

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА»
Кафедра физики элементарных частиц**

Курсовая работа на тему:

Исследование трехмерной структуры нуклона с помощью
зависимых от поперечного импульса функций распределения
партонов (TMD PDF)

Выполнил:
Студентка 2 курса 203 группы
Селимова А.Р

Научный руководитель:
к. ф.-м. н., ст. н. с.
Апарин А.А

Москва, 2024

Оглавление

I. Введение.....	3
II. Теоретический обзор темы	
2.1 Структура нуклона.....	3
2.2 Краткие представления о квантовой хромодинамике.....	5
2.3 PDF(Parton distribution functions) - функции распределения партонов.....	6
2.4 Зависимость от поперечного импульса (TMD) в физике элементарных частиц.....	8
III. Экспериментальные данные	
3.1 Обзор экспериментальных данных PDF.....	12
3.2 Обзор экспериментальных данных TMD PDF.....	14
IV. Заключение	
2.3 Проблемы и нерешенные вопросы.....	17
3.2 Подведение итогов.....	19
IV. Список литературы.....	20

Исследование трехмерной структуры нуклона с помощью зависимых от поперечного импульса функций распределения партонов (TMD PDF)
Investigation of the three-dimensional structure of the nucleon using transverse momentum-dependent parton distribution functions (TMD PDF)

I. Введение

Вся окружающая нас материя состоит из атомов, которые, в свою очередь, состоят из электронных оболочек и ядер, состоящих из нуклонов: протонов и нейтронов. С точки зрения электромагнитного взаимодействия они являются разными частицами: протон имеет положительный заряд, а нейтрон - нейтральный, но относительно сильного взаимодействия эти частицы идентичны, именно поэтому их принято называть нуклонами.

Данная курсовая работа посвящена TMD PDF – важному инструменту исследований в физике частиц, который позволяет лучше понять внутреннюю структуру нуклонов и их взаимодействия.

II. Теоретический обзор темы

2.1 Структура нуклона

Как уже было сказано ранее, нуклон является составной частицей. Доказательство этого факта впервые получили в Национальной ускорительной лаборатории SLAC из экспериментов по глубоконеупругому рассеянию лептонов на нуклонах (Deep Inelastic Scattering, DIS). Теоретически, в работах

Франклина Янга и Мюррея Гелл-Мана была предложена концепция кварков в 1964 году. Они предположили, что нуклоны состоят из трех фрагментов, называемых кварками, но это предположение истинно лишь от части: на данный момент известно, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов. Кварки, которые определяют основные физические свойства частиц, называют валентными кварками. Помимо валентных кварков в составе адронов имеются виртуальные пары частиц - кварки и антикварки, которые испускаются и поглощаются глюонами на очень короткое время.

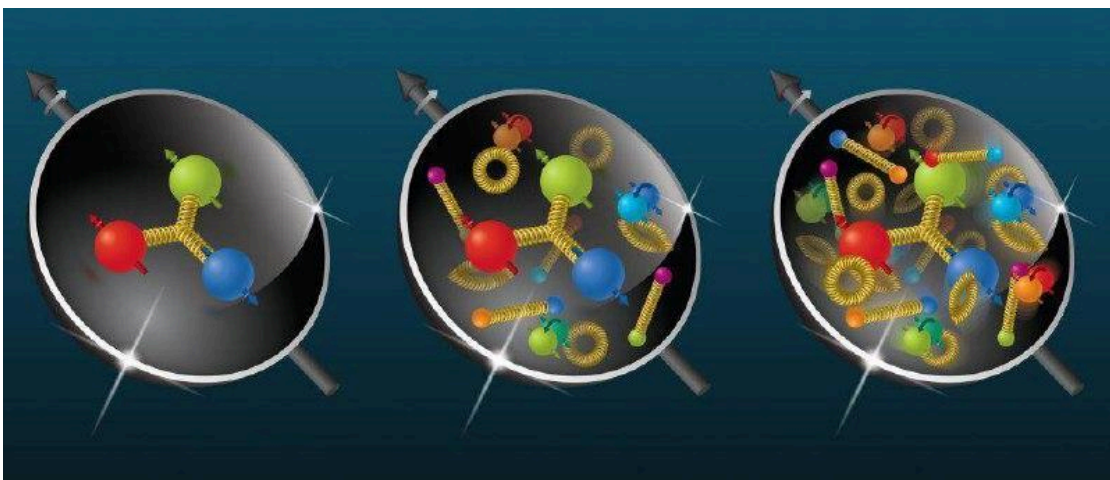


Рис.1 Взято из:Brookhaven National Laboratory

Таким образом можно описать партонную модель строения нуклона:

1. Нуклон состоит из партонов, частиц, в которых сосредоточена вся масса (внутренняя энергия) нуклона. Размер партонов $< 10^{-17}$ см.
2. Заряженные партоны имеют все характеристики кварков – их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$.
3. Глюоны, несут около половины внутреннего импульса (энергии) нуклона.
4. Валентные кварки окружены испускаемыми и поглощаемыми ими виртуальными глюонами, реализующими межкварковое сильное взаимодействие. Глюоны рожают виртуальные кварк-антикварковые пары, аннигилирующие затем вновь в глюоны. Эти виртуальные пары образуют множество морских кварков.

2.2 Краткие представления о квантовой хромодинамике

По современным представлениям квантовая хромодинамика (КХД) является основной теорией сильного взаимодействия, которая описывает взаимодействие между кварками и глюонами в адронах.

Основа КХД - понятие о “цвете”, в рамках теории, каждый кварк обладает внутренним квантовым числом - цветовым зарядом, который представлен в качестве трех возможных вариантов: “красный” (r), “зеленый” (g), “синий” (b) - антикваркам соответствуют антицвета: “антикрасный”, “антизеленый”, “антисиний”. Кварки - фундаментальные частицы, несущие цветовой заряд. Глюонам, бозонам, имеющим нулевую массу, спин 1 и отвечающим за передачу сильного взаимодействия соответствуют комбинации цвет-антицвет, причём эта комбинация, по аналогии с оптикой, бесцветна. При испускании и поглощении глюонов кварки (и глюоны) могут менять свой цвет, но сохраняют тип (аромат).

Основные принципы квантовой хромодинамики:

- Асимптотическая свобода: В отличие от электромагнитной и слабой сил, сила взаимодействия между кварками и глюонами уменьшается при увеличении энергии. Это означает, что на малых расстояниях (высоких энергиях) взаимодействие между кварками и глюонами становится слабым, что делает возможным изучение их свойств в рамках теории.
- Связывание кварков: Кварки не могут существовать свободно из-за явления конфайнмента. При попытке разделить кварки, энергия в системе увеличивается, и на определенном расстоянии образуются новые кварк-антикварковые пары, образуя таким образом адроны.

- Эволюция решетки: КХД описывает взаимодействие кварков и глюонов через эволюцию решетки, что позволяет анализировать их поведение на различных масштабах и энергиях.

2.3 PDF (Parton distribution functions) - функции распределения партонов

Функции распределения партонов – метод в физике элементарных частиц, направленный на изучение структуры партонов. Они позволяют найти вероятность нахождения партонов (кварков и глюонов) как функцию доли x импульса протона, который несет партон. Также, они представляют ключевую информацию о спиновой структуре адронов и взаимодействиях их составляющих - партонов. Одним из главных источников информации о PDF являются процессы глубоко неупругого рассеяния лептонов на нуклонах, а величины x и Q^2 являются основными характерными масштабами для изучения функций распределения партонов.

Партонную структуру нуклона лучше всего исследовать в таких процессах рассеяния, как глубоко неупругое рассеяние (DIS) лептонов (электронов, мюонов или нейтрино) на нуклонах, где лептон действует как зонд, который передает четырехкратный импульс с модулем q нуклону в столкновении. Нобелевская премия была присуждена Джерому Фридману, Генри Кендаллу и Ричарду Тейлору в 1990 году за их новаторский электрон-протонный эксперимент DIS в SLAC в 1966 году, который впервые предоставил доказательства партонной структуры нуклона.

В DIS разрешающая способность зонда составляет примерно \hbar/q , поэтому уровень обнаруживаемой структуры увеличивается с увеличением q . При $q=100$ ГэВ разрешение составляет примерно 0,002 Фм, чего достаточно для

исследования внутренней структуры нуклона. Удобно рассматривать систему, в которой нуклон мишени имеет очень большой импульс. В такой системе импульс партон почти коллинеарен импульсу нуклона, так что мишень можно рассматривать как поток партонов, каждый из которых несет долю x продольного импульса. Функции распределения партонов по импульсу внутри протона называются просто функциями распределения партонов (PDF), если направление вращения партонов не учитывается. Они представляют собой плотности вероятности. Для нахождения партон, несущего долю импульса x , в квадрате энергетической шкалы Q^2 ($=-q^2$). Эксперименты DIS показали, что число партонов увеличивается при низком x с увеличением Q^2 и падает при высоком x . При низких значениях Q^2 трехвалентные кварки становятся все более доминирующими в нуклоне. При высоких значениях Q^2 появляется все больше и больше пар кварк-антикварк, имеющих низкую долю импульса x . Они составляют морские кварки. Важным открытием экспериментов DIS является то, что кварки и антикварки несут только половину импульса нуклона, а оставшуюся часть переносят глюоны. Доля, переносимая глюонами, увеличивается с увеличением Q^2 .

Не существует общепринятого уникального набора функций распределения партонов. Есть несколько групп, которые конкурируют за лучшую параметризацию партонных распределений. Группы не используют одни и те же входные данные. Они различаются главным образом способом параметризации PDF, трактовкой тяжелых кварков и значением константы связи α_s , а также способом обработки экспериментальных ошибок и оценки теоретических ошибок.

Основной теоретический инструмент для точного прогнозирования результатов адронных коллайдеров, таких как Теватрон и БАК, это теорема факторизации КХД для дифференциального сечения произвольного жесткого процесса (в которых роль играют именно кварки и глюоны) при столкновении частиц **a** и **b**.

$$d\sigma_{ab}^{kl} \sim \int dx_i dx_j f_a^i(x_i, \mu^2) f_b^j(x_j, \mu^2) d\sigma_{ij}^{kl},$$

Где обозначает плотность распределения партонов i в адроне A , для j соответственно, x_i - отношения компоненты продольного импульса партона i к импульсу адрона A , μ - шкала жесткого взаимодействия,

$d\sigma_{ij}^{kl}$ - дифференциальное сечение жесткого подпроцесса $i + j \rightarrow k + l$

Кинематику процесса DIS можно описать следующими переменными: Q^2 — квадрат четырехимпульса, переданного протону при обмене; x — доля импульса протона, переносимая ударным кварком, y — доля энергии падающего лептона в системе покоя протона, которая теряется в столкновении. С точки зрения этих переменных сечение DIS с двойным дифференциалом записывается так:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{2\pi\alpha^2}{xyQ^4} [(1 + (1 - y)^2)F_2 - (1 - (1 - y)^2)x F_3 - y^2 F_L]$$

Эта формула верна для процессов нейтрального тока (NC), где обмениваемой частицей является фотон или Z -бозон. Для взаимодействий с заряженным током (CC) обмениваемой частицей является W -бозон.

2.4 Зависимость от поперечного импульса (TMD) в физике элементарных частиц

В физике высоких энергий, распределения поперечных импульсов (TMD) представляют собой распределения импульсов кварков и глюонов внутри партона, которые перпендикулярны передаче импульса между пучком и адроном. В частности, это распределения вероятности обнаружить внутри адрона партон с определенным поперечным импульсом, помимо доли продольного импульса x , TMD предоставляют информацию об ограниченном движении кварков и глюонов внутри адрона и дополняют информацию о

структуре адронов, предоставляемую вышеупомянутыми функциями распределения партонов. Также как и в случае с PDF, способ параметризации TMD PDF отличается у разных научных групп.

Они очень важны для описания поведения адронов в процессах при высоких энергиях, например, глубоконеупругое рассеяние(DIS), или процесс Дрелла-Яна(DY - адрон-адронное рассеяние при высоких энергиях, когда кварк одного адрона и антикварк другого адрона аннигилируют, создавая виртуальный фотон или Z-бозон, который затем распадается на пару противоположно заряженных лептонов).

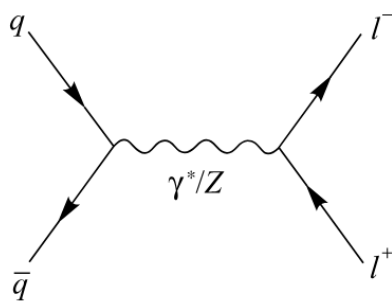


Рис. 1. Рождение пары лептонов в процессе Дрелла – Яна

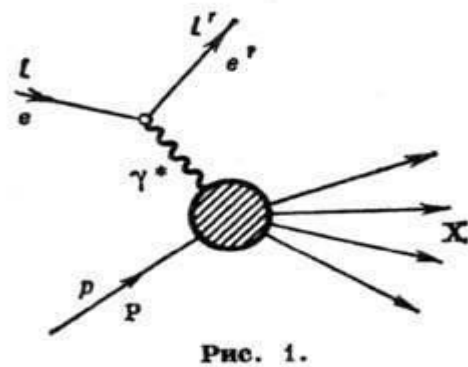


Рис. 2 Глубоконеупругое рассеяние

Факторизация (TMD PDF) включает разделение вкладов, возникающих из различных масштабов импульса в процессе рассеяния на высоких энергиях. TMD PDF необходимы для описания внутренней структуры адронов, особенно распределения частиц (кварков и глюонов) в них.

Концепция эволюции и масштабирования важна для понимания того, как поперечно зависимые функции распределения частиц (TMD PDF) изменяются при изменении факторизационной шкалы, которая характеризует энергетический масштаб процесса. Это связано с решениями уравнений ренормгруппы(математическое уравнение,

которое описывает, как меняются параметры теории при изменении масштаба энергии или расстояния) в контексте квантовой хромодинамики (QCD).

1. Эволюция TMD PDF при изменении факторизационной шкалы μ , TMD PDF изменяются в соответствии с уравнениями ренормгруппы, которые описывают изменение с каскадом различных масштабов импульса внутри адрона. Это приводит к изменениям формы и нормировки TMD PDF, которые могут быть предсказаны с помощью вычислений в рамках QCD.

2. Масштабирование относительно энергии процесса: TMD PDF также масштабируются относительно характерных энергий процесса, в котором они участвуют. Это означает, что форма и нормировка TMD PDF зависят от энергии рассеяния или от энергии рожденных частицы, что влияет на их интерпретацию и использование в физических моделях и экспериментах.

Понимание эволюции и масштабирования TMD PDF позволяет учитывать их изменения при анализе экспериментальных данных с различных факторизационных шкал и энергий, что является важным аспектом в моделировании и интерпретации физических процессов в рамках QCD.

Теорема факторизации для TMD PDF обычно включает две основные шкалы:

1. Жесткий масштаб(Hard scale): Этот масштаб связан с самим процессом жесткого рассеяния, когда высокоэнергетическая зондовая частица взаимодействует с частицей внутри адрона. На этом масштабе могут быть надежно применены вычисления в рамках квантовой хромодинамики (QCD). Жесткий масштаб обычно характеризуется передачей импульса Q или инвариантной массой конечных частиц.

2. Мягкий масштаб(Soft scale): Этот масштаб представляет собой внутренний импульс частиц внутри адрона и обычно значительно меньше жесткого масштаба. На этом масштабе преобладают непертурбативные эффекты

квантовой хромодинамики, и функции распределения частиц содержат вероятность обнаружения частицы с определенной долей продольного импульса x и поперечного импульса k внутри адрона.

Теорема факторизации утверждает, что при достаточно высоких энергиях и в подходящих кинематических областях TMD PDF можно факторизовать в произведение

жестких, мягких и коллинеарных функций:

$$f_{q/p}(x, k_{\perp}) = \sum_i \int dx' dz d^2\mathbf{p}_{\perp} \delta(x - x'z) J_i(z, \mathbf{p}_{\perp}) S_i(z, \mathbf{p}_{\perp}) f_{q/i}(x', \mu) D_{h/i}(z, \mathbf{p}_{\perp}, \mu),$$

где:

$f_{q/p}(x, k_{\perp})$ – TMD PDF, представляющая собой плотность вероятности обнаружения частицы с ароматом q в адроне p с продольной долей импульса x и поперечным импульсом k_{\perp} .

$f_{q/i}(x', \mu)$ – коллинеарные PDF, представляющие собой вероятность обнаружения частицы с вкусом q в частице типа i с долей продольного импульса x' при факторизационной шкале μ .

$D_{h/i}(z, \mathbf{p}_{\perp}, \mu)$ – функции фрагментации, описывающие вероятность того, что частица i фрагментирует в адрон h , неся долю z импульса частицы при шкале μ

$S_i(z, \mathbf{p}_{\perp})$ жесткий фактор, включающий физику процесса жесткого рассеяния

$J_i(z, \mathbf{p}_{\perp})$ мягкий фактор, содержащий непertурбативную информацию об адроне.

Факторизация позволяет проводить отдельные расчеты процесса жесткого рассеяния, функций распределения частиц и функций фрагментации, что облегчает моделирование и предсказание наблюдаемых величин в высокоэнергетических рассеивающих экспериментах.

III. Экспериментальные данные

3.1 Обзор экспериментальных данных PDF (Parton distribution functions)

Обзор распределения партонов в протоне показан на рисунках ниже в двух масштабах $Q=2\text{ГэВ}$ (рис. 1) и $Q=100\text{ГэВ}$ (рис. 2).

Рисунок 1: Обзор распределения партонов СТЕQ6М при $Q = 2 \text{ ГэВ}$ (Pumplin et al. 2002).

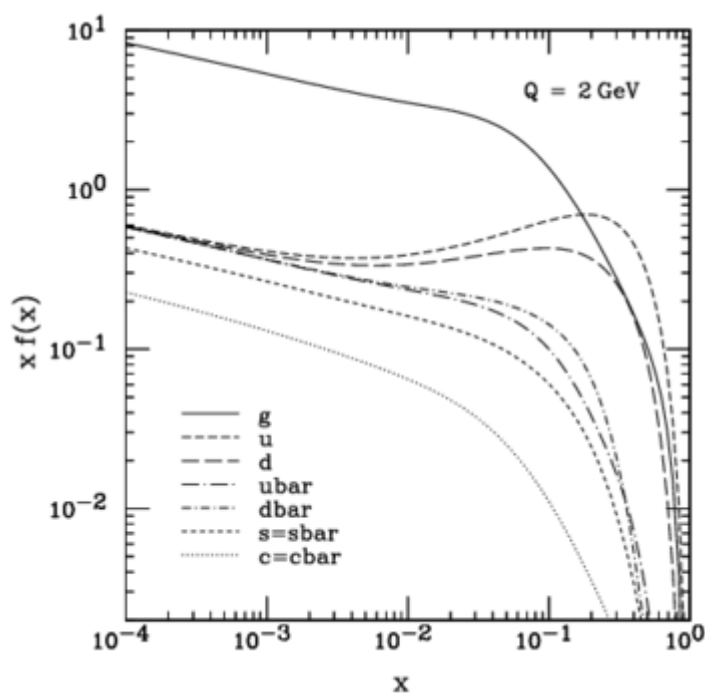
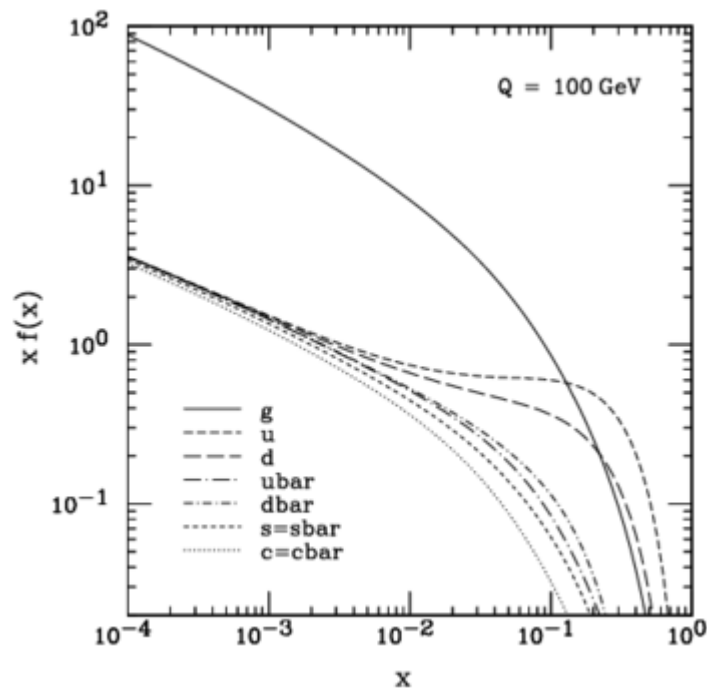


Рисунок 2: Обзор распределения партонов СТЕQ6М при $Q = 100$ ГэВ (Pumplin et al. 2002).

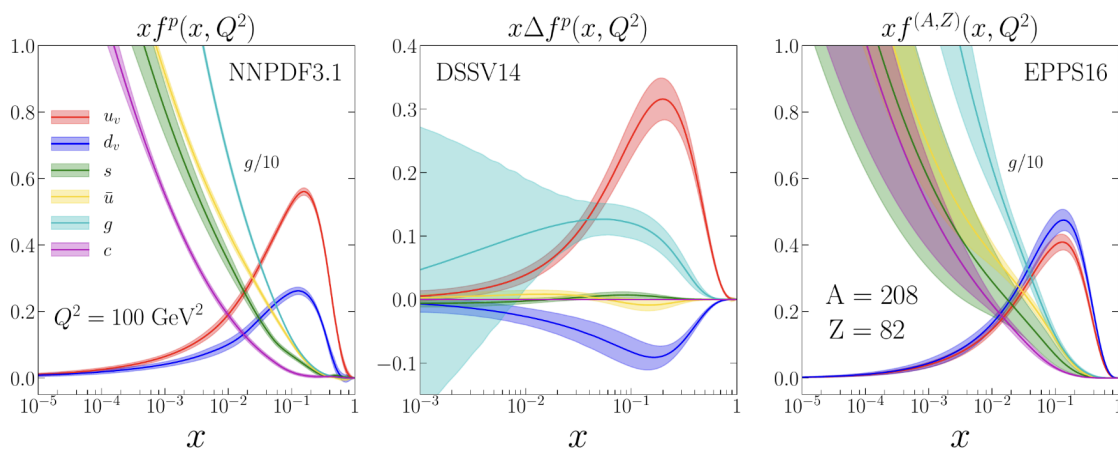


Как и ожидалось, при малых значениях Q^2 и больших значениях x выше 0,1 преобладающими распределениями являются u-кварки, более чем в два раза превосходящие по размерам d-кварки при высоких x и гораздо большие, чем тяжелые кварки. При низком значении x море не является симметричным. Странных кварков значительно меньше, чем верхних и нижних кварков. Плотность очарования равна нулю ниже порога очарования ($m_c = Q \approx 1,5$ ГэВ) и медленно увеличивается с увеличением энергии. При более высоких Q^2 (рис. 2) форма распределений кварков и глюонов быстро меняется при очень низких x . Море становится более симметричным, поскольку при низких значениях x эволюция не зависит от аромата, а морских кварков и глюонов становится все больше и больше. Рост плотности партонов при низких значениях x и высоких значениях Q^2 является фундаментальным предсказанием КХД, которое было четко подтверждено на электрон-протонном коллайдере HERA в DESY в 1993 году.

Вместе с тем, данные от Большого Адронного Коллайдера (БАК) могут добавить новые сведения о PDF. Всякие измерения на коллайдере всегда играли

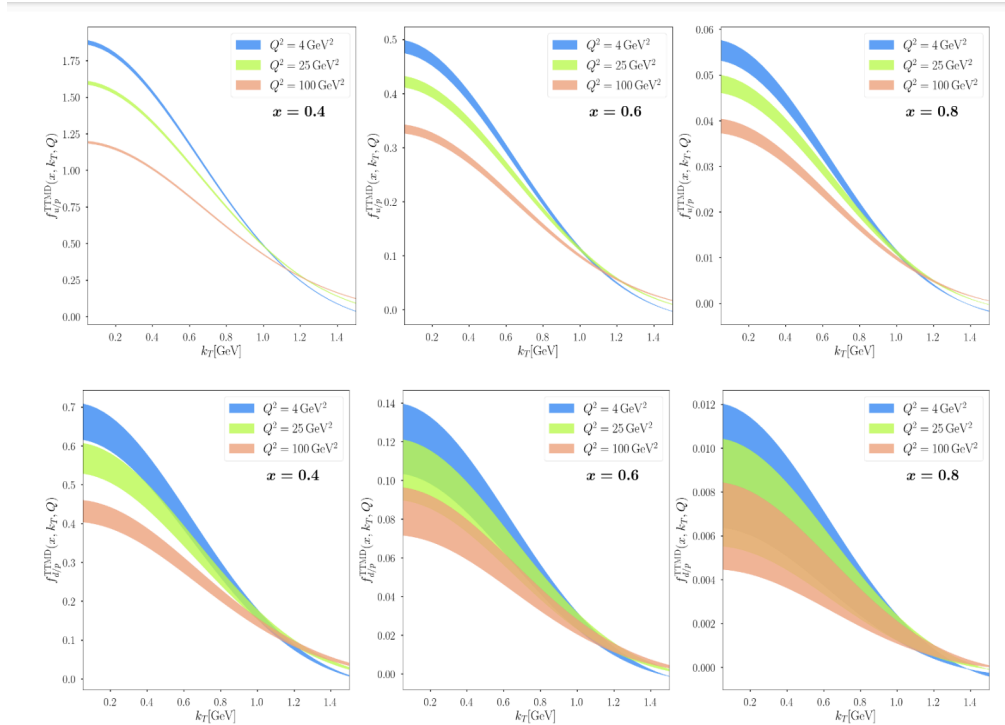
важную роль в составлении общих картин PDF. Например, информация об экспериментах Дрелла-Яна с фиксированной мишенью предоставляет уникальные данные о морских кварках с высокими значениями x . Данные о высокоэнергетичных струях от Теватрона дают прямую информацию о глюонах с высоким x . Сечения реакций W и Z на Теватроне, а также их распределения, дают нам информацию о распределении кварков, которая дополняет информацию из глубокого неупругого рассеяния. Возможно, аналогичные измерения на БАК приведут к улучшению нашего понимания PDF еще больше.

Данные DIS, DY и струйных процессов, используемые при аппроксимации PDF, охватывают широкий диапазон значений x и Q^2 . Данные HERA преимущественно находятся при низких значениях x , тогда как данные DIS с фиксированной мишенью и DY находятся при более высоких значениях x . Данные о струях коллайдера как на Тэватроне, так и на LHC сами по



себе охватывают широкий диапазон значений x и Q^2 и особенно важны при определении распределений глюонов высококого x .

3.2 Обзор экспериментальных данных TMD PDF(Transverse momentum dependent parton distribution functions)



На рис.1 изображено распределение поперечного импульса пороговых TMD PDF для кварка u (верхняя панель) и d (нижняя панель) в протоне для трех различных жестких масштабов и трех различных масштабов Бьоркена. На данном примере представлены параметризованные наборы CT18NNLO коллинеарных PDF, где параметризованные уравнения заданы при начальном масштабе $\mu_F = 1.3$ ГэВ.

3.3 Методы исследования

- **Использование метода Монте-Карло для изучения TMD PDF**

Для многих процессов существуют вычислительные методы, и многие из них реализованы в инструментах симуляции метода Монте-Карло (MC), таких как Powheg, Mc@nlo, aMc@nlo, которые объединяют вычисления порядка следующего за ведущим порядком частиц с частицами и адронизацией. Все эти симуляции требуют перераспределения кинематических переменных после генерации частиц, чтобы обеспечить сохранение энергии-импульса, что может привести к значительным

кинематическим сдвигам в продольной доле импульса x . Это происходит потому, что поперечный импульс генерируется начальным состоянием душ частиц, который не доступен при вычислении жёсткого рассеяния. В определенных областях фазового пространства эти продольные сдвиги могут существенно влиять на точность расчетов. Используя TMDs, этому кинематическому перераспределению можно избежать с самого начала, при условии, что TMDs включают поперечные импульсы, генерируемые эволюцией в рамках возмущений квантовой хромодинамики, которую в свою очередь можно оценить с помощью различных схем приближения.

Если для решения уравнения эволюции TMD используется метод монте-карло, дополнительным преимуществом является то, что решение уравнения эволюции можно непосредственно сопоставить с симуляцией частиц: кинематические распределения одинаковы, независимо от того, получены ли они из решения уравнения эволюции или из симуляции частиц. Хотя общего монте-карло метода на уровне TMD пока не существует, были представлены примеры таких алгоритмов для конкретных случаев. Например, Cascade - полный монте-карло генератор событий на уровне адронов, использующий TMDs, изначально разработанный для процессов с малым x в ep , теперь расширенный для средних и больших x и pp процессов.

Единая факторизация и эволюция для TMD PDF – это цель многих исследований в области физики высоких энергий, и значительный прогресс был достигнут в этом направлении. Тем не менее, единая схема, полностью охватывающая все аспекты TMD PDF, является сложной задачей из-за разнообразия явлений и масштабов, которые необходимо учитывать.

Основные подходы к факторизации и эволюции TMD PDF включают:

1. Факторизация Коллинза-Сопера-Стермана (CSS):

- Эта схема используется для анализа процессов, таких как глубоко неупругое рассеяние (DIS) и процесс Дрелла-Яна. Она учитывает ренормализационные эффекты и позволяет разделить твердые взаимодействия от длиннодействующих мягких взаимодействий.

- CSS-факторизация вводит функции эволюции для описания изменения TMD PDF с изменением масштаба.

2. Формализм Коллинза (Collins formalism):

- Он расширяет CSS-схему, вводя методы для учета поляризации и спиновой зависимости TMD PDF.

- Формализм Коллинза также включает в себя дополнительные элементы, такие как soft factors и rapidity divergence subtraction, для более точного описания процессов.

3. SCET (Soft-Collinear Effective Theory):

- SCET предоставляет эффективную теорию для факторизации процессов на различных масштабах. Она полезна для анализа процессов с широким диапазоном поперечных импульсов.

- SCET позволяет формально вывести TMD PDF и их эволюцию, интегрируя вклад от коллинеарных и мягких глюонов.

4. Калькуляция эволюции при помощи уравнений Ренорм-группы (Renormalization Group Equations, RGE):

- Включает использование уравнений для эволюции TMD PDF, таких как уравнения Докшицера-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи (DGLAP) и Бальдестера-Куранто-Фрадкина (BKJ) для продольных и поперечных импульсов соответственно.

- В рамках этих уравнений TMD PDF эволюционируют в зависимости от масштаба энергии, что позволяет учитывать изменения при разных значениях энергии.

Не смотря на то, что все эти подходы стремятся к общей картине TMD PDF, полностью единой схемы, охватывающей все аспекты, еще не достигнуто. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и применяется в зависимости от конкретных задач и условий эксперимента. Научное сообщество

продолжает работать над интеграцией различных подходов, чтобы создать более универсальную и точную модель для описания TMD PDF и их эволюции.

IV. Заключение

4.1. Проблемы и нерешенные вопросы

Представленная в курсовой работе тема является молодой и подающей большие надежды на будущие открытия, во многом, за счет этого факта имеется вопросов и нерешенных проблем.

Одно важное усовершенствование, необходимое для эволюции TMD, - это включение переходов между числом ароматов в полной эволюции TMD аналогично тому, что делается для коллинеарных PDF в формализме ACOT. Улучшения в непертурбативной теории в обработке TMD при низких значениях Q и низких q_T будут важны для феноменологии, поскольку теоремы факторизации дают мало детальных ограничений на эти трехмерные объекты.. Поскольку TMD описывают инклюзивные процессы, включая излучение мягких адронов, усилия по ограничению их будут иметь пользу от более детальных представлений о адронизации и фрагментации(описывает процесс превращения кварков и глюонов, содержащихся внутри протона, в конечные стабильные частицы, такие как пионы). Интересным примером применения теории фрагментации к TMD является использование струнной модели для описания механизма Коллинза в работе [4].

На данный момент существует множество других формализмов факторизации TMD (или формализмов, тесно аналогичных факторизации TMD), и, к сожалению, здесь невозможно подробно обсудить любой из них. Особенно активным подходом в последние годы является эффективная теория мягких коллинеарных частиц (SCET). Существует множество версий факторизации TMD, которые исходят из перспективы SCET. Другой подход к факторизации TMD - это подход Джи, Ма и Юаня.

Вероятно, на данном моменте можно понять, определив, есть ли и какие различия между различными формулировками факторизации TMD, или они фактически являются эквивалентными формулировками с различной нотацией и/или конвенциями для промежуточных шагов. Другие вопросы, которые следует учитывать, - это пределы малых и больших x , поправки более высокого порядка и отношение к эксклюзивному рассеянию (на выходе образуется определенный набор конечных частиц, исключительно связанных с взаимодействующими частицами, без каких-либо дополнительных частиц из окружающей среды).

Детальные теоретические рассмотрения показывают, что факторизация TMD должна разрушиться в некоторых процессах. Например, когда важны массы мишени и адрона, или когда распределение остаточных масс рассматривается детально, приближения, лежащие в основе факторизации TMD, уже не достаточны и требуются поправки. В таких случаях может быть необходимо сформулировать другие формы факторизации.

4.2 Подведение итогов

Феноменология TMD сделала огромный скачок от приближений модели частиц до N³LO (Это высокоточный уровень приближения в квантовой хромодинамике (QCD), который учитывает вклады логарифмических зависимостей в высших порядках расчетов.) за последнее десятилетие. Универсальные QCD-подгонки, включающие данные от SIDIS, DY, W^\pm/Z и pp рассеяния, были успешно выполнены. Феноменология TMD продолжает развиваться в глобальные анализы QCD данных с высоким порядком точности в рамках возмущений и будет использовать данные из различных процессов и установок. Методы машинного обучения и искусственного интеллекта уже применялись в таких типах подгонок и будут продолжать развиваться и

использоваться. Полная структура нуклона, вшитая в TMD, очень тесно связана с линейной структурой в коллинеарных распределениях, включая распределения twist-3, и в следующие годы ученые полагают наблюдать слияние обеих феноменологий. Новые точные экспериментальные данные позволят исследовать другие TMD, включая подчиненные TMD функции. Другие наблюдаемые величины и измерения станут доступными, что позволит феноменологии выйти за рамки привычного изображения и использовать распределения Вигнера. С грядущими новыми экспериментальными измерениями будут исследоваться глюонная и морская кварковая структура нуклона, а также ядерные модификации TMD. Экспериментальные программы будущих и существующих установок, таких как Electron Ion Collider, Jefferson Lab 12 GeV Upgrade, RHIC в BNL, COMPASS, в CERN, BELLE II в KEK, BES III в Пекине и LHC в CERN, будут огромным вкладом в наше понимание структуры адронов и прогресса феноменологии в целом, и структуры всей материи.

IV. Список литературы

- [1] Строковский Е. А. Лекции по основам кинематики элементарных процессов : учебное пособиею. 2010
- [2] R. Angeles-Martinez, A. Bacchetta, I.I. Balitsky, Transverse momentum dependent (TMD) parton distribution functions: status and prospects. 2015
- [3].Ted C. Rogers. An Overview of Transverse Momentum Dependent Factorization and Evolution 2015
- [4] X. Artru, J. Czyzewski, and H. Yabuki. Single spin asymmetry in inclusive pion production, Collins effect and the string model. Z. Phys. 1997.
- [5] Study of the Transverse-Momentum-Dependent structure of the nucleon in Semi-Inclusive DIS
- [6] S. Kumano, Qin-Tao Song, Transverse-momentum-dependent parton distribution functions for spin-1 hadrons. 2021
- [7] Xiangdong Ji, Yizhuang Liu, Transverse-momentum-dependent parton distribution functions from large-momentum effective theory. 2020
- [8]CTEQ Collaboration, S. Kretzer *et al.*, «CTEQ6 Parton Distributions with Heavy Quark Mass Effects» (2004).
- [9] P. J. Mulders and J. Rodrigues (2001) “Transverse momentum dependence in gluon distribution and fragmentation functions”