

$e^+e^-$  коллайдер на низкую  
энергию для поиска  
связанного состояния ( $\mu^+\mu^-$ )

А.В. Богомягков, В.П. Дружинин, В.А. Киселёв,  
В.В. Кобец, А.А. Краснов, Е.Б. Левичев,  
А.И. Мильштейн, Н.В. Митянина, И.Н. Окунев,  
Ю.А. Пупков, Е.А. Ротов, С.В. Синяткин, А.Г. Трибендис

Научная сессия

16.03.2018 ИЯФ СО РАН

# Зачем строить мумутрон?

Технологии по которым нет опыта в ИЯФ

- Малые эмиттансы, длина сгустка, бета функция, большой угол встречи  $75^\circ$ 
  - коррекция хроматизма, получение динамической апертуры
  - коррекция бетатронной связи на уровне 0.3-0.5%
  - сведение и стабилизация пучков в месте встречи, пикапы, корректоры для обратной связи
  - капельная инжекция на энергии эксперимента (top-up)
  - конструкция вакуумной камеры: импеданс, охлаждение, механическая устойчивость, Ве ...
  - коллимация фона
  - прецизионность, предсказуемость, совпадение с моделью
  - разработка современных систем: магнитной, вакуумной, управления, диагностики, питания ...

# Зачем строить мумутрон?

Технологии по которым нет опыта в ИЯФ

- Большой ток 2 А
  - вакуумная система с низким импедансом, сифоны, клапаны, коллиматоры, пикапы и т.п.
  - резонаторы 350 МГц с подавлением высших мод
  - системы поперечной, продольной связи в многосгустковом режиме для подавления коллективных неустойчивостей
  - изучение, подавление электронных облаков и ионной неустойчивости
  - подавление нагрева вакуумных устройств токами изображения

# Зачем строить мумутрон?

- Чтобы освоить современные ускорительные технологии и изучить ускорительную физику, которые нужны для проектов «Супер Чарм-Тау Фабрика» и «Сибирский источник СИ» тем самым уменьшая риски этих больших, «тяжелых» и дорогостоящих проектов
- Если таковых проектов не последует, то освоенные технологии будут нелишними для нашей контрактной деятельности
- Кадровый голод. Молодым и талантливым не интересно работать на старых установках без ярких экспериментов.
  - «Лучше всего молодой специалист растет, создавая проект с нуля.» ©Г.Н.Кулипанов
  - м-трон для этого идеален: небольшой срок реализации, есть обширное поле для новых идей и предложений

# ДИМЮОНИЙ

- Димюоний это связанное состояние пары ( $\mu^+\mu^-$ ).
- Система из 2 лептонов, описываемая КЭД
- Из 6 лептонных атомов ( $e^+e^-$ ), ( $\mu^+e^-$ ), ( $\mu^+\mu^-$ ), ( $\tau^+e^-$ ), ( $\tau^+\mu^-$ ), ( $\tau^+\tau^-$ ) наблюдались только два позитроний ( $e^+e^-$ ), мюоний ( $\mu^+e^-$ ).
- Компактен (большая  $m_\mu$ )  $R_{\mu\mu} \approx \frac{1}{100} R_{\mu e} \approx \frac{1}{200} R_{ee}$

# Зачем изучать димюоний?

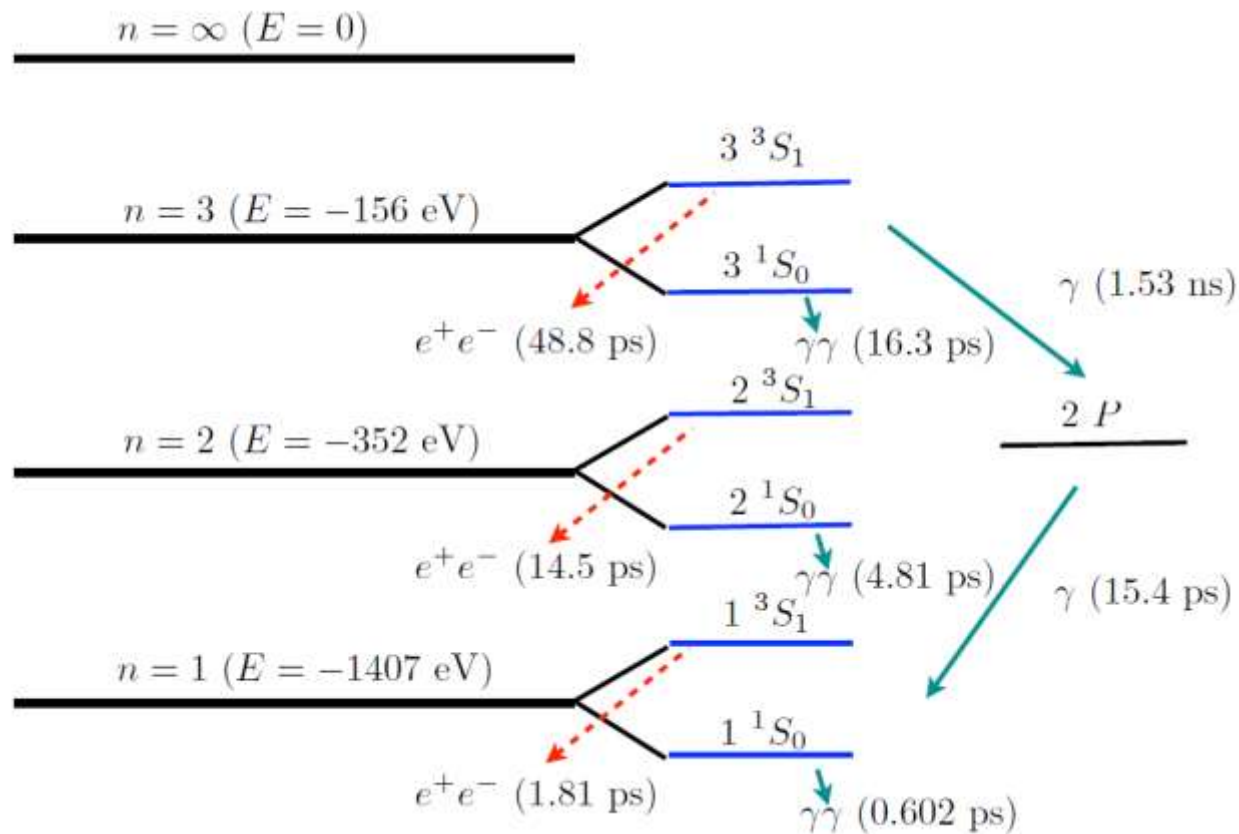
- Наблюдение димюония это открытие мирового уровня
- Тест КЭД  $\left( \text{мюоний} \neq \text{позитроний} \times \frac{m_e}{m_\mu} \right)$
- Экспериментальные трудности приведут к новым методикам.
- Исследование свойств мюона
  - Разница в  $3.5\sigma$  расчетом и измерением  $(g-2)_\mu$
  - Проблема радиуса протона/дейтрона
  - Указание на нарушение лептонной инвариантности в распадах В-мезонов (LHCb),  $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$  и  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$

# Публикации

- V.N.Baier and V.S.Synakh, Bimuonium production in electron-positron collisions, SOVIET PHYSICS JETP, **14**, № 5, 1962, pp.1122-1125
- S.J. Brodsky and R.F. Lebed. Production of the Smallest QED Atom: True Muonium ( $\mu^+\mu^-$ ). Phys. Rev. Lett., 102:213401, 2009
- H. Lamm and R.F. Lebed, True Muonium ( $\mu^+\mu^-$ ) on the Light Front, arXiv 1311.3245v3, 12 Nov 2014
- H. Lamm, True muonium: the atom that has it all, arXiv 1509.09306v1, 30 Sep 2016

# Свойства димюония

- Масса:  $M_{\mu\mu} = 2 \times 105.7 \text{ MeV} - 1.4 \text{ keV}$
- Время жизни мюона:  $\tau_{0,\mu\mu} = 2.2 \text{ мкс}$
- Время жизни димюония:  $\tau_{0,\mu\mu}(n \ ^3S_1) = n^3 \times 1.81 \text{ пс}$





# Сечение и фон

- Сечение рождения:

$$\sigma(1^3S_1, M_{\mu\mu}) \approx 0.2 \frac{\Gamma_{ee}}{\sigma_M} = 0.15 \div 7 \text{ nb}$$

- Фон: упругое рассеяние  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

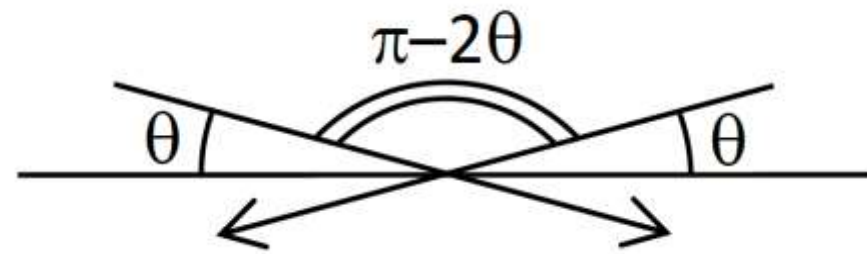
$$\sigma_{Bhabha} = 22000 \text{ nb}$$

- Подавление фона возможно при разделении мест распада и рождения

$$c\tau_{\mu\mu}(1^3S_1) > 540 \text{ мкм}$$

$\sigma_M$  – разрешение инвариантной массы

# Встреча под углом



- Инвариантная масса

$$\langle M \rangle = 2E_0 \cos \theta - \frac{E_0}{2} \cos \theta \left[ \sigma_\delta^2 + \sigma_{px}^2 + \sigma_{py}^2 + \frac{\cos 2\theta}{(\cos \theta)^2} \right]$$

- Разрешение инвариантной массы

$$\sigma_M^2 = 2E_0^2 \left[ \sigma_\delta^2 \cos^2 \theta + \sigma_{px}^2 \sin^2 \theta \right]$$

- Светимость ( $\varphi = \sigma_z \tan \theta / \sigma_x$ )

$$\mathcal{L}_0 = \frac{N_1 N_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y \sqrt{1 + \varphi^2}} f_0 N_b \approx \frac{N_1 N_2}{4\pi \sigma_y \sigma_z \tan \theta} f_0 N_b$$

- Производство

$$\dot{N}_{\mu\mu} \approx \frac{\Gamma_{\mu\mu} \sigma_{\mu\mu} \mathcal{L}_0}{2\sqrt{\pi} \sigma_M}$$

# Встреча под углом: фон

- Длина пути распада  $\mu^+ \mu^- (1^3S_1) \rightarrow e^+ e^-$

$$OA = l = c \tau_{0,\mu\mu} \beta_{\mu\mu} \gamma_{\mu\mu} = c \tau_{0,\mu\mu} \tan \theta$$

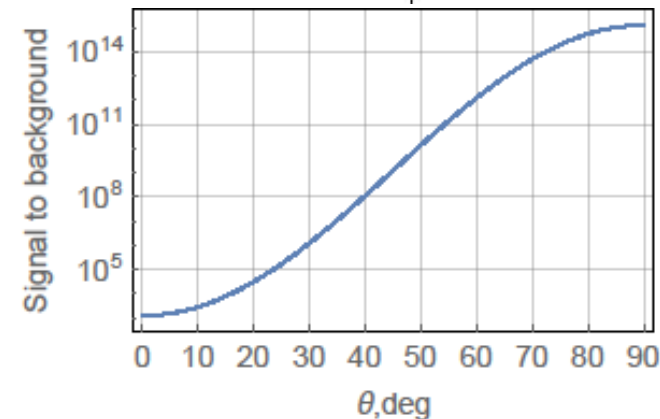
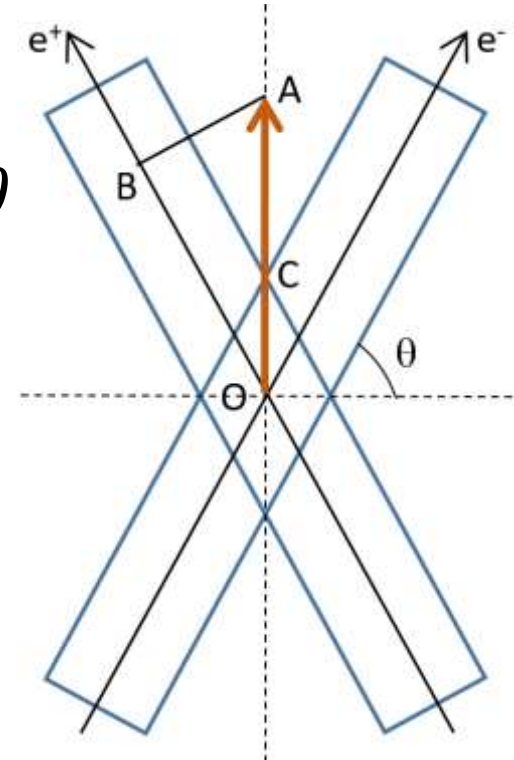
- Плотность частиц пучка

$$N_1 \propto \exp\left(-\frac{n_x^2}{2}\right)$$

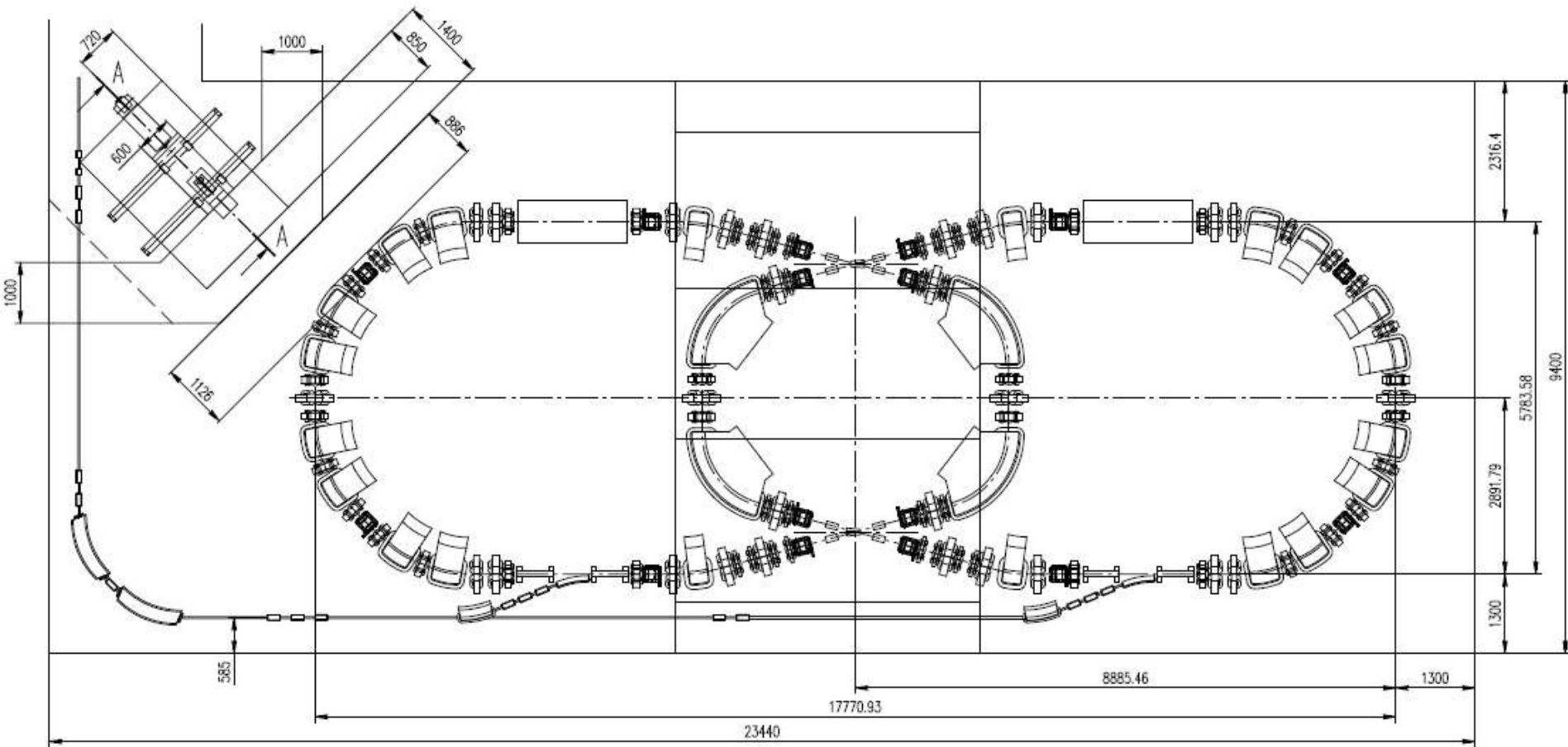
$$n_x = \frac{AB}{\sigma_x} = \frac{l \cos \theta}{\sigma_x} = \frac{c \tau_{0,\mu\mu}}{\sigma_x} \sin \theta$$

- Отношение сигнал шум

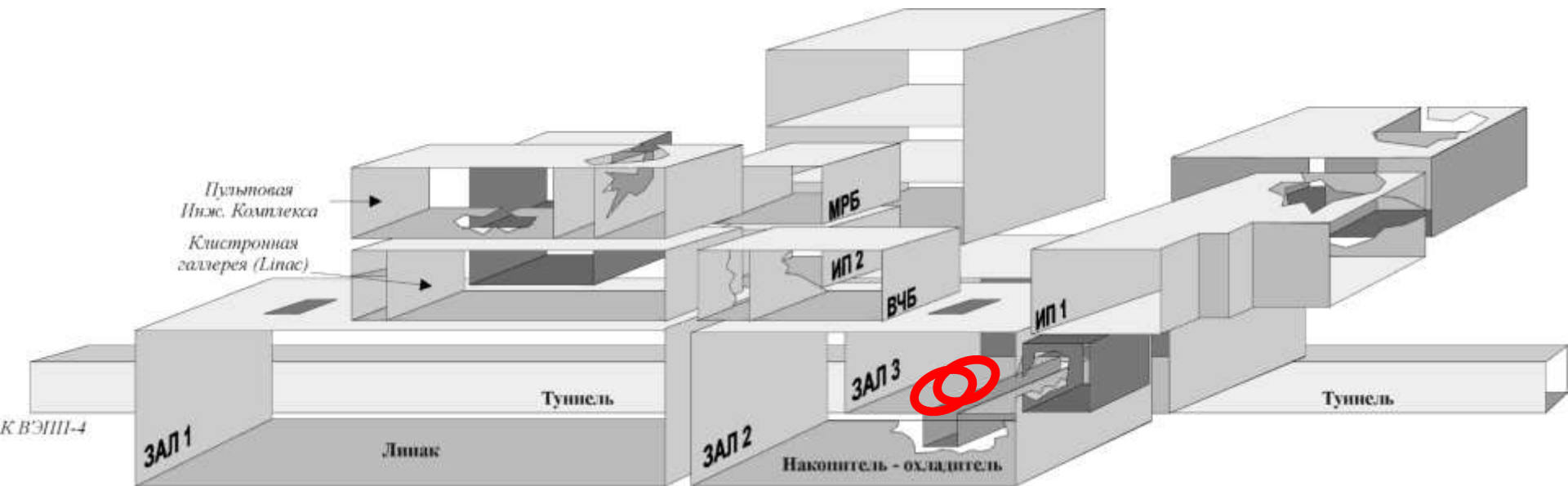
$$\frac{\dot{N}_{\mu\mu}}{\dot{N}_{ee}} \propto \frac{\exp\left[\frac{c^2 \tau_{0,\mu\mu}^2}{\sigma_x^2} \sin^2 \theta\right]}{\sqrt{\sigma_\delta^2 \cos^2 \theta + \sigma_{px}^2 \sin^2 \theta}}$$



# Расположение коллайдера



# Зал №3 комплекса ВЭПП-5



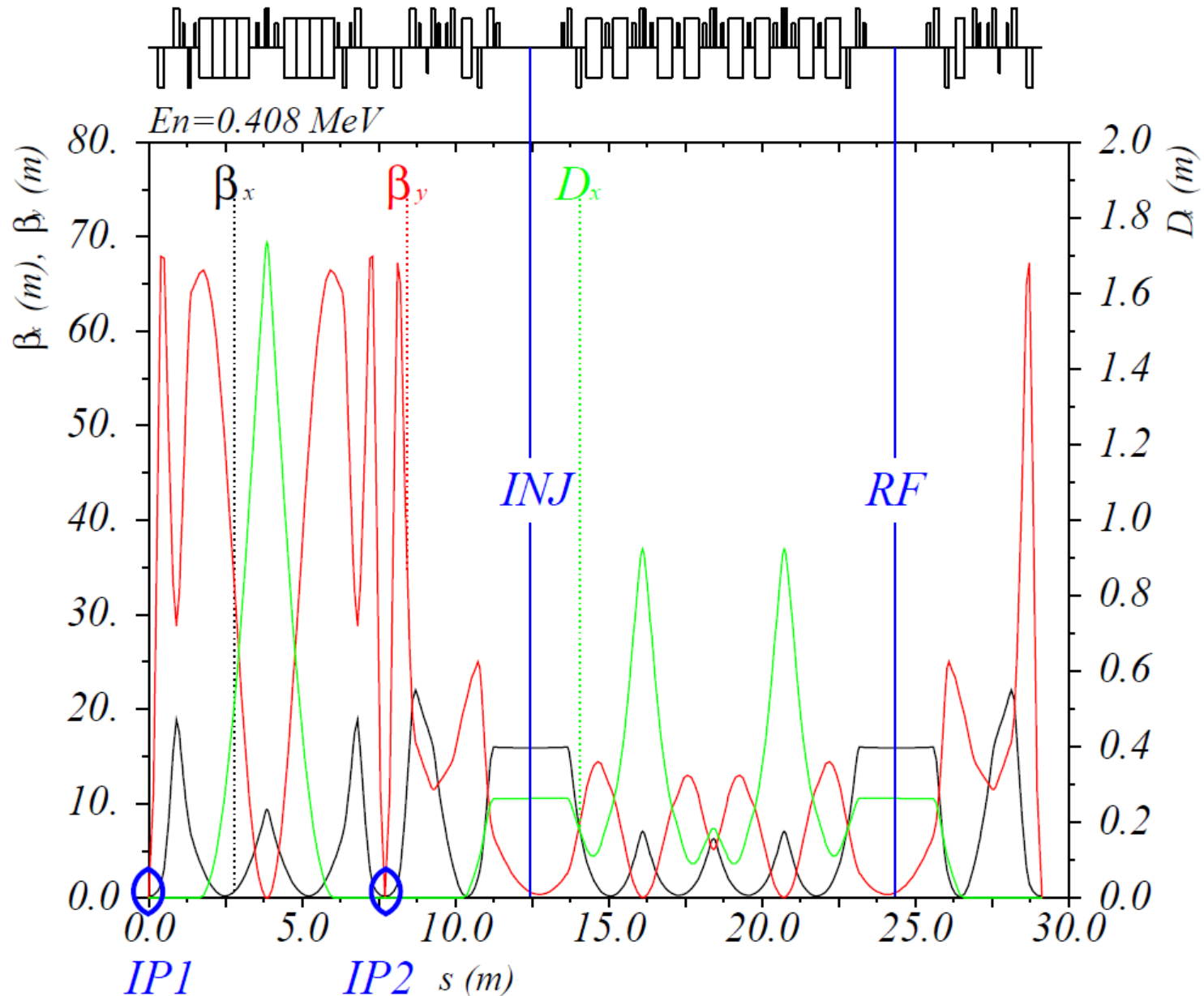
# Зал №3 комплекса ВЭПП-5



# Зал №3 комплекса ВЭПП-5



# Оптические функции





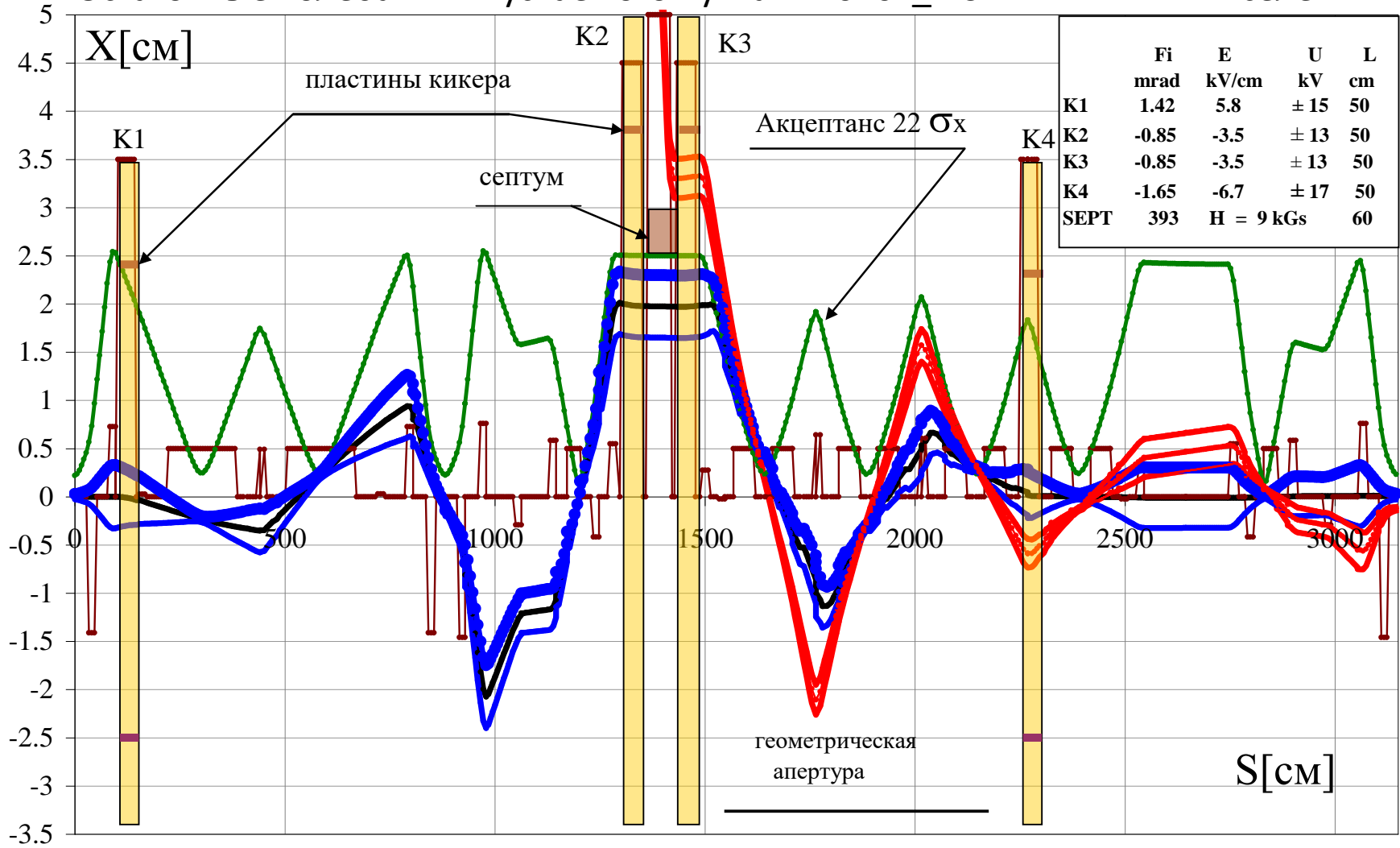
# Инжекция

Инжекция в медианной плоскости

Септум с токовым экраном

Остаточные колебания впускаемого пучка  $\sim 10 \cdot \sigma_x$ \_IBS

В.А. Киселев

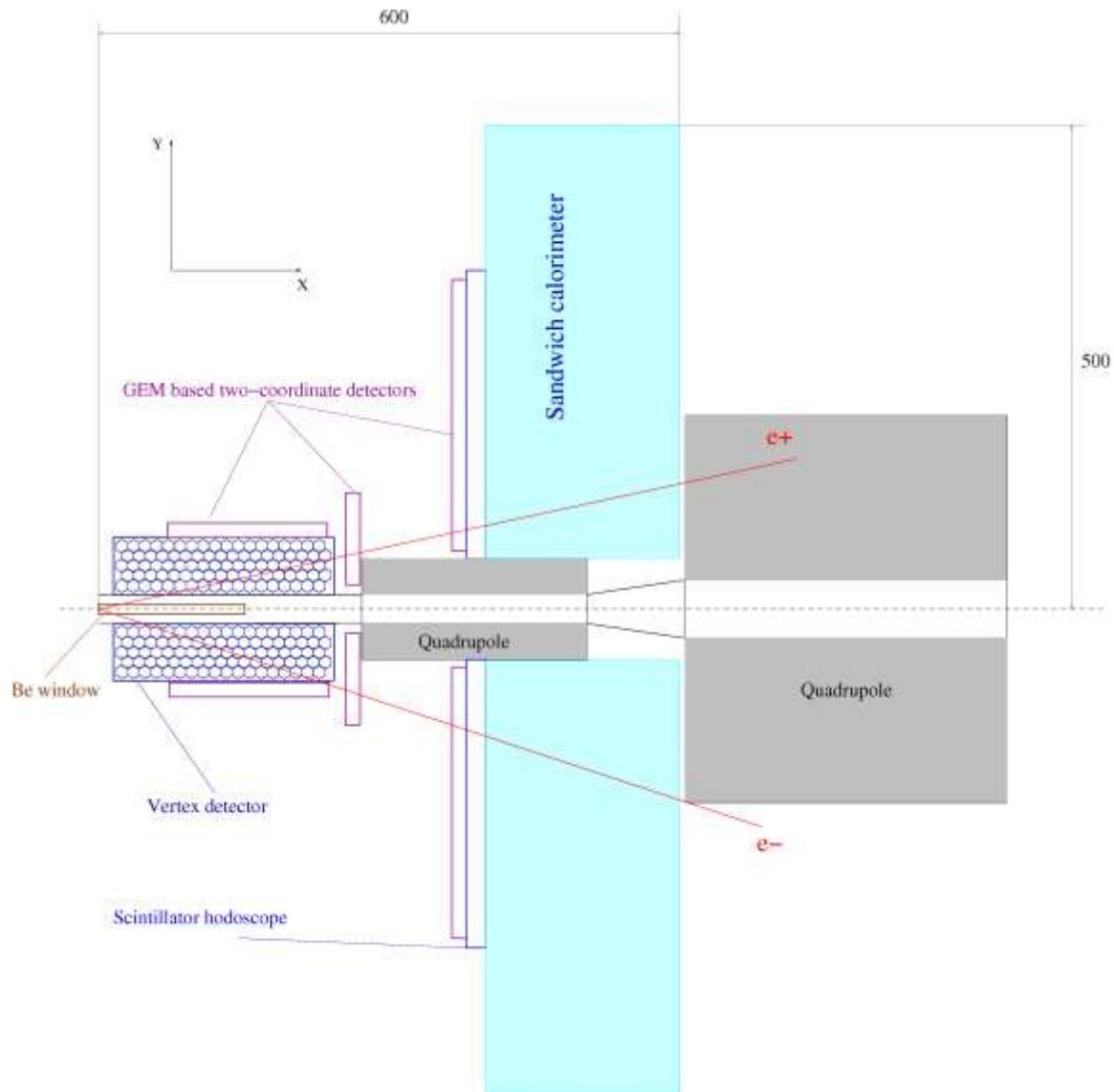




# Параметры для $(\mu^+ \mu^-)$

$\theta$ , град	75	$M$ , МэВ	211.315
$E_0$ , МэВ	408.225	$\sigma_M$ , кэВ	396
$\beta_x/\beta_y$ , см	15/0.2	$\frac{\sigma_x}{\sqrt{2} \cos \theta'}$ , МКМ	277
$\sigma_z$ , см	1.1		
$\varepsilon_x/\varepsilon_y$ , нм	68/0.34	$I(30 \text{ bunch})$ , А	1.7
$\sigma_\delta$	$8 \times 10^{-4}$	$\mathcal{L}$ , $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	$8.6 \times 10^{31}$
$\nu_s$	0.019	$\dot{N}(1S, l > 2 \text{ мм})$	4.7 час $^{-1}$
$\xi_x$	$1.6 \times 10^{-6}$		
$\xi_y$	$1.1 \times 10^{-3}$	$N_p(1 \text{ bunch})$	$3.5 \times 10^{10}$
$\xi_z$	$-2.1 \times 10^{-3}$	$N_{limit}$	$1.6 \times 10^{11}$

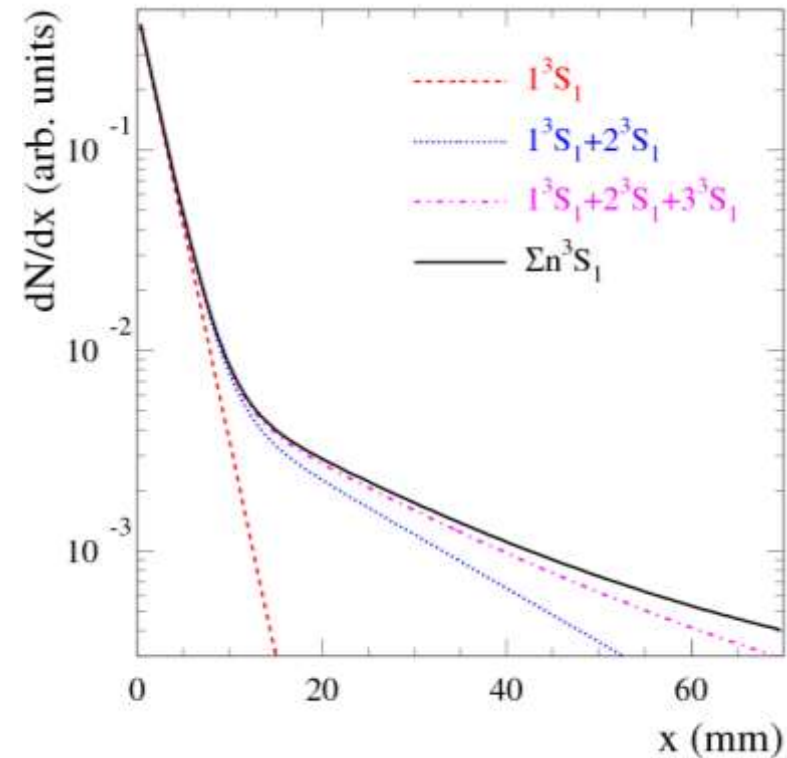
# Детектор



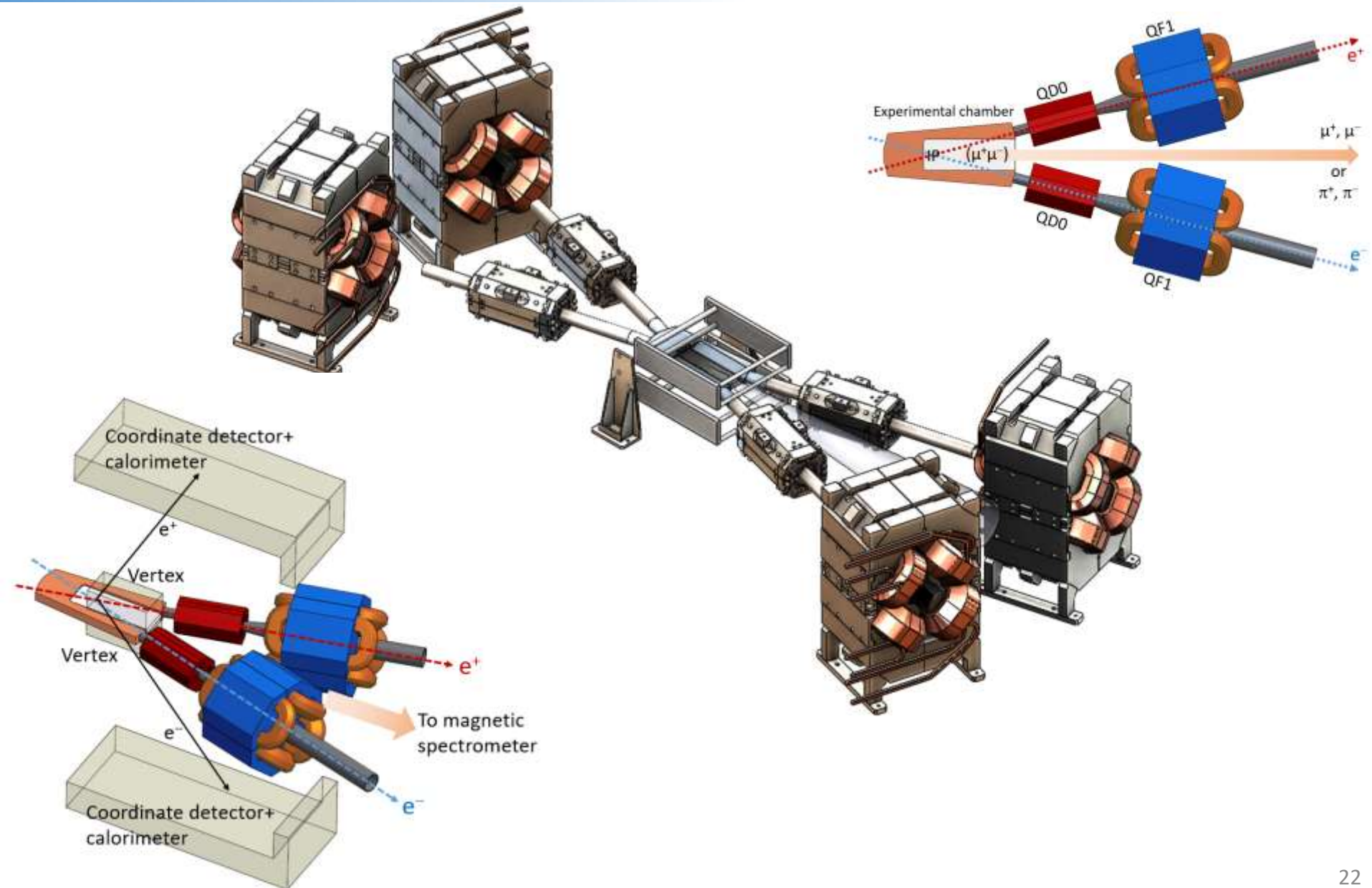
# Регистрация димюония

Событий		за 1 час	за 4 месяца
$x > 2 \text{ mm}$	1S/2S/3S	4.7/1.4/0.5	13k/4k/1k

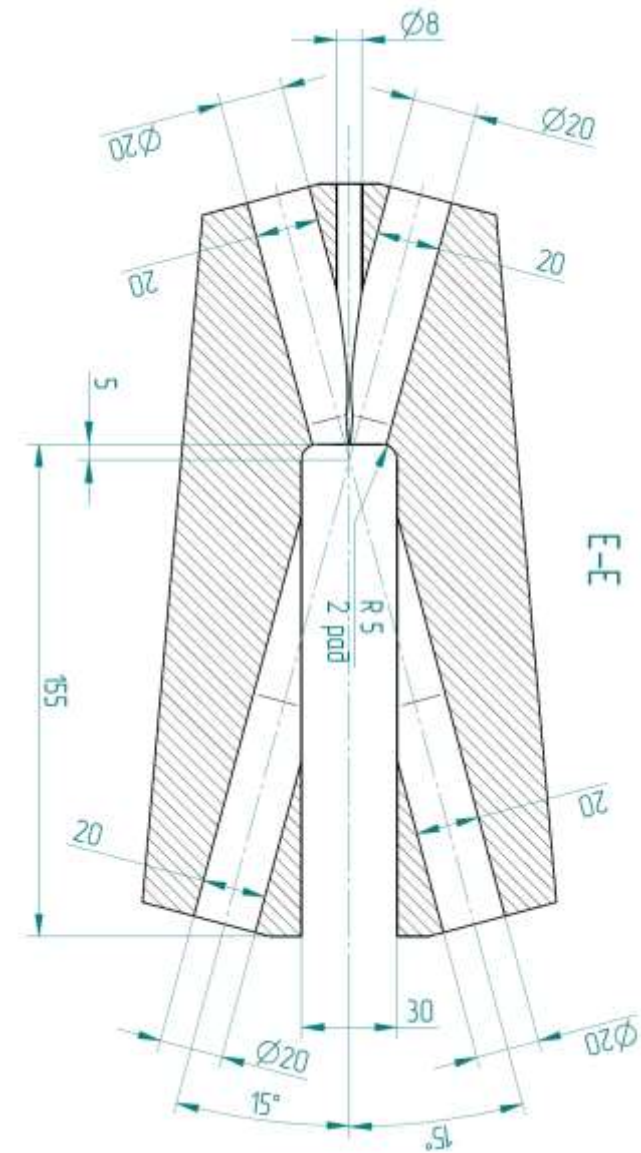
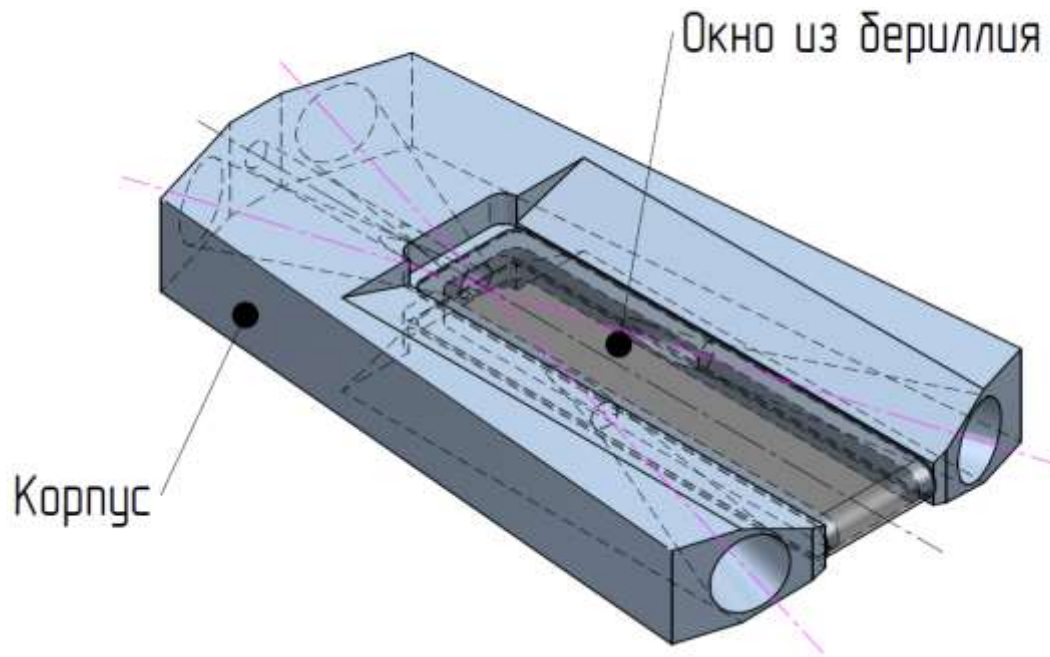
- Эффективность регистрации 15-30%
- Разрешение детектора по вершине  $150 \mu\text{m}$
- Результирующее разрешение  $\sigma_{vtx} = 320 \mu\text{m}$
- Для подавления упругого рассеяния требуется  $x_{vtx} > 6.25 \sigma_{vtx} = 2 \text{ mm}$



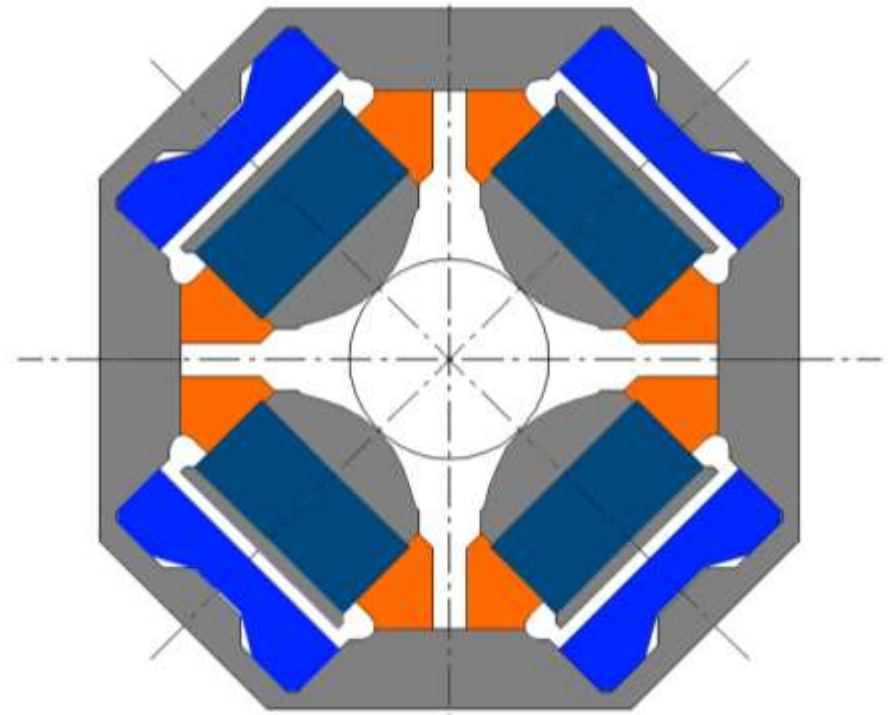
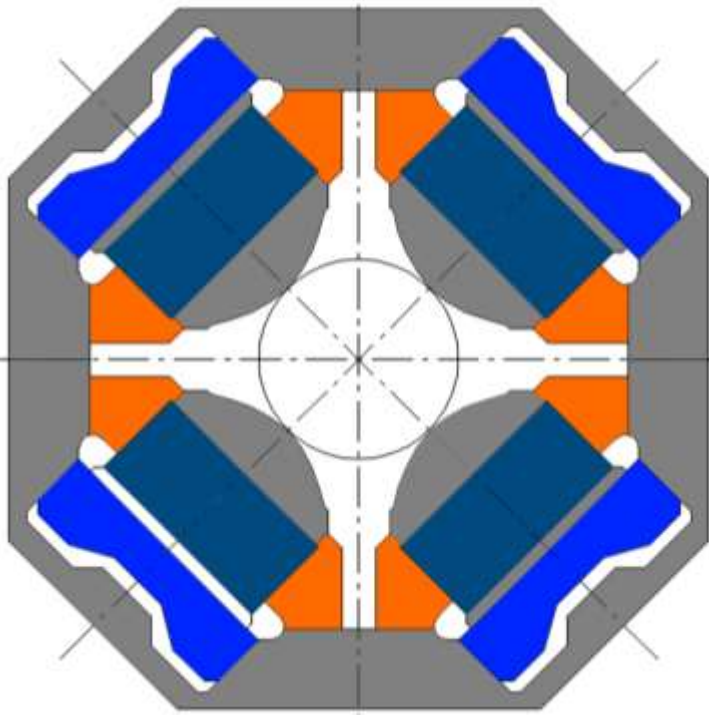
# Место встречи



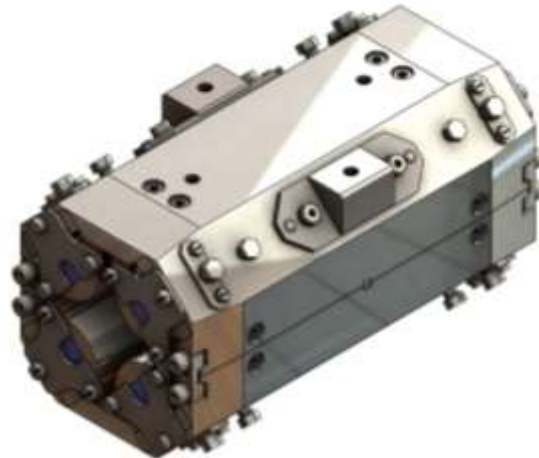
# Камера места встречи



# Квадрупольные линзы



-  Постоянный магнит
-  Ярмо, сталь ARMCO
-  Подвижная часть, сталь ARMCO
-  Медь





# Заключение

- Разработан проект двух-колечного коллайдера с большими токами и интенсивностями сгустков, на низкую энергию
- Идет проектирование ключевых систем и элементов
- Коллайдер оптимизирован для размещения в зале фи фабрики
- Существующий ИК удовлетворяет требованиям для инъекции в новый коллайдер
- Ориентировочная стоимость коллайдера ~500 млн рублей; срок изготовления 3 года
- Проект интересен как для физики и техники ускорителей, так и для физики частиц