



ИЯФ СО РАН

Координатные детекторы на основе газовых электронных умножителей в эксперименте ДЕЙТРОН



Научная конференция: Физика частиц при средних и высоких энергиях, Протвино, 2 – 5 июня 2026 года

Авторы: В. В. Гаузштейн, С. А. Зеваков, В. И. Иванов, В. Н. Кудрявцев, Т. В. Мальцев*, Д. М. Николенко, И. А. Рачек, Д. К. Топорков, А. И. Фикс, Ю. В. Шестаков, Л. И. Шехтман, А. В. Юрченко.

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН

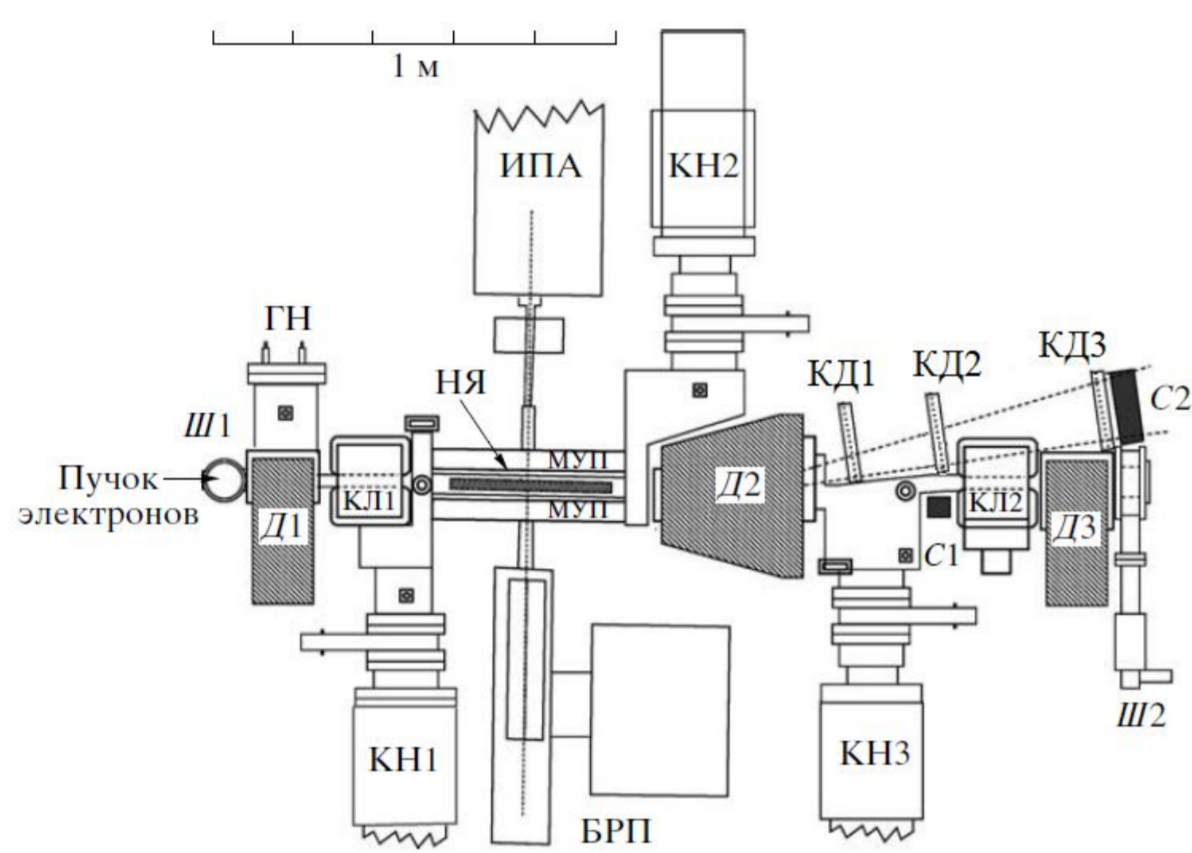
* e-mail: T.V.Maltsev@inp.nsk.su

Аннотация

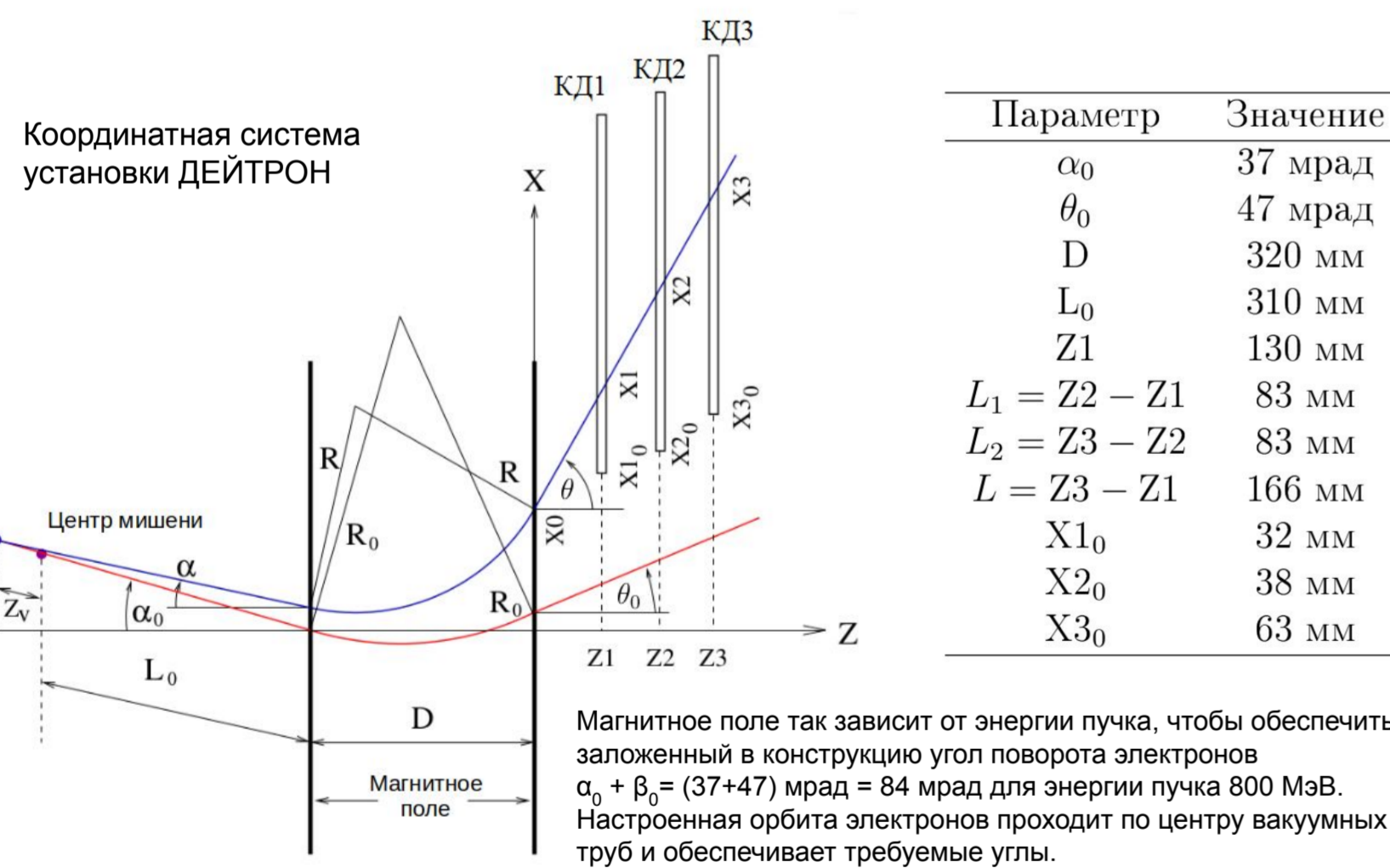
Эксперимент ДЕЙТРОН [1] проводится на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-3 в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера в Новосибирске. Физическая программа эксперимента включает изучение таких процессов, как упругое рассеяние электрона на дейтроне, фоторасщепление дейтрона [2] и фоторождение пионов на дейтроне [3] с измерением поляризационных наблюдаемых [4], сечений реакций и угловых распределений. В эксперименте пучок электронов с энергией 800 МэВ пролетает через газовую мишень, состоящую из поляризованных атомов дейтерия. Далее электроны отклоняются дипольным магнитом и регистрируются тремя координатными детекторами на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ) [5]. В докладе дано описание координатной системы и алгоритмов реконструкции треков, выполнена оценка углового и энергетического разрешения установки, проведено сравнение экспериментальных результатов с расчётами.

Установка ДЕЙТРОН

Установка ДЕЙТРОН располагается внутри экспериментального прямолинейного промежутка ВЭПП-3, состоит из внутренней газовой мишени, детекторов продуктов реакции (протонов, нейтронов, пи-мезонов) и системы мечения квази-реальных фотонов (СМФ) [6]. В состав СМФ входит три дипольных магнита Д1, Д2 и Д3 с соотношением интегралов магнитных полей 1.00:-2.27:1.27, и трековая система. Внутренняя мишень находится между первым и вторым магнитом. В направлении первоначального пучка располагается сцинтилляционный счётчик С1, который регистрирует тормозные гамма-кванты. Электроны, энергия которых уменьшилась в результате какой-либо реакции на мишени, и которые при этом сохранили направление движения, близкое к первоначальному, отклоняются от траектории пучка накопителя полем второго магнита и через специальное окно выводятся из вакуумной камеры второго магнита. Координатные детекторы на основе ГЭУ КД1, КД2 и КД3 определяют координаты пролёта этих электронов. После координатных детекторов располагается триггерный сцинтилляционный счётчик С2, который регистрирует электроны, прошедшие через эти координатные детекторы. Антисовпадения сцинтилляторов С1 и С2 позволяют подавлять большую часть событий тормозного излучения электронов на ядрах мишени.

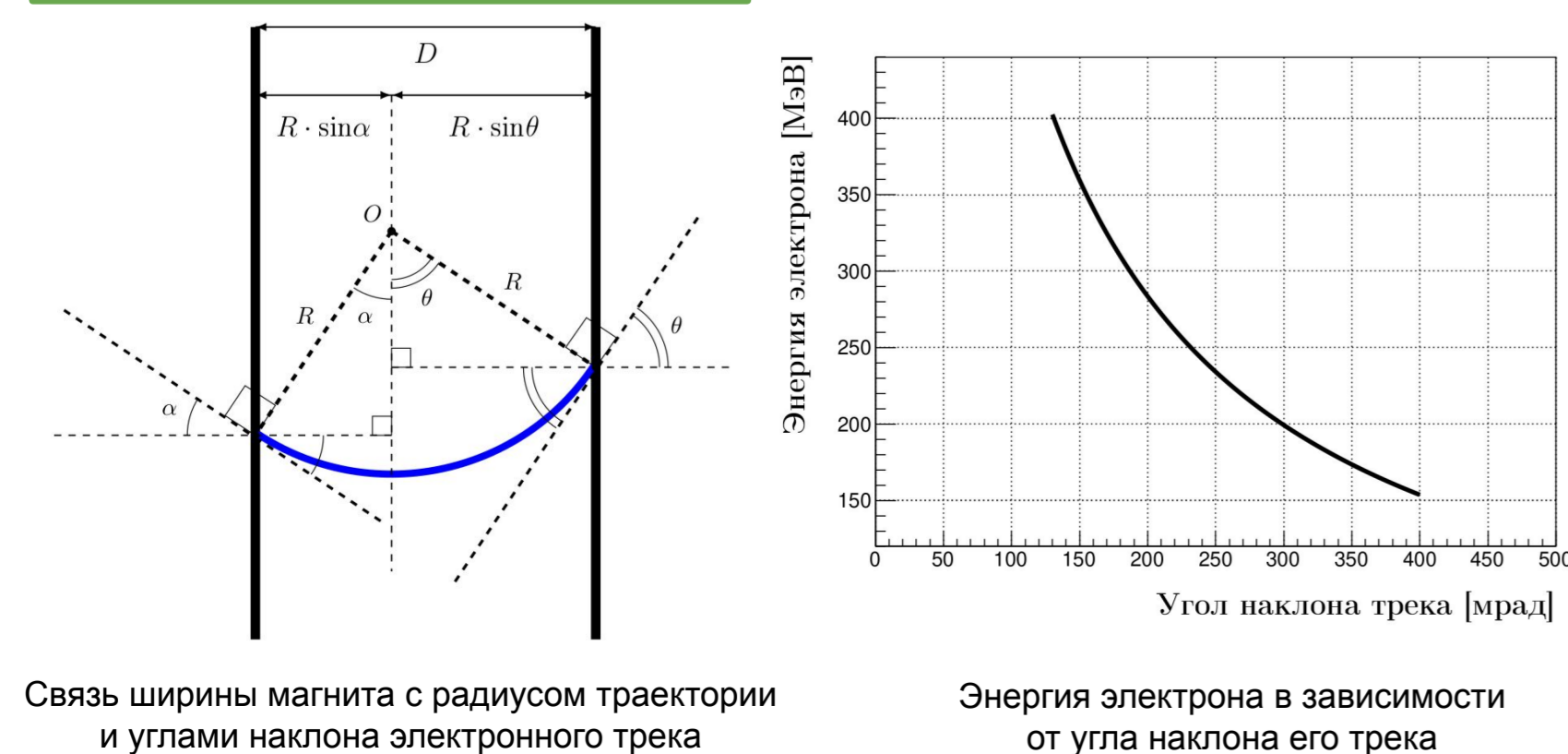


Установка ДЕЙТРОН. Вид сверху. Д1, Д2, Д3 – дипольные магниты; КД1, КД2 – квадрупольные линзы; МУП – магнит управления направлением поляризации мишени; КД1, КД2, КД3 – координатные детекторы; С1, С2 – триггерные сцинтилляционные счётчики; ИПА – источник поляризованных атомов; НЯ – накопительная ячейка мишени; БРП – поляриметр Брейта-Раби атомов струи ИПА; КН1, КН2, КН3, ГН – криогенные и геттерные насосы; Ш1, Ш2 – пролётные шиберы экспериментального промежутка.



Энергия регистрируемых электронов

Formulas for calculating the radius of the unperturbed orbit, the radius of electron motion, and the energy of the electron beam. Includes the relationship between the magnetic field and the radius of the trajectory.



Детекторы на основе ГЭУ

Внутри детектора находится четыре газовых промежутка, разделённых тремя ГЭУ, каждый из которых представляет собой каптоновую плёнку толщиной 50 мкм, покрытую с двух сторон медью толщиной 3 мкм. В этой структуре проделано множество отверстий с шагом 140 мкм и диаметром 80 мкм. При напряжении 360 В на каждом ГЭУ, коэффициент газового усиления детекторов достигает 2x10^4, а эффективность регистрации частиц находится на уровне 99% [7].

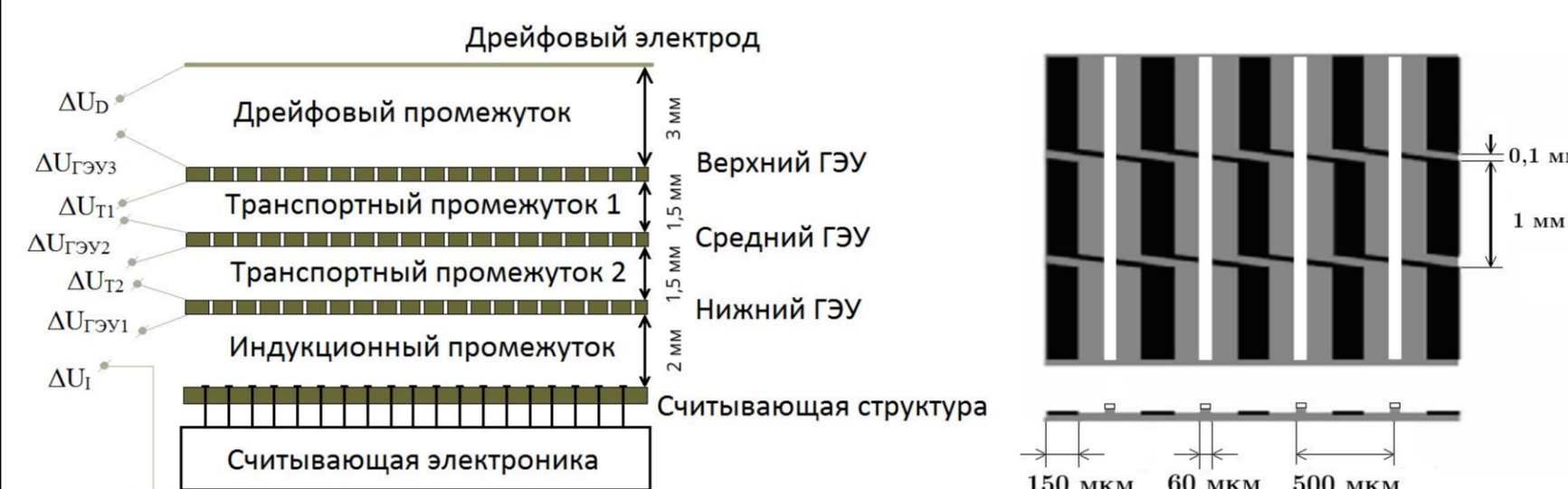
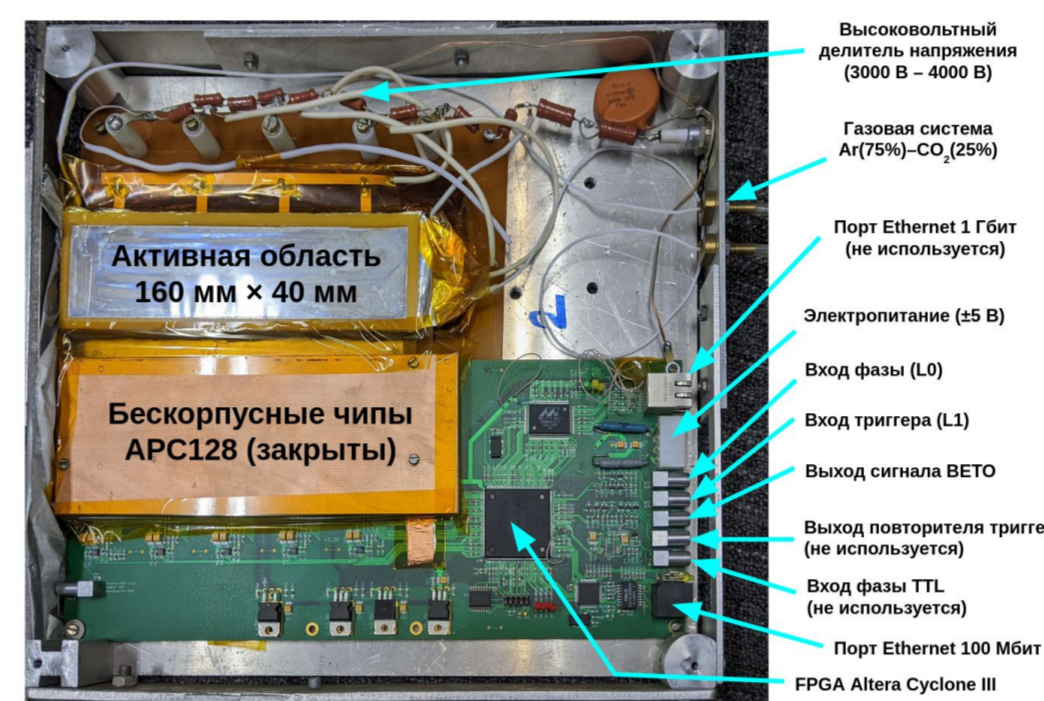


Схема детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ для установки ДЕЙТРОН.

Считывающая полосковая структура детекторов расположена на каптоновой фольге толщиной 50 мкм. Толщина меди на считывающей структуре равна 3 мкм. Считывающая структура состоит из двух слоёв, расстояние между которыми составляет 50 мкм. В верхнем слое расположены прямые полоски с шагом 500 мкм. Нижний слой содержит полоски шириной 150 мкм (стерео-полоски) и наклонные полоски. Полоски нижнего слоя разделены на короткие прямые секции, а наклонные перемычки так соединяют ближайшие прямые секции, что в среднем образуются полоски, наклонённые под углом 30° к прямым полоскам верхнего слоя. Считывающая структура детектора содержит 320 прямых и 320 наклонных полосок.

Угловое разрешение установки

Угловое разрешение установки Δθ – это погрешность измерения угла наклона трека θ. Угловое разрешение Δθ связано с энергетическим разрешением ΔE.

- многократное рассеяние регистрируемого электрона в материале детекторов;
- ограниченное собственное пространственное разрешение детекторов;
- точность геометрической выставки детекторов.

Вклад многократного рассеяния электронов в материале детекторов

Equation for the multiple scattering contribution to the angular resolution: sigma_theta-MS = sqrt(5) * sigma_MS1. The value of X/X0 is 0.30%.

Equation for the multiple scattering contribution: sigma_MS1 = (13.6 MeV / beta * pc) * sqrt(X/X0) * [1 + 0.038 * ln(X/X0)].

Вклад собственного разрешения детекторов оценивался из предположения о том, что главный вклад в измерение угла наклона трека обеспечивают крайние детекторы, так как именно крайние детекторы дают наибольшую базу измерения.

Equation for the detector resolution contribution: sigma_theta-Res = sqrt(2) * (sigma_detector / L).

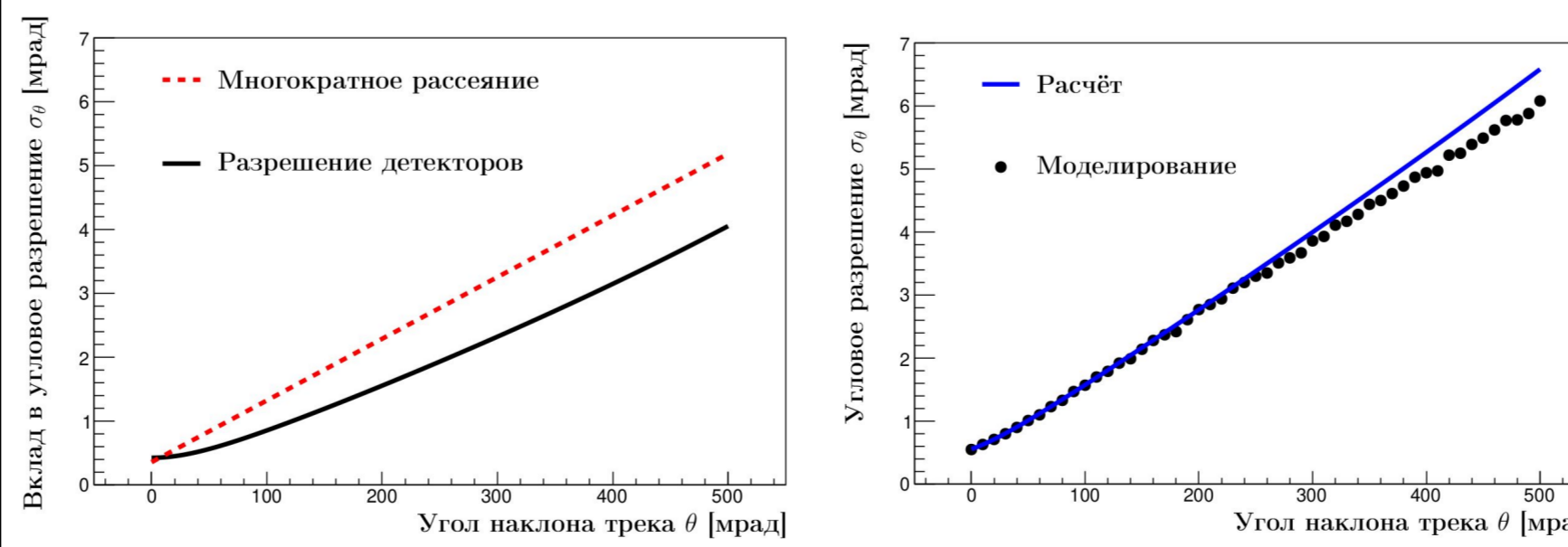
Пространственное разрешение в зависимости от угла наклона трека

d = 3 мм Толщина дрейфового промежутка

Equation for the detector resolution contribution: sigma_detector(theta) = sqrt(sigma_0^2(0) + (d * tan(theta) / sqrt(12))^2).

Совместный вклад многократного рассеяния и собственного разрешения детекторов

считался равным квадратичной сумме данных вкладов. Вклад многократного рассеяния превышает вклад разрешения детекторов. Также было проведено моделирование процесса измерения угла наклона трека. В моделировании трек восстанавливался по трём хитам в трёх детекторах. Работа центрального детектора приводит к улучшению углового разрешения при регистрации треков с углом наклона, превышающим 300 мрад.



Расчётные вклады многократного рассеяния и пространственного разрешения детекторов в угловое разрешение установки ДЕЙТРОН. Сравнение моделируемого и расчётного вклада совместного эффекта многократного рассеяния и пространственного разрешения детекторов в угловое разрешение установки ДЕЙТРОН.

Вклад геометрической точности выставки детекторов



Погрешность поворотной выставки детекторов φ = 1°. Полное угловое разрешение. Квадратичная сумма вычисленных вкладов является оценкой для полного углового разрешения установки.

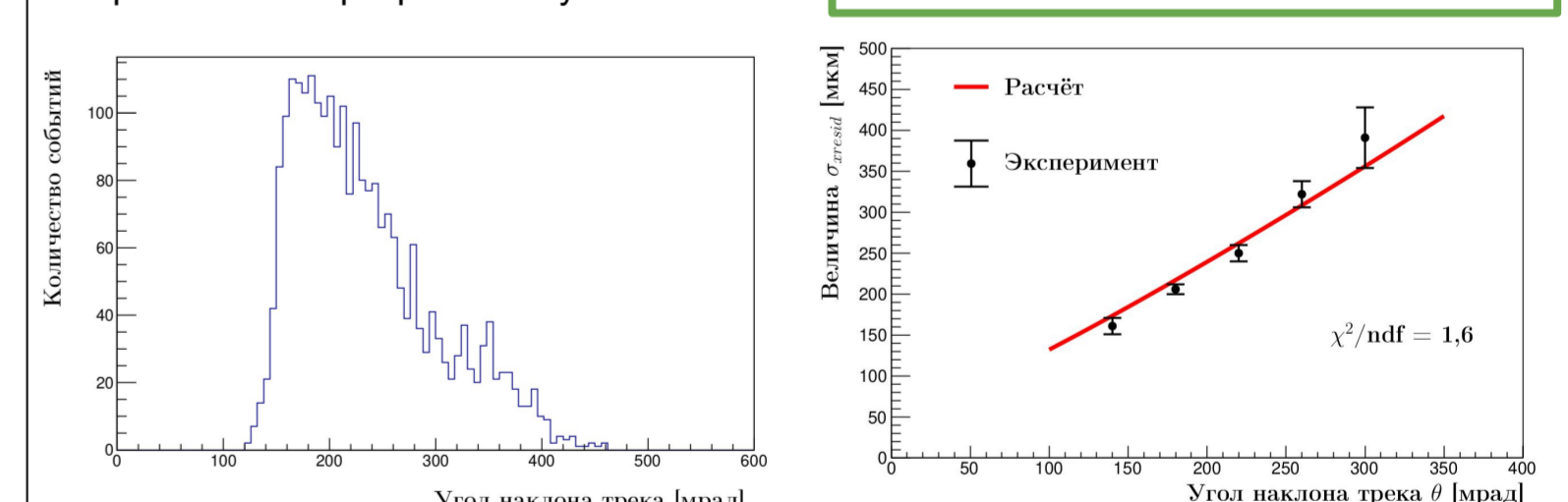
Table showing the angular resolution contributions for different detector alignment errors. It lists parameters like delta_theta_x, delta_theta_xy, delta_theta_yz, delta_theta_zx, delta_theta, and delta_theta/theta, along with their values for different deflection angles.

Энергетическое разрешение установки

Table showing the energy resolution of the setup. It lists parameters like E, delta E, and delta E/E, along with their values for different deflection angles.

Согласованность измерений и расчётов

Вычисление угла наклона трека в эксперименте проводилось путём аппроксимации трёх хитов прямой линией, где каждый хит являлся результатом измерения координаты трека соответствующим детектором. Сравнение экспериментального и расчётного значения sigma_xresid демонстрирует согласованность оценок для углового и энергетического разрешения установки.



Распределение событий по углу наклона трека. Стандартное отклонение распределения событий по координатной разности в зависимости от угла наклона трека.

Заключение

Выполнен расчёт углового и энергетического разрешения установки ДЕЙТРОН с тремя детекторами на основе ГЭУ в составе координатной системы. Проведён анализ данных с детекторов на основе ГЭУ, которые работали в эксперименте ДЕЙТРОН осенью 2021 года.

Угловое разрешение установки ДЕЙТРОН изменяется от 5% до 2% для регистрируемого угла наклона трека в диапазоне от 130 мрад до 400 мрад. Относительное энергетическое разрешение установки ДЕЙТРОН изменяется от 2% до 4% для энергии регистрируемых электронов в диапазоне от 150 МэВ до 400 МэВ.

Список литературы

List of references including papers on deuteron photodisintegration, polarization transfer, and detector development for the DEUTERON facility.