

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд, представен за присъждане на образователната и научна степен „доктор“ по Научна специалност: 4.1 Физически науки (Физика на елементарните частици и високите енергии)

Автор на дисертационен труд: **Симона Илиева Илиева**

Тема на дисертационен труд :

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СЕЧЕНИЕ ЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧРЕЗ ОТСЛАБВАНЕТО НА СНОП ПРОТОНИ С ИМПУЛС 31 GEV/C В 90 САНТИМЕТРОВА ГРАФИТНА МИШЕНА

Рецензент: проф. д-р Ваню Джанков Чолаков, ПУ „П. Хилендарски“

Симона Илиева е зачислена към катедра “Атомна физика” при Физически факултет на Софийски университет “Св. Климент Охридски” със заповед РД 20-912/27.06.2017 в редовна форма на обучение по професионално направление 4.1.Физически науки, докторска програма “Физика на елементарните частици и високите енергии”.

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Явлението осцилации на неутриното за три поколения лептони теоретично се описва с включването на три ъгъла на смесване, една Диракова фаза, свързана с нарушаването на CP симетрията в лептонния сектор, и две независими разлики между квадратите на масите на масовите състояния на неутриното. Стойностите на тези параметри се определят експериментално от вероятностите за преминаване на един аромат неутрино в друг. Получените резултати имат приложение и извън областта на осцилациите на неутриното. Като пример може да се посочи, че те задават ограничения в оценките на разликите между масите на неутриното в моделите за произхода на масата на тази частица. Освен в PMNS матрицата на смесване на неутриното, големината на Дираковата фаза е важен параметър и в моделите, обясняващи асиметрията между материя и антиматерия във Вселената. Един от експериментите с водеща роля в определянето на параметрите на осцилациите на неутриното е експериментът T2K (Токаї to Kamioka) . Той е неутринен експеримент с голямо прелетно разстояние. В него осцилациите на неутриното се наблюдават като разлика между предсказани и измерени неутринни добиви за даден аромат неутрино при далечния детектор, разположен на стотици километри от източника на неутрино. Началният сноп неутрино в T2K се генерира в разпадите на частици, получени при бомбардиране на 90 сантиметрова графитна мишена с протони ускорени до енергия 30 GeV.

Експериментите, свързани с научните изследвания в дисертационния труд, са проведени в Европейската организация за ядрени изследвания, CERN на експеримента NA61/SHINE. Анализът на данните е осъществен във Физически факултет на Софийски университет “Св. Климент Охридски”.

Представеният за рецензия дисертационен труд представя експериментално изследване на взаимодействията протон-въглерод с крайна цел определяне на сечението за взаимодействие тип продукция и съдържа 87 страници, 61 фигури и 14 таблици, разпределени в 5 глави. Библиографията обхваща 131 заглавия.

ГЛАВА 1 съдържа въведение във физиката на неутриното и описва явлението осцилации на неутриното. Представени са методите за получаване на снопове неутрино в лабораторни условия и е направен обзор на референтните изследвания на адрон-ядрените реакции, участващи в генерирането му. В тази глава са дефинирани основните задачи, които стоят за разрешаване от дисертанта: разработване на процедура за анализ на данни и Монте Карло, генериране на Монте Карло симулации и оценка на систематичните неопределености на резултата за сечението.

До този момент сечението за взаимодействие тип продукция в реакции $p + C$ е изследвано чрез бомбардиране на тънка (около 2 cm) мишена със сноп протони. Подобни изследвания се правят и в експеримента NA61/SHINE. При тях крайният резултат е силно зависим от моделирането на адрон-ядрените взаимодействия в мишената в симулациите, които са необходими за определянето на сечението от експериментално наблюдаемите величини. В настоящата работа са анализирани данни, получени отново на експеримента NA61/SHINE, но при фокусиране на сноп протони с импулс 31 GeV/c върху предната основа на графитен цилиндър с дължина от 90 cm. Използваната дълга мишена е копие на тази от експеримента T2K. В този случай методът за пресмятане на сечението за взаимодействие тип продукция се основава на изчисляването на вероятността протон да оцелее при преминаването си през мишената. Полученият резултат за сечението е сравнен с други такива и са направени изводи за влиянието му върху предсказанието на потока неутрино в T2K.

В ГЛАВА 2 се описва експеримента NA61/SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment (NA61/SHINE). Той е експеримент с фиксирана мишена, разположен в експерименталната част North Area на Европейската организация за ядрени изследвания CERN. В NA61/SHINE се използват снопове високоенергетични частици, получени от ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron). За мишени се използват както тънки, така и мишени-копия на тези от експериментите по осцилации на неутриното. В NA61/SHINE се изследват адрон-протонни, адрон-ядрени и ядро-ядрени взаимодействия чрез детектиране на продуктите от тези реакции. Изследователската програма на NA61/SHINE е насочена в три основни направления: изучаване на формирането на кварк-глюонната плазма и търсенето на критичната точка на преход между кварк-глюонна плазма и адронен газ; изучаване на адрон-ядрени взаимодействия с цел подобряване моделирането на широките атмосферни порои; изучаване на адрон-ядрени взаимодействия с цел определяне на сечения за взаимодействие и адронни добиви за подобряване предсказанията на неутринните потоци в експерименти като T2K и неутринните експерименти във Fermilab: MINERvA, NOvA и DUNE. Настоящата работа е част от направлението за адрон-ядрени изследвания в NA61/SHINE, свързани с T2K. В експеримента се използват както йонни, така и адронни снопове от ускорителя SPS. За референтните изследвания, свързани с експериментите по неутринни осцилации, се

използват адронни снопове. Те се получават от ускорените в SPS протони, които се транспортират на около 1 km до първична берилиева мишена. В експериментите провеждани в NA61/SHINE и свързани с T2K досега са използвани протонни снопове с енергия 31 GeV/c. Вследствие на взаимодействията в мишената се раждат вторични частици. Последните достигат до детектора на NA61/SHINE по транспортна линия. По тази линия се извършва селекцията по импулс на частиците чрез серия от магнити. В резултат, снопът се състои от различни по вид частици, но с приблизително еднакъв импулс като селекцията на типа адрони от снопа се извършва от детекторите на NA61/SHINE. Представеният в тази работа анализ е на данни от 2010 г. с мишена-копие на мишената от T2K. По тази причина е представено подробно описание на детекторната установка към тази година. Обърнато е особено внимание на разположението на различните видове детектори, техните характеристики и сигналите, получавани от тях. Типът на налитащите адрони се определя от два Черенковски детектора, като сигналите и от двата детектора са включени в тригера на частиците от снопа. Серия от сцинтилационни броячи, също са част от тригерната система и имат за цел да дефинират сноп с малка разходимост, насочен към мишената. В допълнение, траекторията на всяка частица от снопа се построява с помощта на информацията от три многонишкови пропорционални камери. В конкретното изследване е използвана мишена-копие на мишената от T2K. Тя представлява графитен цилиндър с дължина 90 cm, съответстваща на дължини 1.9 cm на взаимодействие, и радиус на основата 1.3 cm. Продуктите на реакциите в мишената се регистрират от 5 време-проеекционни камери (TPC). Две от тях са поставени в два свръхпроводящи диполни магнити, като по закривяването на траекторията на заредените частици в магнитното поле се определя техният импулс.

В тази глава подробно е описана методиката и са приведени резултатите от референтните измервания в NA61/SHINE на адронни добиви и сечения на взаимодействие. През 2007, 2009 и 2010 година на експеримента NA61/SHINE са проведени референти изследвания на адрон-ядрени реакции, свързани с генерирането на неутринния сноп в T2K като класификацията на видовете ядрени взаимодействия, която се използва в NA61/SHINE, съпада с тази, използвана в T2K. Използвани са протонни снопове с импулс 31 GeV/c и тънка графитна или мишена-копие на тази в T2K. Получените резултатите включват както диференциални адронни добиви и множествености, така и сечения за нееластично взаимодействие или взаимодействие тип продукция. Тези резултати, с изключение на последния, който е публикуван неотдавна, са постепенно прилагани в предсказанието на неутринния поток в T2K, което води до поэтапно намаляване на пълната неопределеност на предсказанието. При обработката на данни от 2007 и 2009 година, получени при бомбардиране на тънка мишена, е използван метод включващ въвеждането на няколко Монте Карло корекции. Тези корекции са свързани със заложените в генераторите сечения за различни видове взаимодействия и правят резултатите силно зависими от използваните модели на процесите в симулациите. Оказва се, че доминиращият компонент в пълната неопределеност на пресметнатите сечения е Монте Карло моделирането на адрон-ядрените процеси. За да се избегне този ефект, през 2010 година, една част от данните на NA61/SHINE с мишената-копие са регистрирани при максималното възможно магнитно поле в спектрометъра. Силното 9

Tm магнитно поле закривява високоенергетичните частици от снопа, които са оцелели при преминаването си през мишената към TPC детекторите. Тези частици са взаимодействали еластично или квази-еластично в дългата мишена. При дадените условия е възможно да се определи отслабването на потока частици при преминаването му през дългата мишена и чрез него да се пресметне сечението за взаимодействие тип продукция. При този подход зависимостта от моделирането на физичните процеси в симулациите е намалена до минимум. Причината е, че в пресмятанията се използва една Монте Карло корекция, свързана с ефективността на детекторите и реконструкцията на следите. Анализът на тези данни е описан в представената дисертация.

В ГЛАВА 3 е направено детайлно представяне на методиката и получените резултати при определяне на сечението за взаимодействие тип продукция в $p + C$ реакции при 31 GeV/c импулс на налитация сноп. Обработени са около 1.2 М събития регистрирани през лятото на 2010 година в експеримента NA61/SHINE при бомбардиране на 90 сантиметровата мишена-копие на тази от T2K с протони с импулс 31 GeV/c. Използвано е максималното магнитно поле в детекторната система на NA61/SHINE, което дава възможност частиците от снопа, които са взаимодействали еластично и квази-еластично в мишената, да бъдат регистрирани в TPC. Чрез определянето на техния дял от общия брой налитащи протони е пресметната вероятността протон да оцелее при преминаването си през дългата мишена. От тази вероятност е определено сечението за взаимодействие тип продукция. При изпълнението на тази изчистена задача е направен внимателен подбор на детектираните продукти на реакциите в мишената. Селекцията на TPC следите е основна. При определянето на сечението за взаимодействие тип продукция е използвана Монте Карло (МК) корекция, с която се ограничава влиянието на ефективността за регистрация и реконструкция на следите на частиците в детектора при анализа на данните. Такъв тип МК корекция е възприета като “стандартна” в NA61/SHINE и обикновено се използва при пресмятането на адронни добиви в референтните изследвания, свързани с неутринни експерименти. За сравнение, при определяне на сечения за взаимодействие с данни от измервания с тънка мишена, Монте Карло корекциите са няколко и включват оценки на заложените в генераторите сеченията за различни видове взаимодействия. Съответно получените резултати от измервания с тънки мишени имат силно изразена зависимост от избора на МК модел на взаимодействията. За да се изчисли МК корекцията в това изследване са направени симулации на събития с пакета Geant4 версия 10.4.p03. Референтният списък с физични модели на взаимодействията е QBVC, и е определена големината на корекцията. Тази корекция е приложена към вероятността за оцеляване и въвежда неопределеност на крайния резултат за сечението, свързана с избора на модел на взаимодействията в МК генератора. За изчисляването на тази неопределеност са използвани симулации с моделите, заложените в списъците FTFP_BERT и QGSP_BIC. В допълнение към симулациите с пакета Geant4 са направени такива и с генератора Fluka 2011.2c.5. В последния анализ на данни от NA61/SHINE с мишена-копие МК корекциите са пресметнати чрез този генератор. В T2K симулациите на адрон-ядрените взаимодействия в мишената се извършват с Fluka. Поради тези причини и Fluka генераторът е използван в настоящия анализ. Определена е пълната относителна

неопределеност на сечението. Един от основните източници на неопределеност са несинхронизираните с тригера закъснели частици. Те замърсяват сигнала от синхронизираната с тригера частица, тъй като продуктите, получени при взаимодействията на двете частици в мишената, не могат да бъдат разделени в TPC камерите. Това води до премахването от селекцията на част от оцелелите в мишената частици, които са били синхронизирани с тригера. Разработен и приложен е метод за количествено определяне на честотата на несинхронизирани с тригера частици. Сред другите главни източници на систематична неопределеност на резултата за сечението са зависимостта на софтуерната реконструкция на следите от прецизността на познаването на геометрията на детектора и неопределеността на измерването на плътността на мишената. Моделирането на процесите в симулациите не е доминантен фактор в пълната неопределеност на сечението за взаимодействие. Представената оценка за сечението за взаимодействие тип продукция е сравнена с предходни резултати на колаборацията NA61/SHINE и на други групи. Предстои представеният резултат да бъде използван за претеглянето на честотата на взаимодействията тип продукция в мишената при симулациите на неутринния поток в T2K.

В ГЛАВА 4 е формулирано заключението, че сечението за взаимодействие тип продукция може да се определи използвайки отслабването на начален сноп частици при преминаването му през мишена с известна дължина. Следвайки този подход са анализирани данни от експеримента NA61/SHINE, получени при бомбардиране на 90 сантиметрова графитна мишена-копие на тази от експеримента T2K с протонен сноп с импулс 31 GeV/c. Получената стойност за сечението за взаимодействие тип продукция е в добро съответствие с предходни измервания на колаборацията NA61/SHINE за $p + C$ взаимодействия при 31 GeV/c импулс на началния сноп, възпроизведени при използването на тънка мишена. Спрямо тях обаче, представеният нов резултат има по-малка неопределеност, от което следва, че за да се обясни несъответствието между предсказанията за неутринния поток при далечния детектор в T2K, получени с данни от тънка и мишена-копие, са необходими допълнителни проучвания на причините. Независимо от това, направената оценка на сечението за взаимодействие тип продукция е приложима към процедурата в T2K по претегляне на резултатите от симулациите на адрон-ядрените взаимодействия в мишената. По-малката неопределеност на представеното сечение в сравнение с предходни данни ще доведе и до по-малка неопределеност на предсказанието за неутринния поток, което е и основната цел на работата.

В ГЛАВА 5 са описани научните приноси на докторантката и получените резултати от нейната работата по темата в експеримента NA61/SHINE. Приведен е списъкът на публикации, както и списъкът на изнесените доклади на конференции във връзка с дисертационния труд.

Съдържанието на дисертацията показва, че Симона Илиева познава състоянието на проблема, с чието решение се е зела. Тя е работила под ръководството на ерудиран научен ръководител и в екип с голям опит в областта на експерименталната физика на елементарните частици, което е осигурило достъп до почти цялата специализирана

литература по проблемите. Обширният обзор, който е направила в първата глава на дисертацията, а така също и в началото на всяка следваща глава, свързана с решаване на конкретна научно изследователска задача показва добро познаване не само на физико-техническите, но и на теоретичните проблеми на съвременната физика на високите енергии. Всичко това ми дава основание да считам, че Симона Илиева напълно удовлетворява „образователния“ компонент на научната степен „доктор“.

Дисертационния труд обобщава работата извършена по изследването на взаимодействията протон-въглерод, наблюдавани в експеримента NA61/SHINE при бомбардиране мишена-копие на тази от T2K с протони с импулс 31 GeV/c.

Научните приноси на дисертацията се заключават в следното:

- Създадена е възпроизводима процедура за пресмятането на сечението за взаимодействие тип продукция чрез измерването на отслабването на начален снап частици при преминаването им през мишена с известна дължина.
- Направено е детайлно проучване на възможните систематични ефекти и произтичащите от тях неопределености при определяне на сечението, включително е оценена зависимостта от избора на модел на взаимодействията в Монте Карло генераторите.
- Предложен е метод за количествено определяне на честотата на несинхронизирани с тригера частици.
- Тествана е пълната последователност от софтуерни процедури при Монте Карло симулациите в NA61/SHINE. Няколко проблема са идентифицирани и решени в процеса. Част от коригираните софтуерни модули се използват и за реконструкцията на данни и са допълнително тествани преди и след калибровъчната процедура.

Всички публикации са в съавторство, от които е видно, че приносът на С. Илиева е значителен, изразяващ се в подготовка и анализ на данните с подходящ софтуер, интерпретация и описание на получените резултати. Формулираните приноси и публикациите по темата съответстват на изброените в дисертацията. Искам специално да отбележа, че експериментите по физика на елементарните частици и високите енергии са трудоемки, изискват усилията на много специалисти от различни професионални области и на практика в наши дни не могат да се осъществят от един човек. Като обобщение на приносите в представения дисертационен труд, може да се каже, че са проведени измервания с висока точност и е направен задълбочен анализ на експерименталните данни, в резултат на което са получени публикуваните научни резултати.

За значението на тези приноси трябва да съдим по физичните резултати, които ще се получават след редовната научноизследователска дейност на експеримента NA61/SHINE.

Оценката ми за личния принос на докторанта в изследванията, описани в дисертацията е косвена. След проведени разговори с нейния научен ръководител останах с впечатлението, че Симона Илиева проявява отговорност при изпълнение на задачите, умение за работа в големи колективи и за работа под напрежение, придобила е опит в представянето и защитата на резултатите си, както пред колаборацията, така и на международни форуми. В работата си тя се отличава с изключителна упоритост, диалогичност и коректност. Приема задачи и извън темата на докторантурата, отлично е положила изпитите си, справя се с воденето на семинарни и практични занятия със студенти. Анализът на данните, завършен с публикация във Phys. Ref. D през 2021 г., е заслуга изцяло на Симона Илиева. Убеден съм, че тя е придобила нужните знания, умения и навици, за да извършва самостоятелна научна работа и дисертационния труд, в който намира отражение опитът на един висококвалифициран екип от специалисти, се е превърнал в лично дело на докторантката.

Дисертацията се основава на 5 статии в списания с импакт – фактор и 3 доклада на международни и вътрешни конференции. Дисертантът отговаря изцяло на Препоръчителните изисквания на Физическия факултет на Софийския университет за придобиване на образователната и научната степен „доктор“.

Авторефератът на дисертацията е изготвен съгласно изискванията и отразява основните положения и научните приноси на дисертационния труд.

Нямам забележки по същество към текста на дисертацията и автореферата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на изтъкнатите в рецензията научни приноси на дисертационния труд убедено препоръчвам на Научното жури да присъди образователна и научна степен „доктор“ по професионално направление 4.1. Физически науки (Физика на високите енергии и елементарните частици) на СИМОНА ИЛИЕВА ИЛИЕВА.

26 Май 2021 г.

Пловдив

Рецензент:

/ Проф. д-р В.Д.Чолаков /