

# Электрон-позитронная аннигиляция при низких энергиях.

Ачасов М.Н.

# Введение

Стандартная модель физики частиц включает набор фундаментальных частиц и их взаимодействий.

КВАРКИ	КВАРКИ	КВАРКИ	КВАРКИ	БОЗОНЫ
u верхний 2/3 1/2	c очарованный 1.27 GeV/c <sup>2</sup> 1/2	t истинный 172 GeV/c <sup>2</sup> 1/2	g глюон 0 1	H Хиггс 125 GeV/c <sup>2</sup> 0
d нижний 1/3 1/2	s странный 95 MeV/c <sup>2</sup> 1/2	b прекрасный 4.18 GeV/c <sup>2</sup> 1/2	γ фотон 0 1	
ЛЕПТОНЫ	ЛЕПТОНЫ	ЛЕПТОНЫ	ЛЕПТОНЫ	БОЗОНЫ
e электрон 0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	μ мюон 105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	τ тау 1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	Z Z бозон 91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1	
ν <sub>e</sub> нейтрино 0 1/2	ν <sub>μ</sub> мюонное 0 1/2	ν <sub>τ</sub> тау 0 1/2	W W бозон 80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1	

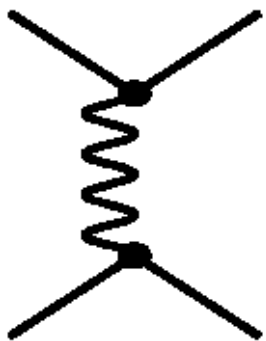
Электрон-позитронное взаимодействие – важнейший инструмент исследования в физике частиц:

- Возможность создания установок со встречными электрон-позитронными пучками.
- Электрон и позитрон – фундаментальные частицы, т.е. без внутренней структуры.
- Электрон и позитрон взаимодействуют электромагнитным образом.
- В электрон-позитронных столкновениях рождаются другие фундаментальные частицы – кварки, лептоны, бозоны.

# Электрон-позитронное взаимодействие.

Рассеяние

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



Двухфотонное рождение лептонов

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-,$$

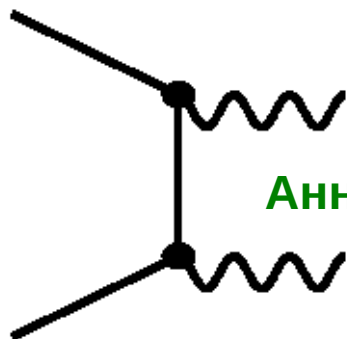
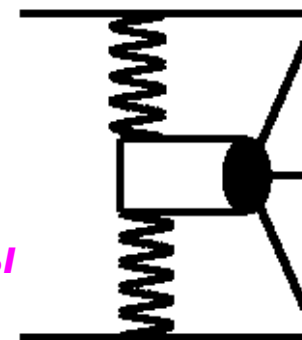
$$e^+e^- \mu^+\mu^-,$$

$$e^+e^- \tau^+\tau^-$$

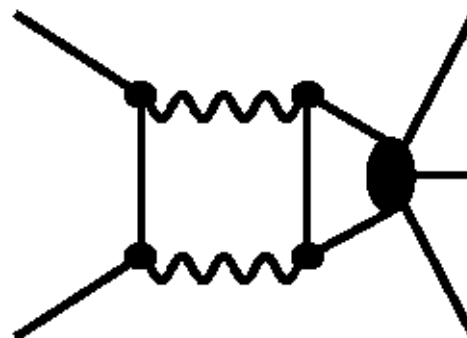


Двухфотонное рождение адронов

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{адроны}$$



Аннигиляция  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

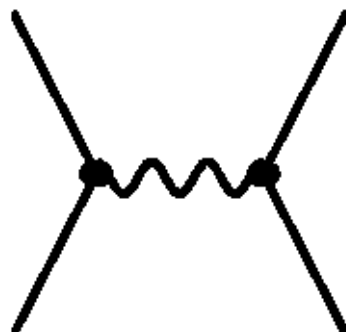


двухфотонная аннигиляция в адроны

$$e^+e^- \rightarrow \gamma^*\gamma^* \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{адроны}$$

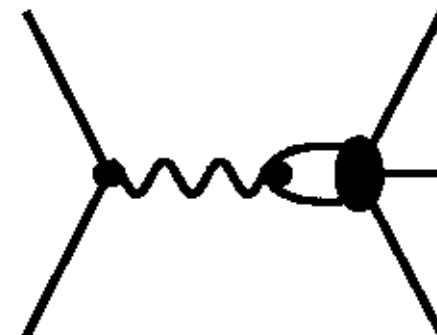
аннигиляция в пару лептонов

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$$

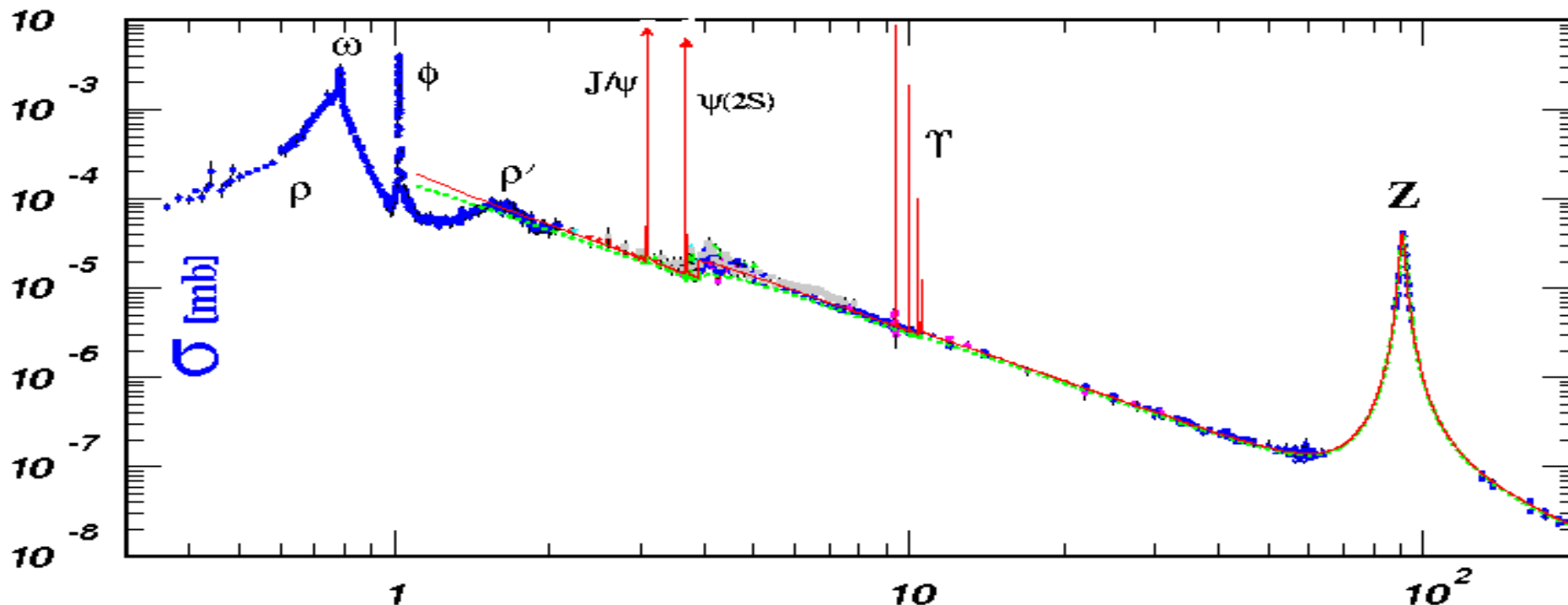


аннигиляция в адроны

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{адроны}$$



# Аннигиляция $e^+e^- \rightarrow$ адроны.

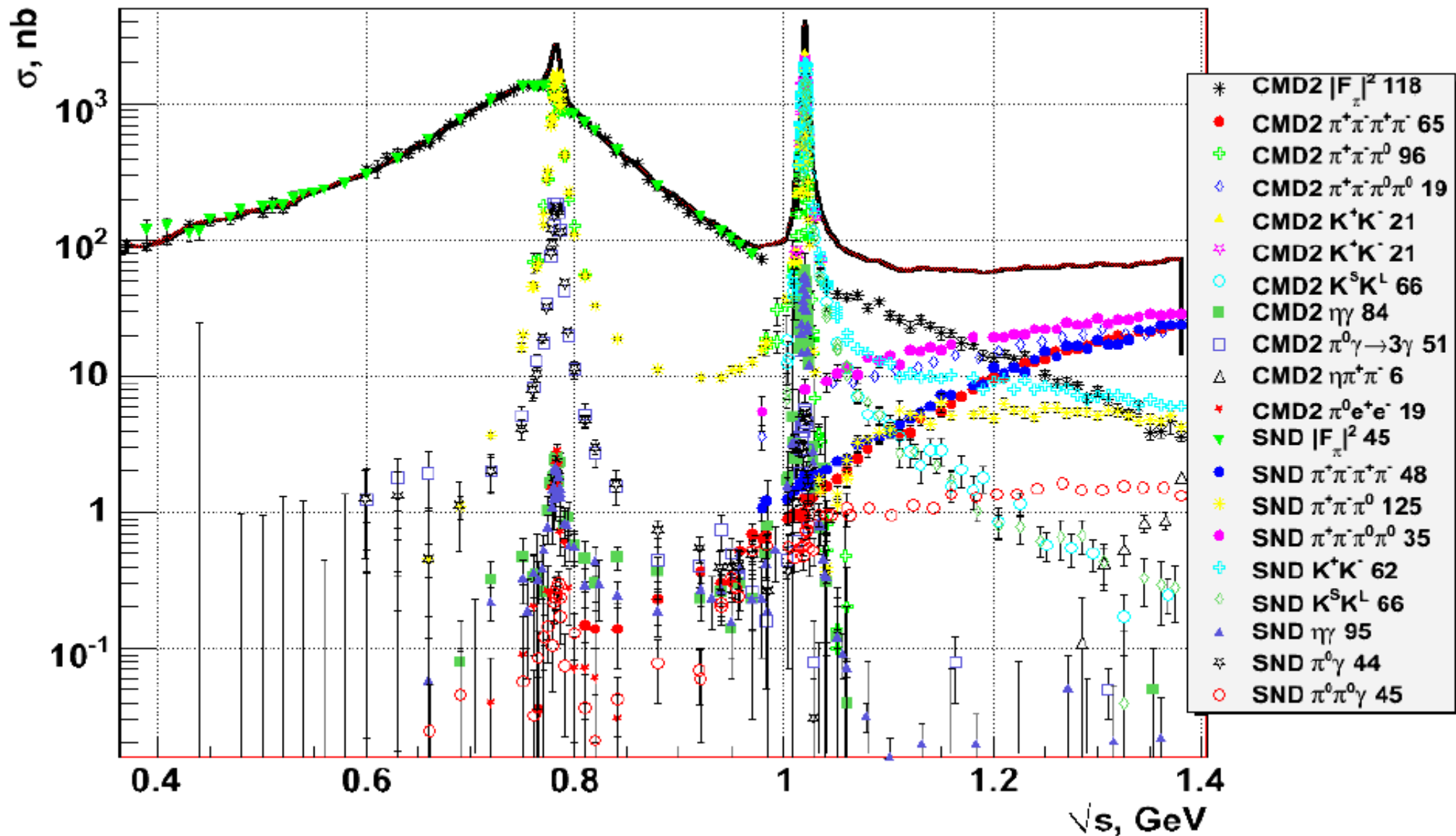


Сечение  $e^+e^- \rightarrow$  адроны  $\sqrt{s} \approx 0.4 - 190$  ГэВ

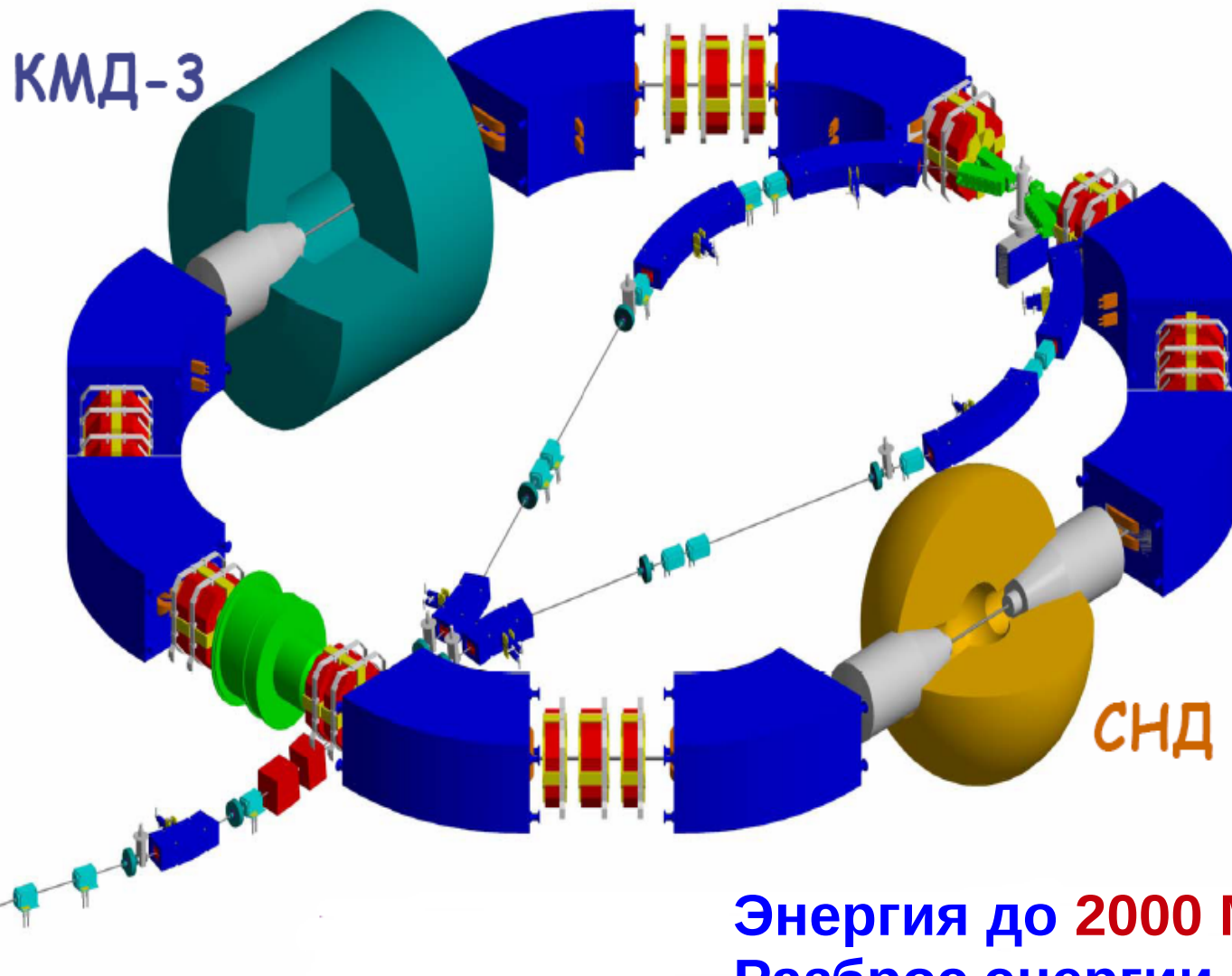
Сечение  $e^+e^- \rightarrow$  адроны можно условно разбить на области

- «Низких энергий» – до **3 ГэВ**. Рождение **u, d, s** кварков;  **$\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$** -мезонов и их возбуждённых состояний.  $|\rho\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$ ,  $|\omega\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} + u\bar{u})$ ,  $|\phi\rangle \approx s\bar{s}$
- Рождения  **$\psi$**  и  **$\Upsilon$**  – мезонов («шармония» и «ботомония») – **3-12 ГэВ**;  
**u, d, s, c, b** кварки.  $|\psi\rangle = c\bar{c}$ ,  $|\Upsilon\rangle = b\bar{b}$
- «Высоких энергий» – от **12 ГэВ**. Рождение **Z**-бозона, всех типов кварков.

# Сечения процессов аннигиляции $e^+e^- \rightarrow$ адроны при «низкой энергии»



# Коллайдер ВЭПП-2000.

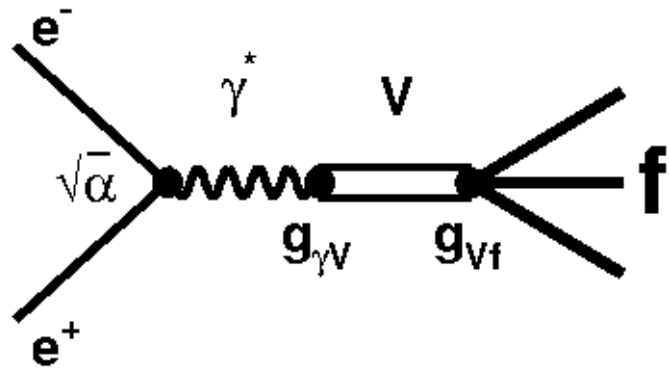


Энергия до **2000 МэВ**  
Разброс энергии **0,7 МэВ**  
Светимость до  **$10^{-32}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>**  
Периметр **24 м**  
Время оборота пучка **82 нс**

# Аннигиляция $e^+e^- \rightarrow$ адроны в области «низких энергий».

При низких энергиях практически невозможно рассчитать сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow$  адроны в рамках фундаментальной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики.

Для описания сечений применяется феноменологическая модель доминантности векторных мезонов (ДВМ).



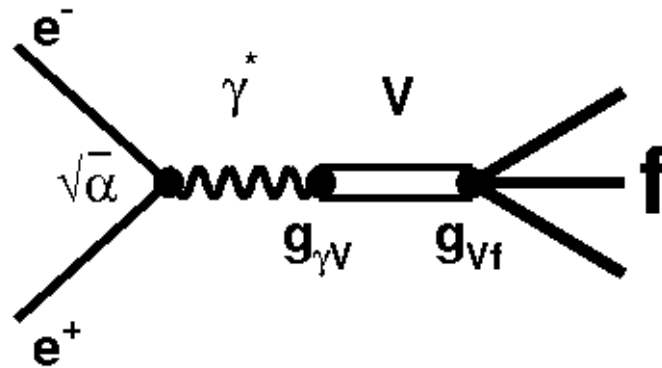
Взаимодействие фотона с адронами происходит посредством перехода фотона в нейтральный векторные мезоны и их последующего распада на адроны.

$$V = |q\bar{q}\rangle \quad (I=1,0 \quad J^{PC}=1^{--})$$

$$\gamma \quad (I=1,0 \quad J^{PC}=1^{--})$$

$$V = \rho, \omega, \phi, \rho', \omega', \phi', \dots$$

# Сечения процессов $e^+e^- \rightarrow$ адроны в модели ДВМ.



$$\sigma(e^+e^- \rightarrow f) = \frac{(4\pi\alpha)^2}{s^{3/2}} P_f(s) \left| \sum_V \frac{g_{\gamma V} g_{Vf}}{D_V(s)} e^{i\phi_{V_0 V}} \right|^2$$

Константы связи  $\gamma - V$  и  $V - f$ :

$$g_{Vf} = \left[ \frac{\Gamma_V B(V \rightarrow f)}{P_f(m_V)} \right]^{1/2}, \quad g_{\gamma f} = \left[ \frac{3m_V^3 \Gamma_V B(V \rightarrow e^+e^-)}{4\pi\alpha^2} \right]^{1/2}$$

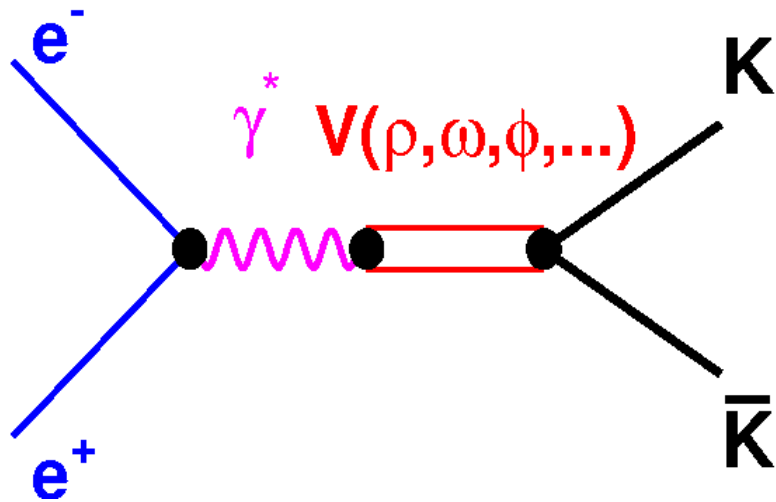
Обратный пропагатор:

$$D_V(s) = m_V^2 - s - i\sqrt{s} \sum_f g_{Vf}^2 P_f(s)$$

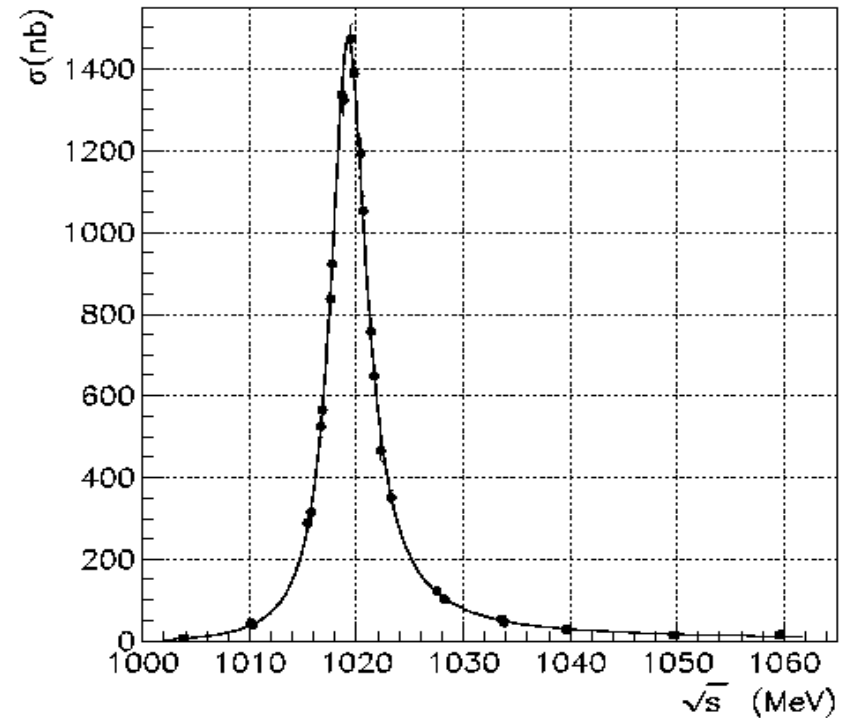


# Процесс $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$ .

(пример двухчастичного конечного состояния)



$$\sigma_{K\bar{K}} = \frac{(4\pi\alpha)^2}{s^{3/2}} P_{K\bar{K}}(s) \left| \sum_{\rho, \omega, \phi} \frac{g_{\gamma V} g_{VK\bar{K}}}{D_V(s)} e^{i\phi_{\rho V}} + A_{K\bar{K}} \right|^2$$

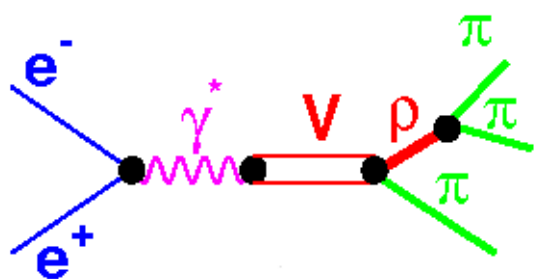


Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow K_s K_L$ .

Анализ сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow K\bar{K}$  позволяет измерять параметры  $\phi$ -мезона: массу, ширину и др.

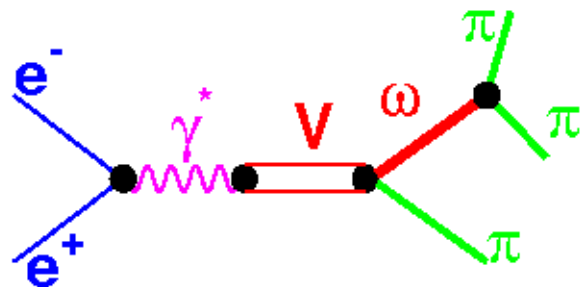
# Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ .

(пример многочастичного конечного состояния)



$$\frac{d\sigma}{dm_0 dm_+} = \frac{4\pi\alpha}{s^{3/2}} \frac{|\vec{p}_+ \times \vec{p}_-|^2}{12\pi^2 \sqrt{s}} m_0 m_+ \cdot \left| A_{\rho\pi}(s) \sum_{i=+,0,-} \frac{g_{\rho^i\pi\pi}}{D_{\rho}(m_i)} + A_{\omega\pi}(s) \frac{g_{\omega\pi\pi}}{D_{\omega}(m_0)} \right|^2$$

$$A_{\rho\pi}(s) = \sum_V \frac{g_{\gamma V} g_{V\rho\pi}}{D_V(s)} \times e^{i\phi_{\omega V}}, \quad A_{\omega\pi}(s) = \sum_V \frac{g_{\gamma V} g_{V\omega\pi}}{D_V(s)} \times e^{i\phi_{\rho V}}$$



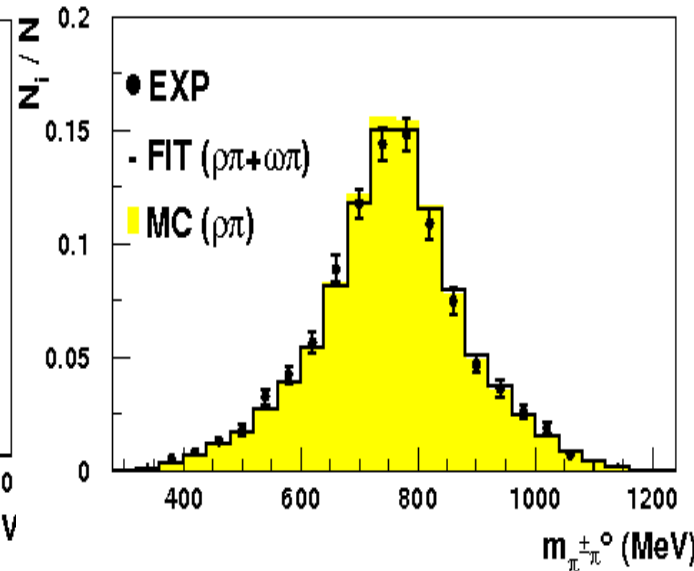
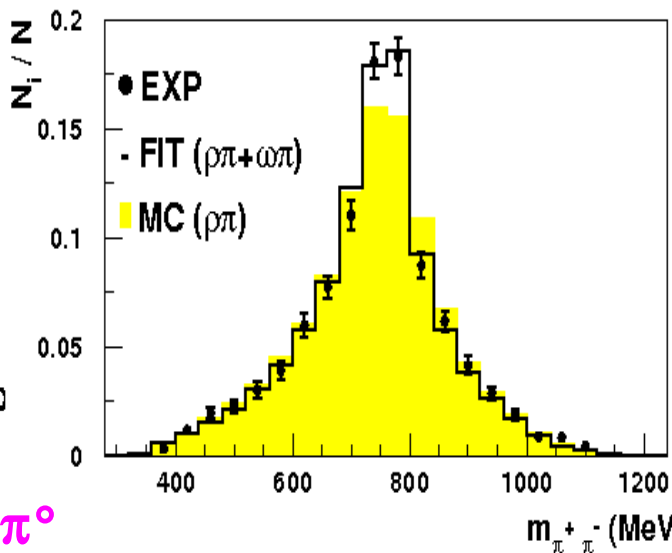
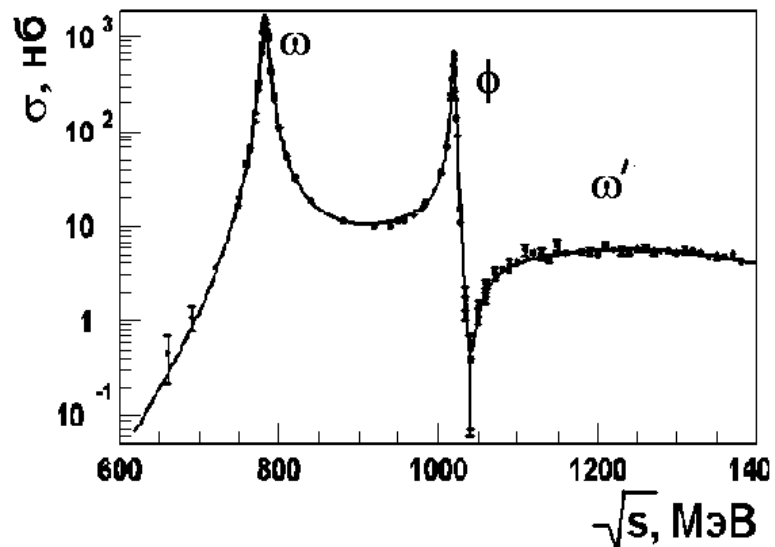
Доминирует процесс

$e^+e^- \rightarrow (\omega, \phi, \omega', \omega'') \rightarrow \rho^\pm \pi^\pm, \rho^0 \pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ .

Наблюдается процесс

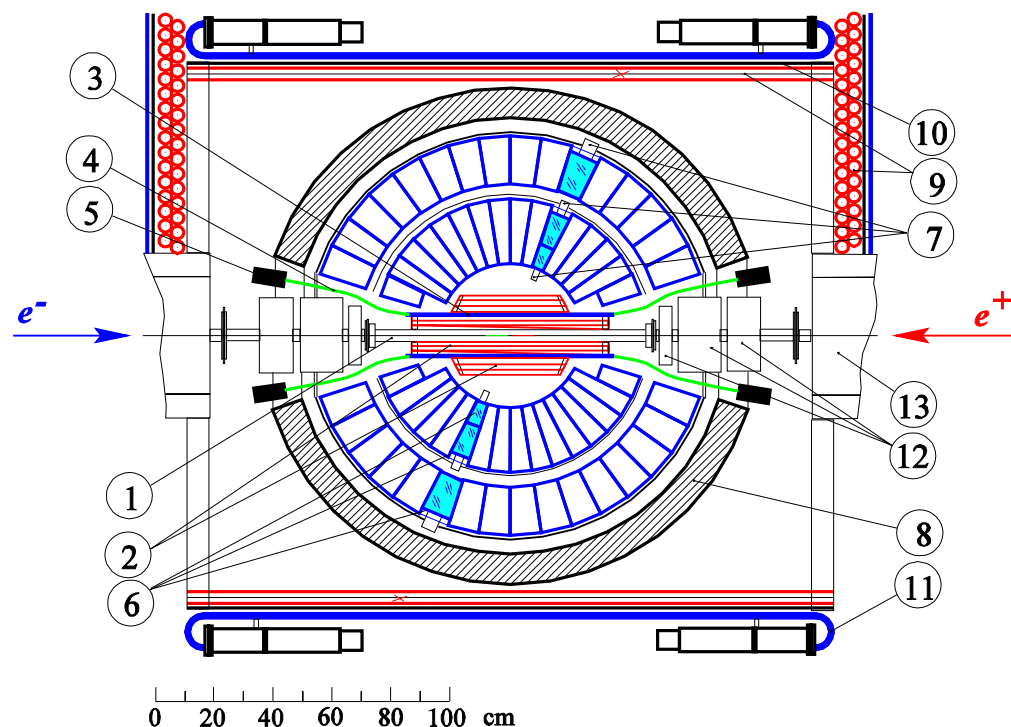
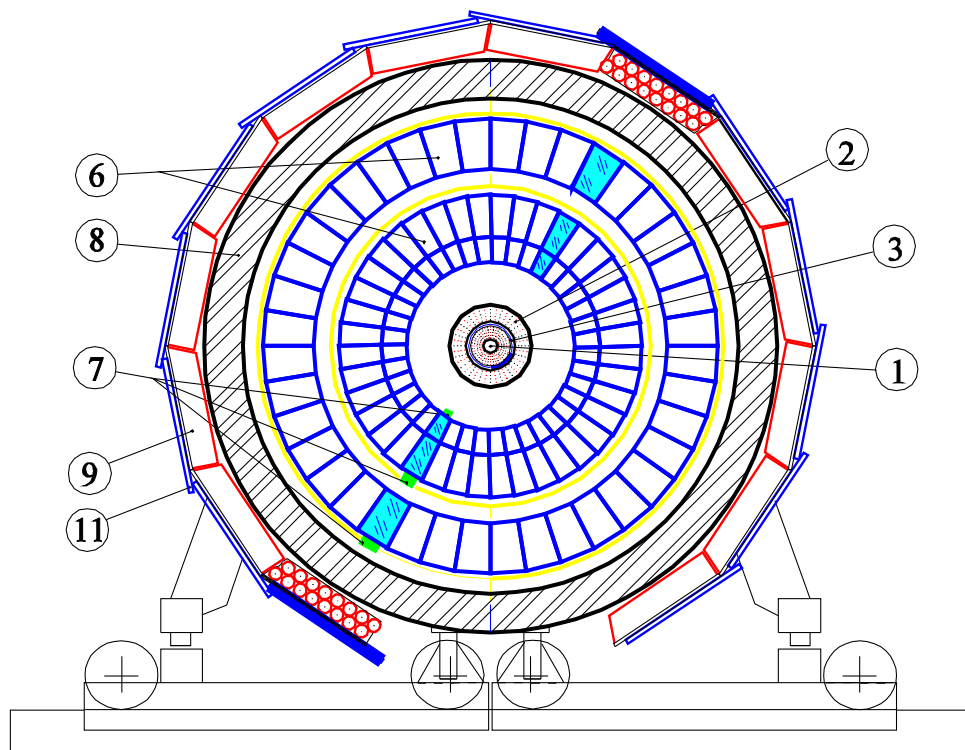
$e^+e^- \rightarrow (\rho, \rho', \rho'') \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ .

Спектры масс  $\pi^+\pi^-$  и  $\pi^\pm\pi^0$ .



Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

# СФЕРИЧЕСКИЙ НЕЙТРАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР (СНД)



**1** – вакуумная камера, **2** – дрейфовые камеры, **3** – сцинтилляционный счетчик, **4** – световоды, **5** – ФЭУ, **6** – кристаллы NaI(Tl), **7** – ВФТ, **8** – железный поглотитель, **9** – стримерные трубки, **10** – железные пластины, **11** – сцинтилляционные счетчики, **12** – магнитные линзы, **13** – поворотные магниты.

# Измерение сечений процессов .

$$\sigma_0 = \frac{N}{IL \varepsilon (1 + \delta_r)(1 + \delta_e)}$$

$N$  — число событий процесса  $e^+e^- \rightarrow$  адроны;

$IL$  — интегральная светимость;

$\varepsilon$  — эффективность регистрации;

$\delta_r$  — поправка на излучение фотонов начальными (конечными частицами);

$\delta_e$  — поправка на разброс энергии.

Теоретическое сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ :

$$\sigma_{\pi^+\pi^-} = \frac{(4\pi\alpha)^2}{s^{3/2}} P_{\pi\pi}(s) \left| \sum_{\rho, \omega, \rho'} \frac{g_{\gamma V} g_{V\pi\pi}}{D_V(s)} e^{i\phi_{\rho V}} \right|^2$$

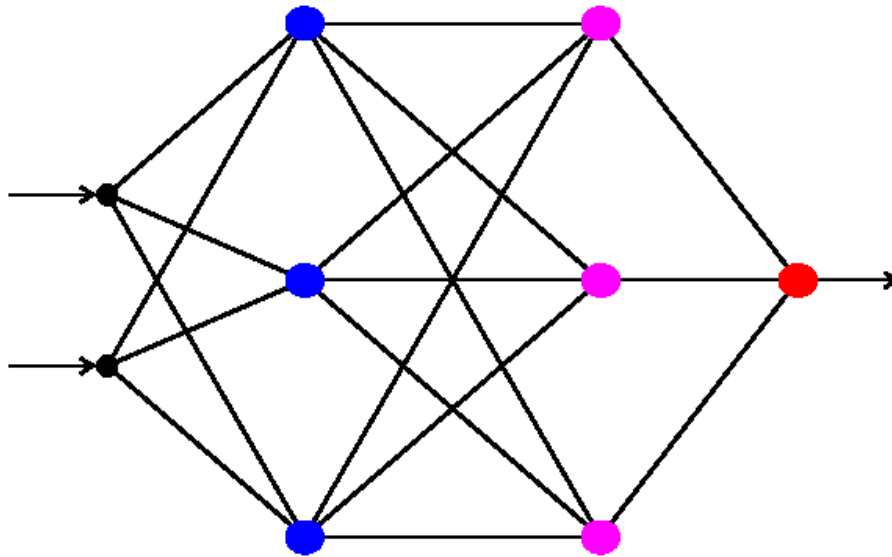
# Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$

в области энергии  $\sqrt{s} < 1$  ГэВ

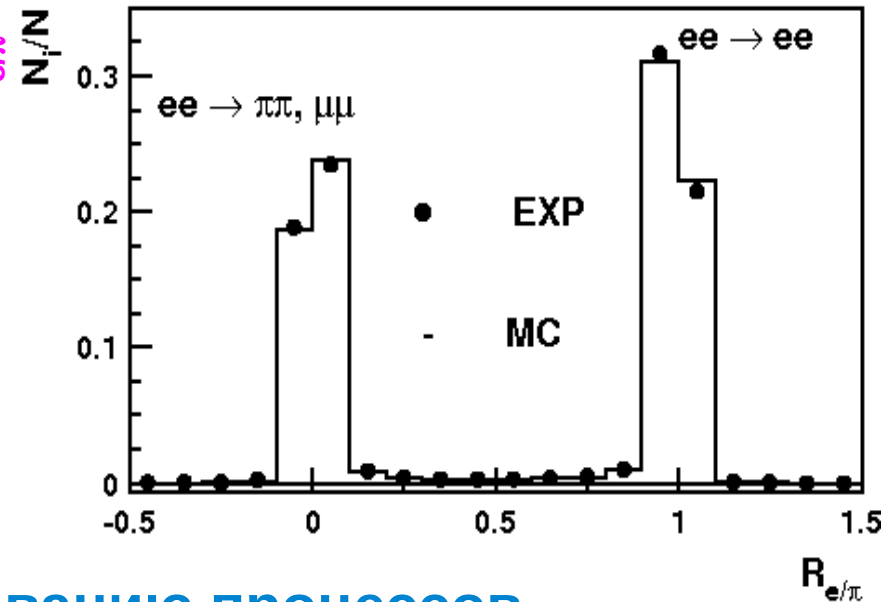
- Отбирались коллинеарные события ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ).
- Для подавления фона от космических мюонов использовалась мюонная система
- По энергovyделениям в слоях калориметра события разделялись на два класса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ .
- События  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  использовались для определения светимости. События  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  вычитались по КЭД расчёту.

$e/\pi$  разделение основано на нейронной сети — многослойном перцептроне:

Энергovyделения в  
слоях калориметра



Параметр  $e/\pi$   
разделения  $R_{e/\pi}$

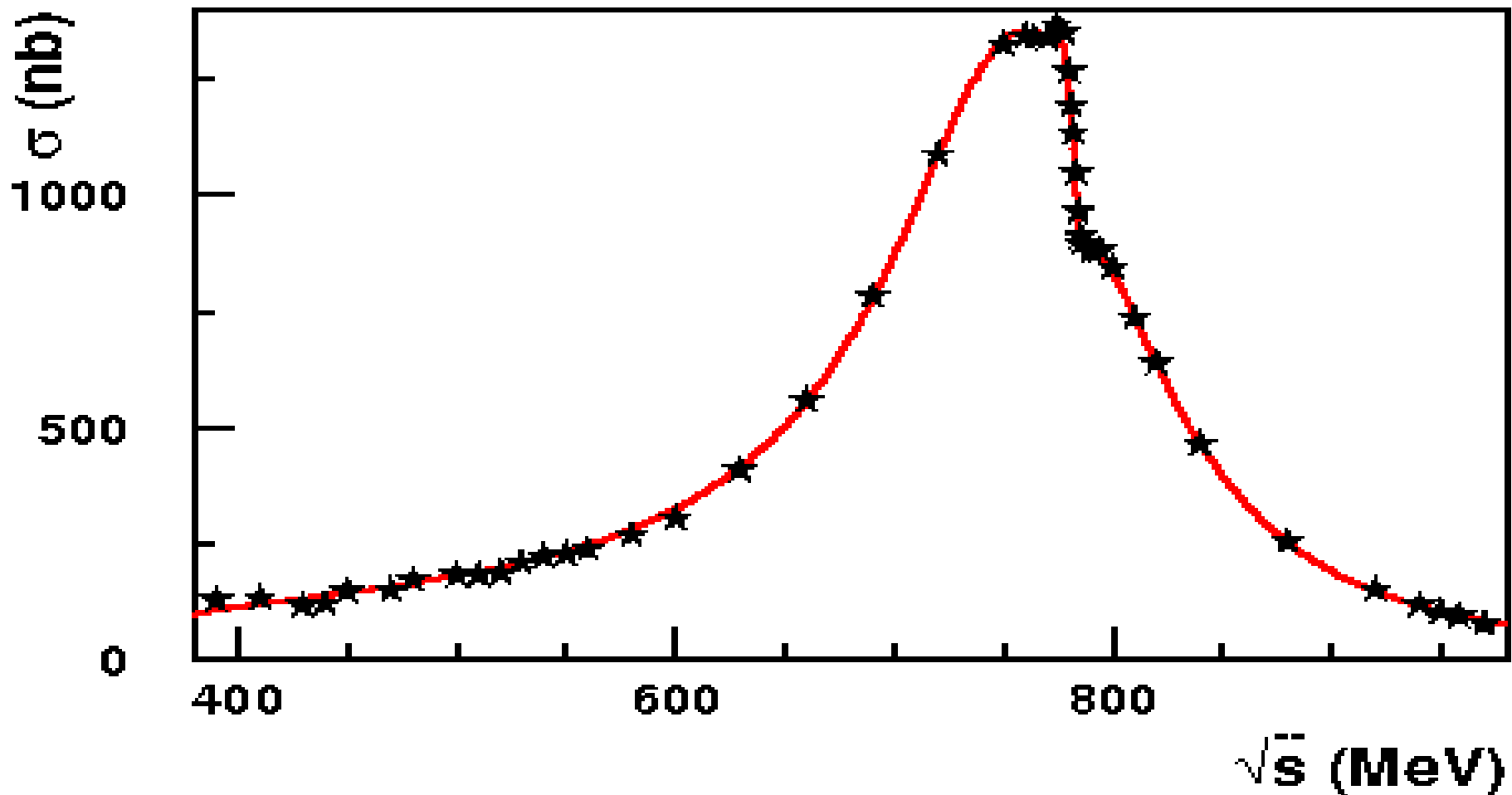


Сеть обучалась по моделированию процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  ( $\gamma$ ) и  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  ( $\gamma$ ) в каждой точке по энергии.

# Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в области энергии $\sqrt{s} < 1$ ГэВ

$$\sigma_{\pi\pi} = \frac{N_{\pi\pi}}{IL \varepsilon_{\pi\pi\gamma} (1 + \delta_r)(1 + \delta_e)} \quad IL = \frac{N_{ee}}{\sigma_{ee\gamma} \varepsilon_{ee\gamma}} \quad N_{\pi\pi} = N - N_{ee} - N_{\mu\mu} - N_{3\pi} - N_{\mu}$$

Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ , измеренное детектором СНД.  
Систематическая ошибка измерения **1.3 %**.



# «Новая физика».

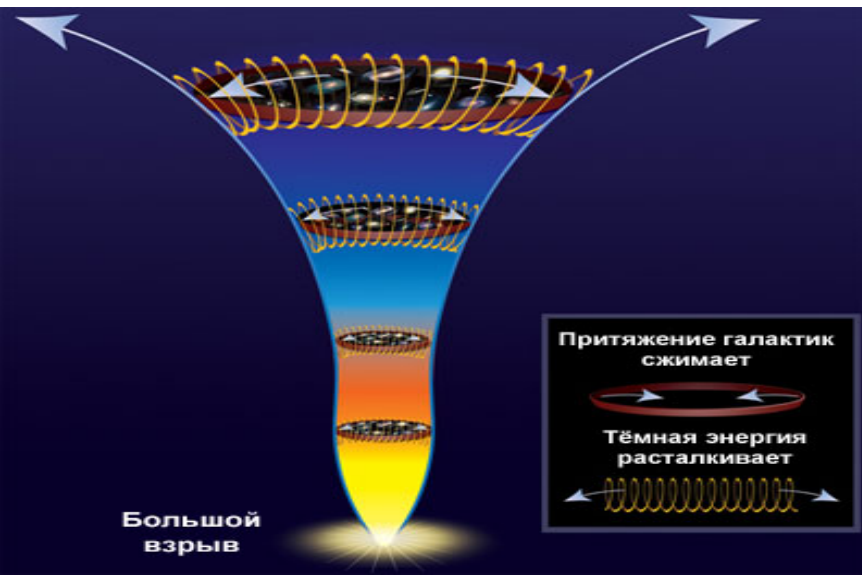
Стандартная модель физики частиц описывает все экспериментальные данные об элементарных частицах и их взаимодействиях.



Новая физика – явления природы выходящие за рамки стандартной модели, например новые фундаментальные частицы и взаимодействия.

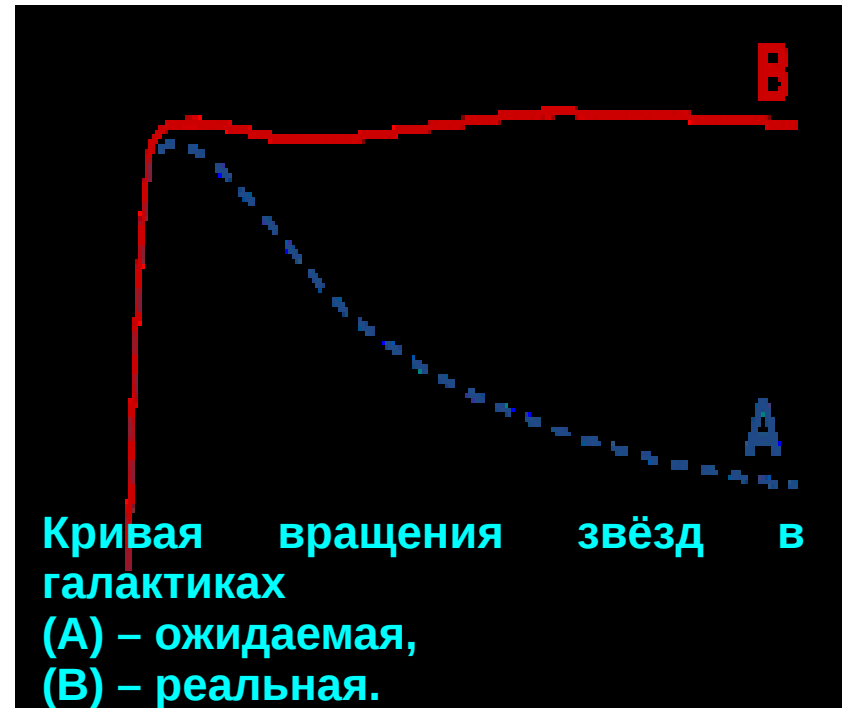
В частности, на существование новой физики указывают результаты анализа астрономических наблюдений. Космология требует существования частиц, полей, взаимодействий, которых нет в стандартной модели физики частиц.

# Новая физика. Тёмные энергия и материя.



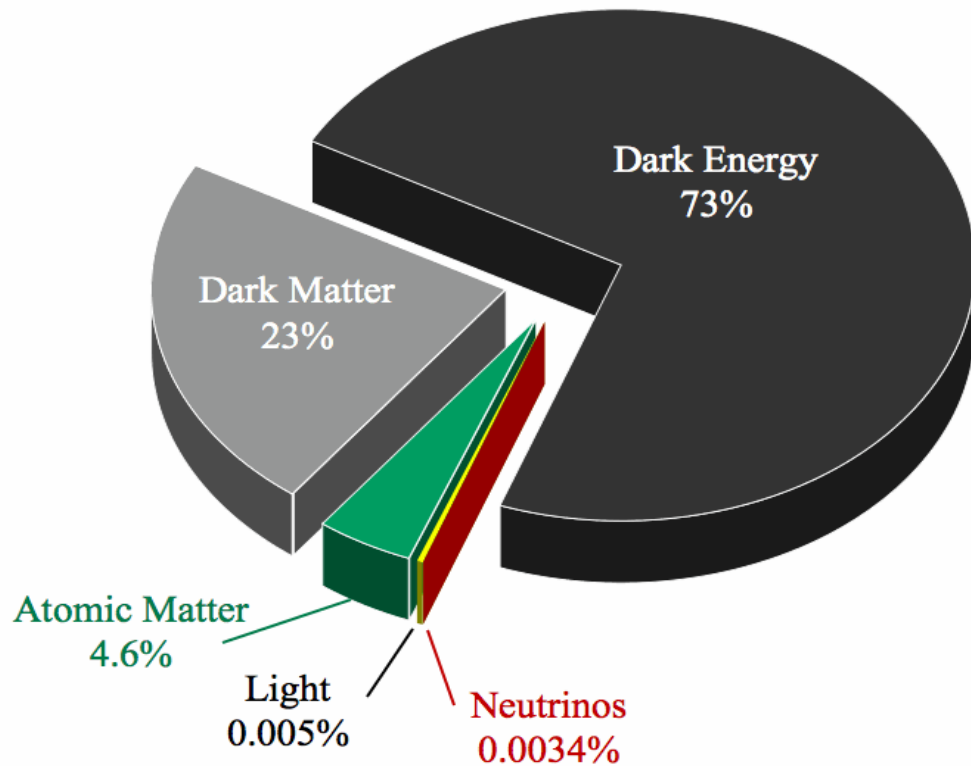
Открытие ускоренного расширения вселенной, говорит о том, что на космологических масштабах есть неизвестные силы, «разрывающие» вселенную. Связанное с этими силами поле, получило название темной энергии.

Проблема тёмной материи. Астрономические наблюдения, например, измерения скоростей вращения звёзд в галактиках, свидетельствуют о том, что большая часть вещества, из которого состоит Вселенная, невидима. Для объяснения этих явлений введено понятие тёмной материи. Элементарных частиц тёмной материи нет в стандартной модели.





# Новая физика. Тёмные энергия и материя.



Общая энергия-масса ( $E=mc^2$ )

наблюдаемой вселенной:

**73%** тёмная энергия

**23%** тёмная материя,

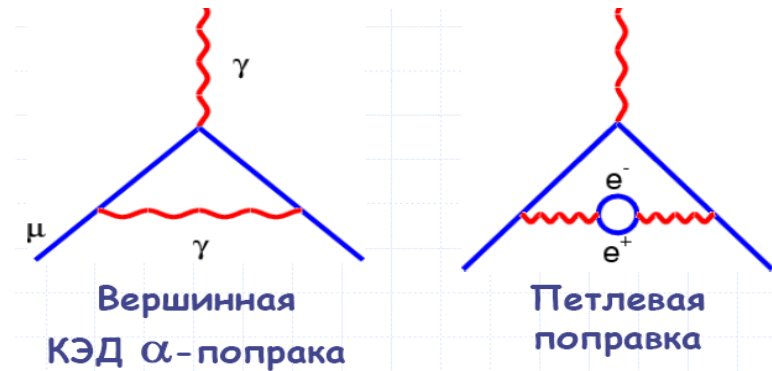
**5%** обычное протон-нейтронное вещество.

# Магнитный момент мюона и новая физика.

Соотношение между магнитным моментом и спином мюона ( $s=1/2$ ):

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_{\mu}} \vec{s}$$

Из уравнения Дирака  $g=2$ , но квантовые флуктуации поля (радиационные поправки) изменяют это значение:  $g \approx 2,002$ . Величина изменения характеризуется аномальным магнитным моментом  $a_{\mu} = (g-2)/2$ .



Вклад в  $a_{\mu}$  дают любые поля:

$$a_{\mu} = a_{\mu}^{QED} + a_{\mu}^{EW} + a_{\mu}^{had} + a_{\mu}^{NewPhysics}$$

Экспериментальное измерение:  
(ошибка  $\approx 0,5$  ppt или  $0,5 \times 10^{-6}$ )

$$a_{\mu}^{exp} = (11659209 \pm 6) \times 10^{-10}$$

Теоретический расчёт в рамках стандартной модели:

$$a_{\mu}^{th} = a_{\mu}^{QED} + a_{\mu}^{EW} + a_{\mu}^{had}$$

Вклад новой физики:

$$a_{\mu}^{NewPhysics} = a_{\mu}^{exp} - a_{\mu}^{th}$$

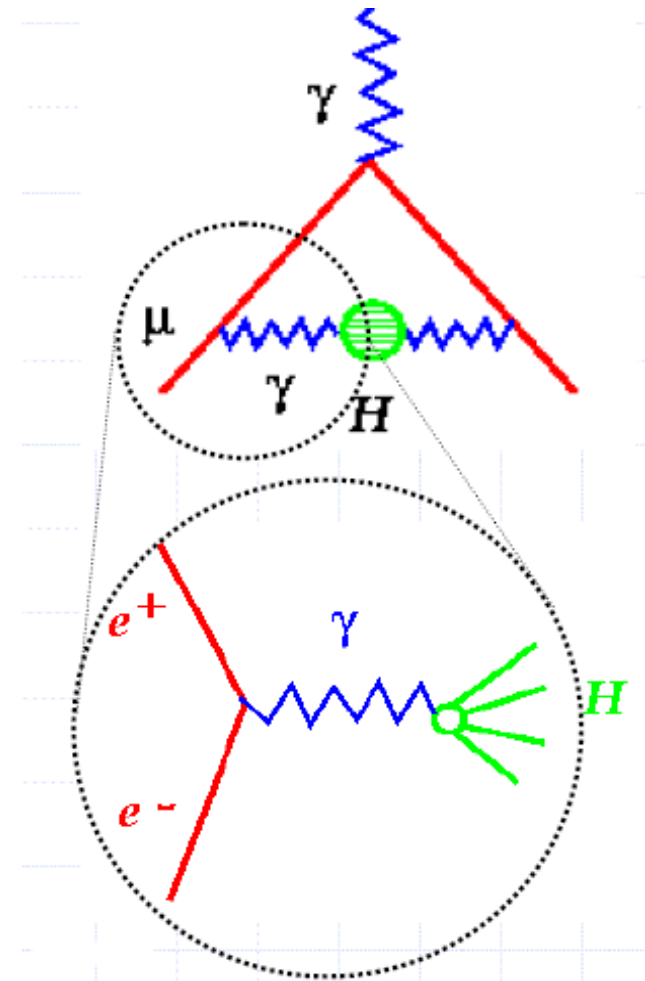
# Аннигиляция $e^+e^- \rightarrow$ адроны и расчёт $a_\mu$ .

Адронный вклад не может быть рассчитан из первых принципов и для его определения необходимо использовать результаты измерения сечения аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow$  адроны.

Вычисление адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона:

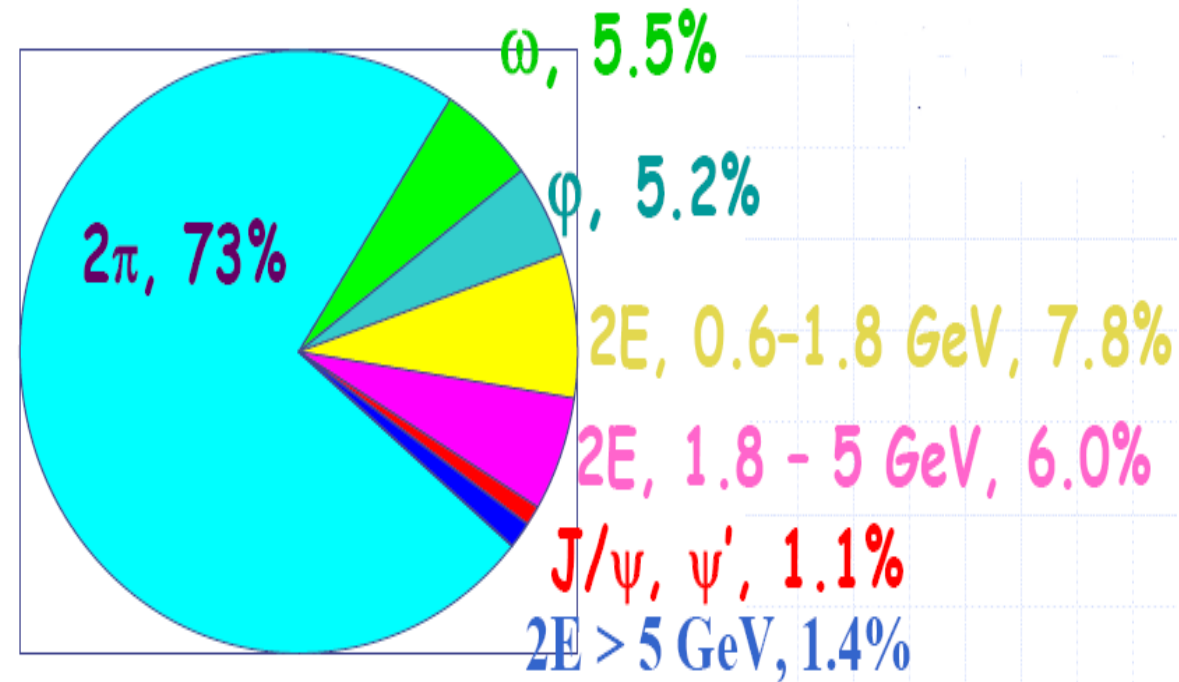
$$a_\mu^{had} = \left( \frac{\alpha m_\mu}{3\pi} \right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{R(s)K(s)}{s^2} ds$$

$$K(s) - \text{ядро КЭД}, R(s) = \frac{\sigma(ee \rightarrow \text{адроны})}{\sigma(ee \rightarrow \mu\mu)}$$



# Аннигиляция $e^+e^- \rightarrow$ адроны и расчёт $a_\mu$ .

Точность теоретического расчёта  $a_\mu$  (составляет  $\approx 0,4$  ppm или  $0,4 \times 10^{-6}$ ) полностью определяется точностью вычисления адронного вклада, т.е. ошибкой измерения сечений  $e^+e^- \rightarrow$  адроны.



Основной вклад в  $a_\mu^{had}$  даёт область низких энергий:

Сечени процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  — 70%

Сечения  $e^+e^- \rightarrow$  адроны в области  $\phi$  и  $\omega$  резонансов — 10 %

Сравнение расчёта и измерения  $a_\mu$ :

$$a_\mu^{NewPhysics} = a_\mu^{exp} - a_\mu^{th} \approx 3,5 \sigma$$

В 2016 – 2020 гг планируется измерить с точностью 0,15 ppm.

# Заключение

- Электрон-позитронная аннигиляция при низких энергиях является важным инструментом исследования лёгких векторных мезонов  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  и их возбуждённых состояний.
- Для интерпретации результатов новых измерений  $a_\mu$  с точностью 0,15 ppm необходимо уменьшить ошибки измерений сечений  $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ , в частности, измерить сечение  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  с точностью 0,5%.