

СКОРОСТИ СЧЕТА ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ОСНОВНЫХ И САТЕЛЛИТНЫХ БАНЧЕЙ НА NICA

С. П. Авдеев^{а,б}, С. Г. Бузин^а, М. Г. Буряков^а, В. М. Головатюк^а,
А. Г. Литвиненко^{а,б,1}, Е. И. Литвиненко^а, А. И. Малахов^{а,б},
Г. Д. Мильнов^{а,б}, Б. Отгонгэрэл^{а,в}, М. Совд^{а,в}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^в Институт физики и технологии Монгольской академии наук, Улан-Батор

Приведены оценки скорости взаимодействия при столкновении тяжелых ионов на NICA/MPD при столкновении основных сгустков (рассеяние банч–банч), при столкновении сателлитных сгустков (рассеяние сателлит–сателлит) и при столкновении основного сгустка с сателлитным (рассеяние банч–сателлит). Приведено распределение вершин в области взаимодействия установки MPD. Основной вывод состоит в том, что вклад рассеяния сателлит–сателлит и вклад рассеяния сателлит–банч не превышает 2% к рассеянию банч–банч.

We present estimations of the counting rate in the collision of heavy ions at NICA/MPD in the collision of the main bunches (bunch–bunch scattering), in the collision of satellite bunches (satellite–satellite scattering), and in the collision of the main bunch with the satellite one (bunch–satellite scattering). The distribution of vertices in the interaction area of the MPD setup is given. The main conclusion is that the contribution of satellite–satellite scattering and the contribution of bunch–satellite scattering do not exceed 2% of the bunch–bunch scattering.

PACS: 29.20.db; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

На ускорительном комплексе NICA [1, 2] между двумя основными сгустками частиц (банчами) будут находиться два промежуточных сгустка с интенсивностью на порядок меньше основной. Для эффективной регистрации частиц детектором MPD необходимо иметь узкое распределение вершин вдоль оси столкновений ($\sigma_{V,z} \leq 40$ см). В свою очередь, распределение вершин связано с продольным размером (распределением) частиц в сгустках (банчах). Для уменьшения размера банчей вдоль оси столкновений изменяется частота ВЧ-системы коллайдера с кратности 22 на кратность 66. Это приводит к появлению двух дополнительных сгустков между основными. Дополнительные сгустки, имеющие интенсивность на порядок меньшую, чем основные, в дальнейшем будем называть сателлитами.

¹E-mail: avdeyev@jinr.ru

В работе обсуждаются относительные скорости счета при столкновении частиц из основных сгустков (R_{bb} банч–банч), при столкновении частиц из промежуточных сгустков (R_{ss} спутник–спутник) и столкновения частиц из основного сгустка с частицами из промежуточного сгустка (R_{bs} банч–спутник) для параметров NICA и условий фокусировки, планируемых в области сведения пучков на установке MPD. При заданном сечении скорость счета определяется светимостью [3]:

$$R_{i,j} = \mathcal{L}_{i,j} \sigma. \quad (1)$$

Индексы i и j принимают значения b или s в зависимости от того, рассматриваются столкновения основных банчей \mathcal{L}_{bb} , спутников \mathcal{L}_{ss} или банча с спутником \mathcal{L}_{bs} . Светимость определяется следующими тремя факторами:

- 1) константами ускорителя: частотой оборота f_r и числом соответствующих сгустков N_k ;
- 2) интенсивностью (числами частиц в сталкивающихся сгустках I_i ; $i = b/s$);
- 3) параметрами сгустков (банчей), такими как распределение частиц внутри банча и условиями фокусировки.

Остановимся на структуре светимости подробнее. Для этого приведем выражение для светимости, где эти факторы выделены явно [3]:

$$\mathcal{L}_{i,j} = (N_k f_r) \frac{I_i I_j}{S_{\text{eff},i,j}}. \quad (2)$$

Число сталкивающихся сгустков N_k и частота оборота f_r известны точно и определяются параметрами коллайдера для данной энергии столкновений $\sqrt{s_{NN}}$. При рассмотрении столкновений основных сгустков $N_{k=b} = 22$, при столкновении спутника с спутником $N_{k=s} = 44$ и при столкновении спутника с банчей $N_{k=bs} = 22$ — с оговоркой, что в этом случае учитываются только столкновения, находящиеся с одной стороны от точки фокусировки, если смотреть перпендикулярно оси столкновений. В любом случае множитель перед дробью задан.

Интенсивности в сталкивающихся сгустках измеряются и проявляются только множителем, стоящим в числителе.

Геометрический фактор в знаменателе определяется распределением частиц в сгустках и оптимизацией положения сгустков в поперечной плоскости. Остановимся более подробно на эффективной площади пересечения сгустков $S_{\text{eff},i,j}$. Для этого введем плотности распределения частиц в основных сгустках (банчах) и спутниках. Считаем распределения одинаковыми для основных банчей и спутников. Плотности распределения вероятности частиц в пространстве также принимаем одинаковыми для обоих колец коллайдера:

$$p_{\perp}(x, y; z_V) \geq 0, \quad \iint p_{\perp}(x, y; z_V) dx dy = 1. \quad (3)$$

Здесь z_V обозначает продольную координату вершины взаимодействия, отсчитываемую вдоль оси столкновения от точки взаимодействия до точки фокусировки. Для описания распределения частиц в сгустке по продольной оси (Z) введем соответствующую плотность вероятности:

$$p_{\parallel}(z) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} p_{\parallel}(z) dz = 1. \quad (4)$$

В таком случае эффективные площади пересечения [3]:

$$\frac{1}{S_{\text{eff, bb}}} = \frac{1}{S_{\text{eff, ss}}} = 2 \iint \iint dz_V d\xi dx dy (p_{\perp}^2(x, y; z_V)) (p_{\parallel}(z_V - \xi) p_{\parallel}(z_V + \xi)). \quad (5)$$

Выражение (5) написано для случая оптимизированного положения сгустков частиц, налетающих слева и справа и сталкивающихся при одинаковых поперечных координатах, когда максимумы поперечных распределений совпадают.

Для прояснения роли фокусировки поперечную площадь пересечения сгустков для различных расстояний z_V от точки пересечения пучков определим как

$$\frac{1}{S_{\text{eff, } \perp}(Z_V)} = \iint dx dy (p_{\perp}^2(x, y; z_V)). \quad (6)$$

Индексы у поперечной площади пересечения опущены, поскольку распределения частиц в банчах и сателлитах считаются одинаковыми. Фокусировка приводит к уменьшению эффективной площади пересечения по квадратичному закону [4, 5] вблизи точки фокусировки:

$$S_{\text{eff, } \perp}(z_V) = S_{\text{eff, } \perp}(0) \left(1 + \left(\frac{z_V}{\beta_{\text{IP}}} \right)^2 \right), \quad (7a)$$

где β_{IP} — значение бета-функции в точке пересечения пучков (точке фокусировки), а $S_{\text{eff, } \perp}(0)$ — эффективная поперечная площадь пересечения в точке фокусировки. При нормальном распределении частиц в банчах по каждой из поперечных координат на NICA [1]:

$$S_{\text{eff, } \perp}(0) = 4\pi\sigma_x\sigma_y = 4\pi \cdot 0,11 \cdot 0,08 = 0,1106 \text{ см}^2, \quad (76)$$

где $\sigma_{x/y}$ — стандартные отклонения по соответствующим осям. С учетом фокусировки (7a) эффективная площадь пересечения пучков равна

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = 2 \iint dz_V d\xi \frac{(p_{\parallel}(z_V - \xi) p_{\parallel}(z_V + \xi))}{S_{\text{eff, } \perp}(0) (1 + (z_V/\beta_{\text{IP}})^2)}. \quad (8)$$

СТОЛКНОВЕНИЯ БАНЧ–БАНЧ И САТЕЛЛИТ–САТЕЛЛИТ НА NICA

Поскольку эффективные площади пересечения при столкновениях банч–банч и сателлит–сателлит одинаковы (5), светимости для этих столкновений различаются из-за разных интенсивностей и разного числа сгустков:

1. Для столкновений банч–банч:

$$\mathcal{L}_{\text{bb}}[\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] = (22f_r) \frac{I_b^2}{S_{\text{eff}}} = (22f_r) I_b^2 \frac{1}{S_{\text{eff}}}. \quad (9)$$

2. Для столкновений сателлит–сателлит:

$$\mathcal{L}_{\text{ss}}[\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] = (44f_r) \frac{I_s^2}{S_{\text{eff}}} = (44f_r) I_s^2 \frac{1}{S_{\text{eff}}}. \quad (10)$$

Для оценок интенсивность сгустков данного типа считалась одинаковой. Отсюда отношение скоростей счета равно

$$R_{ss}/R_{bb} = 2(I_s/I_b)^2 \leq 2\%, \quad (11)$$

вклад от рассеяния спутник–спутник не превышает 2%, поскольку интенсивность основных сгустков на порядок или больше превышает интенсивность спутниковых. Пусть при нормировке светимости регистрируются только сигналы от столкновения основных банчей. Максимум, к чему это может привести, — к погрешности в определении светимости для столкновений банч–банч не больше, чем на 2%. Столкновения спутник–спутник отстоят от столкновений банч–банч на $\Delta t_{sb} \approx 26$ нс. Время пересечения банчей $\Delta t_{bb} \approx 4\text{--}5$ нс. В настоящее время неясно, для решения каких задач могло бы потребоваться знание светимости с точностью лучше 2%, но существенно, что такая разница между временем эффективного столкновения и временем между приходами банча и спутника в точку фокусировки позволяет принципиально отделить по времени столкновения банч–банч от столкновений спутник–спутник.

Остановимся на распределении вершин вдоль оси столкновений для столкновений банч–банч. Здесь необходимо конкретизировать распределение частиц в банчах по продольной (вдоль оси столкновений) координате. Выберем его в виде нормального распределения:

$$p_z(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right). \quad (12)$$

Для NICA $\sigma_z = 60$ см, а начало координат выбрано в точке фокусировки (в точке сведения пучков). С учетом фокусировки (7а) это дает

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_{\text{eff}, bb/ss}} &= \\ &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dz_V du \left(\frac{\exp(-(z_V + u)^2/(2\sigma_z^2)) \exp(-(z_V - u)^2/(2\sigma_z^2))}{2\pi\sigma_z^2 (1 + (z_V/\beta_{IP})^2)} \frac{1}{S_{\text{eff}, \perp}(0)} \right) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dz_V \left(\frac{\exp(-z_V^2/(\sigma_z^2))}{\sqrt{\pi}\sigma_z (S_{\text{eff}, \perp}(0)) (1 + (z_V/\beta_{IP})^2)} \right) = 6,85 \text{ см}^{-2}. \quad (13) \end{aligned}$$

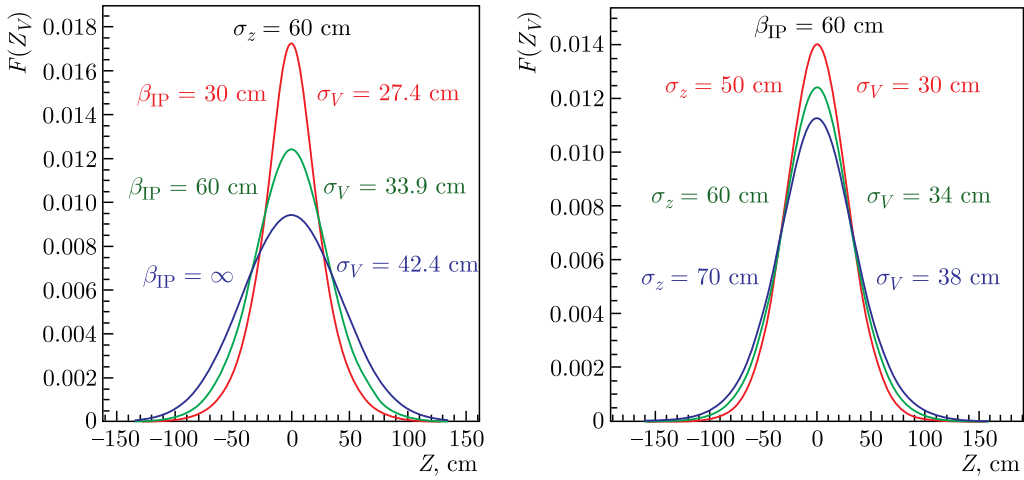
Это отвечает эффективной поперечной площади пересечения $S_{\text{eff}, bb/ss} = 0,146 \text{ см}^2$, что на 30% больше эффективной поперечной площади пересечения $S_{\text{eff}, \perp}(0) = 0,1106 \text{ см}^2$ (см. (7б)).

Распределение вершин (плотность вероятности) вдоль оси столкновения $F(z_V)$ с учетом фокусировки определяется уравнением (13) и равно

$$F(z_V) = N_F \frac{\exp(-z_V^2/(\sigma_V^2))}{(1 + (z_V/\beta_{IP})^2)}, \quad (14а)$$

где N_F — нормировочная константа:

$$N_f = 1 \left/ \int_{-\infty}^{\infty} dz_V \left(\frac{\exp(-z_V^2/(\sigma_V^2))}{(1 + (z_V/\beta_{IP})^2)} \right) \right. \quad (14б)$$

Распределение вершин взаимодействия для разных значений β_{IP} и σ_z

β_{IP} , см	σ_z , см	σ_V , см	$\tilde{\sigma}_V$, см	$\tilde{\tilde{\sigma}}_V$, см	$\tilde{\sigma}_V/\sigma_V$	$\tilde{\tilde{\sigma}}_V/\sigma_V$
30	60	27,4	19	22,0	0,69	0,84
60	50	29,5	27	31,5	0,92	1,07
60	60	33,9	30	35,3	0,88	1,04
60	70	37,9	32	38,1	0,85	1,005
∞	60	42,4	42,4	42,4	1,00	1,00

На рисунке показано распределение вершин для разных значений бета-функции (β_{IP}) величины стандартного распределения частиц в сгустках σ_z .

Приближенно влияние β_{IP} и σ_z на стандартное отклонение распределения вершин σ_V можно описать выражением

$$\tilde{\sigma}_V = \frac{\sigma_z \beta_{IP}}{\sqrt{2(\beta_{IP}^2 + \sigma_z^2)}}, \quad (15)$$

или более сложным, но и более точным выражением:

$$\tilde{\tilde{\sigma}}_V = \tilde{\sigma}_V \sqrt{\frac{1 + 1,5(\tilde{\sigma}_V/\beta_{IP})^2}{1 + 0,5(\tilde{\sigma}_V/\beta_{IP})^2}}. \quad (16)$$

Напомним, что σ_z обозначает стандартные отклонения продольного распределения частиц в банчах (12), а σ_V — стандартное отклонение вершин взаимодействия вдоль оси столкновения (14а). В таблице собраны результаты расчетов стандартного распределения вершин для случаев, приведенных на рисунке. Там же приведены значения $\tilde{\sigma}_V$ и $\tilde{\tilde{\sigma}}_V$, рассчитанные по (15) и (16).

СТОЛКНОВЕНИЯ БАНЧ–САТЕЛЛИТ НА NICA

При столкновении основного банча с спутником максимумы в распределениях по оси столкновений находятся на расстоянии $\pm l_{bs}$ от точки фокусировки:

$$l_{bs} = \frac{L}{66} = \frac{503,4}{66} = 7,63 \text{ м}, \quad (17)$$

где $L = 503,4$ м — длина кольца NICA [2], а 66 — полное число сгустков в кольце NICA.

Вследствие отмеченного выше факта смещения точки столкновения максимумов от точки фокусировки выражение для эффективной площади пересечения принимает вид (ср. с (10)):

$$\frac{1}{S_{\text{eff, bs}}} = \int_{-\infty}^{\infty} dz_V \left(\frac{\exp(-(z_V - l_{\text{bs}})^2/(\sigma_z^2))}{\sqrt{\pi}\sigma_z (S_{\text{eff, } \perp}(0)) (1 + (z_V/\beta_{\text{IP}})^2)} \right). \quad (18)$$

Оценим, насколько меняется эффективная площадь пересечения банчей в точке «встречи» максимумов распределений сгустков l_{bs} :

$$\frac{S_{\text{eff, sb}}(z_V = l_{\text{bs}})}{S_{\text{eff, bb/ss}}(z_V = 0)} = \frac{1 + (l_{\text{bs}}/\beta_{\text{IP}})^2}{1} \approx 163. \quad (19)$$

Точное значение светимости для столкновений банч–спутник равно

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{bs}}[\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] &= (22f_r)(I_b I_s) \int_{-\infty}^{\infty} dz_V \left(\frac{\exp(-(z_V - l_{\text{bs}})^2/(\sigma_z^2))}{\sqrt{\pi}\sigma_z (S_{\text{eff, } \perp}(0)) (1 + (z_V/\beta_{\text{IP}})^2)} \right) = \\ &= (22f_r)(I_b I_s) \cdot 4,14 \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом светимости при столкновении основных банчей (9) это дает

$$\mathcal{L}_{\text{bs}}/\mathcal{L}_{\text{bb}} = 0,6 \cdot 10^{-3}(I_s/I_b). \quad (21a)$$

Поскольку интенсивность спутников как минимум на порядок меньше интенсивности основных банчей, получаем, что частота столкновений банч–спутник не превышает 1%:

$$\mathcal{L}_{\text{bs}}/\mathcal{L}_{\text{bb}} \leq 0,6 \cdot 10^{-3}. \quad (21б)$$

Отношение эффективных площадей пересечения для столкновений банч–спутник и столкновений банч–банч равно (см. (9) и (17)):

$$\frac{S_{\text{eff, sb}}(z_V = l_{\text{bs}})}{S_{\text{eff, bb/ss}}(z_V = 0)} = \frac{6,85}{4,14 \cdot 10^{-2}} \approx 165, \quad (22)$$

что меньше чем на 1% отличается от оценки (19).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что для области взаимодействия MPD на NICA:

- 1) при определении светимости столкновения спутник–спутник дают вклад не более 2% по отношению к столкновениям основных банчей;
- 2) столкновения банч–спутник имеют скорость счета меньше чем на три порядка по сравнению со скоростью счета при столкновениях основных банчей;
- 3) стандартное отклонение распределения вершин взаимодействия $\sigma_V = 34$ см, что является приемлемым для работы MPD.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 23-22-00160).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов О. С., Костромин С. А., Мельников С. А., Мешков И. Н. и др. // ЭЧАЯ. 2022. Т. 53, вып. 5. С. 1220–1273.
2. <https://nica.jinr.ru/>
3. Игамкулов З., Кручеру М., Курепин А. Б., Литвиненко А. Г., Литвиненко Е. И., Переседов В. Ф. // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6(225). С. 535–551.
4. Пашков П. Т. Основы теории протонного синхротрона. ИФВЭ 99-42, ОУ-У70. Протвино, 1999.
5. Liu C., Hulsart R., Marusic A., Minty M., Michnoff R., Thieberger P. Precision Tune, Phase and Beta Function Measurement by Frequency Analysis in RHIC // Eur. Phys. J. Web Conf. 2013. V. 204; Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, 2013; <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2013/>.

Получено 30 мая 2023 г.