

Физическая программа μμтрона

В.П.Дружинин, А.И.Мильштейн,

С.И.Середняков, Н.Мучной,

Е.П.Солодов, А.А.Король

ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Диапазон энергий

➤ $e^+e^- \rightarrow \pi^0$

○ фон от $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

➤ $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$

○ фон от $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma$

➤ $e^+e^- \rightarrow \text{dimuonium}$

➤ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

➤ $e^+e^- \rightarrow \text{dipionium}$

○ малое сечение

➤ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$

➤ $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$

➤ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

➤ $e^+e^- \rightarrow \eta$

➤ $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$

➤ ...

Минимальная
энергия в системе
центра масс
 $E_{\text{CM}} = 210 \text{ МэВ}$

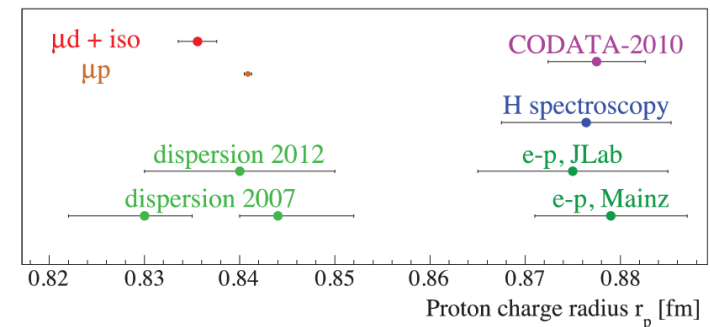
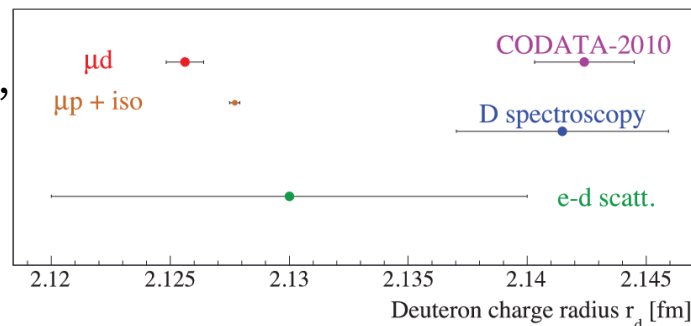
ДИМЮОНИЙ

- Димюоний – это связанное состояние пары $\mu^+\mu^-$
- Система из 2 лептонов, описываемая КЭД.
- 6 лептонных атомов: **позитроний** (e^+e^-), **мюоний** (μ^+e^-), **димюоний** ($\mu^+\mu^-$), **тауоний** (τ^+e^-), **тау-мюоний** ($\tau^+\mu^-$), **дитауоний** ($\tau^+\tau^-$). Наблюдались только позитроний и мюоний.
- По сравнению с ними димюоний более компактная система $R_{\mu\mu} \approx (1/100)R_{\mu e} \approx (1/200)R_{ee}$.

Димюоний. Зачем изучать?

- Наблюдение димюония – это открытие мирового уровня
- Сложная экспериментальная задача → вызов экспериментатору → развитие методики
- Тесты КЭД (мюоний – позитроний $\times m_e/m_\mu$)
- Исследование свойств мюона
 - ✓ Разница в 3.5σ между расчетом и измерением $(g-2)_\mu$
 - ✓ Проблема радиуса протона/дейтрона

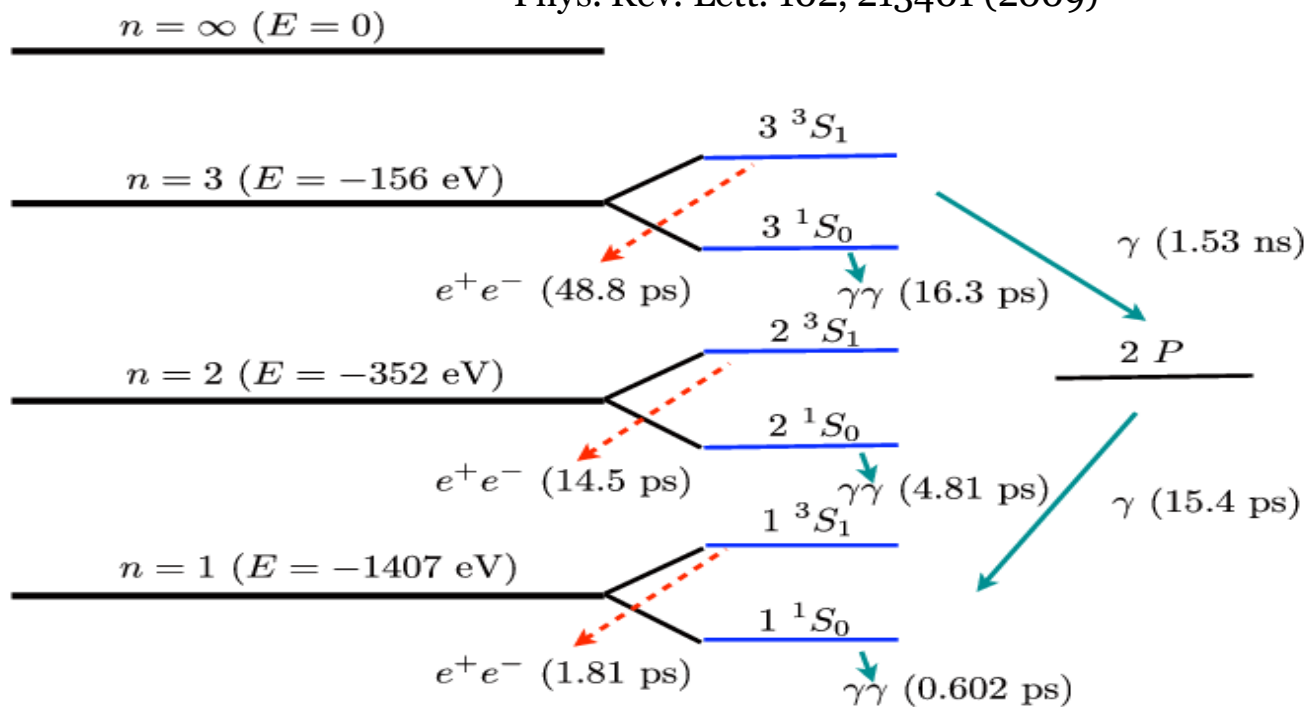
R.Pohl et al., Nature,
466, 213 (2010);
Science, 353, 669
(2016)



Димюоний. Свойства.

S.J.Brodsky and R.F.Lebed

Phys. Rev. Lett. 102, 213401 (2009)



$3S_1$ $J^{PC}=1^{--}$

$1S_0$ $J^{PC}=0^{-+}$

$3P_0$ $J^{PC}=0^{++}$

$3P_1$ $J^{PC}=1^{++}$

$3P_2$ $J^{PC}=2^{++}$

$1P_1$ $J^{PC}=1^{+-}$

Рождение димюония в e^+e^- столкновениях:
В.Н.Байер и В.С.Сынах,
ЖЭТФ, **41**, 1576 (1961).

Димюоний. Сечение рождения.

В реакции $e^+e^- \rightarrow (\mu^+\mu^-) \rightarrow e^+e^-$ рождаются все состояния n^3S_1

$$\sigma(m_{\mu\mu}) \approx \frac{12\pi}{m_{\mu\mu}^2} \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{\Gamma_{ee}}{\delta} \approx 0.2 \frac{\Gamma_{ee}}{\delta} \text{ б}$$

Для разных конфигураций коллайдера:

$$\Gamma_{ee}/\delta = 0.37 \times 10^{-6} \text{ кэВ} / (7-300) \text{ кэВ} \approx (1-50) \times 10^{-9}$$

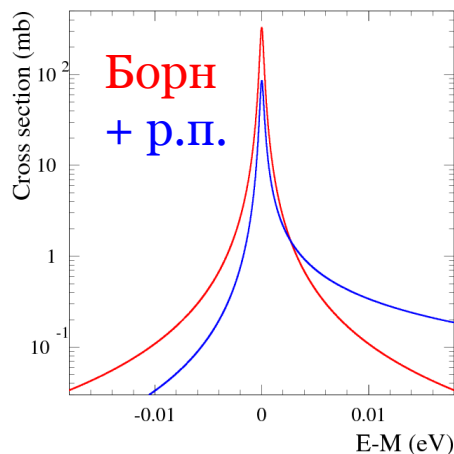
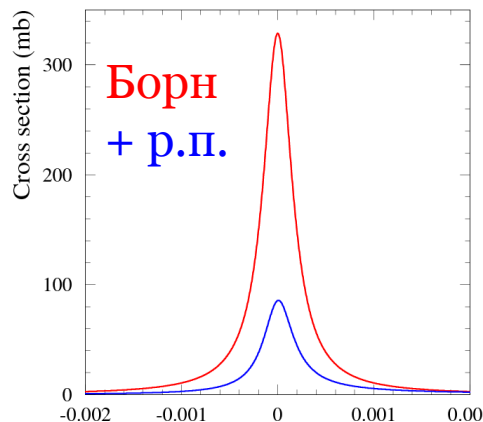
$$\sigma(m_{\mu\mu}) = 0.2-10.0 \text{ нб} \rightarrow 50-200 \text{ событий/час}$$

❑ Фон – упругое рассеяние $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

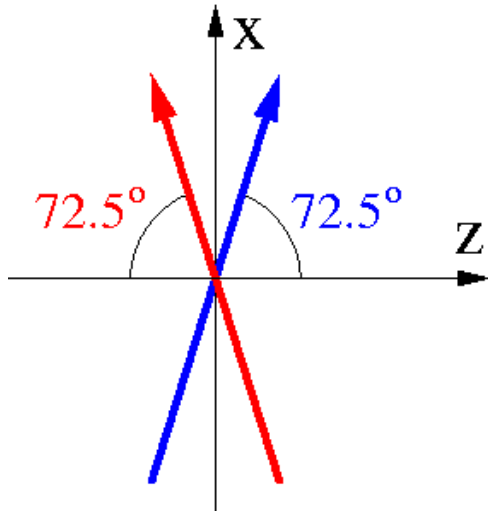
❑ Эффект/фон для $45^\circ < \theta < 135^\circ$ – $(6-30) \times 10^{-5}$

❑ На симметричном коллайдере при лобовом столкновении наблюдение – маловероятно, изучение – невозможно.

❑ Столкновения под углом – отлет мюония



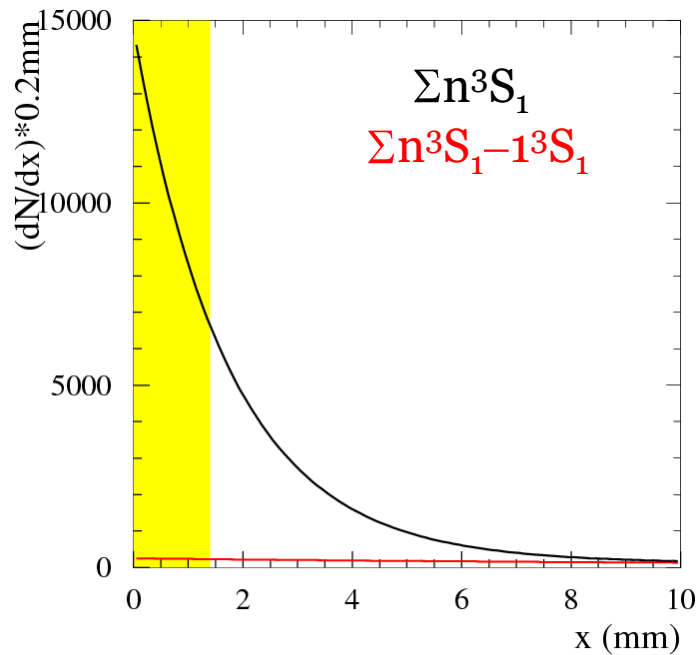
Параметры коллайдера.



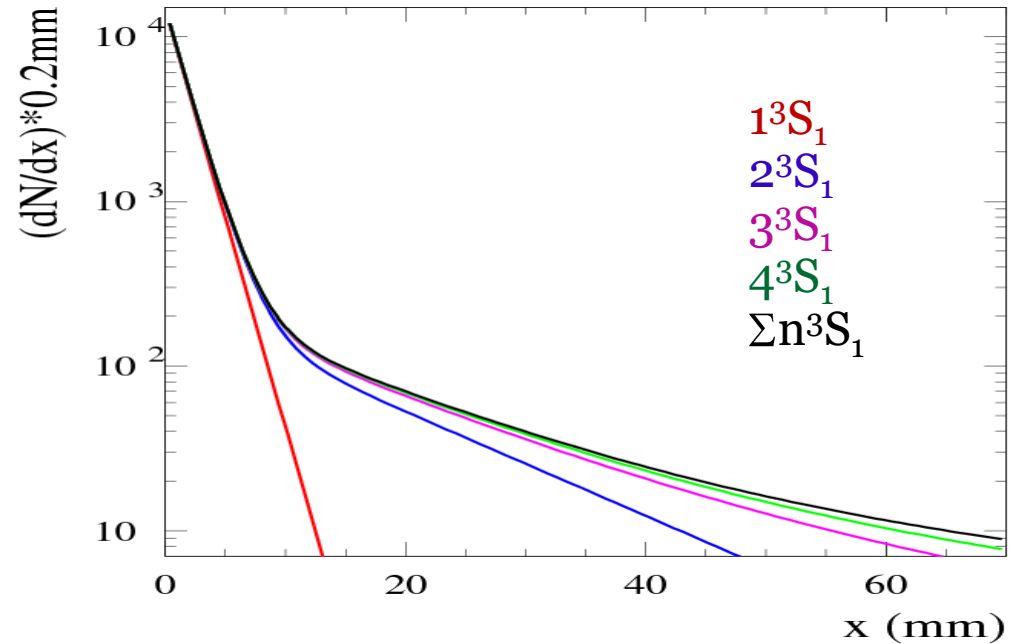
| | |
|---|-----|
| E_{beam} (MeV) | 351 |
| σ_E/E_{beam} ($\times 10^{-4}$) | 5 |
| $\Delta\alpha$ ($\times 10^{-4}$) | 5.6 |
| σ_x at IP (μm) | 85 |
| σ_y at IP (μm) | 1.0 |
| σ_z at IP (mm) | 40 |
| L_{aver} ($\times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$) | 7.5 |

- ✓ Энергетический разброс в СЦМ: $\delta(\sigma_E, \Delta\alpha) = 280 \text{ кэВ}$
- ✓ $\beta=0.953$, $\gamma=3.17$, $\beta\gamma=3.17$, $l = \beta\gamma\tau = 1.717 \text{ мм}$ для 1^3S_1
- ✓ Размеры места встречи: $\sigma_x(\text{IP}) = \sigma_x / (\sqrt{2}\cos\alpha) = 200 \mu\text{м}$,
 $\sigma_y(\text{IP}) = \sigma_y / \sqrt{2} = 0.7 \mu\text{м}$, $\sigma_z(\text{IP}) \approx \sigma_x / (\sqrt{2}\sin\alpha) = 60 \mu\text{м}$
- ✓ С разрешением детектора по $x_{\text{vertex}} = 100 \mu\text{м}$ отлет 1.4 мм соответствует подавлению фона на уровне 6σ (10^{-9}).

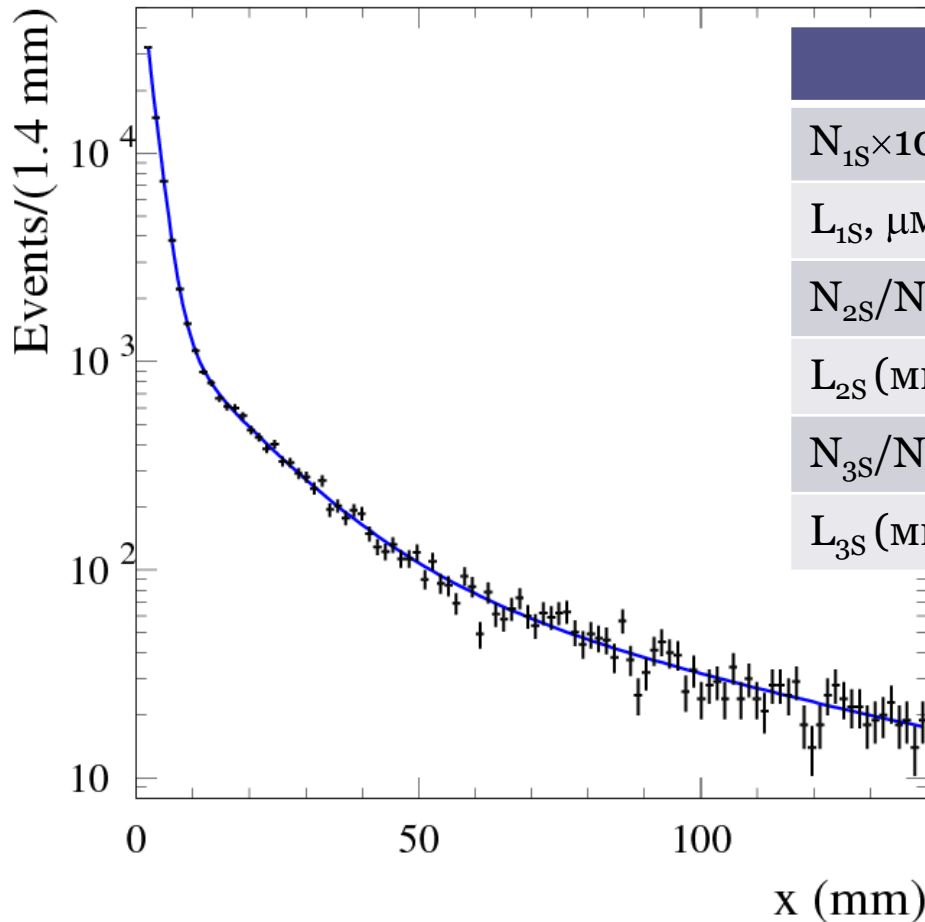
Димюоний. Количество событий.



| Событий | за час | за 4 месяца |
|------------------|----------|---------------|
| всего (1S/2S/3S) | 43/5/1.6 | 124k/16k/4.6k |
| $x > 1.4$ mm | 19/5/1.6 | 55k/14k/4.5k |



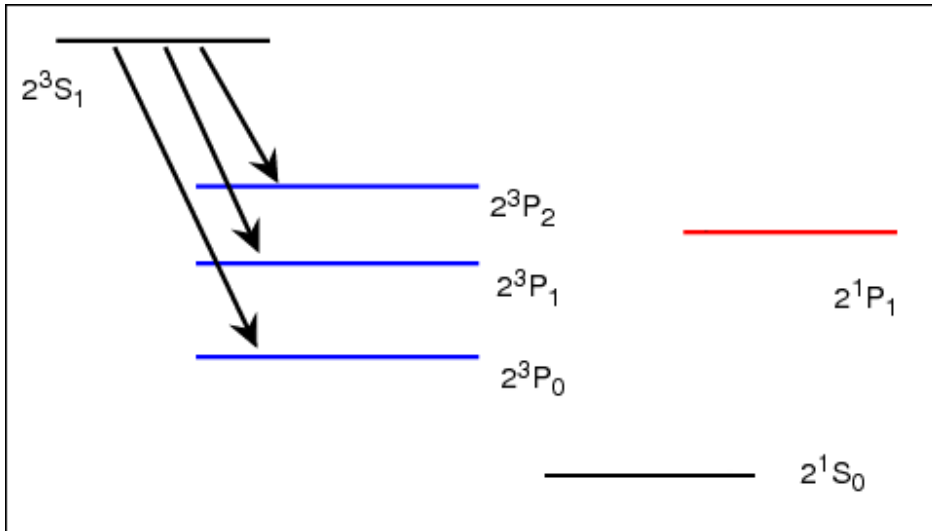
Димюоний. Время жизни.



| | true | x>0 mm | x>1.4mm |
|-----------------------------|------|-----------------|-----------------|
| $N_{1S} \times 10^{-3}$ | 125 | 124.7 ± 0.5 | 124.0 ± 0.8 |
| $L_{1S}, \mu\text{M}$ | 1717 | 1707 ± 8 | 1712 ± 14 |
| $N_{2S}/N_{1S} \times 10^3$ | 125 | 126 ± 5 | 126 ± 6 |
| $L_{2S} (\text{MM})$ | 13.7 | 13.1 ± 0.7 | 13.2 ± 0.7 |
| $N_{3S}/N_{1S} \times 10^3$ | 37 | 39 ± 6 | 39 ± 6 |
| $L_{3S} (\text{MM})$ | 46.4 | 46 ± 6 | 46 ± 6 |

- ✓ Разброс энергии δ может быть измерен по событиям $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$.
- ✓ После этого из N_{1S} может быть определена Γ_{ee} .
- ✓ Γ_{ee} можно сравнить с Γ , определенной из $L_{1S} \rightarrow$ Поиск невидимых распадов.

Димюоний. Изучение свойств.



Новый коллайдер позволяет не только наблюдать димюоний, но и измерять его свойства.

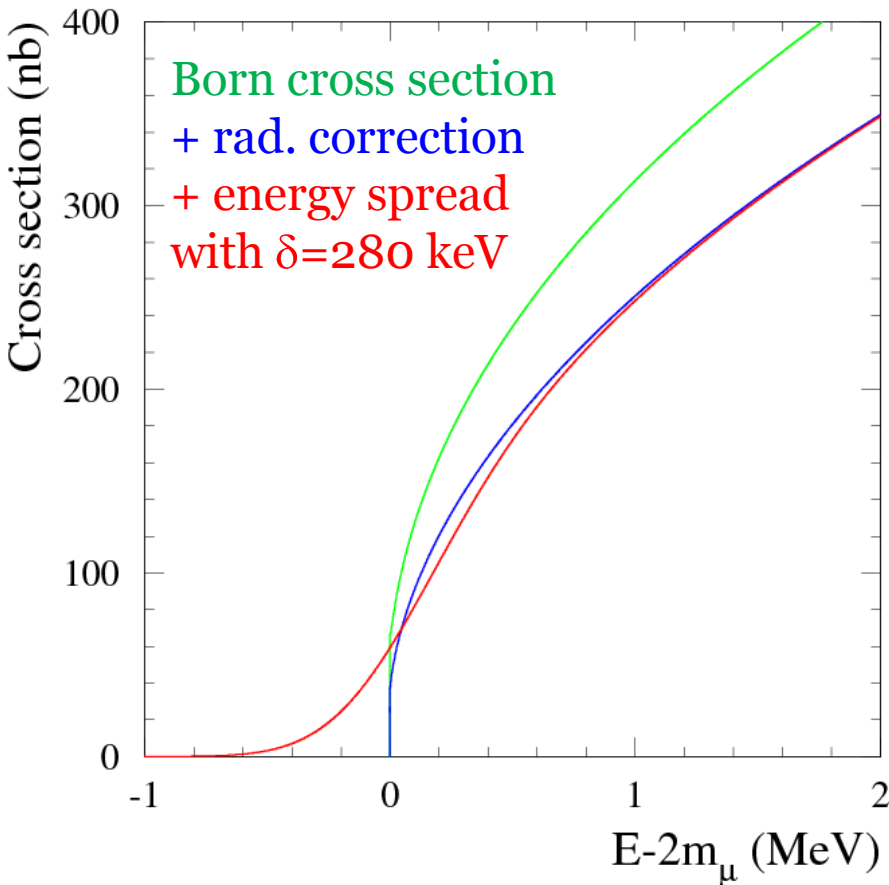
Лазерная спектроскопия.

- Длины волн ~ 100 $\mu\text{м}$.
- $2P$ -состояния переходят в $1S$ -состояния с излучением фотона с энергией ~ 1 кэВ.

Взаимодействие мишенью (фольгой)

- ✓ Переходы орто \leftrightarrow пара
- ✓ Возбуждение
- ✓ Ионизация

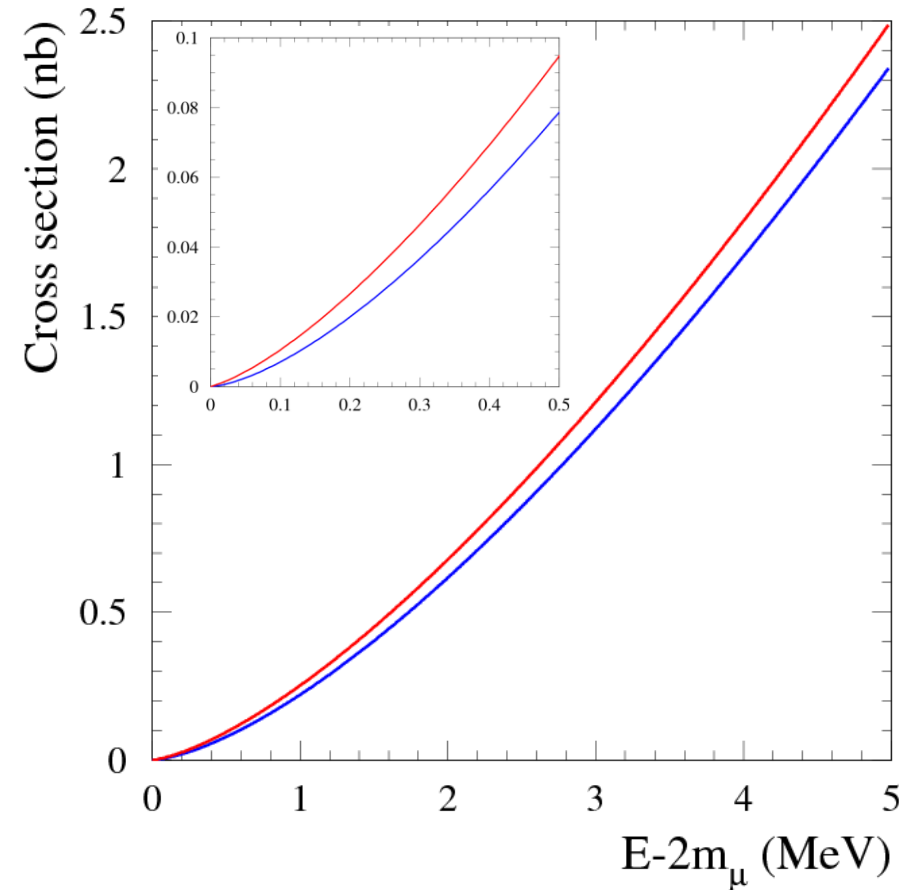
Процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$



- Кулоновское взаимодействие в конечном состоянии приводит к **ненулевому сечению на пороге реакции.**
- Вблизи порога мюоны летят вдоль оси x . При **$T=5$ МэВ** максимальный угол мюона с осью x равен **4°**
- Детектор небольшого размера, установленный перпендикулярно оси x (магнитный спектрометр, RICH, ...)

- ✓ Прецизионное измерение SSS-фактора.
- ✓ Калибровка энергии.
- ✓ Измерение энергетического разброса.

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$



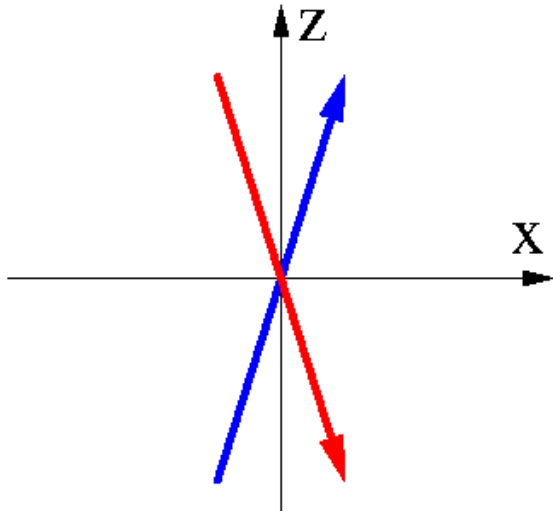
➤ Этот же детектор может быть использован для прецизионного измерения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ вблизи порога реакции.

➤ Изучение взаимодействия в конечном состоянии.

➤ Кулоновское взаимодействие увеличивает сечение на 20% (13%) при $T=0.5$ (1.0) МэВ.

➤ Вклад сильного взаимодействия может быть того же порядка → сравнение с киральными расчетами.

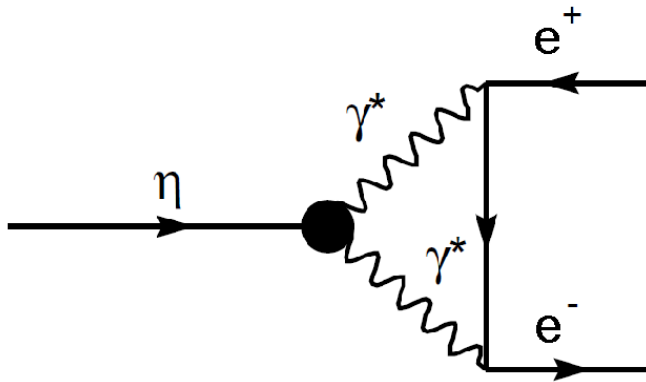
Параметры коллайдера.



| | | |
|---|-----|-----|
| E_{beam} (MeV) | 287 | 502 |
| E_{CM} (MeV) | 547 | 957 |
| ΔE_{CM} (keV) | 200 | 480 |
| L_{aver} ($\times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$) | 4.3 | 3.4 |

- ✓ Область резонансов ρ и ω , важная для $(g-2)_{\mu}$
- ✓ Светимость на 2 порядка выше, чем на ВЭПП-2000
- ✓ Прецизионное измерение сечений $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^0\gamma$, $\eta\gamma$, $\pi^0\pi^0\gamma$
- ✓ Редкие процессы $e^+e^- \rightarrow \eta$, η' .
- ✓ Двухфотонные процессы $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0$, $\pi\pi$, η .

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



- Редкий распад: $\Gamma_{ee} \sim \alpha^2 (m_e/m_\eta)^2 \Gamma_{\gamma\gamma}$.
- Чувствительность к новой физике?
- Для вычисления распада нужно знать переходной формфактор $F(q_1^2, q_2^2)$ для вершины $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \eta$.

| $\mathcal{B}(P \rightarrow l^+l^-)$ | Unitary bound (U) | Theory | Experiment |
|---|-----------------------|-------------|--------------------------------|
| $\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-) \times 10^8$ | 4.69 | 6.23 – 6.38 | 7.49 ± 0.38 [7] $3\sigma!$ |
| $\mathcal{B}(\eta \rightarrow e^+e^-) \times 10^9$ | 1.78 | 4.60 – 5.24 | < 2300 [8] |
| $\mathcal{B}(\eta \rightarrow \mu^+\mu^-) \times 10^7$ | 4.36 | 4.64 – 5.12 | 5.8 ± 0.8 [9] |
| $\mathcal{B}(\eta' \rightarrow e^+e^-) \times 10^{10}$ | 0.36 | 1.15 – 1.86 | < 56 [10, 11] |
| $\mathcal{B}(\eta' \rightarrow \mu^+\mu^-) \times 10^7$ | 1.35 | 1.14 – 1.36 | – |

За 10^7 с может быть зарегистрировано 100 событий $e^+e^- \rightarrow \eta$ и 10 событий $e^+e^- \rightarrow \eta'$ в чистых многофотонных модах распада.

Детекторы.

- ❑ **Детектор для мюония** – относительно простой: трековая система и калориметр (сэндвич) над и под местом встречи. Требуется высокое ($<100 \mu\text{м}$) разрешение по реконструкции вершины и хорошее временное разрешение ($\leq 1 \text{ нс}$).
- ❑ Он может быть дополнен системой для регистрации пар мюонов, вылетающих вдоль оси x .
- ❑ Эти же детекторы могут быть использованы для измерения сечений: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ **вблизи порогов реакций.**
- ❑ **Универсальный детектор для изучения e^+e^- аннигиляции в адроны.**

Заключение

