

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

С.П.Авдеев<sup>1,2</sup>, С.Г.Бузин<sup>1</sup>, М.Г.Буряков<sup>1</sup>, В.М.Головатюк<sup>1</sup>, А.И.Малахов<sup>1,2</sup>, Г.Д.Мильнов<sup>1,2,\*</sup>,  
А.Б.Курепин<sup>3</sup>, **А.Г.Литвиненко<sup>1,2</sup>**, Е.И.Литвиненко<sup>1</sup>, Б.Отгонгэрэл<sup>1,4</sup>, М.Совд<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>ОИЯИ, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

<sup>3</sup>ИЯИ РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт 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.Avdeev<sup>1,2</sup>, S.G.Busin<sup>1</sup>, M.G.Buryakov<sup>1</sup>, V.M.Golovatyuk<sup>1</sup>, A.I.Malakhov<sup>1,2</sup>, G.D.Milnov<sup>1,2,\*</sup>,  
A.B.Kurepin<sup>3</sup>, **A.G.Litvinenko<sup>1,2</sup>**, E.I.Litvinenko<sup>1</sup>, B. Otgongerel<sup>1,4</sup>, M. Sovd<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

<sup>2</sup> Dubna State University, Dubna, Moscow oblast, 141982 Russia

<sup>3</sup> Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

<sup>4</sup> Institute 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 fAcility). 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 ( $\mathcal{L}$ ) определяет среднее число взаимодействий в единицу времени ( $R$ ) для реакции с известным сечением  $\sigma$  [1-2]:

$$R = \mathcal{L}\sigma. \quad (1)$$

Отсюда светимость равна:

$$\mathcal{L} = R/\sigma. \quad (2)$$

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 ( $R_{tr}$ ) равна:

$$R_{tr} = \mathcal{L}(\epsilon\sigma). \quad (3)$$

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:

$$\mathcal{L} = R_{tr}/(\epsilon\sigma) = N_{tr} / (T_{tr}(\epsilon\sigma)), \quad (4)$$

где  $N_{tr}$  – число зарегистрированных событий,  $T_{tr}$  – время регистрации событий. При таком подходе ошибка определения светимости равна:

$$\Delta\mathcal{L} = \mathcal{L} \sqrt{\frac{1}{N_{tr}} + \frac{(\Delta(\epsilon\sigma))^2}{(\epsilon\sigma)^2}}. \quad (5)$$

Максимальная проектная светимость коллайдера NICA для столкновений тяжёлых ионов составляет  $\mathcal{L} = 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Ниже остановимся на возможности определить произведение  $(\epsilon\sigma)$  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 ( $\geq 50\%$ ) 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]):
  - а) центральная область – в которой находятся частицы с малыми продольными импульсами
  - б) две области спектаторов (фрагментов сталкивающихся ядер, включая нуклоны).
2. “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].

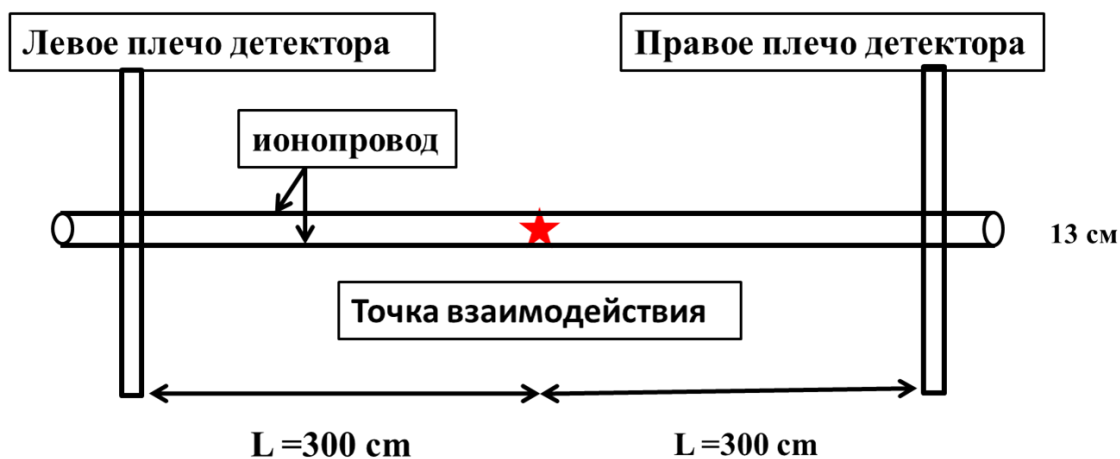


Рис. 1. Схематический вид детектора в горизонтальной плоскости. Рисунок из [4].

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

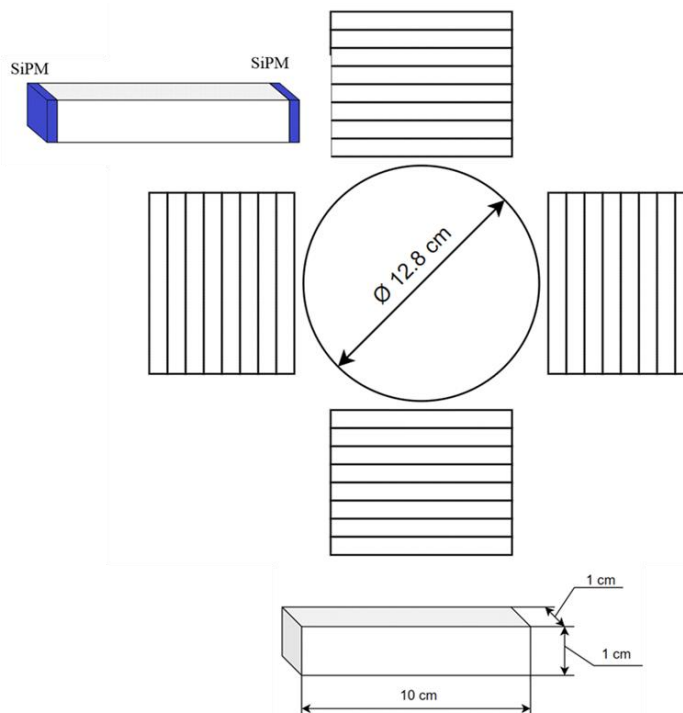


Рис. 2. Фронтальный вид одного из плеч детектора (см. [4]).

Каждое плечо состоит из 4-ёх плоскостей. Каждая плоскость в свою очередь состоит из восьми сцинтилляционных полос размером  $1 \times 1 \times 10\text{ cm}^3$ . 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 спектров.

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  $T_{L/R}$ .
4. При срабатывании обоих плеч во временном интервале меньше десяти нс ( $|T_L - T_R| < 10$  нс) вырабатывался триггер. Такое условие можно было сделать и более жёстким, но из-за малой вероятности наложения событий в этом не было необходимости (вероятность  $< 5 \cdot 10^{-4}$  (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  $\Delta T \sim 200$  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  $N_{tr}$  к числу сгенерированных событий  $N_r$  в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс  $\sqrt{S_{NN}} = 11$  ГэВ:

$$\varepsilon_{MC} = N_{tr}/N_r = 0.77 . \quad (6)$$

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 ( $\varepsilon\sigma$ ), рассмотрим параметры, определяющие величину светимости. Для этого приведём выражение для светимости:

$$\mathcal{L} = \sum_{k=1}^{N_b} \mathcal{L}_k = \sum_{k=1}^{N_b} (I_{L,k} \cdot I_{R,k} \cdot f_r) / (S_{eff,k}) . \quad (7)$$

Использованы следующие обозначения:

1.  $N_b$  — число банчей (известно точно);
2.  $I_{L,k}$  и  $I_{R,k}$  — интенсивности (число ионов) в  $k$  – ой паре банчей, налетающих слева и справа соответственно (определяется по диагностической аппаратуре коллайдера);
3.  $f_r$  — частота обращения (известна точно);
4.  $S_{eff,k}$  — 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  $\delta X$  и  $\delta Y$  соответственно. В таких условиях светимость зависит от настройки положения банчей в поперечной плоскости:

$$\mathcal{L}(\delta X, \delta Y) = (I_L \cdot I_R \cdot f_r) / (S_{eff}(\delta X, \delta Y)) . \quad (8)$$

В дальнейшем не будем писать индекс, указывающий номер пары сталкивающихся банчей. Число событий ( $N_{tr}$ ), зарегистрированных за время ( $T_{tr}$ ) равно:

$$N_{tr}(\delta X, \delta Y) = [\mathcal{L}(\delta X, \delta Y)((\varepsilon\sigma))] \cdot T_{tr}(\delta X, \delta Y) . \quad (9)$$

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

$$p_{\perp,L/R}(x, y; z_V) \geq 0; \iint p_{\perp,L/R}(x, y; z_V) dx dy = 1, \quad (10)$$

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

$$p_{\parallel,L/R}(z) \geq 0; \int_{-\infty}^{\infty} p_{\parallel,L/R}(z) dz = 1. \quad (11)$$

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

$$\begin{aligned} & \frac{1}{S_{eff}(\delta X, \delta Y)} = \\ & = 2 \iint \iint dz_V d\xi dx dy \left( p_{\perp,L}(x + \delta X/2, x \rightarrow y; z_V) p_{\perp,R}(x - \delta X/2, x \rightarrow y; z_V) \right) \cdot \\ & \quad \left( p_{\parallel,L}(z_V - \xi) \cdot p_{\parallel,R}(z_V + \xi) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

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]:

$$\iint d(\delta X) d(\delta Y) \left( \frac{1}{S_{eff}(\delta X, \delta Y)} \right) = 1 . \quad (13)$$

Доказательство этого свойства сразу следует из линейной замены переменных

$$\begin{aligned} & \begin{cases} x_1 = x + \delta X/2; & \left| \frac{\partial(x, \delta X)}{\partial(x_1, x_2)} \right| = 1 \\ x_2 = x - \delta X/2; \end{cases} \\ & \begin{cases} y_1 = y + \delta Y/2; & \left| \frac{\partial(y, \delta Y)}{\partial(y_1, y_2)} \right| = 1 . \\ y_2 = y - \delta Y/2; \end{cases} \\ & \begin{cases} z_1 = z_V + \xi; & \left| \frac{\partial(z_V, \xi)}{\partial(z_1, z_2)} \right| = \frac{1}{2} \\ z_2 = z_V - \xi; \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

С учётом этих замен получаем:

$$\begin{aligned} & \iint d(\delta X) d(\delta Y) \frac{1}{S_{eff}(\delta X, \delta Y)} = \\ & \left( \int dz_1 p_{\parallel,L}(z_1) \right) \cdot \left( \int dz_2 p_{\parallel,R}(z_2) \right) \cdot \left( \iint dx_1 dy_1 p_{\perp,L}(x_1, y_1; z_V) \right) \cdot \left( \iint dx_2 dy_2 p_{\perp,R}(x_2, y_2; z_V) \right) \cdot \\ & = (1) \cdot (1) \cdot (1) \cdot (1) = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

В результате измерений для различных расстояний между банчами в поперечной плоскости  $\{\delta X_i, \delta Y_j\}$  можно получить дискретный набор измеренных значений скоростей счёта:

$$R(\delta X_i, \delta Y_j) = N_{tr}(\delta X_i, \delta Y_j) / T_{tr}(\delta X_i, \delta Y_j) = \mathcal{L}(\delta X, \delta Y)((\varepsilon\sigma)) = (I_L \cdot I_R \cdot f_r) (\varepsilon\sigma) / S_{eff}(\delta X_i, \delta Y_j) . \quad (16)$$

После серии измерений можно провести аппроксимацию дискретного набора данных для приведённой скорости счёта  $r(\delta X_i, \delta Y_j)$

$$r(\delta X_i, \delta Y_j) = R(\delta X_i, \delta Y_j) / (I_L \cdot I_R \cdot f_r) \rightarrow r(\delta X, \delta Y) = \frac{(\varepsilon\sigma)_{exp}}{S_{eff}(\delta X, \delta Y)} . \quad (17)$$

После интегрирования получим произведение эффективности на сечение:

$$\iint d(\delta X) d(\delta Y) r(\delta X, \delta Y) = (\varepsilon\sigma)_{exp} \iint d(\delta X) d(\delta Y) \frac{1}{S_{eff}(\delta X, \delta Y)} = (\varepsilon\sigma)_{exp} . \quad (18)$$

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

$$\mathcal{L} = R_D / (\varepsilon\sigma)_{exp} = N_{tr} / (T_{tr}(\varepsilon\sigma)_{exp}) . \quad (19)$$

### Закключение.

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  $2 \cdot 10^7$  и светимости  $10^{23} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  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 ( $\epsilon_{\text{МС}}$ ). Заметим ещё раз, что  $\epsilon_{\text{МС}}$  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 РФФИ №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.С.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](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf).
8. 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
9. Г. Д. Мильнов и др. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЁТЧИКА ДЕТЕКТОРА ИЗМЕРЕНИЯ СВИМОСТИ НА NICA// Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 4(243). С. 271–280
10. S. van der Meer CALIBRATION OF THE EFFECTIVE BEAM HEIGHT IN THE ISR // CERN-ISR-PO-68-31, 1968