

На правах рукописи

САЛЬНИКОВ Сергей Георгиевич

**СПИНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ЭЛЕКТРОН-ПРОТОННОМ
И НУКЛОН-АНТИНУКЛОННОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

МИЛЬШТЕЙН – доктор физико-математических наук,
Александр Ильич профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

НИКОЛАЕВ – доктор физико-математических наук,
Николай Николаевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, г. Черноголовка, ведущий научный сотрудник.

ШАТУНОВ – доктор физико-математических наук,
Юрий Михайлович профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ – Новосибирский государственный
ОРГАНИЗАЦИЯ университет, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2013 г.
в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее время активно обсуждаются эксперименты с поляризованными частицами. Например, большое значение имеют эксперименты по рассеянию поляризованных антипротонов на поляризованных протонах, для чего была создана коллаборация PAX. Такие эксперименты позволят измерить некоторые наблюдаемые, недоступные для измерений другими способами. К примеру, в процессе Дрелла-Яна ($p\bar{p} \rightarrow p\bar{p} + l^+l^-$) можно измерять такую важную партонную функцию, как поперечность валентных кварков в протоне, а в процессе аннигиляции ($p\bar{p} \rightarrow e^+e^-$) можно измерить амплитуды и относительную фазу электрического и магнитного формфакторов протона во времениподобной области. Для реализации запланированной физической программы необходимо научиться получать пучки поляризованных антипротонов. В качестве основного способа поляризации антипротонов рассматривается спиновая фильтрация на поляризованной мишени. Метод спиновой фильтрации заключается в том, что при рассеянии на поляризованной мишени скорости выбывания из пучка частиц с различными направлениями спина отличаются, таким образом, пучок приобретает поляризацию. Этот метод был успешно опробован в эксперименте FILTEX на протонах с энергией 23 МэВ и позже в накопителе COSY на протонах с энергией 49 МэВ. Было показано, что за несколько часов можно получить поляризацию протонного пучка на уровне 5%. Возможность применения метода спиновой фильтрации к поляризации антипротонов предлагается проверить на AD-ring в CERN, а проведение запланированной программы исследований предполагается на базе накопителя HESR ускорительного комплекса FAIR.

Теоретическое описание кинетики поляризации при рассеянии, как правило, проводят следующим образом. Если пучок изначально был неполяризован, то конечная поляризация выражается через два аксиальных вектора: $\vec{\zeta}_T$ и $\vec{v} \left(\vec{\zeta}_T \cdot \vec{v} \right)$, где $\vec{\zeta}_T$ – поляризация мишени, а \vec{v} – скорость пучка. Ограничиваясь рассмотрением эволюции поляризации в случае, когда поляризация мишени параллельна либо перпендикулярна оси пучка, мы видим, что поляризация пучка всегда параллельна поляризации мишени.

При такой постановке задачи рассмотрение кинетики поляризации существенно упрощается, так как можно ввести ось квантования, направленную по поляризации мишени, и рассматривать изменение числа частиц с определённой проекцией спина на данную ось. Однако, если направления поляризаций произвольны, то возможно вращение поляризации, которое не может быть описано в таком подходе. Эффекты, связанные с поворотом поляризации представляют определённый интерес, например, при изучении рассеяния поляризованных нейтронов в среде. Обобщение кинетических уравнений на случай, когда направления поляризаций и скорости произвольны, представляет собой нетривиальную задачу, так как в этом случае необходимо рассматривать эволюцию матрицы плотности. Ранее уже были предложены разные способы вывода кинетического уравнения общего вида, однако они довольно сложны. Кроме того, не был проведён детальный анализ решений кинетического уравнения.

Цель работы состоит в получении уравнения, описывающего эволюцию поляризации частиц в процессах рассеяния, и применении этого уравнения к различным задачам, таким как электрон-протонное и протон-антипротонное рассеяние.

Основное внимание уделяется рассмотрению полученного уравнения в случае рассеяния двух частиц со спином $1/2$ и анализу решений этого уравнения. Другая важная задача — изучение кинетики поляризации в протон-антипротонном и дейтрон-антипротонном рассеянии с помощью неймегенского оптического потенциала.

Личный вклад автора

Изложенные в работе результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

Научная новизна

Предложен новый способ вывода уравнений эволюции для величин, построенных из операторов спинов частиц, а также соотношения унитарности для амплитуды рассеяния. Впервые получен общий вид уравнения эволюции для поляризации спиновой частицы при рассеянии на бесспиновой и спиновой частицах и проанализированы его общие решения. Получено уравнение, описывающее кинетику поляризации в нуклон-(анти)нуклонном рассеянии, и впервые рассмотрено его общее решение.

В работе получены аналитические выражения для коэффициентов кинетического уравнения в случае электрон-протонного рассеяния в нерелятивистском случае. Впервые вычислены зависящие от спина части сечения и коэффициенты кинетического уравнения для антипротон-протонного и антипротон-дейтронного рассеяния с помощью неймегенского потенциала.

Научная и практическая ценность

Предложенный способ вывода кинетических уравнений существенно упрощает получение уравнений эволюции для величин, построенных из операторов спинов частиц. В работе проведено детальное рассмотрение кинетического уравнения для поляризации в случае рассеяния двух частиц со спинами $1/2$. Получены формулы, выражающие коэффициенты кинетического уравнения через амплитуду рассеяния в случае, когда выбыванием частиц из пучка можно пренебречь, а также в том случае, когда выбывание частиц важно. Таким образом, зная амплитуду рассеяния, можно сразу написать уравнение эволюции и его решение.

Полученные кинетические уравнения могут быть использованы для описания эволюции поляризации частиц в процессах рассеяния. Например, можно предсказать время, необходимое для поляризации пучка, вычислить угол поворота поляризации частицы при прохождении через вещество, а также величину тензорной поляризации дейтрона после рассеяния.

В работе рассмотрены различные способы получения пучка поляризованных антипротонов. Показано, что поляризация антипротонов путем рассеяния на поляризованных позитронах невозможна за разумное время. Полученные с помощью неймегенской модели предсказания для сечения протон-антипротонного рассеяния говорят о том, что спиновая фильтрация на поляризованной водородной мишени может обеспечить необходимую поляризацию антипротонов за время порядка суток. Фильтрация на дейтериевой мишени позволит получить такую же поляризацию за меньшее время.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Получение кинетического уравнения для величин, построенных из операторов спинов. Предложен новый способ, существенно упрощающий получение уравнений эволюции. Детально проанализиро-

ваны уравнения, описывающие эволюцию поляризации спинорной частицы при рассеянии на бесспиновой и спинорной частицах, получены общие решения. Получено обобщение уравнения с учётом выбывания частиц из пучка.

2. Аналитическое вычисление коэффициентов кинетического уравнения для поляризации в случае ep рассеяния. Взаимодействие электрона с протоном описывается с помощью гамильтониана Брейта.
3. Исследование эволюции поляризации антипротонного пучка при рассеянии на поляризованной водородной и дейтериевой мишенях. Амплитуда $\bar{p}p$ рассеяния вычислена с помощью неймегенского нуклон-антинуклонного потенциала, а для описания рассеяния на дейтроне использовалось приближение Глаубера-Ситенко. Получены предсказания для степени поляризации антипротонов в этих процессах.

Апробация диссертации

Материалы диссертации докладывались на Международной конференции «19th International Spin Physics Symposium» в 2010 г. (Юлих, Германия), на Семинаре теоретического отдела ИЯФ СО РАН в августе 2013 г. и опубликованы в научных журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, приложения, изложена на 87 страницах и содержит 56 наименований библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность поставленной научной задачи — получения кинетического уравнения для поляризации.

В первой главе выводится уравнение эволюции для среднего значения оператора, построенного из операторов спинов частиц, в процессах рассеяния без учета выбывания частиц. Уравнение эволюции имеет вид

$$\frac{d}{dt} \langle \mathcal{O} \rangle = vN \text{Sp} \left\{ \rho(t) \left[\int d\Omega_{\vec{n}} F^+ \mathcal{O} F - \frac{2\pi i}{k} \left(F^+(0) \mathcal{O} - \mathcal{O} F(0) \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где \mathcal{O} — оператор, независимый от импульсов и координат частиц, v — носительная скорость, N — плотность частиц в см^{-3} , ρ — спиновая матри-

ца плотности системы, k – импульс в системе центра масс, F – амплитуда рассеяния, являющаяся оператором в спиновом пространстве.

Сначала рассматривается эволюция поляризации спиновой частицы при рассеянии на бесспиновой частице и показывается, что в процессе деполяризации поляризация будет менять не только величину, но и направление. Затем получено уравнение для поляризации при рассеянии на спиновой частице в виде

$$\frac{d}{dt}\vec{\zeta}_1 = A_1\vec{\zeta}_1 + B_1\left(\vec{n}_0 \cdot \vec{\zeta}_1\right)\vec{n}_0 + A_2\left[\vec{\zeta}_1 \times \vec{\zeta}_2\right] + B_2\left(\vec{n}_0 \cdot \vec{\zeta}_2\right)\left[\vec{\zeta}_1 \times \vec{n}_0\right] + A_3\vec{\zeta}_2 + B_3\left(\vec{n}_0 \cdot \vec{\zeta}_2\right)\vec{n}_0, \quad (2)$$

где $\vec{\zeta}_1, \vec{\zeta}_2$ – поляризации частиц, \vec{n}_0 – направление оси пучка, A_i, B_i – коэффициенты, выражающиеся через амплитуду рассеяния. В работе рассмотрены некоторые частные решения кинетического уравнения (2), и показано, как можно получить общее решение. Доказано, что все решения этого уравнения стремятся к некоторому конечному значению поляризации. Отдельно рассмотрено приближенное решение уравнения в случае, когда амплитуда рассеяния слабо зависит от спинов. Такое приближение применимо, по крайней мере, к рассеянию частиц, взаимодействующих только электромагнитным образом, так как в этом случае основной вклад в амплитуду рассеяния дает кулоновский потенциал, не зависящий от спинов. При этом оказывается, что выполняется сильное неравенство $A_2, B_2 \gg A_1, B_1, A_3, B_3$, и решение уравнения принимает более простой и наглядный вид.

Вторая глава посвящена применению полученного кинетического уравнения к описанию кинетики поляризации в нерелятивистском электрон-протонном рассеянии. Для вычисления амплитуды рассеяния используется гамильтониан Брейта

$$H = -\frac{\alpha}{r} - \frac{\alpha\mu_0}{2m_em_p} \frac{\vec{L} \cdot \vec{\sigma}_1}{r^3} - \frac{\alpha\mu_0}{4m_e^2} \frac{\vec{L} \cdot \vec{\sigma}_2}{r^3} + \frac{\alpha\mu_0}{4m_em_p} \left\{ \frac{3(\vec{\rho} \cdot \vec{\sigma}_1)(\vec{\rho} \cdot \vec{\sigma}_2) - (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2)}{r^3} + \frac{8\pi}{3} \delta(\vec{r}) (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) \right\}, \quad (3)$$

где α – постоянная тонкой структуры ($\hbar = c = 1$), $\mu_0 = 2.79$ – гиромагнитное отношение для протона, m_p и m_e – массы протона и электрона

соответственно, \vec{L} – оператор орбитального момента электрона, $\vec{\sigma}_1$ и $\vec{\sigma}_2$ – операторы спина протона и электрона соответственно, $\vec{\rho} = \vec{r}/r$. В работе получено аналитическое выражение для коэффициентов кинетического уравнения (2) A_i , B_i , и рассмотрены два предельных случая: борновское приближение (параметр Зоммерфельда $\xi = -\alpha/v \rightarrow 0$) и случай малой относительной скорости частиц ($\xi \rightarrow -\infty$). Показано, что сечение переворота спина пропорционально ξ^2 в пределе малых скоростей, как и ожидалось. Несмотря на это, даже при малых скоростях, использование этого процесса для поляризации антипротонов невозможно, так как время поляризации оказывается слишком большим при доступных сегодня параметрах пучков.

Третья глава посвящена исследованию протон-антипротонного и дейтрон-антипротонного рассеяния. Кинетическое уравнение, полученное в первой главе, обобщено на случай, когда выбывание частиц из пучка играет важную роль. В этом случае уравнение может быть записано в виде

$$\frac{d}{dt} \langle \mathcal{O} \rangle = vN \text{Sp} \left\{ \rho(t) \left[\int_{\vec{n} \in \Gamma} d\Omega_{\vec{n}} F^+ (\mathcal{O} - \langle \mathcal{O} \rangle) F - \frac{2\pi i}{k} \left(F^+(0) (\mathcal{O} - \langle \mathcal{O} \rangle) - (\mathcal{O} - \langle \mathcal{O} \rangle) F(0) \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

где Γ – область интегрирования, соответствующая тому, что частицы после рассеяния остаются в пучке, то есть угол рассеяния меньше угла акцептанса.

Написаны уравнения, описывающие эволюцию поляризации и числа частиц в пучке в случае протон-антипротонного рассеяния. Уравнение для поляризации антипротонов в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{\zeta}_1 = & A_1 \left((\vec{\zeta}_1 \cdot \vec{\zeta}_2) \vec{\zeta}_1 - \vec{\zeta}_2 \right) + B_1 \left(\vec{n}_0 \cdot \vec{\zeta}_2 \right) \left((\vec{\zeta}_1 \cdot \vec{n}_0) \vec{\zeta}_1 - \vec{n}_0 \right) \\ & + A_2 \left[\vec{\zeta}_1 \times \vec{\zeta}_2 \right] + B_2 \left(\vec{n}_0 \cdot \vec{\zeta}_2 \right) \left[\vec{\zeta}_1 \times \vec{n}_0 \right], \quad (5) \end{aligned}$$

где $\vec{\zeta}_1$ и $\vec{\zeta}_2$ – поляризации антипротона и протона соответственно, \vec{n}_0 – направление оси пучка. В случаях, когда \vec{n}_0 параллелен либо перпендикулярен $\vec{\zeta}_2$, получено общее решение этого уравнения. В работе получено выражение для сечения выбывания антипротонов из пучка, совпадающие с известными результатами, а также выведены формулы для коэф-

фициентов кинетического уравнения (5). Для вычисления всех этих величин использовался неймегенский нуклон-антинуклонный оптический потенциал. В работе представлены графики зависимости коэффициентов кинетического уравнения и ожидаемой степени поляризации пучка от энергии антипротонов. Предсказывается степень поляризации антипротонного пучка около 0,2 за время порядка суток.

Рассеяние антипротонов на дейтроне описывается с помощью приближения Глаубера-Ситенко, которое позволяет выразить амплитуду рассеяния на составном ядре через амплитуды рассеяния на нуклонах. В работе применяется улучшенная версия глауберовской модели, учитывающая зависимость амплитуд рассеяния от спинов, а также вклад D -волны в волновую функцию дейтрона. Получено кинетическое уравнение для поляризации и показано, что вклад тензорной поляризации дейтрона сильно подавлен в пределе малых углов акцептанса. Степень поляризации антипротонов в случае фильтрации на дейтериевой мишени предсказывается примерно такой же, как и в случае водородной мишени, а время поляризации вдвое меньше при той же плотности мишени.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

1. Предложен новый способ получения кинетического уравнения для любых величин, построенных из операторов спинов частиц. Проанализировано уравнение эволюции для поляризации спиновой частицы при рассеянии на бесспиновой или спиновой частицах, рассмотрены общие решения уравнения.
2. Получено общее решение кинетического уравнения, описывающего эволюцию спина антипротона при рассеянии на позитронах, и показано, что такой способ не позволяет получить пучок поляризованных антипротонов за разумное время.
3. Кинетическое уравнение обобщено на случай рассеяния с выбыванием частиц и использовано для изучения эволюции поляризации антипротонов при рассеянии на водородной мишени. Получено общее решение уравнения в случае, когда поляризация мишени параллельна либо перпендикулярна оси пучка. Коэффициенты кинетического уравнения вычислены с помощью неймегенского нуклон-антинуклонного потенциала. Получена степень поляризации антипротонов около 0,2 за время порядка суток.

4. Исследована эволюция поляризации антипротонов при рассеянии на дейтериевой мишени. Для вычисления амплитуды $\bar{p}d$ рассеяния использовалось приближение Глаубера-Ситенко. Степень поляризации антипротонов получается примерно такая же, как и в случае $\bar{p}p$ рассеяния, однако время поляризации меньше при той же плотности мишени.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Milstein A.I., Salnikov S.G., Strakhovenko V.M. Polarization effects in non-relativistic ep scattering. // Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. B. 2008, Vol. 266. No 15. P. 3453-3457.
2. Dmitriev V.F., Milstein A.I., Salnikov S.G. Spin-dependent part of $p\bar{p}$ interaction cross section and Nijmegen potential. // Phys. Lett. B. 2010. Vol. 690. No. 4. P. 427-430.
3. Dmitriev V.F., Milstein A.I., Salnikov S.G. Spin-dependent part of $p\bar{p}$ interaction cross section and Nijmegen potential. // Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing. Vol. 295. 2011. P. 012088.
4. Salnikov S.G. Spin-dependent part of $\bar{p}d$ interaction cross section and Nijmegen potential. // Nucl. Phys. A. 2012, Vol. 874. P. 98-107.
5. Milstein A.I., Salnikov S.G. Kinetics of polarization in non-relativistic scattering. // Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. B. 2013, Vol. 313. P. 64-67.

САЛЬНИКОВ Сергей Георгиевич

**Спиновые эффекты в электрон-протонном
и нуклон-антинуклонном взаимодействии**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 19.09.2013 г.

Сдано в набор 23.09.2013 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 0.7 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 18

Обработано на РС и отпечатано на

роталпринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.