

Введение в физику элементарных частиц

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Камчатская школа по ФЭЧ и смежным темам

23-27 сентября 2019 г.



INVESTIGADOR
FCT



GOVERNO DA REPÚBLICA
PORTUGUESA



PROGRAMA OPERACIONAL POTENCIAL HUMANO



QUADRO
DE REFERÊNCIA
ESTRATÉGICO
NACIONAL



1 История изучения микромира

2 Стандартная модель

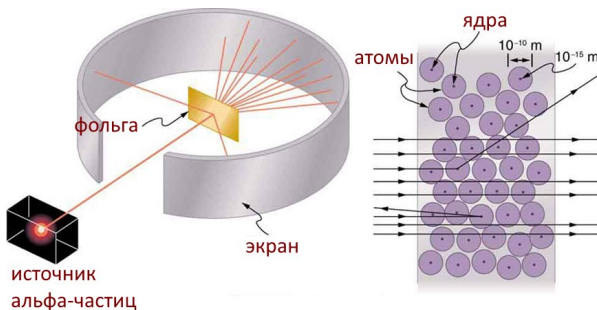
3 Открытие бозона Хиггса

4 Поиски Новой физики

Эпоха первопроходцев

Первые шаги

- 1896: спонтанная радиоактивность
● Беккерель, Пьер и Мария Кюри (1903) ● Резерфорд (1908)
- 1897: катодные лучи → электроны ● Томсон (1906)
- 1911: атомное ядро (эксперимент Резерфорда)
- 1919: искусственная трансмутация элементов



Революция 1: теория относительности

- Скорость света c — предел для любых частиц;
- законы физики одинаковы во всех инерциальных СО.

Важное следствие: **масса — это тоже форма энергии!**



в покое: $E_0 = mc^2$.

в движении: $E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2 c^2}$

Для безмассовых частиц: $m = 0 \rightarrow E = pc$.

Осторожно!

В современной физике частиц нет «массы покоя» и «релятивистской массы». Есть просто «масса» — неизменная характеристика частицы.

Единицы измерения

Макроскопические единицы измерения неудобны для микромира:

$$m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad E_H \approx 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ Дж.}$$

Удобная универсальная единица — **электронвольт (эВ)**.

$$1,78 \cdot 10^{-36} \text{ кг} = 1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

-  атомная физика, оптика: $E \sim 1 \text{ эВ}$;
-  ядерная физика: МэВ (10^6 эВ);
-  элементарные частицы: **ГэВ** (10^9 эВ) и **ТэВ** (10^{12} эВ);
 - масса протона: $\approx 1 \text{ ГэВ}$,
 - масса бозона Хиггса: **125 ГэВ**,
 - энергия протонов в LHC: **6,5 ТэВ**.

Планк (1918) Бор (1922) де Бройль (1929)
Гейзенберг (1932) Шредингер (1933) Борн (1954)

Микромир населен «частицами-волнами»:

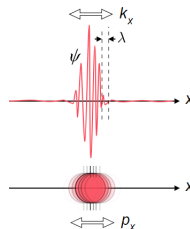
$\lambda = 2\pi\hbar/p$, где $\hbar$ — постоянная Планка.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$$

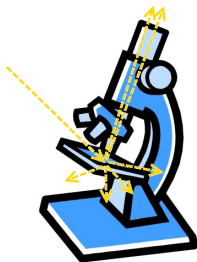
$$\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \approx 0,197 \text{ эВ} \cdot \text{нм}.$$

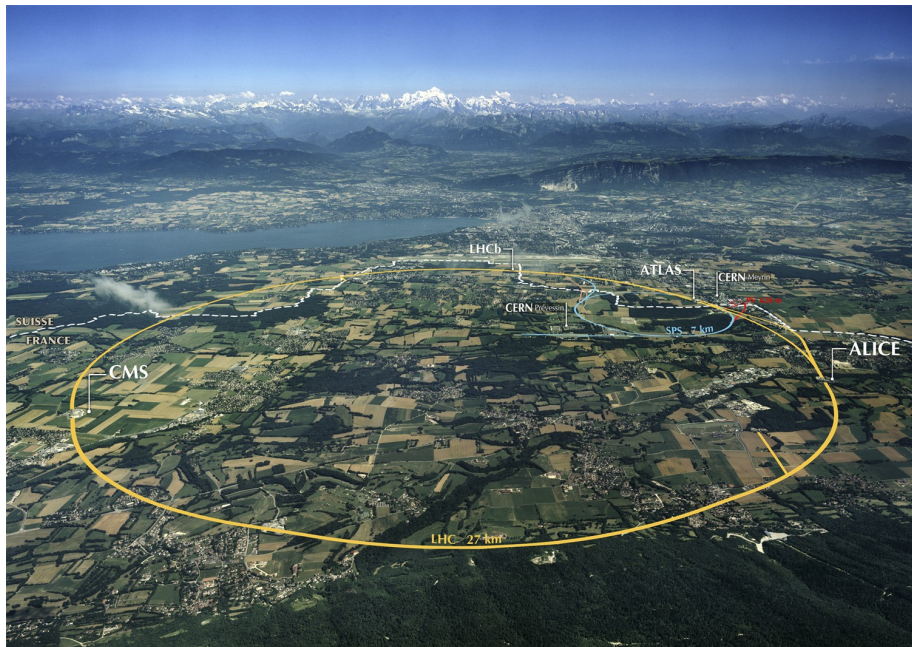
Принципиально новые квантовые явления — **спин** и **тождественность частиц** — тоже играют ключевую роль в жизни микромира.



Чем мельче объект, тем больше импульс «частицы-осветителя»!

ядро

$$r \approx 1 \text{ фм}, p > 1 \text{ ГэВ}$$




Вглубь ядра

1921: Резерфорд предсказал нейтрон

1932: Открытие нейтрона  Чедвик (1935)

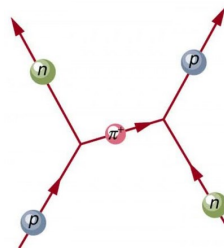
1934: Юкава предложил теорию
внутриядерных сильных взаимодействий и
предсказал π -мезоны — частицы-переносчики
ядерных сил с массой 130 МэВ



Юкава (1949)

1936: открытие мюонов μ , «тяжелых электронов»

1947: открытие π -мезонов  Пауэлл (1950)

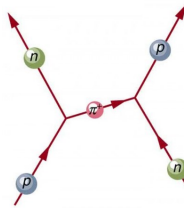


Квантовая теория поля

теория относительности + квантовая механика = **квантовая теория поля**

Фундаментальная сущность — **поле**. Частицы — его возмущение.

- Нет закона сохранения количества частиц!
Частицы могут рождаться и исчезать.
- **Виртуальная частица** — особое состояние поля, неспособное улететь далеко от источника.

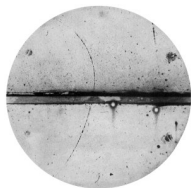


Антиматерия

1928–1930: Дирак построил квантовую электродинамику и предсказал существование **позитрона** e^+ — античастицы **электрона** e^-



Дирак (1933)

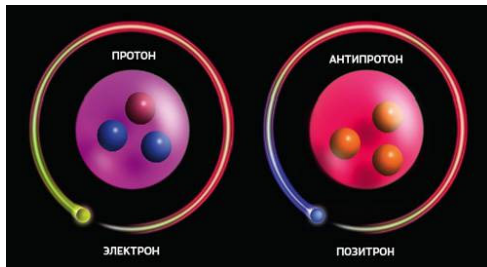


1932: открытие позитрона  **Андерсон (1936)**

Дмитрий Скобельцын видел следы в 1929 году, но не смог правильно интерпретировать!

1955: открытие антипротона  **Сегре, Чемберлен (1959)**

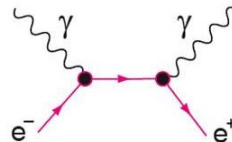
Антиматерия



Материя и антиматерия **аннигилируют** с выделением огромной энергии!

Существуют ли звезды и галактики из антивещества?

Куда подевалась антиматерия??

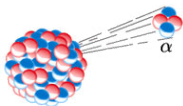


Ускорительная революция

Инструменты эпохи первопроходцев

природная радиоактивность

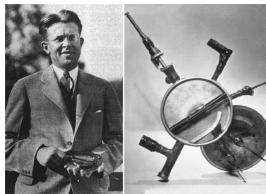
$E \sim$ несколько МэВ;



циклотрон

1929: $E \sim 80$ кэВ;

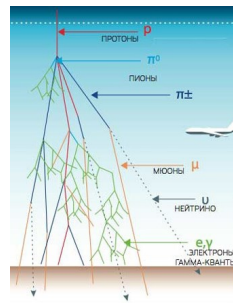
1939: $E \sim 16$ МэВ;



Лоуренс (1939)

космические лучи

природный ускоритель;
запредельные энергии,
но поток $\propto 1/E^{2,7}$.

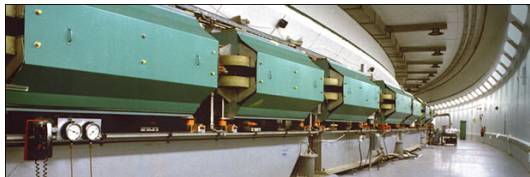


Гесс (1936)

Эра больших ускорителей

40-50-е годы: **бум развития ускорительной техники**: Cosmotron (3,3 ГэВ), Bevatron (6,5 ГэВ), СФ (10 ГэВ), PS (28 ГэВ), AGS (33 ГэВ)

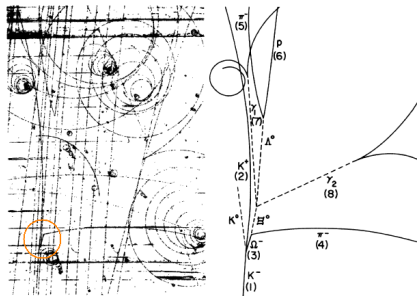
Новые центры: BNL (1947), **ЦЕРН (1954)**, LNF (1955), **ОИЯИ (1956)**, ИЯФ (1958), ИФВЭ (1963)



Великие ускорительные открытия

- 1947: «странные» частицы,
- 1955: антипротон, 1956: антинейтрон,
- 50е-60е: десятки новых адронов*;  Альварес (1968)

***адрон** = частица, чувствующая сильное взаимодействие.

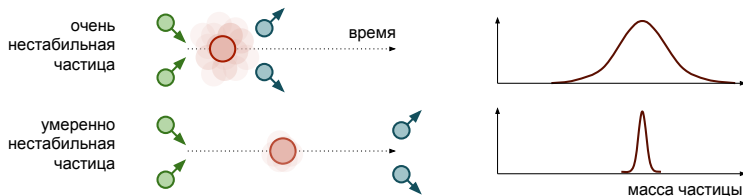


Резонансы

50-е годы: очень короткоживущие адроны, $\tau \sim 10^{-24}$ сек.

Но как вообще их можно заметить??

Соотношение неопределенностей энергия-время: $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$.



Чем нестабильнее частица, тем более «размазана» ее масса.

Кварки

1960-е годы: адронов слишком много!

Прослеживаются закономерности и структура  Хофштадтер (1961)
адроны явно состоят из каких-то «кирпичиков»!

1964: Гелл-Манн, Цвейг — идея **кварков**

 Гелл-Манн (1969)

«верхний» кварк, **u** (заряд $+2/3$),

«нижний» кварк, **d** (заряд $-1/3$),

«странный» кварк, **s** (заряд $-1/3$).

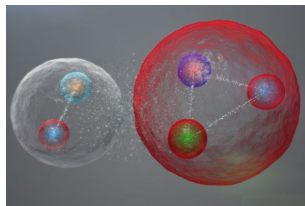
$p = [uud]$, $n = [udd]$, $\pi^+ = [u\bar{d}]$, $\Lambda = [uds] \dots$

1974: «очарованный» кварк **c** ($+2/3$)

 Рихтер, Тинг (1976)

1979: «прелестный» кварк **b** ($-1/3$),

1995: «топ» кварк **t** ($+2/3$).



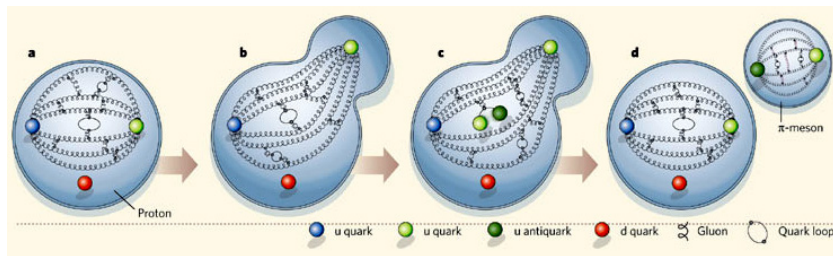
mass →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
	u	c	t
	up	charm	top
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	d	s	b
	down	strange	bottom

Пленение кварков

Кварки держатся вместе за счет **сильного взаимодействия**.

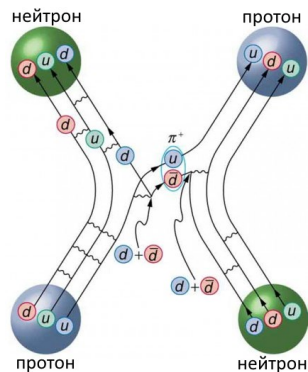
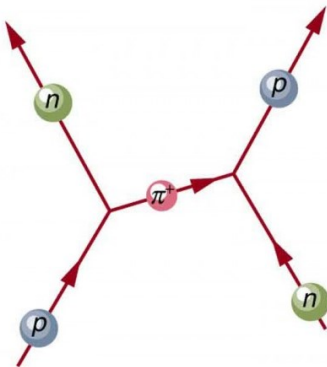
Его переносчики, **глюоны**, чувствуют особый «заряд» кварков — **цвет**.

Самоподдерживающаяся сила: **глюоны чувствуют друг друга!**



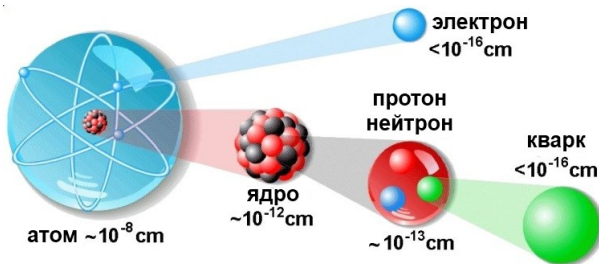
Конфайнмент: кварки навечно пленены внутри адронов!

Ядерные силы: новый взгляд



Стандартная модель и ее трудности

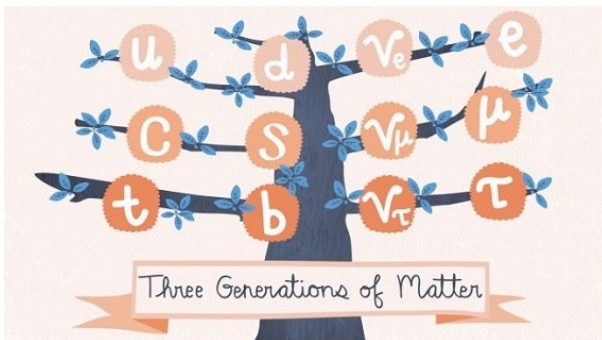
Устройство материи



Фундаментальные взаимодействия:

- **Электромагнитное:** частицы переносчики — фотоны;
- **Сильное:** частицы переносчики — глюоны;
- **Слабое:** частицы переносчики — тяжелые W и Z -бозоны;
- Гравитация: для микромира она слишком слаба, **вычеркиваем**.

Три поколения фермионов



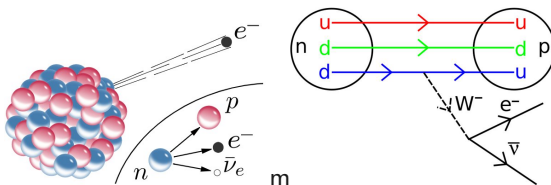
Частицы из 2 и 3-го поколения тяжелые и нестабильные.

Откуда **взялись** три поколения?? — **до сих пор неизвестно!**

Особенность слабого взаимодействия

Слабое взаимодействие — единственное, **способное менять тип частиц!**

Бета-распад нейтрона: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \Rightarrow d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$.



Нейтрино — уникальные, сверхлегкие, сверхпроникающие частицы, чувствуют только слабое взаимодействие.

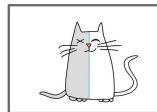
🏆 Ледерманн, Шварц, Стейнбергер (1988) 🏆 Райнес (1995)

🏆 Дэвис, Кошиба (2002) 🏆 Каджита, Макдональд (2015)

Зачем нужны миллиарды столкновений?

Возьмем какую-то нестабильную частицу. У нее есть много вариантов (**каналов**) распада. Она находится **одновременно во всех возможных состояниях**, покада мы не поймаем продукты распада.

Schrödinger's Cat



Невозможно заранее предсказать распад
в каждом конкретном случае!

Но мы можем теоретически вычислить **вероятность** того или иного канала — и ее мы можем сравнить с экспериментом.

Надо **повторить эксперимент миллиарды раз** и сосчитать, сколько раз случился нужный распад → отсюда и получится вероятность.

Фундаментальные частицы и взаимодействия

кварки	u u-кварк	c c-кварк	t t-кварк	γ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
лептоны	ν _e электрон-нейтрино	ν _μ мюон-нейтрино	ν _τ тау-нейтрино	Z z-бозон
	e электрон	μ мюон	τ тау	W w-бозон
				бозоны

Взаимодействия вытекают из принципа **калибровочной симметрии!**

Калибровочные симметрии Стандартной модели: $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$.

Впрочем, есть проблема: настолько симметричная теория возможна **только для безмассовых частиц**. Что делать??

Хиггсовский механизм

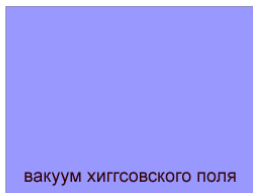
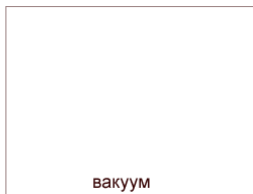
Хиггсовский механизм элегантно решает эту проблему!

- Новая субстанция — **хиггсовское поле**.
- Уравнения остаются симметричными. Но хиггсовское поле **само организуется** так, чтоб частично их нарушить.
- **Спонтанное нарушение симметрии** аукается во всех частях теории, и частицы становятся массивными.



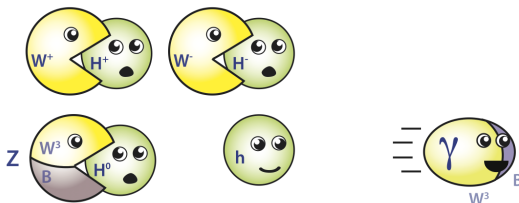
Браут, Энглер, Хиггс, Гуральник, Хэген, Киббл, 1964

Хиггсовский механизм в картинках



Частица «цепляется» за хиггсовское поле и приобретает массу.

Хиггсовский механизм в картинках



Последствия спонтанного нарушения:

- Электрослабое взаимодействие **расщепляется** на слабое (тяжелые W и Z) и электромагнитное (безмассовый фотон).
- Остается частица-отголосок механизма — **бозон Хиггса**.
- Частицы материи приобретают массы.

Стандартная модель

- Стандартная модель — завершена.
 Глэшоу, Салам, Вайнберг (1979)
- Ничего нельзя подправлять, все параметры зафиксированы.
- Можно делать предсказания и проверять их в эксперименте.
- СМ выдержала **тысячи проверок** за последние 50 лет!

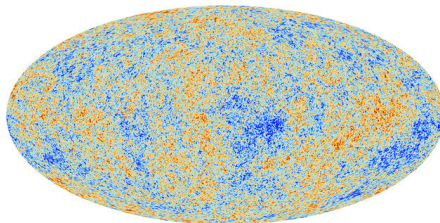
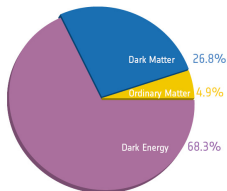


кварки	u u-кварк	c c-кварк	t t-кварк	γ фотон
	d d-кварк	s s-кварк	b b-кварк	g глюон
лептоны	ν _e электрон-нейтрино	ν _μ мюон-нейтрино	ν _τ тау-нейтрино	Z z-бозон
	e электрон	μ мюон	τ тау	W w-бозон
бозоны				



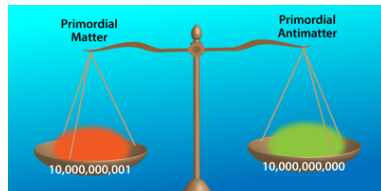
Проблемы СМ: космология

Как объяснить **темную материю**?



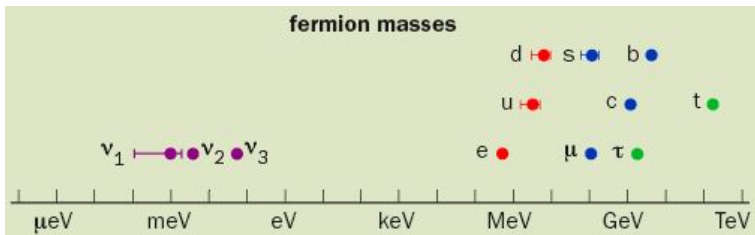
Куда пропало антивещество?

Как возник дисбаланс между частицами и античастицами в ранней вселенной?



Проблемы СМ: фермионы

- Откуда взялись **такие массы** у кварков и лептонов?



- Почему **нейтрино** такие безумно легкие?
- Почему слабое взаимодействие **смешивает** разные фермионы?

Вопросы без ответов

Множество вопросов «почему», на которые СМ неспособна ответить:

- Почему три поколения фермионов?
- Почему три типа взаимодействий? Почему именно таких взаимодействий?
- Почему левые и правые фермионы ведут себя так по-разному?
- Откуда возникло нарушение CP -симметрии? ($\approx$ почему частицы и античастицы ведут себя слегка по-разному?)
- Почему все массы такие маленькие по сравнению с $M_{Pl} \sim 10^{19}$ ГэВ?
- Почему гравитация такая слабая?

Проблемы СМ

Обязана существовать **Новая Физика** — теория устройства микромира, более глубокая чем Стандартная модель!

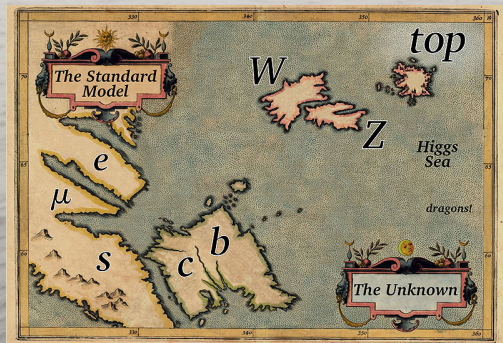
Теоретики придумали уже ≈ 1000 вариантов Новой физики!

Но какая из них реализуется в нашем мире — мы не знаем!



Главная задача современной ФЭЧ — **найти Новую физику**.

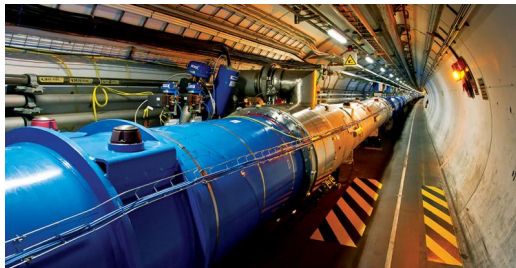
Новая физика

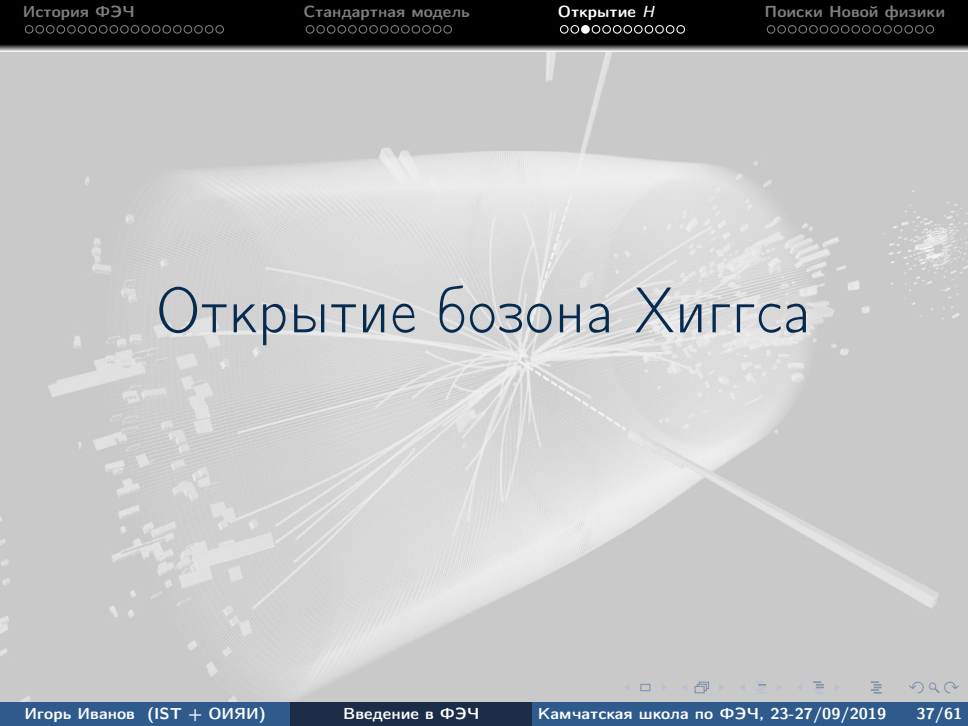


Стандартная
модель

Передний край ФЭЧ

Наш флагман: **Большой адронный коллайдер** (LHC), самый мощный «микроскоп», когда-либо построенный человеком.

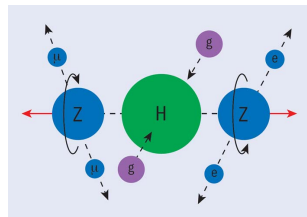




Открытие бозона Хиггса

Поиск бозона Хиггса

- Хиггсовский бозон можно породить в столкновениях, но он **очень нестабилен** и сразу распадается на фотоны, электроны, мюоны, адроны...
- По следам распада детектор восстанавливает «картину происшествия».

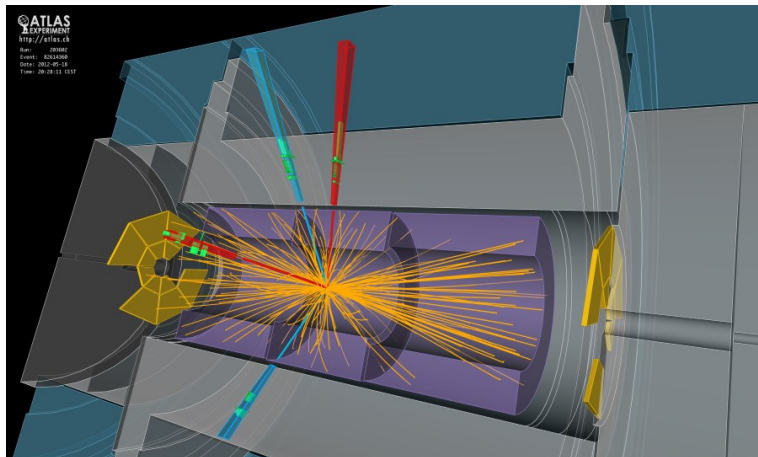


Но один и тот же набор частиц может родиться как из распада бозона Хиггса (**сигнал**), так и независимо (**фон**).

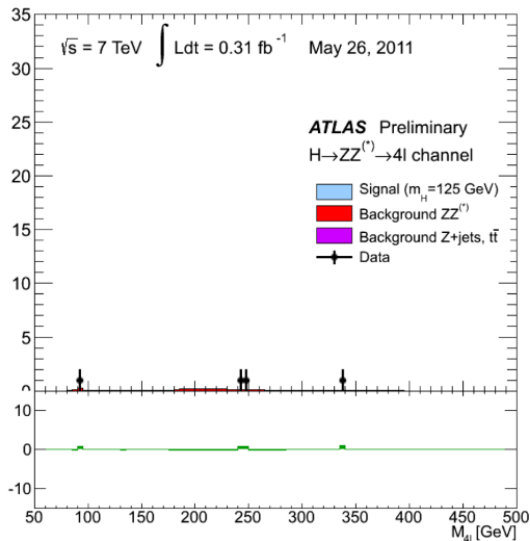
Необходимо накопить статистику, отделить сигнал от фона, сравнить с теоретическими предсказаниями.

Открытие бозона Хиггса

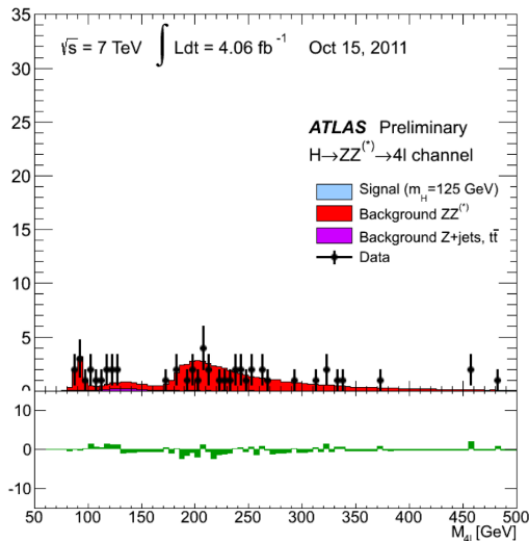
Кандидат в событие $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e^+2e^-$



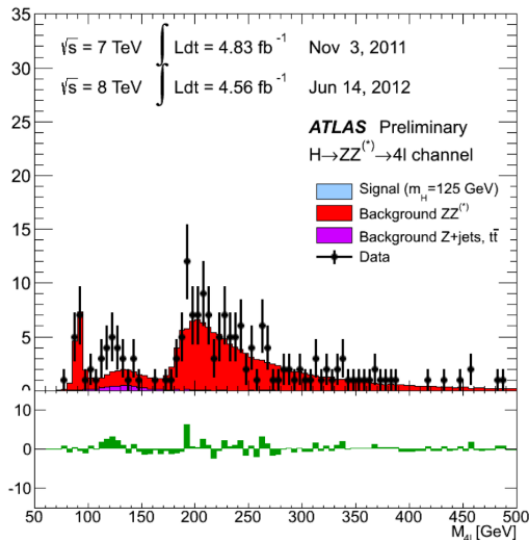
Открытие бозона Хиггса



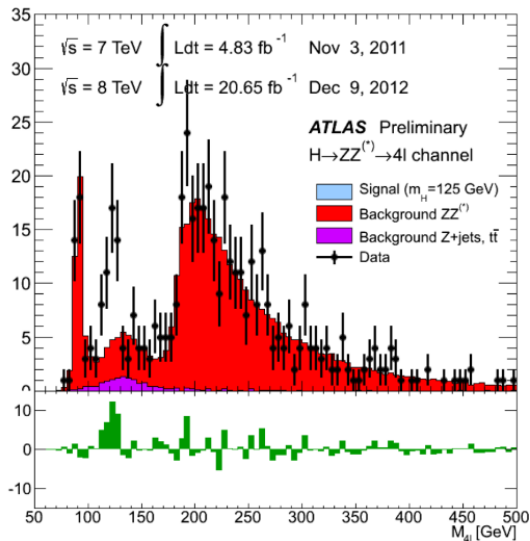
Открытие бозона Хиггса



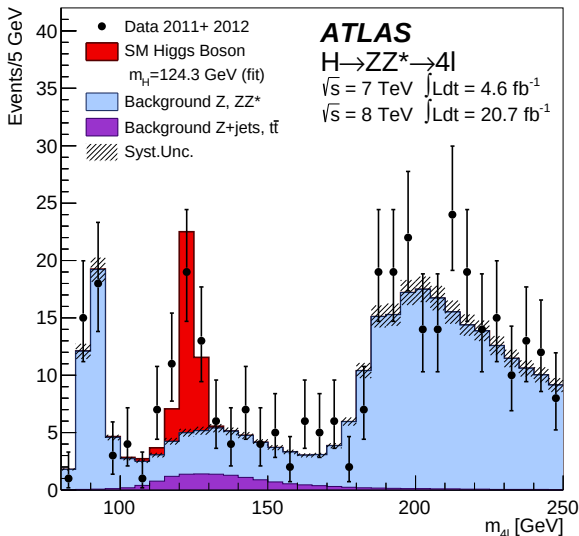
Открытие бозона Хиггса



Открытие бозона Хиггса



Открытие бозона Хиггса



Открытие бозона Хиггса

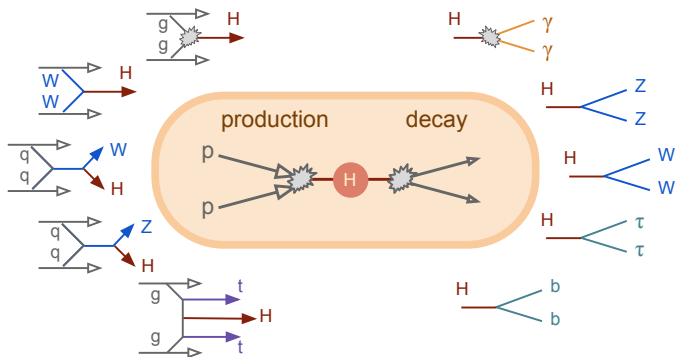
4 июля 2012 г.: ATLAS+CMS объявили о **полноценном открытии!**

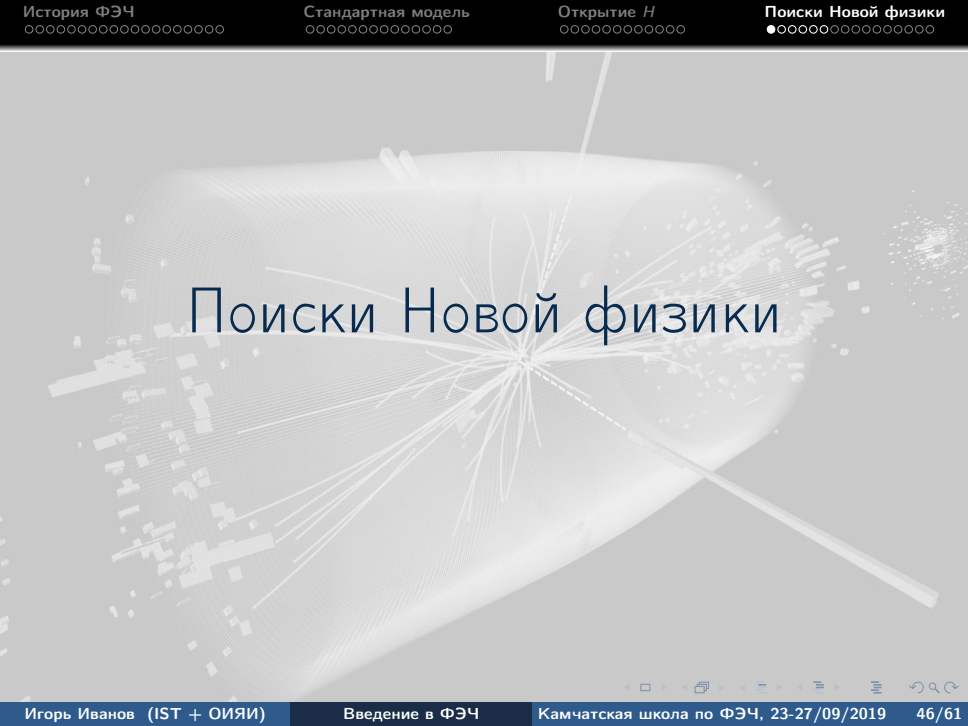


Это «**третий тип частиц**»: не частицы материи, не частицы-переносчики сил, а нечто **фундаментально новое**.

Рождение и распад бозона Хиггса

2012: началась **хиггсовская эра**.



A detailed visualization of a particle collision event, likely from a particle detector. It shows a central point of interaction with numerous tracks radiating outwards, representing the paths of particles produced in the collision. The tracks are depicted as thin, glowing lines, some solid and some dashed, against a dark, textured background that resembles a detector's internal structure or a simulated environment. The overall image has a scientific and futuristic feel, with a focus on the complex patterns created by high-energy collisions.

Поиски Новой физики

Как ищут Новую Физику

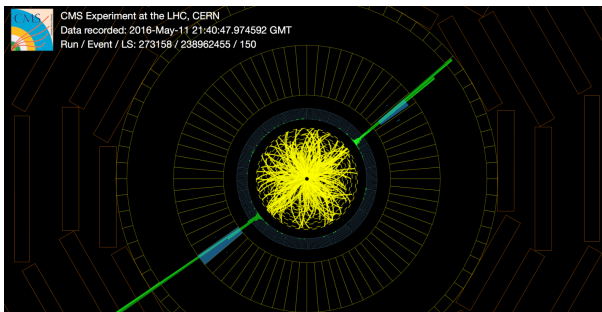
Новая физика = любые частицы и явления, не вписывающиеся в СМ.

Три основных пути:

- **Слепые поиски**: изучаем все основные процессы на **максимальных энергиях**, ищем **любые отклонения** от фона,
- **Прицельные поиски**: ищем новые явления в **конкретных** процессах, предсказанные моделями Новой физики,
- **Сверхвысокая точность**: измеряем СМ процессы с максимальной точностью и ищем мельчайшие **отклонения** от предсказаний СМ.

Столкновения при высоких энергиях

Типичный вид события:

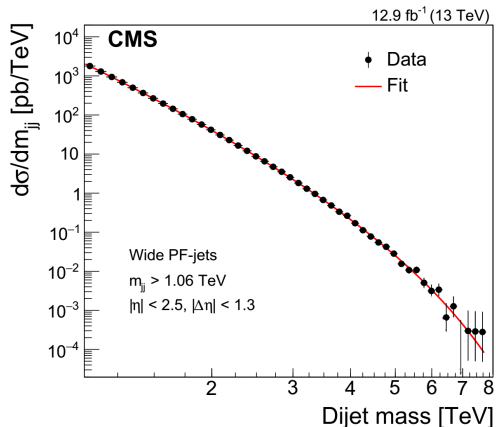
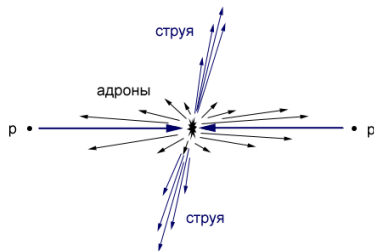


Одиночное событие еще ни о чем не рассказывает. Необходимо:

- (1) набрать статистику и изучать **распределения**,
- (2) сравнить результаты с теорией или моделью.

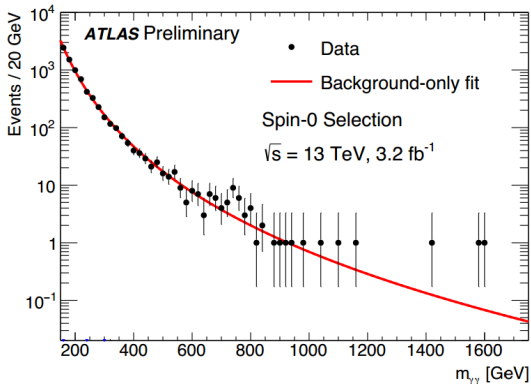
Двухструйные события

Пример от CMS (2016): рождение двух адронных струй, **распределение по инвариантной массе**



Двухфотонная сенсация при 750 ГэВ

15 декабря 2015 г.: намек на новую частицу с массой 750 ГэВ!

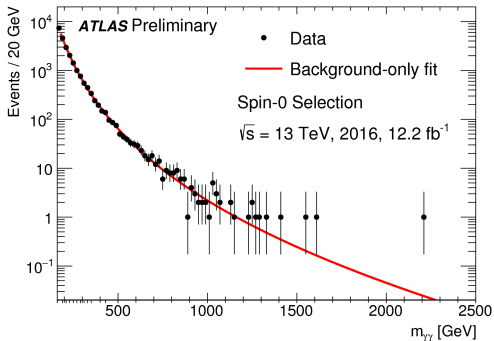


Теоретики ринулись объяснять ее: > 400 статей за полгода!

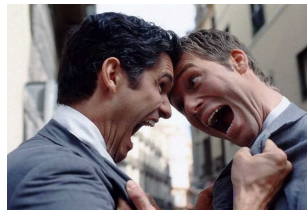
Обескураживающие результаты 2016 года

Август 2016: статистика в 4 раза больше.

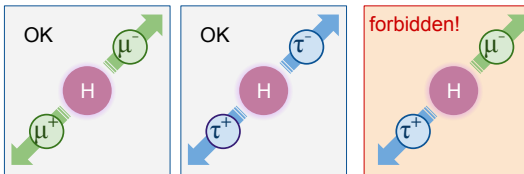
Всплеск при 750 ГэВ **исчез!**



Бурные дебаты
среди теоретиков



«Невозможный» распад бозона Хиггса



Распад на лептоны разного сорта $H \rightarrow \mu\tau$ запрещен в СМ!

Но он возможен в моделях Новой Физики с **несколькими бозонами Хиггса** $\rightarrow$ конкретное предсказание целого класса моделей.

Достоверное обнаружение $\Rightarrow$ открытие Новой Физики $\Rightarrow$



«Невозможный» распад бозона Хиггса

Сеанс LHC Run 1 (2010-2012): поиск распада $H \rightarrow \mu\tau$ на ATLAS и CMS.

- CMS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84^{+0.39}_{-0.37})\%$.
- ATLAS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$.
- Общая статистическая значимость: **отклонение от нуля на 2.6σ** .

Ажиотаж среди теоретиков: намек на **новые бозоны Хиггса?!**

Опубликовано ≈ 200 **теоретических статей** в 2015–2016 годах.

Сеанс LHC Run 2 (2015-2018): все намеки исчезли.

Текущее **ограничение сверху**: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$.

«Невозможный» распад бозона Хиггса

Сеанс LHC Run 1 (2010-2012): поиск распада $H \rightarrow \mu\tau$ на ATLAS и CMS.

- CMS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84^{+0.39}_{-0.37})\%$.
- ATLAS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$.
- Общая статистическая значимость: **отклонение от нуля на 2.6σ** .

Ажиотаж среди теоретиков: намек на **новые бозоны Хиггса?!**

Опубликовано ≈ 200 **теоретических статей** в 2015–2016 годах.

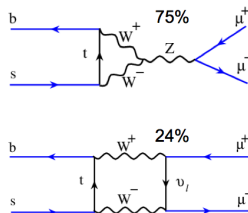
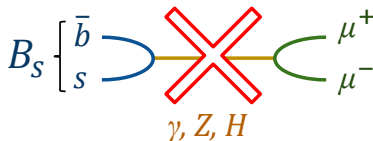
Сеанс LHC Run 2 (2015-2018): все намеки исчезли.

Текущее **ограничение сверху**: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$.

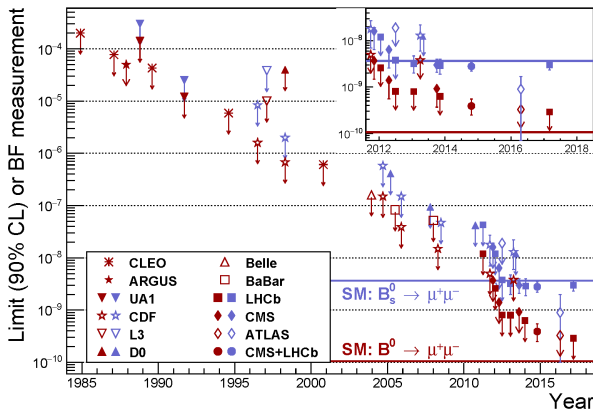
Распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ исключительно редкий в СМ:

$$\text{Br}_{SM}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.66 \pm 0.23) \cdot 10^{-9}.$$



Распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$



Драма 2011 года: сенсация от CDF $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu\mu) = (18 \pm 10) \cdot 10^{-9}$; почти сразу опровергнута CMS и LHCb.

Распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

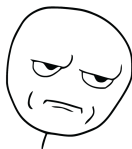
Путь к открытию:

- 2012: первые намеки от LHCb,
- 2013: указание на существование от LHCb+CMS,
- 2014: полноценное открытие LHCb+CMS.

Последнее измерение от LHCb:

$$\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0 \pm 0.6_{-0.2}^{+0.3}) \cdot 10^{-9},$$

что согласуется с ожиданиями СМ.



Полулептонные распады B -мезонов

Несколько подозрительных отклонений в редких распадах B -мезонов:

- $\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau \bar{\nu} / \bar{B} \rightarrow D^{(*)} \mu \bar{\nu}$: отклонение $\approx 4\sigma$.
- $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$: расхождение на 3.4σ ,
- $B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$: расхождение на 3.5σ ,
- $B \rightarrow K \mu \mu / B \rightarrow K e e$: отклонение на 2.6σ .

Сейчас это самая большая надежда на открытие Новой Физики.

Но!! большинство результатов — **все еще на статистике Run 1** → с нетерпением ждем результаты LHC Run 2 и детектора Belle II!



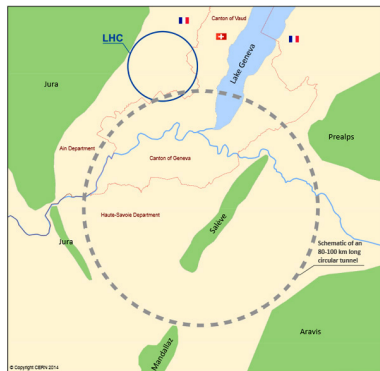
Планы на будущее

Жизнь после LHC

Исследования на LHC продлятся до 2037 года.

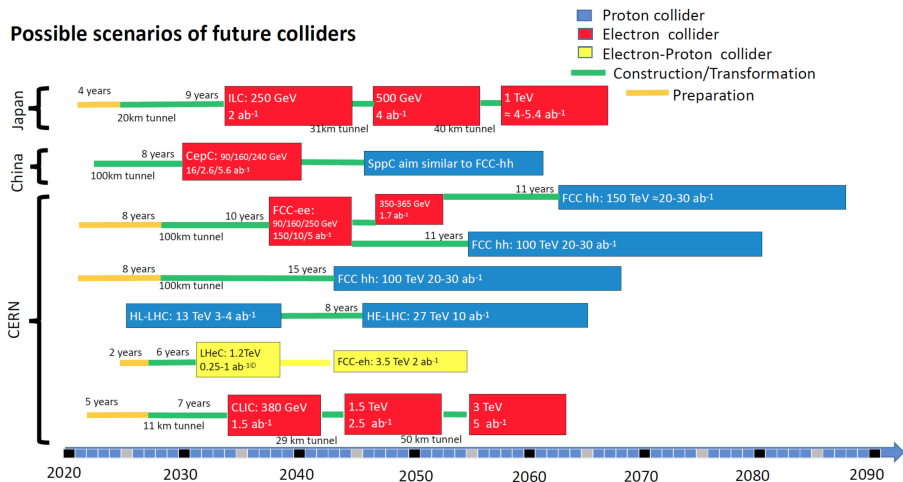
Возможный будущий коллайдер: **Future Circular Collider**

- окружность: 98 км
- энергия столкновений:
100 TeV ($7 \times E_{LHC}$),
- интегральная светимость:
 $20\text{--}30 \text{ ab}^{-1}$ ($10 \times L_{LHC}$),
- магнитное поле в диполях:
16 Т ($2 \times B_{LHC}$),
- потери на синхротронное излучение:
мегаватты ($1000 \times P_{LHC}$),
- готовность технологий:
2040-е годы.



Жизнь после LHC

Possible scenarios of future colliders



plot by Ricardo Gonalo, LIP News, n.16



Путешествие продолжается!