

# **Модификация свойств векторных мезонов в ядерной среде**

**А.А. Дзюба**

**Семинар ОФВЭ ФГБУ «ПИЯФ им. Б.П. Константинова»**

**6 марта 2012 г.**

# Структура доклада

1) Мотивация (коротко)

2) Эксперимент ANKE

A-зависимость сечений рождения  $\phi$ -мезона

Ширина и сечение  $\phi N$ -взаимодействия

3) Определение  $\sigma_{\phi N}$  из  $\gamma p \rightarrow \phi p$  и  $\gamma A \rightarrow \phi A$  реакций

4) Мировые экспериментальные данные по изменению свойств векторных мезонов в ядрах

AA-соударения

$\gamma A$ - и  $pA$ -реакции

A-зависимости

# Векторные мезоны

$\rho(770)$  <sup>[h]</sup>

$$I^G(J^{PC}) = 1^+(1^-)$$

Mass  $m = 775.49 \pm 0.34$  MeV

Full width  $\Gamma = 149.1 \pm 0.8$  MeV

$\omega(782)$

$$I^G(J^{PC}) = 0^-(1^-)$$

Mass  $m = 782.65 \pm 0.12$  MeV (S = 1.9)

Full width  $\Gamma = 8.49 \pm 0.08$  MeV

$\phi(1020)$

$$I^G(J^{PC}) = 0^-(1^-)$$

Mass  $m = 1019.455 \pm 0.020$  MeV (S = 1.1)

Full width  $\Gamma = 4.26 \pm 0.04$  MeV (S = 1.4)

# Изменение спектральных функций векторных мезонов в ядерной среде

S. Leupold, V. Metag, and U. Mosel, *Int. J. Mod. Phys. E* 19, 147 (2010).

R. S. Hayano and T. Hatsuda, *Rev. Mod. Phys.* 82, 2949 (2010).

Динамическое нарушение киральной симметрии в вакууме

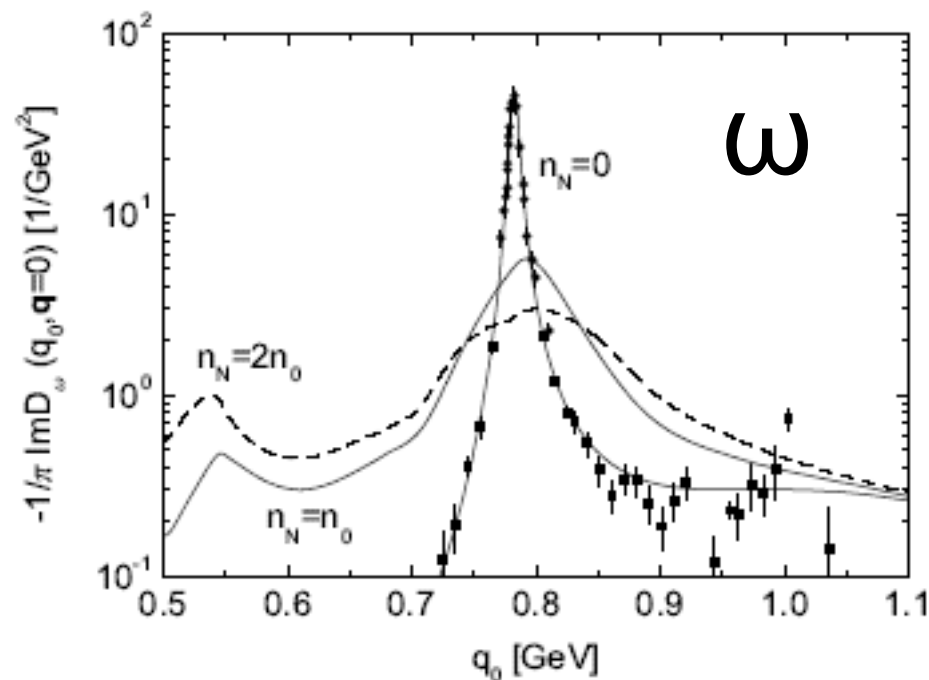
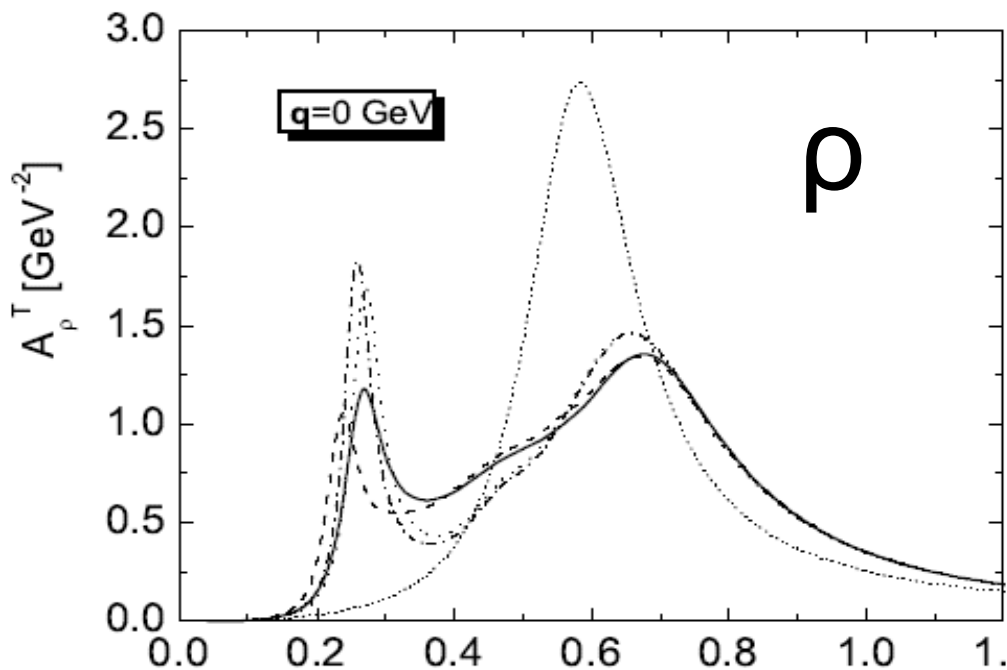
$$\mathcal{L} = \sum_q (\bar{q}_L i \not{D} q_L + \bar{q}_R i \not{D} q_R) - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^\alpha G_{\alpha}^{\mu\nu} + \sum_q (\bar{q}_L m q_R + \bar{q}_R m q_L),$$

Частичное восстановление в ядерной среде??

# Изменение спектральных функций векторных мезонов в ядерной среде

S. Leupold, V. Metag, and U. Mosel, *Int. J. Mod. Phys. E* 19, 147 (2010).

R. S. Hayano and T. Hatsuda, *Rev. Mod. Phys.* 82, 2949 (2010).



# Изменение спектральных функций векторных мезонов в ядерной среде

S. Leupold, V. Metag, and U. Mosel, *Int. J. Mod. Phys. E* 19, 147 (2010).

R. S. Hayano and T. Hatsuda, *Rev. Mod. Phys.* 82, 2949 (2010).

## Ожидание теории:

$\rho$ -мезон:

при малых импульсах: Уширяется, появляется второй пик

$> 1$  GeV: Симметричное уширение

$\omega$ -мезон:

Уширение (60 МэВ), масса не меняется

$\varphi$ -мезон:

Уширение (28 МэВ), сдвиг массы мал (-6 МэВ)

# Изменение спектральных функций векторных мезонов в ядерной среде

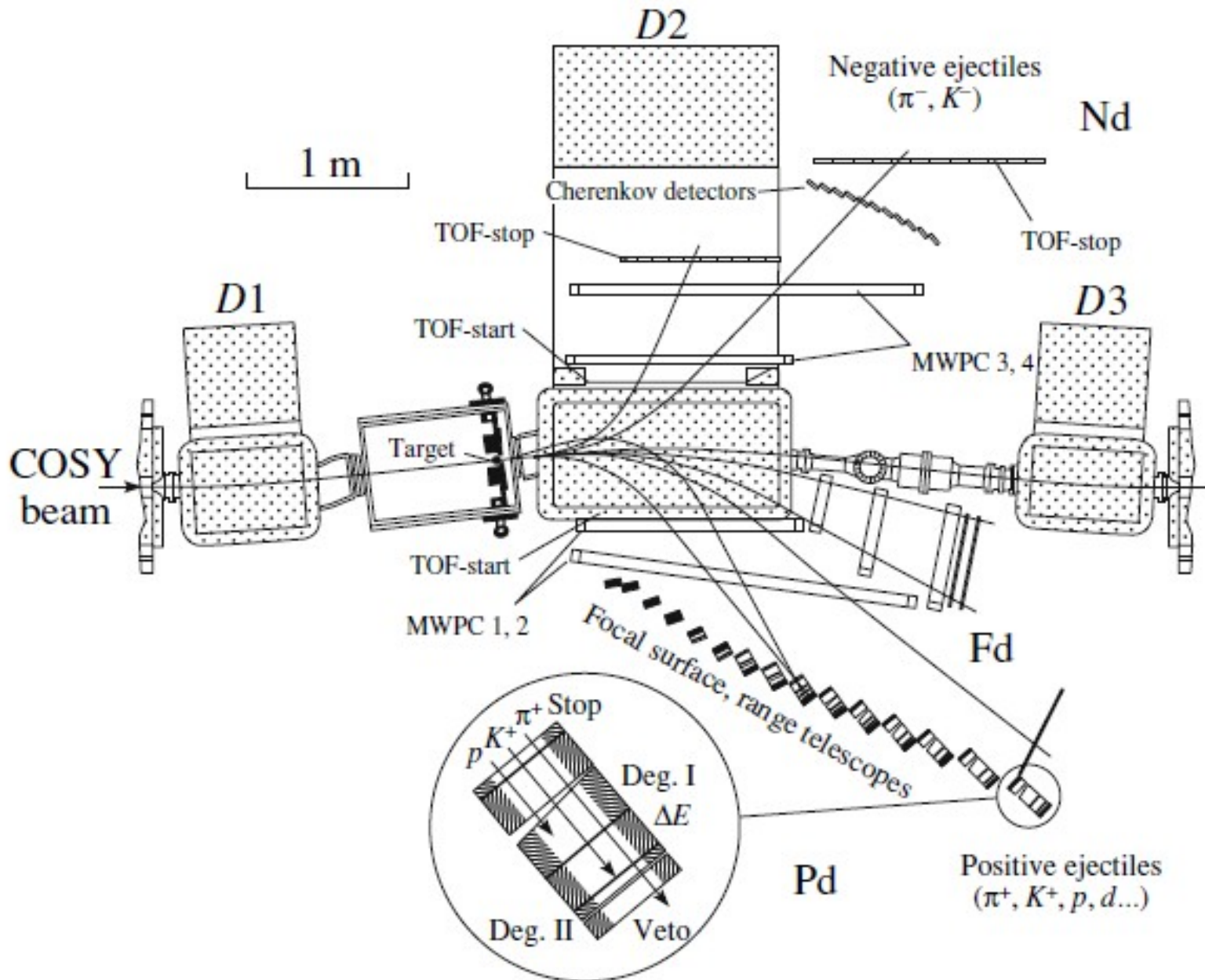
S. Leupold, V. Metag, and U. Mosel, *Int. J. Mod. Phys. E* 19, 147 (2010).

R. S. Hayano and T. Hatsuda, *Rev. Mod. Phys.* 82, 2949 (2010).

Методы обнаружения:

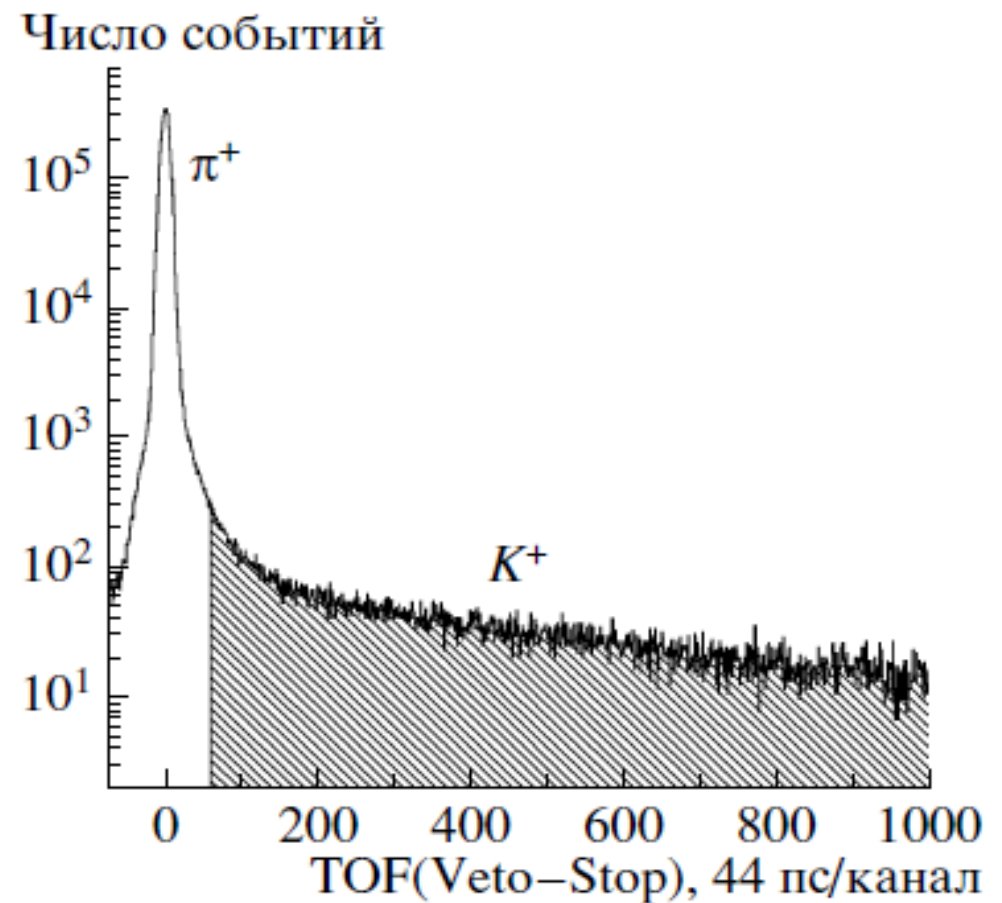
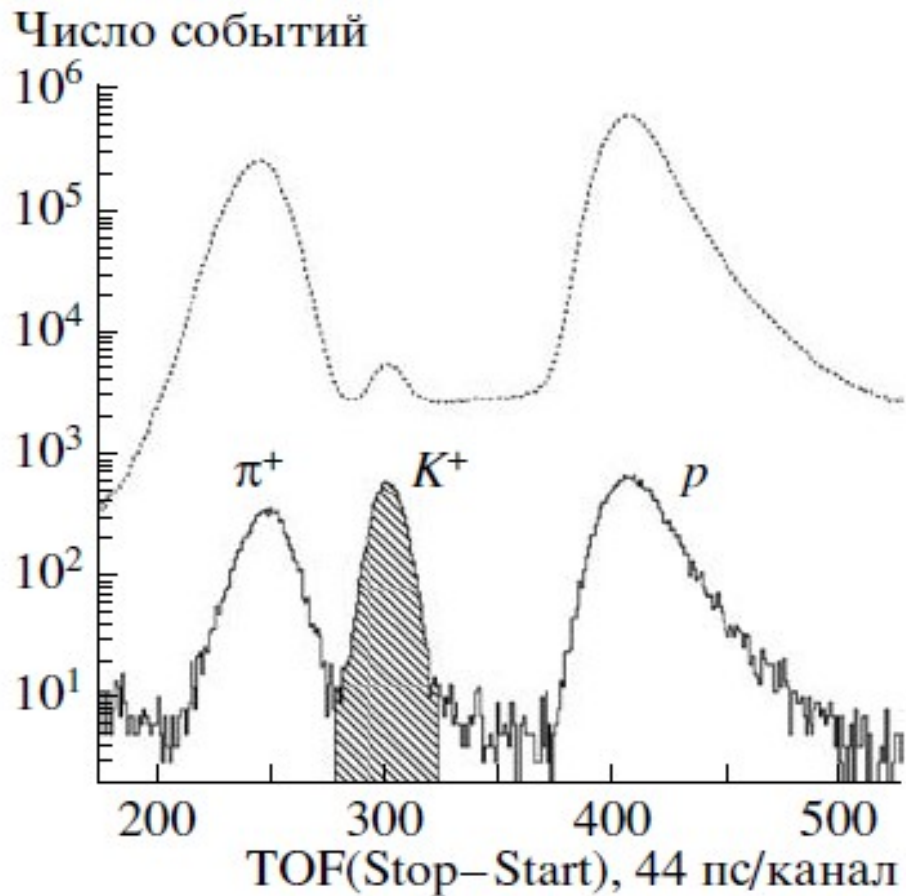
- 1) Электрослабые распады  
(малый брэнчинг; фон)
- 2) А-зависимость сечений рождения  
(требуется модельно-зависимых расчетов)

# Спектрометр ANKE

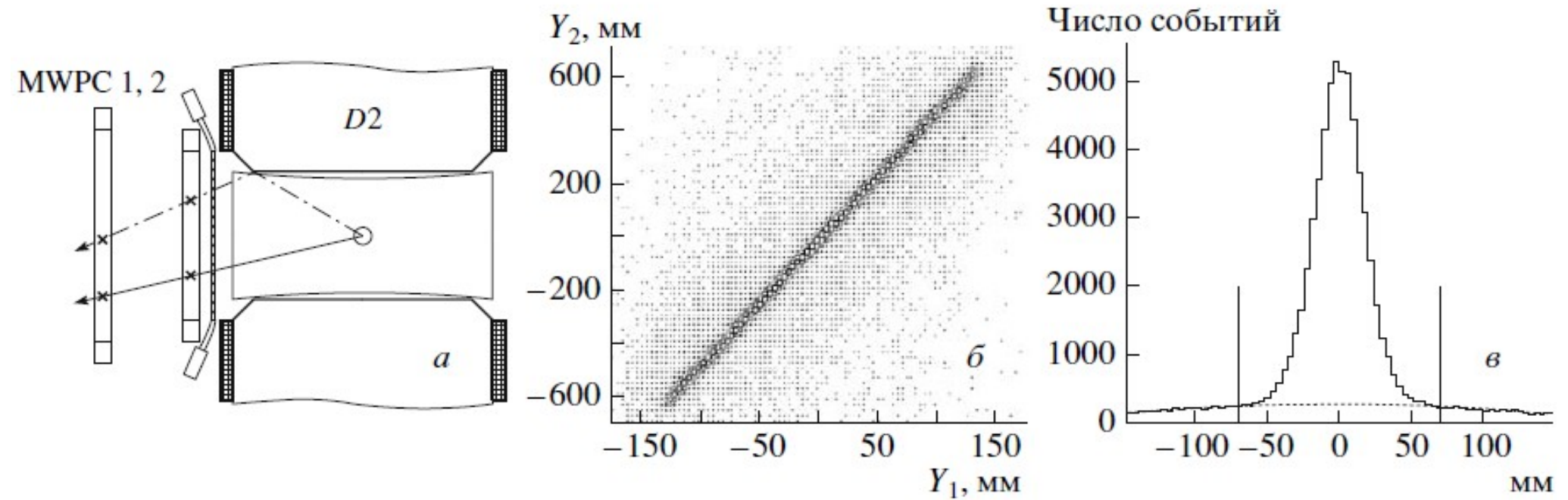




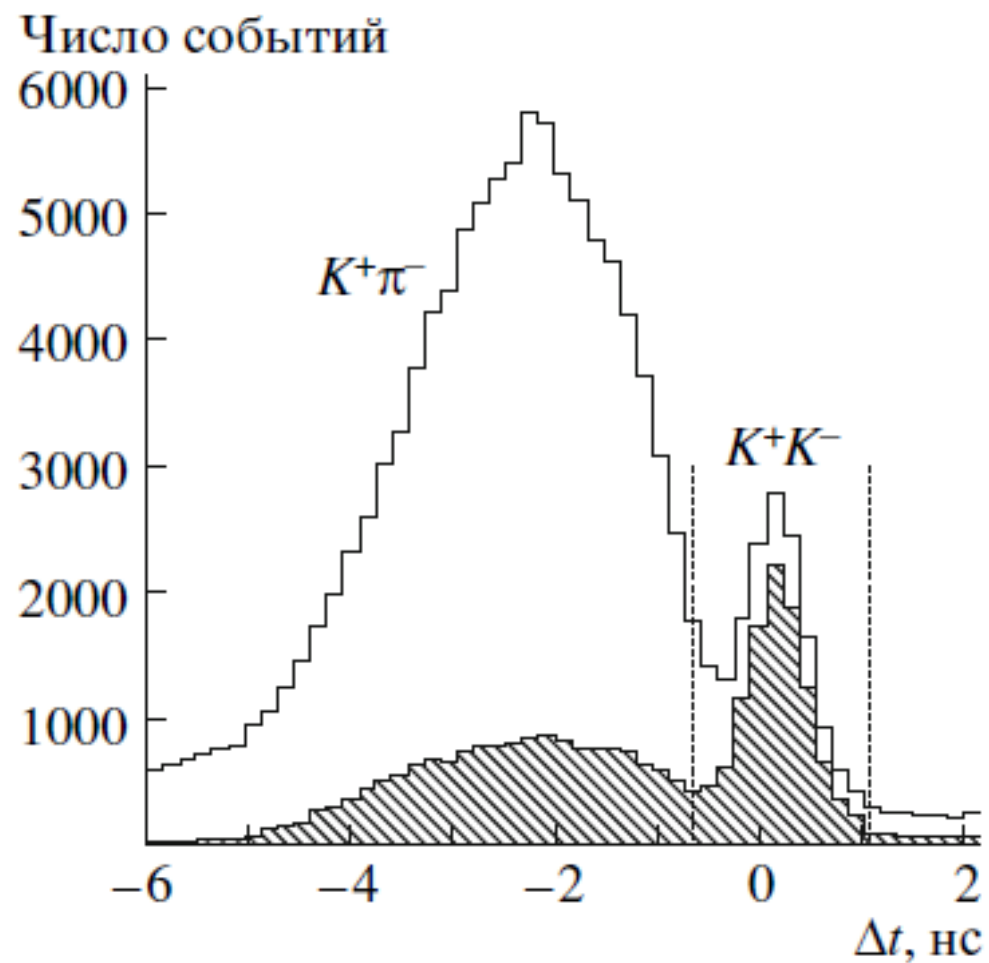
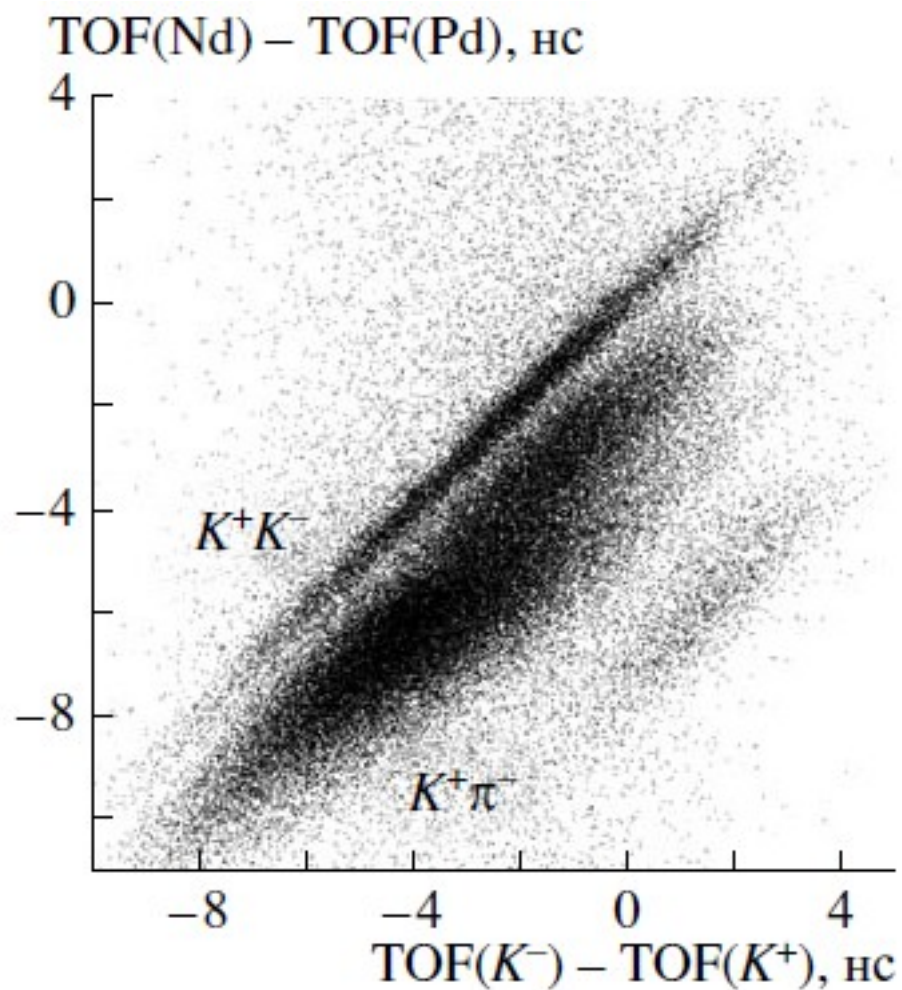
# Выделение $K^+$ -мезонов



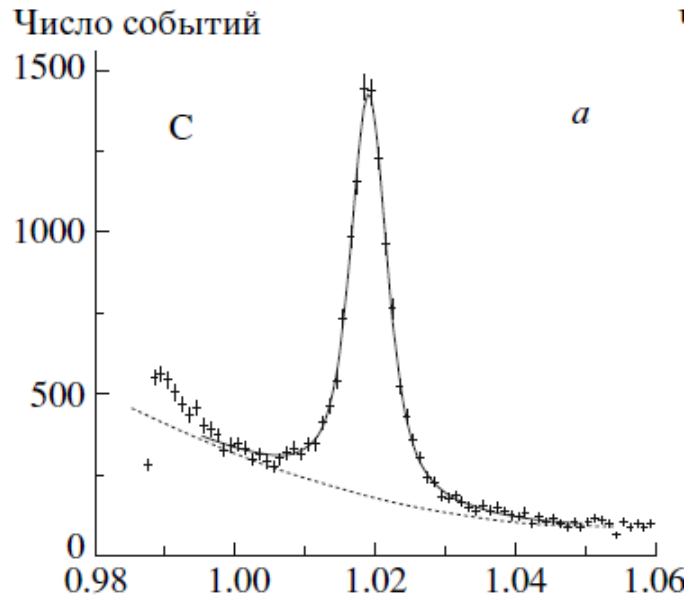
# Вертикальный угол



# $K^+K^-$ -корреляции

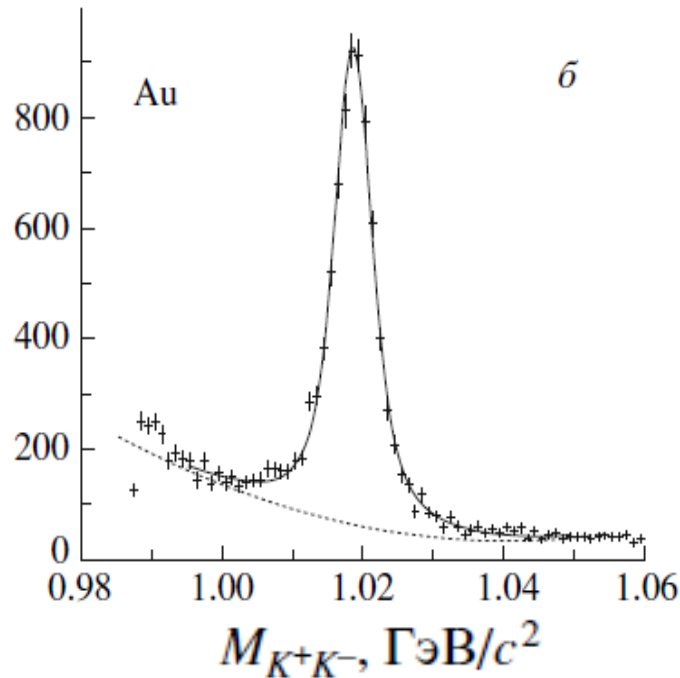


# φ-мезона



$$R = \frac{\sigma_{\phi}^A / A}{\sigma_{\phi}^C / 12} = \frac{12 \sigma_{\phi}^A}{A \sigma_{\phi}^C},$$

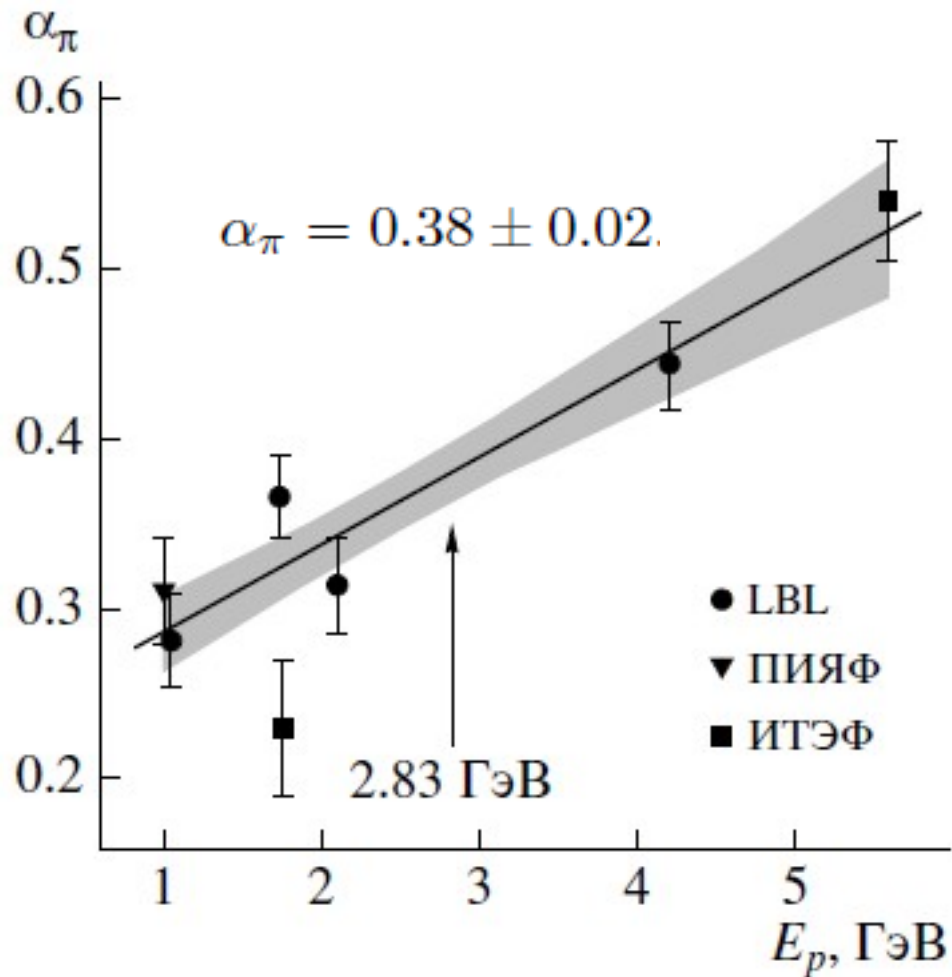
$$p(\pi) = 500 \text{ MeV}/c, \quad \theta < 4^\circ$$



$$R = \frac{N_{\phi}^A}{N_{\phi}^C} \frac{N_{\pi}^C}{N_{\pi}^A} \frac{\sigma_{\pi}^A}{\sigma_{\pi}^C} \left( \frac{A}{12} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{N_{\phi}^A}{N_{\phi}^C} \frac{N_{\pi}^C}{N_{\pi}^A} \left( \frac{A}{12} \right)^{\alpha_{\pi}-1},$$

# A-зависимость для пионов

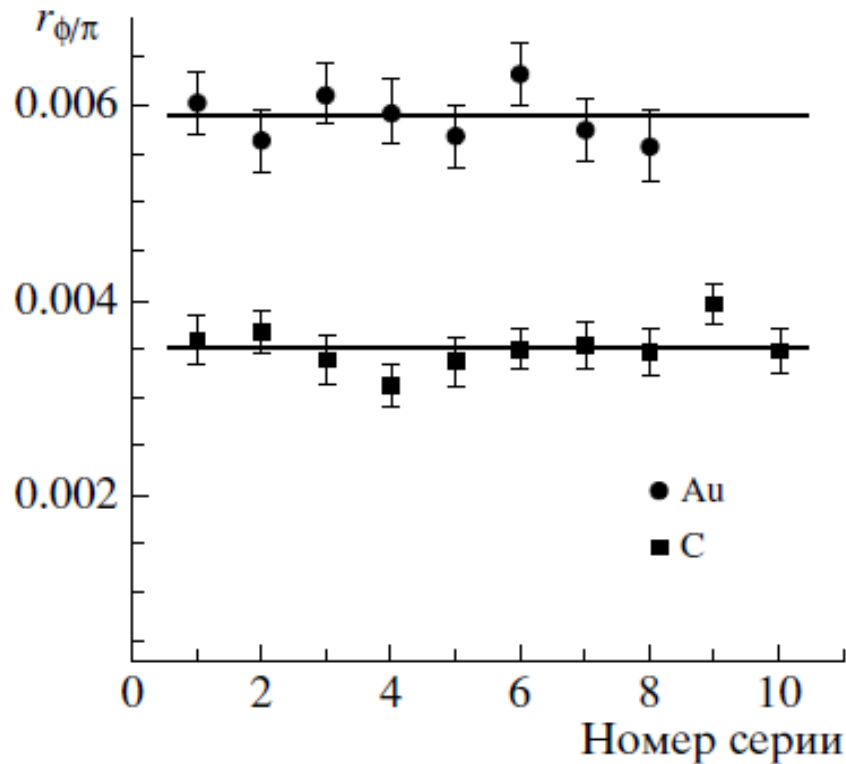


$$N_\phi^A = \tilde{N}_\phi^A / (\varepsilon_{\text{mwpc}} \varepsilon_{\text{daq}} \varepsilon_{\text{acc}} \varepsilon_{\text{dec}} \varepsilon_{\text{BR}} \varepsilon_{\text{elec}})$$

$$R = \frac{\tilde{N}_\phi^A}{\tilde{N}_\phi^C} \frac{\tilde{N}_\pi^C}{\tilde{N}_\pi^A} \frac{\varepsilon_{\pi\text{daq}}^A}{\varepsilon_{\phi\text{daq}}^A} \frac{\varepsilon_{\phi\text{daq}}^C}{\varepsilon_{\pi\text{daq}}^C} \frac{\varepsilon_{\phi\text{mwpc}}^C}{\varepsilon_{\phi\text{mwpc}}^A} \times$$

$$\times \frac{\varepsilon_{\pi\text{mwpc}}^A}{\varepsilon_{\pi\text{mwpc}}^C} \left( \frac{A}{12} \right)^{\alpha_\pi - 1}.$$

# Стабильность. Ошибки.



Источник ошибки	Вклад, %
<b>Систематические ошибки:</b>	
система записи данных	1–2
эффективность восстановления треков	2
нормировка на $\pi^+$	3–5
вычитание фона при идентификации $\phi$	6
вычитание фона при выделении $\pi^+$	3
<b>Статистические ошибки:</b>	
определение количества $\phi$	2.4
определение количества $\pi^+$	<0.3

# A-зависимость

$A/C$	$R$
Cu/C	$0.479 \pm 0.011 \pm 0.035$
Ag/C	$0.387 \pm 0.009 \pm 0.033$
Au/C	$0.292 \pm 0.007 \pm 0.021$

$$\sigma = \sigma_0 A^{\alpha_\phi}$$

$$\alpha_\phi = 0.56 \pm 0.03$$

# Сравнение А-зависимостей с модельными расчетами

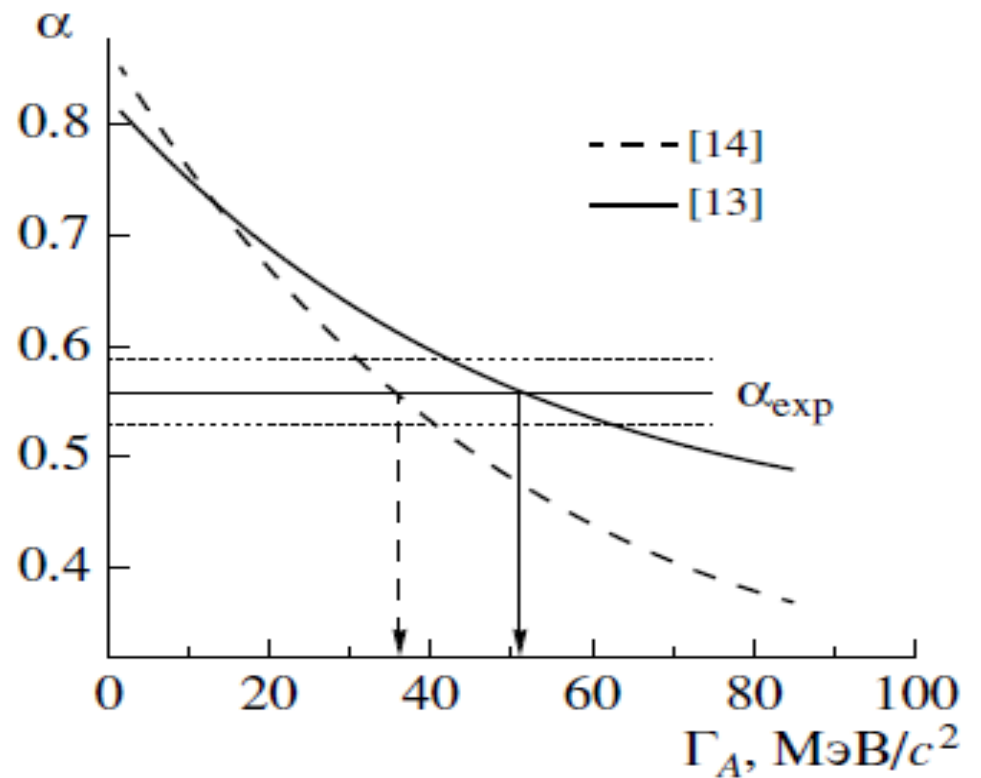
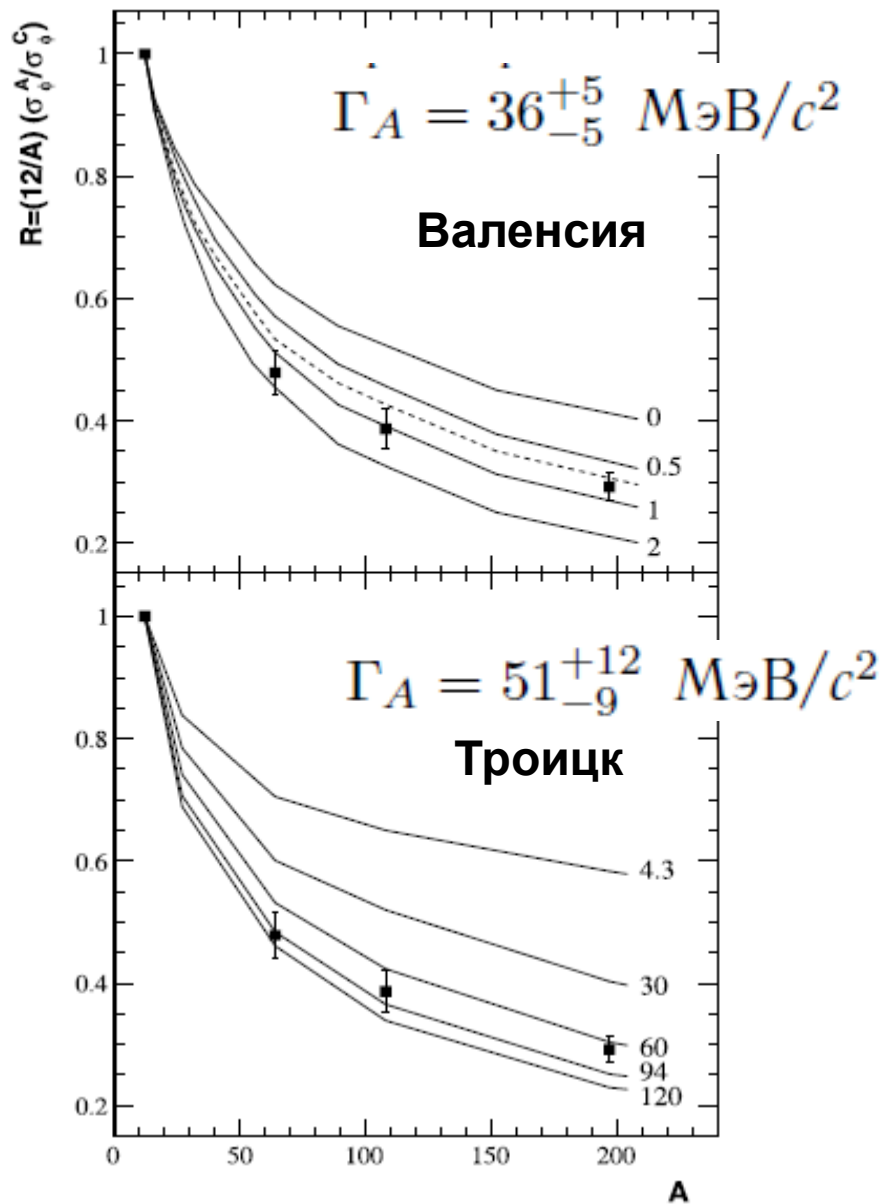
- 1) «Валенсия» V. K. Magas, L. Roca and E. Oset, Phys. Rev. C 71, 065202 (2005).
- 2) «Троицк» E. Ya. Paryev, J. Phys. G 36, 015103 (2009).

$$D = \exp\left(-\int dl/\lambda\right) \quad \lambda = \beta/\Gamma_A.$$

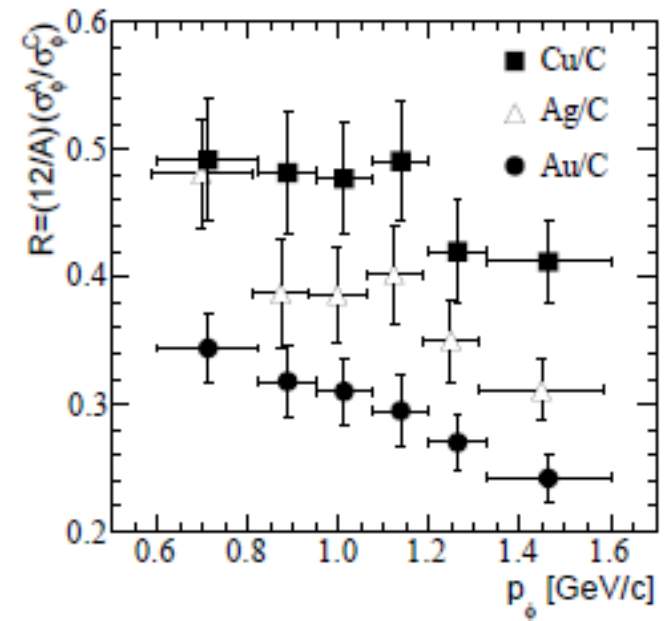
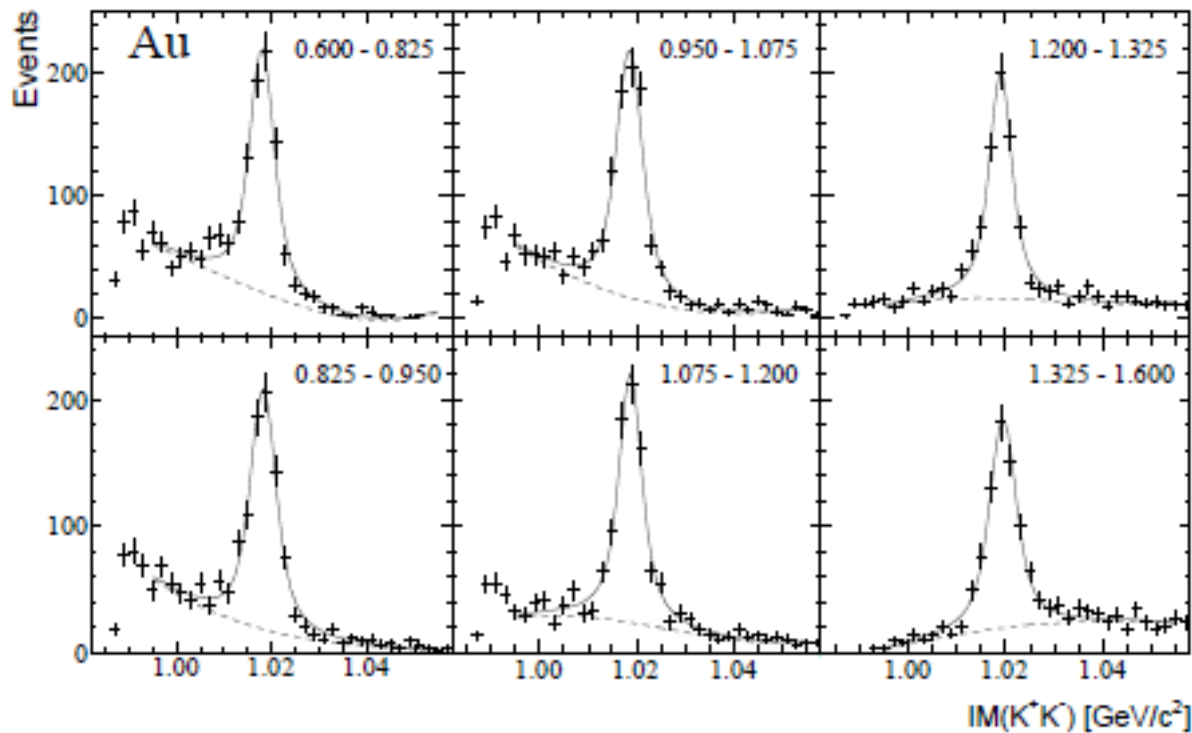
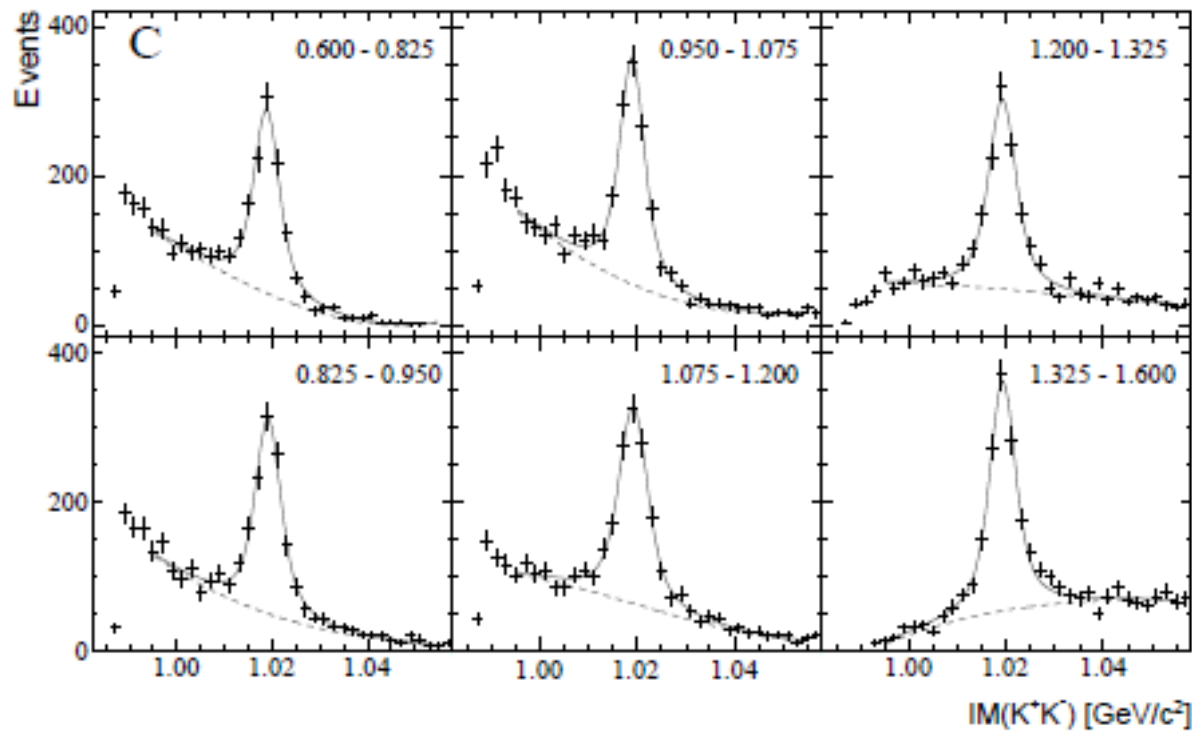
- 3) «Россендорф» H. Schade, University of Dresden, PhD thesis (2010).  
<http://gibuu.physik.uni-giessen.de>



# Сравнение с расчетами



# Импульсная зависимость

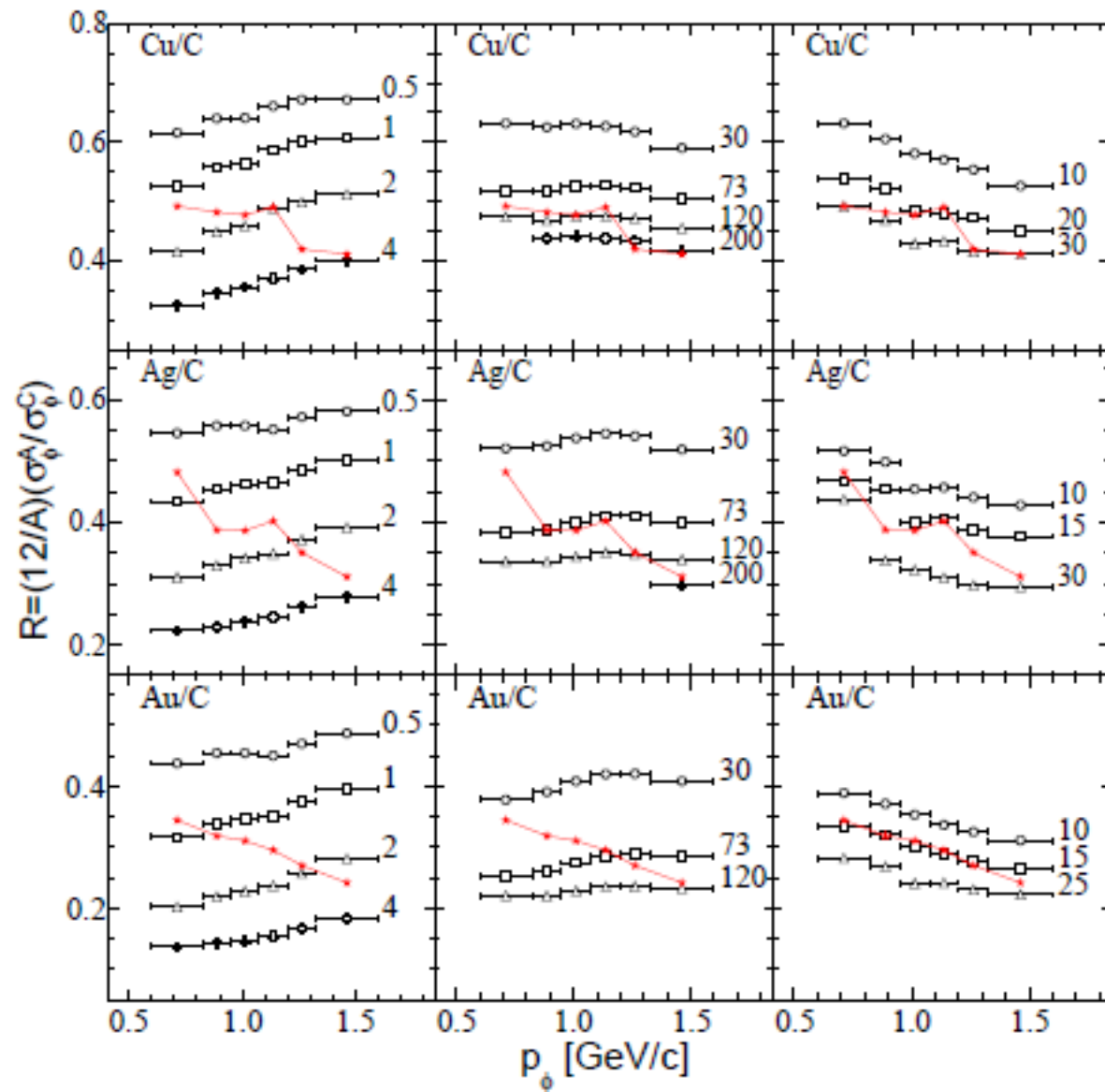


# Расчеты vs. эксперимент

«Валенсия»  
(фактор)

«Троицк»  
(ширина)

«Россендорф»  
(сечение)



# Импульсная зависимость для

$$\Gamma_{\phi} \text{ и } \sigma_{\phi N}$$

$$\Gamma = \Gamma_{\text{dec}} + \Gamma_{\text{coll}}$$

$$\Gamma_{\text{coll}}(p, \rho(r)) = \beta \sigma_{\phi N}^* \rho(r)$$

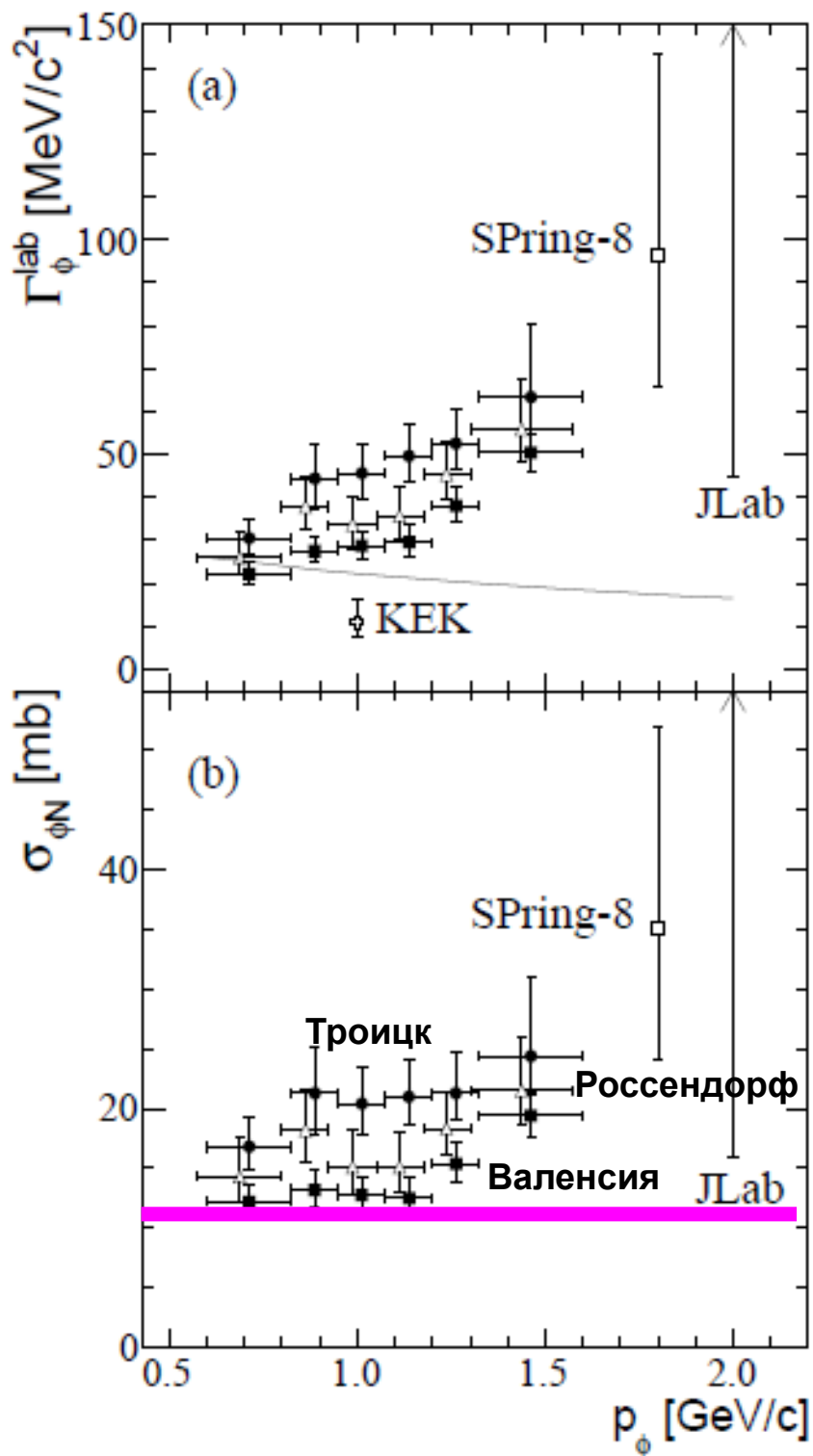
Приближение низкой плотности:

$$\Gamma_{\text{coll}}(p, \rho(r)) = \Gamma_{\text{coll}}(p) \rho(r) / \rho_0$$

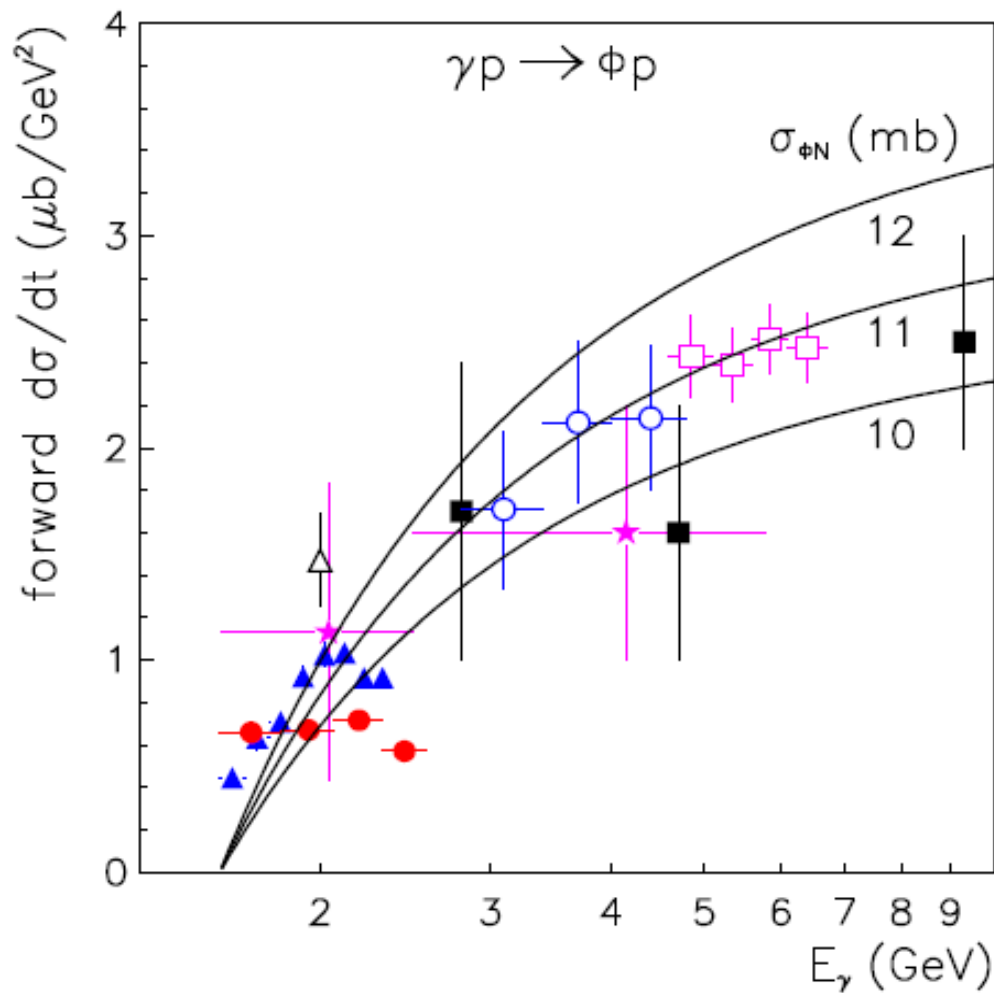
$$\Gamma_{\text{coll}}(p) = \beta \sigma_{\phi N}^* \rho_0$$

$\sigma_{\phi N}$  из  $\gamma p \rightarrow \phi p$

$$\rho_0 = 0.16 \text{ ФМ}^{-3}$$



# Модель векторной доминанции в $\gamma p \rightarrow \phi p$



$$\mathcal{M}_{\gamma N \rightarrow \phi N} = \sum_V \frac{\sqrt{\pi\alpha}}{\gamma_V} \mathcal{M}_{VN \rightarrow \phi N},$$

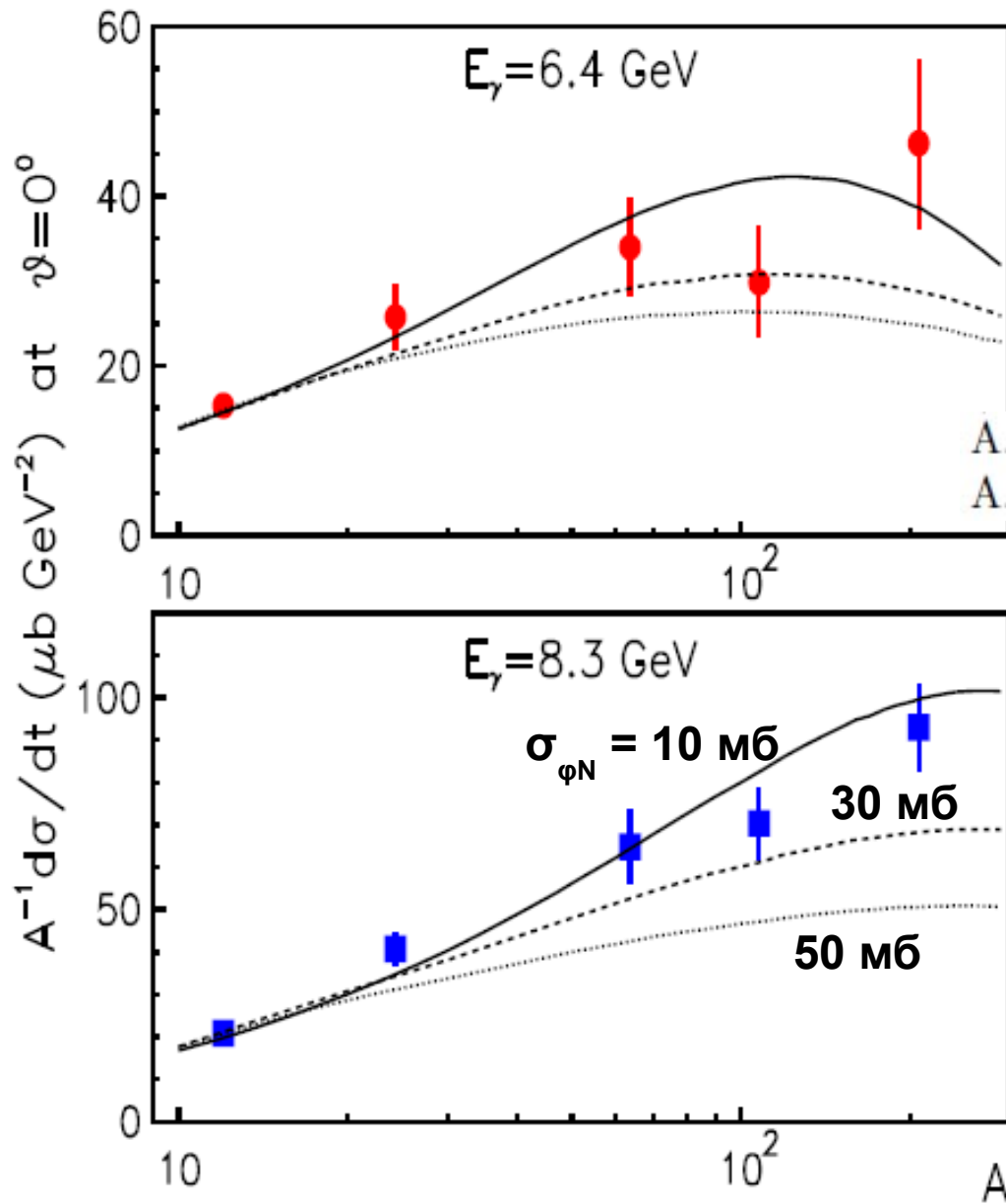
$$\gamma_\rho \div \gamma_\omega \div \gamma_\phi = 2.48 \div 8.53 \div 6.69$$

$$\frac{d\sigma_{\gamma N \rightarrow \phi N}}{dt} = \frac{|\mathcal{M}_{\gamma N \rightarrow \phi N}|^2}{64\pi s q_\gamma^2}$$

$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma N \rightarrow \phi N}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\alpha}{16\gamma_\phi^2} \frac{q_\phi^2}{q_\gamma^2} (1 + \alpha_\phi^2) \sigma_{\phi N}^2$$

A. Sibirtsev, H. W. Hammer, U.-G. Meißner, and A. W. Thomas, Eur. Phys. J. A **29**, 209 (2006).

# $\gamma A \rightarrow \varphi A$



## Данные:

G. McClellan *et al.*, Phys. Rev. Lett. 26, 1593 (1971)

## Расчет:

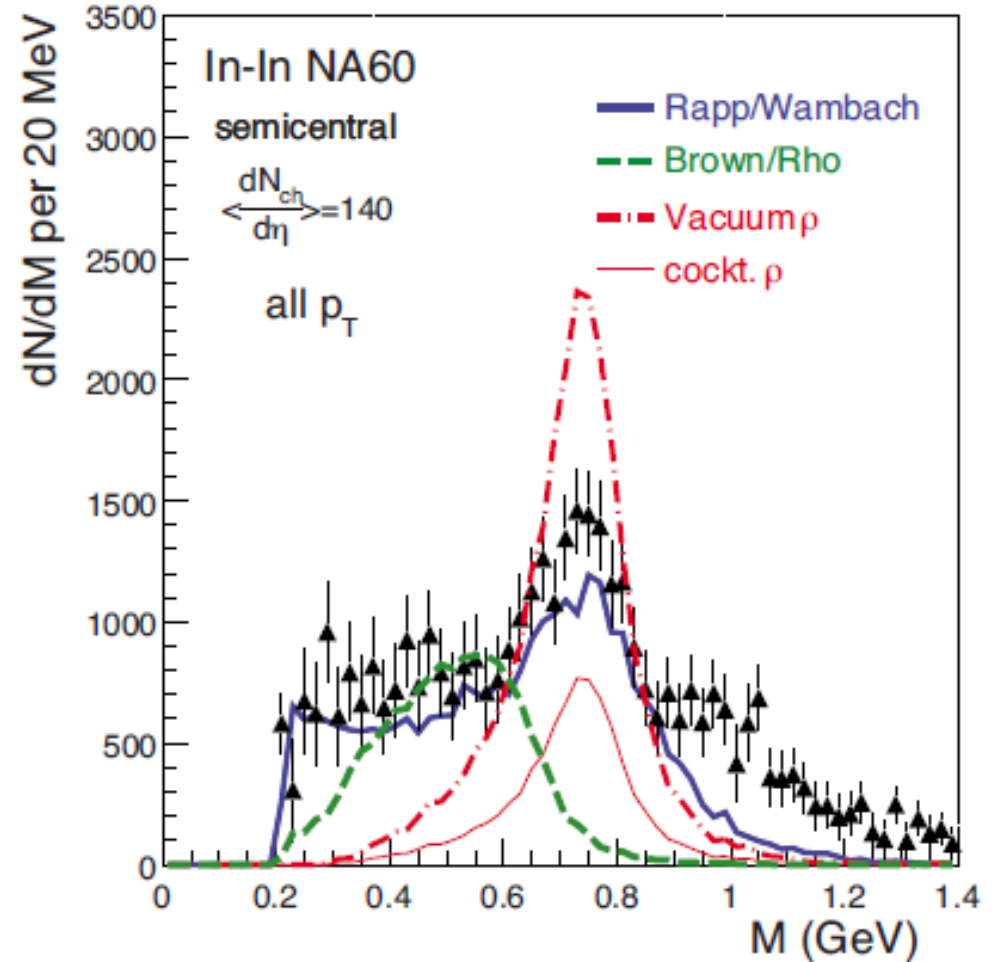
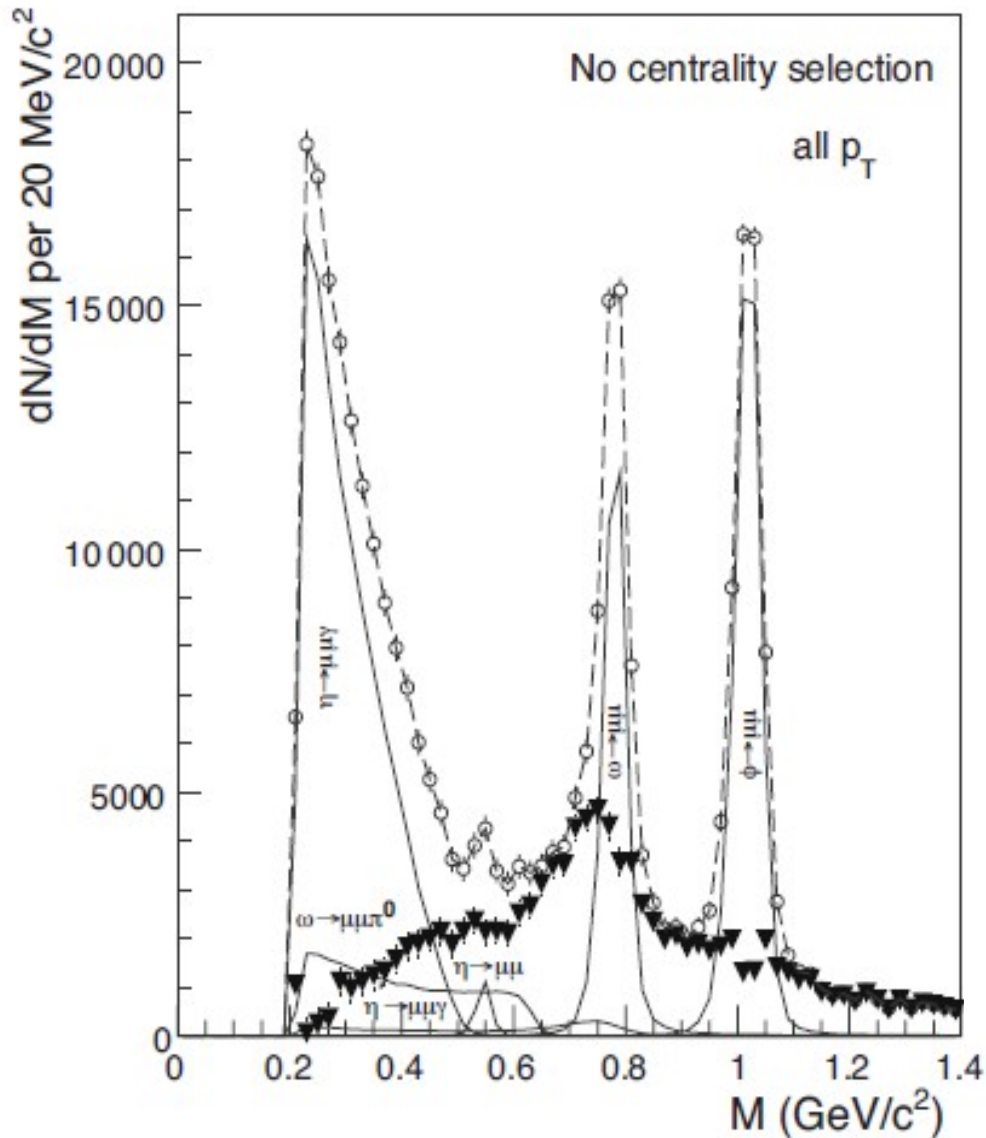
A. Sibirtsev, H. W. Hammer, U.-G. Meißner, and A. W. Thomas, Eur. Phys. J. A 29, 209 (2006).

**Учет  $\omega\varphi$ -перерасеяния  
уменьшает сечение.**

# Эксперименты

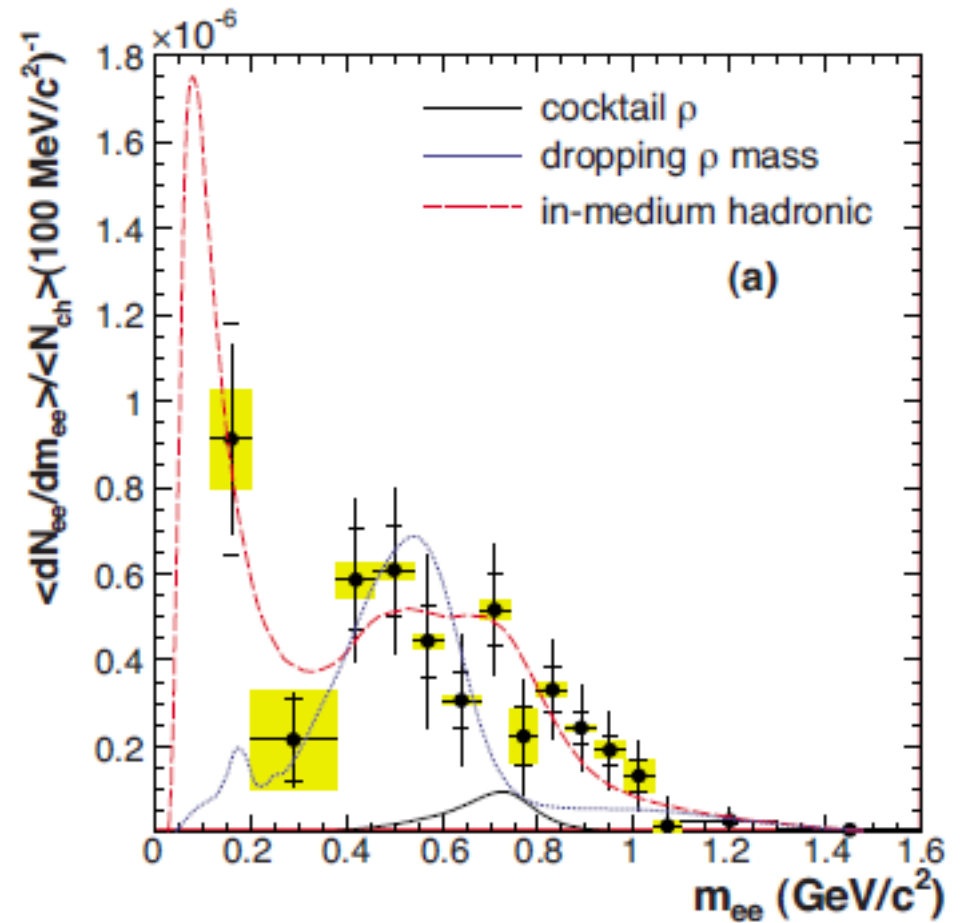
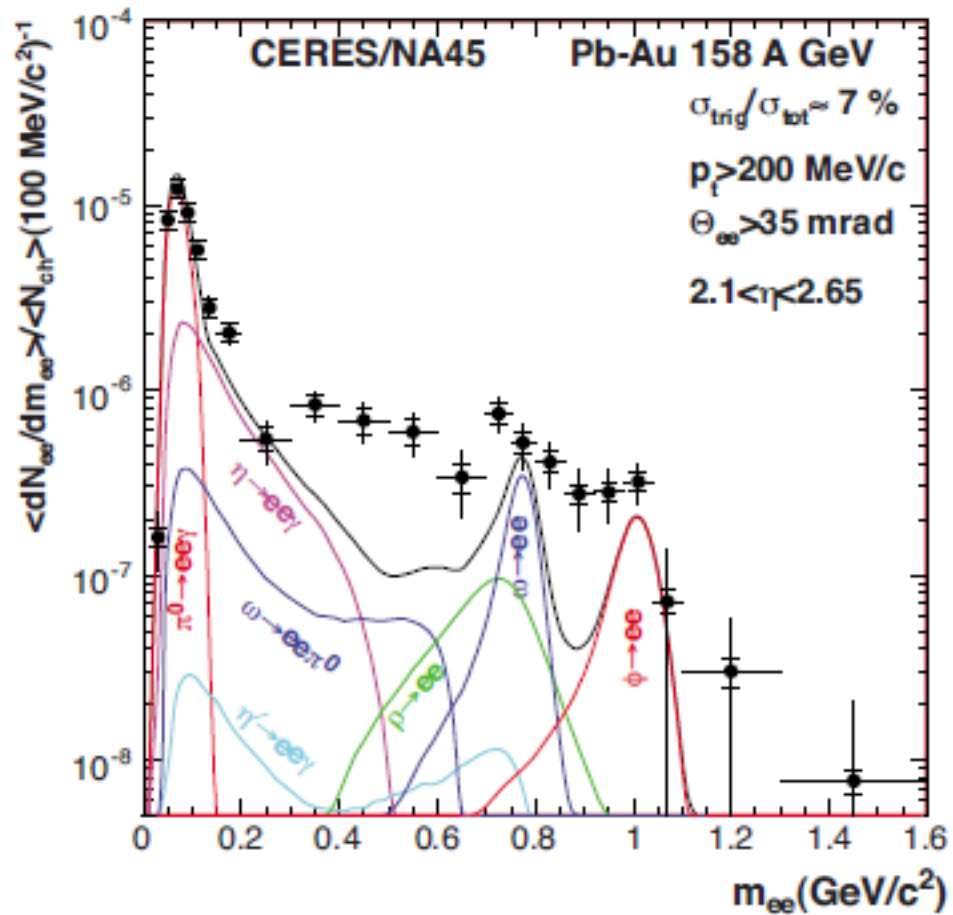
Exp.	$p/A_{\text{acc}}$	$\rho$	$\omega$	$\varphi$
NA45 Pb+Au 158 AGeV	$p_T > 0$ GeV	уширение		
NA60 In+In 158 AGeV	$p_T > 0$ GeV	уширение сдвиг		
KEK pA 12GeV	$p > 0.6$ GeV	$\Delta m/m = -9\%$ $\Delta \Gamma = 0$	$\Delta m/m = -9\%$ $\Delta \Gamma = 0$	$\Delta m/m = -3.4\%$ $\Gamma/\Gamma_{\text{vac}} = 3.6$
CLAS $\gamma A$ 0.6-3.8 GeV	$p > 0.8$ GeV	сдвиг на C Уширение на Fe		
SPRING8 $\gamma A$ 1.5-2.4 GeV	$p > 1.0$ GeV			$\sigma_{\varphi N} = 35$ mb $\Rightarrow \Gamma = 80$ МэВ
CBELSA $\gamma A$ 0.9-2.2 GeV			$p < 0.5$ GeV: не чувствует. $p > 0.4$ GeV: $\Gamma = 140$ MeV	

# CERES / NA60, $M_{inv}(\mu\mu)$

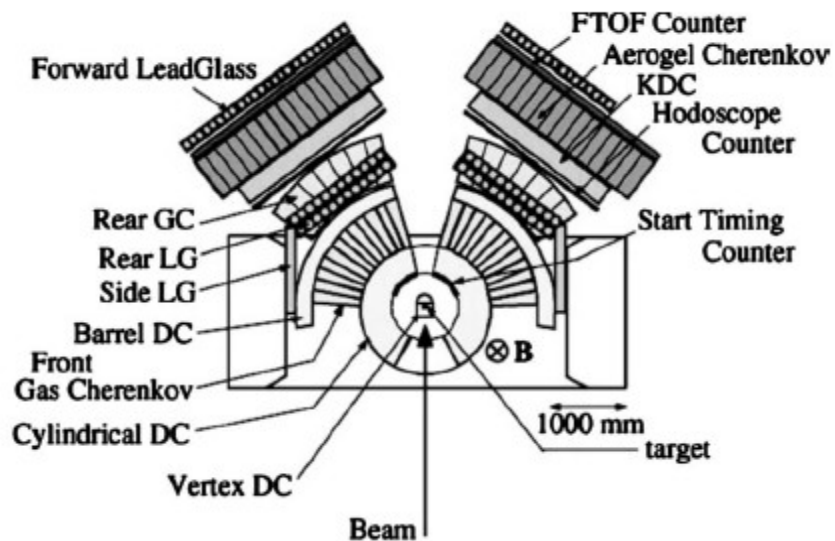




# CERES/NA45, $M_{inv}(ee)$



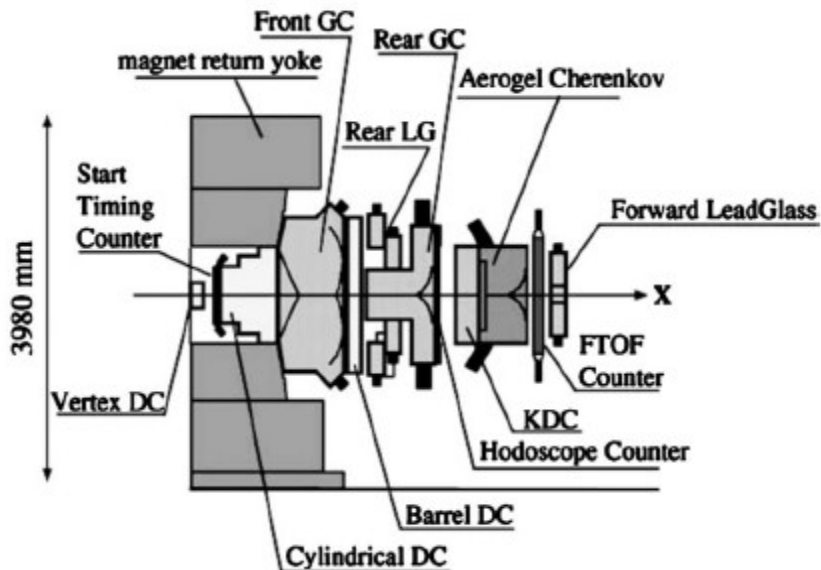
# KEK-E325



pC, pCu @ 12 GeV

$\rho, \omega, \varphi \rightarrow e^+e^-$

Разрешение по  $M(ee)$   
8-10 MeV/c<sup>2</sup>



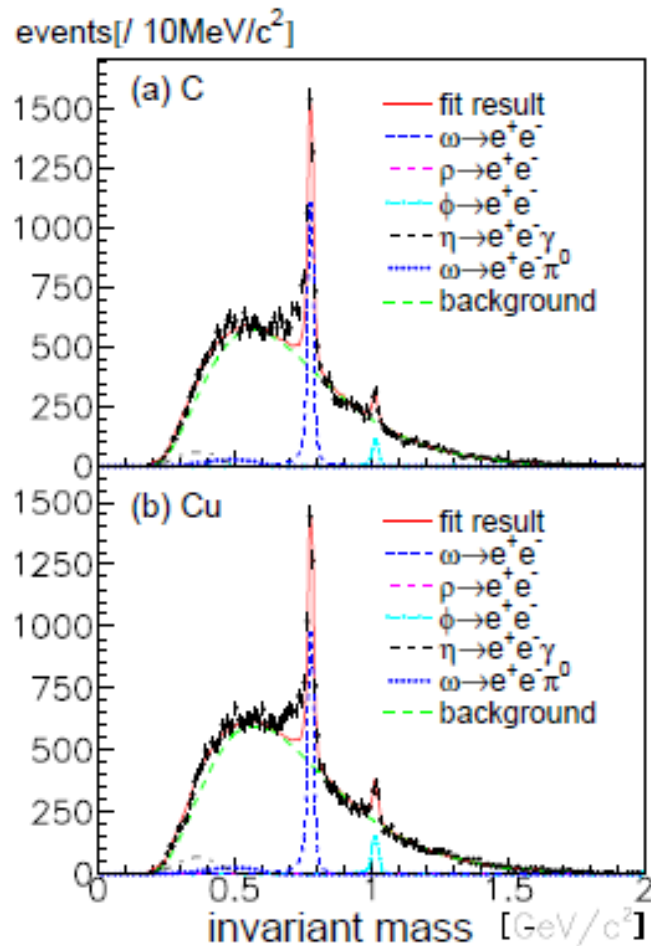
$1 < \beta\gamma < 3$

$0.5 < y < 2$

# КЕК-E325, $\rho$ - и $\omega$ -мезоны

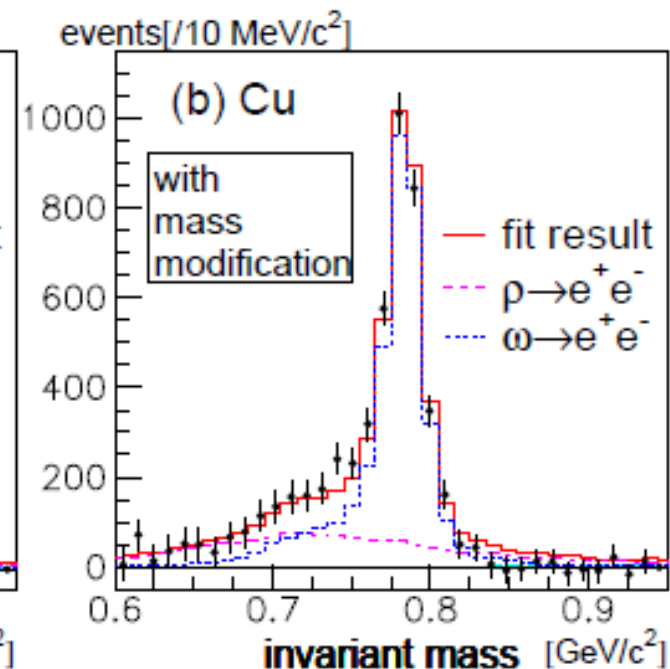
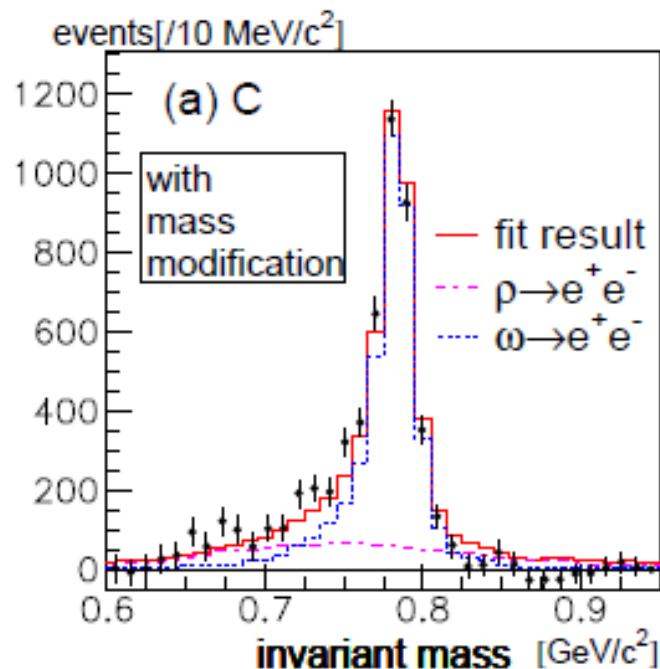
Naruki, M., *et al.* (KEK-PS E325 Collaboration), 2006, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 092301.

Отношение выходов  $\rho/\omega$  (H:C:Cu) 1 : 0.15 : 0.31



$$m_V(\rho)/m_V(0) = 1 - k(\rho/\rho_0)$$

$$k = 0.092 \pm 0.002$$



# KEK-E325 $\phi$ -МЕЗОН

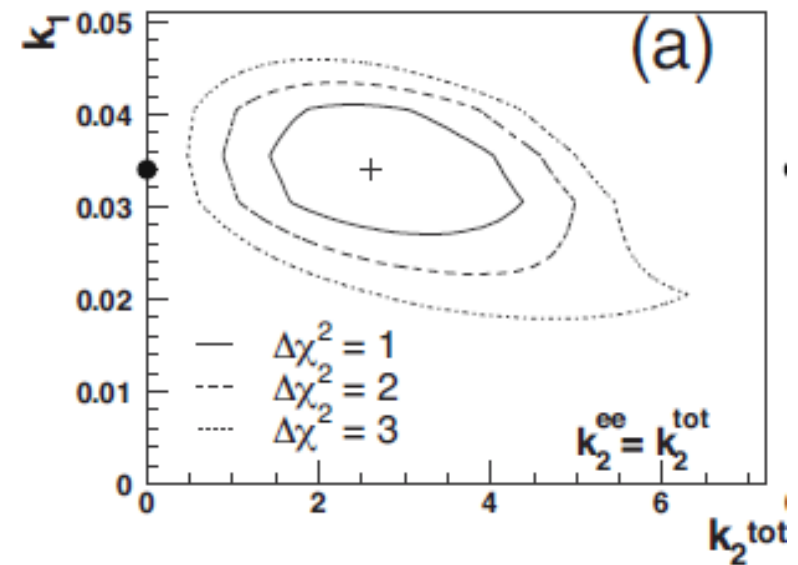
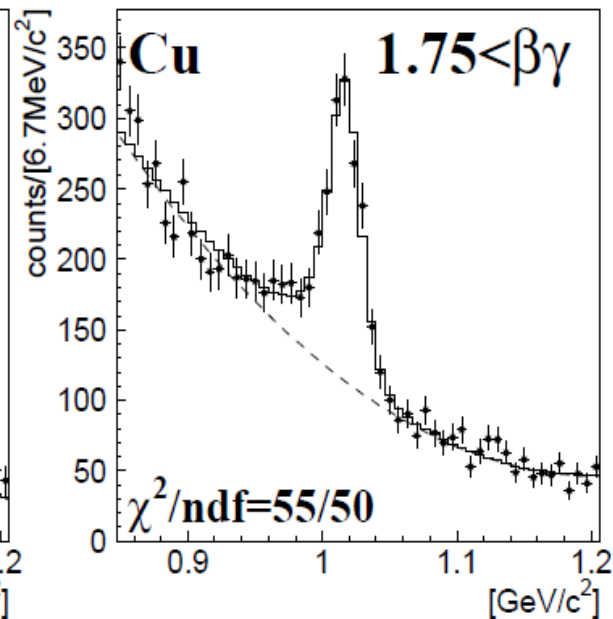
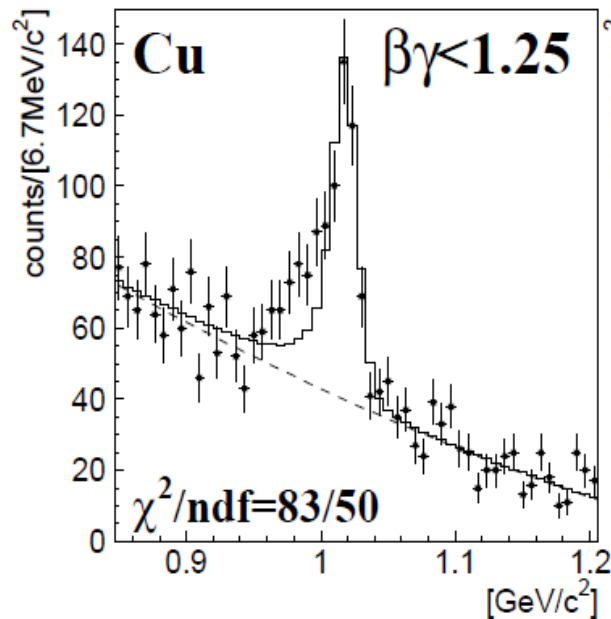
Muto, R., *et al.* (KEK-PS E325 Collaboration), 2007, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 042501.

$$m_{\phi}(\rho)/m_{\phi}(0) = 1 - k_1(\rho/\rho_0)$$

$$= 0.034^{+0.006}_{-0.007}$$

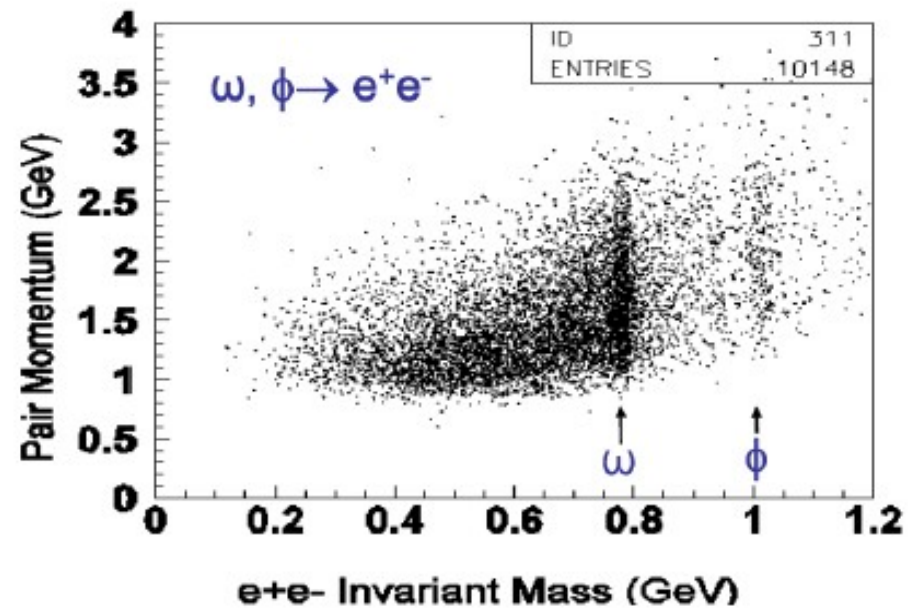
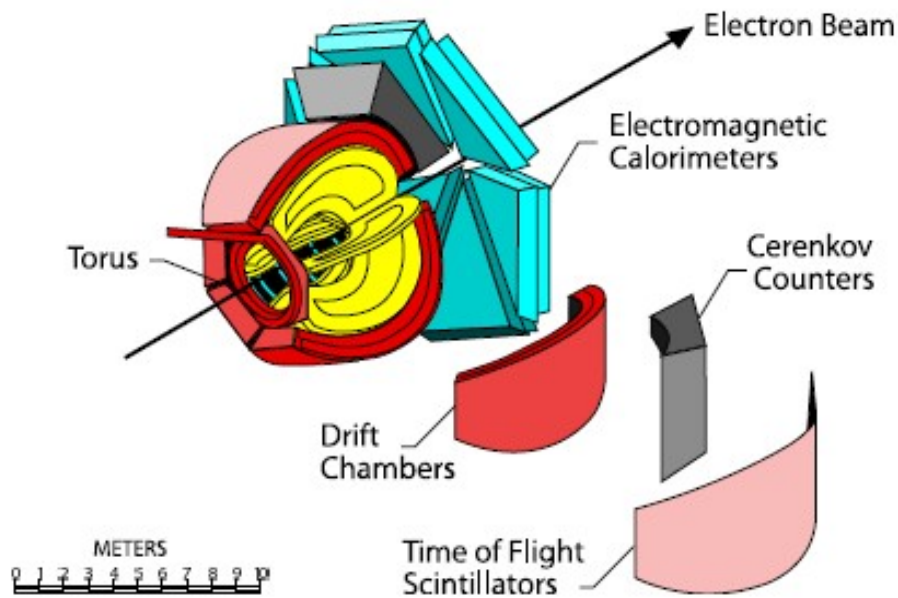
$$\Gamma_{\phi}^{\text{tot}}(\rho)/\Gamma_{\phi}^{\text{tot}}(0) = 1 + k_2^{\text{tot}}(\rho/\rho_0)$$

$$2.6^{+1.8}_{-1.2}$$



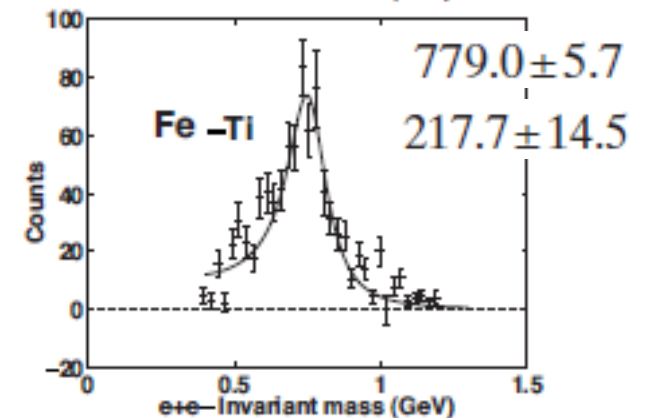
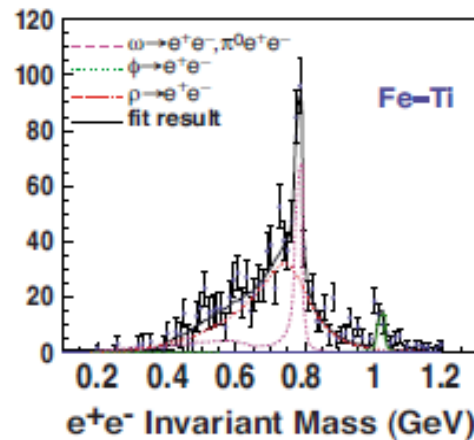
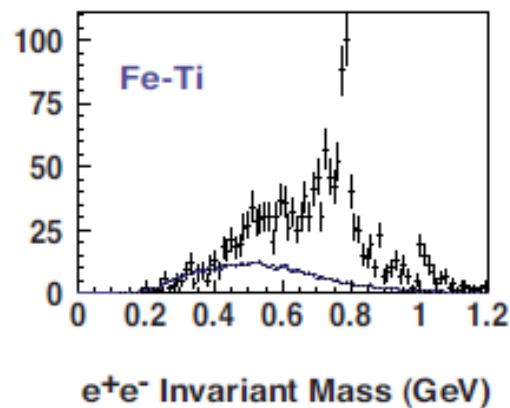
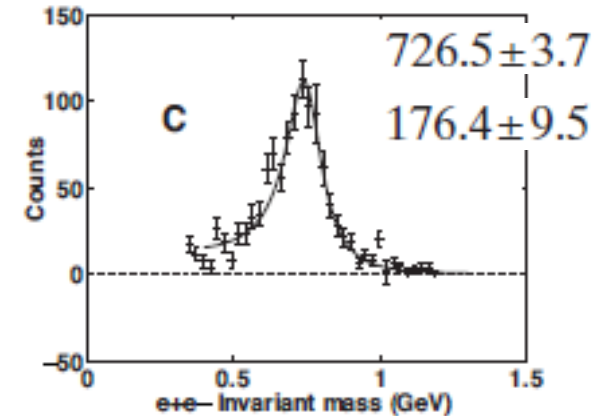
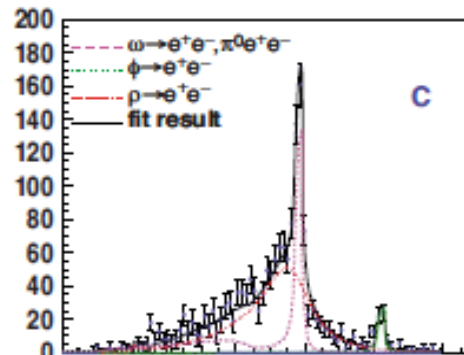
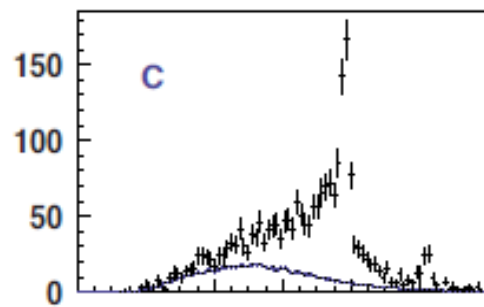
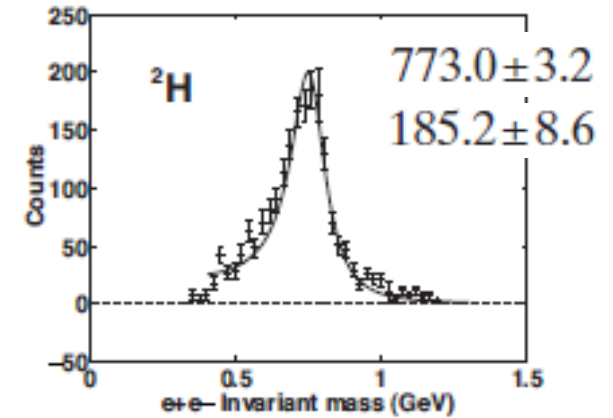
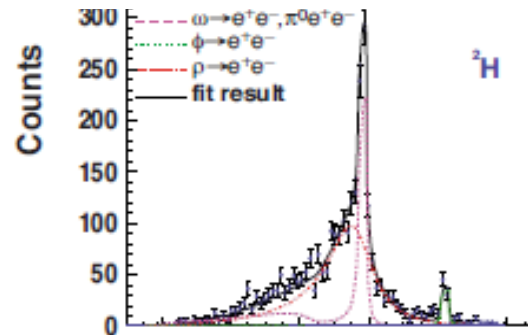
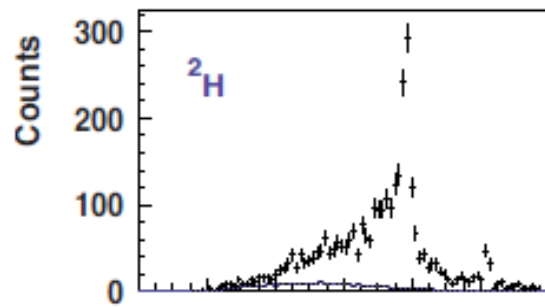
# CLAS-g7 @ JLab

## Large Acceptance Spectrometer

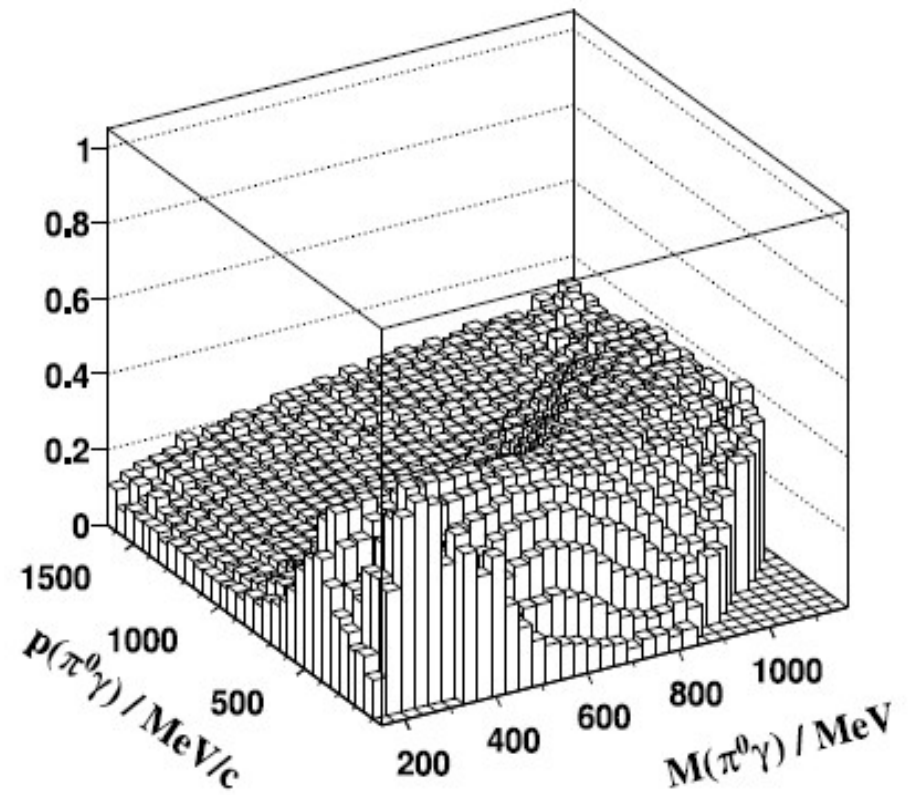
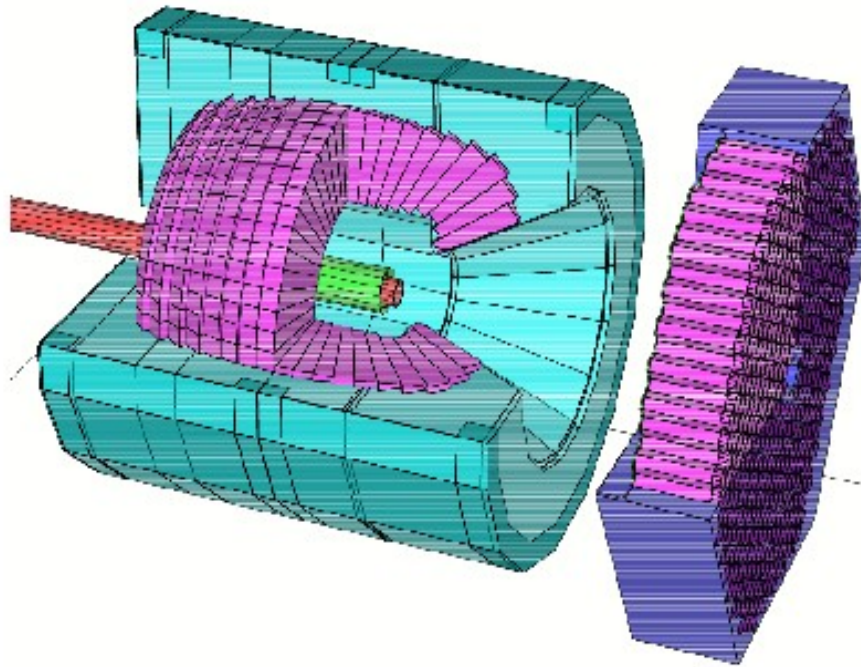


# CLAS-g7 @ JLab

Wood, M. H., *et al.* (CLAS Collaboration), 2008, *Phys. Rev. C* 78, 015201.

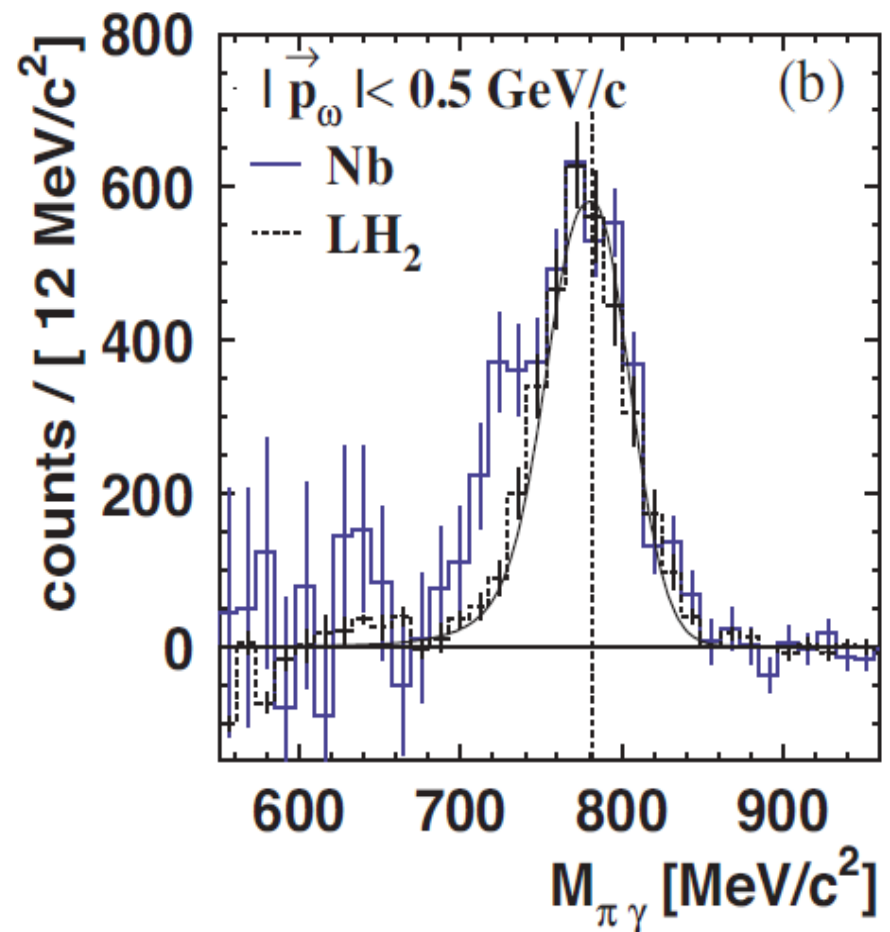
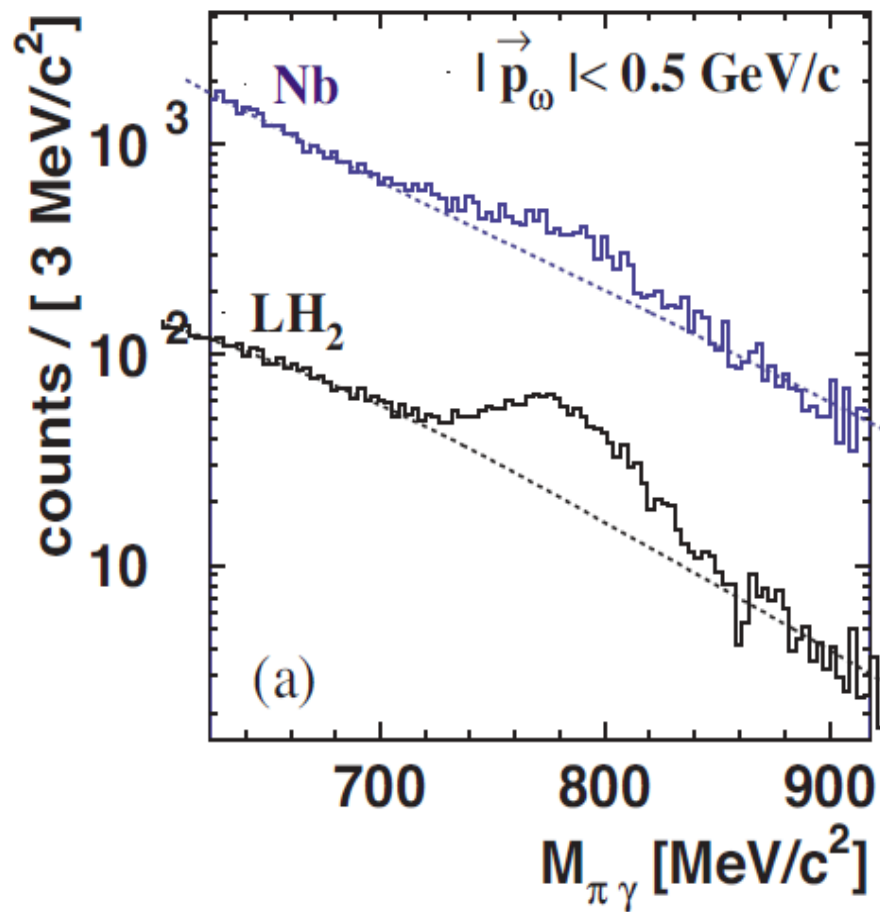


# CBELSA / TAPS



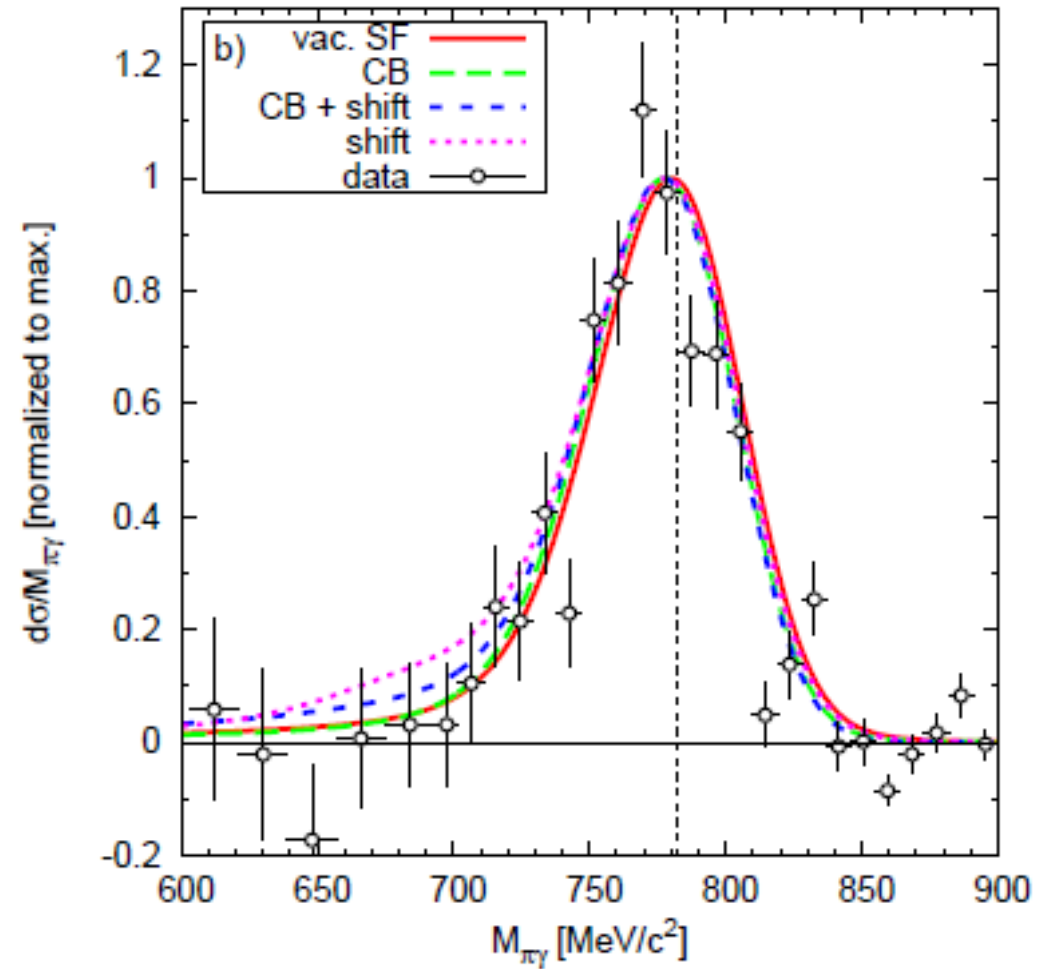
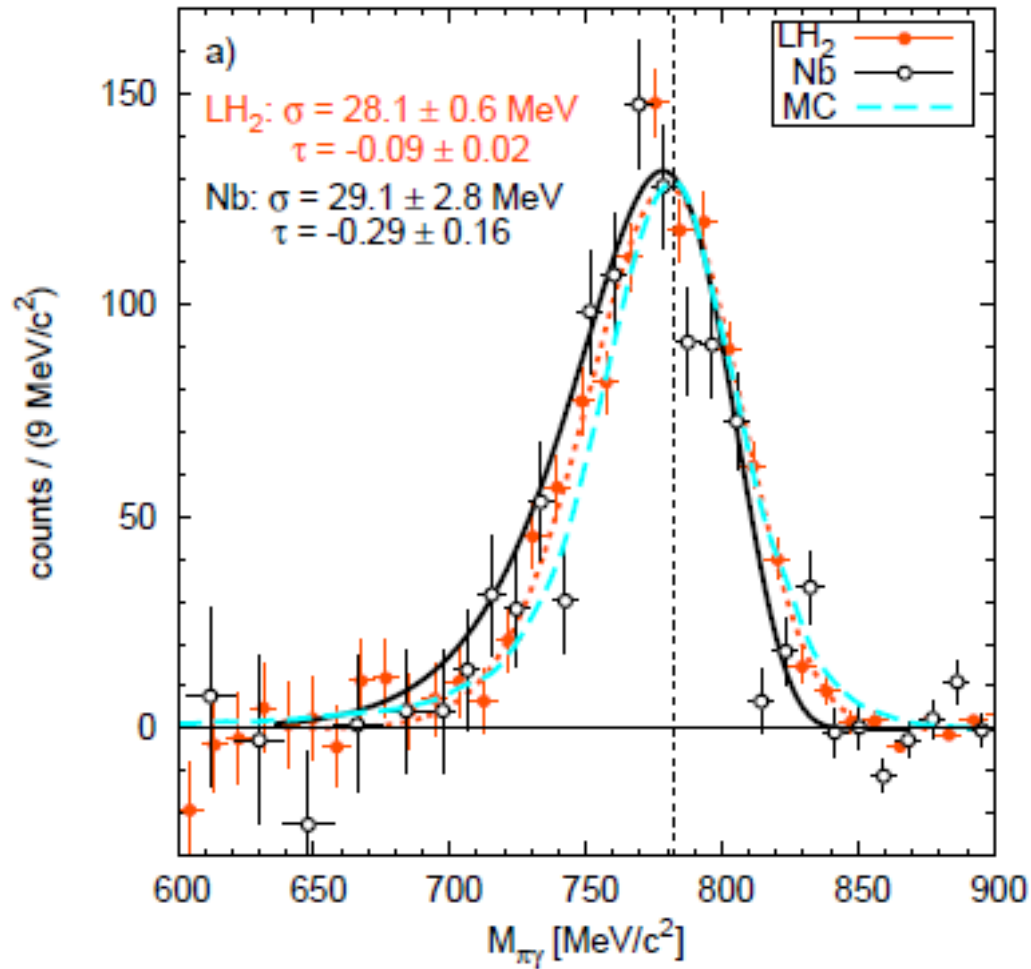
# CBELSA / TAPS, $M(\gamma\pi)$ , 2005

Phys. Rev. Lett 94 (2005) 192303

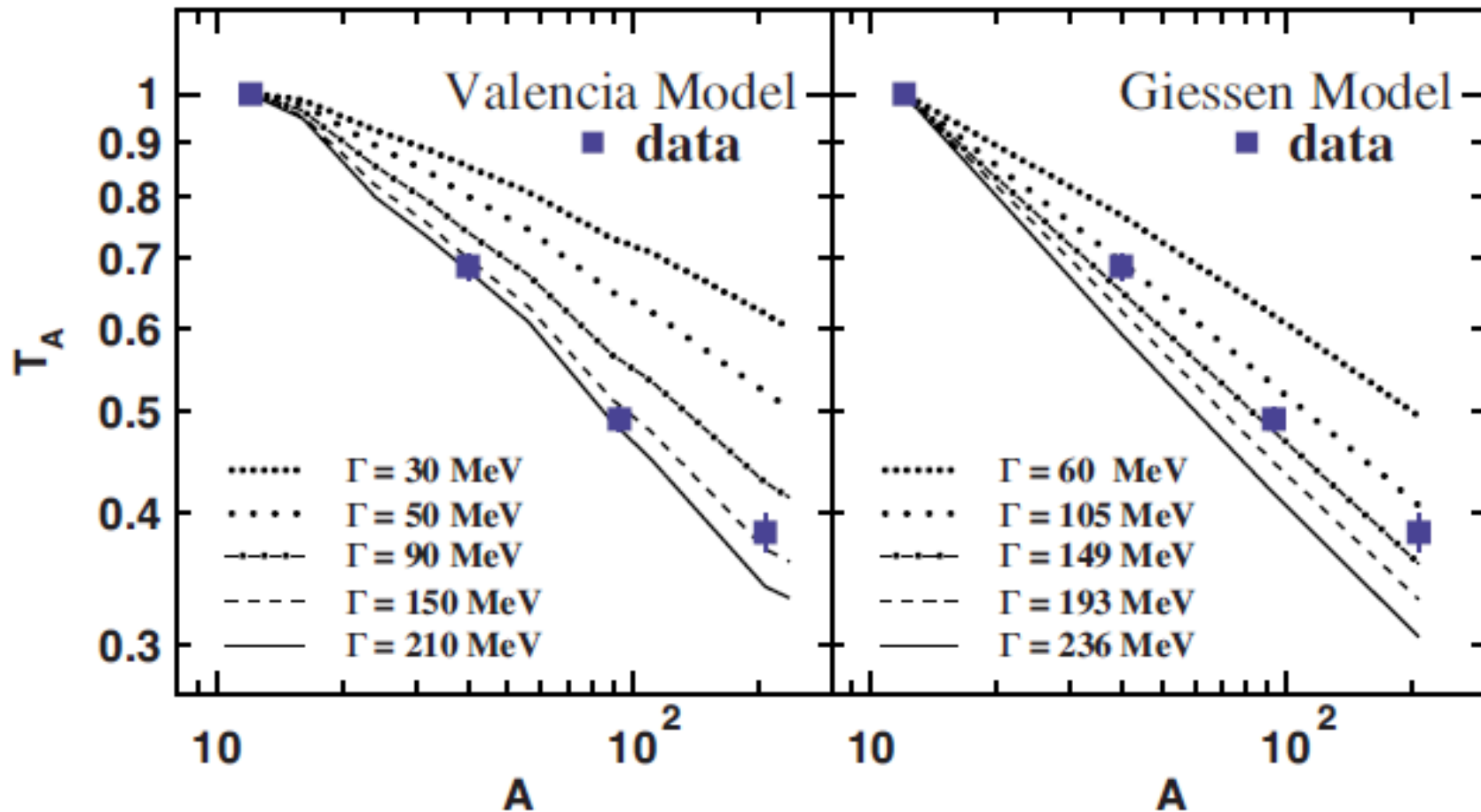




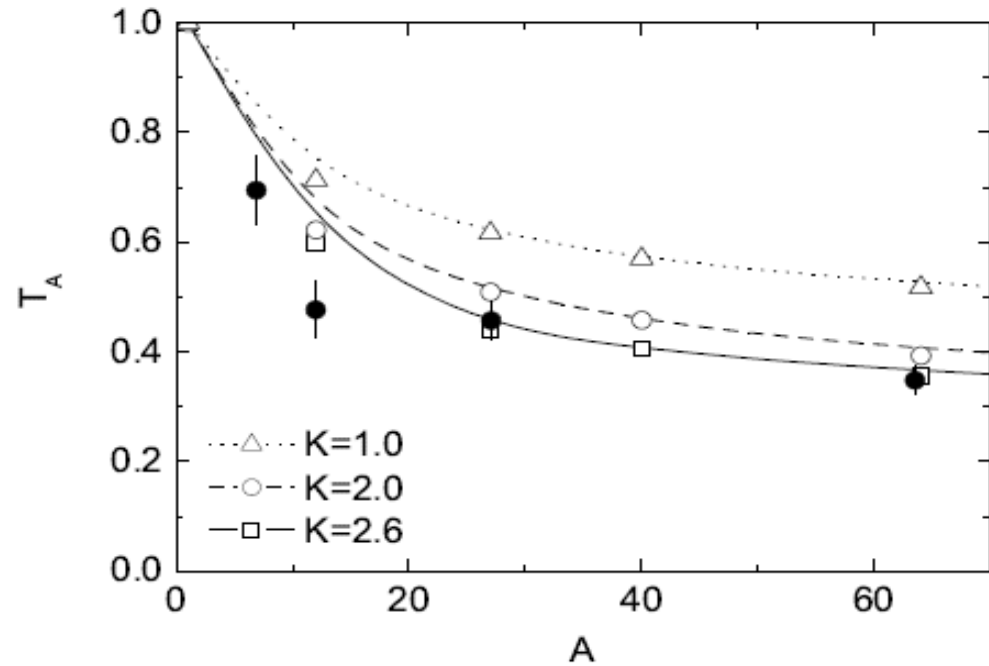
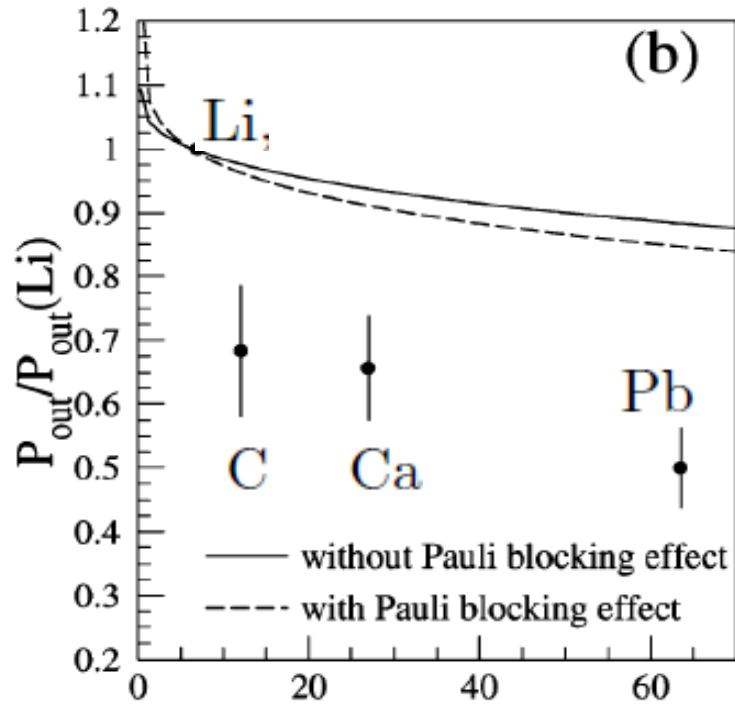
# CBELSA / TAPS, $M(\gamma\pi)$ , 2011



# CBELSA / TAPS, A-зависимость



# Spring-8, A-зависимость для $\phi$ -мезона



# Эксперименты

Exp.	$p/A_{\text{acc}}$	$\rho$	$\omega$	$\varphi$
NA45 Pb+Au 158 AGeV	$p_T > 0$ GeV	уширение		
NA60 In+In 158 AGeV	$p_T > 0$ GeV	уширение сдвиг		
KEK pA 12GeV	$p > 0.6$ GeV	$\Delta m/m = -9\%$ $\Delta \Gamma = 0$	$\Delta m/m = -9\%$ $\Delta \Gamma = 0$	$\Delta m/m = -3.4\%$ $\Gamma/\Gamma_{\text{vac}} = 3.6$
CLAS $\gamma A$ 0.6-3.8 GeV	$p > 0.8$ GeV	сдвиг на C Уширение на Fe		
SPring8 $\gamma A$ 1.5-2.4 GeV	$p > 1.0$ GeV			$\sigma_{\varphi N} = 35$ mb $\Rightarrow \Gamma = 80$ МэВ
CBELSA $\gamma A$ 0.9-2.2 GeV			$p < 0.5$ GeV: не чувствует. $p > 0.4$ GeV: $\Gamma = 140$ MeV	

# Выводы

1) На спектрометре ANKE получены  $A$ -зависимости (в том числе импульсные) для рождения  $\phi$ -мезона

PLB 695 (2011) 74, ЯФ 75 (2012) 100, PRC

2) Сравнение  $A$ -зависимостей для  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов с моделями показывает существенное уширение векторных мезонов в ядерной среде.

3) Эксперименты с детектированием лептонного канала распада векторных мезонов указывают на изменение их свойств в ядрах, но не являются 100% доказательством.