

Новости двухфотонной физики.

Жилич В.Н.

*Использовались материалы из докладов членов коллаборации
Belle, BESIII etc.*

28 августа 2026 г.

Выездное собрание "Дискуссионного клуба" 2026

Цели доклада:

- Напомнить, что такое/почему/зачем для двухфотонной физики.
- Обзор текущего состояния по **ИЗУЧЕНИЮ** двухфотонных процессов.

Введение:

- Что такое двухфотонные события?
- Таггирование рассеянных частиц.
- Эксклюзивные/двухчастичные процессы
- Изучение C-четных резонансов, эксклюзивная и инклюзивная моды
- Инклюзивные процессы. Полное сечение рождения адронов
- Измерение сечения $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$
- Изучение топологии многоадронных событий в двухфотонных процессах

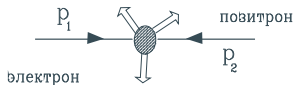
Что такое двухфотонные события?

Это не

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma, \text{ а } \gamma\gamma \rightarrow X$$

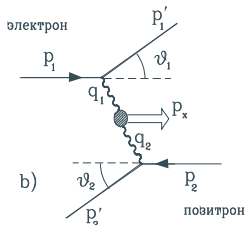
или, если мы говорим о встречных пучках,

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^- + X.$$



a)

Однофотонная аннигиляция e^+e^-



Двухфотонное взаимодействие e^+e^- .

Энергию виртуального фотона и другие параметры рожденных частиц можно найти по формулам: $\omega_1 = (|p_1| - |p'_1|)$,

$$q_1^2 = -|p_1||p'_1|\vartheta_1^2 - O(m_e^2),$$

$$W(\gamma\gamma) \approx 2\sqrt{\omega_1\omega_2}$$

Поскольку мы изучаем $\gamma\gamma$ процессы на коллайдерах, то у нас остаются начальные частицы, чаще всего e^+e^- . В зависимости, как мы с ними обращаемся, выделяются несколько подходов к анализу, называемых модами:

- No-tag мода. На частицы пучка (условное название - Scattered Electrons, SE) не обращают внимания.
События отбирают по признакам:
 - Полная энергия в детекторе заметно меньше $2 * E_b$; m Поперечный импульс мал $P_{tr} < (0.1 - 1.0) GeV$.
- Anti-tag мода. Следят, чтобы оставшиеся SE не оставили отметки в детекторе, ограничивая тем самым их поперечный импульс, “зажимают” $< Q^2 >$.

- Single-tag мода. Один SE попадает в детектор и у него измеряется угол и энергия. Это дает возможность более точно определить Q и дает возможность кинематической реконструкции.
- Double-tag мода. Оба SE попадают в детектор. Это позволяет подавить фон, работать с missing-particle в центральной части и измерять Q_1, Q_2 .
Последнее полезно для теории, т.к. до сих пор плохо известно, факторизуются ли формфакторы $\gamma\gamma$ -процессов.
- Для таггирования SE часто используют торцы детектора, при этом статистика сразу падает в $n * (10 - 100)$ раз.
- Либо делают специализированные детекторы SE, которые должны регистрировать их начиная с малых углов вылета (EFC -Belle), вплоть до нулевого угла (МД-1, КЕДР).
- Не очень веселый практический опыт показывает, что специализированные системы встречаются с большими проблемами, которые существенно уменьшают их потенциальную выгоду.

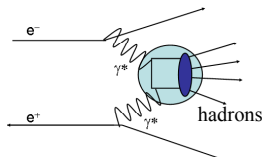
Что такое двухфотонные события?

- В качестве системы X могут рождаться пары *лептонов/мезонов/барионов*, *C-четные адронные резонансы* и другие *многоадронные* ($N_{hadr} \geq 3$) системы
- Сечение рождения пар лептонов можно рассчитать в рамках QED. Чтобы выйти на уровень точности 1% требуется корректный учет рад.поправок, что возможно, но, похоже что, мало кому интересно.
- Для адронных систем требуется применение QCD в области низких энергий, где не существует надежных методов вычислений
- В рамках метода эквивалентных фотонов можно рассчитать функцию светимости $\mathcal{L}(W)$ такую, что $\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^-X) = \int_0^{2E_b} \mathcal{L}(W)\sigma(\gamma\gamma \rightarrow X) dW$. Пересчитывая обратно, мы можем говорить об измерении двухфотонного сечения
- Если смотреть более детально, то разложение по поляризациям взаимодействующих фотонов (продольная и поперечная), приводит к появлению азимутальной асимметрии для рожденных частиц. В последнее время, эту зависимость начинают измерять/использовать для анализа двухчастичных событий
- Я расскажу о доступных для изучения на работающих коллайдерах процессах в ранее перечисленном порядке

- Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \mu^+\mu^-$ при $E_b = 4.7$ ГэВ составляет около 60 нб, а $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + e^+e^-$ в 100 раз больше. Правда, 99% рожденных e^+e^- улетает вдоль пучка и не регистрируются детектором. Поэтому после реконструкции треков количество обоих лептонов почти одинаково.
- Изучение этих процессов важно/неизбежно для анализа двухфотонных событий
- Данные процессы служат для контроля интегральной $\gamma\gamma$ -светимости, эффективности детектора и т.д. Поиск по публикациям показал, что никто не получал точность лучше 3-5%
- В работе¹ наших коллег из Института Математики утверждается, что возможно наблюдение зарядовой асимметрии в этом процессе за счет интерференции с тормозной диаграммой. Более интересно наблюдение асимметрии при рождении пары пионов, но для этого необходим интеграл $\geq 100/1/\text{пб}$. Асимметрия выражается через пионный форм-фактор и спиральный амплитуды процесса $\gamma^*\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$.
- Кажется интересным измерить процессы с реальными рад.поправками типа $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ (процесс α^5), который никто еще не измерял

¹I.F. Ginsburg et al, Eur. Phys.J. C (2001)

Two-Photon Collisions and QCD/Hadron Physics



Hadron production from collisions of virtual or quasi-real photons

- Perturbative/Non-perturbative QCD
- Hadron/Photon form factors
- Resonances

Wide energy region and various physics aspects
can be studied simultaneously.

Incident photon -- dominated by quasi-real photon

$$Q^2 \equiv |q^2| \lesssim 0.001 \text{ GeV}^2$$

No-Tag:

with p_T -balance requirement, $|\Sigma p_T^* (\text{hadrons})| < 0.05 - 0.3 \text{ GeV}/c$

$$Q^2 \ll W^2 \quad (W \equiv W_{\gamma\gamma}), \quad Q^2 \ll E_{\text{QCD}}^2$$

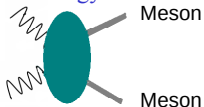


S.Uehara, KEK, GPD2010, Trento, Oct., 2010

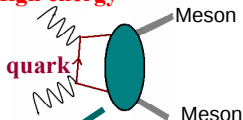
2

Meson-pair production and QCD

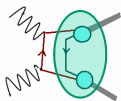
Low energy



High energy



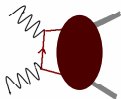
High energy



Brodsky and Lepage
Perturbative QCD approach

for exclusive meson production
Works with refined form factors

S.J.Brodsky, G.P.Lepage, PRD 24, 1808 (1981)
M.Benayoun, V.L.Chernyak, NPB329,209(1990)



Kroll, Diehl and Vogt
Handbag model
with soft hadron exchange

M.Diehl, P.Kroll, and C. Vogt, PLB 532, 99 (2002)
M.Diehl, P.Kroll, PLB 683, 165 (2010)

Predicts...

Scattering-angle
(of meson)
distribution,
Energy -dependence
Cross section ratios
under SU(3) sym.

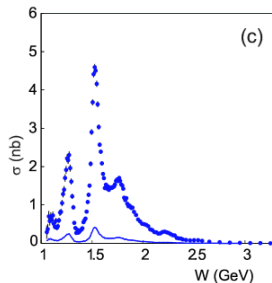
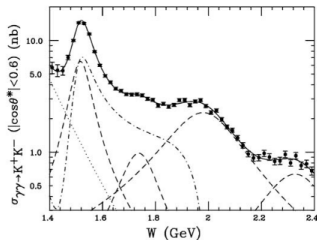
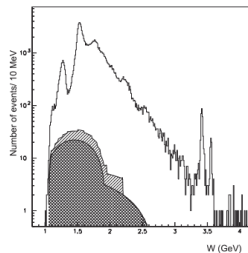
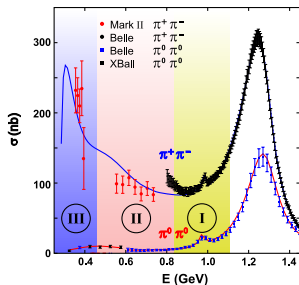
S.Uehara, KEK, GPD2010, Trento, Oct., 2010

3

Двухфотонное рождение пар заряженных мезонов и барионов.

- Сечение рождения пар π , K и p примерно в 10, 100 и 1000 раз меньше, чем $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \mu^+\mu^-$
- В обзорных работах и в анализе используются данные набранные все ещё ARGUS(280 1/пб) , LEP, Babar(470 1/фб), Belle (100÷700 1/фб) и BESIII(20 1/фб)
- При $W_{\gamma\gamma} > \sim 3$ ГэВ есть различные модели, которые предсказывают зависимость $\sigma(W_{\gamma\gamma}) \sim W^{-n}$, и позволяют оценить $n \simeq (6(\text{meson}) - 10(\text{barion}))$. В эксперименте $n = 7 \div 15$.

Двухфотонная физика на Belle и ARGUSe



Измерения сечения процессов $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-, K^+K^-, K^0\bar{K}^0$, на детекторе Belle

- Сечение рождения резонанса пропорционально $(2J + 1)\Gamma_{\gamma\gamma}/M_R^3$ где J –спин частицы, M_R –масса. Двухфотонная ширина $\Gamma_{\gamma\gamma} = \Gamma_{tot} \cdot Br_{\gamma\gamma}$ может быть рассчитана в рамках различных моделей, она зависит от кваркового состава и волновой функции. Это помогает разбираться с внутренним строением резонансов
- Однако, применяя метод одиночного или двойного тагирования, можно выделять резонансы с улетевшими частицами, что резко повышает эффективность и точность кинематики
- Благодаря тагированию, результаты МД-1 по двухфотонной ширине η, η', a_2 до сих пор присутствуют в PDG (20 1/пб, 35(!) лет назад).
- Кроме-того, тагирование при заметых Q^2 расширяет область доступных для изучения процессов. Реальная пара $\gamma\gamma$ может производить резонансы только с четным J –спином. Для виртуальных фотонов это ограничение снимается.

Двухфотонное рождение очарованных C-четных резонансов

- Мезоны $\eta_c, \eta_c(2S), \chi_0, \chi_2$ тяжелые, поэтому их сечение рождения подавляется фактором $1/M^3$ и эффективной $\mathcal{L}(\gamma\gamma)$ светимостью
- Сечение рождения η_c равно 7(10) пб при $E_b=3.7(4.5)$ ГэВ
- Несмотря на работу всех фабрик, для $\eta_c(2S)$ данные по $\Gamma_{\gamma\gamma}$ противоречивы, так что практически любое измерение будет важным

$\eta_c(2S)$ PARTIAL WIDTHS

$\Gamma(\gamma\gamma)$					Γ_{16}
VALUE (keV)	EVTs	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT	

• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • •

0.44 ± 0.14	106	²⁰ XU	18	BELL $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \eta' \pi^+ \pi^-$	
1.3 ± 0.6		²¹ ASNER	04	CLEO $\gamma\gamma \rightarrow \eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	

²⁰ Assuming that the branching fraction into $\eta' \pi^+ \pi^-$ is the same as for $\eta_c(1S)$.

²¹ They measure $\Gamma(\eta_c(2S) \gamma\gamma) B(\eta_c(2S) \rightarrow K \bar{K} \pi) = (0.18 \pm 0.05 \pm 0.02) \Gamma(\eta_c(1S) \gamma\gamma) B(\eta_c(1S) \rightarrow K \bar{K} \pi)$. The value for $\Gamma(\eta_c(2S) \rightarrow \gamma\gamma)$ is derived assuming that the branching fractions for $\eta_c(2S)$ and $\eta_c(1S)$ decays to $K_S K \pi$ are equal and using $\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow \gamma\gamma) = 7.4 \pm 0.4 \pm 2.3$ keV.

Полное сечение рождения адронов в двухфотонных процессах

- Особый интерес представляет полное сечение перехода $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ (здесь *hadrons* - любая адронная система)
 - In pre-QCD times, in order to describe the behaviour of scattering amplitudes at high energy, s , and small momentum-transfer squared, t , Regge theory was developed and successfully applied in a wide range of energies. The Regge approach is based on the singularities of amplitudes in the complex angular momentum, j , plane.
- Используя довольно общие предположения, можно связать сечение $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ с полным сечением процессов γN и NN , где N - любой нуклон (чаще всего протон), и получить зависимость² от инвариантной массы $W_{\gamma\gamma}$ в интервале $2 \div 8$ ГэВ

$$\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}) = A + B/W.$$

Первый член определяется померонным обменом, второй обменом f_2, a_2

²Первую ссылку дают на J.L.Rosner, Brookhaven rep. CRISP 71 26 (1971), но этой публикации я не нашел. Результаты другого расчета взяты из статьи I.F. Ginzburg, V.G. Serbo, Phys.Lett 109B (1982) 231

Полное сечение рождения адронов в двухфотонных процессах-1

- $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}) = A + B/W.$

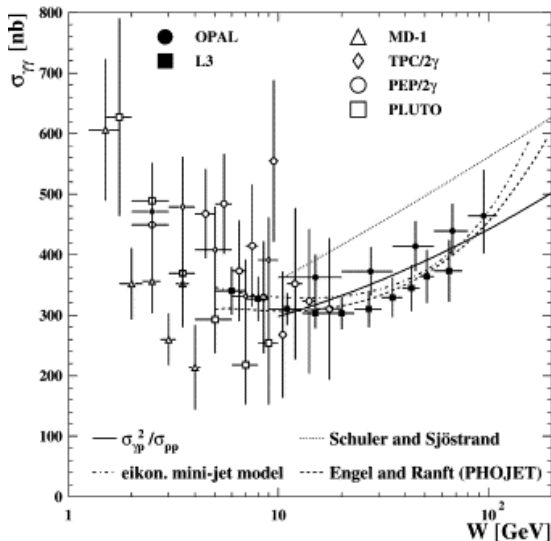
- В некотором приближении

$$A = \sigma_{asympt}^2(\gamma N) / \sigma_{asympt}(NN) \approx 240 \text{ нб} \text{ (} 250 \div 300 \text{ - в зависимости от способа расчета),}$$

$$B \approx 270 \text{ нб} \cdot \text{ГэВ} \text{ (} 260 \div 370 \text{)}$$

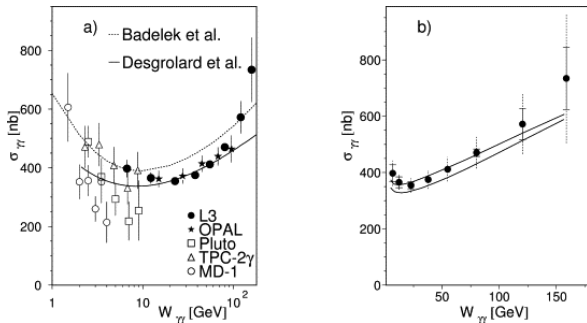
- Значительное число работ по этой теме было выполнено в 80-х и начале 90-х годов. Последние 10-15 лет интерес к $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ лежит в области больших энергий (LEP+LHC). Там наблюдается степенной по W рост сечения (*причем с дробной степенью*), который, при этом, объясняется теорией.
- А в области $W < 5 \text{ ГэВ}$, как правило, исследуются фиксированные конечные состояния, в частности события с большой виртуальностью $\gamma\gamma^*$ (Belle, BABAR и др.)

Экспериментальные данные по $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$

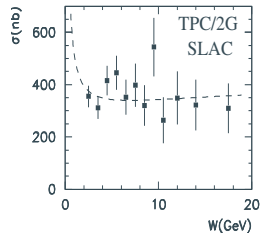
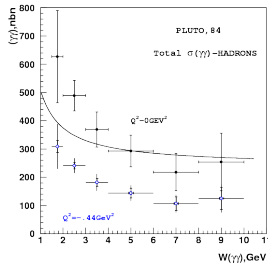
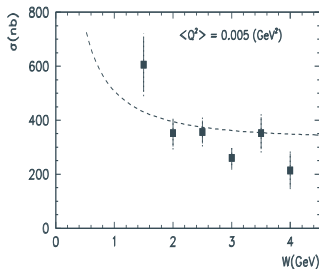


Измерение сечения $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$, компиляция данных за 40 лет

Экспериментальные данные по $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$



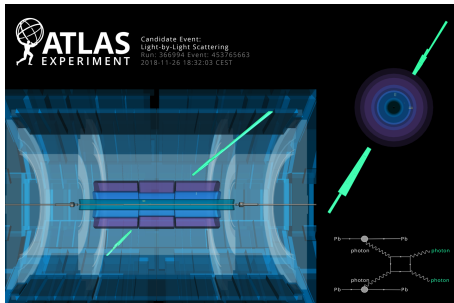
Сечение $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$, измеренное разными детекторами. Сравнение с двумя теоретическими моделями. Данные в области низких энергий могут влиять на выбор модели



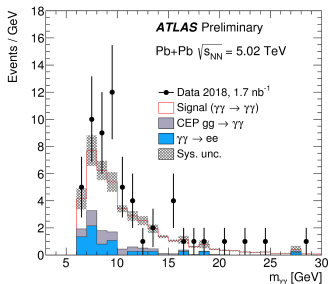
Результаты измерения полного сечения $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$, полученные на детекторе МД-1 (Новосибирск, ИЯФ) в 1983-1985 гг., PLUTO(1984) и TPC/2 γ (1990). Результаты на МД-1 получены при $Q^2 \approx 0.005 \text{ ГэВ}^2$, PLUTO – $Q^2 \geq 0.44 \text{ ГэВ}^2$, TPC/2 γ – $Q^2 \geq 0.2 \text{ ГэВ}^2$ (знак у Q^2 опущен). На всех картинках показана теоретическая кривая $\sigma(W_{\gamma\gamma}) = 240 + 270/W$

Простое измерить – это сложно!

- Рассмотрим самый простой процесс $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, который теоретики рассчитали еще в 1934 г.
- А наблюдали его только в 2017г! На БАК-льшом коллайдере при столкновении ядер Pb+Pb на энергии $\sqrt{S_{NN}} = 5.02$ TeV (детекторы ATLAS & CMS).
- А зачем нужны ядра? Потому что сечение $\gamma\gamma$ -процессов возрастает в $Z^4 \simeq 45$ миллионов раз . Увидеть иначе – без шансов!



ATLAS event display



Распределение по инвариантной массе отобранных событий

- После отборов ATLAS видит 59 событий, из которых $30 \pm 4(\text{syst})$ сигнал, а фон $12 \pm 1(\text{stat}) \pm (\text{syst})$.
- Согласие с ожиданием $R = (1.53 \div 1.73) \pm (0.33 \div 0.40)$.
- А кому полезно это измерение? Во-первых, это красиво! Плюс, возможна чувствительность к новой физике. Примеры – магнитные монополи, векторные фермионы и аксионоподобные частицы. Также чувствительность к влиянию возможных операторов в эффективной теории поля (вне рамок SM). И, конечно, вклад в аномальный магнитный момент e и μ ! (Хотя здесь инв.массы слишком большие.)

- Я просмотрел материалы нескольких конференций за последний год. Докладов по двухфотонной физике МАЛО!
- Значительная часть из них так или иначе связана с тем самым “священным Граалем” – вкладом в аномальный магнитный момент мюона.
- Заметные усилия вкладываются в создание новых генераторов двухфотонных событий. Например

<https://arxiv.org/pdf/2511.12717>

HadroTOPS: A Monte Carlo Event Generator For Hadron Production In Two-Photon Scattering In Electron Positron Collisions

Max Lellmann, Igor Danilkin, Achim Denig, etc

Abstract

We present a Monte Carlo event generator specifically developed for the study of hadronic two-photon scattering events in two-photon scattering at electron-positron colliders. The code enables the generation of events with exact leading-order QED coupling and a flat phase space decay of the hadronic state into an arbitrary number of final state particles as selected by the user. Thus, this generator is well-suited for the use of partial wave analyses tools to study the two-photon production of higher-multiplicity final states across a wide range of energies and photon virtualities. Furthermore, the code integrates both experimental and theoretical inputs on the two-photon couplings of hadrons to simulate two-photon production processes. Motivated by the investigations of the BESIII collaboration, the final states $\pi^+\pi^-$, $\pi^0\pi^0$, $\pi^0\eta$, K^+K^- , $K_S^0K_S^0$, $\eta\eta$, and $f_1(1285) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ via $a_0^\pm(980)\pi^\mp$ and $f_0(500)\eta$ are currently included. The code is sufficiently flexible to easily add additional final states as well as quickly change the already included channels.

- В поисках других материалов о двухфотонных процессах, я наткнулся на несколько статей с дисперсионным анализом. В паре из них авторы пересекаются с авторами упомянутого генератора. В этих статьях очень много математики, как пример: *the analytical structure of the left-hand cuts*. Что это такое, мне пришлось спрашивать у ИИ...
- Расскажу о нескольких работах, которые использовали данные Belle. 3 автора, 6 страниц.

EPJ Web of Conferences 303, 01007 (2024)

Pion polarizabilities from a dispersive analysis of $\gamma^* \gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

Abstract

We present results for the charged and neutral pion polarizabilities, obtained through a dispersive analysis of photon-fusion reactions with two pions in the final state. This analysis is motivated by current and future measurements at COMPASS, JLab (Hall D), and the BESIII measurement of single-virtual photon-fusion reactions in the space-like region, offering insight into generalized pion polarizabilities. To improve upon predictions within an un-subtracted dispersion formalism with only the pion left-hand cut, one needs to consider the influence of heavier left-hand cuts. We parametrize the latter using an expansion in a suitably constructed conformal variable, capturing the analytical structure of the left-hand cuts. The coefficients in this expansion are determined from the matching with the Lagrangian-based approach, the Adler zero constraint for $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$, and a fit to the cross-section data. The extension to the single-virtual case is also discussed.

- Результат - 1 картинка.

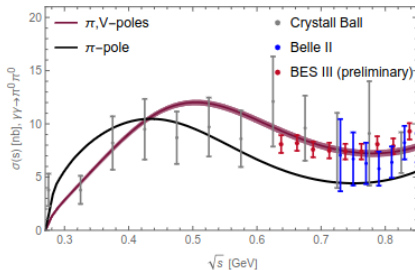


Figure 1. Integrated $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$ cross-section with $|\cos\theta| \leq 0.8$ corresponding to different left-hand cut contributions in the S-wave. The data are taken from [24–27].

- Еще один анализ.
Те же 3 автора, 7 страниц.

Physics letters : B, 827(2022)

Dispersive analysis of the $\gamma\gamma \rightarrow D\bar{D}$ data and the confirmation of the $D\bar{D}$ bound state.

A B S T R A C T

In this paper, we present a data-driven analysis of the $\gamma\gamma \rightarrow D^+D^-$ and $\gamma\gamma \rightarrow D^0\bar{D}^0$ reactions from threshold up to 4.0 GeV in the $D\bar{D}$ invariant mass. For the S -wave contribution, we adopt a partial-wave dispersive representation, which is solved using the N/D ansatz. The left-hand cuts are accounted for using the model-independent conformal expansion. The D -wave $\chi_{c2}(3930)$ state is described as a Breit-Wigner resonance. The resulting fits are consistent with the data on the invariant mass distribution of the $e^+e^- \rightarrow J/\psi D\bar{D}$ process. Performing an analytic continuation to the complex s -plane, we find no evidence of a pole corresponding to the broad resonance $X(3860)$ reported by the Belle Collaboration. Instead, we find a clear bound state below the $D\bar{D}$ threshold at $\sqrt{s_B} = 3695(4)$ MeV, confirming the previous phenomenological and lattice predictions.

Другие новости с двухфотонных полей-4

- Результат - 4 картинки. Вы думаете на нем главное – $\chi_{c2}(3930)$? Нет!
- Главное – это связанное состояние под порогом $D\bar{D}$ при $\sqrt{s_B} = 3695 \pm 4$ МэВ!!!

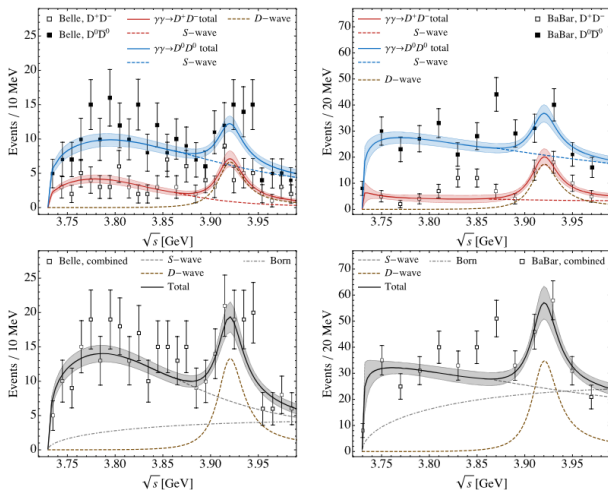


Fig. 1. Fit results compared to the data from the Belle [15] (left panels) and BaBar [16] (right panels) Collaborations. The top panels show the charged and neutral cross sections. For comparison, in the bottom panels the sum of two are presented in both cases.

- И еще один анализ.

Другие 3 автора, но уже 27 страниц.

Phys. Rev. D 97, 014020 (2018)

Hadron tomography by generalized distribution amplitudes in pion-pair production process $\gamma^*\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$ and gravitational form factors for pion

Hadron tomography can be investigated by three-dimensional structure functions such as generalized parton distributions (GPDs), transverse-momentum-dependent parton distributions, and generalized distribution amplitudes (GDAs). Here, we extract the GDAs, which are s - t crossed quantities of the GPDs, from cross-section measurements of hadron-pair production process $\gamma^*\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$ at KEKB. This work is the first attempt to obtain the GDAs from the actual experimental data. The GDAs are expressed by a number of parameters and they are determined from the data of $\gamma^*\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$ by including intermediate scalar- and tensor-meson contributions to the cross section. Our results indicate that the dependence of parton-momentum fraction z in the GDAs is close to the asymptotic one. The timelike gravitational form factors Θ_1 and Θ_2 are obtained from our GDAs, and they are converted to the spacelike ones by the dispersion relation. From the spacelike Θ_1 and Θ_2 , gravitational densities of the pion are calculated. Then, we obtained the mass (energy) radius and the mechanical (pressure and shear force) radius from Θ_2 and Θ_1 , respectively. They are calculated as $\sqrt{\langle r^2 \rangle_{\text{mass}}} = 0.32 \sim 0.39$ fm, whereas the mechanical radius is larger $\sqrt{\langle r^2 \rangle_{\text{mech}}} = 0.82 \sim 0.88$ fm. This is the first report on the gravitational radius of a hadron from actual experimental measurements. It is interesting to find the possibility that the gravitational mass and mechanical radii could be different from the experimental charge radius $\sqrt{\langle r^2 \rangle_{\text{charge}}} = 0.672 \pm 0.008$ fm for the charged pion. For drawing a clear conclusion on the GDAs of hadrons, accurate experimental data are needed, and it should be possible, for example, by future measurements of super-KEKB and international linear collider. Accurate measurements will not only provide important information on hadron tomography but also possibly shed light on gravitational physics in the quark and gluon level.

- Результат - 21 картинка. Я покажу промежуточный рисунок, т.к. главный результат статьи – это радиус пиона.

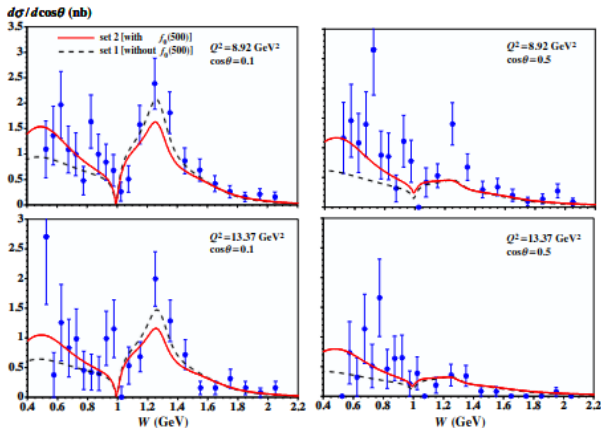


FIG. 15. Comparison with the Belle cross sections measurements at $Q^2 = 8.92$ and 13.37 GeV^2 with $\cos\theta = 0.1$ and 0.5 . The dashed and solid curves indicate our analysis results for set 1 (without $f_0(500)$) and set 2 (with $f_0(500)$), respectively.

- Покажу некоторые результаты с BESIII, благо они представили хорошие доклады. Сначала введение – для чего они стараются.

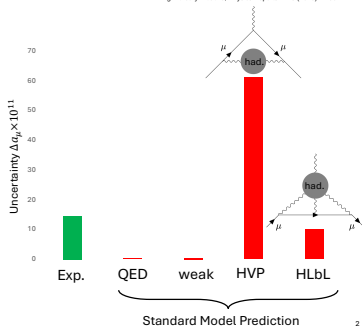
The Muon's Anomalous Magnetic Moment

g-2 theory initiative, Physics Reports 1143 (2025) 1-158

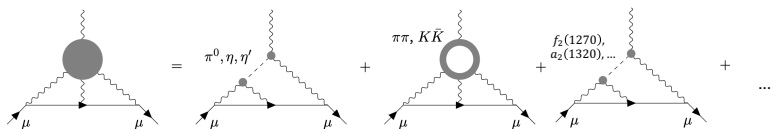
- Anomalous magnetic moment of the muon

$$a_\mu = \frac{(g-2)_\mu}{2}$$

- Long standing discrepancy between experiment and Standard Model
- Golden channel for precision tests of the Standard Model**
 - Experimentally known to 127 ppb (BNL & FNAL)
 - Standard Model's uncertainty much larger
 - Limited by hadronic effects



The Hadronic Light-by-Light Contribution

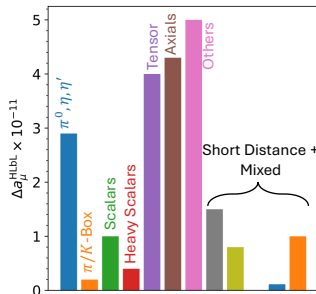
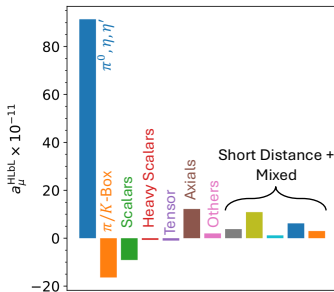


One needs to know the coupling of hadrons to photons!

- Small energies especially relevant (pQCD impossible)
- Light mesons dominate
- Two-photon coupling described by Transition Form Factors $F(Q_1^2, Q_2^2)$

The Hadronic Light-by-Light Contribution

g-2 theory initiative, Physics Reports 1143 (2025) 1-158



Provide experimental input for (pseudo-)scalar, tensor, and axial contributions!

4

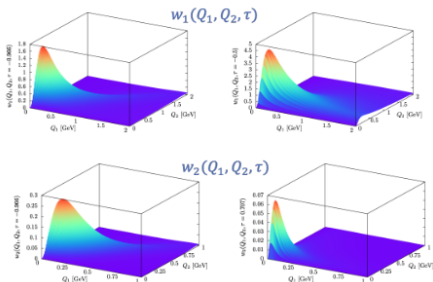
Видим, что для решения этой задачи необходимо точнее измерять сечение двухфотонного рождения частиц со спином 1, 2 и ДРУГИМ...

Most Relevant Q^2 Region

$$a_{\mu}^{\text{HLbL}; \pi^0(1)} = \int_0^\infty dQ_1 \int_0^\infty dQ_2 \int_{-1}^1 d\tau w_1(Q_1, Q_2, \tau) F_{\pi^0 \gamma^* \gamma^*}(-Q_1^2, -(Q_1 + Q_2)^2) F_{\pi^0 \gamma^* \gamma^*}(-Q_2^2, 0)$$

Universal weight functions

Form factors



Relevant Q^2 region:
 $< 1.5 \text{ GeV}^2$

[A. Nuyfeler: PRD94, 053006 (2016)]

Нужны измерения при не очень больших виртуальностях. Хотя результаты Babar&Belle $Q^2 > 10 \text{ GeV}^2$ тоже упоминаются в расчете **HLbL** вклада.

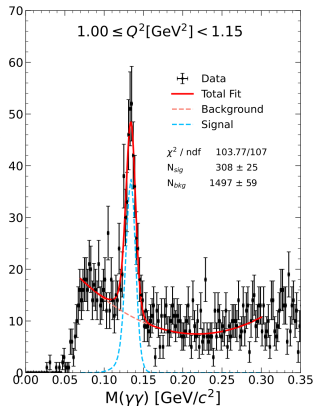
Study of $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$

- Single Tag Measurement (2.9 fb^{-1} @ 3.773 GeV)
 - Require quasi-real photon
- Select ...
 - ... one final state lepton
 - ... require small scattering angle of missing momentum $\rightarrow$ small missing Q^2

- Background suppression and subtraction

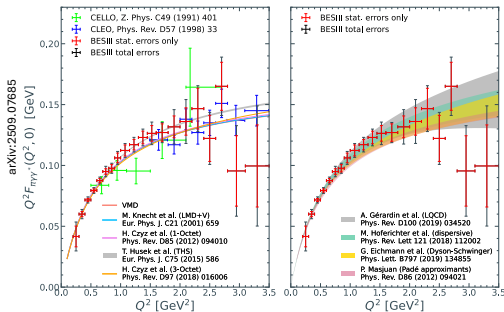
$$|F(Q^2, 0)|^2 = \frac{N}{\Delta Q^2 L \varepsilon (1 + \delta)} \left(\frac{d\sigma_{WZW}}{dQ^2} \right)^{-1}$$

- Normalize to **luminosity**, **efficiency**, **point-like cross section**, and **corrections for radiative effects and finite 2nd virtuality**



12

Study of $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$

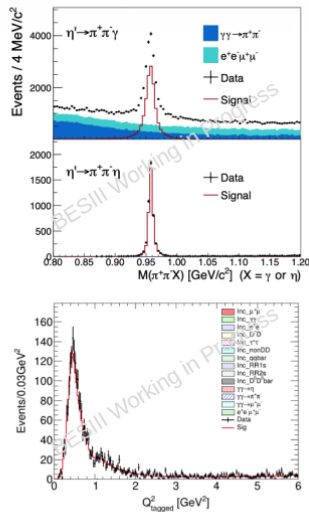


- Good agreement with previous measurements
- Most precise measurement at small Q^2
- Excellent agreement with
 - Lattice QCD
 - Dispersive calculations
 - Dyson-Schwinger
- To be repeated with 20 fb⁻¹
 - Also for η and η'

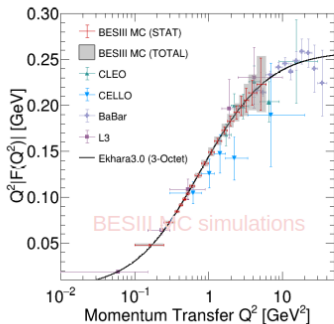
Результаты выглядят уже хорошо, хотя пока обработанно лишь 3 из 20 1/фбн.

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$$

- 20.3 fb⁻¹ data at $\sqrt{s} = 3.773$ GeV
- Similar event selection strategy:
 - Exactly one lepton candidate with the detector acceptance, $E/P > 0.8$
 - $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ and $\pi^+ \pi^- \eta$ with $\eta \rightarrow \gamma \gamma$
 - PID requirement for pion track
 - Kinematic fit with one missing track
(e^+ / e^-)
 - Cut on angle of the missing momentum
 - $Q_2^2 < 0.08 \text{ GeV}^2$
 - $Q_1^2 \in [0.1, 6.0] \text{ GeV}^2$ divided into 18 bins



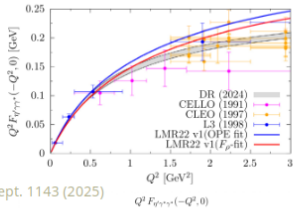
Expected Precision



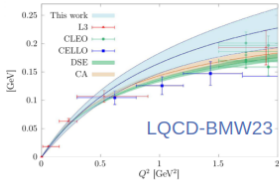
Equivalent measurement for η ongoing

SM Predictions

Holographic approach



Phys. Rept. 1143 (2025)

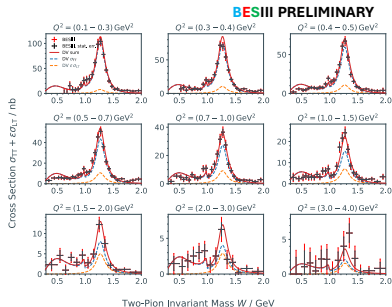


Использовали все 20 1/фбн. Ошибки довольно маленькие.

Study of $\gamma\gamma^* \rightarrow f_0/f_2 \rightarrow \pi^0\pi^0$

[Phys. Rev. D, vol. 101, no. 5, p. 054008, 2020,
Phys. Lett. B, vol. 789, pp. 366–372, 2019, Prog. Part. Nucl. Phys.,
vol. 107, pp. 20–68, 2019]

- The cross sections contain information on Transition Form Factors
- Different resonances:
 - Scalars: $f_0(500)$ & $f_0(980)$
 - Tensor: $f_2(1270)$
 - Others statistically irrelevant
- Extraction of TFFs through partial wave analysis

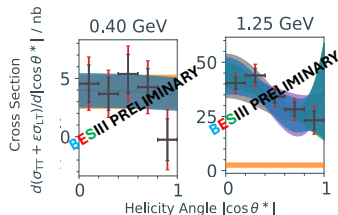
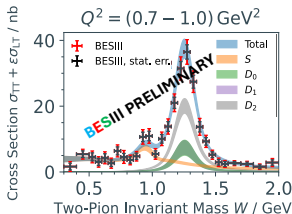


17

Испльзовали все 20 1/фбн. Распределения по углу хелисити заметно изменяются в зависимости от энергии (не стал показывать картинки). Это подтверждает, что здесь присутствует несколько резонансов.

Study of $\gamma\gamma^* \rightarrow f_0/f_2 \rightarrow \pi^0\pi^0$

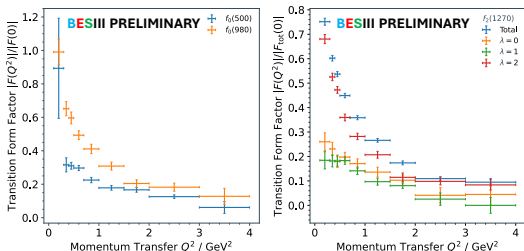
- Fit to single tagged data to extract Q^2 dependence of TFFs
- Angular modulations used to differentiate resonance
- Smearing effects taken into account



19

Разделяются вклады по 4-ём парциальным волнам, что позволяет измерить форм-факторы для каждого из резонансов.

Study of $\gamma\gamma^* \rightarrow f_0/f_2 \rightarrow \pi^0\pi^0$

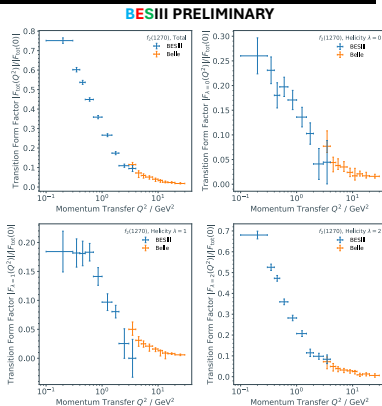


- First extraction of TFFs in a_μ relevant Q^2 range
- First measurement of $f_0(500)$ TFF
- Lowest Q^2 and most precise measurement of $f_0(980)$ and $f_2(1270)$ TFFs
 - Compatible with high Q^2 Belle data!

Измеренная зависимость формфакторов от Q^2

Comparison To Belle

- First measurement below 3 GeV^2
- Helicity-2 component dominant
- Very slight tension to existing helicity-1 Belle data
- Otherwise the data seems to be described by a smooth distribution
- "Plateau" in helicity-1 TFF
 - Drop towards zero required by Landau-Yang

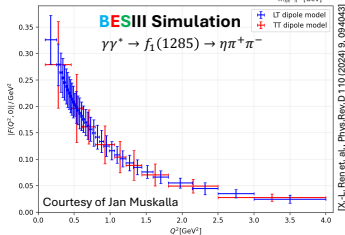
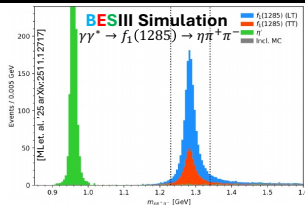


25

Хорошая согласование с результатами Belle

Conclusion and Outlook

- BESIII is perfectly suited to provide data on space-like TFFs at small to intermediate Q^2
- World best measurement of $\pi^0, f_0(500), f_0(980),$ and $f_2(1270)$ TFFs
- Several measurements in preparation
 - $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0, \eta, \eta', \pi^+\pi^-, \pi^0\eta \dots$
 - $\gamma\gamma^* \rightarrow f_1(1285) \rightarrow a_0(980)\pi/f_0(500)\eta$
 - $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \pi^0, \eta, \eta', \pi^0\pi^0$
 - Study of azimuthal angular dependencies
 - ...
- More data to come: 10 fb^{-1} @ 4.68 GeV**



謝謝

Ближние планы BESIII по сбору двухфотонного урожая

- Здесь наблюдается явный застой. Последняя публикация (которую я нашел) относится к 2023 г. Зато нет заклинаний про **HLbL**.
- Просмотрел результаты с Belle, по материалам недавнего “*Workshop for two-photon physics and related detection technology. Fudan University, May 2026*” в Китае. Все ссылки на результаты до 2020 г.
- Покажу пару последних результатов. 10 pages, 9 figures –
Найдено $7.9 \pm 3.1(\text{stat.}) \pm 1.5(\text{syst.})$ событий $X(3915)$. Есть картинка зависимости сечения от Q^2 !
First measurement of the Q^2 distribution of $X(3915)$ single-tag two-photon production.

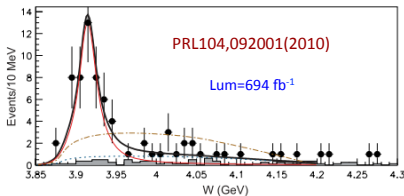
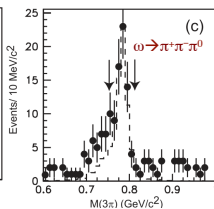
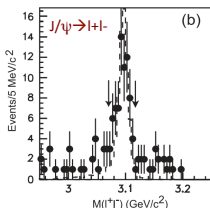
(The Belle Collaboration)

We report the first measurement of the Q^2 distribution of $X(3915)$ produced by single-tag two-photon interactions. The decay mode used is $X(3915) \rightarrow J/\psi\omega$. The covered Q^2 region is from $1.5 \text{ (GeV}/c)^2$ to $10.0 \text{ (GeV}/c)^2$. We observe $7.9 \pm 3.1(\text{stat.}) \pm 1.5(\text{syst.})$ events, where we expect 4.1 ± 0.7 events based on the $Q^2 = 0$ result from the no-tag two-photon process, extrapolated to higher Q^2 region using the $c\bar{c}$ model of Schuler, Berends, and van Gulik. The shape of the distribution is also consistent with this model; we note that statistical uncertainties are large.

- Раньше уже были публикации по этой частице $\chi(3915)$. Это, предположительно, $\chi_{c0}(2P)$, но нет твердой уверенности. PRL 104,092001(2010), использованная статистика 700 $1/\text{fbн}$.

Observation of a charmonium-like enhancement in $\gamma\gamma \rightarrow \omega J/\psi$ process.

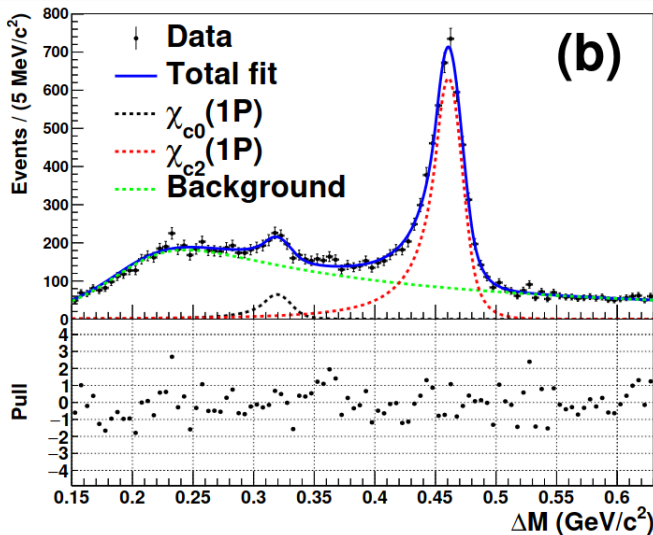
$\chi_{c0}(2P)$ candidate



1. Belle $\gamma\gamma \rightarrow \omega J/\psi$ process using “zero-tag” events.
2. Observe a structure near 3.9 GeV, $\chi(3915)$ significance 7.7σ
3. Mass= $(3915 \pm 3 \pm 2)$ MeV, width= $(17 \pm 10 \pm 3)$ MeV
4. Candidate for $\chi_{c0}(2P)$

- **Measurement of two-photon decay width of $\chi_{c2}(1P)$ in $\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c2} \rightarrow J/\psi\gamma$ at Belle.** Последние изменения 24 Jan 2023.

ABSTRACT: We report the measurement of the two-photon decay width of $\chi_{c2}(1P)$ in two-photon processes at the Belle experiment. We analyze the process $\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c2}(1P) \rightarrow J/\psi\gamma$, $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$ ($\ell = e$ or μ) using a data sample of 971 fb^{-1} collected with the Belle detector at the KEKB e^+e^- collider. In this analysis, the product of the two-photon decay width of $\chi_{c2}(1P)$ and the branching fraction is determined to be $\Gamma_{\gamma\gamma}(\chi_{c2}(1P))\mathcal{B}(\chi_{c2}(1P) \rightarrow J/\psi\gamma)\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-) = 14.8 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 0.7(\text{syst.}) \text{ eV}$, which corresponds to $\Gamma_{\gamma\gamma}(\chi_{c2}(1P)) = 653 \pm 13(\text{stat.}) \pm 31(\text{syst.}) \pm 17(\text{B.R.}) \text{ eV}$, where the third uncertainty is from $\mathcal{B}(\chi_{c2}(1P) \rightarrow J/\psi\gamma)$ and $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-)$.

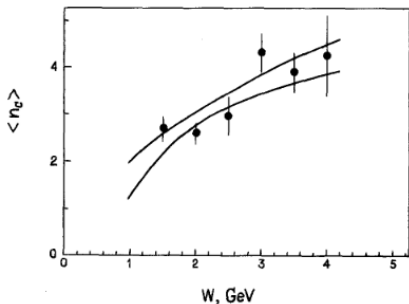


Разница в массах между $M(I^+I^-\gamma)$ и $M(I^+I^-)$. Здесь пары e^+e^- и $\mu^+\mu^-$ выбраны вблизи массы J/ψ . Спектр по сайдбендам показан зеленым.

- Фотон так же неисчерпаем, как и атом электрон!
- А если они собираются по 2 или, даже, по 3, то работы хватит на много человек и лет.
- Спасибо за внимание!

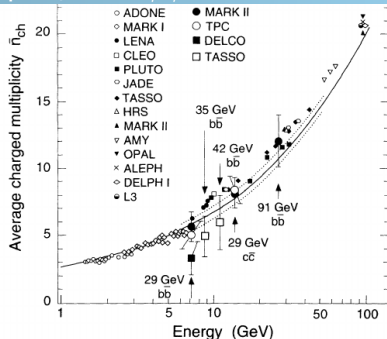
- Представляется интересным измерение инклюзивных сечений вида $\gamma\gamma \rightarrow \pi + X, K + X, K_s + X$ в зависимости от $W(\gamma\gamma)$
- Кроме измерения сечения процесса $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ представляется важным изучение других характеристик, таких как энергетические спектры, угловые распределения и т.п.
- Одной из таких характеристик является зависимость средней множественности от инвариантной массы
- Поскольку двухфотонные события являются неизбежным фоном для всех работающих коллайдеров, важно уметь правильно моделировать этот фон. Средняя множественность является удобным параметром для настройки и проверки Монте-Карло генераторов, используемых как для изучения двухфотонных событий, так и для борьбы с ними

Множественность частиц в процессе $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$



Заряженная множественность в $\gamma\gamma$ -событиях, измеренная на МД-1.

$$n_{ch} = 1.62 \pm .37 + 1.83 \pm .45 \cdot \ln(W(\text{GeV}))$$



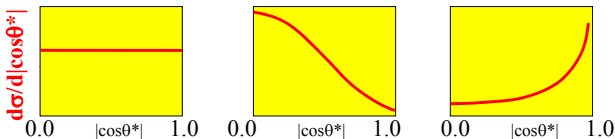
Заряженная множественность в процессе e^+e^- -аннигиляции, компиляция данных

$$\bar{n}_{had}^{corr} = 3.48 + 0.0511 \exp[2.737 \sqrt{\ln E_{c.m.}}] - 141 E_{c.m.}^{-1.80}$$

- Точность измерения этой зависимости для двухфотонных процессов во много раз хуже, чем для событий e^+e^- -аннигиляции
- Измерение средней множественности в процессе $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ и формы распределения для N_{ch} (оно необязательно Пуассоновское) было бы полезным для многих исследований

Angular dependences in $\gamma\gamma \rightarrow MM'$

General tendency in meson pair production processes



Low energy

Near the mass threshold
or Scalar resonance

Intermediate energy

Tensor resonance

High energy

pQCD

Quark line mediates

Predictions for High Energy

pQCD: $\sim 1/\sin^4\theta^*$ for a charged-meson pair

(no definite prediction for a neutral-meson pair)

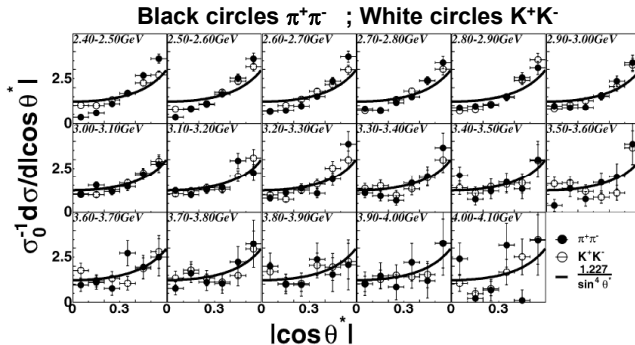
Handbag: $\sim 1/\sin^4\theta^*$ dep. , for BOTH charged and neutral



S.Uehara, KEK, GPD2010, Trento, Oct., 2010

10

$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ and $\gamma\gamma \rightarrow K^+K^-$



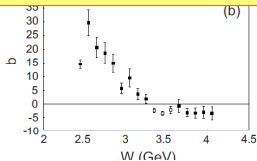
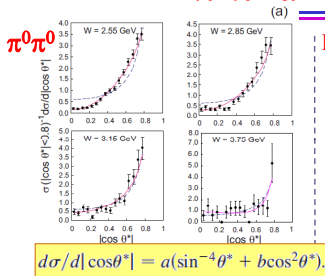
The $\sim 1/\sin^4\theta^*$ dependence is valid above $W > 3.0$ GeV
for these processes



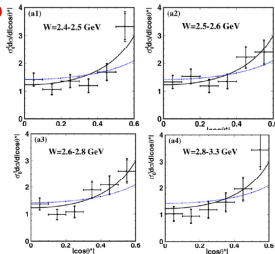
S.Uehara, KEK, GPD2010, Trento, Oct., 2010

11

$\pi^0\pi^0$ and $K_S^0K_S^0$



$K_S^0K_S^0$



Angular dependence available only for $W < 3.3 \text{ GeV}$

Black solid: Handbag ($\sim 1/\sin^4\theta^*$)

Blue dotted: Benayoun & Chernyak

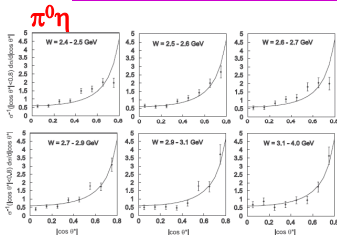
Not bad within errors

$\sim 1/\sin^4\theta^*$ valid above $W > 3.1 \text{ GeV}$

S.Uehara, KEK, GPD2010, Trento, Oct., 2010

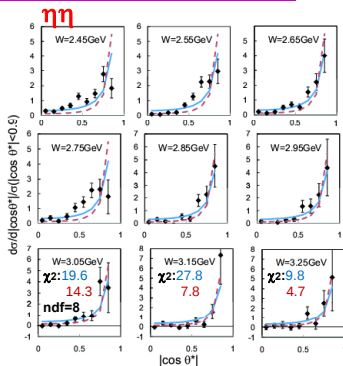
12

$\pi^0\eta$ and $\eta\eta$



The agreement with $1/\sin^4\theta^*$ is good for $W > 2.7\text{ GeV}$

The reactions **except $\eta\eta$** show an agreement with $\sim 1/\sin^4\theta^*$ above $W > 2.4 - 3.1\text{ GeV}$.



— $\sim 1/\sin^4\theta^*$ is not good anywhere.

- - - $\sim 1/\sin^6\theta^*$ is better for $W > 3.0\text{ GeV}$



S.Uehara, KEK, GPD2010, Trento, Oct., 2010

13