

## ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОИСКА ПЕРВИЧНОЙ ВЕРШИНЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА BM@N С УЧЕТОМ ТОПОЛОГИИ СОБЫТИЙ

© 2021 г. Н. Е. Кахановская<sup>а</sup>, \*, С. П. Мерц<sup>б</sup>, С. А. Немнюгин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>б</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

\*E-mail: kakhanovskaya.natalia@gmail.com

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 24.02.2021 г.

Принята к публикации 04.03.2021 г.

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) — это первый действующий эксперимент в рамках проекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). В 2018 году на пучках аргона, криптона и углерода были проведены первые запуски эксперимента с набором физических данных. Одна из необходимых задач для проведения анализа экспериментальных данных — это восстановление первичной вершины взаимодействия (пространственной точки, в которой произошло столкновения пучка с мишенью). Настоящая работа посвящена анализу и оптимизации существующего алгоритма поиска первичной вершины, основанного на методе виртуальных плоскостей. Проведен анализ зависимости качества работы алгоритма от его параметров. Приводятся результаты для разных мишеней и триггеров.

**Ключевые слова:** BM@N, BmnRoot, первичная вершина, метод виртуальных плоскостей, фильтр калмана, реконструкция событий, оптимизация алгоритма, анализ зависимости от параметров

**DOI:** 10.56304/S2079562920060299

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) является частью создаваемого в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Московская область) ускорительно-накопительно-го комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1]. Его основная цель — исследование взаимодействия релятивистских пучков тяжелых ионов с фиксированными мишенями в диапазоне энергий до 6 ГэВ/нуклон.

Эксперимент BM@N — это первая действующая установка в рамках ускорительного комплекса NICA. Первые запуски с набором физических данных прошли в 2018 году. К настоящему моменту было осуществлено 7 запусков [2].

На рис. 1 показана схема установки эксперимента BM@N. Геометрия экспериментальной установки довольно типична для эксперимента с фиксированной мишенью: прямо за мишенью располагается набор детекторов, необходимых для реконструкции траекторий заряженных частиц и ионизационный калориметр, за ними располагаются времяпролетные детекторы и в конце установки — ZDC калориметр [3].

Одной из важных и актуальных задач эксперимента является исследование рождения странных короткоживущих частиц (гиперонов), информацию о которых восстанавливают по их продуктам

распада. Для вычисления длины пробега гиперона важно иметь максимально точное положение первичной вершины. Существующий алгоритм дает возможность восстанавливать первичную вершину, однако, анализ зависимости точности восстановления вершины от параметров алгоритма не производился [4].

Целью этого исследования было оценить границы применимости алгоритма восстановления вершины, учесть влияние его параметров на результат работы и провести настройку алгоритма с целью повышения его эффективности. В качестве данных для проведения исследования использовались полученные в 2018 году события столкновения ионов аргона с пятью различными мишенями.

Данная работа была направлена на исследование алгоритма восстановления именно первичной вершины взаимодействия. При этом, частицы в событиях рождались и на материалах детекторных подсистем, и во время распадов гиперонов, порождая так называемые вторичные частицы. Для отделения траекторий, принадлежащих первичным частицам от тех, что принадлежат вторичным, используется предобработка данных. Описание ее работы выходит за рамки данной статьи.

В качестве траекторий, по которым восстанавливались первичные вершины событий, используются так называемые “глобальные треки”, по-

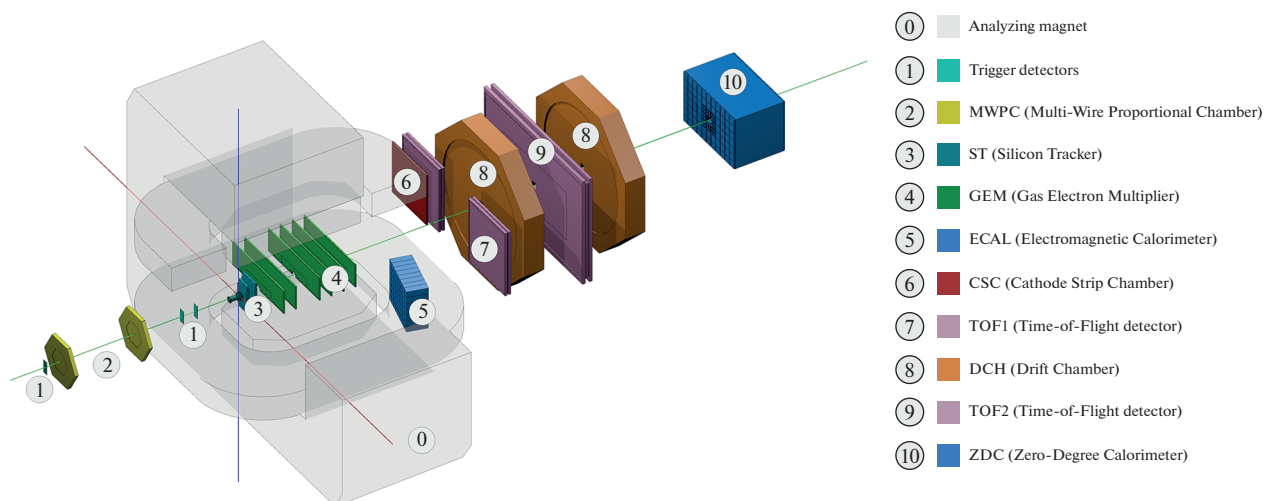


Рис. 1. Схема установки эксперимента BM@N.

лучаемые после объединения сегментов траекторий частиц в разных детекторных подсистемах. Глобальные треки имеют более точные параметры, а число ложных глобальных треков значительно меньше, чем число ложных треков, восстановленных только внутри магнита.

## 2. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Исследуемый в данной работе алгоритм поиска первичной вершины представляет собой реализацию метода виртуальных плоскостей, основные шаги которого представлены ниже:

1. Строится набор из  $M$  эквидистантных виртуальных плоскостей, перпендикулярных оси  $Z$  в диапазоне  $(Z_v - R, Z_v + R)$ , где  $Z_v$  — приблизительная координата первичной вершины, полученная исходя из физического расположения мишени.

2. Реконструированные треки заряженных частиц экстраполируются к каждой виртуальной плоскости с применением фильтра Калмана [5].

3. Для каждой виртуальной плоскости  $k$  считается среднее расстояние между всеми парами точек  $(i, j)$  от треков, попавших на данную плоскость, по формуле:

$$d_k = \frac{1}{C_N^2} \sum_{i=0}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} \sqrt{(x_i^k - x_j^k)^2 + (y_i^k - y_j^k)^2},$$

где  $N$  — число точек на плоскости;  $x_i, y_i, x_j, y_j$  — поперечные координаты точек  $i$  и  $j$ ;  $C_N^2$  — число возможных пар точек.

Данное среднее расстояние выбрано в качестве меры плотности точек на плоскости. Оно не учитывает погрешности точек и может плохо работать при наличии “выбросов”, то есть треков, далеко отстоящих от основной массы точек. Вы-

бор наиболее оптимальной оценки плотности точек на виртуальной плоскости может быть отдельным важным исследованием.

4. Среди всего количества средних расстояний  $d_k$  определяется минимальное значение  $d_{\min}$ . После чего  $Z_v$  пересчитывается в соответствии с виртуальной плоскостью, которой принадлежит минимальное значение среднего расстояния.

5. Диапазон поиска  $R$  сужается в  $S$  раз и весь цикл повторяется заново до тех пор, пока диапазон поиска не станет равен предельному значению  $R_{\min}$ . В данном исследовании  $R_{\min}$  было выбрано 100 мкм.

В результате работы алгоритма определяется значение  $Z_v$  — координата первичной вершины. На рис. 2 показана иллюстрация работы алгоритма по методу виртуальных плоскостей:

В алгоритме имеется ряд параметров, которые могут влиять на его работу и качество восстановления первичной вершины.

Таковыми параметрами являются:

- количество виртуальных плоскостей  $M$ ;
- ширина исходного диапазона измерения  $R$ ;
- фактор сближения плоскостей в конце каждой итерации  $S$ .

До настоящего момента зависимость точности восстановления первичной вершины от данных параметров не была исследована. В данной работе приводятся результаты эффективности работы алгоритма в зависимости от изменения входных параметров для разных пар мишень-триггер.

Эффективность работы алгоритма оценивается по следующим параметрам:

- количество восстановленных вершин, найденное в области мишени  $I$ ;

– ширина распределения первичной вершины по оси  $Z_v$  –  $\sigma$ ;

– время работы алгоритма –  $T$ .

Целью оптимизации исходного алгоритма является увеличение точности расчета координаты первичной вершины (уменьшение  $\sigma$ ) и одновременное увеличение количества восстановленных вершин в искомом диапазоне (увеличение  $I$ ) путем перебора начальных параметров в широком диапазоне.

Увеличение  $I$  важно, так как в полученных экспериментальных данных есть много пустых событий, из-за чего в процессе реконструкции восстанавливается около 10% от всего количества треков.

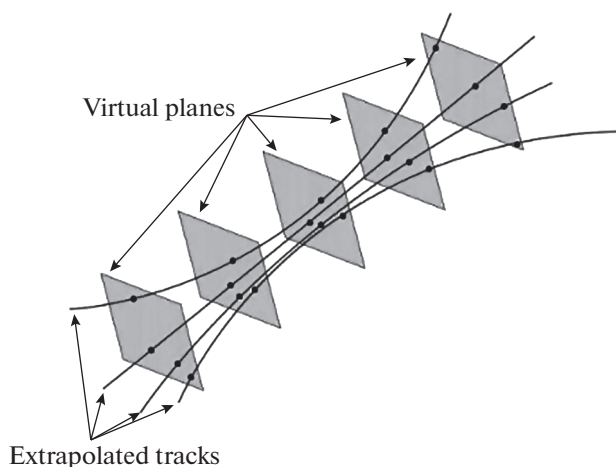


Рис. 2. Иллюстрация работы метода виртуальных плоскостей.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМА

Во время сеанса 2018 года в эксперименте использовались различные комбинации триггерных условий, то есть условий по отбору событий по множественности. Для этих целей использовались триггерные детекторы BD (Barrel Detector) и FD (Forward Silicon Detector). В данной работе для анализа были отобраны данные для трех комбинаций триггеров: BD3 – три и более пролетевшие частицы через детектор BD, FD3 – три и более пролетевшие частицы через детектор FD, BD1&FD2 – хотя бы одна пролетевшая через детектор BD частица и хотя бы 2 пролетевшие через детектор FD частицы в одном событии. Для каждой комбинации триггерных условий было отобрано по миллиону событий для каждой из мишеней: углерод (C), алюминий (Al), медь (Cu), олово (Sn), свинец (Pb).

Приблизительная координата первичной вершины  $Z_v = -1.0$  см.

Для получения значения ширины восстановленной вершины  $\sigma$  применялась аппроксимация гистограммы нормальным распределением в диапазоне от  $-1.8$  до  $-0.6$  см.

Для каждой пары мишень-триггер было проведено вычисление первичной вершины при следующих параметрах:

$M = \{5, 20, 50, 100\}$ ;  $R = \{50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150\}$ ;  $S = \{1.5, 2, 5, 10\}$ .

Диапазоны параметров специально выбираются очень широкими, “не физическими”, чтобы исследовать границы применимости алгоритма. Так, значения  $M = 100$ ,  $R = 150$  см,  $S = 10$  используются, как предельные, чтобы исследовать поведение алгоритма при экстремальных параметрах.

Значения параметров, используемые в алгоритме по умолчанию, были следующие:  $M = 5$ ,  $R = 50$ ,  $S = 2$ .

Для каждого набора параметров вычисленные значения выходных параметров записывались в файл, после чего строились графики, наглядно показывающие зависимость эффективности вос-

становления первичной вершины от изменения входных параметров.

На рис. 3 показаны получившиеся после вычисления первичной вершины графики зависимости  $I$ ,  $\sigma$  и  $T$  от  $R$  для нескольких пар мишень-триггер:

По результатам вычисления и приведенным графикам можно выделить несколько общих характеристик, которые сохраняются при изменении мишени или триггера:

1. Значение характеристики  $I$  увеличивается при  $S = \{1.5, 2\}$  и уменьшается при  $S = \{5, 10\}$  при увеличении  $R$ , причем при  $S = \{10\}$  он уменьшается сильнее. Таким образом значения при  $S = \{1.5, 2\}$  являются более предпочтительными, так как при них значение  $I$  максимально. Видно также, что значения при  $S = 1.5$  и  $S = 2$  различаются очень слабо.

2. На графиках зависимости  $\sigma$  от  $R$  видно, что при  $S = \{1.5, 2\}$  значение  $\sigma$  меньше, чем при  $S = \{5, 10\}$  и данная характеристика меняется меньше при изменении  $R$ , угол наклона графиков становится меньше. Значение  $\sigma$  уменьшается при увеличении количества плоскостей, однако, значение  $\sigma$  при  $M = 100$ , почти не уменьшается, по сравнению с  $M = 50$ .

3. Графики зависимости  $T$  от  $R$  позволяют оценить степень различия времени, затрачиваемого на вычисление первичной вершины в зависимости от задаваемых параметров. Из них видно, что уменьшение параметра  $S$  сильно влияет на увеличение времени расчета, так как при этом требуется больше шагов, для достижения заданной точности. Увеличение количества виртуальных плоскостей  $M$  увеличивает время расчета алгоритма, однако, меньше, чем при уменьшении  $S$ .

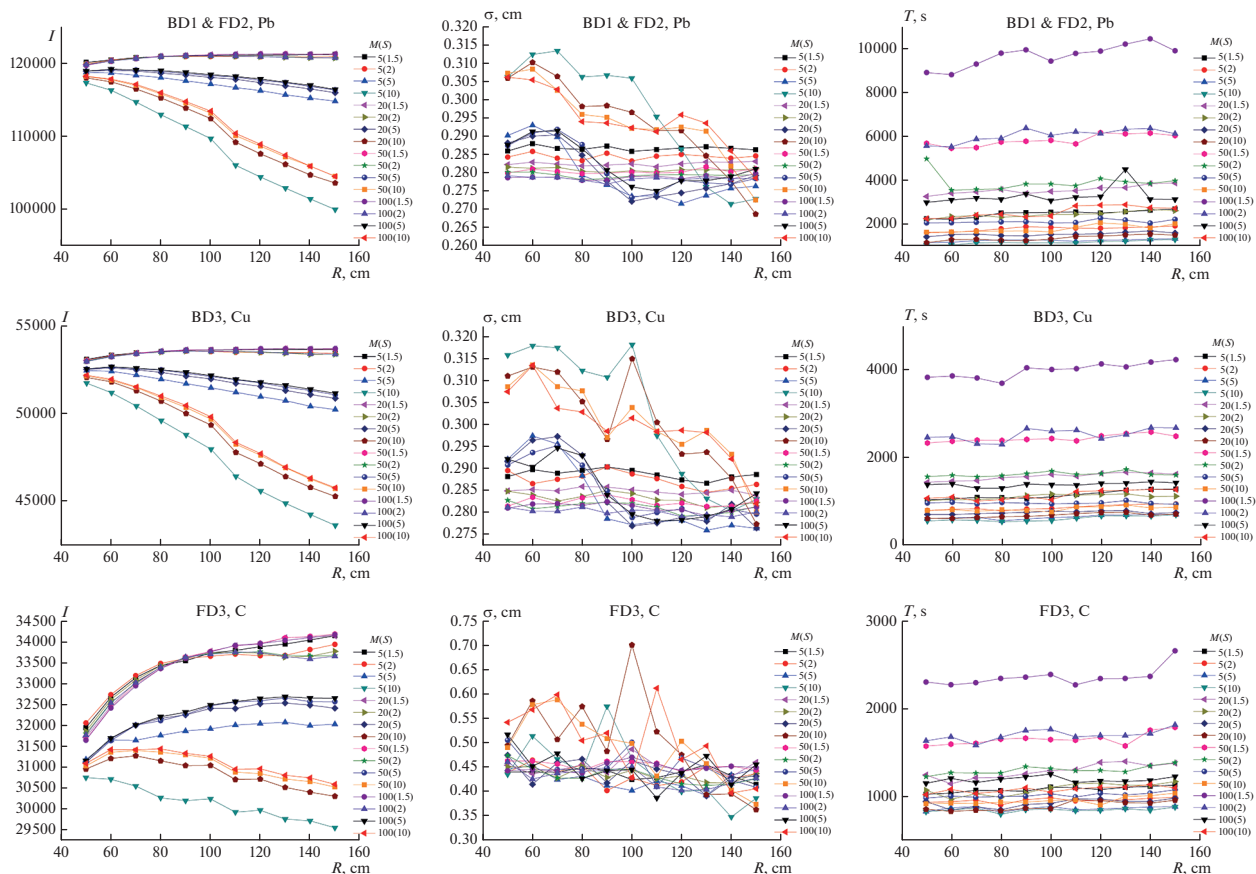


Рис. 3. Зависимости параметров эффективности  $I$ ,  $\sigma$  и  $T$  от изменения параметров  $R$ ,  $M$  и  $S$  для разных пар мишень-триггер.

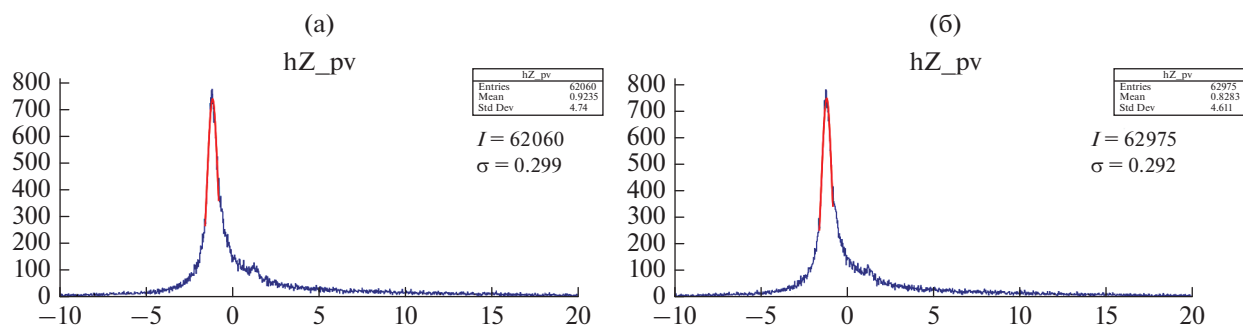


Рис. 4. Распределения вершины по  $Z$ -координате: (а)  $M = 5$ ,  $R = 50$ ,  $S = 2$ ; (б)  $M = 50$ ,  $R = 100$ ,  $S = 2$ .

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно выбрать набор параметров, позволяющий улучшить точность вычисления первичной вершины по сравнению со значением, используемым по умолчанию:

$$M = 50, \quad R = 100, \quad S = 2.$$

Для сравнения на рис. 4 были построены гистограммы распределения по  $Z$ -координате вершины для триггера BD3 мишени Sn:

Установлены некоторые закономерности изменения выходных параметров в зависимости от используемого триггера или мишени. Чем больше атомный номер элемента, используемого в каче-

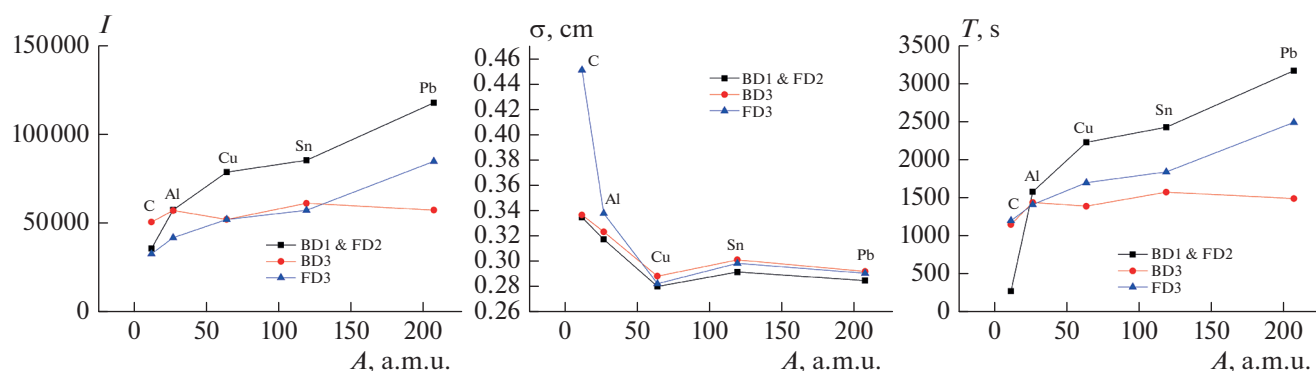


Рис. 5. Зависимости  $I$ ,  $\sigma$  и  $T$  от атомной массы элемента-мишени и типа используемого триггера.

стве мишени, тем больше значение  $I$ , и как следствие, тем меньше значение  $\sigma$ , график получается более сглаженным и требуется больше времени для расчета алгоритма. Это связано с тем, что в экспериментальных запусках с более тяжелой мишенью рождается больше треков. Тогда в алгоритме появляется больше треков для восстановления, благодаря чему вычисление первичной вершины становится более точным. Это хорошо видно на графиках зависимости  $I$ ,  $\sigma$  и  $T$  от атомной массы элемента, который используется в качестве мишени, и типа используемого триггера (рис. 5):

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было проведено вычисление первичной вершины для эксперимента BM@N с помощью алгоритма, основанного на методе виртуальных плоскостей, при разных значениях входных параметров — количество плоскостей ( $M$ ), начальный диапазон измерения ( $R$ ) и фактор сближения плоскостей в конце каждого шага ( $S$ ) — для разных пар мишень-триггер.

Было проведено сравнение полученных после вычисления первичной вершины при разных значениях входных параметров для разных пар ми-

шень-триггер выходных параметров — количество восстановленных вершин в области мишени ( $I$ ), ширина распределения первичной вершины ( $\sigma$ ) и время, требуемое для вычисления первичной вершины на данном диапазоне ( $T$ ).

В результате выполненного исследования определен набор параметров, позволяющий точнее вычислять координату первичной вершины взаимодействия по сравнению со стандартным набором параметров, используемых по умолчанию.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РФФИ №18-02-40104.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Kekelidze V. // J. Instrum. 2017. V. 12. P. 06012.
2. Baranov D. et al. // KnE Energ. Phys. 2018. V. 3. P. 291.
3. Baranov D. et al. // EPJ Web Conf. 2020. V. 226. P. 03003.
4. Kapishin M., Kolesnikov V., Vasendina V., Zinchenko A. // JINR News. No. 3. 2014.
5. Fruhwirth R. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1987. V. 262. P. 444.

## Optimization of the Primary Vertex Reconstruction Algorithm for the BM@N Experiments with Regard to Topology of Events

N. E. Kakhanovskaya<sup>1, \*</sup>, S. P. Merts<sup>2</sup>, and S. A. Nemnyugin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034 Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

\*e-mail: kakhanovskaya.natalia@gmail.com

Received December 24, 2020; revised February 24, 2021; accepted March 4, 2021

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) is the first working experiment performed on the NICA accelerating complex. It is a fixed target experiment. To this moment there have been seven runs of the experiment, most of which are technical. In 2018 the first run of the experimental facility with physics data collection took

place. One of the prerequisites for physics analysis of experimental data is the existence of the primary vertex position estimation. Current report describes the proposed algorithm to reconstruct the primary vertex using the virtual planes method. The results of this algorithm for different targets, beams and trigger conditions are presented. The sensitivity of presented method is considered.

*Keywords:* BM@N, BmnRoot, primary vertex, virtual planes method, kalman filter, events reconstruction, algorithm optimisation, parameter dependency analysis