Оптимизация Магнитного Трекового Калориметра (MTC) для задач нейтринной физики и физики вне Стандартной Модели

В. В. Гуляева12, А. М. Анохина12

1Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

2Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Эксперимент SHiP (Search for Hidden Particles) на кольце SPS в CERN нацелен на поиск скрытых частиц, предложенных многочисленными теориями вне Стандартной Модели. SHiP является экспериментом с фиксированной мишенью с энергией налетающего пучка протонов 400 ГэВ [1]. Для поиска частиц легкой темной материи в SHiP планировалось использовать нейтринный детектор SND (Scattering and Neutrino Detector), состоящий из последовательности слоев пассивного материала, между которым размещены эмульсионные пластины и электронные трекеры, основанные на сцинтилляционных волокнах. Эта технология уже показала себя в эксперименте по изучению нейтринных осцилляций OPERA [2], а трекеры SciFi (Scintillating Fibres) используются в эксперименте LHCb. Основным преимуществом эмульсионного детектора является очень высокая разрешающая способность, что позволяет получить точную трехмерную реконструкцию события. Однако, использование эмульсий для реконструкции событий при длительной экспозиции и больших нагрузках вызывает определенные сложности. В данной работе предложен альтернативный вариант нейтринного детектора состоящий из слоев поглотителя и трекеров SciFi. В качестве материала абсорбера было выбрано железо с магнитным полем 1.7 Т, для трекеров SciFi были выбраны сине-излучающие сцинтилляционные волокна диаметром 250 мкм, волокно изготовлено из полистирола (PS) с двойной оболочкой из плексигласа (PMMA). Ядро волокна со спектросмещающей добавкой позволяет не только вызывать сцинтилляционную вспышку, но и транспортировать свет к SiPM.

Целью данной работы является иллюстрация возможностей подобного детектора на примере идентификации вторичных частиц нейтринных событий, и как следствие, определения энергии и аромата нейтрино, провзаимодействовавшего в детекторе. Под идентификацией в данном случае понимается определение энергии, импульса, знака заряда вторичных частиц, восстановление первой и второй вершины события. Модель так называемой легкой темной материи (light dark matter, LDM), одного из вариантов гипотетических массивных частиц скрытого сектора, предполагает, что взаимодействие LDM в детекторе происходит подобно процессам взаимодействия нейтрино по каналам нейтрально тока (NC) с рождением вторичных частиц, подобных тем, что рождаются при взаимодействиях нейтрино. Следовательно, можно предположить, что детектор, по показаниям которого распознаются нейтринные события, можно использовать и для поиска LDM.

Предполагается, что импульс частицы будет определяться по параметру s, c помощью которого описывается кривизна ее траектории в магнитном поле. Такого рода параметр s указан на рис.1 (а,в). Магнитное поле направлено по оси y детектора. Средняя траектория для 100000 мюонов с энергией 10 в плоскости xz показаны на рис.1. С помощью рис.1, можно оценить вклад многократного рассеяния при прохождении мюоном слоев железа.

A graph of a graph of different colored lines

AI-generated content may be incorrect.

Рис. 2. Траектория мюона с энергией 10 ГэВ в слоях детектора MTC (Magnetised Tracking Calorimeter) и рассмотренные варианты параметра кривизны S1, S2, S3.

Зависимость параметра кривизны s от энергии мюонов для диапазонов 10 - 50 ГэВ, см. рис.2, была использована для решения обратной задачи, т.е. для определения энергии по параметру кривизны. Средняя ошибка определения энергии составила около 12%.

A graph of a graph of a graph

AI-generated content may be incorrect.Рис. 2. Зависимости Энергия (E) - параметр кривизны (S), для различных параметров кривизны S1,S2,S3. Рассмотрены точки трека мюонов при пересечении слоев SciFi с номерами 0,8,16,24,32. Коричневыми линиями изображены аппроксимации полиномами второй степени. Во врезках указаны параметры аппроксимации

Показано, что выбранная конструкция детектора и методика реконструкции позволяют хорошо различить сигнальные события (тау-лептонное нейтрино) от фоновых. События неупругого взаимодействия нейтрино из спектра эксперимента SHiP на ядрах моделировались с помощью пакета GENIE [3], а вторичные частицы проходили через детектор в рамках пакета GEANT4 [4]. На основе методов машинного обучения (ML), обученных на кинематических переменных, был создан классификатор, способный точно различать различные типы событий.

A comparison of a blue and purple chart

AI-generated content may be incorrect.Рис. 3. Результат работы классификатора. Матрицы ошибок (confusion matrix) для двух вариантов распознования событий: a) тау-лептонное нейтрино (адронный канал) / мюонное нейтрино (NC) б) тау-лептонное нейтрино (лептонный канал) / мюонное нейтрино (СC) (слева).

Литература

1. Anelli M. [et al.] A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS //arXiv preprint arXiv:1504.04956. – 2015.

2. Acquafredda R. [et al.] The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam //Journal of Instrumentation. – 2009. – Т. 4. – №. 04. – С. P04018

3. Andreopoulos C. [et al.]. The GENIE neutrino monte carlo generator //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2010. – Т. 614. – №. 1. – С. 87-104.

4. Agostinelli S. [et al.] GEANT4—a simulation toolkit //Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Т. 506. – №. 3. – С. 250-303.