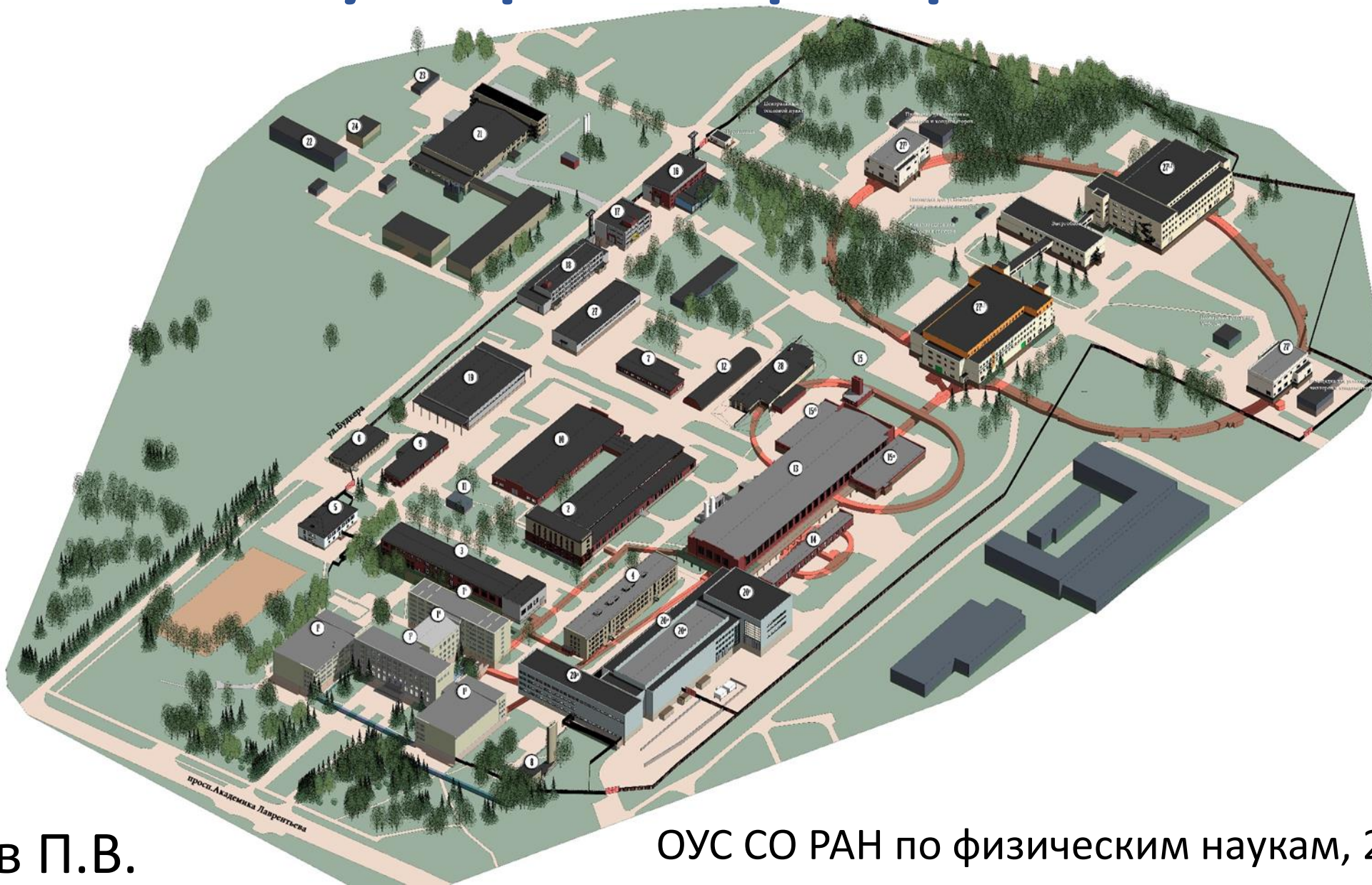


Супер С-т фабрика



Логачев П.В.

ОУС СО РАН по физическим наукам, 20.12.2017

Физика элементарных частиц

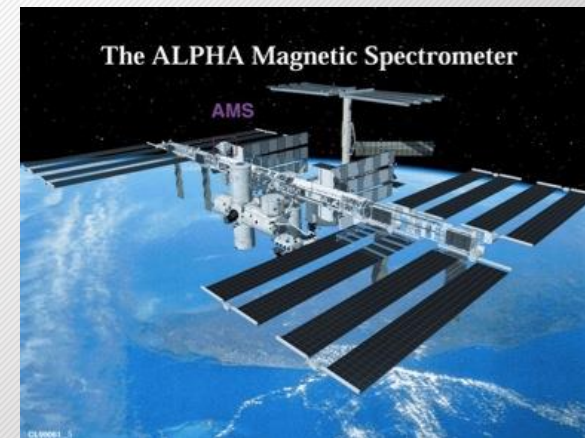
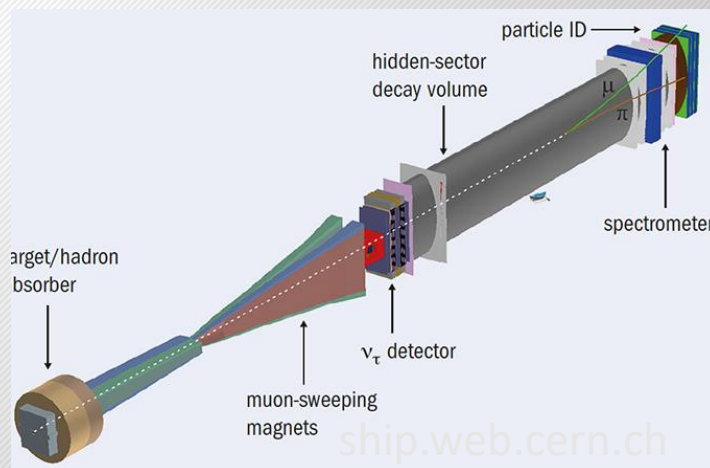
- Динамично развивается, генерирует новые знания и технологии
- Имеет одно из самых больших, мощных и хорошо организованных научных сообществ в мире, которое объединяет самые сложные на сегодняшний день эксперименты и теории.
- Является основой очень перспективных мультидисциплинарных направлений (*синхротронное излучение, лазеры на свободных электронах, ядерная медицина, супервычисления и большие данные*)
- Лидирует в поиске новых фундаментальных законов природы.

- Регистрация космических частиц
- Эксперименты с фиксированной мишенью
- Коллайдеры: линейные, циклические
- Орбитальные эксперименты
- Детекторы нейтрино

Эксперименты в физике высоких энергий

Ключевые параметры

- Тип взаимодействующих частиц
- Энергия взаимодействия



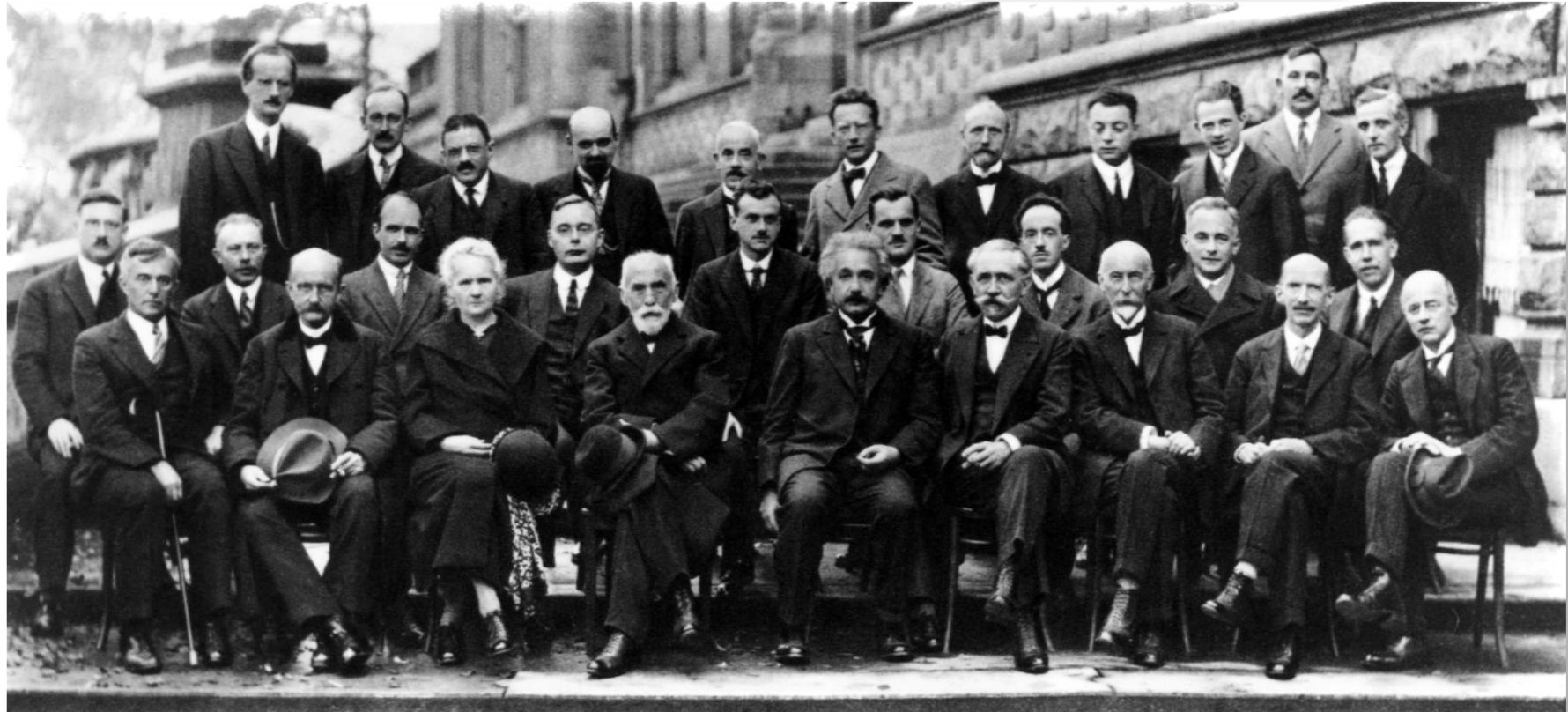
Мы все знаем?

... представляется вероятным, что большинство основополагающих принципов были твёрдо установлены ... развитие физической науки следует искать в шестых знаках после запятой
(Альберт Майкельсон, 1894)

Сольвеевский конгресс 1927 г.
Электроны и фотоны



wikimedia.org

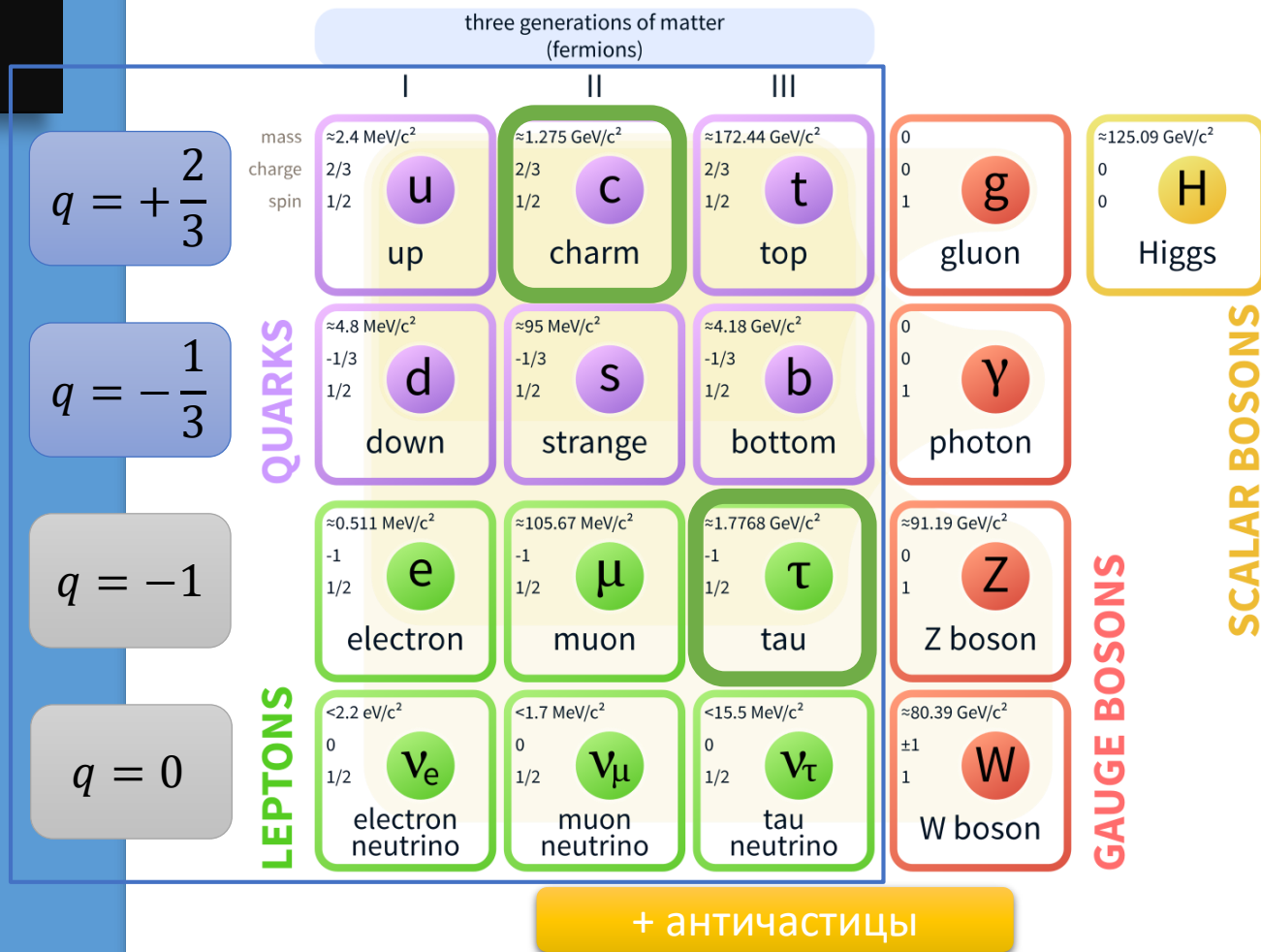


wikimedia.org

Стандартная модель (СМ)

- Характерные масштабы физики элементарных частиц
 - $l < 10^{-15}$ м
 - $\tau \sim 10^{-24} \div 10^{-8}$ с
 - $E > 1$ ГэВ
- СМ описывает электрослабое и сильное взаимодействия средствами квантовой теории поля
- СМ – самая успешная физическая теория
 - $a_e^{\text{exp}} = 0.001\ 159\ 652\ 180\ 73(28)$
 - $a_e^{\text{SM}} = 0.001\ 159\ 652\ 181\ 64(76)$
- СМ согласуется с огромным количеством экспериментальных результатов

Standard Model of Elementary Particles



Проблема иерархий

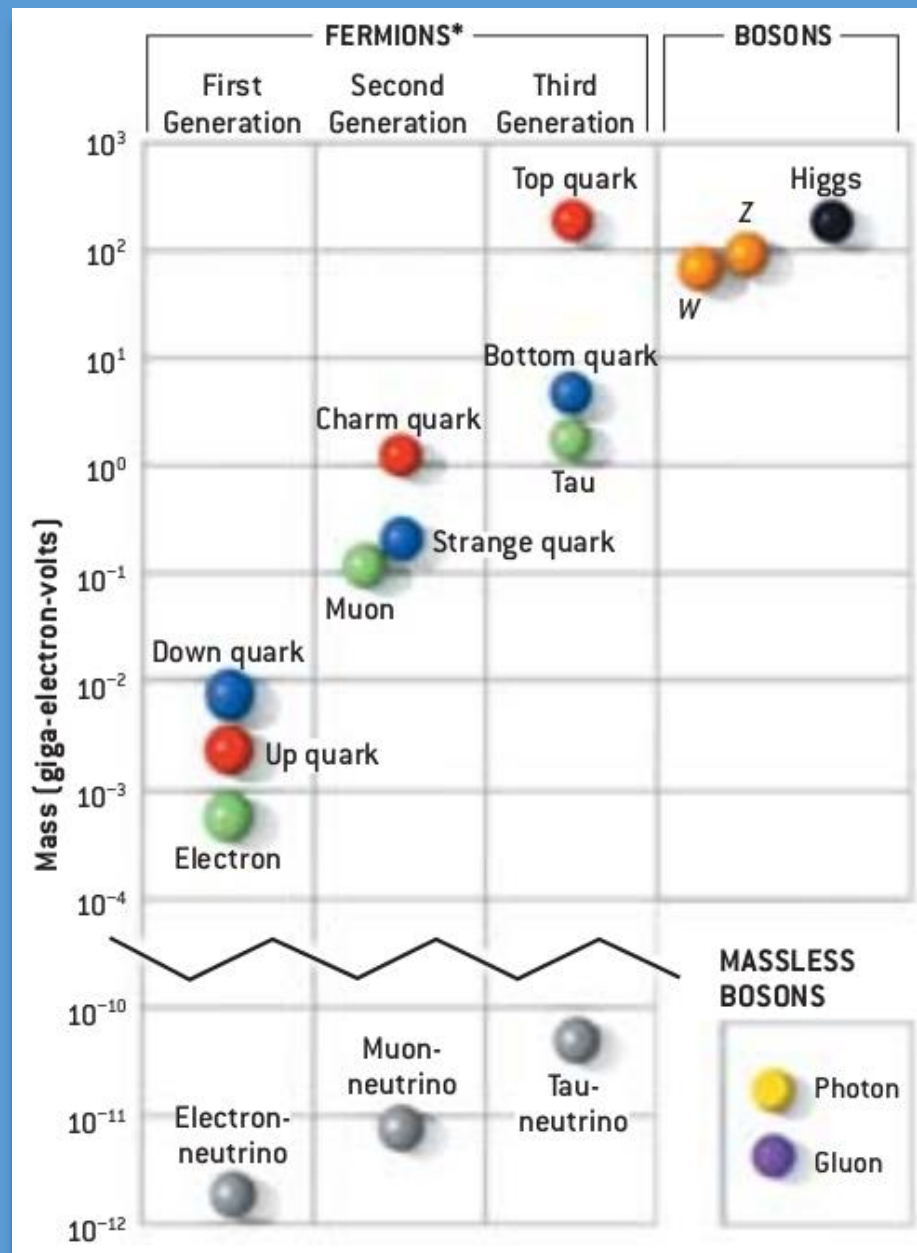
Константы взаимодействий

- Сильное: 1
- Электромагнитное: $\frac{1}{137}$
- Слабое: 10^{-6}
- Гравитационное: 10^{-38}

Есть ли причина для такого широкого диапазона?

$$E_P = \sqrt{\frac{hc^5}{G}} \approx 1.22 \times 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Нет ничего интересного между электрослабым ($\sim 10^3$ ГэВ) и планковским масштабами?



Gordon Kane, Scientific American, May 2003

Тонкая настройка Вселенной

Трехмерность пространства

Законы Кулона и Всемирного тяготения

$$F \sim \frac{1}{r^{d-1}}$$

При $d > 3$ орбиты планет атомные орбитали неустойчивы

Массы e, p, n

- Уменьшение m_n на 0.2% приведет к нестабильности протона $p^+ \rightarrow ne^+ \nu_e$
- Увеличение m_n на $\sim 0.2\%$ приведет к нестабильности ядер (кроме водорода)

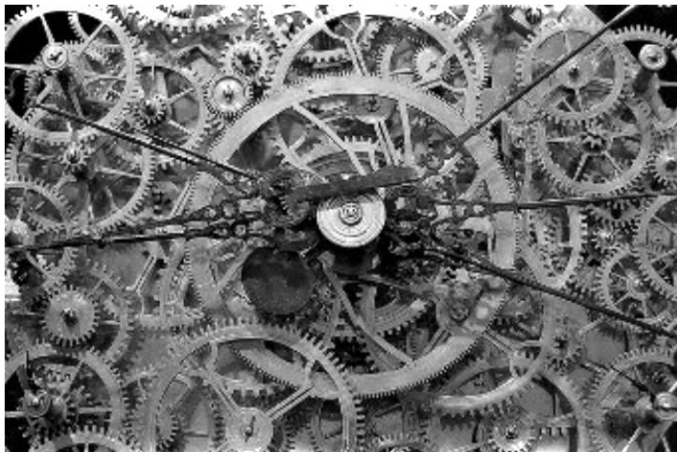
Плотность материи Вселенной

- $\rho < \rho_c$ – открытая Вселенная с отрицательной кривизной
- $\rho = \rho_c$ – открытая плоская Вселенная
- $\rho > \rho_c$ – закрытая Вселенная с положительной кривизной



Тонкая настройка Вселенной

- Трехмерность пространства
- Соотношение масс e , p и n
- Энергетическая эффективность синтеза водорода
- Плотность материи во Вселенной
- ...



blogos.org

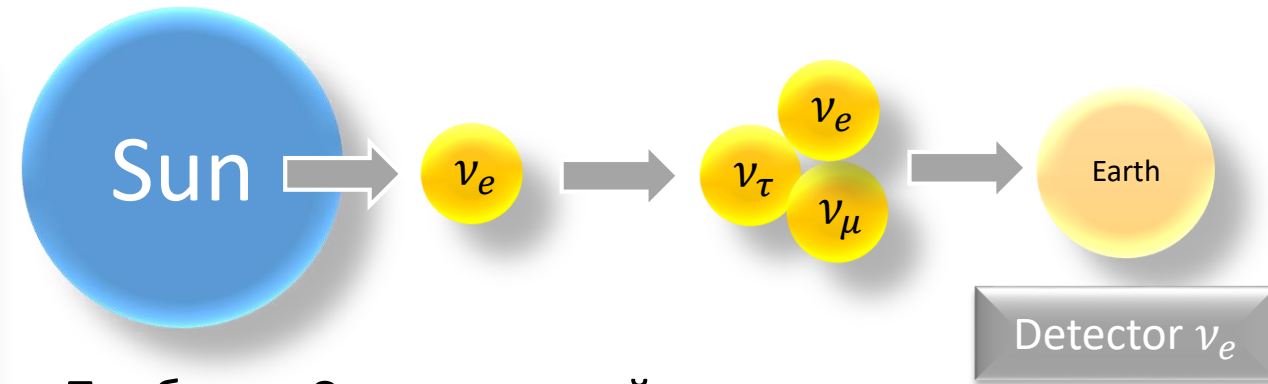
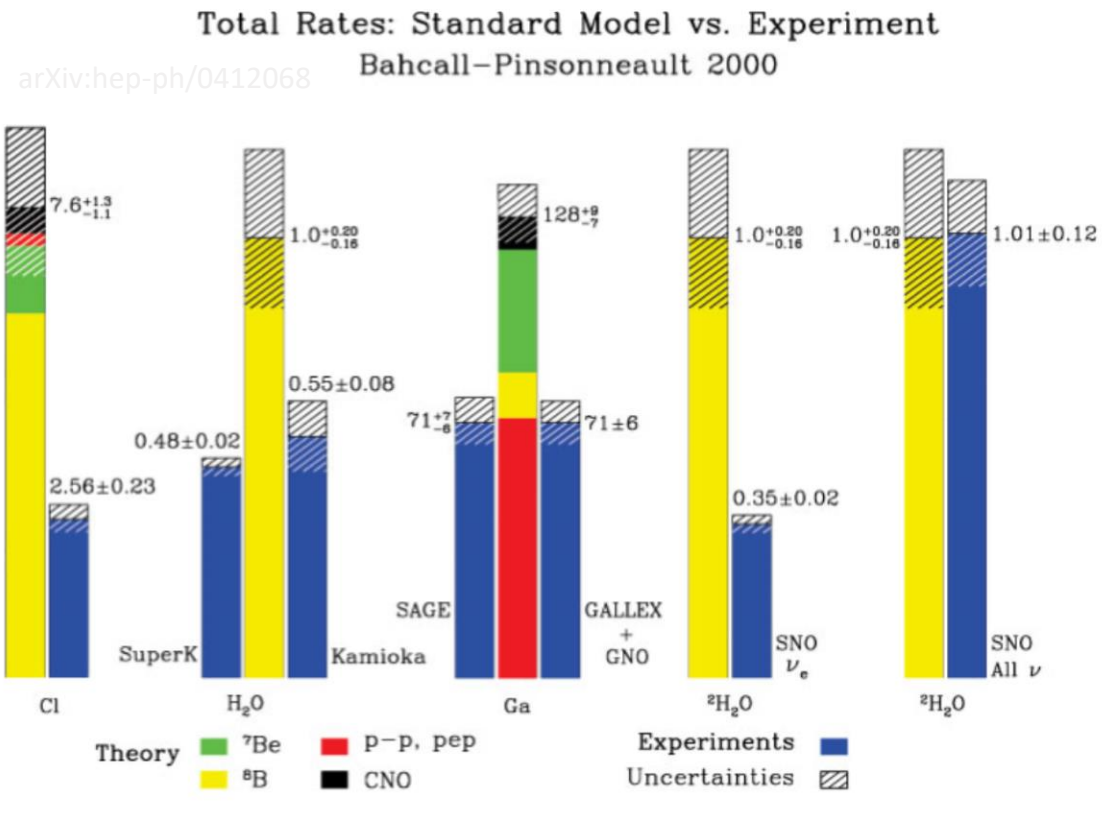
Научные законы, в том виде, в котором они нам известны, содержат множество фундаментальных параметров, таких как величина электрического заряда электрона и отношение масс протона и электрона. ... Удивительный факт состоит в том, что эти числа, похоже, очень точно подобраны так, чтобы сделать возможным развитие жизни.



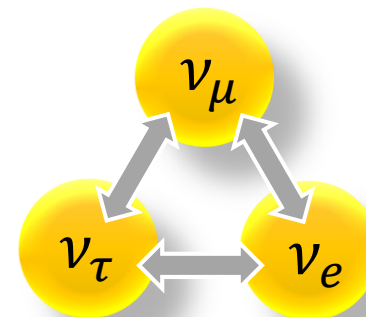
independent.co.uk

- Что происходит?
 - Разумный замысел?
 - Мы живем в одной из множества (10^{500}) Вселенных?
 - ???

Осцилляции нейтрино

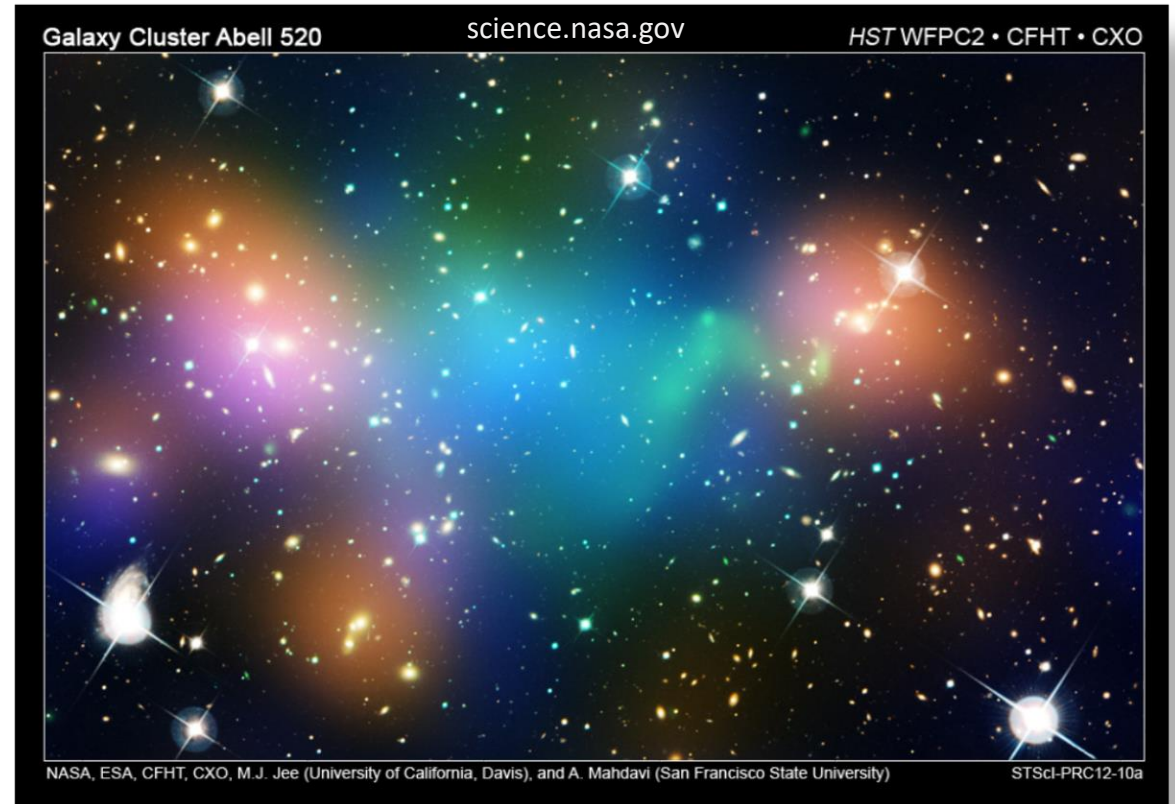
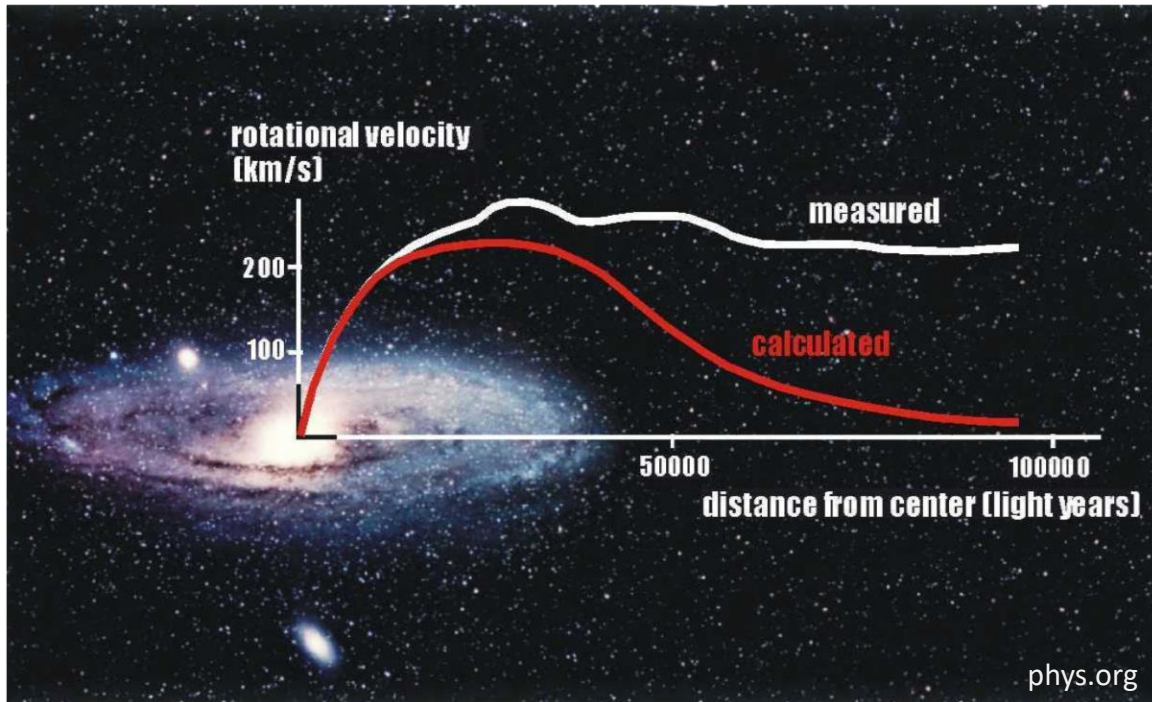


- Проблема Солнечных нейтрино
 - Мы не понимаем как устроено Солнце?
 - Мы чего-то не знаем про нейтрино?

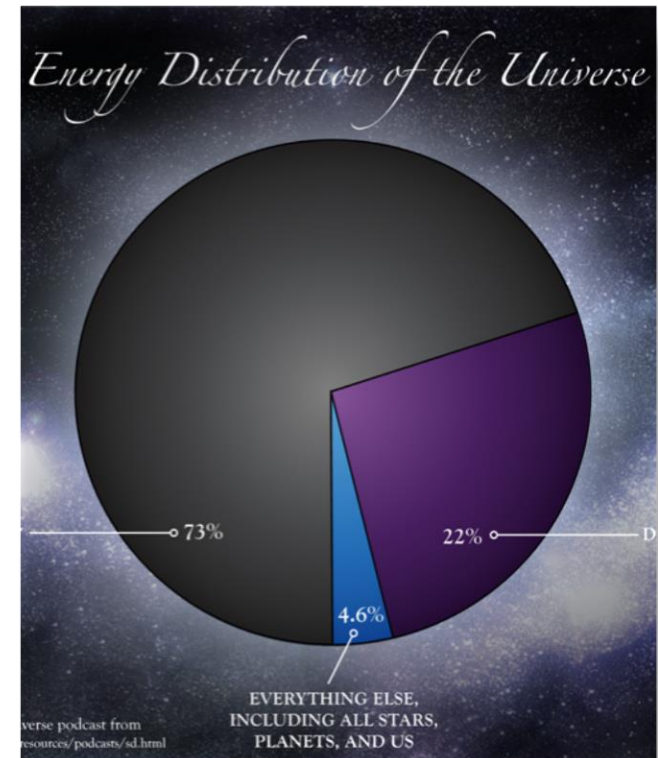
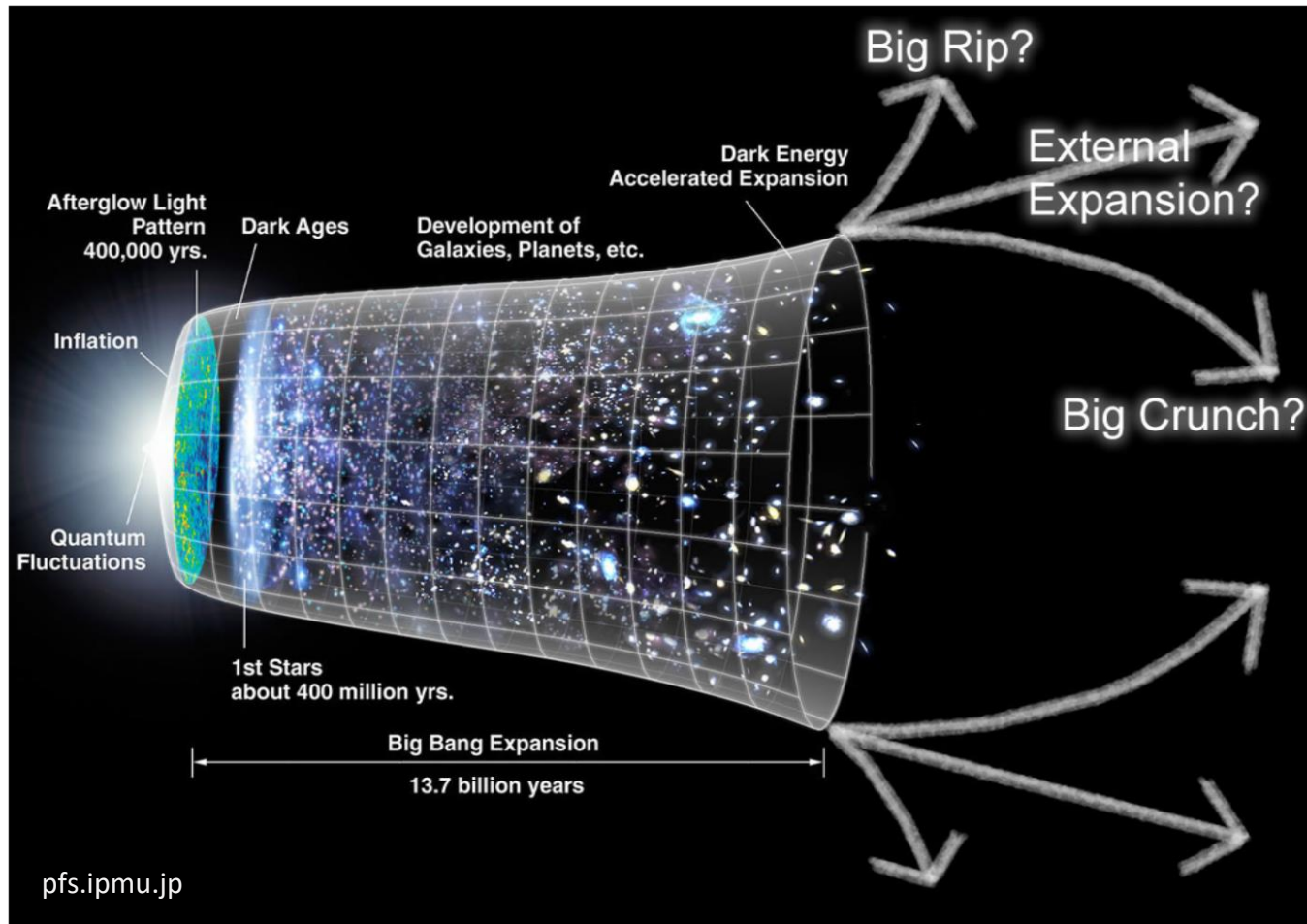


$$\mu \rightarrow e \nu_\mu \bar{\nu}_e$$

Темная материя



Темная энергия



Описание эволюции Вселенной тесно связано с пониманием физики частиц

Еще вопросы



<http://www.learningtech.com.sg>

- «Тонкая настройка Вселенной»
- Почему электрический заряд квантован?
- Почему кварки имеют электрический заряд $+\frac{2}{3}$ и $-\frac{1}{3}$?
- Почему есть три поколения лептонов и кварков?
- Почему вокруг нас почти нет антиматерии?
- Почему только слабое взаимодействие различает материю и антиматерию?
- Существует ли теория, которая единообразно описывает все взаимодействия, включая гравитацию?

Действующие коллайдеры

В ИЯФе работают
два из четырех
действующих e^+e^-
коллайдеров



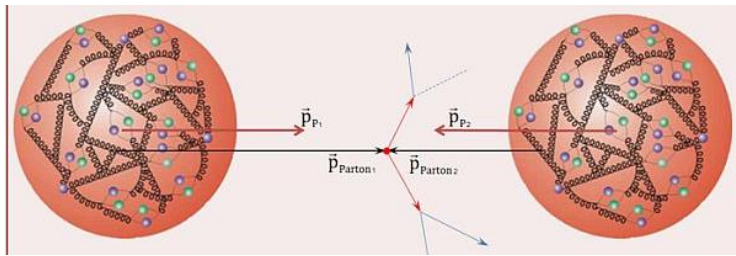
Высокая энергия vs. Высокая точность

Встречные pp

- Рождение состояний с любыми квантовыми числами
- Малые потери на синхротронное излучение → высокая энергия

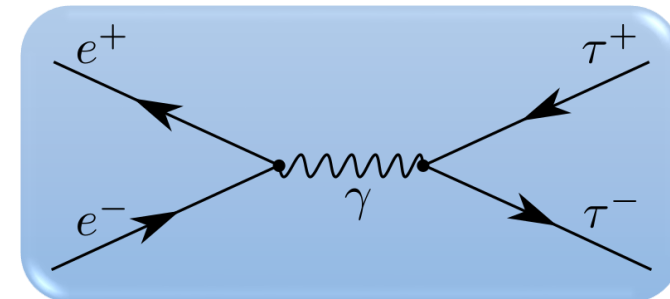
$$P_{\perp} \sim \frac{(\beta\gamma)^4}{\rho^2}$$

- Прямое рождение новых частиц



Встречные e^+e^-

- Ясное начальное состояние
 - (E, \vec{p})
 - $J^{PC} = 1^{--}$
- Низкая множественность
- Прецизионные измерения свойств частиц
- Непрямой поиск новой физики

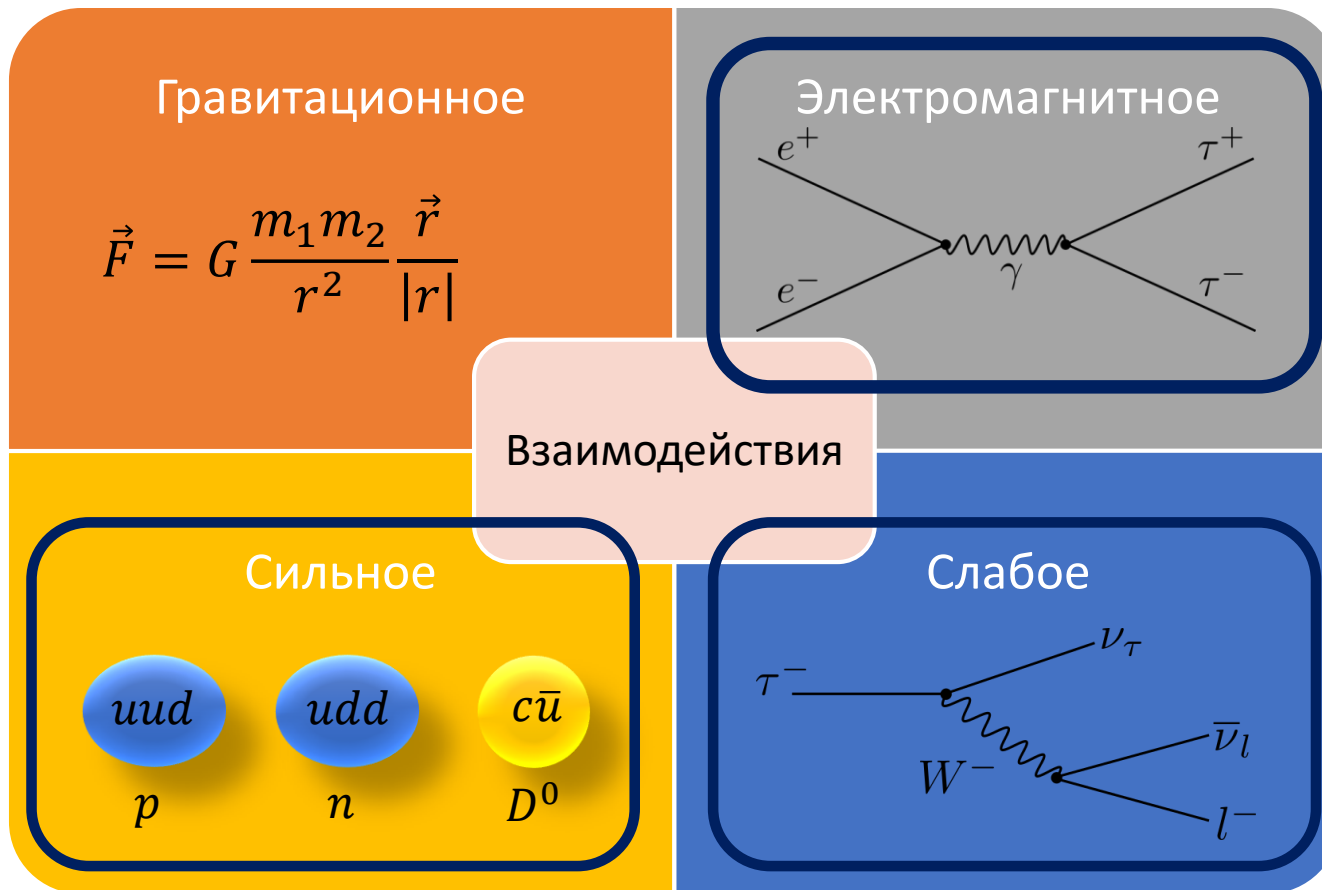




Национальный выбор

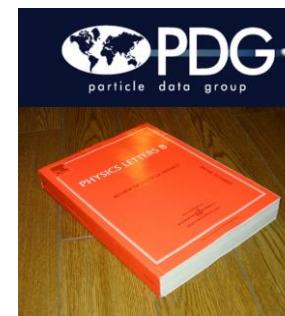
- ***Только участие в зарубежных экспериментах, без собственных установок и базы:*** финансирование чужой науки, без возвратного эффекта в национальную экономику, технологии и образование, потеря национальной независимости в этих сферах.
- ***Реализация собственных проектов самого высокого мирового уровня привлекает зарубежные знания, технологии и ресурсы в страну, делая ее лидером, укрепляет независимость.***

Фундаментальные взаимодействия



Супер c - τ фабрика позволяет выполнять прецизионное изучение электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий

Элементарные частицы

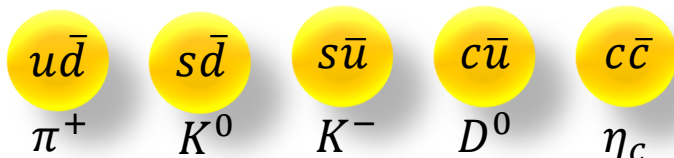


<http://pdg.lbl.gov/>

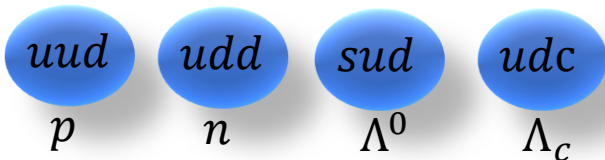
«Зоопарк»

- Фундаментальные частицы
- Адроны

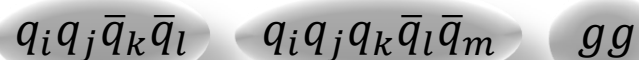
Мезоны ($q_i \bar{q}_j$)



Барионы ($q_i q_j q_k$)

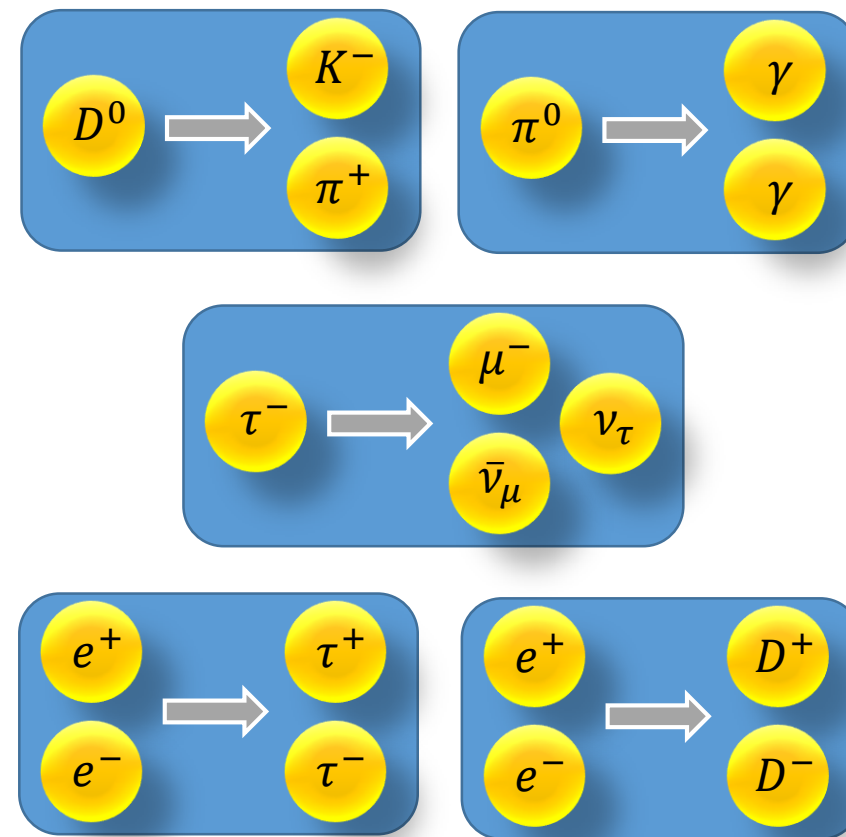


- «Экзотика»



Рождение и распад частиц

- Почти все частицы нестабильны
 - $\tau(\pi^0) \approx 8 \times 10^{-17}$ с ЭМ
 - $\tau(\pi^+) \approx 2.6 \times 10^{-8}$ с Слабое
 - $\tau(\tau^-) \approx 3 \times 10^{-12}$ с Слабое
 - $\tau(D^+) \approx 10^{-12}$ с Слабое
 - $\tau(\rho^0) \sim 10^{-24}$ с Сильное
- Тяжелые частицы могут рождаться в столкновении более лёгких
- Законы сохранения
 - Энергии-импульса
 - Электрического заряда
 - Лептонного числа
 - ...



Физическая программа Супер c - τ фабрики

ФАНО России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Г.И. Будера
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Супер Чарм – Тау фабрика

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
(физическая программа, детектор)

Новосибирск – 2017

ctd.inp.nsk.su

Чармоний $c\bar{c}$

- Спектроскопия
- Распады
- Изучение легких состояний в распадах J/ψ

$D^0(c\bar{u}), D^+(c\bar{d}), D_s(c\bar{s})$ мезоны

- Спектроскопия
- Распады
- Осцилляции
- CP нарушение

Очарованные барионы $\Lambda_c^+(udc)$

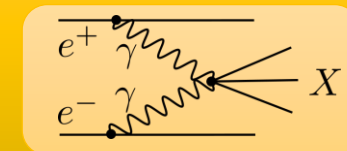
- Распады
- CP нарушение

τ лептон

- Распады
- CP нарушение
- Поиск несохранения лептонного числа
- Проверка лептонной универсальности

Двухфотонная физика

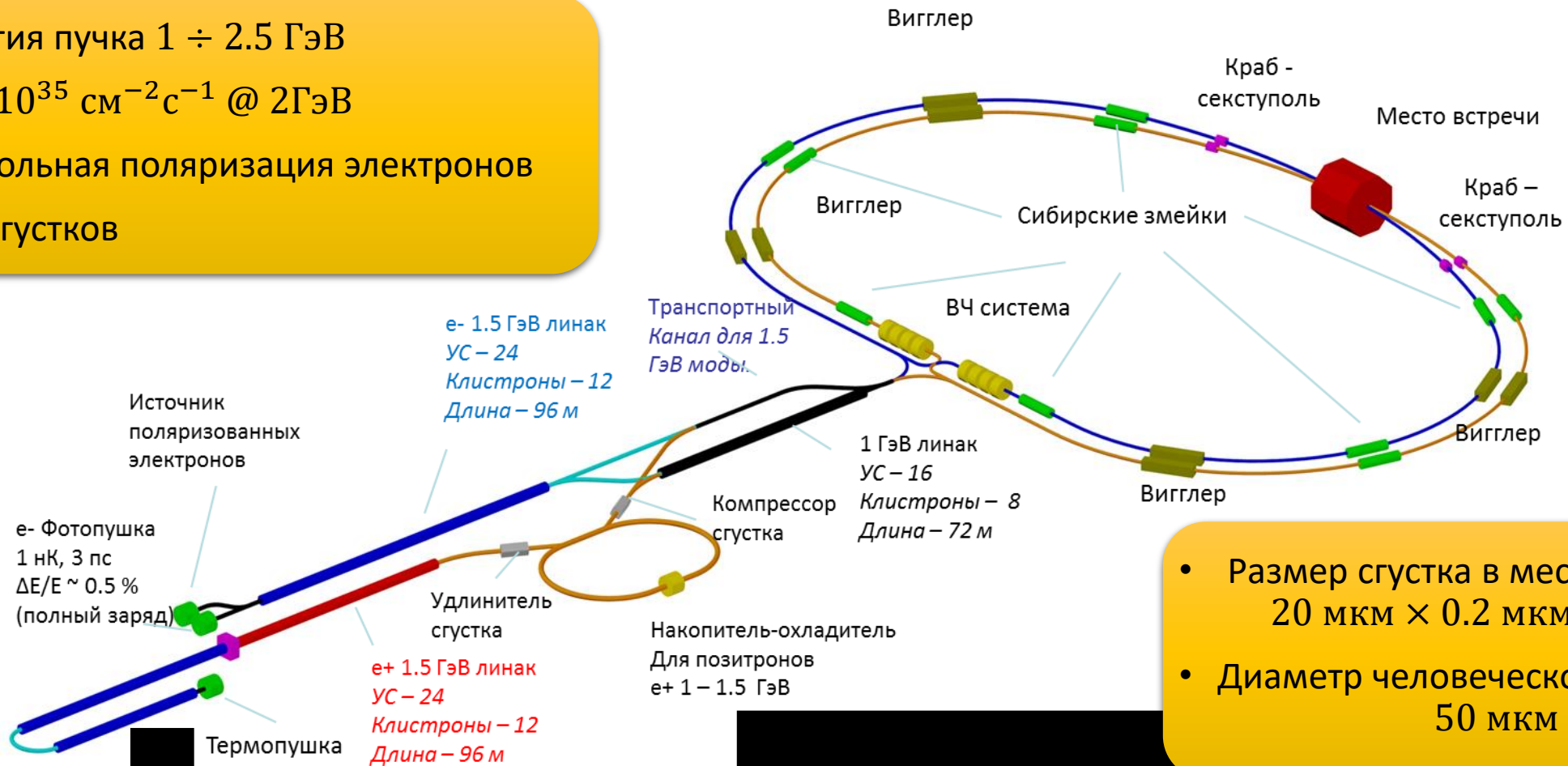
- Поиск C -четных резонансов
- $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons})$



$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$$

Супер $c\text{-}\tau$ фабрика

- Энергия пучка 1 ÷ 2.5 ГэВ
- $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ @ 2ГэВ
- Продольная поляризация электронов
- 406 сгустков

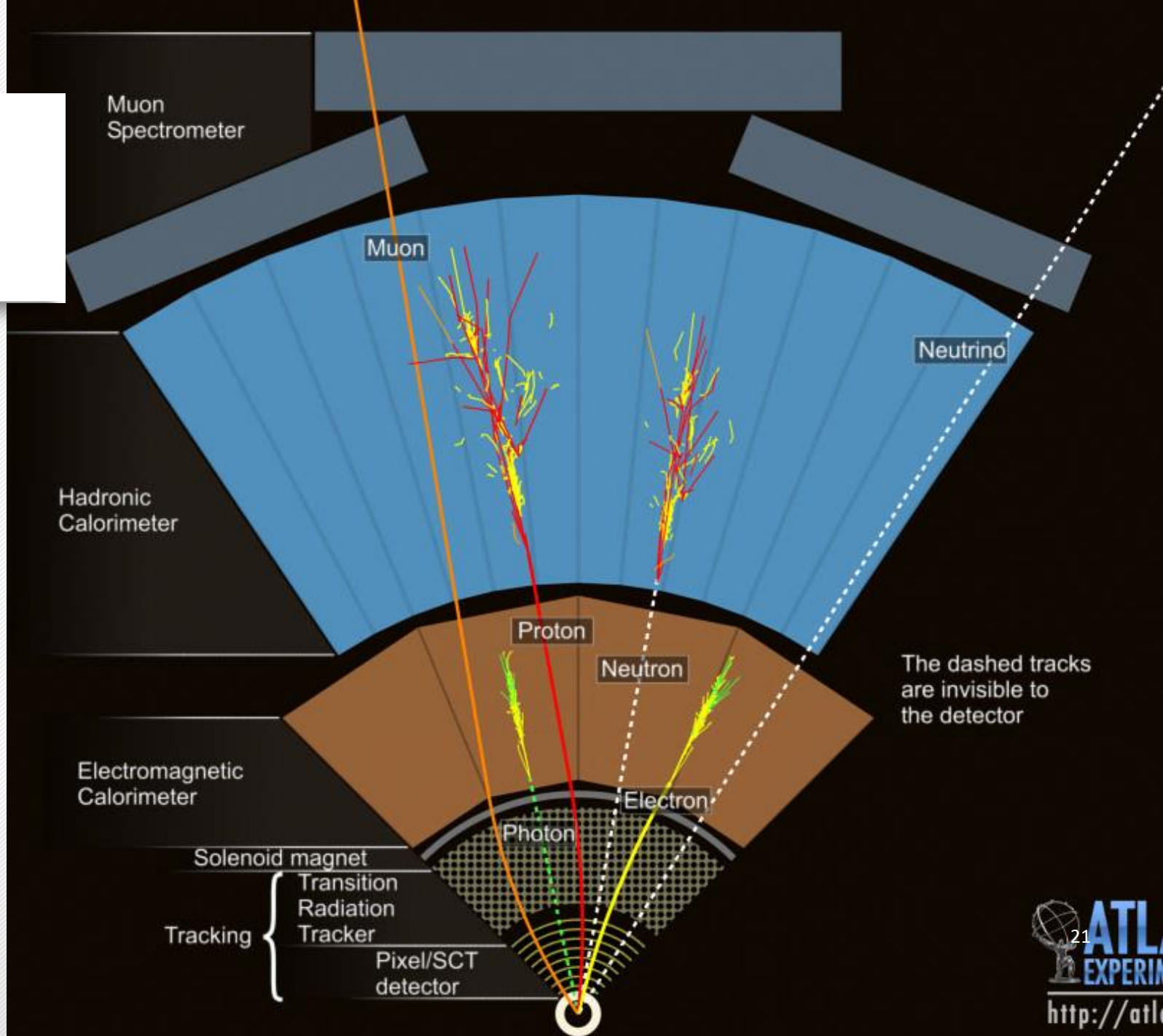
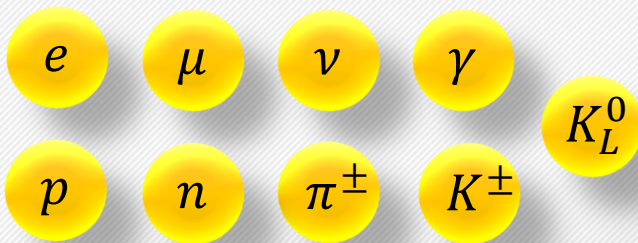


- Размер сгустка в месте встречи
20 мкм × 0.2 мкм × 10 мм
- Диаметр человеческого волоса
50 мкм

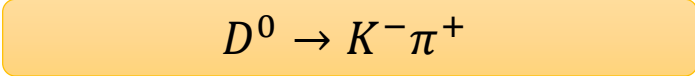
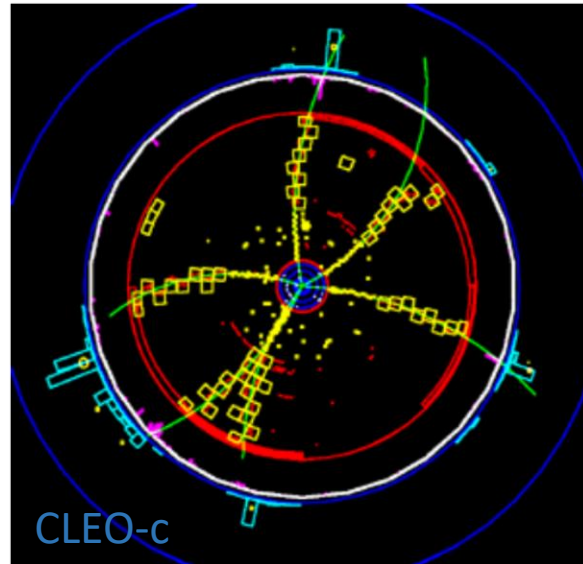
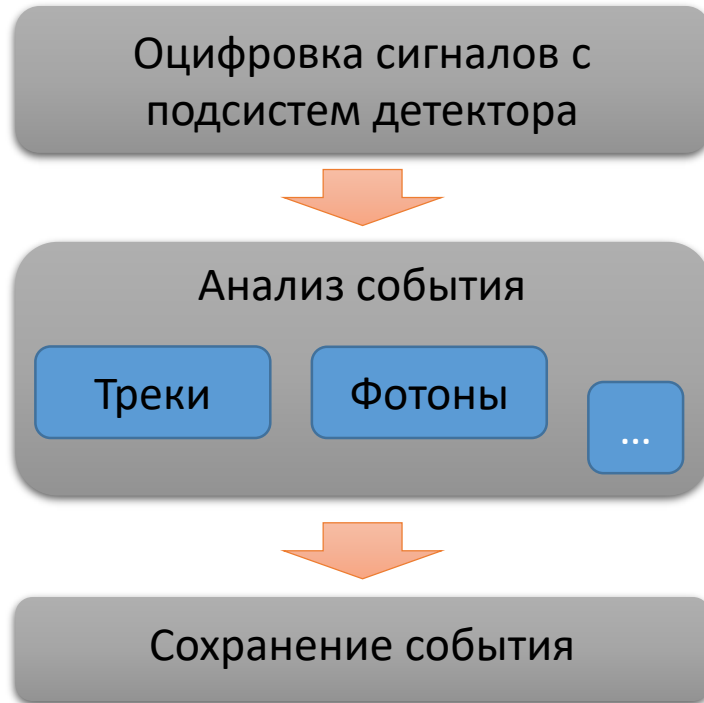


Регистрация элементарных частиц

- Взаимодействие частиц с веществом
 - Ионизация в газе
 - Ионизация в твердом теле
 - Черенковское излучение
 - Электромагнитные и адронные ливни
 - ...
- Типы измерений
 - Измерение импульса (в магнитном поле)
 - Измерение энергии
 - Измерение времени пролета
 - Измерение координат траектории
- Частицы, долетающие до детектора



Реконструкция событий



- Трек с импульсом \mathbf{p}_K , идентифицированный как K^-
- Трек с импульсом \mathbf{p}_π , идентифицированный как π^+
- Точка пересечения треков – вершина распада D^0 мезона
- Инвариантная масса близка к массе D^0 мезона

$$m_{K\pi} = \sqrt{(E_K + E_\pi)^2 - (\vec{p}_K + \vec{p}_\pi)^2}$$

Супер c - τ

- Количество записанных событий: 2×10^{12}
- Общий объем данных: 100 ПБ (пета – 10^{15})

Big Data

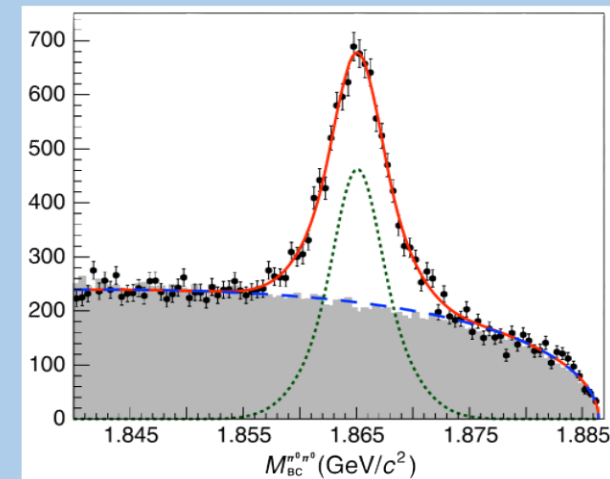
Анализ данных

Типичные задачи

- Задача классификации
 - Разделение сигнала и фона
- Задача регрессии
 - Описание формы распределений
- Проверка статистических гипотез
 - Гипотеза (не)нулевого сигнала
 - Доверительные интервалы

Методы машинного обучения

BESIII, Phys. Rev. D91, 112015 (2015)



- $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0) = (8.24 \pm 0.21 \pm 0.30) \times 10^{-4}$
- $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \gamma\gamma) < 3.8 \times 10^{-6}$

«Производительность» Супер c - τ фабрики

Светимость

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{2\pi\sigma_x\sigma_y} = 10^{35} \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$$

- Сечение процесса (при энергии 3.8 ГэВ)

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-) = 2.9 \text{ нб}$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^0) = 3.6 \text{ нб}$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow D^+D^-) = 2.9 \text{ нб}$$

$$1 \text{ нб} = 10^{-33} \text{ см}$$

- Количество событий в год

$$N_{\tau\tau} = 10^7 \text{ c} \times 10^{35} \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2} \times 2.9 \text{ нб} \approx 3 \times 10^9$$

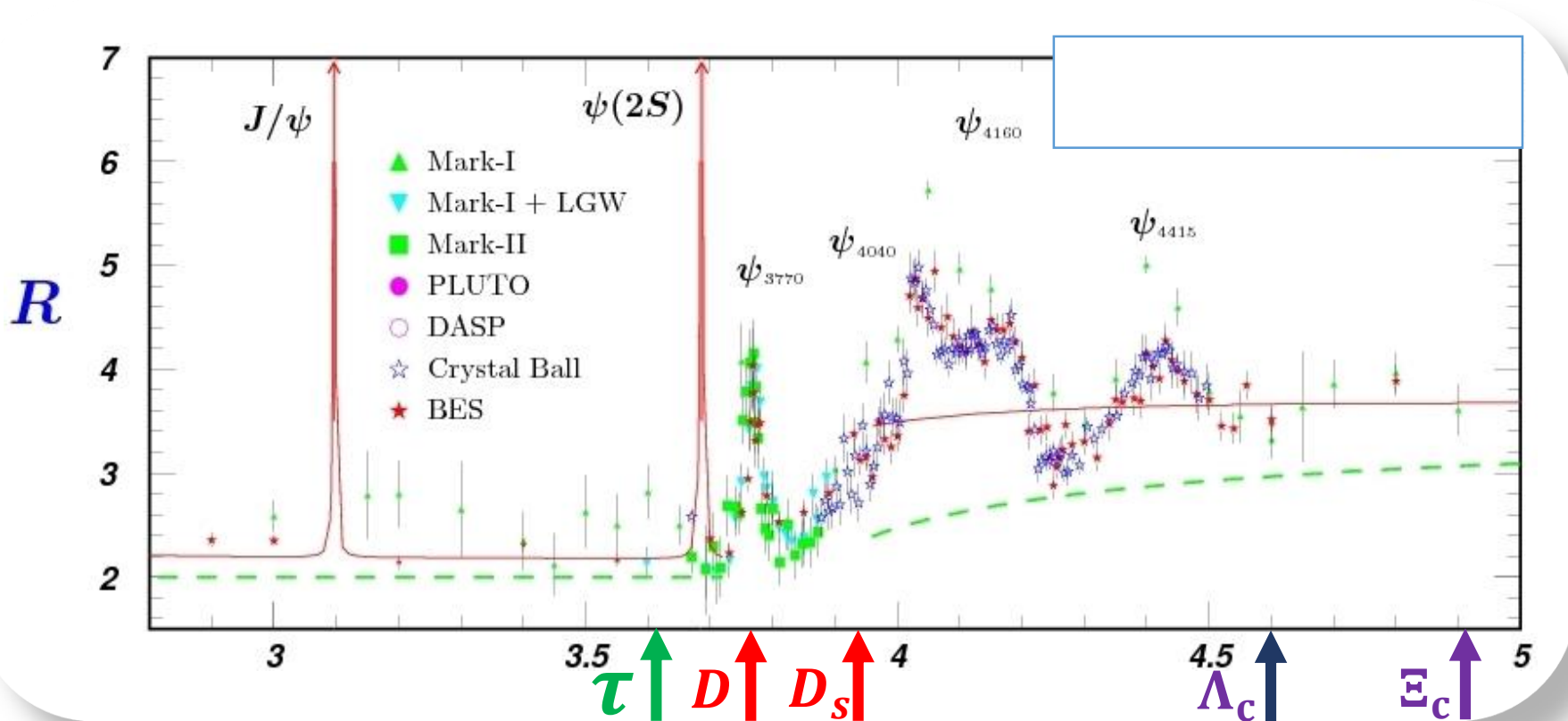
$$N_{D\bar{D}} \approx 6.5 \times 10^9$$

Поток и объем данных

- Максимальная частота записи событий
300 КГц
- Размер события
30 ÷ 50 кБ
- Количество записанных событий
 2×10^{12}
- Общий объем данных
100 ПБ (пета – 10^{15})
- Вычислительный кластер
0.6 Пфлопс

Big Data

Диапазон энергий Супер c - τ фабрики



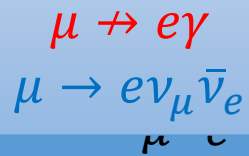
За год работы
Супер c - τ фабрики

$2E$, ГэВ	Количество состояний
3.1	$10^{12} J/\psi$
3.69	$10^{11} \psi(2S)$
3.77	$10^9 D\bar{D}$
4.17	$10^8 D_s\bar{D}_s$
3.55 ÷ 4.3	$10^{10} \tau\tau$
4.65	$10^8 \Lambda_c^+\Lambda_c^-$

Big Data

Нарушение лептонного числа

- В СМ сохраняется лептонное число



- Осцилляции нейтрино не сохраняют лептонное число (уже новая физика!)
- С учетом осцилляций нейтрино, ожидаемая вероятность процесса $\mu \rightarrow e \gamma$ находится на уровне 10^{-54}
- Сценарии новой физики
 - «Не минимальный бозон Хиггса» $H \rightarrow l l'$
 - Суперсимметрия
 - ...

Процесс	Текущий предел*	Супер c - τ
$\tau \rightarrow \mu \gamma$	4.4×10^{-8} (BaBar)	10^{-9}
$D^0 \rightarrow \mu^+ e^-$	1.6×10^{-8} (LHCb)	4×10^{-9}
$D^0 \rightarrow \eta \mu^+ e^-$		$\sim 10^{-8}$
$D^+ \rightarrow K^+ e^- \mu^+$	1.2×10^{-6} (BaBar)	$\sim 10^{-8}$
$D^+ \rightarrow \pi^+ e^- \mu^+$	3.6×10^{-6} (BaBar)	$\sim 10^{-8}$
$J/\psi \rightarrow l l'$	1.5×10^{-7} (BESIII)	$\sim 10^{-9}$

*Предел означает, что вероятность процесса меньше, чем X

Лептонная универсальность

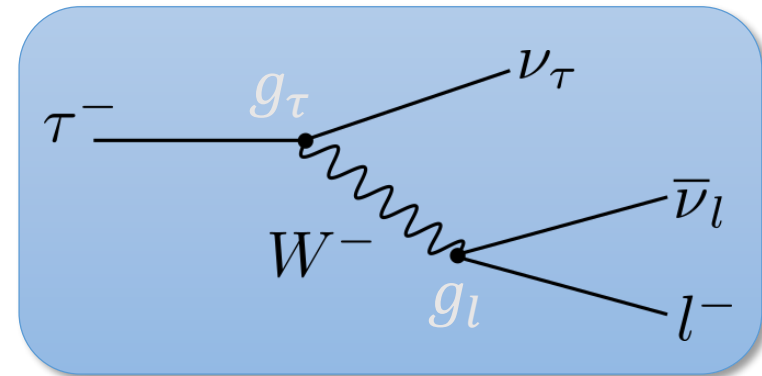
$$\tau^- \rightarrow l^- \bar{\nu}_l \nu_\tau$$

$$\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau l^- \bar{\nu}_l) = \frac{G_\tau G_l m_\tau^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_l^2}{m_\tau^2}\right) r_{EW}$$

$$r_{EW} = \left[1 + \frac{\alpha(m_\tau)}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2\right)\right] \left[1 + \frac{3}{5} \frac{m_\tau^2}{m_W^2} + \frac{9}{5} \frac{m_l^2}{m_W^2}\right] \approx 0.9915$$

$$f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \ln x,$$

$$G_l = \frac{g_l^2}{4\sqrt{2}m_W^2}$$



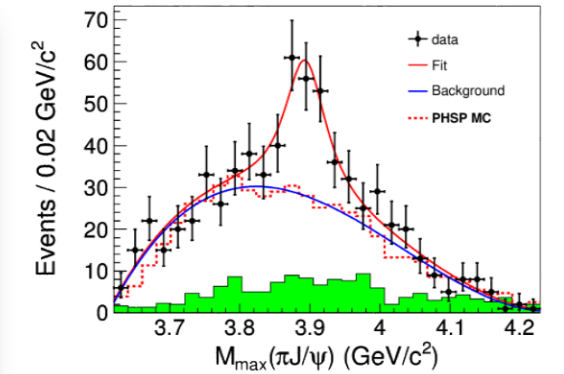
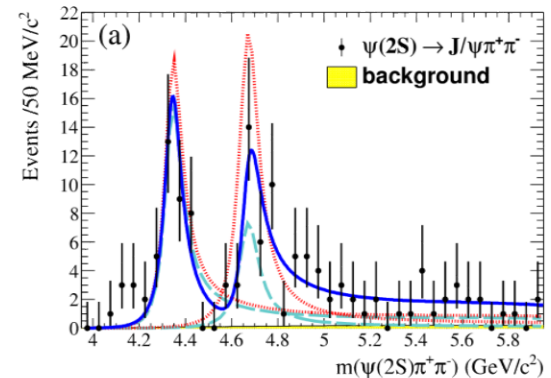
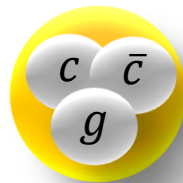
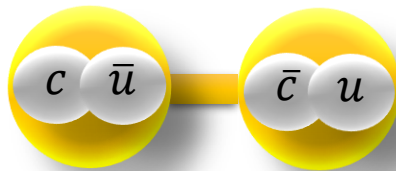
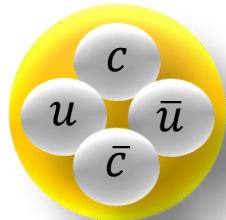
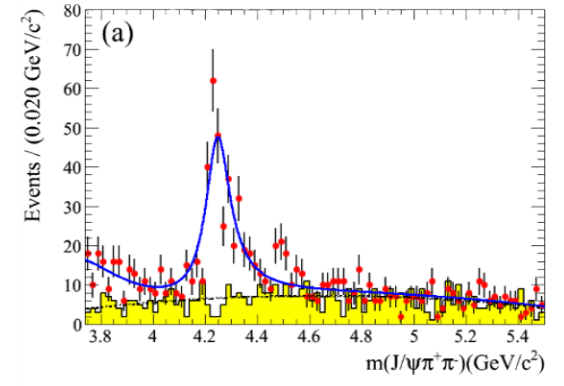
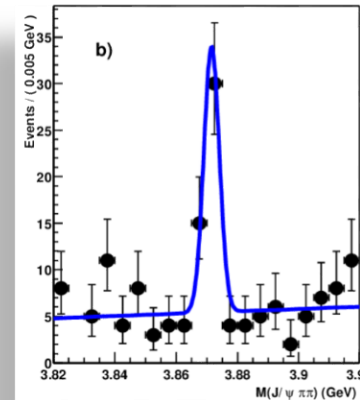
$$l \in \{e, \mu\}$$

Параметр	Расчет	Измерение	Супер c - τ
$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu) / \mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e)$	0.972564 ± 0.000010	0.9796 ± 0.0039 (BaBar)	$Y \pm 0.000x$
$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) / \mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$	9.762 ± 0.031	$10.73 \pm 0.69 \pm 0.56$ (Belle)	$Y \pm 0.0x$

Состояния XYZ

- Состояния XYZ не укладываются в ожидаемый спектр $c\bar{c}$ состояний
- Возможная интерпретация
 - Тетракварки
 - Молекулярные состояния
 - Гибриды
 - ???

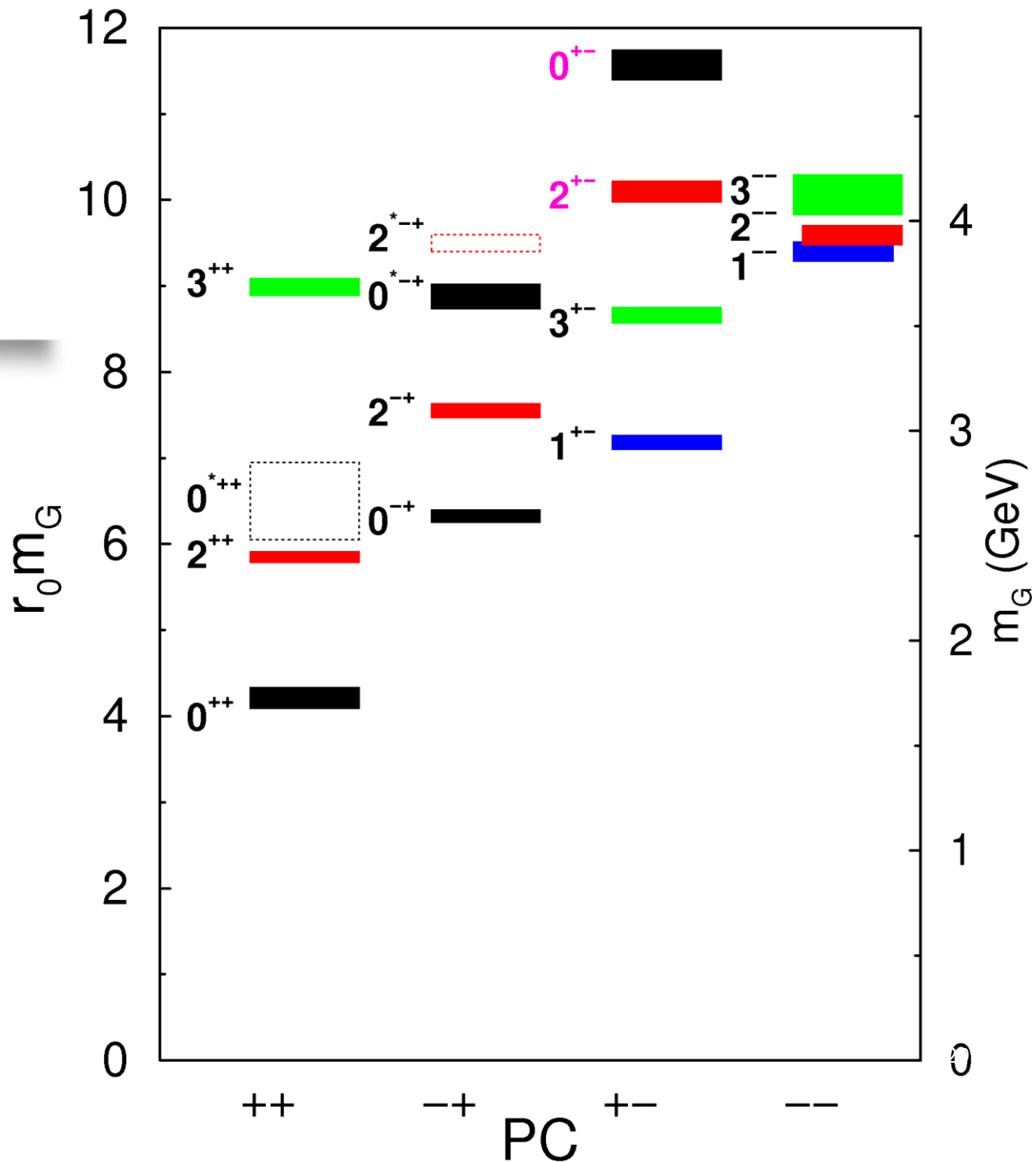
X(3872)
 Y(4260)
 Y(4360)
 Y(4660)
 Z(3900)
 ...



[1] Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (Belle 2003)
 [2] Phys. Rev. D86, 051102(R) (BaBar 2012)
 [3] Phys. Rev. Lett. 110, 252001 (BES-III 2013)
 [4] Phys. Rev. D89, 111103(R) (BaBar 2014)

Поиск глюболов

- Теория предсказывает существование резонансов, состоящих только из глюонов
- Свойства многих легких резонансов изучены недостаточно детально
- Легкие резонансы рождаются на Супер c - τ фабрике в распадах J/ψ
- Детальное изучение свойств легких резонансов и их классификация позволит идентифицировать экзотические состояния (глюболы, гибриды, многокварковые, молекулярные состояния)

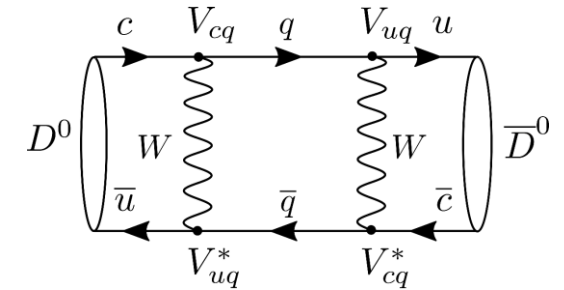
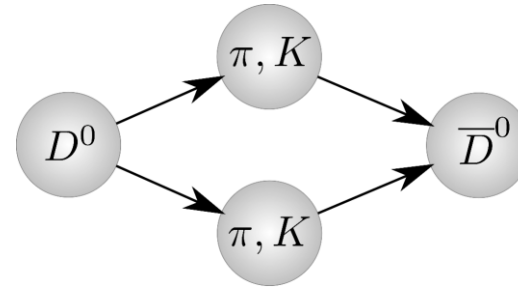


Осцилляции D мезонов

Квантовая когерентность

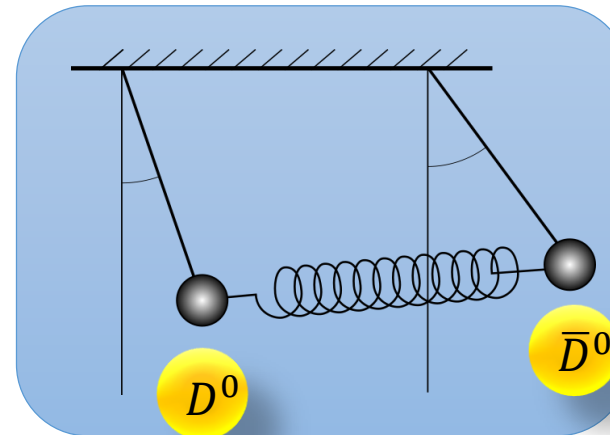
$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow D^0\bar{D}^0$$

- Пара нейтральных D мезонов рождается в когерентном состоянии с квантовыми числами фотона $J^{PC} = 1^{--}$



Идея измерения

- В момент распада одного из D мезонов в состоянии с определенным ароматом (например, $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$), второй D мезон имеет противоположный аромат
- Если второй D мезон распался в состоянии с тем же ароматом, то значит он поменял свой аромат



Многие сценарии новой физики предсказывают усиление осцилляций D мезонов

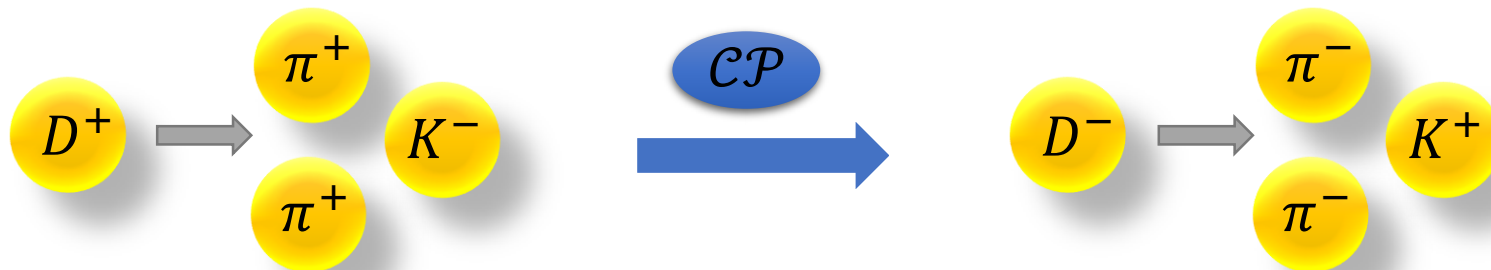
Отличие материи от антиматерии

CP симметрия

- Последовательное применение C и P преобразований переводит материю в антиматерию
- Законы сильного и электромагнитного взаимодействия инвариантны относительно CP преобразования
- Нарушение CP симметрии обнаружено в слабых взаимодействиях

Нарушение CP симметрии

- Пример прямого CP нарушения
 $\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) \neq \mathcal{B}(D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-)$
- Стандартная Модель предсказывает крайне малую величину нарушения CP симметрии в распадах очарованных частиц
- Любой сигнал CP нарушения в очарованных частицах будет ясным сигналом наличия новой физики



Выводы

1. Супер c - τ фабрика дает уникальные возможности для изучения свойств D мезонов, чармониев, очарованных барионов и более легких частиц
2. Многие измерения на Супер c - τ фабрике чувствительны к эффектам новой физики
3. Создание Супер c - τ фабрики требует творческих усилий физиков, инженеров и программистов
4. Анализ данных Супер c - τ фабрики позволит получать новую информацию в течение многих лет
5. Будут созданы новые научные и технологические школы

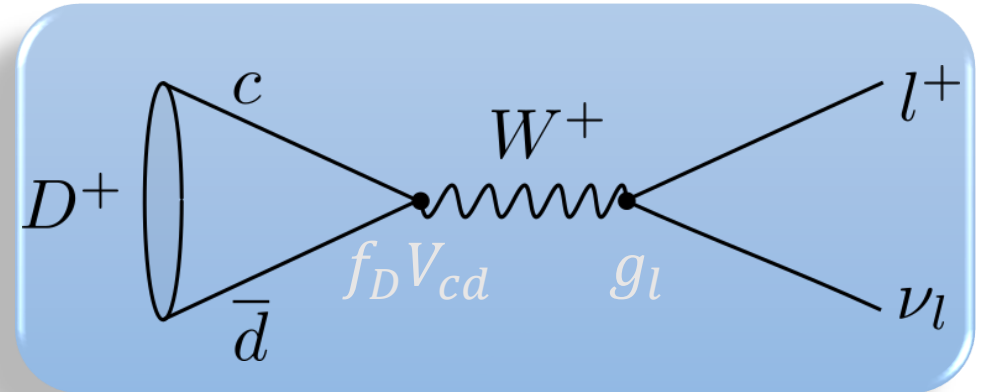


Спасибо за внимание!

Измерение распадных констант

$D^+ \rightarrow l\nu$

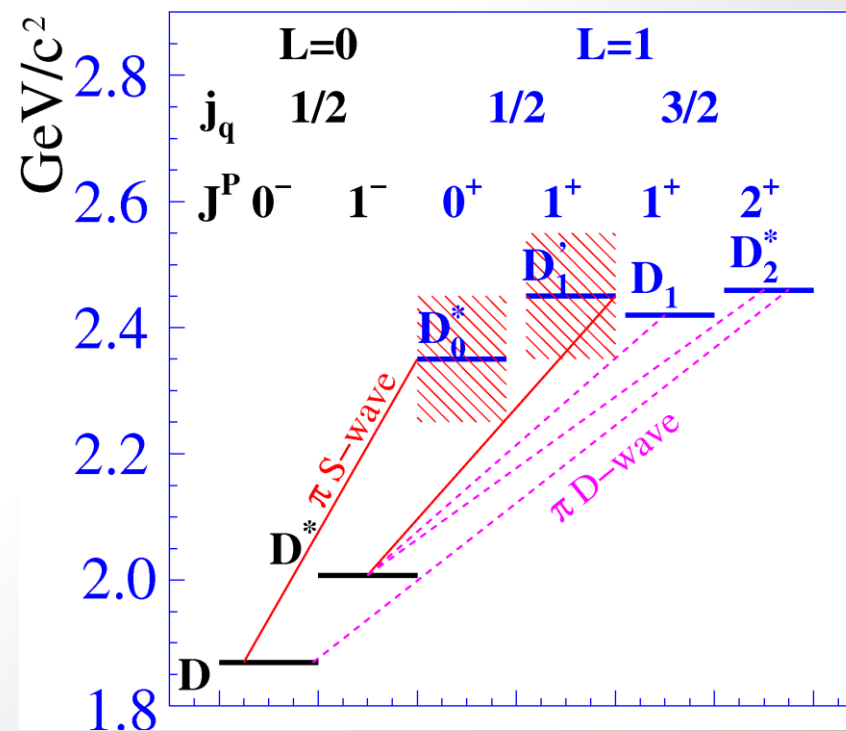
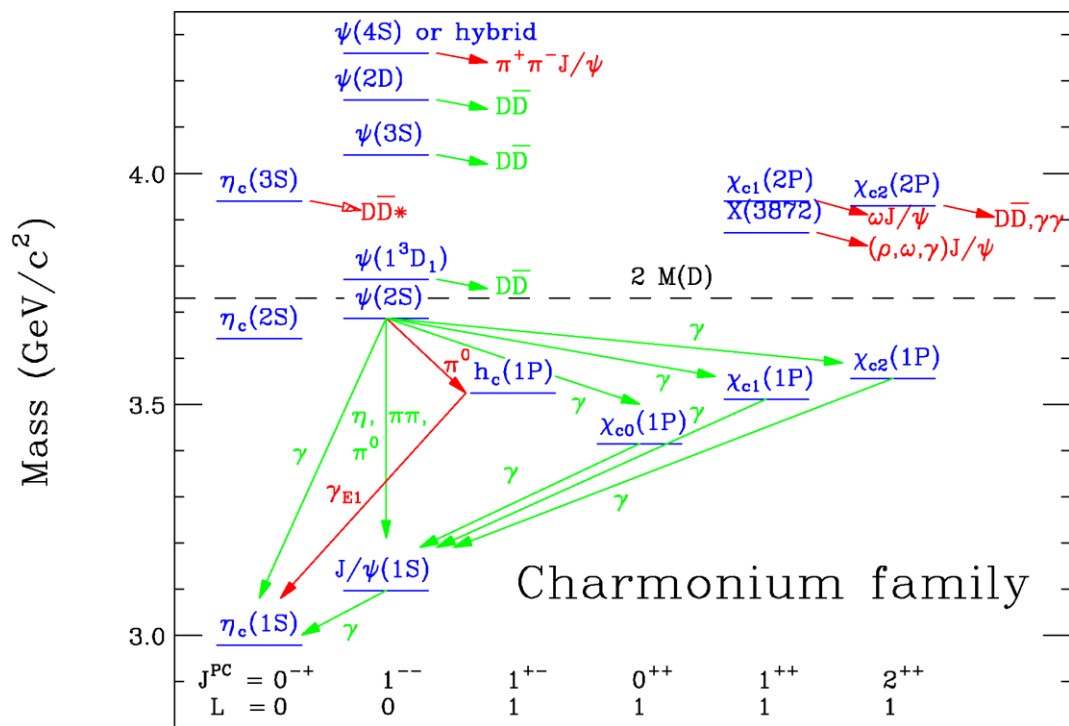
$$\Gamma(D^+ \rightarrow l\nu) = \frac{G_F^2}{8\pi} f_D^2 m_l^2 m_D \left(1 - \frac{m_l^2}{m_D^2}\right) |V_{cd}|^2$$



Параметр	Расчет	Измерение	Супер c - τ
f_D	$202.3 \pm 2.2 \pm 2.6$	$203.2 \pm 5.3 \pm 1.8$ (BESIII)	$Y \pm 0.x$
f_{D_s}	$258.7 \pm 1.1 \pm 2.9$	$255.5 \pm 4.2 \pm 5.1$ (Belle)	$Y \pm 0.x$
f_{D_s}/f_D	1.2788 ± 0.0264	$1.26 \pm 0.05 \pm 0.03$	$Y \pm 0.00x$

Проверка КХД

Спектроскопия



$\mathcal{P}, \mathcal{C}, \mathcal{T}$

$$\mathcal{P}: \vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$

$$\mathcal{C}: q \rightarrow -q$$

$$\mathcal{T}: t \rightarrow -t$$

\mathcal{CPT} теорема

$$\mathcal{P}|D^0\rangle = -|D^0\rangle$$

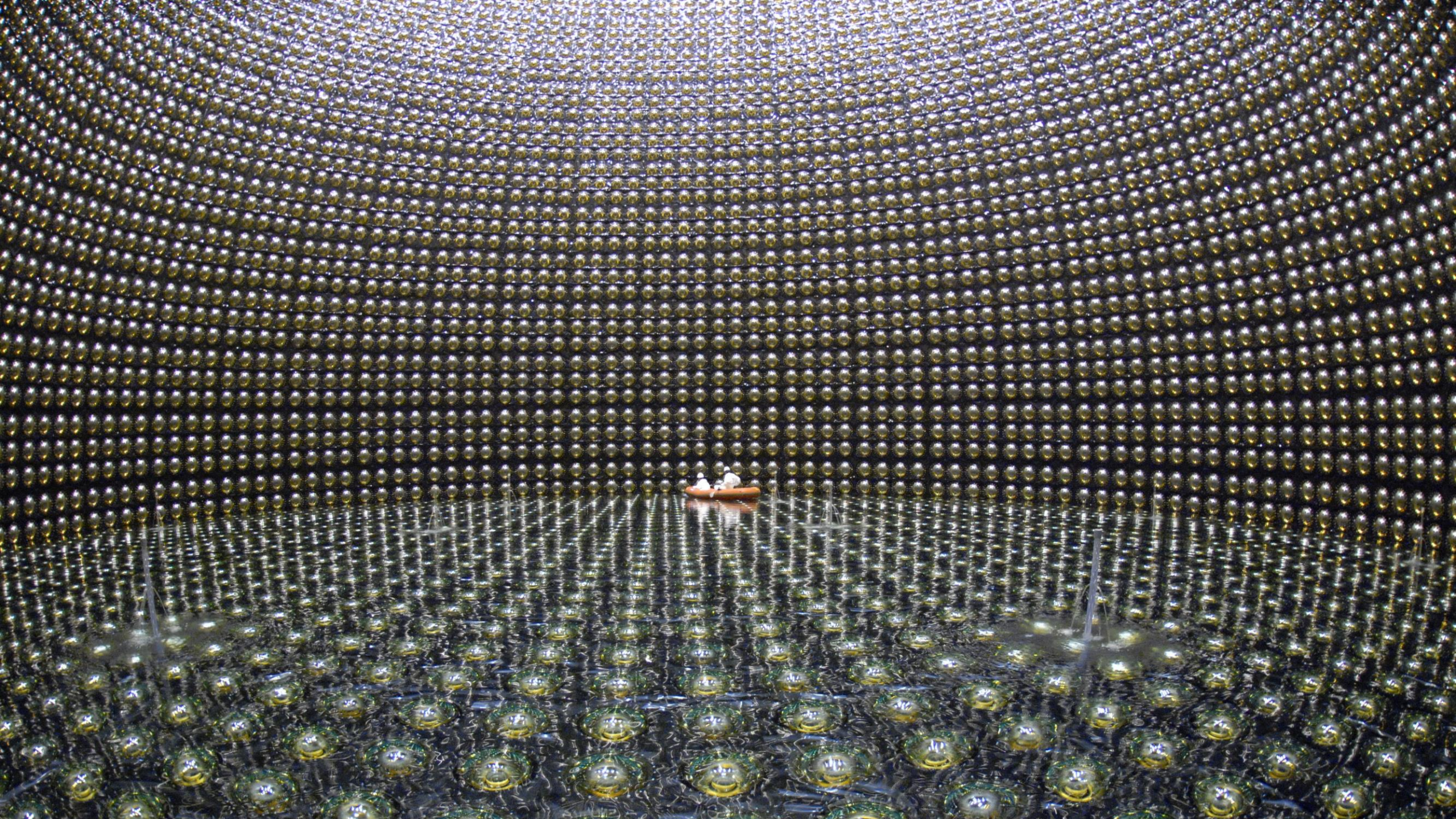
$$\mathcal{P}|J/\psi\rangle = -|J/\psi\rangle$$

$$\mathcal{C}|J/\psi\rangle = -|J/\psi\rangle$$

$$\mathcal{CP}|D^0\rangle = \pm|\bar{D}^0\rangle$$

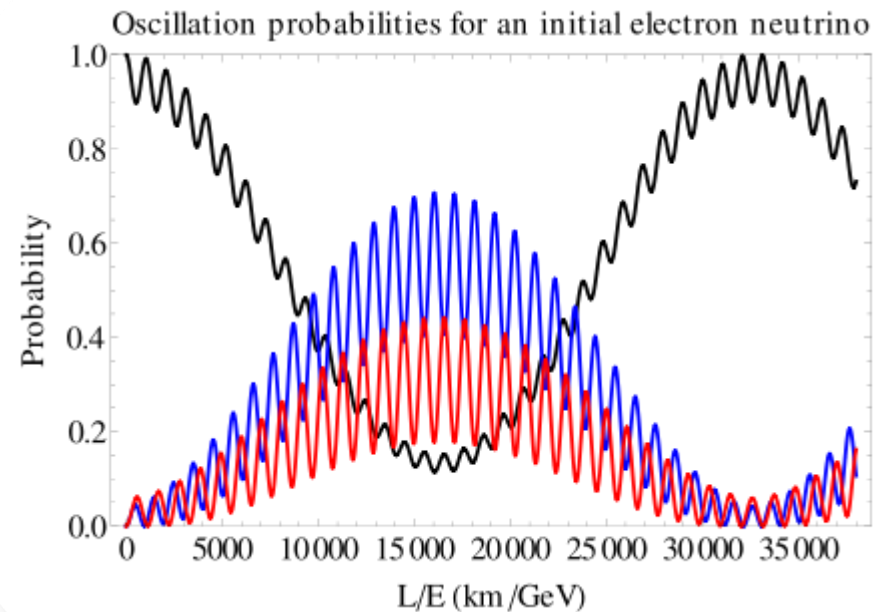
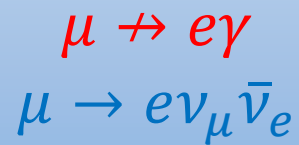
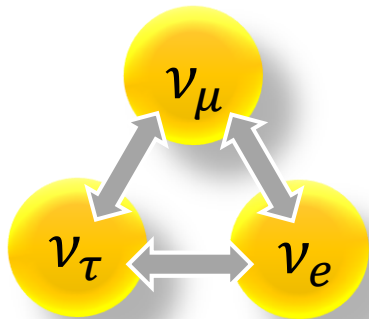
Супер c - τ

- Изучение спектров состояний $q_i \bar{q}_j$, $q \in \{u, d, s, c\}$ - проверка расчетов КХД
- Поиск экзотических состояний



Осцилляции нейтрино

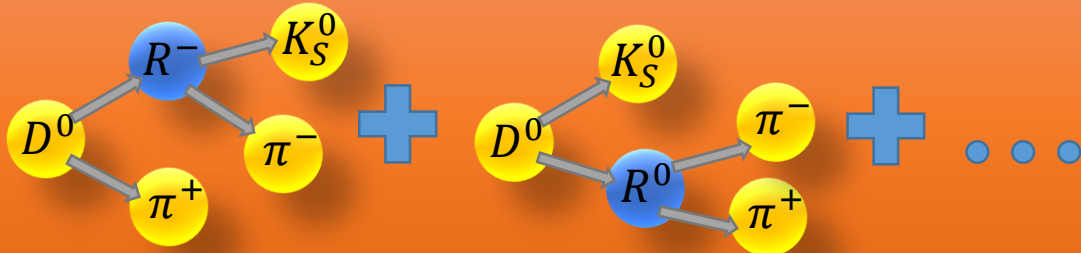
- Предсказано Б. Понтекорво в 1957 году
- Осцилляции нейтрино надежно установлены
 - Исчезновение солнечных ν_e
 - Исчезновение реакторных $\bar{\nu}_e$
 - Исчезновение ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ из атмосферных ливней
- Осцилляциям нейтрино нарушают закон сохранения лептонного числа



wikimedia.org

Динамика многочастичных распадов

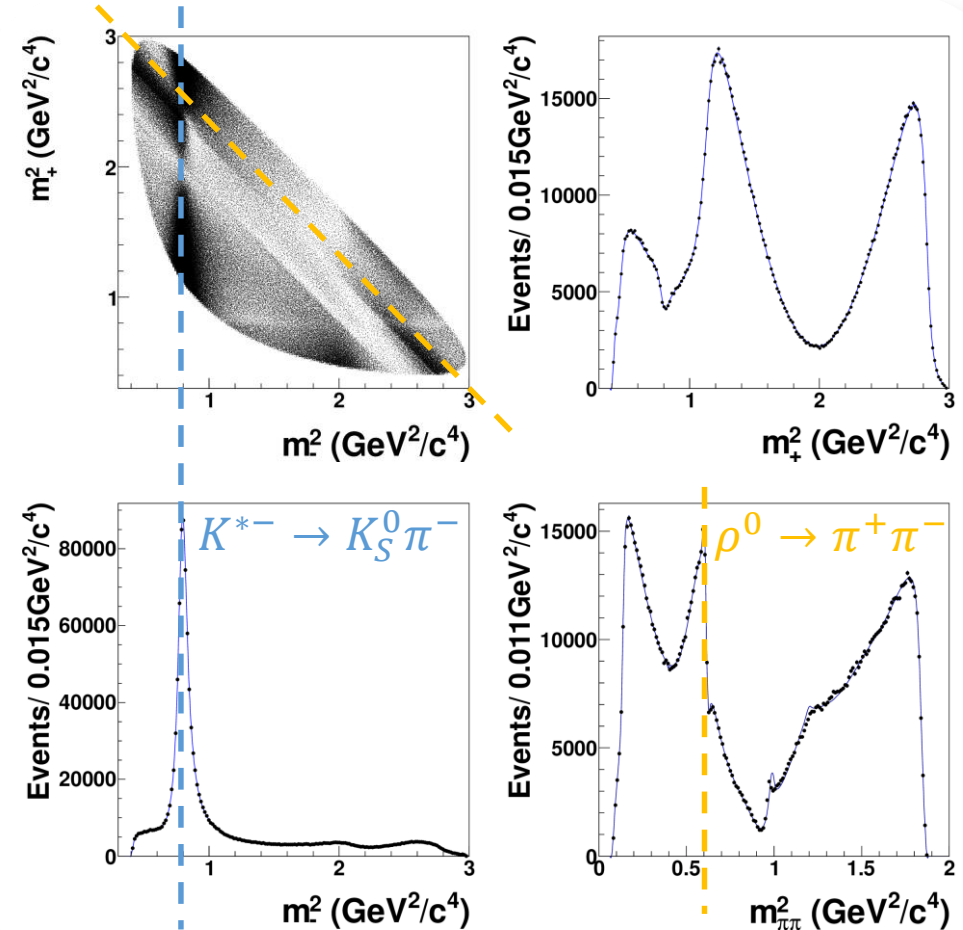
Квантовая суперпозиция



Идея анализа

- Распределение инвариантных масс пар конечных частиц показывает промежуточные резонансы
- Для распада $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ определим

$$m_+^2 \equiv m^2(K_S^0 \pi^+), \quad m_-^2 \equiv m^2(K_S^0 \pi^-)$$



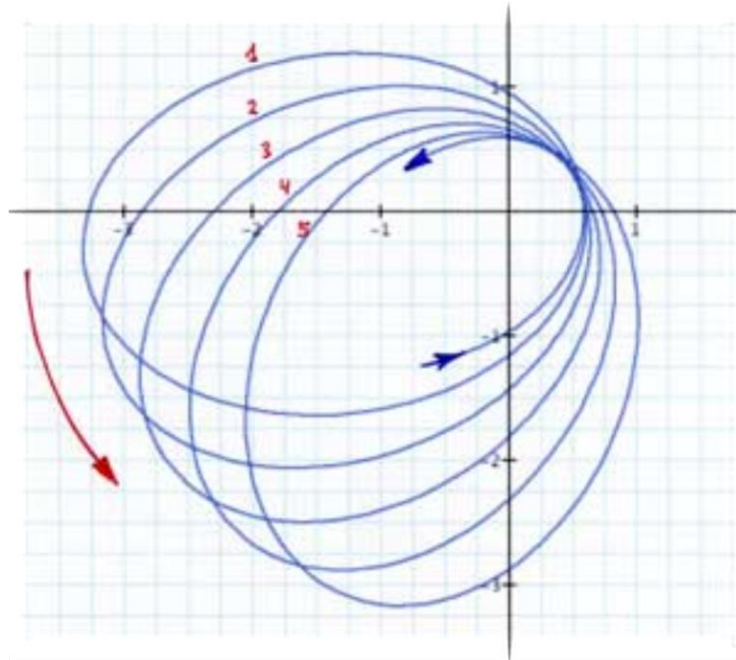
Высокая точность и Новая физика

Прецессия перигелия орбиты Меркурия

Расчет **столетней** прецессии
 $575.31''$

- $532.3035''$ - влияние тел Солнечной системы
- $42.9799''$ - эффекты ОТО
- $-0.0286''$ - эллиптичность Солнца

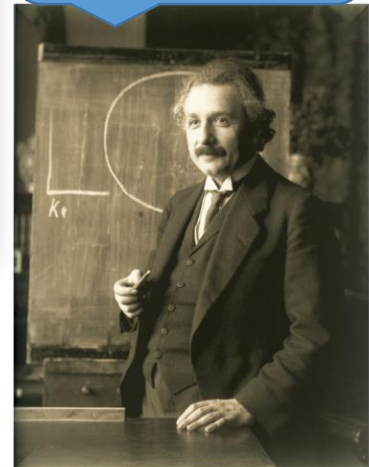
Измеренная величина
 $(574.10 \pm 0.65)''$



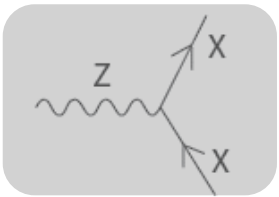
Прецессия орбиты Меркурия вокруг Солнца не может быть объяснена Ньютоновой механикой или влиянием известных планет (Urbain Le Verrier, 1859)



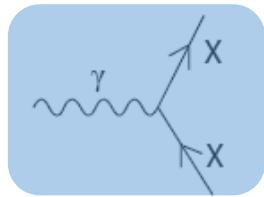
$$\sigma = \frac{24\pi^3 L^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}$$



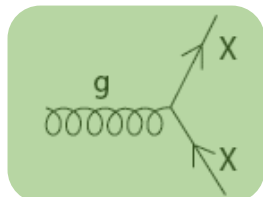
Диаграммы Фейнмана



X is any fermion in the Standard Model.



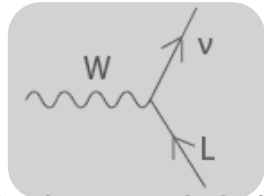
X is electrically charged.



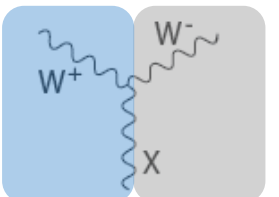
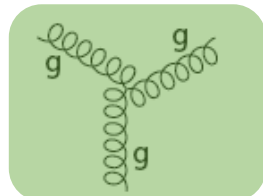
X is any quark.



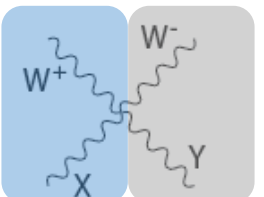
U is a up-type quark;
D is a down-type quark.



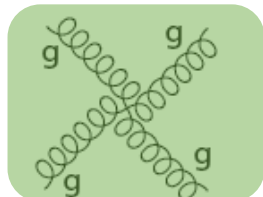
L is a lepton and ν is the corresponding neutrino.



X is a photon or Z-boson.



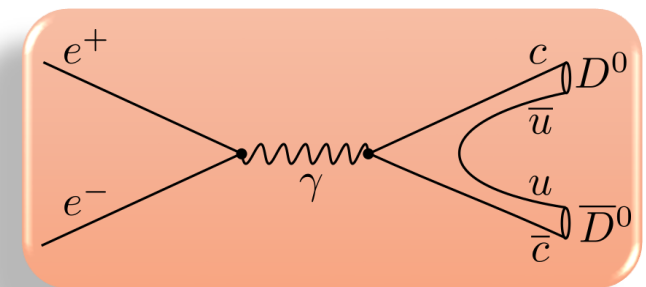
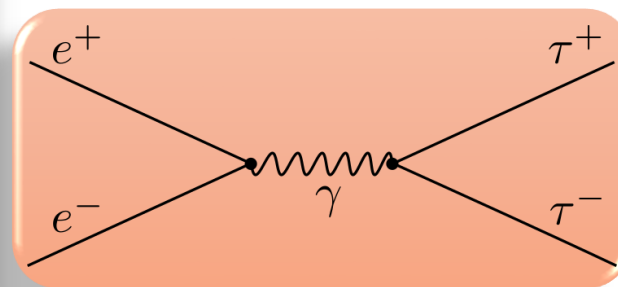
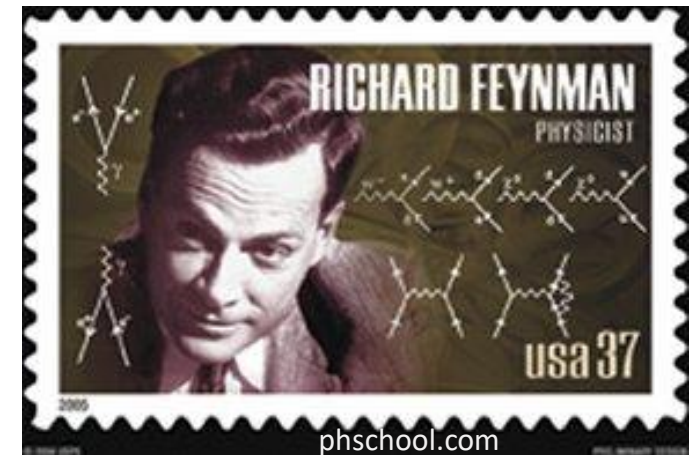
X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.



Электромагнитное

Слабое

Сильное



Когерентные распады D мезонов

Квантовая когерентность

$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow D^0\bar{D}^0$$

- Пара нейтральных D мезонов рождается в когерентном состоянии с квантовыми числами фотона $J^{PC} = 1^{--}$

$$\psi \propto |D_1^0\rangle |\bar{D}_2^0\rangle - |D_2^0\rangle |\bar{D}_1^0\rangle$$

- Когерентность разрушается в момент распада одного из D мезонов
- Когерентное рождение пар $D^0\bar{D}^0$ является уникальной особенностью Супер c - τ фабрики и позволяет выполнять многие измерения

Измерения

- Относительная величина и фаза амплитуд распада

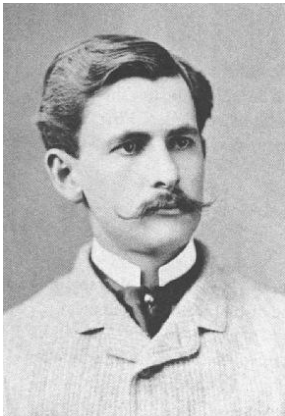
$$r_f \cdot e^{i\delta_f} \equiv \frac{\mathcal{A}(\bar{D}^0 \rightarrow f)}{\mathcal{A}(D^0 \rightarrow f)}$$

- Факторы когерентности
- Параметры осцилляций D мезонов
- Параметры нарушения CP симметрии

Цитаты

... it seems probable that most of the grand underlying principles have been firmly established ... the future truths of physical science are to be looked for in the sixth place of decimals

(Albert Michelson, 1894)



The laws of science, as we know them at present, contain many fundamental numbers, like the size of electric charge of the electron and the ratio of the masses of proton and the electron. ... The remarkable fact is that the values of these numbers seem to have been very finely adjusted to make possible the development of life. (Stephen Hawking)



Проблема иерархий

Масса бозона Хиггса

$$m^2 = m_0^2 + \Delta m^2 \sim (125 \text{ ГэВ})^2$$

«Голая» масса

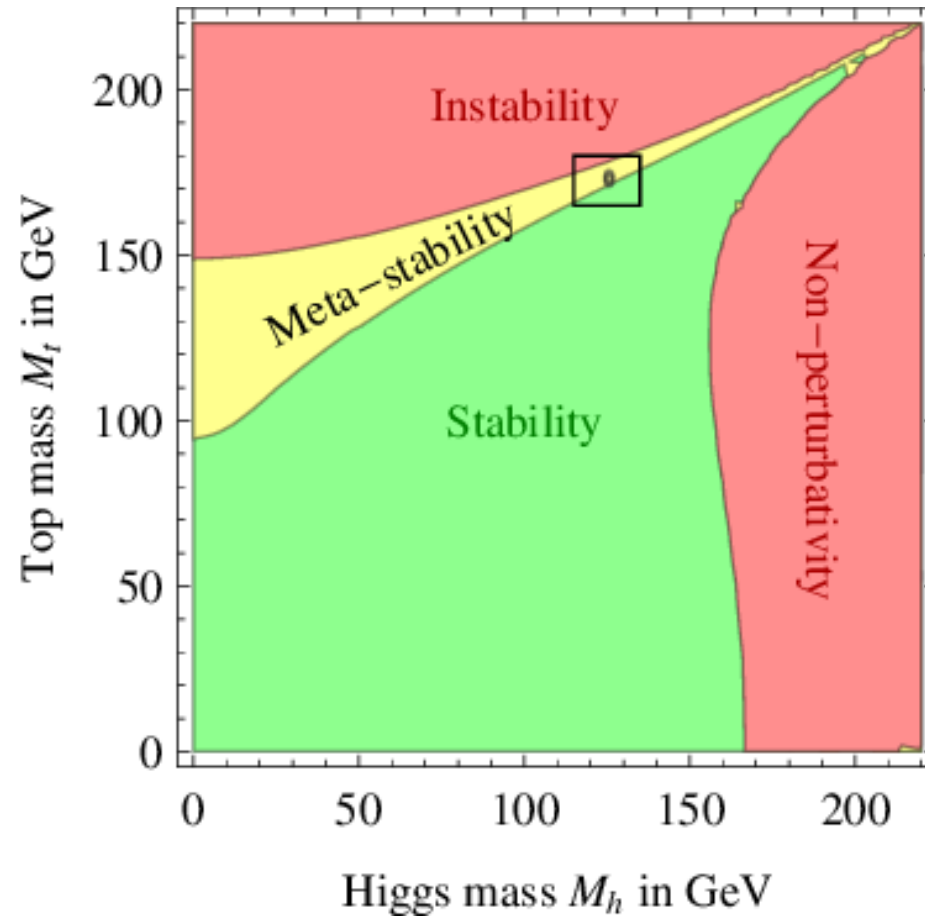
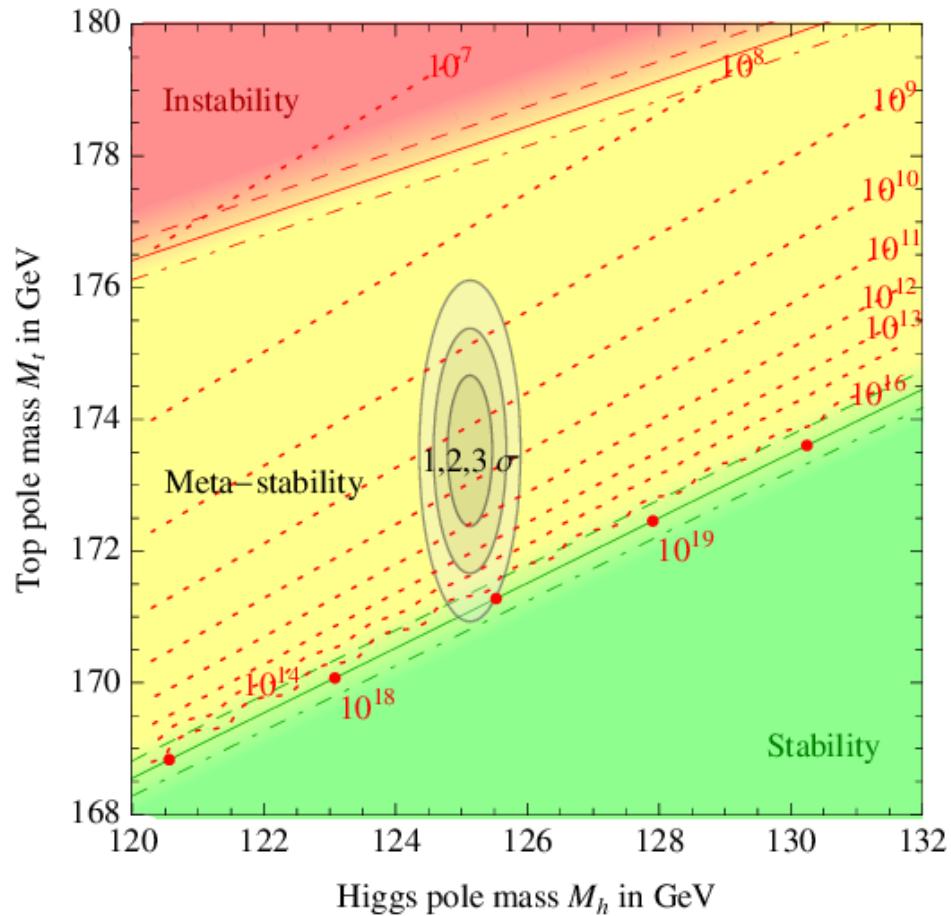
Поправки

$$\Delta m^2 \sim \frac{1}{16\pi^2} m_{Pl}^2 \approx 10^{36} \text{ ГэВ}^2$$

Необходимо (очень) точное сокращение между m_0^2 и Δm^2

Проблема может разрешиться при наличии новой физики на масштабах ТэВ

Стабильность вакуума

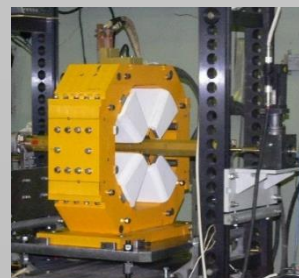
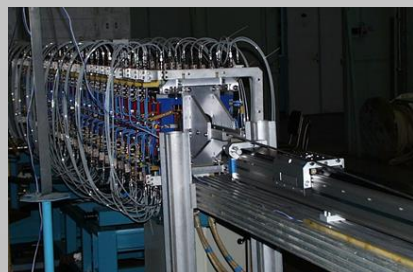
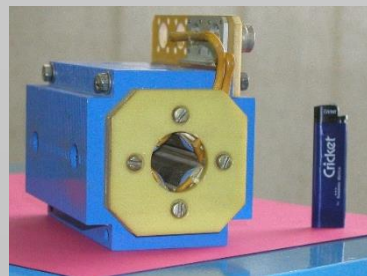


Jose R. Espinosa
[arXiv:1512.01222]

Параметры коллайдера СЧТФ

Energy	1.0 GeV	1.5 GeV	2.0 GeV	2.5 GeV
Circumference	813.1 m			
Emittance hor/ver	8 nm/0.04 nm x rad @ 0.5% coupling			
Damping time hor/ver/long	30/30/15 ms			
Bunch length (mm)	18	12	10	10
Energy spread (MeV)	1.09	1.65	1.86	1.80
Momentum compaction	$1.00 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-3}$
Synchrotron tune	0.007	0.010	0.009	0.008
RF frequency	508 MHz			
Harmonic number	1300			
Particles in bunch	$7.1 \cdot 10^{10}$			
Number of bunches	406			
Bunch current	4.19 mA			
Total beam current	1.7 A			
Beam-beam parameter	0.135	0.135	0.121	0.097
Luminosity	$0.56 \cdot 10^{35}$	$0.86 \cdot 10^{35}$	$1.02 \cdot 10^{35}$	$1.02 \cdot 10^{35}$

Сделано в ИЯФ



Первые коллайдеры

$$e^-e^-$$

- Stanford-Princeton (Стэнфорд 1962)

- ВЭП-1 (ИЯФ 1963)

$$e^-e^+$$

- AdA (Италия- Франция 1961)

- ВЭПП-2 (ИЯФ 1965)

Изучены процессы

- $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ (Стэнфорд, ИЯФ 1962)

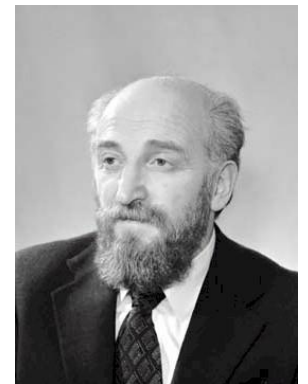
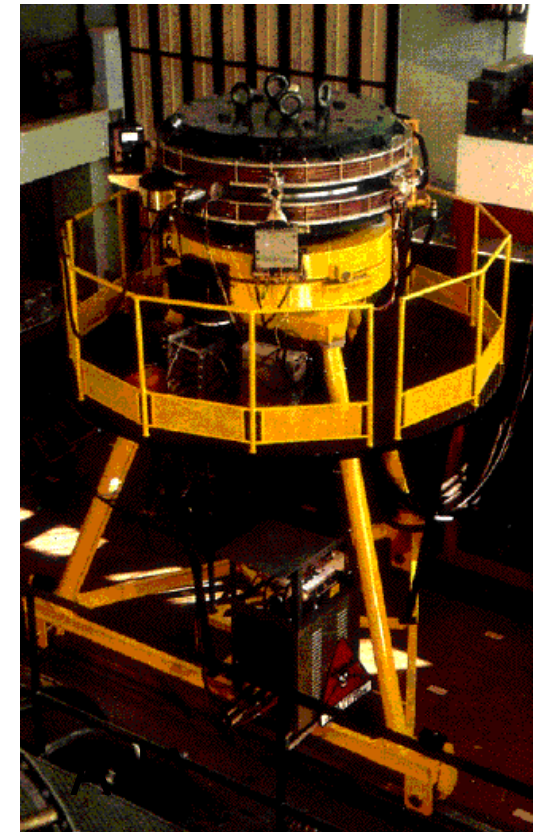
- $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$ (Orsay 1964)

- $e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons}$ (ИЯФ 1966)

- $e^-e^+ \rightarrow \varphi$ (ИЯФ 1966)

- $e^-e^+ \rightarrow \gamma\gamma$ (ИЯФ 1971)

Прецизионные измерения КЭД



Г.И. Будкер



Б. Тушек

Лоренц-структура распадов τ

- Ключевая роль поляризации электронного пучка

Новые частицы в петлевых переходах

- FCNC $c \rightarrow uX$