhov1,2, G.D.Milnov1,2,\*, A.B.Kurepin3, A.G.Litvinenko1,2  , E.I.Litvinenko1, B. Otgongerel1,4, M. Sovd1,4

1 Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

2 Dubna State University, Dubna, Moscow oblast, 141982 Russia

3Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

4Institute of Physics and Technology, MAS, Ulaanbaatar, 13330 Mongolia

***\*****e-mail:* [*milnov@jinr.ru*](mailto:milnov@jinr.ru)

PACS: 29.20.db; 29.40.Mc

Обсуждается детектор для настройки сведения пучков в точке взаимодействия установки MPD (Multi-Purpose Detector) на коллайдере NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAсility). Рассмотрена процедура калибровки "детектора светимости” для получения абсолютной светимости в зоне взаимодействия MPD.

The detector for tuning of the beam convergence in the interaction point of the MPD (Multi-Purpose Detector) experiment at NICA collider (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) is discussed. The calibration procedure of the luminosity detector for determination of absolute luminosity in the MPD interaction zone is presented.

**Введение**

Светимость () определяет среднее число взаимодействий в единицу времени (R) для реакции с известным сечением σ [1-2]:

. (1)

Отсюда светимость равна:

. (2)

Такой метод применяется на лептонных коллайдерах, поскольку для электромагнитного взаимодействия сечение удаётся рассчитать с точностью лучше одного процента [3].

Для адронных коллайдеров и особенно коллайдеров тяжёлых ионов сечение рассчитать с приемлемой точностью (лучше 10%-20%) не удаётся. В таком случае скорость счёта некоторого детектора ( равна:

. (3)

Сечение любого канала реакции в этом случае известно с недостаточной точностью, поэтому нет необходимости рассчитывать эффективность регистрации детектора светимости с точностью лучшей, чем точность определения сечения. Светимость, с учётом эффективности, равна:

, (4)

где – число зарегистрированных событий, – время регистрации событий. При таком подходе ошибка определения светимости равна:

*.* (5)

Максимальная проектная светимость коллайдера NICA для столкновений тяжелых ионов составляет . Ниже остановимся на возможности определить произведение из серии измерений. При этом платой за невозможность получить сечение и эффективность из расчётов является ускорительное время, затраченное на реализацию программы таких измерений.

**Схема детектора**

Из-за малой вероятности наложения событий при проведении измерений достаточно регистрировать число ядерных столкновений с конечной эффективностью (≥50%) без применения каких-либо дополнительных отборов по центральности или множественности столкновений. [4]. При разработке “детектора светимости” учитывались следующие особенности столкновений тяжёлых ионов на коллайдере NICA [5]:

1. Специфическое распределение вторичных частиц по быстроте, в котором можно выделить три кинематические области (см. например [6]):
2. центральная область – в которой находятся частицы с малыми продольными импульсами
3. две области спектаторов (фрагментов сталкивающихся ядер, включая нуклоны).
4. “Детектор светимости” должен быть компактным, чтобы его можно было использовать как в составе MPD, так и при настройке сведения пучков во время запуска коллайдера.

Выбранная схема детектора показана на Рис.1 [4].

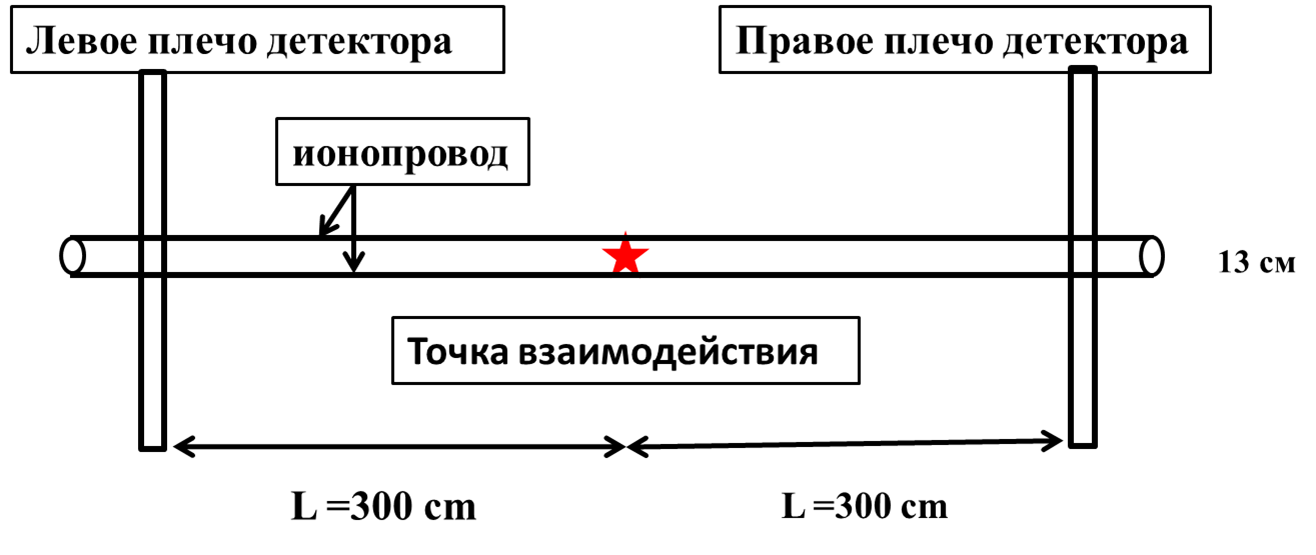


Рис. 1. Схематический вид детектора в горизонтальной плоскости. Рисунок из [4].

Детекторы левого и правого плеча регистрируют спектаторы от ядер налетающих справа и слева соответственно. Детекторы левого и правого плеч идентичны и фронтальный вид одного из таких детекторов показан на Рис.2.

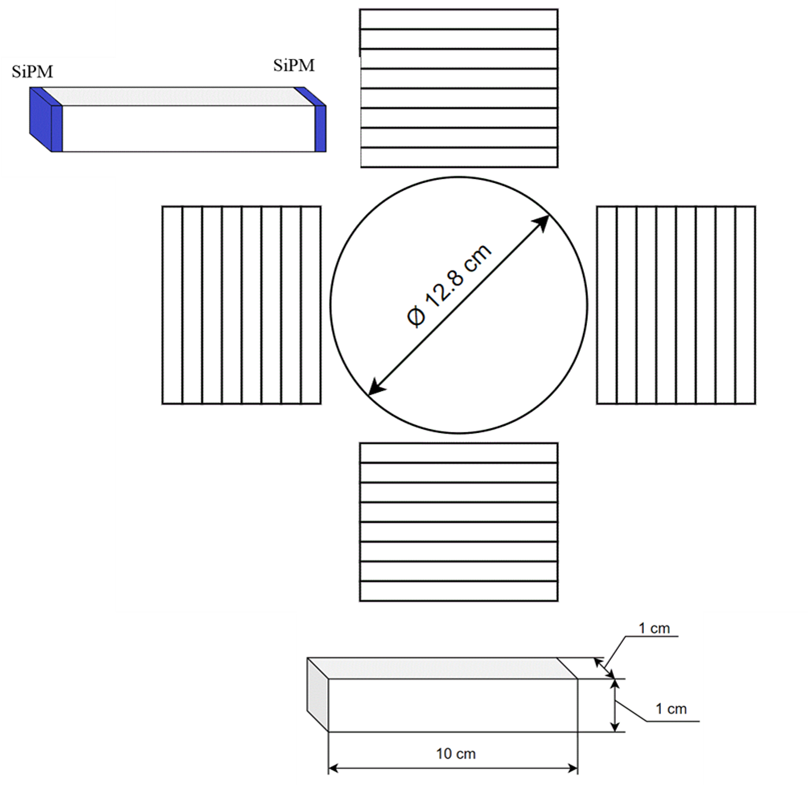


Рис. 2. Фронтальный вид одного из плеч детектора (см. [4]).

Каждое плечо состоит из 4-ёх плоскостей. Каждая плоскость в свою очередь состоит из восьми сцинтилляционных полос размером 1х1х10 см3. Сигнал снимается с каждого из торцов кремневыми фотоумножителями SiPM (HAMAMATSU S13360-6025C [7]), как это показано на Рис.2.

Моделирование эффективности регистрации выполнено при следующих условиях:

1. Для описания рождения частиц использовался генератор DCM-SMM [8], поскольку этот генератор описывал рождение ядерных фрагментов, которые рождаются в области спектаторов.
2. Вычислялось время срабатывания каждого из SiPM при попадании заряженного спектатора (или нескольких) в данную полосу.
3. Если было срабатывание нескольких полос в данном плече, то наименьшее из времён считалось временем срабатывания данного плеча .
4. При срабатывании обоих плеч во временном интервале меньше десяти нс () вырабатывался триггер. Такое условие можно было сделать и более жёстким, но из-за малой вероятности наложения событий в этом не было необходимости (вероятность (см. [4])). Поэтому оптимизация времени совпадения плеч не планируется.
5. Измеренное временное разрешение одной сцинтилляционной полосы SiPM составляло порядка 150 пс [9].

Более подробно вопрос необходимого временного разрешения обсуждался в [4]. Выводы этой работы указывают на то, что временного разрешения пикосекунд

достаточно для первичной настройки сведения пучков.

Эффективность “детектора светимости” при условии регистрации хотя бы одного спектатора в каждом плече с разницей по времени пролета в левом и правом плече менее 10 нс равна отношению зарегистрированных событий  к числу сгенерированных событий в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс = 11 ГэВ:

*.* (6)

Полученная эффективность обсуждается в [4].

Следует заметить, что таким образом определённая эффективность используется только для оценки скорости счёта. Как будет показано ниже, произведение сечения на реальную эффективность, входящее в выражение для экспериментального определения светимости [4], вычисляется при проведении скана Ван-дер-Меера [10].

**Калибровка “детектора светимости”**

Выше отмечалось, что непосредственное определение светимости по измеренной скорости счёта невозможно из-за недостаточной точности в определении эффективности регистрации и сечения рассеяния. Чтобы описать процедуру калибровки “Детектора светимости”, которая позволяет определить произведение эффективности регистрации на сечение , рассмотрим параметры, определяющие величину светимости. Для этого приведём выражение для светимости:

. (7)

Использованы следующие обозначения:

1. — число банчей (известно точно);
2. и — интенсивности (число ионов) в k – ой паре банчей, налетающих слева и справа соответственно (определяется по диагностической аппаратуре коллайдера);
3. — частота обращения (известна точно);
4. — эффективная площадь пересечения k – ой пары банчей в поперечной плоскости. Эта площадь определяется распределением частиц в банчах и их относительным положением в поперечной плоскости.

Дальнейшее рассмотрение проведём для фиксированной пары банчей. Кроме того, не будем предполагать, что относительное положение сталкивающихся банчей для точки фокусировки в поперечной плоскости оптимизировано. Расстояние между центрами банчей по осям X и Y (в поперечной плоскости) будем обозначать  и  соответственно. В таких условиях светимость зависит от настройки положения банчей в поперечной плоскости:

. (8)

В дальнейшем не будем писать индекс, указывающий номер пары сталкивающихся банчей. Число событий (), зарегистрированных за время () равно:

. (9)

Для пояснения метода калибровки детектора светимости остановимся подробнее на эффективной площади пересечения пучков. Для этого необходимо ввести распределение частиц в поперечной плоскости:

*,* (10)

Здесь  означает расстояние поперечной плоскости, для которой записано распределение от точки фокусировки. Следовательно, зависимость распределения от  возникает при учёте фокусировки. Равенство интеграла единице при любом является нормировочным условием, означающим сохранение числа пучковых частиц в процессе фокусировки. Наряду с поперечным распределением необходимо ввести и продольное распределение частиц в банчах:

*.* (11)

Обратная площадь пересечения выражается следующим образом через эти распределения [2,4]:

| . (12)

Ключевым свойством эффективной площади пересечения пучков, в конечном счете, позволяющим использовать скан ван-дер Меера для калибровки “детектора светимости” является “обобщённое условие нормировки”, предложенное для одномерного случая в [10] и использованное для пересечения с фокусировкой в [2,4]:

. (13)

Доказательство этого свойства сразу следует из линейной замены переменных

. (14)

С учётом этих замен получаем:

. (15)

В результате измерений для различных расстояний между банчами в поперечной плоскости можно получить дискретный набор измеренных значений скоростей счёта:

*.* (16)

После серии измерений можно провести аппроксимацию дискретного набора данных для приведённой скорости счёта

. (17)

После интегрирования получим произведение эффективности на сечение:

. (18)

После этого, используя (4), по измеренной скорости счёта получаем светимость для данного набора:

. (19)

**Заключение.**

Для “детектора светимости” описана процедура калибровки, опирающаяся на измерения в рамках скана ван дер Меера. Время на проведение измерений при столкновении ядер золота для числа частиц в банче 210 7  и светимости в рамках программы скана ван дер Меера составляет около 3-ёх часов (около 5000 событий на один сдвиг пучка). При этом время на набор статистики и время на перестройку канала делятся примерно поровну. Эта оценка времени набора получена, опираясь на эффективность детектора светимости, полученную из моделирования (). Заметим ещё раз, что не используется при вычислении светимости, а только при оценках времени экспозиции.

Что касается измерения светимости в составе MPD, то следует отметить, что любая детекторная подсистема может (должна) использоваться для определения светимости.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ №23-22-00160.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.С. Козлов, С.А. Костромин, С.А. Мельников, И.Н. Мешков и др. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКА В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA // ЭЧАЯ, 2022.Т.53,вып.5.C.1220–1273
2. З. Игамкулов, М. Кручеру, А.Б. Курепин и др. Измерение и контроль светимости на NICA//Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, №6(225). С.535-551
3. А.Б.Арбузов, Э.А.Кураев БАБА-РАССЕЯНИЕ НА МАЛЫЕ УГЛЫ //ЭЧАЯ, т.27, №5, с.1247-1320, (1996)
4. S.P. Avdeev, S.G.Busin, M.G.Buryakov, V.M. Golovatyuk, A.I. Malakhov, G.D. Milnov, A.B. Kurepin, A.G. Litvinenko, E.I. Litvinenko. Detector for Setting Up Beam Convergence and Determining Luminosity at the Interaction Point on the MPD NICA **//** Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 5, pp. 679–690*.*
5. \http://nica.jinr.ru/
6. M.B. Golubeva, F.F. Guber, A.P. Ivashkin et al. Determination of Centrality of Nucleus–Nucleus Collisions with the Aid of the Spectator Calorimeter for the MPD Setup at the NICA Facility // Physics of Atomic Nuclei, 2013, Vol. 76, No. 1, pp.1-15.
7. Кремниевые фотоумножители HAMAMATSU S13360-6025CS.-

https: www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\_series\_kapd1052e.pdf.

1. M. Baznat, A. Botvina, G. Musulmanbekov, V. Toneev, V. Zhezher Monte-Carlo generator of heavy ion collisions DCM-SMM // arXiv:1912.09277 [nucl-th], 2019
2. Г. Д. Мильнов и др. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЁТЧИКА ДЕТЕКТОРА ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТИМОСТИ НА NICA// Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 4(243). С. 271–280
3. S. van der Meer CALIBRATION OF THE EFFECTIVE BEAM HEIGHT IN THE ISR // CERN-ISR-PO-68-31, 1968