

Измерение параметров нейтральных мезонов в мезон-ядерных взаимодействиях на установке ГИПЕРОН-М

С.В.Евдокимов, В.И.Изучеев, Е.С.Кондратюк, Б.В.Полищук,
С.А.Садовский, А.А.Шангараев, Ю.В.Харлов

НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ

Введение

- Данная работа направлена на поиск модификации массы и ширины нейтральных мезонов, рождающегося в ядерной материи.
- Спектральная форма резонанса определяется взаимодействием соответствующих кварков со средой:

$$A = -\frac{1}{\pi} \Im D_{ret}$$

$$D_{ret}(p) = i \int d^4x e^{ipx} \theta(x_0) \langle \Omega | [O(x_0, \vec{x}), O(0, \vec{x})] | \Omega \rangle$$

$$O(t, \vec{x}) = \bar{q}(t, \vec{x}) \Gamma q(t, \vec{x})$$

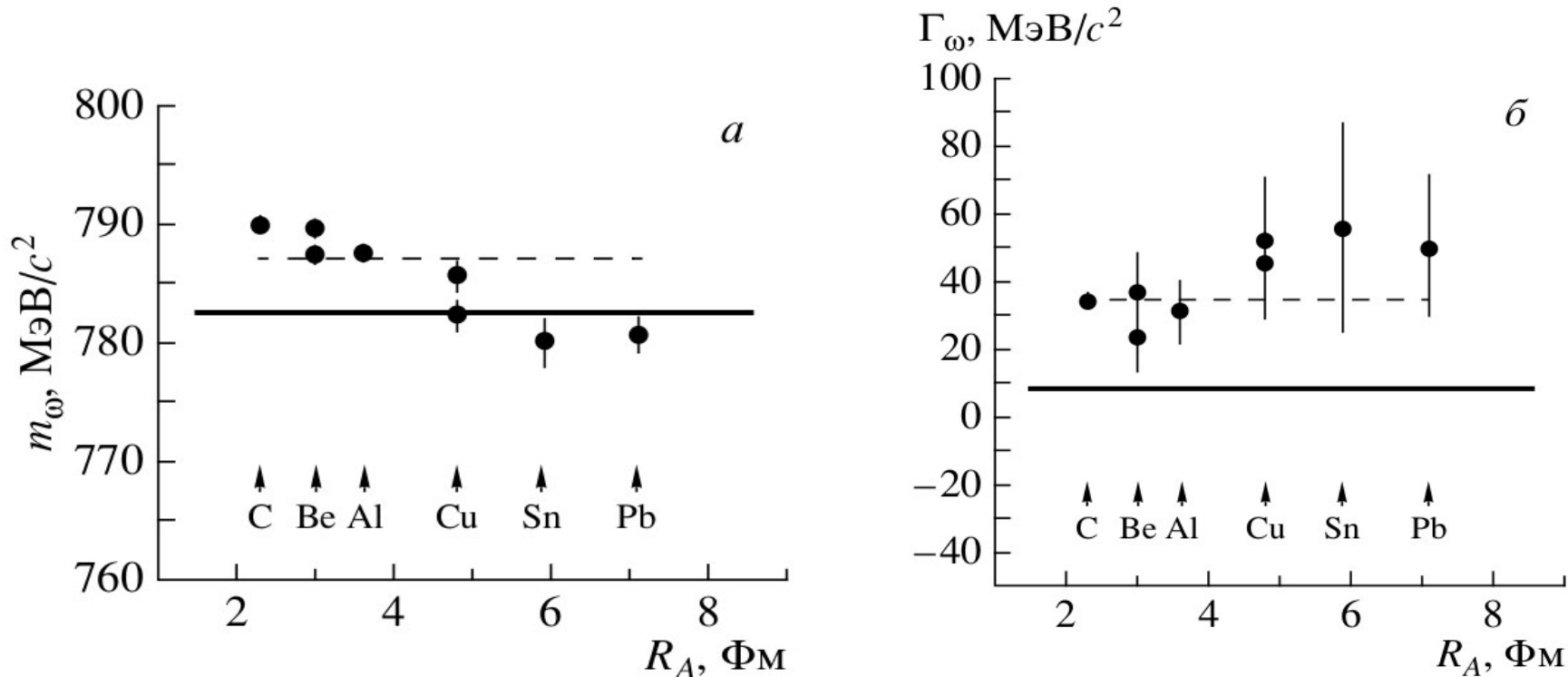
- Если среда – вакуум, то спектральная функция соответствует обычной Брейт-Вигнеровской форме резонанса, и большинство измерений в PDG соответствуют именно этому случаю.
- В случае ядерной среды $|\Omega\rangle$ спектральная функция резонанса может измениться по сравнению с вакуумным состоянием, что может приводить к изменению параметров резонанса, в том числе его массы и ширины.
- Наблюдение наличия/отсутствия таких эффектов поможет получить важную информацию о сильных взаимодействиях в непертурбативной области КХД.

Существующие результаты

experiment	momentum acceptance	ρ	ω	ϕ
KEK-E325 pA 12 GeV	$p > 0.6 \text{ GeV/c}$	$\frac{\Delta m}{m} = -9\%$ $\Delta\Gamma \approx 0$	$\frac{\Delta m}{m} = -9\%$ $\Delta\Gamma \approx 0$	$\frac{\Delta m}{m} = -3.4\%$ $\frac{\Gamma_\phi(\rho_0)}{\Gamma_\phi} = 3.6$
CLAS γ A 0.6-3.8 GeV	$p > 0.8 \text{ GeV/c}$	$\Delta m \approx 0$ $\Delta\Gamma \approx 70 \text{ MeV}$ ($\rho \approx \rho_0/2$)		
CBELSA /TAPS γ A 0.9-2.2 GeV	$p > 0 \text{ MeV/c}$		Δm insensitive $p_\omega < 0.5 \text{ GeV/c}$ $\Delta\Gamma(\rho_0) \approx 130 \text{ MeV}$ $\langle p_\omega \rangle = 1.1 \text{ GeV/c}$	
SPring8 γ A 1.5-2.4 GeV	$p > 1.0 \text{ GeV/c}$			$\Delta\Gamma(\rho_0) \approx 70 \text{ MeV}$ $\langle p_\phi \rangle = 1.8 \text{ GeV/c}$
CERES Pb+Au 158 AGeV	$p_t > 0 \text{ GeV/c}$	broadening favoured over mass shift		
NA60 In+In 158 AGeV	$p_t > 0 \text{ GeV/c}$	$\Delta m \approx 0$ strong broadening		

Результаты ГИПЕРОН-М (2013)

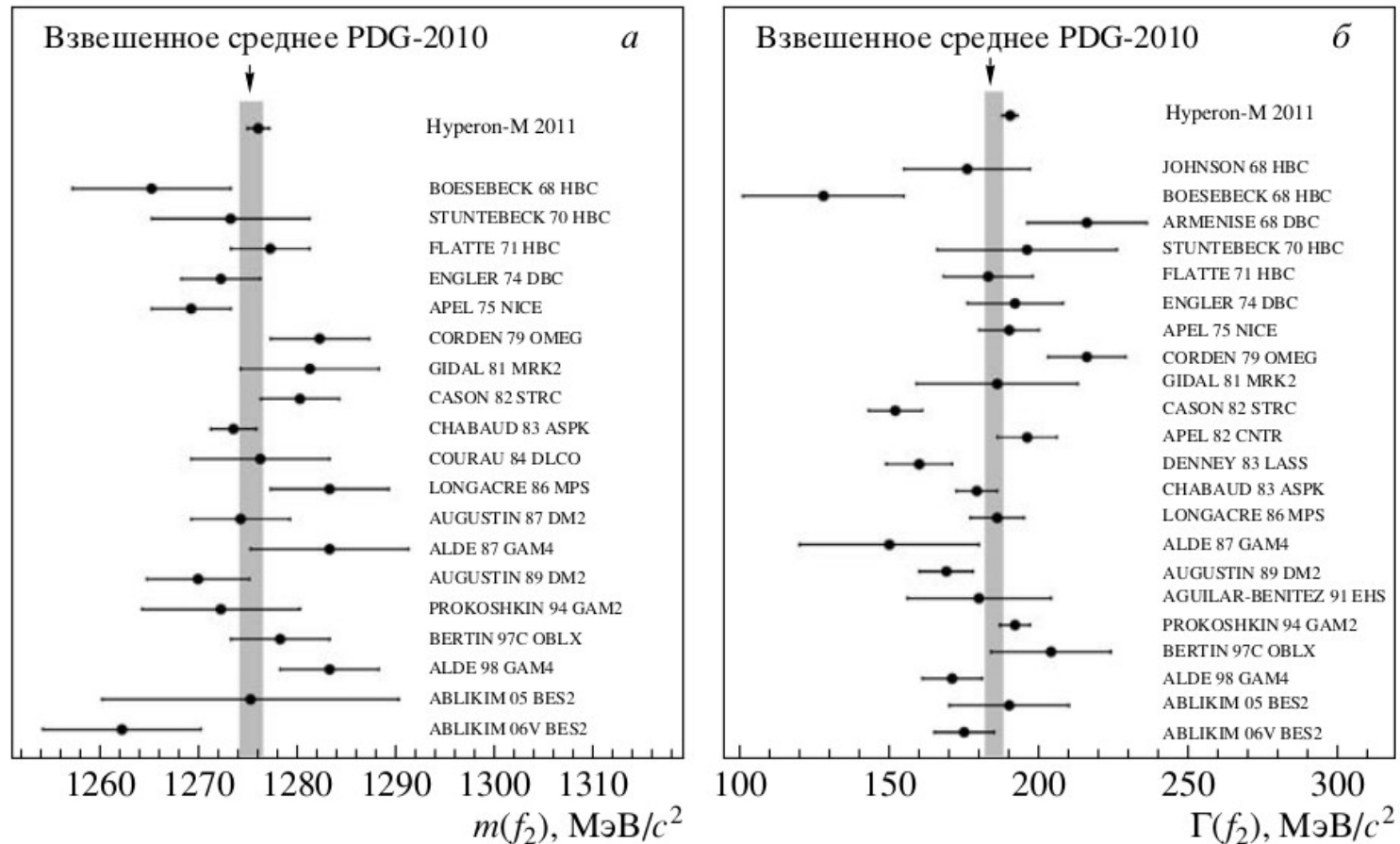
- В 2013 году была опубликована работа по измерениям масс нейтральных мезонов в эксперименте ГИПЕРОН-М (статистика сеансов 2008-2009гг.):
 - ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2013, том 76, No 11, с. 1389–1403
- В том числе были измерены параметры $\omega(782)$ -мезона на различных мишенях:



- Проведенные измерения, как видно, были существенно искажены неконтролируемыми систематическими ошибкам и несовершенным методом обработки данных.
- Статистика сеансов 2008-2018гг. и усовершенствование метода измерения должны изменить картину.

Результаты ГИПЕРОН-М (2013)

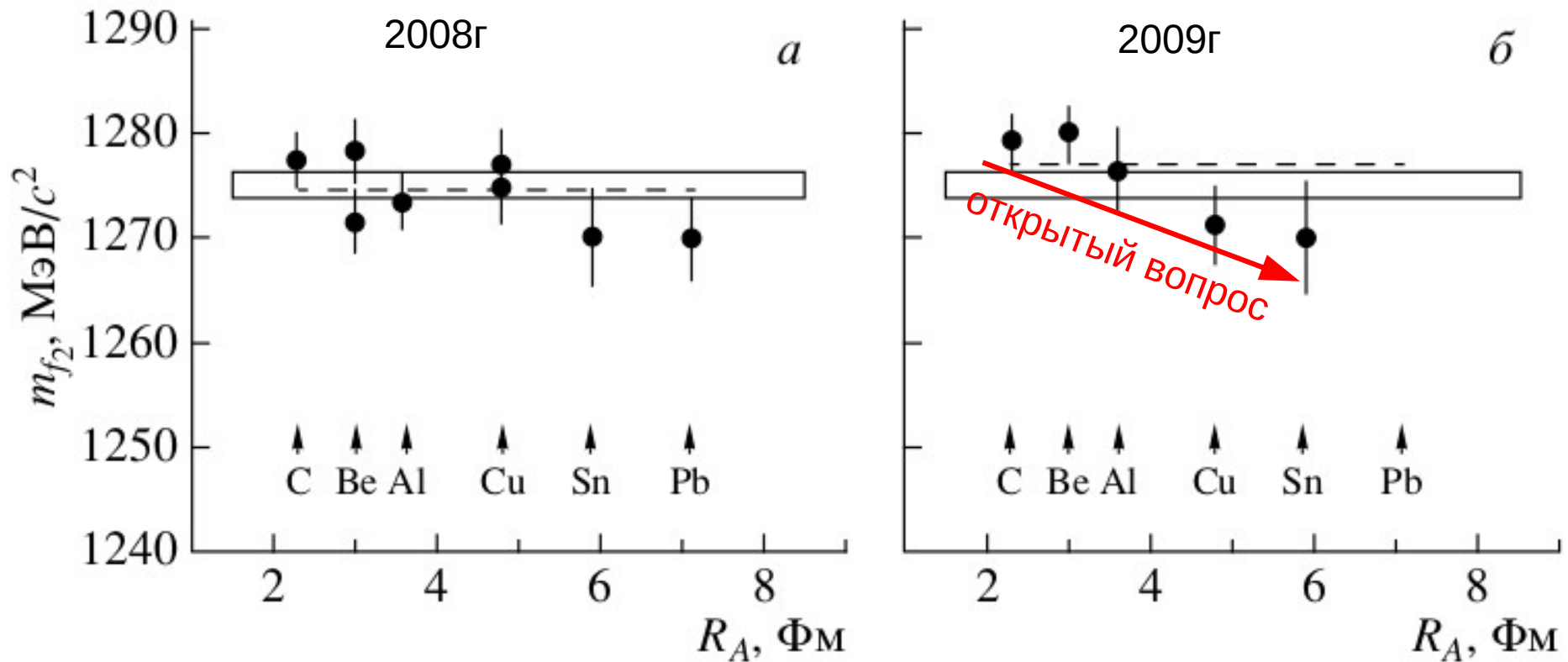
- В том числе были измерены параметры $f_2(1270)$ -мезона на различных мишенях:



- Измерение массы и ширины позволило улучшить мировые данные (включены в PDG в 2014 году).
- Статистика сеансов 2008-2018гг. и усовершенствование метода измерения позволят еще уточнить мировые данные.

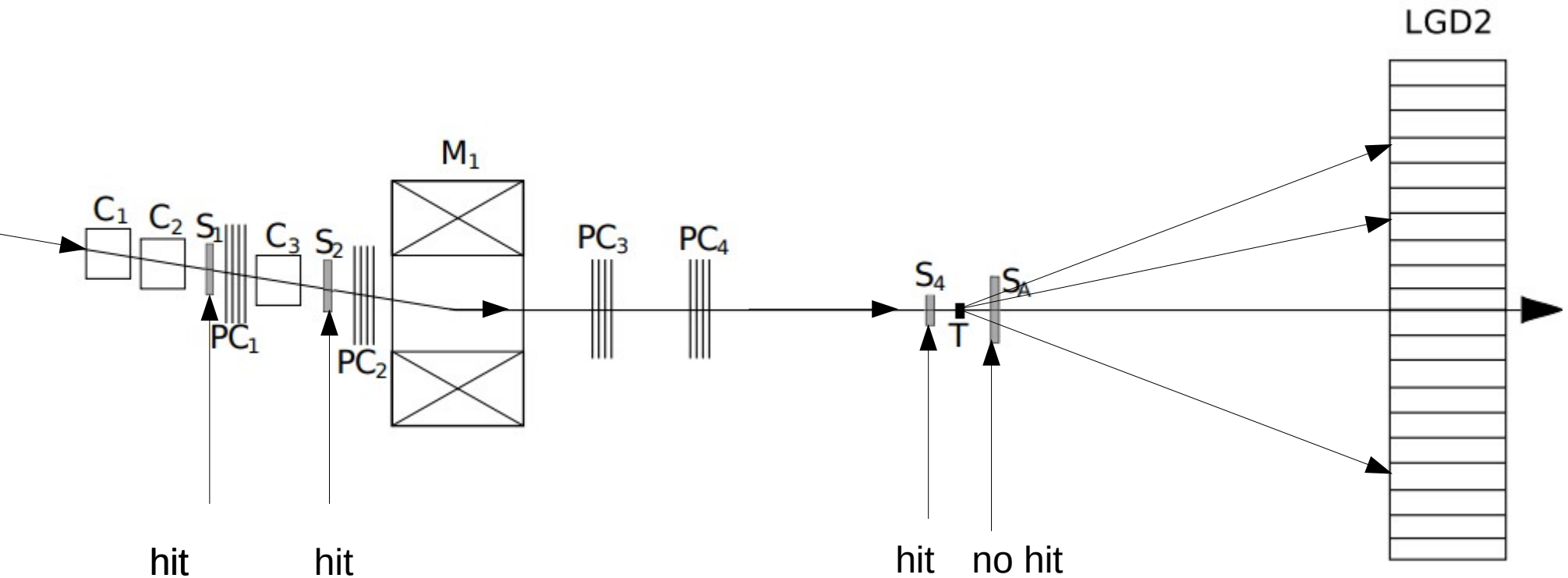
Результаты ГИПЕРОН-М (2013)

- В том числе были измерены параметры $f_2(1270)$ -мезона на различных мишенях:



- Измерение массы в сеансе 2009г показывает возможное наличие зависимости массы от ядра → открытый вопрос, требующий более тщательного изучения.
- Статистика сеансов 2008-2018гг. и усовершенствование метода измерения позволят еще уточнить мировые данные.

Эксперимент ГИПЕРОН-М



- Пучок 7 GeV/c, состав 50% π^+ + 46% p + 4%K⁺;
- Пучок взаимодействует с ядрами мишени T (Be, C, CH, Al, Cu, Sn, Pb), рождая вторичные частицы;
- Триггер на сцинтилляционных пучковых счетчиках $S_1 * S_2 * S_4 * \bar{S}_A$ выбирает события, в которых наблюдаются лишь нейтральные кластеры в э.м. калориметре LGD2 (Lead Glass Detector);
- Таким образом, в регистрируемых событиях возможно наблюдение нейтральных резонансов, распадающихся на фотоны в конечном состоянии;

Реконструкция событий

- При срабатывании триггера амплитуды с фотоумножителей LGD2 считывались, оцифровывались и записывались на диск. Электроника системы сбора данных эксперимента реализована в стандарте МИСС
- При обработке данных записанные амплитуды переводились в выделенные энергии в ячейках с помощью калибровочных коэффициентов:
 - Калибровка детектора была произведена на двухфотонных событиях;
 - Для данной ячейки строилось распределение по массе 2γ-событий, в которых один из фотонов попадал в эту ячейку;
 - Калибровочный коэффициент подбирался так, чтобы соответствующий пик от распада π⁰-мезона соответствовал его табличной массе;
- Выделенные в ячейках LGD2 энергии в данном событии объединялись в кластеры, определялись их координаты в плоскости (X,Y) и энергии.
- Импульс фотонов определялся по известной точке взаимодействия частиц пучка с мишенью (координаты центра мишени), и реконструированным координатам и энергиям ливней в калориметре.
- Из-за нелинейности энергетической шкалы калориметра энергии фотонов были далее скорректированы:

$$E_{corr}(E) = E \left(1 + \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i}{E} \ln(E / 1 \text{ МэВ}) \right)$$

- Метод энергетической коррекции был представлен ранее и опубликован в работе “ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА”, 2011, № 5, с. 88–92

$\omega(782)$ -мезон

Отбор событий

- Единственным каналом распада $\omega(782)$ -мезона на фотоны в конечном состоянии с заметным брэнчингом является распад

$$\omega(782) \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3 \gamma$$

- Поэтому для анализа $\omega(782)$ -мезонов отбирались события с 3 фотонами в конечном состоянии.
- Также отбирались и события с 2 фотонами для контроля масс π^0 - и η -мезонов.
- Отобранные события обрабатывались далее с использованием процедуры кинематического 1С фита:
 - Все возможные комбинации пар фотонов из трёх фитировались 2 конкурирующими гипотезами:
 - $M(\gamma\gamma) = M(\pi^0)$;
 - $M(\gamma\gamma) = M(\eta)$;
 - Для наилучшей по вероятности пары проводился отбор $\chi^2_{\pi\gamma} < 5.2$, отобранные события $\pi^0\gamma$ использовались для дальнейшего анализа.
- $\omega(782)$ -мезон в основном рождается в реакции перезарядки
Поэтому его энергия близка к энергии пучка. Чтобы избавиться от заведомо фоновых событий, производился отбор по полной энергии $E_{\text{tot}} > 4$ ГэВ.
- Для анализа использовались данные эксперимента, набранные в 2008-2018гг., на различных ядерных мишенях.

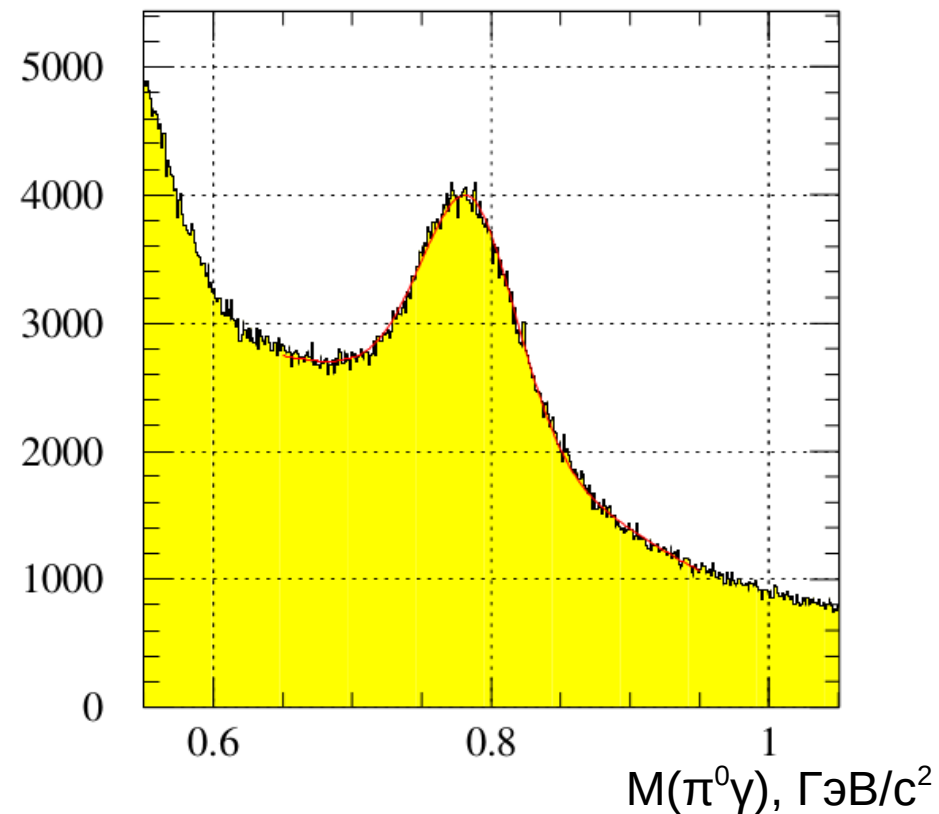
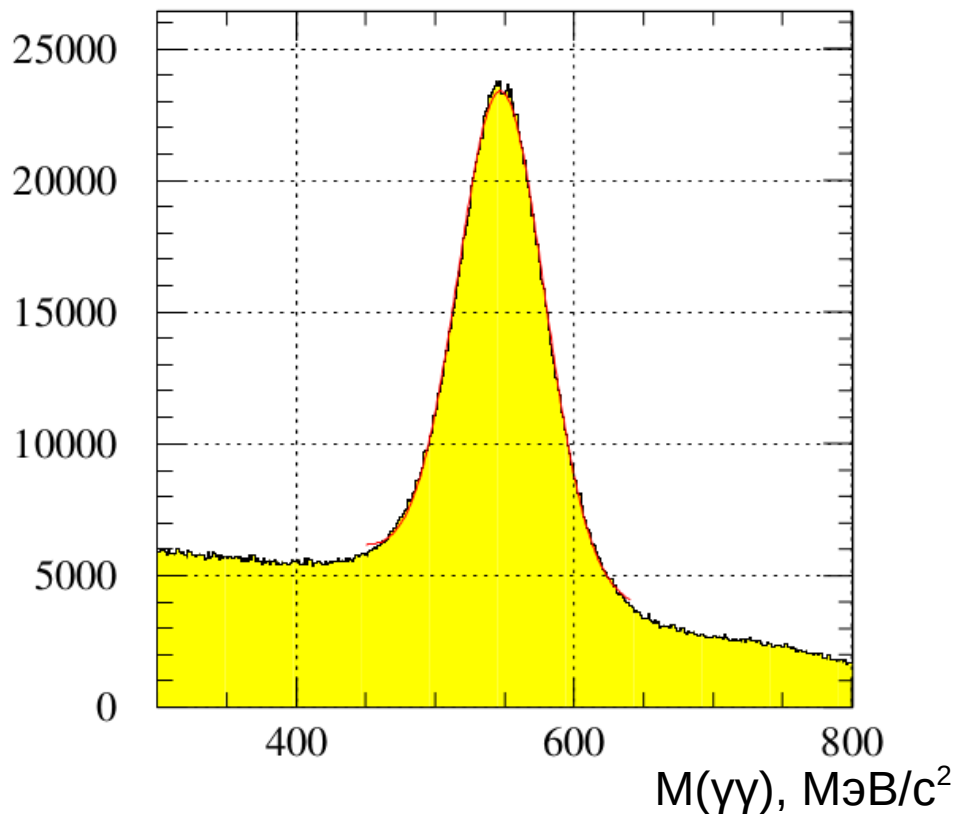
Использованные мишени

Мишень	Радиус ядра мишени (Фм)	Радиационная длина вещества (см)	Толщина мишени (см)	Радиационная толщина мишени (X ₀)	Ядерная длина вещества (г/см ²)	Ядерная толщина мишени (λ)
C	2,3	19.3	7.5	0,399	85.8	0,193
CH	2,3	50.3	8.0	0.159	78.5	0.091
Be	3,0	35.3	7.8	0,221	77.8	0.185
Al	3,6	8.90	3.5	0,393	107.2	0,088
Cu	4,8	1.43	0.65	0,375	137.3	0.038
Sn	5,9	1.21	0.50	0.414	166.7	0.022
Pb	7,1	0.56	0.25	0.445	199.6	0,014

- Для поиска модификации массы и ширины $\omega(782)$ -мезона были использованы мишени, радиус ядер которых в значительной степени покрывает доступный диапазон от 2.3 Фм до 7.1 Фм.
- Толщины мишеней подобраны таким образом, что они имеют радиационную толщину одного порядка для минимизации систематических погрешностей, связанных с прохождением конечных фотонов через мишень.
- При этом ядерная толщина мишеней уменьшается с увеличением массового числа A мишени.
- Эффекты, связанные с разными мишенями, учтены с помощью МК моделирования

Анализ данных

- Для увеличения статистической точности в анализе использовались все данные сеансов 2008-2018гг. При этом в каждом отдельном сеансе масса π^0 , наблюдаемого в двухфотонных событиях на каждой мишени корректировалась так, чтобы с точностью $0.2 \text{ МэВ}/c^2$ она совпадала с табличной. Такое совпадение было обеспечено за счёт тюнинга общей нормировки калибровочных коэффициентов, отличающихся от сеанса к сеансу и от мишени к мишени.



Суммарные спектры $\gamma\gamma$ -событий в области массы η -мезона (слева) и $\pi^0\gamma$ -событий в области массы $\omega(782)$ -мезона на Ве мишени приведены для иллюстрации.

Измерение параметров $\omega(782)$ -мезона

- Для точного измерения массы и ширины $\omega(782)$ -мезона был применен метод параметрического анфолдинга: спектр масс фитируется параметризацией спектра масс $\omega(782)$ -мезона, полученного с помощью Монте Карло моделирования.
- Сигнал – Брейт-Вигнеровский резонанс:

$$BW_{\omega}(m, m_{\omega}, \Gamma_{\omega}) = \left| \frac{m}{\sqrt{q}} \cdot \frac{m_{\omega} \Gamma}{m_{\omega}^2 - m^2 - im_{\omega} \Gamma} \right|^2, \quad \Gamma = \Gamma_{\omega} \left(\frac{q}{q_{\omega}} \right)^{2l+1} \frac{D_l(rq_{\omega})}{D_l(rq)}$$

- Параметризация реконструированного спектра была выбрана в виде

$$F_{\omega}(m, m_{\omega}, \Gamma_{\omega}) = \left| \frac{m}{\sqrt{q}} \cdot \frac{m_{\omega} \Gamma}{m_{\omega}^2 - m^2 - im_{\omega} (\Gamma + \Gamma_a)} \right|^2 \times \sum_{i=0}^n a_i H_i \left(\frac{m - m_{\omega}}{m_0} \right)$$

Здесь m_{ω} , Γ_{ω} – параметры $\omega(782)$ -мезона, D_l – факторы Блатта-Вайскопфа ($l=1$ для $\omega(782)$ -мезона), $H_i(x)$ – функции Эрмита, m_0 – нормировка массовой шкалы.

Γ_a и a_i определяются из Монте Карло моделирования.

Монте Карло моделирование

- Модель МК включает в себя первичный генератор событий, модель установки ГИПЕРОН-М, транспортный код, отбор, оцифровку и форматирование событий:
 - Генератор событий представляет собой генератор квазидвухчастичных реакций

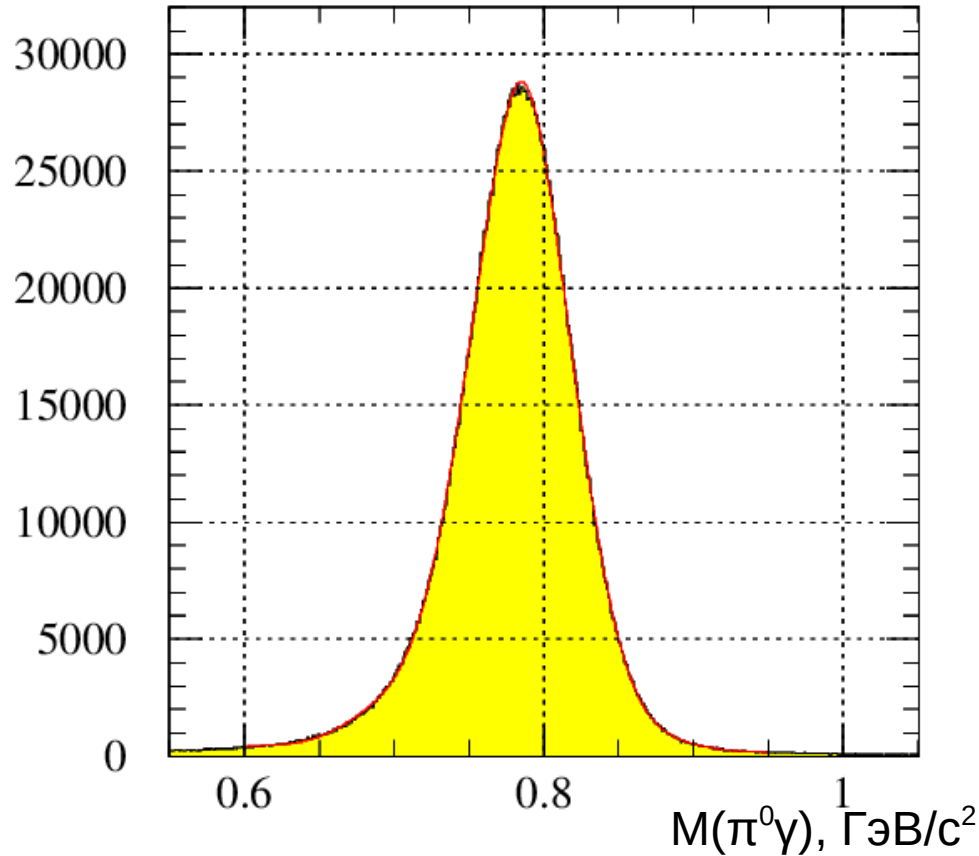


При этом распределения по t и массе системы X подобраны таким образом, чтобы качественно воспроизводить наблюдаемые в эксперименте спектры.

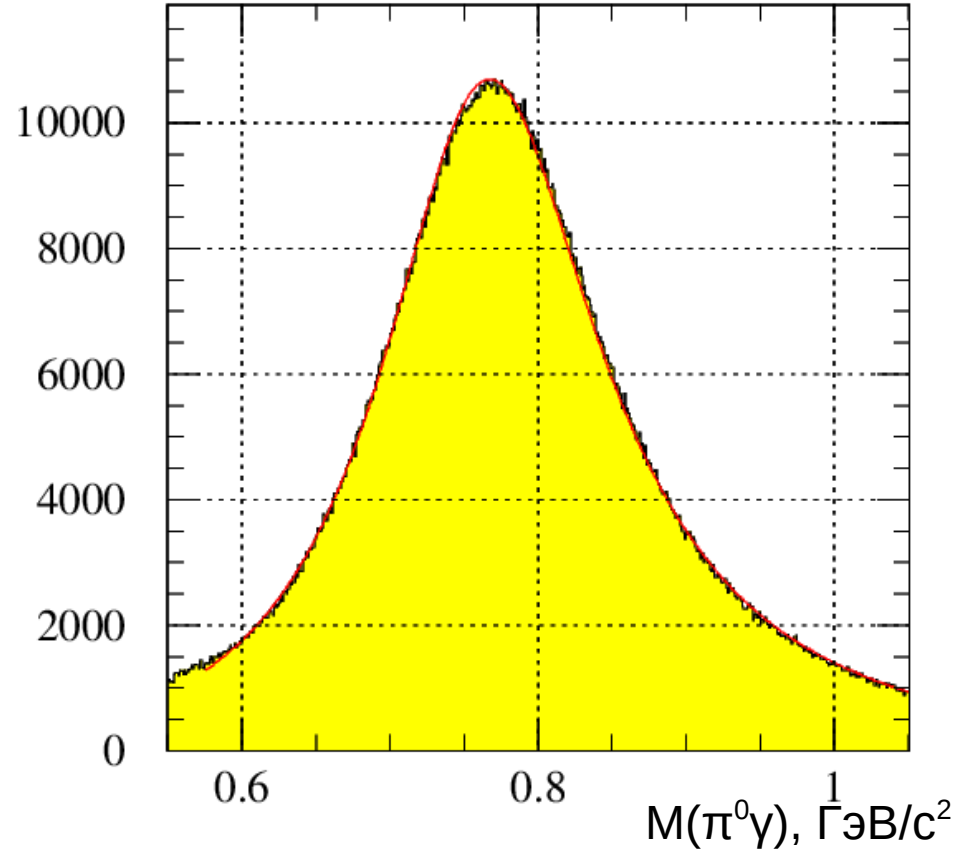
- Модель установки включает в себя мишень, сцинтилляционные счётчики S4 и Sa, и калориметр LGD2.
- Сгенерированные фотоны передаются транспортному коду GEANT3, который моделирует их прохождение через модель установки.
- С помощью энергий, выделившихся в счётчиках S4 и Sa, моделируется нейтральный триггер. Требуется наличие сигнала в S4 выше порога регистрации заряженной частицы и его отсутствие в Sa.
- Выделившиеся в ячейках калориметра энергии оцифровываются: они делятся на соответствующий калибровочный коэффициент, результат переводится в отсчеты АЦП: целое число от 0 до 4095, к каждому каналу добавляется шум электроники.
- Результат записывается в формате данных ГИПЕРОН-М, и в последствии обрабатывается абсолютно той же программой анализа, что и эксперимент.

МК-спектры

$$\omega(782) \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3 \gamma$$



$$\rho^0(770) \rightarrow \pi^0 \gamma \rightarrow 3 \gamma$$



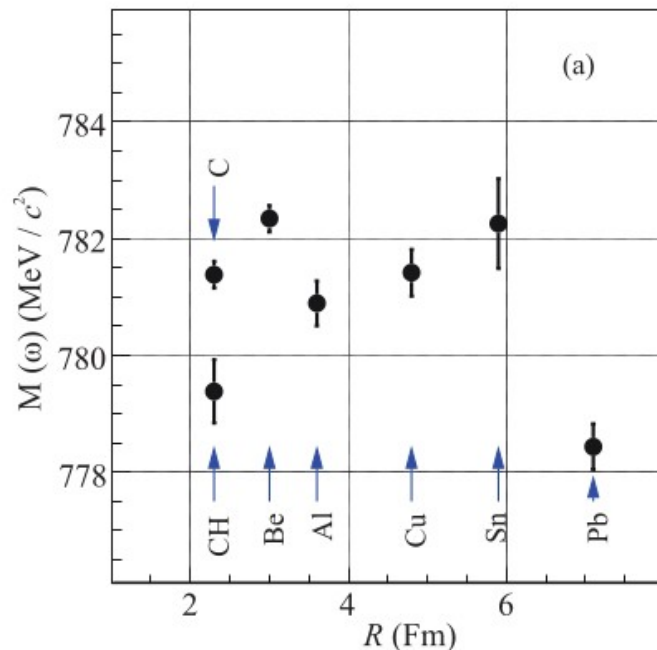
Спектры $\pi^0\gamma$ -событий, полученные в результате Монте Карло моделирования. Слева пик от распада $\omega(782) \rightarrow \pi^0\gamma$, справа – пик от распада $\rho(770) \rightarrow \pi^0\gamma$.

Полученные спектры зафитированы функцией параметризации $F(m, m_{\text{res}}, \Gamma_{\text{res}}, \Gamma_a)$ с фиксированными m_{res} и Γ_{res} , взятыми из PDG. Соответственно, фитируемыми параметрами в данном случае выступают Γ_a и коэффициенты функций Эрмита a_i .

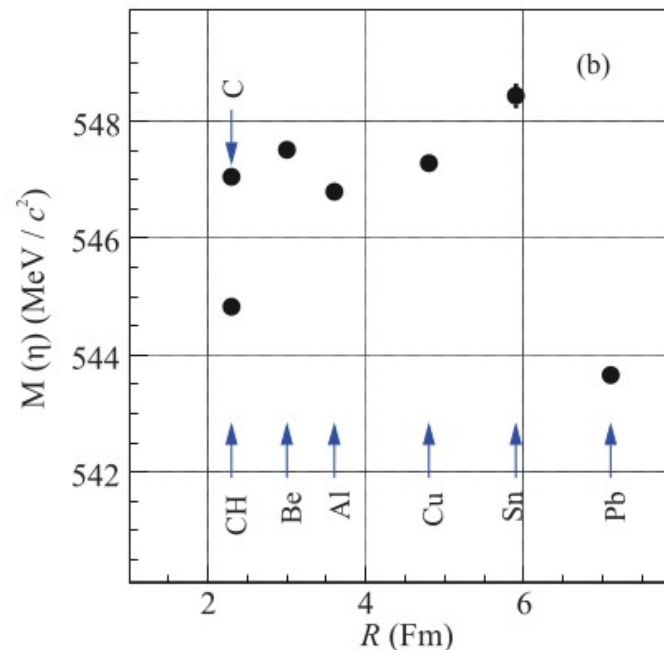
Результаты фитирования

- Наблюдаемые спектры $\pi^0\gamma$ -событий по каждой мишени были зафитированы полученной из МК параметризацией спектра $\omega(782)$ -мезона для этой мишени с линейным фоном и вкладом от распада $\rho^0(770) \rightarrow \pi^0\gamma$.
- Ожидаемое сечение рождения $\rho^0(770)$ сопоставимо с $\omega(782)$, отношение брэнчингов их распадов $BR(\rho^0(770) \rightarrow \pi^0\gamma)/BR(\omega(782) \rightarrow \pi^0\gamma) = 5.6 \times 10^{-3}$, то есть вклад $\rho^0(770)$ должен быть на уровне 0.5%.

Масса $\omega(782)$ -мезона, полученная для каждой мишени фитированием наблюдаемого на ней $\pi^0\gamma$ -спектра.



Масса η -мезона, полученная фитированием $\gamma\gamma$ -спектра на каждой мишени.



Коррекция массы

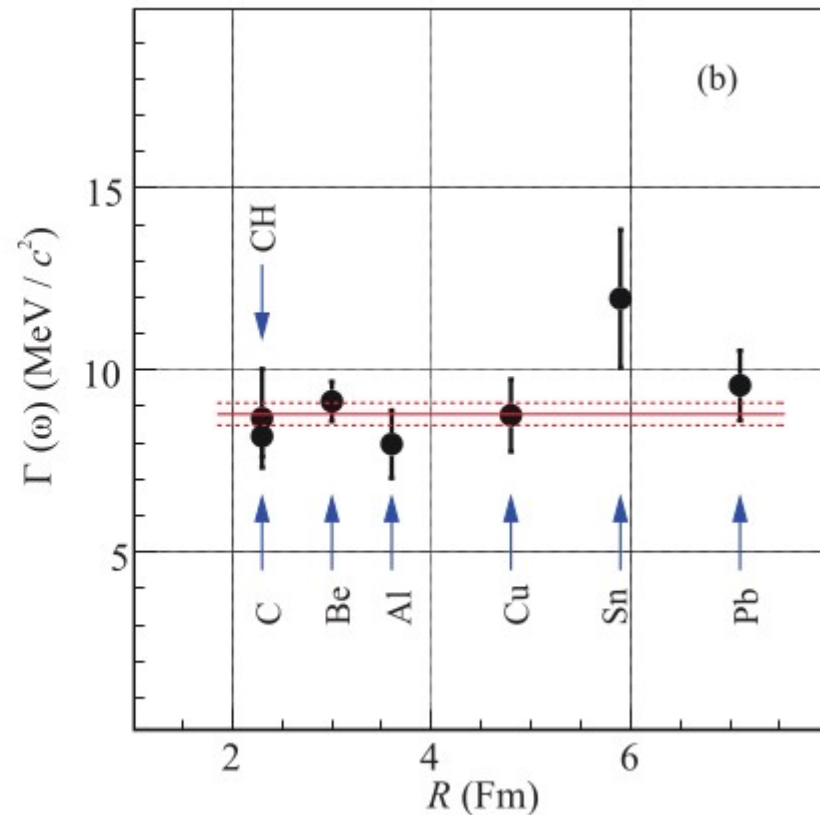
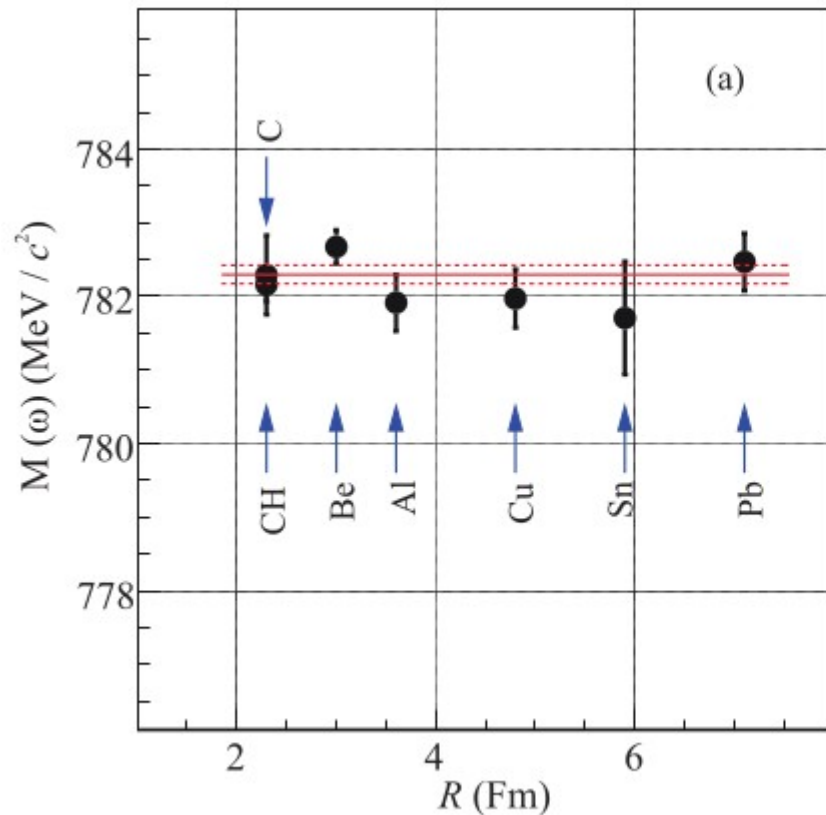
- Полученные фитированием массы $\omega(782)$ - и η -мезонов явно скореллированы.
- Однако масса η -мезона не может различаться от мишени к мишени: из-за большого времени жизни ($\tau = 2.5 \times 10^{-7}$ фм), он всегда покидает ядро и распадается вне ядерной материи.
- Скореллированность их массы говорит о наличии одинаковой неконтролируемой систематической погрешности, например, вариации энергии пучка или расстояния при смене мишени. Таким образом, полученная масса $\omega(782)$ -мезона скорректирована на массу η -мезона по формуле:

$$m_{\omega} = m_{mes}(\omega) \cdot \left(1 - \alpha \frac{m_{mes}(\eta) - m_{PDG}(\eta)}{m_{mes}(\eta)}\right)$$

- Параметр α отличен от 1 из-за того, что 3γ -события подвергаются кинематическому фиту и более устойчивы к различным отклонениям, тогда как к 2γ -событиям эта процедура не применяется, и изменение массы η -мезона будет всегда больше соответствующего изменения массы $\omega(782)$ -мезона.
- Параметр α был оценен с помощью МК-моделирования вариацией калибровочных коэффициентов (0.5%) и расстояния от мишени до калориметра (0.5%). Обе оценки совпадают:

$$\alpha = 0.6706$$

Результаты



Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 5, с. 291 – 298 http://jetpletters.ru/ps/2325/article_34585.shtml

- А-зависимости массы и ширины $\omega(782)$ -мезона **не наблюдается**.
- Результаты были профитированы константой, получены значения параметров по всем мишеням:

$$m_{\omega} = 782.30 \pm 0.13 \text{ (st)} \pm 0.26 \text{ (sys)} \text{ MeV},$$

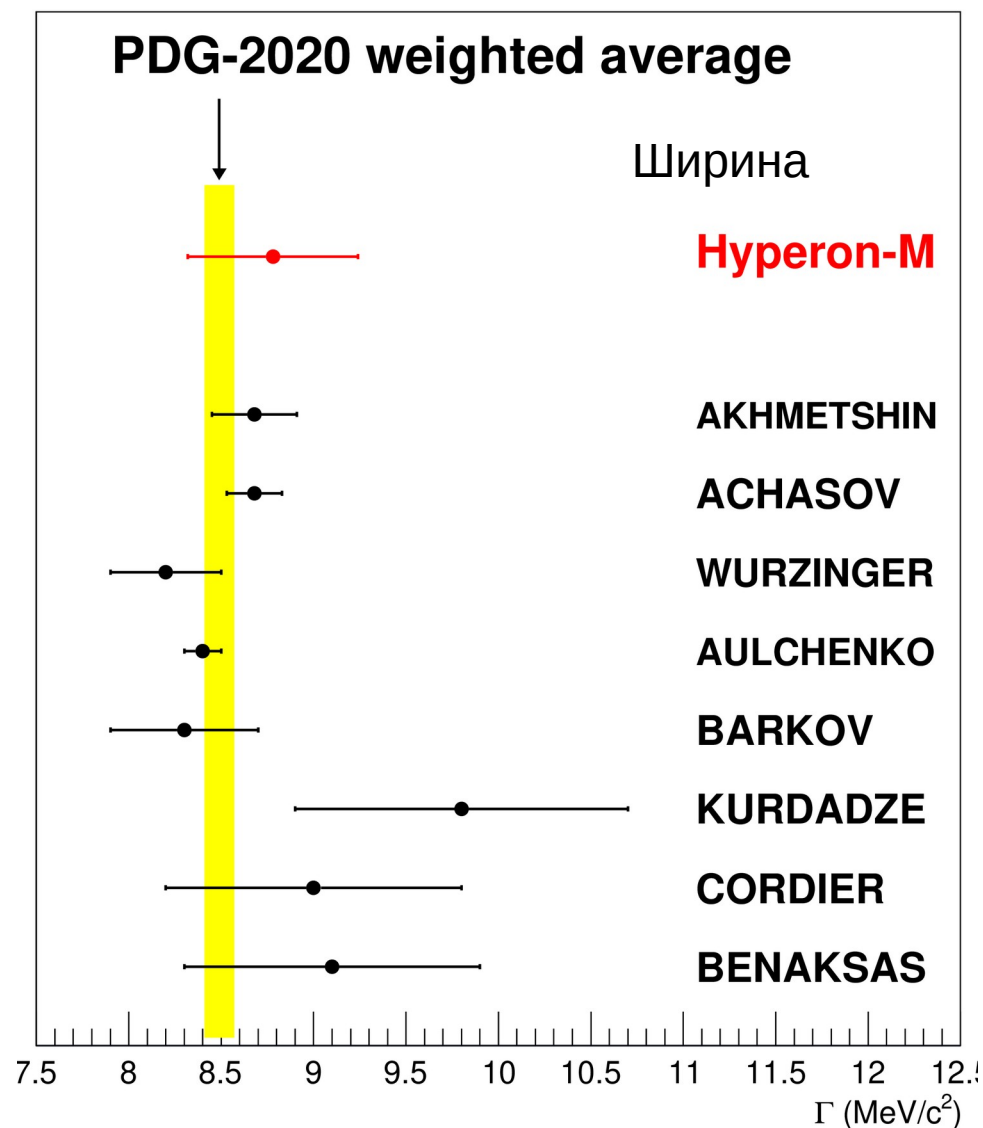
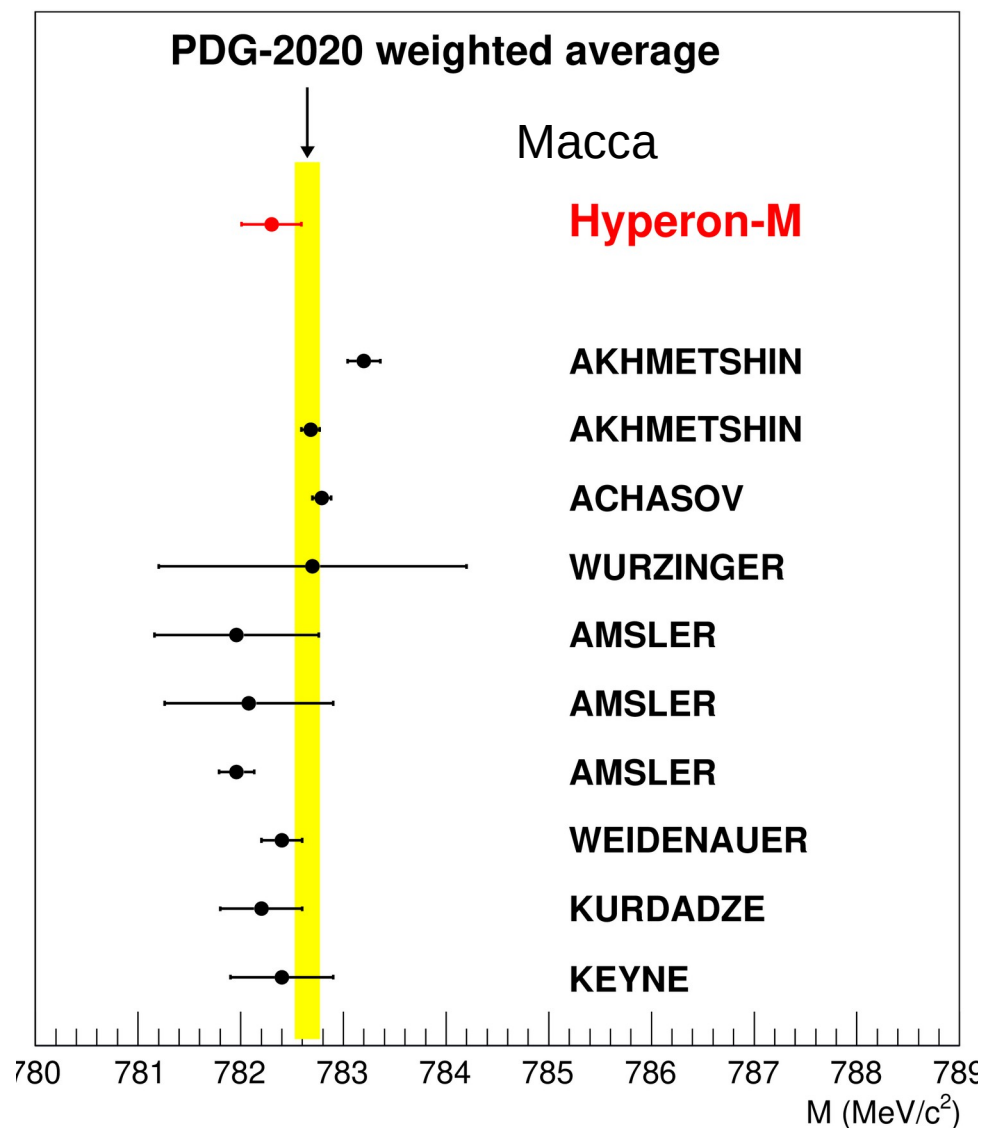
$$\Gamma_{\omega} = 8.78 \pm 0.30 \text{ (st)} \pm 0.35 \text{ (sys)} \text{ MeV}.$$

PDG: $m = 782.65 \pm 0.12 \text{ MeV}/c^2,$

$\Gamma = 8.49 \pm 0.08 \text{ MeV}/c^2$

Результаты (2)

- Систематические ошибки были оценены путем вариации отбора событий по энергии, изменением области фитирования данных и МК.



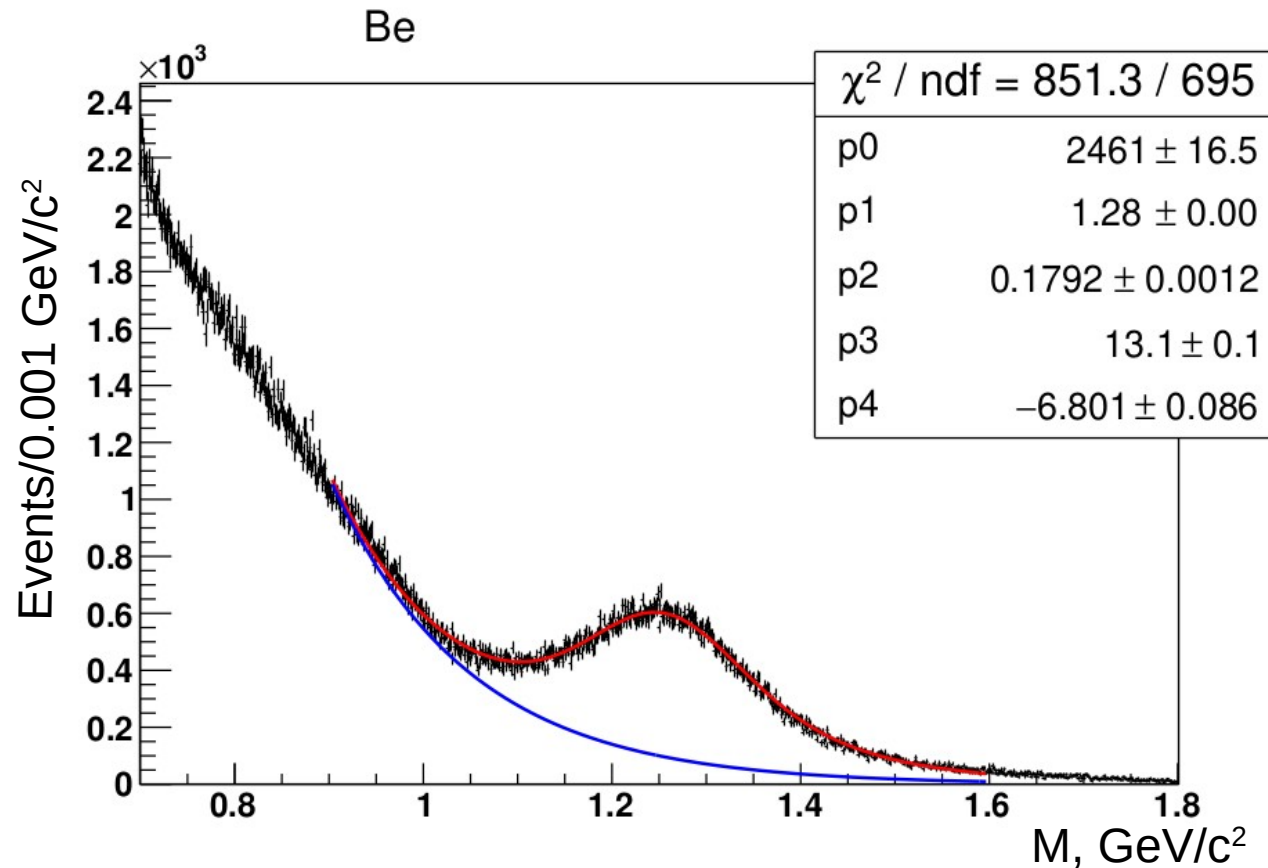
f₂(1270)-мезон

Анализ данных

- $f_2(1270)$ наблюдается в эксперименте ГИПЕРОН-М в распаде

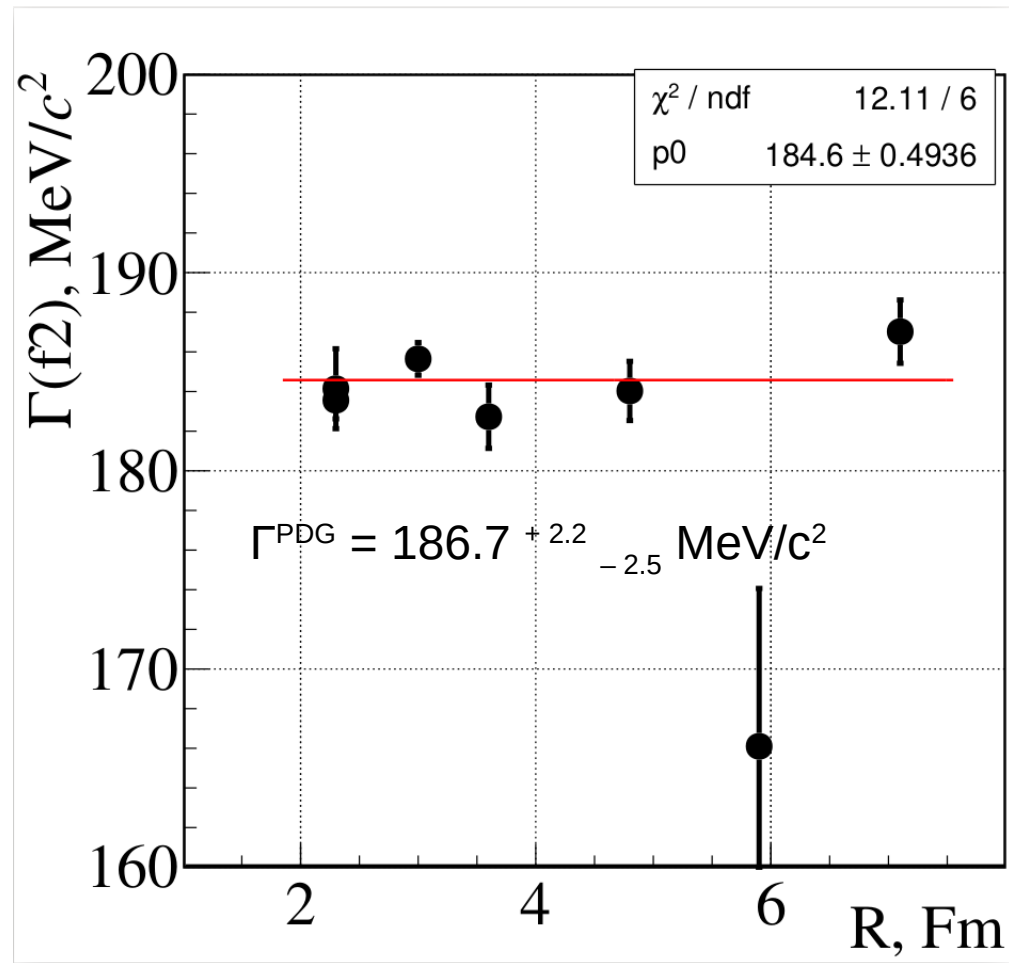
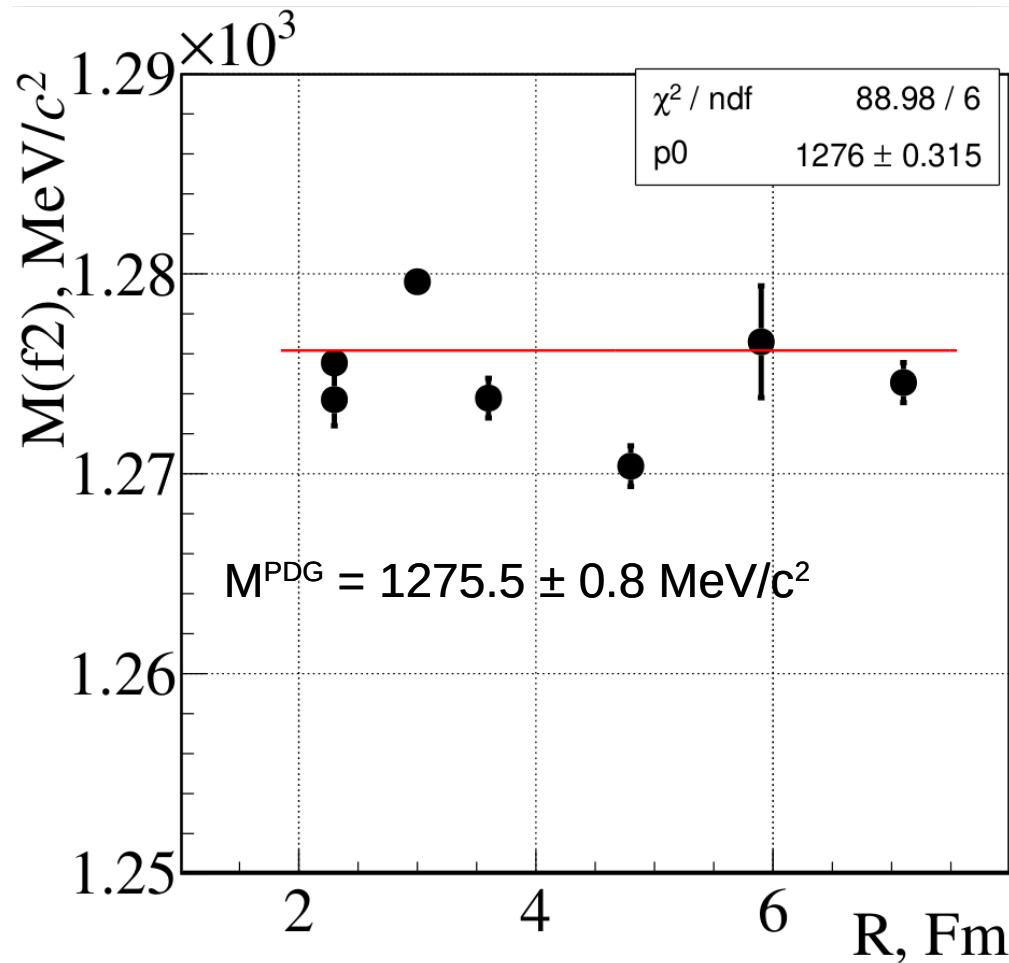
$$f_2(1270) \rightarrow 2 \pi^0 \rightarrow 4 \gamma$$

- Для измерения его массы и ширины используется описанный ранее



Представлен пример спектра $2\pi^0$ -систем, полученных в эксперименте на Be-мишени, профитированный спектральной функцией с экспоненциальным фоном.

Предварительные результаты $f_2(1270)$



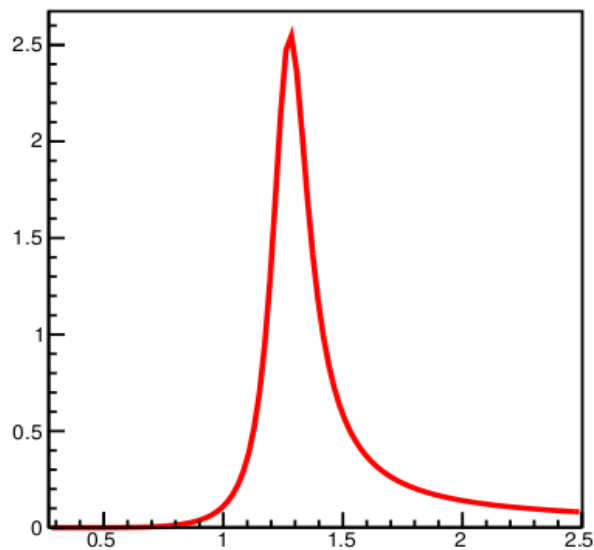
- Измерение параметров $f_2(1270)$ -мезона по совокупным данным 2008-2018гг. не показывает наличия зависимости его параметров от ядра мишени.
- Идет работа над окончательными результатами для публикации.

Заключение

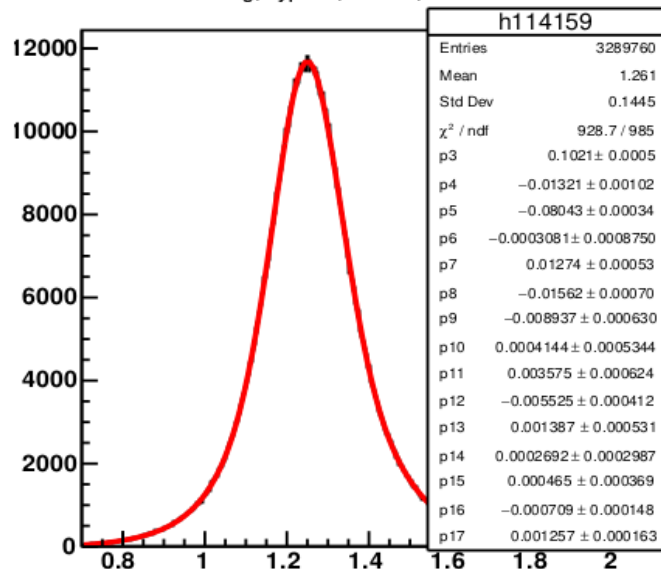
- Статистика 2008-2018гг. и усовершенствование метода обработки позволили существенно повысить точность измерения массы и ширины $\omega(782)$ -мезона в эксперименте ГИПЕРОН-М по сравнению с работой 2013 года.
- А-зависимость параметров $\omega(782)$ -мезона не наблюдается.
- Измерение массы и ширины $\omega(782)$ -мезона по совокупной статистике имеют точность уровня мировых данных и согласуются с ними.
- Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 5, с. 291 – 298
http://jetpletters.ru/ps/2325/article_34585.shtml
- Предварительные результаты измерения параметров $f_2(1270)$ -мезона находятся в стадии завершения анализа. Судя по ним, А-зависимости параметров также не наблюдается.

Backup: MK f2(1270)

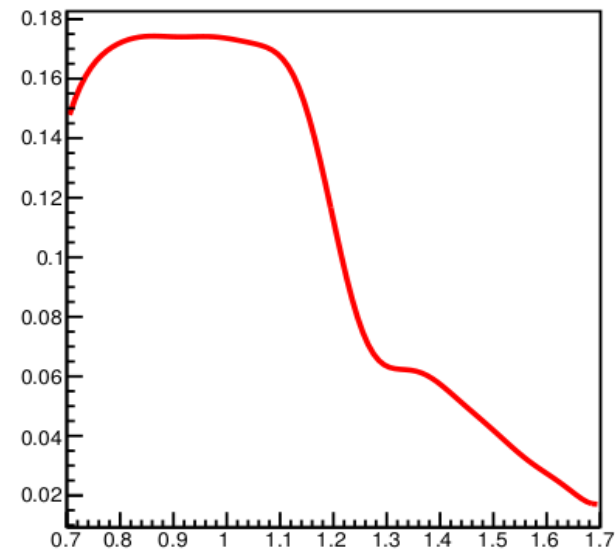
Generated BW



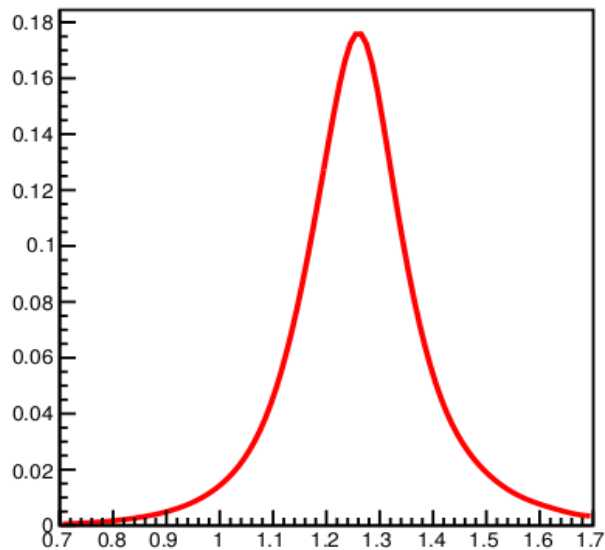
Eff. Mass: 4g, hyp 1/1, E>4500, Pt cut: 0.00



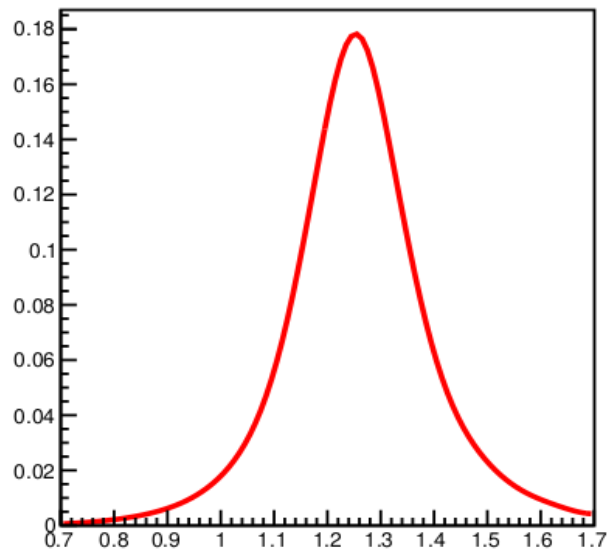
correction



BW x correction, $\Gamma = 0.16 \text{ GeV}/c^2$



BW x correction, $\Gamma = 0.18 \text{ GeV}/c^2$



BW x correction, $\Gamma = 0.2 \text{ GeV}/c^2$

