

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.12.01+539.124+539.125.4+539.126.34

БАКМАЕВ

Сабир Магомед-Кадиевич

Прецизионное вычисление
дифференциальных сечений для процессов
идуших в периферической кинематике
на коллайдерах высоких энергий

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2008

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Э.А. Кураев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

В.Т. Ким (ПИЯФ РАН, г. Гатчина)

доктор физико-математических наук,

А.Е. Дорохов (ЛТФ ОИЯИ)

Ведущая организация:

Государственный научный центр институт физики высоких энергий г. Протвино.

Защита диссертации состоится “___” _____ 2008 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д-720.001.01 при Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “___” _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

А.Б. Арбузов

Общая характеристика диссертации.

Актуальность темы. Физика элементарных частиц к началу третьего тысячелетия переживает бурное развитие. Ввод в действие коллайдеров средних и высоких энергий позволил получить огромное количество информации об уже известных частицах а также новых объектах исследования. Значительный объем информации поступает также из анализа проявлений космических лучей. В рамках формализма квантовой теории поля (КТП) были созданы реалистические подходы - стандартной модели (СМ) и квантовой хромодинамики (КХД), которые вместе с квантовой электродинамикой создали базу для анализа этой информации. Однако к настоящему времени не существует законченной теории элементарных частиц, в которой в частности, был решен вопрос о спектре масс частиц и их основных характеристиках - спин, масса, заряд, константа связи. Описание результатов экспериментов таким образом оставляет место для так называемой "новой физики" — явлениям которые не могут быть объяснены в рамках современного состояния теоретической физики.

Ключевую роль при этом играет точность экспериментальных измерений так и теоретических результатов для соответствующих процессов рассчитанных на основании квантовой теории поля.

Процессы квантовой электродинамики (КЭД) на коллайдерах идут со значительно большими вероятностями, чем процессы обусловленные сильными или слабыми взаимодействиями. По этой причине они являются источниками фонов, учет которых есть важная проблема экспериментальной физики частиц.

Если в экспериментах поставленных в первой половине прошлого века для описания результатов опыта было достаточно теоретических формул, полученных в низшем (борновском) приближении, то в современной постановке опытов оказывается необходимым учитывать квантовые поправки, связанные с излучением виртуальных и реальных фотонов; а также других частиц, принимающих участие в процессе.

Следует также отметить ключевую роль процессов КЭД как в инженерной

задаче создания коллайдеров так и в проблеме регулирования их параметров, таких как светимость и поляризационные характеристики. Темой настоящей диссертации является развитие методов прецизионных расчетов процессов на коллайдерах и применение их к анализу ряда процессов с проявлением электромагнитных и сильных взаимодействий.

Содержание работы. Исследованию процессов тормозного излучения и фотопобразования пар применительно к условиям современного эксперимента посвящена первая глава диссертации.

Известно, что тормозные фотоны образуемые при электрон-позитронном и электрон-протонном рассеянии приобретают определенную поляризацию. Если начальный электрон неполяризован то тормозной фотон приобретает линейную поляризацию; в случае когда начальный электрон продольно поляризован то тормозной фотон может приобрести правую или левую циркулярную поляризацию.

Тормозные фотоны образующиеся при рассеянии электронного пучка на позитроне или протоне могут быть рассмотрены как источники поляризованных фотонов. Их поляризационные характеристики (параметры Стокса) определяются кинематическими величинами (энергиями и углами их вылета относительно пучков). Дифференциальное сечение тормозного излучения достаточно большое (порядка нескольких миллибарн) и не меняется с энергией. При наличии большой статистики можно выбрать подобные события с одинаковыми кинематическими состояниями. Полученный таким образом источник фотонов имеет определенные свойства поляризации, и может использоваться в различных исследовательских задачах.

Поляризованные пучки фотонов позволяют получить дополнительную информацию о свойствах мишени в сравнении с опытами с использованием неполяризованных фотонов, которые дают дифференциальные сечения усредненные по спиновым состояниям. Как пример изучение рассеяния циркулярно-поляризованного фотона, на заряженном лептоне, в рамках СМ может дать, информацию о тяжелых промежуточных векторных бозонах.

Поляризационные явления могут быть изучены при образовании пар в фотон – электронном столкновении; кросс-процесс к рассматриваемому здесь процессу был исследован в данной работе.

В настоящее время этот процесс используется для процедур калибровки светимости пучка. Основанием для этого является теоретическое описание (включая радиационные поправки) и большая величина самого сечения.

В середине 70-х годов большое внимание было обращено на процессы тормозного излучения для электрон - электронных (позитронных) столкновений, где были получены выражения для полных сечений.

Выражение для степени линейной поляризации фотона было получено в приближении очень маленьких углов рассеивания, $\theta_\gamma, \theta_e \sim m/E$ (m - масса электрона, и E - энергия начального электрона в лабораторной системе). Эти результаты были получены в так называемом приближении Вейцеккера-Вильямса. Такая кинематика обеспечивает главный вклад в поперечное сечение, что соответствует маленькой инвариантной массе конечных частиц, летящих в конусе с осью по направлению начальных частиц (e^- или γ). К сожалению эти результаты не могут быть непосредственно применены к реальным экспериментам, где имеются ограничения связанные с порогами для углов эмиссии и энергии рассеянных частиц. Соответствующие формулы получены в диссертации.

Изучение процессов с образованием пар берет начало от известных работ, выполненных Х. Бете, Л. Максимоном, Р. Глюкштерном и др. в начале 50-х годов; и продолжает привлекать внимание до сих пор. Основной интерес в настоящее время заключается в том, чтобы использовать этот процесс в качестве поляриметра. Действительно этот процесс имеет довольно большое поперечное сечение, и эффекты поляризации могут достигнуть 14 процентов. Два различных механизма должны быть приняты во внимание: механизм Бете-Гайтлера, когда пара образуется двумя фотонами, одним реальным и другим виртуальным; и тормозной механизм когда пара образована образована одним виртуальным фотоном. При превышении энергий фотона 50МэВ в лабораторной системе основной вклад дает механизм Бете-Гайтлера, при этом интерференция соот-

ветствующей амплитудой тормозного механизма не превышает 5 процентов, и убывает с дальнейшим ростом энергии фотона.

Следует принимать во внимание, что в низшем порядке ТВ радиационные поправки происходящие от учета дополнительного обменного фотона не влияют на асимметрию в случае когда в качестве мишени используется протон или легкое ядро. Основной вклад от РП связан с взаимодействием между компонентами пар в конечном состоянии. Амплитуда обмена двумя виртуальными фотонами между парой и ядром не интерферирует с борновской амплитудой так как они имеют разную сигнатуру.

Чистый двухфотонный обмен не содержит фактор усиления таких как "большой логарифм" отношения энергии фотона ω к лептонной массе m , и имеет порядок $(\frac{\alpha}{\pi})^2$. Этим вкладом можно пренебречь по сравнению с вкладом порядка α/π , возникающим из-за интерференции борновской амплитуды с однопетлевой амплитудой связанной, со взаимодействием лептоновой пары.

Ситуация меняется когда рассматриваем образование пары в поле тяжелого ядра с большим зарядовым параметром $\nu = Z\alpha$. Основной вклад возникает из-за многофотонного обменного механизма между компонентами пары с ядром.

В процессах КЭД типа $2 \rightarrow 3, 4, 5, 6$ на коллайдерах высоких энергий интенсивно изучались как с позиции эксперимента так и теоретически в течение последних четырех десятилетий. Ускорители с высокими энергиями, сталкивающие e^+e^- , γe , $\gamma\gamma$ и $\mu^+\mu^-$ пучки, широко используются для изучения фундаментальных взаимодействий. Некоторые процессы КЭД на коллайдерах играют важную роль, особенно такие как неупругие столкновения сечения которых не убывают с возрастанием энергии. Физическая программа коллайдеров включает такие эксперименты с поляризованными частицами. Такие процессы требуют для описания больше величин, включающих вычисление дифференциальных сечений с определенными спиральностями начальных частиц лептонов ($l=e$ или μ) и фотонов γ . Эти реакции имеют вид двухструйного процесса с обменом виртуальным фотоном в t-канале.

Развитию методов вычисления спиральных амплитуд для процессов с высо-

кими энергиями на коллайдерах было посвящено большое число работ. Имея в виду предстоящие задачи на планируемых $\gamma\gamma$ и лептон γ коллайдерах, необходимы точные знания для калибровки и контроля светимости коллайдеров. В качестве калибровочных процессов КЭД с достаточно большим дифференциальным сечением с определенными сигнатурами для детектирования. Ниже исследуется возможность использования в качестве калибровочных процессов КЭД с непадающими сечениями. Для исследования этих процессов используется метод спиральных амплитуд. Наиболее общей характеристикой периферийных процессов является важный факт их неубывающего поперечного сечения в пределе высокой общей энергии \sqrt{s} в системе центра масс начальных частиц. Становится важной возможность измерять струи содержащие две или три частицы.

Для теоретического описания процессов, на современных экспериментальных установках, идущих за счет электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий в настоящее время недостаточно знаний соответствующих сечений полученных в низшем порядке теории возмущения. Учет высших приближений сопряжен однако с большими математическими трудностями. Развитые в последние десятилетия методы, тем не менее позволяют произвести расчет вкладов высших порядков ТВ при наличии каких либо усиливающих факторов α ($\alpha = e^2/hc$). Мы будем различать два соответствующих режима. При описании процессов с участием легких заряженных фермионов в качестве эффективного параметра входит величина αL , в частности $\alpha \ln(E/m_e)$ E -энергия в с.ц.м на коллайдере, или $\alpha \ln(M/m_e)$ где M -масса распадающейся частицы, где предполагается $E, M \gg m_e$. Этот режим называется режимом ренормализационной группы (РГ). Он реализуется при описании кинематики в инклюзивной постановке эксперимента с вылетом частиц на большие углы. Зависимость от параметра αL определяется уравнениями эволюции - обобщением традиционных уравнений группы перенормировок Гелл-Мана Лоу. Другим режимом является дважды-логарифмическое приближение, когда эффективным параметром разложения является величина αL^2 . Такой режим реализуется для эксклюзивных

процессов, а также эффектов связанных с не сохранением спиральности.

Поэтому представляет определенный интерес процессы 2γ и 3γ аннигиляции при электрон-позитронном столкновении при высоких энергиях, и РП к этим процессам:

$$e^-(p_-) + e^+(p_+) \rightarrow \gamma(k_1) + \gamma(k_2), s = (p_- + p_+)^2 \gg m_e^2 = m^2;$$

$$e^-(p_-) + e^+(p_+) \rightarrow \gamma(k_1) + \gamma(k_2) + \gamma(k_3).$$

Эти процессы были рассмотрены Л. Брауном, Р. Фейнманом и Х. Харрисом в начале 50-х годов и пересмотрены в 1973г. Х. Берендсом и Гастмансом. В настоящее время эти процессы используют для калибровки коллайдеров, которые позволяют независимо измерять светимости пучков. Детектирование фотонов на большие углы можно использовать для независимого метода измерения светимости.

Процесс бета-распада нейтрона детально исследован в экспериментальном плане. Современное теоретическое описание неполно, причем неопределенности связаны с эффектами сильных взаимодействий которые возникают при вычислении радиационных поправок. Исследование неупругого рассеяния нейтрино на дейтерии приводятся на экспериментальных установках таких как нейтринная обсерватория Сэдбери(SNO). Возрастание точности измерения на эксперименте и важность адекватного теоретического описания нейтрино в секторе стандартной модели является мотивацией этой работы. Работа посвящена вычислению РП в рамках КЭД в без учета электрослабых эффектов.

Традиционно структура адронов исследовалась в опытах по рассеянию электронов на адроне. Теоретическое описание при этом ограничивалось учетом электромагнитных взаимодействий в низшем порядке ТВ, что отвечает учету только одно-фотонного обмена. Формализм упругого и неупругого рассеяния с поляризованными так и неполяризованными частицами должен быть обоснован в форме которая подробно включает в себя параметризацию заряда нуклона и магнитных распределений в нем. Однако было отмечено, что при больших переданных импульсах механизм двух-фотонного обмена может стать важным, в

частности когда импульсы обменных фотонов равны. Недавно эта задача обсуждалась как возможное объяснение расхождения между экспериментальными данными в случае упругого электрон-дейтонного и электрон-протонного рассеяния. В настоящее время предоставляется возможность тщательно проанализировать различные процессы, включая каналы рассеяния и аннигиляции, что привело бы к извлечению дополнительной информации о структуре адронов.

Проблема унитаризации померона как композитного состояния двух взаимодействующих реджезованных глюонов является одной из актуальных задач в КХД. Ряд вопросов связанных с конструированием трех-померонных и более сложных вершин, включающих обычные глюоны может быть решен использованием выражений эффективного реджевского взаимодействия.

Значительное внимание в литературе было уделено описанию образования в периферической кинематике связанных состояний с тяжелыми и легкими кварками. Образование глюонного связанного состояния (глюония) в периферической кинематике отсутствует до настоящего времени. Это и является мотивацией для дальнейшего рассмотрения данной задачи.

Нуклоны после столкновения должны находиться в бесцветном состоянии (невозбужденные барионы), Необходимо рассмотреть фейнмановские амплитуды соответствующих обмену двумя реджезованными глюонами. Кроме того в каждом нуклоне реджезованные глюоны должны взаимодействовать с одним из кварков.

Применение упомянутых методов, представляющих собой развитие аналогичных методов в КЭД, обеспечивает описание различных процессов с точностью 0.1%, достаточной для сравнения с современными экспериментами.

Диссертация посвящена применению этих методов для прецизионного описания некоторых процессов, идущих на коллайдерах высоких энергий.

Целью работы является прецизионное вычисление дифференциальных сечений к процессам на коллайдерах и учет радиационных поправок.

Апробация работы. Результаты представленные в диссертации, доклады-вались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории Теоретической фи-

зики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна), также докладывались на международной зимней школе ПИЯФ по физике ядра и частиц (Репино-2006) и на международной конференции NPСS (Минск-2007)

Публикации по материалам диссертации опубликовано 8 работ в отечественных и зарубежных реферируемых журналах.

Объем и содержание диссертации Диссертация состоит из 4-х глав, введения, заключения и четырех приложений, общим объемом 96 страниц

Во введении обсуждаются основные требования к теоретическому описанию процессов на коллайдерах и методы развитые в рамках КЭД и КХД, привлекаемые для описания данных опытов. В кинематической области рассеяния на малые и большие углы и основные характеристики сечений в этих областях кратко обсуждены. в каждой из этих областей имеются эффективные параметры разложения, и развивается соответствующая теория возмущений. Обсуждена точность получаемых при этом теоретических результатов.

В первой главе изучается несколько процессов в периферической кинематике один из них тормозное излучение фотона при электрон-позитронном (протонном) рассеянии на малые углы. Дифференциальное сечение этого процесса не падает с энергией в с.ц.м. начальных частиц. Здесь важной задачей является детальное исследование поляризационных свойств тормозного фотона, для случаев поляризованного и неполяризованного начального электрона. Этот процесс может быть использован как источник жестких фотонов с определенными поляризованными свойствами.

Другой процесс, рассматриваемый в этой главе исследование амплитуд подпроцессов типа: $2 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 4$ как механизмы образования струй в периферической кинематике. Результаты полученные при этом могут использоваться с целью мониторинга и определения светимости $\gamma\gamma, \gamma e, ee^{\pm}$ пучков. Использование метода спиральных амплитуд позволяет получить компактные

выражения для сечений. Оценена точность полученных результатов — формулы справедливы с точностью несколько процентов. Третьим процессом рассмотренным в этой главе является процесс образования лептонной пары линейно-поляризованным фотоном в поле ядра или иона с зарядом Z . Этот процесс используется для точного определения степени линейной поляризации фотонного пучка. Здесь эффективным параметром разложения является величина $Z\alpha$. Вклады высших порядков ТВ по этому параметру отвечают многофотонным обменам компонент рожденной пары с ядром. Вычисленное дифференциальное сечение этого процесса а также спектральное распределение по энергиям компонент рожденной пары.

$$2\pi \frac{d\sigma}{dx d\phi_1} = \frac{2\alpha}{m^2} [a(\nu) + (x^2 + (1-x)^2)b(\nu) - 2x(1-x)\xi_3 \cos(2\phi_1)b(\nu)],$$

где зависимость коэффициентов $a(\nu)$ и $b(\nu)$ от ν рассчитана численно. Результаты полученные в этой главе имеют как методологическую так и теоретическую ценность.

Во второй главе исследуется процесс спиновой асимметрии пучков при упругом рассеянии электрона на протоне. В соответствующем опыте изучается эффект переворота спина рассеянного электрона по отношению к его начальной ориентации. Соответствующая асимметрия подавлена фактором отношения массы электрона к его энергии. В этом процессе работает режим дважды-логарифмического приближения. Сама асимметрия связанная с переворотом спина есть чрезвычайно малый эффект, исчезающей при нулевой массе электрона. Показано, что вклад высших порядков ТВ по параметру αL^2 значителен и существенно изменяет результат расчета в низшем порядке ТВ. Результат полученный автором был принят во внимание при анализе недавно выполненного прецизионного эксперимента. В этой же главе анализируется возможность измерения вклада двухфотонного механизма при аннигиляции e^+e^- в пару протон антипротон. Измеряемая на эксперименте зарядовая асимметрия обусловлена интерференцией амплитуды в борновском приближении и амплитуды в одно-

петлевом приближении. Вопрос о вкладе двухфотонного механизма в канале рассеяния был предметом пристального внимания как экспериментаторов так и теоретиков, в связи с проблемой измерения зарядового и магнитного форм-факторов протонов. Здесь предполагается метод прямого измерения в канале аннигиляции. Приведены численные предсказания эксперимента.

В третьей главе исследуются процессы $e\bar{e}$ аннигиляции в два и в три фотона с вылетом высокоэнергетических фотонов на большие углы в с.ц.м. Принимаются во внимание вклады от излучения виртуальных и реальных жестких и мягких фотонов. Путем детального анализа вкладов низших порядков ТВ, показана справедливость описания в терминах структурных функций электрона и позитрона. Так для процесса двухквантовой аннигиляции получено

$$d\sigma(p_-, p_+, k_1, k_2) = \int_0^1 dx D(x, L) \int_0^1 dy D(y, L) d\sigma_B(xp_-, yp_+, k_1, k_2) \left(1 + \frac{\alpha}{\pi} K_2\right)$$

,

$$d\sigma_B(xp_-, yp_+, k_1, k_2) = \frac{2\alpha^2}{sxy} \frac{x^2(1-c)^2 + y^2(1+c)^2}{[x(1-c) + y(1+c)]^2(1-c^2)} dO_1.$$

Эти структурные функции $D(x, L)$ удовлетворяют системе уравнений эволюции РГ КЭД. Применяя общую теорему о факторизации вкладов больших и малых расстояний, можно обобщить результат полученный в низшем порядке, включив в рассмотрение вклады высоких порядков ТВ в главном логарифмическом приближении $\alpha L \approx 1$. Прецизионный расчет в низшем порядке ТВ позволяет получить результат с большой точностью учитывая вклады типа $\alpha(\alpha L)^n$ – т.е. приближении, следующим за лидирующим логарифмическим. Результаты полученные в диссертации могут быть использованы для независимого определения светимости на e^-e^+ коллайдерах.

В этой же главе рассмотрен процесс обратный процессу бета-распада нейтрона. При этом в качестве усиливающего фактора имеется логарифм отношения масс протона и электрона $L(M/m_e)$. Для сечения этого процесса а также процесса, связанного с ним преобразования кроссинга, получены выражения справедливые в ведущем $(\alpha \ln(\frac{M}{m_e}))^n$ и следующим $\alpha(\alpha \ln(\frac{M}{m_e}))^n$ приближении-

ях. Также показана возможность записи выражения для сечения в терминах структурных функций электрона.

$$d\sigma = \int_0^1 D(x, L) d\sigma_B(p_e(1-x), p) \left(1 + \frac{\alpha}{\pi} K\right) dx.$$

Экспериментальное изучение этого вопроса является одним из возможных тестов проверки СМ.

В четвертой главе методы КЭД, которые были применены в предыдущих главах используются в КХД. Рассматривается процесс периферического взаимодействия протона с ядром.

Здесь в качестве параметра эффективного разложения является произведение сильной константы связи α_s на атомный номер ядра мишени. Показано, что вклады КХД доминируют над вкладами КЭД-природы. В этом процессе может быть экспериментально исследована эффективная вершина описывающая переход двух реджезованных глюонов в два обычных глюона, с последующим переходом их пару заряженных пионов. Для случая рождения n σ -мезонов получено выражение

$$\sigma_n = \int \frac{d^2\rho}{(2\pi)^2} \frac{(L\sigma_0 Z(\rho))^n}{n!} \exp(-L\sigma_0 Z(\rho)),$$

где $\sigma_0 = 2.25 * 10^{-3} \alpha_s^6 M_p^3 / (M_\sigma M_\rho^4 a(fm)^3)$, $Z(\rho)$ отвечает описанию в борновском приближении. Исследована множественность образования пионов в одном акте столкновения. Результаты использованы для объяснения превышения выхода положительных мюонов над отрицательными в космических лучах.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Вычислена степень линейной поляризации тормозного фотона для неполяризованных пучков $e - p$ и $e - e^\pm$ столкновений на малые рассеивающие углы при высоких энергиях. Вычислены параметры Стокса для этих процессов как функции кинематических переменных, таких как: переданный импульс полярные и азимутальные углы фотона и доли его энергии.

2. Вычислены дифференциальные сечения для процессов фото-образования электрон - позитронной пары в поле ядра, а также спектральное распределение по энергиям компонент рожденной пары. Учтены вклады высших порядков ТВ по параметру $Z\alpha$, которые соответствуют обмену виртуальными фотонами между ядром и компонентами электрон - позитронной пары. Также вычислено сечение для более реалистичного случая экранированного потенциала.
3. Рассмотрены подпроцессы образования струй при столкновении $\gamma\gamma, \gamma e, ee^\pm$ пучков. вычислены спиральные амплитуды для этих подпроцессов, и на их основе даны сечения в компактной форме. приведена техника вычисления спиновых матриц для данного случая.
4. Вычислены радиационные поправки в лидирующем и следующем за лидирующим приближении к процессам 2γ и 3γ аннигиляции при высоких энергиях.
5. Рассмотрен процесс обратного бета-распада. вычислены радиационные поправки с учетом излучения мягкого и жесткого фотонов, в лидирующем и следующем за лидирующим приближении. Вычислено дифференциальное сечение для кросс-процесса.
6. Вычислена спиновая асимметрия в дважды-логарифмическом приближении при рассеянии электрона на протоне.
7. Проведен анализ по двухфотонному обмену для процесса аннигиляции лептонной пары в пару протон - антипротон. Вычислена асимметрия для этого процесса с учетом излучения мягких фотонов в начальном состоянии.
8. В рамках эффективной реджевской теории рассмотрен процесс образования двух реальных глюонов, переходящих в пионы; при периферическом протон ядерном столкновении.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Radiative corrections to the cross-section of $e^- + p \rightarrow \nu + n$ and the crossed processes. E.A. Kuraev, S. Bakmaev, Yu.M. Bystritskiy, O.P. Solovtsova (Dubna, JINR) , T.V. Shishkina (Belarus State U.) . JETP Lett.87:203-208 Mar 2008. 11pp. e-Print: arXiv:0803.0662 [hep-ph]
2. 2γ and 3γ annihilation as calibration processes for high energy e^+e^- colliders. E. Bartos (Bratislava, Inst. Phys.) , S. Bakmaev, E.A. Kuraev (Dubna, JINR) , M.G. Shatnev (Kharkov, KIPT) , M. Secansky (Dubna, JINR Bratislava, Inst. Phys.) . Jan 2008. 9pp. Published in JETP Lett.87:73-77,2008. e-Print: arXiv:0801.1592 [hep-ph]
3. Search for two photon exchange from $e^+ + e^- \rightarrow p + \bar{p} + \gamma$ data. E. Tomasi-Gustafsson (SPhN, DAPNIA, Saclay) , E.A. Kuraev, S. Bakmaev (Dubna, JINR) , S. Pacetti (Enrico Fermi Ctr., Rome Frascati) . DAPNIA-07-144, Oct 2007. 10pp. Published in Phys.Lett.B659:197-200,2008. e-Print: arXiv:0710.0454 [hep-ph]
4. Double logarithmical corrections to beam asymmetry in polarized electron-proton scattering. E. Kuraev, S. Bakmaev, V.V. Bytev, Yu.M. Bystritskiy (Dubna, JINR) , E. Tomasi-Gustafsson (SPhN, DAPNIA, Saclay) . Jun 2007. 7pp. Published in Phys.Lett.B655: 196-199,2007. e-Print: arXiv:0706.2474 [hep-ph]
5. Bremsstrahlung photon polarization for $ee^\pm \rightarrow (e\gamma)e^\pm$, and $ep \rightarrow (e\gamma)p$ high-energy collisions. S. Bakmaev, Yu.M. Bystritskiy, E.A. Kuraev (Dubna, JINR) , E. Tomasi-Gustafsson (SPhN, DAPNIA, Saclay) . May 2007. 9pp. Published in JETP Lett.87:227-232,2008. e-Print: arXiv:0705.0442 [hep-ph]
6. Electron-positron pair production by linearly polarized photon in the nuclear field. S. Bakmaev, E.A. Kuraev (Dubna, JINR) , I. Shapoval, Yu.P. Peresunko (Kharkov, KIPT) . Feb 2007. 10pp. Published in Phys.Lett.B660:494-500,2008. e-Print: hep-ph/0702099
7. QED processes in peripheral kinematics at polarized photon photon and photon

electron colliders. S. Bakmaev, E. Bartos (Dubna, JINR) , M.V. Galynskii (Minsk, Inst. Phys.) , E.A. Kuraev (Dubna, JINR) . Mar 2004. 13pp. Published in Eur.Phys.J.C52:75-82,2007. e-Print: hep-ph/0403111

8. Testing the RRPP vertex of effective Regge action. E.A. Kuraev, V.V. Bytev, S. Bakmaev (Dubna, JINR) , E.N. Antonov (St. Petersburg, INP) . Nov 2007. 9pp. Published in Phys.Lett.B664:274-278,2008. e-Print: arXiv:0711.3576 [hep-ph]