Антиматерия

Владислав Балагура, ИТЭФ, ЦЕРН,

3 ноября 2011

Ангелы и демоны: правда и вымысел

Детективная история о похищении1 грамма антивещества из "секретных“ лабораторий ЦЕРНа с целью взорвать Ватикан.

CERN AC/DI/MM 3324-07 07-1998

Что правда, а что вымысел?

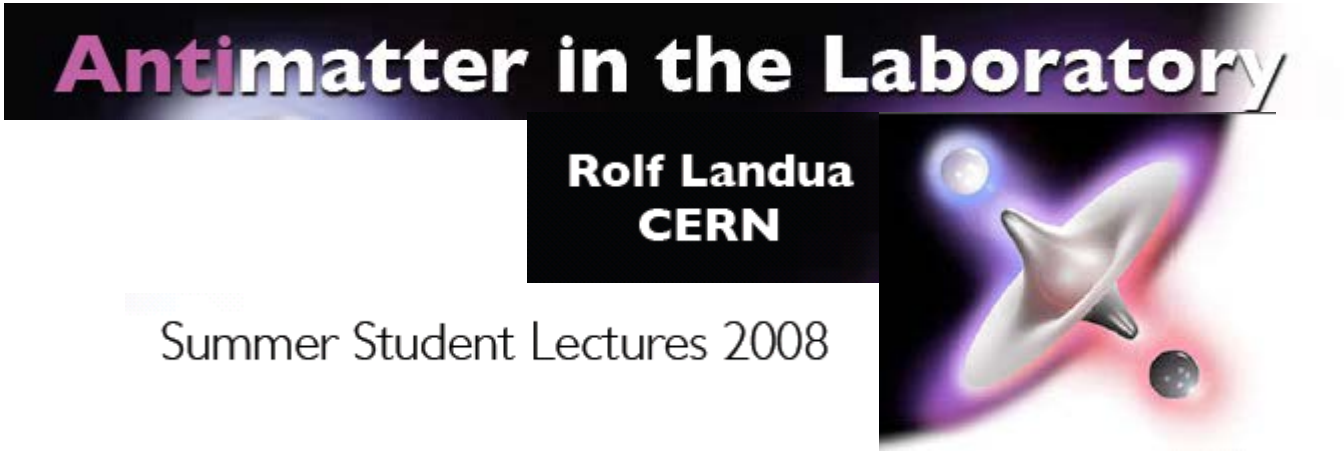
1. Существует ли антиматерия?
2. Можно ли из неё получать энергию?
3. Ведутся ли секретные разработки по созданию бомбы из антивещества?
4. Что еще можно делать с антивеществом?
5. Зачем ЦЕРН производит антиматерию?

В дальнейшем использованы слайды лекций

The Violation of Symmetry between Matter and Antimatter

Andreas Höcker, CERN

CERN Summer Student Lectures, August 7-10, 2007



Предсказание античастиц П.А.Дираком

Специальная теория относительности

+

квантовая механика

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$

$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} e^- \uparrow \\ e^- \downarrow \\ e^+ \uparrow \\ e^+ \downarrow \end{pmatrix}$$

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi = 0$$

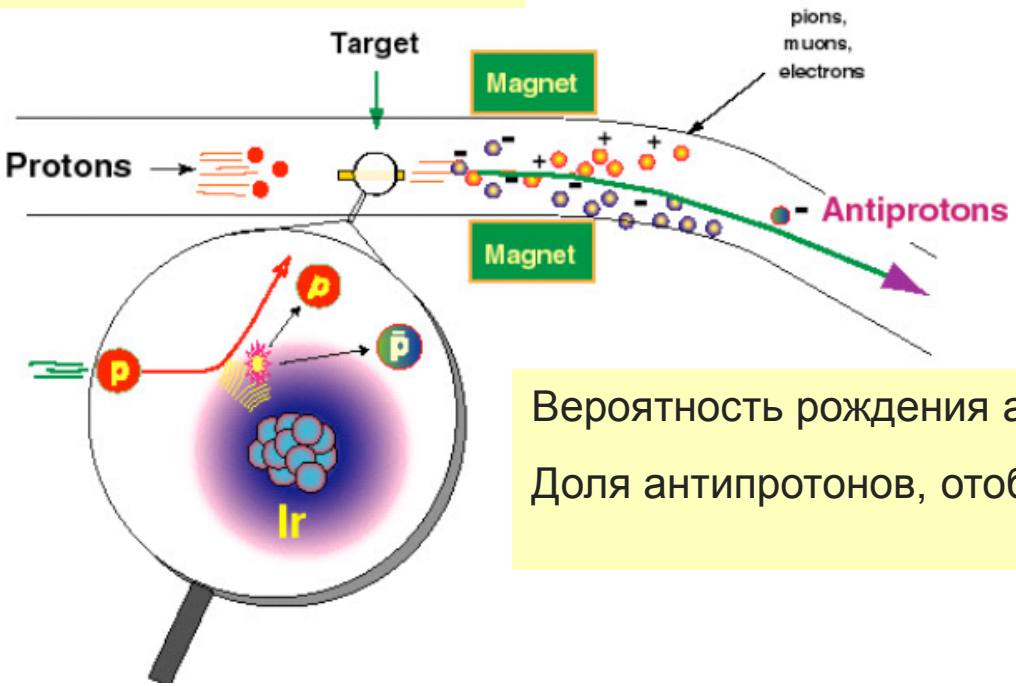
Открытие антинейтрона в 1956 г.

Реакция перезарядки антипротона с протоном с рождением антинейтрона-нейтрона в пропановой пузырьковой камере
(источник: E.G. Segrè, Нобелевская лекция)

Антивещество в ЦЕРНе:
фабрика атомов
анти-водорода =
= антипротон + позитрон

Принцип получения антипротонов

Доля успешно ускоренных протонов ~10^{-3}



Вероятность рождения антипротона ~10^{-4}

Доля антипротонов, отобранных в выходной пучок ~10^{-2}

Один антипротон получается из ~10^{9} протонов.

Максимальная производительность 200 000 000 000 000 антипротонов / год

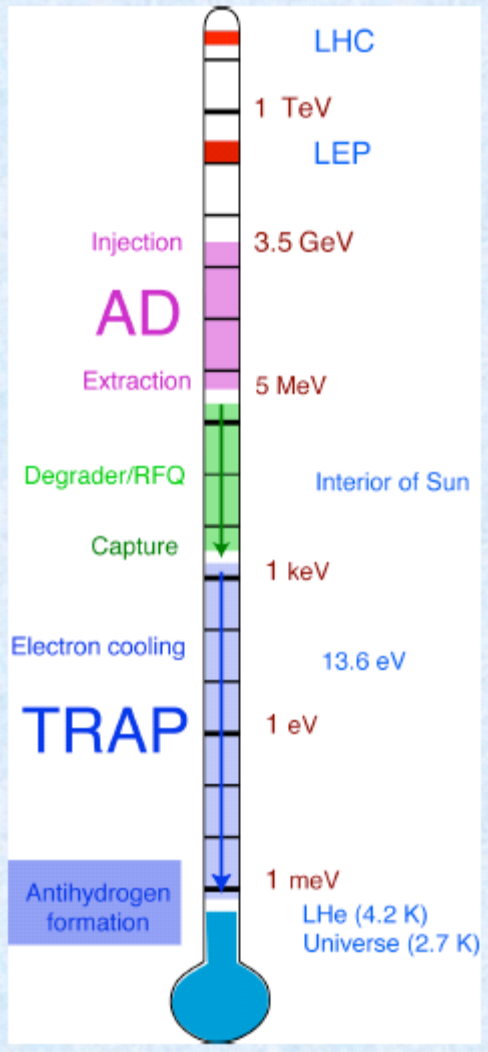
(что составляет 0.3 нано-грамм / год)

Как соединить антипротоны с позитронами?

Антипротоны и позитроны при рождении получаются "горячими".

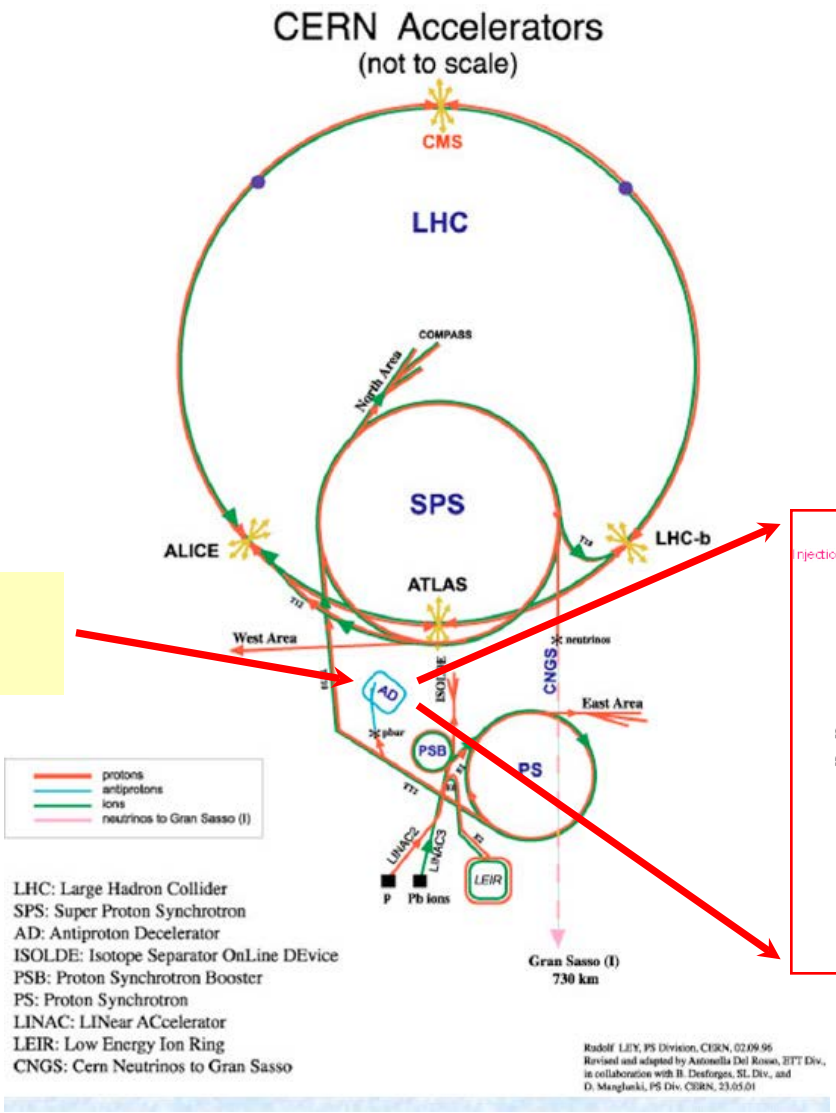
Антиводород - слабо связанная система, энергия 1S-уровня 13.6 эВ.

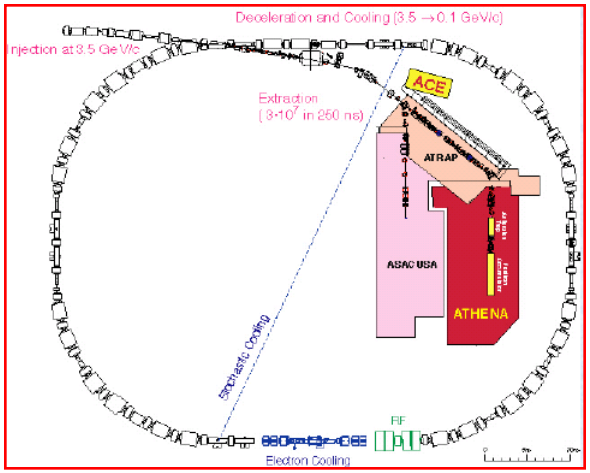
Чтобы из горячей плазмы начали образовываться нейтральные анти-атомы, необходимо ее предварительно "остудить".



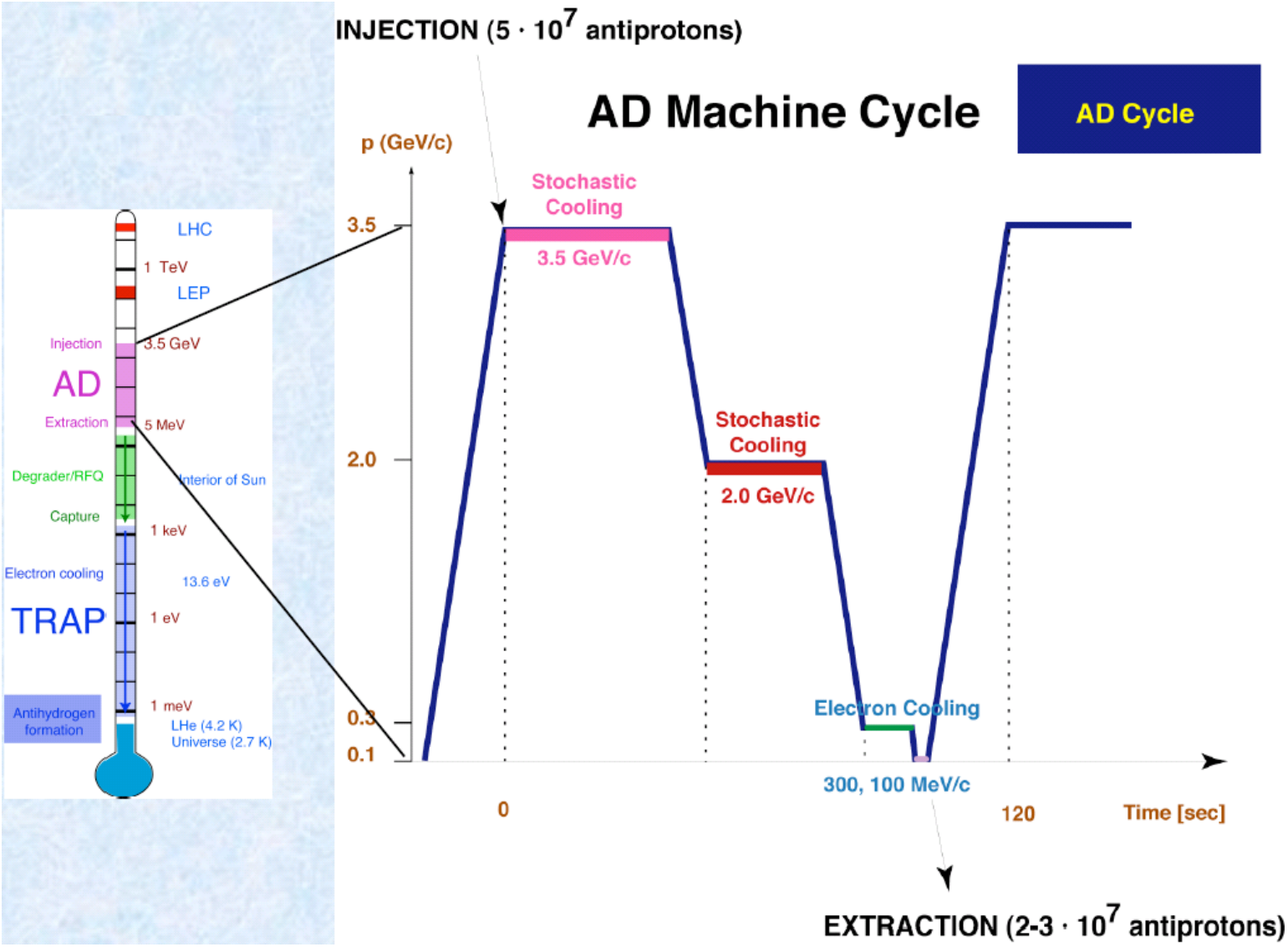
ЦЕРН - властелин колец

Антипротонный
замедлитель (AD)





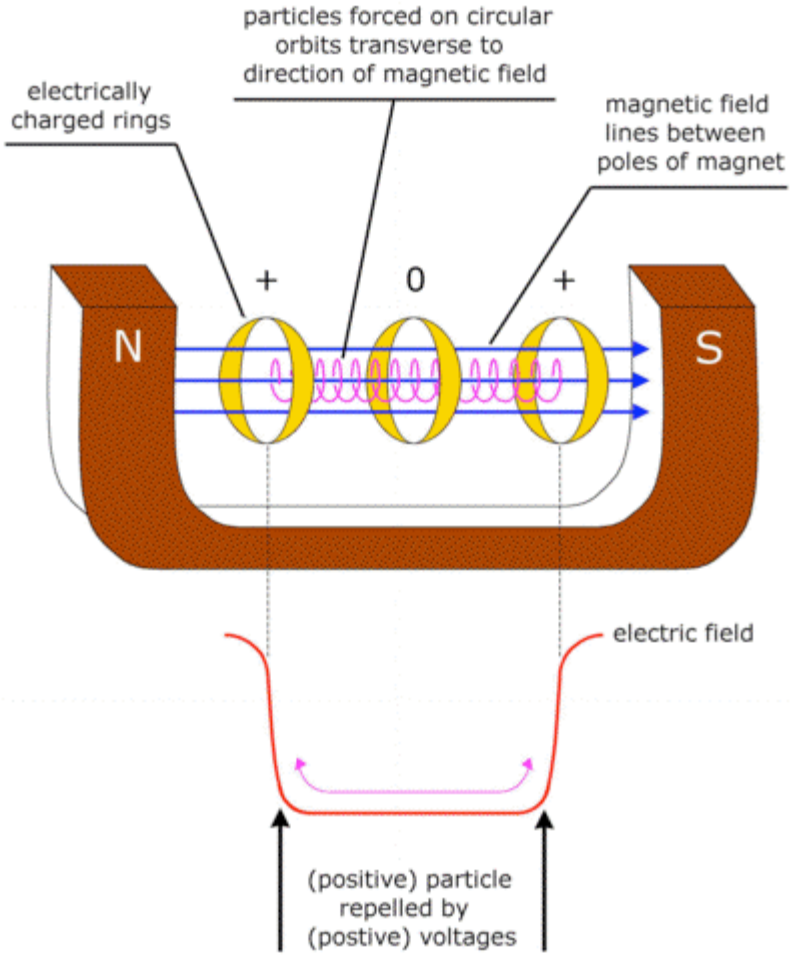
"Охлаждение" в антипротонном замедлителе (AD)



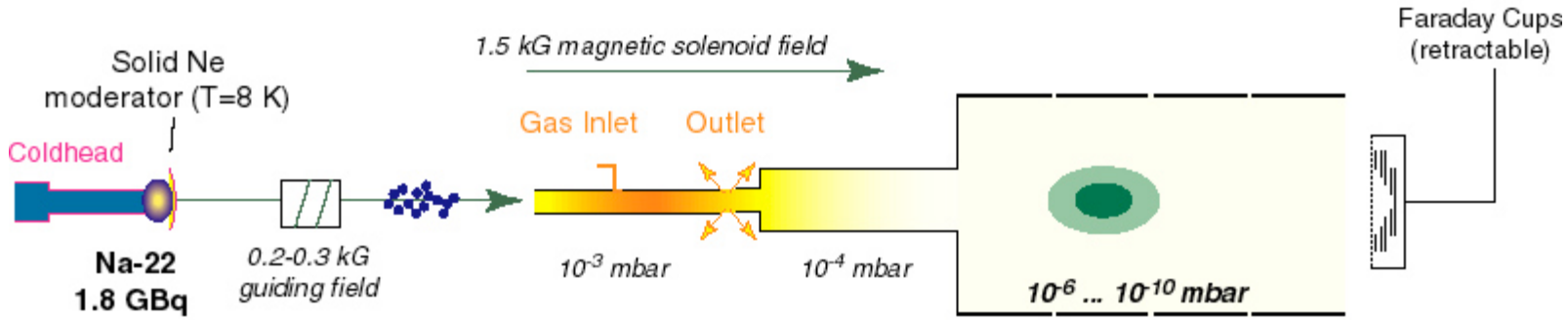
Антипротонный замедлитель

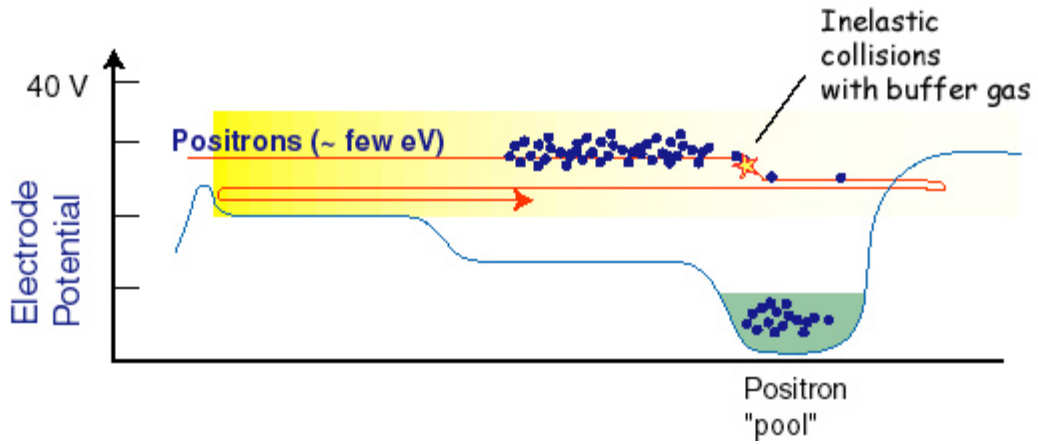
Принцип работы магнитной ловушки

После замедления антипротоны захватываются магнитной ловушкой



Получение позитронов из радиоактивного источника





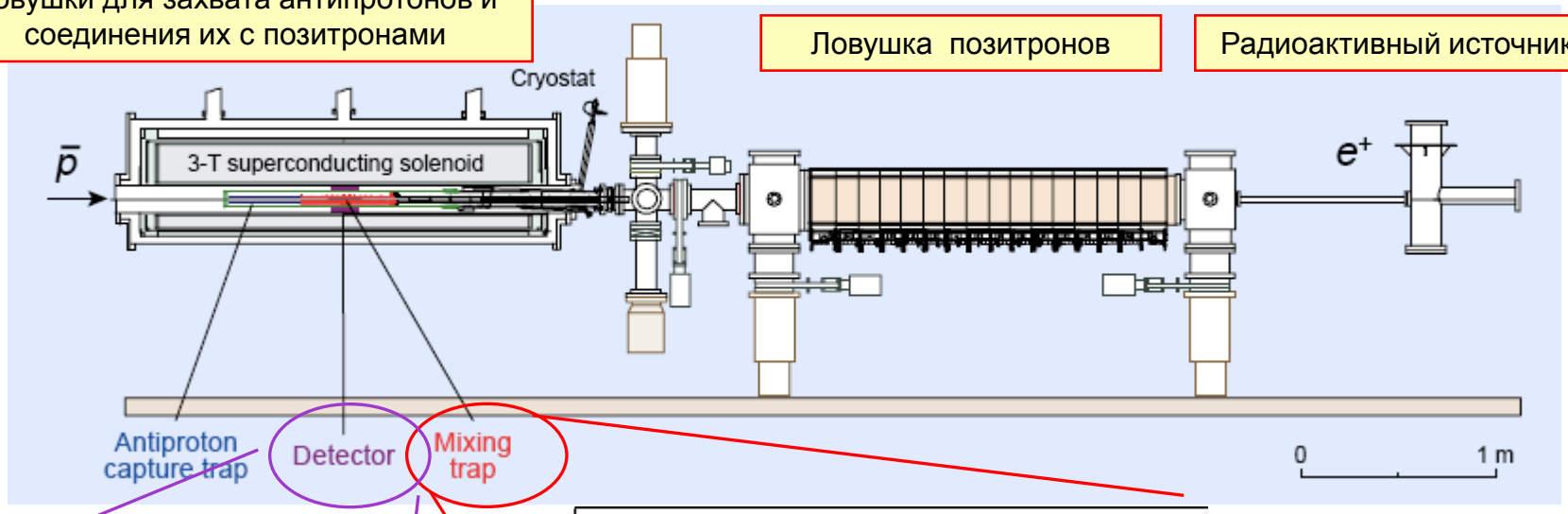
100 млн позитронов за 2 минуты!

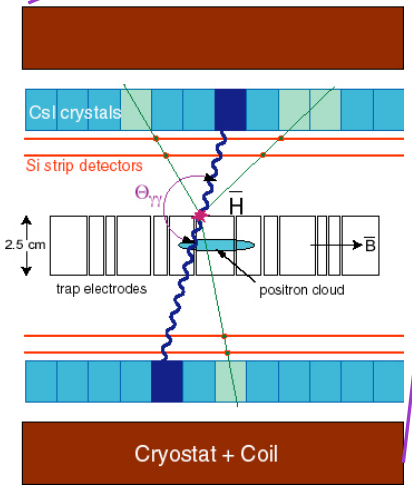
Рождение атомов анти-водорода

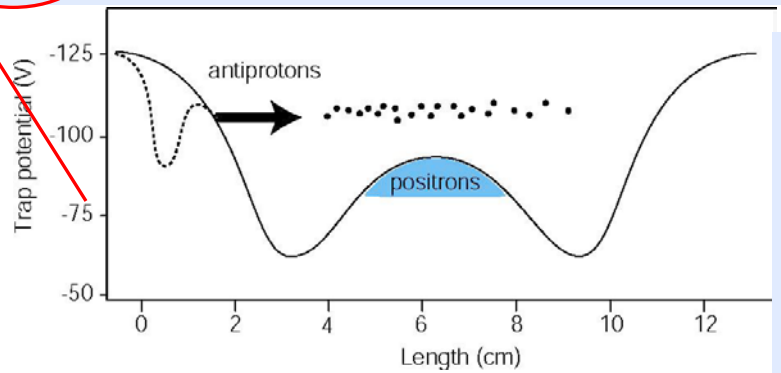
Ловушки для захвата антипротонов и соединения их с позитронами

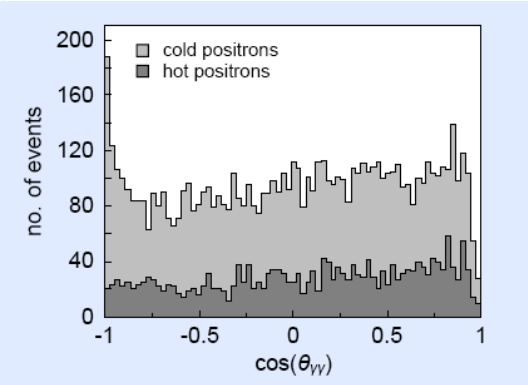
Ловушка позитронов

Радиоактивный источник ^{22}Na





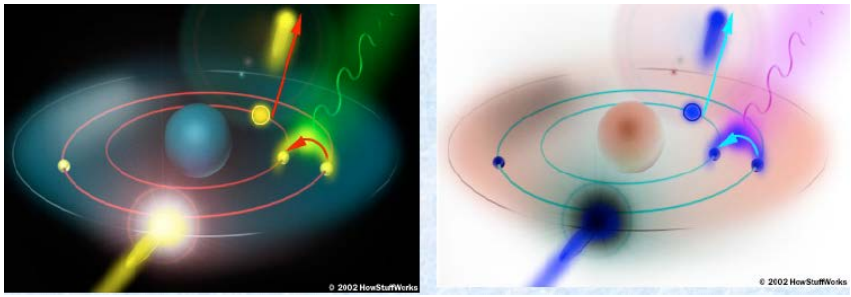




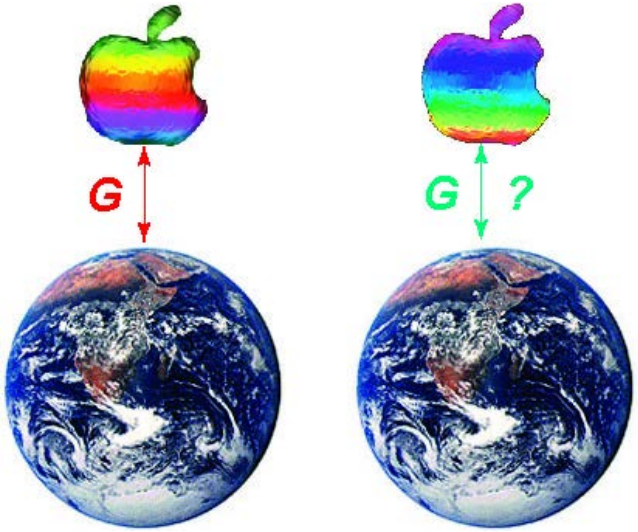
Было получено > 1 000 000 атомов анти-водорода.

[M. Amoretti *et al.*, Nature **419** (2002) 456]

Что дальше?

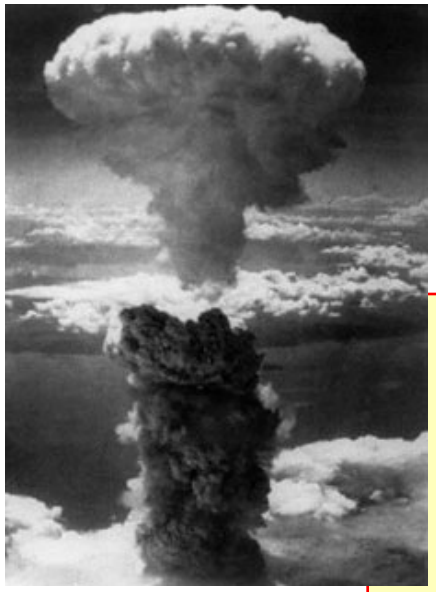


Изучение спектров антиводорода. Есть ли отличия с водородом?



Законы гравитации для антивещества?

Ангелы и Демоны



Бомба из антивещества?

0.5 г антивещества + 0.5 г вещества = 20 ктонн ТНТ = $8 \cdot 10^{13}$ Дж

Необходимая для производтства 0.5 г антивещества энергия (к.п.д. 10^{-9}): ~ $4.5 \cdot 10^{22}$ Дж

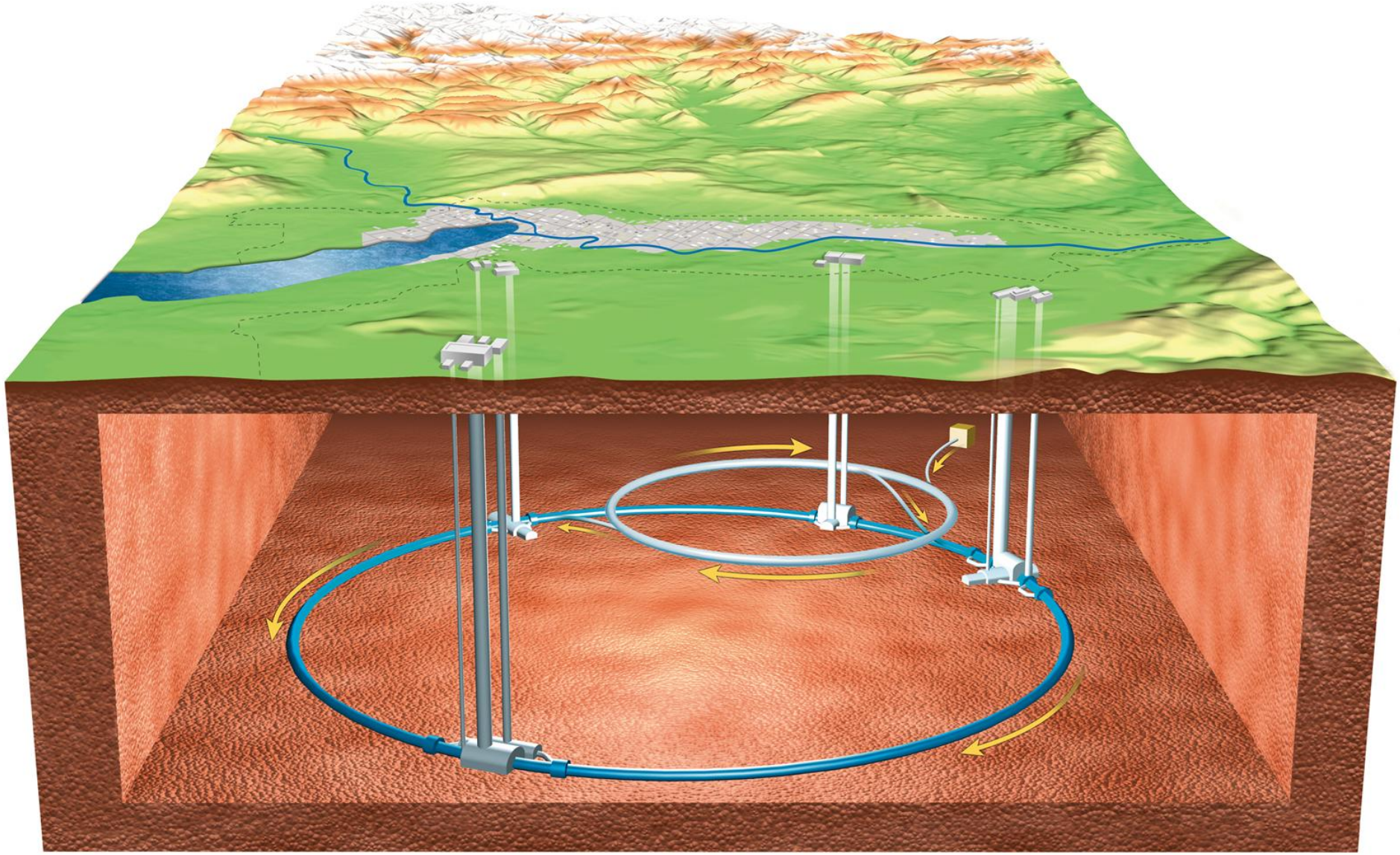
Цена 1 кВт·ч (со скидкой для ЦЕРНа): 0.1 евро

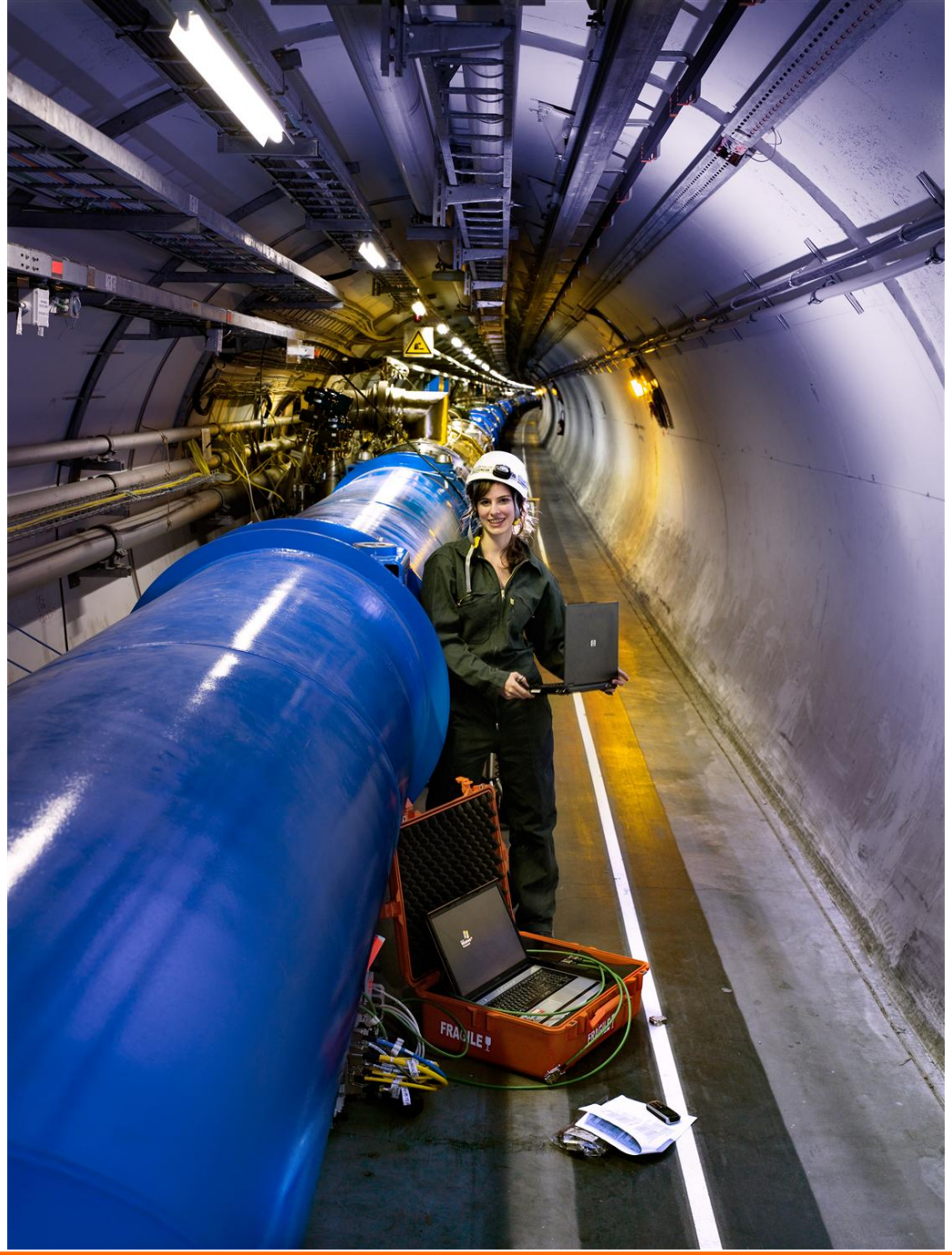
Полная цена ~10^{15} Евро

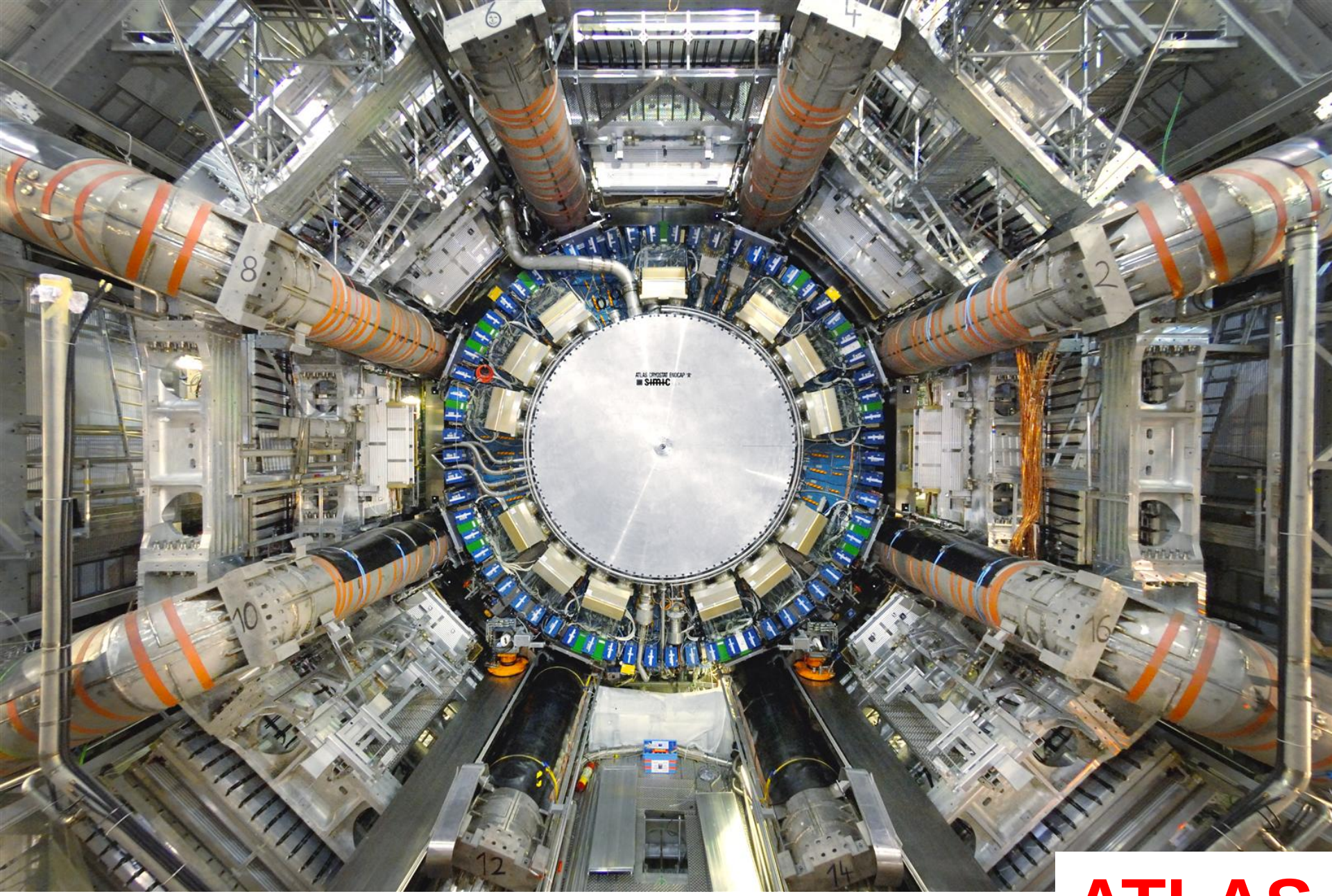
Максимальная производительность ЦЕРНа за год: ~10^{14} антипротонов

Полное время изготовления: ~ 3 миллиарда лет

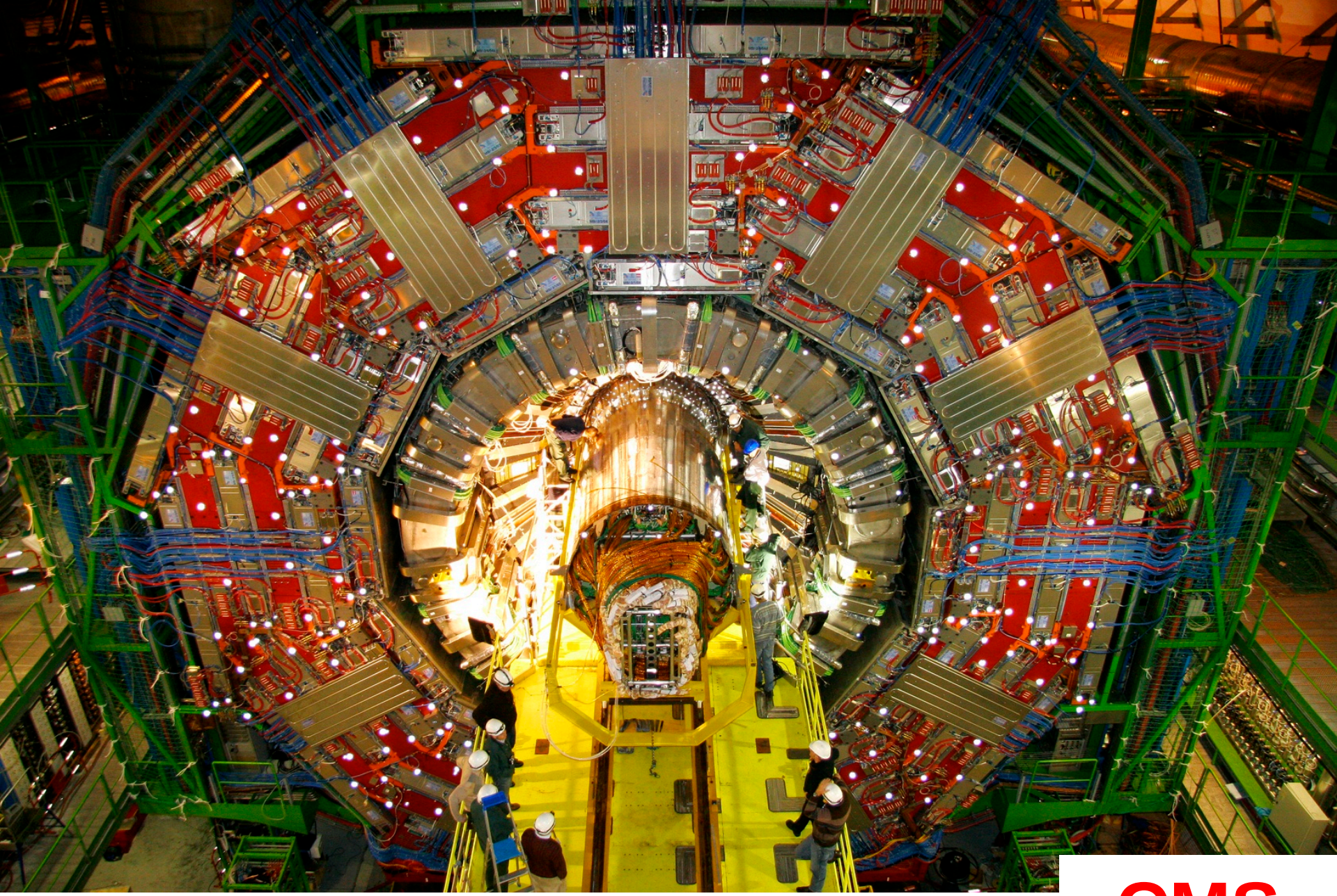
Как антивещество изучается на Большом Адронном Коллайдере?




FRAGILE !

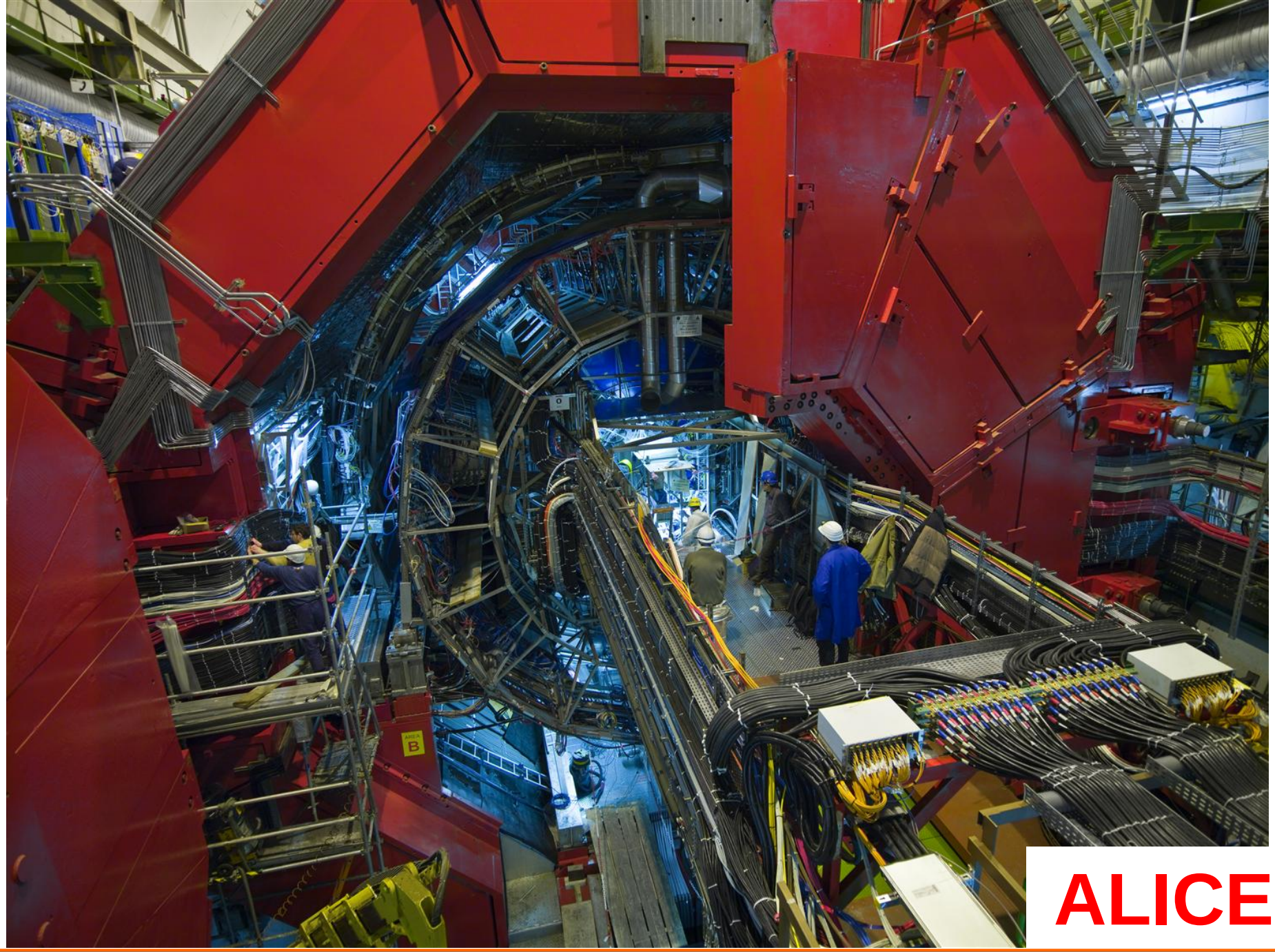


ATLAS

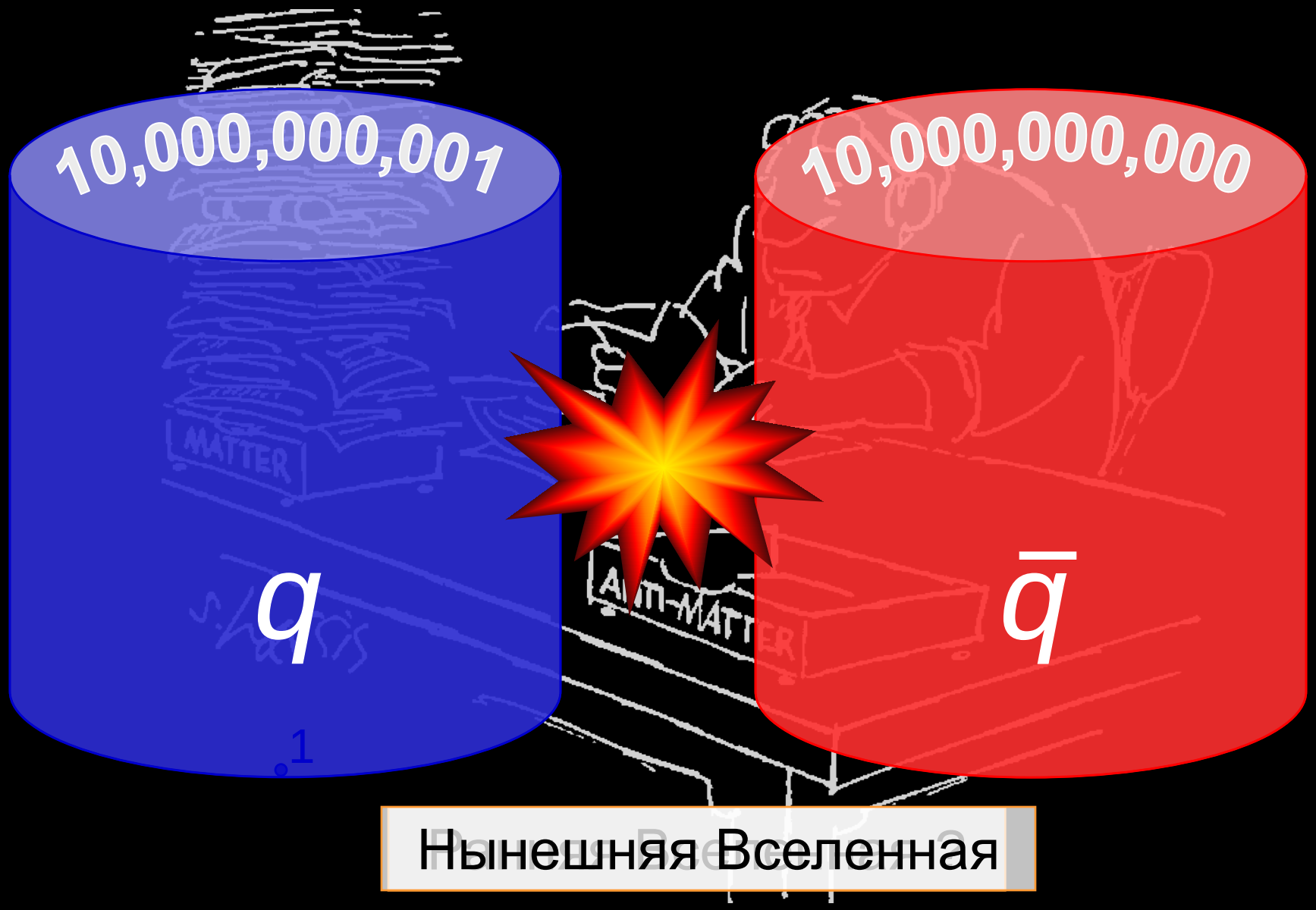


CMS

LHCb


ALICE

Асимметрия между материей и антиматерией

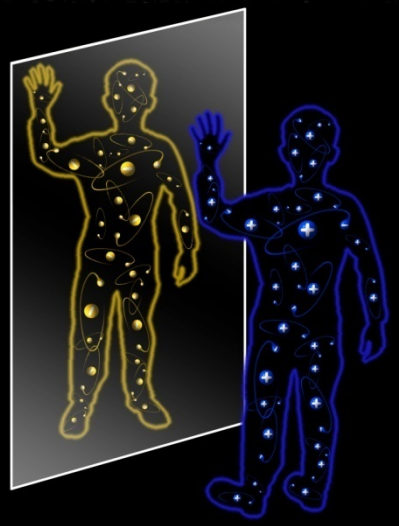


Нынешняя Вселенная

Условия возникновения нашей Вселенной и отсутствия антиматерии

Сахаров, 1967

1. Нарушение барионного числа → новая физика !
2. Нарушение зарядовой и CP-четностей → (возможно) новая физика !
3. Отклонение от термодинамического равновесия (нестационарная система)



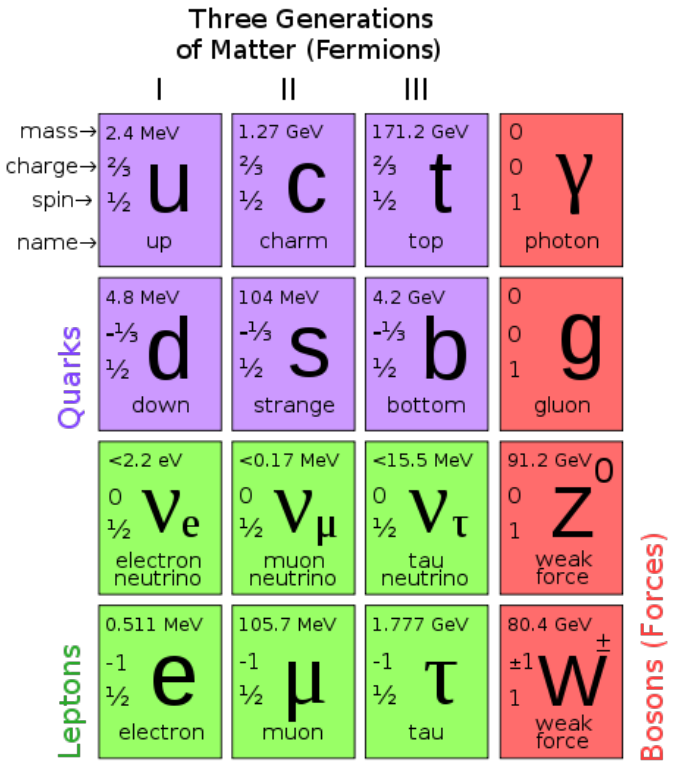
Антиматерия в нашей Вселенной не обнаружена

Теория элементарных частиц: Стандартная Модель

- Силы и переносчики взаимодействий

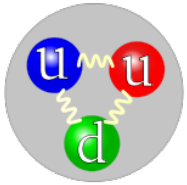
Электромагнитные	⇔	Фотоны (γ)
Сильные	⇔	Глюоны (g)
Слабые	⇔	Нейтральные (Z^0) и заряженные ($W^{\pm}$) бозоны

- Лептоны и кварки объединяются в "поколения"



Например:

протон =



Симметрии

1. Примеры симметрий:
   - Люди примерно право-лево симметричны
   - Сфера симметрична относительно вращений

2. Законы природы симметричны относительно некоторых математических операций

   т.е. наблюдатель не может "вычислить", была ли применена такая операция

Непрерывные симметрии и законы сохранения

- Из классической механики мы знаем, что каждому непрерывному преобразованию, оставляющему Лагранжиан инвариантным, соответствует закон сохранения (теорема Нётер, 1915 г.)

Инвариантность относительно	сдвигов по времени	сдвигов в пространстве	поворотов пространства
Сохраняющаяся величина	Энергия	Импульс	Угловой момент

Никаких нарушений этих симметрий до сих пор не обнаружено

Дискретные симметрии

Следующие дискретные преобразования очень важны в физике элементарных частиц:

Проверка этих симметрий привела к очень неожиданным результатам!

Изменение всех зарядов (например, электрического) на противоположные

$$C\left|e_L^-\right\rangle = \left|e_L^+\right\rangle$$
$$C\left|u\right\rangle = \left|\bar{u}\right\rangle$$
$$C\left|d\right\rangle = \left|\bar{d}\right\rangle$$
$$C\left|\pi^0\right\rangle = +\left|\pi^0\right\rangle$$

- Изменение направления течения времени ***T***

Время *t* заменяется на -*t* во всех уравнениях

T -четность: если движение системы разрешено в прямом направлении времени, то оно разрешено и в обратном

C, P, T преобразования и *CPT* теорема

CPT теорема (1954): “**Любая разумная Лоренц-инвариантная квантовая теория инвариантна относительно одновременного применения всех трех преобразований *C*, *P* и *T*”**

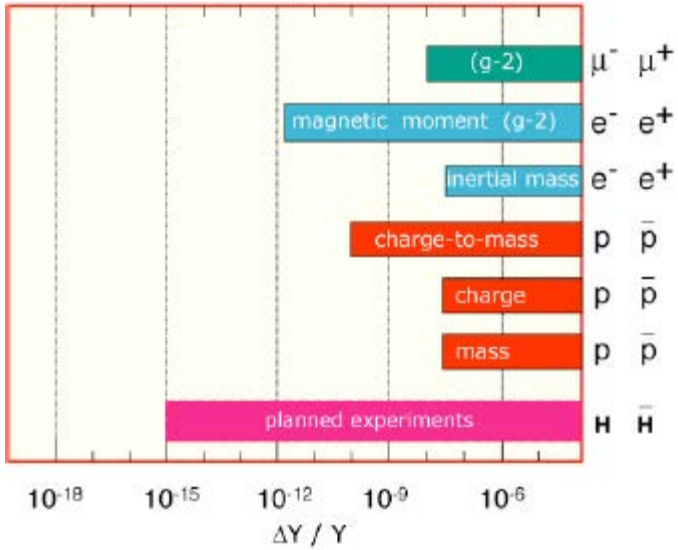
G. Lüders, W. Pauli; J. Schwinger

Величина	*P*	*C*	*T*
Пространственный вектор	$-\boldsymbol{x}$	$\boldsymbol{x}$	$\boldsymbol{x}$
Время	t	t	$-t$
Импульс	$-\boldsymbol{p}$	$\boldsymbol{p}$	$-\boldsymbol{p}$
Спин	$\boldsymbol{s}$	$\boldsymbol{s}$	$-\boldsymbol{s}$
Електрическое поле	$-\boldsymbol{E}$	$-\boldsymbol{E}$	$\boldsymbol{E}$
Магнитное поле	$\boldsymbol{B}$	$-\boldsymbol{B}$	$-\boldsymbol{B}$

Фундаментальные следствия:

Частицы и античастицы имеют **одинаковые массы, времена жизни, магнитные моменты и противоположные квантовые числа**

Прямые экспериментальные проверки



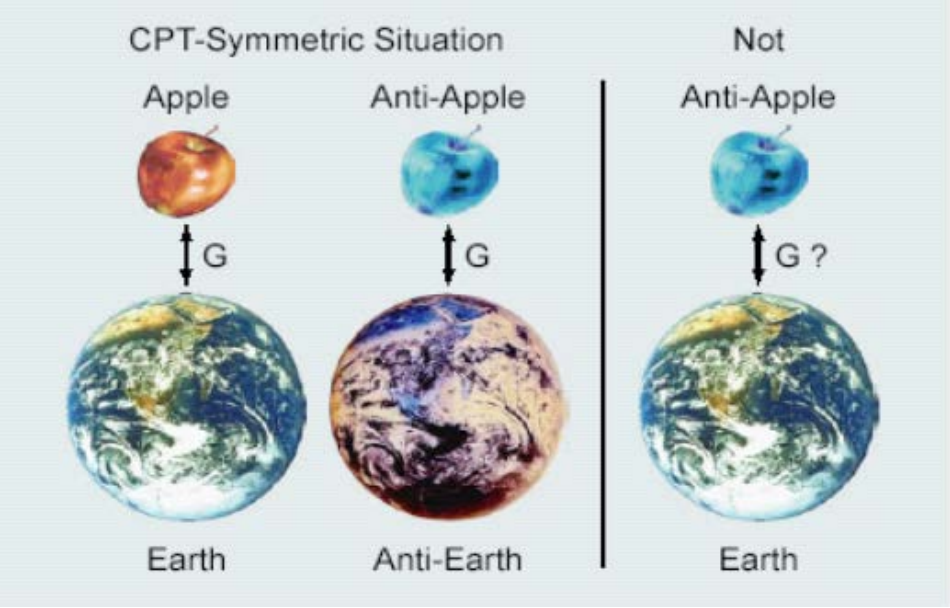
Прямые проверки подтверждают CPT с точностью 10^{-12},

сравнение спектров атомов водорода и анти-водорода сможет улучшить точность до 10^{-15}

Используя предположения о природе К-мезонов: $\left|\left(m_{K^0} - m_{\bar{K}^0}\right)/m_{K^0}\right| < 10^{-18}$

Гравитация и антиматерия: притяжение или отталкивание?

Гравитационное взаимодействие материи и антиматерии нельзя вывести из *CPT*-теоремы



Общепринятое мнение: *гравитационная масса = инерциальной массе*

Тогда антиматерия должна притягиваться (а не отталкиваться) как и материя.

Но это никогда не проверялось экспериментально!

Если CPT сохраняется, то как насчет C, P и T?

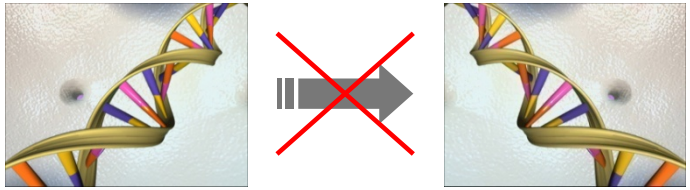
- Пространственная четность часто нарушается в макроскопическом мире

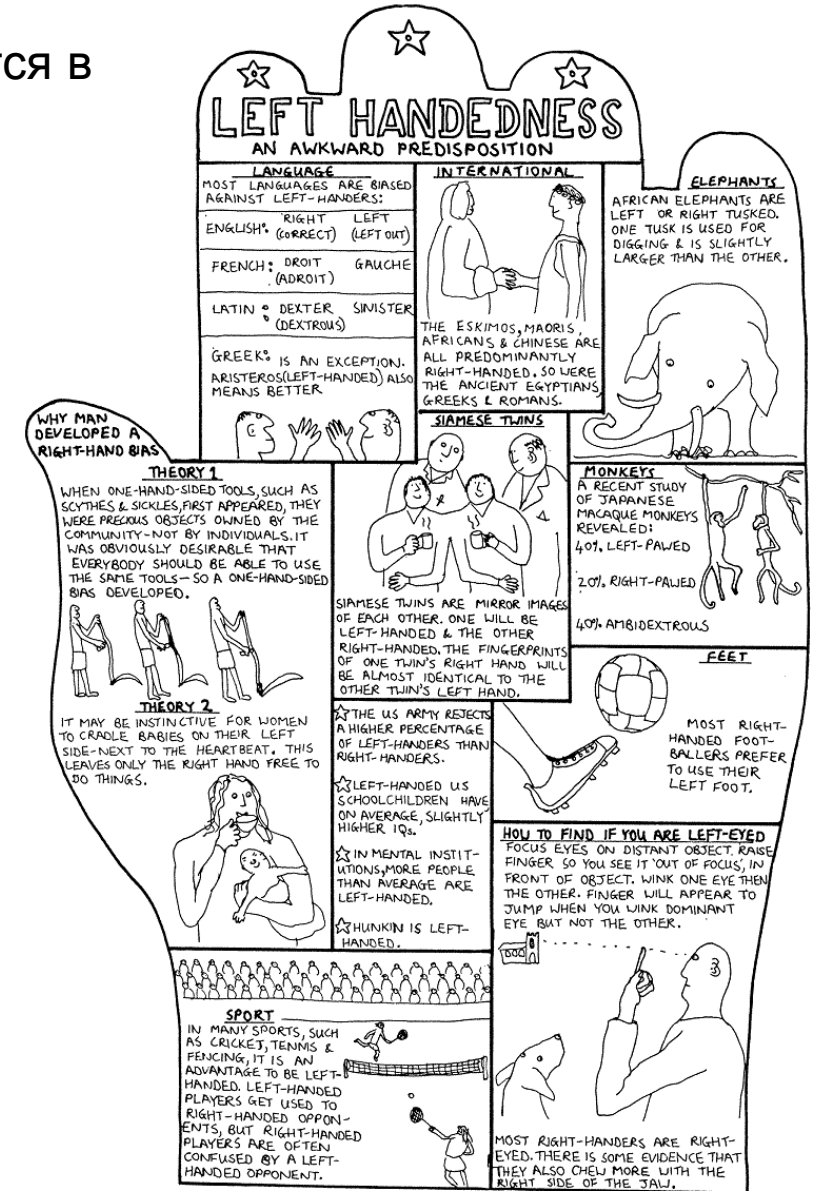
	Левши	Правши	Смешанные
Руки	5%	72%	22%
Ноги	4%	46%	50% (?)
Глаза	5%	54%	41%
Уши	15%	35%	60%

Porac C & Coren S. Lateral preferences and human behavior. New York: Springer-Verlag, 1981

- Около 25% людей ездят по левой стороне

- Все молекулы ДНК в природе имеют одну (из двух возможных) ориентацию



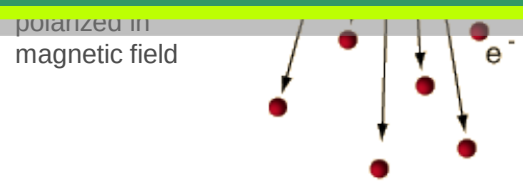


And … the Surprise in Weak Interaction !

Т.Д.Ли и С.Н.Янг в 1956 г. обратили внимание, что P-четность до этого момента не проверялась для слабых взаимодействий. С.Ву поставила эксперимент и в 1957 г. обнаружила нарушение

Было обнаружено, что P-четность в слабых взаимодействиях всегда нарушается, причем максимально (на 100%)

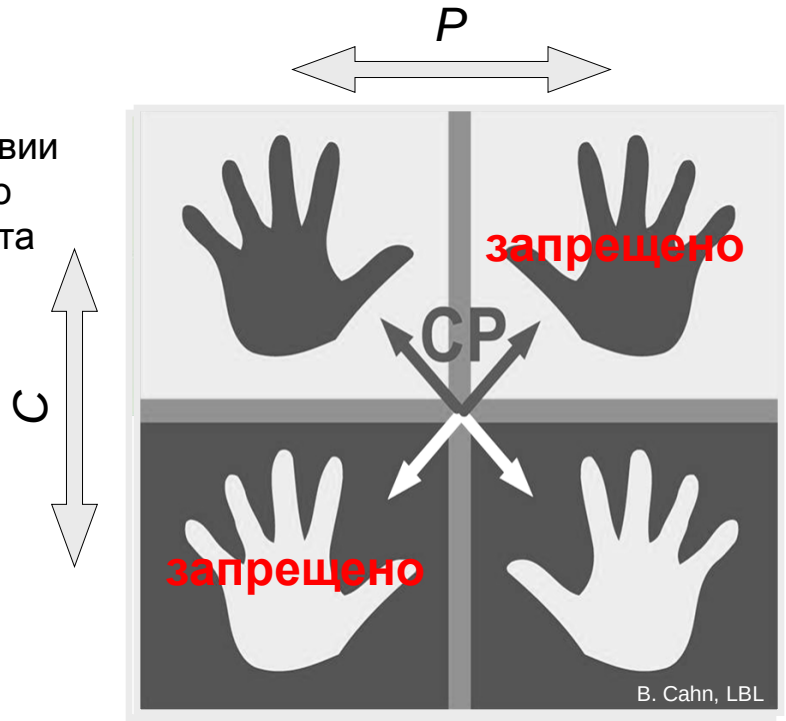
импульс преобразуются при отражении по-разному, значит, их корреляция означает нарушение P-четности!



Слабые взаимодействия нарушают и C-, и P-четности!

- Например: $\mu^-_{\text{polarized}} \to e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$

Во взаимодействии участвует только левая компонента мюона



или правая компонента анти-мюона

CP

Открытие CP-нарушения

Открытие CP-нарушения

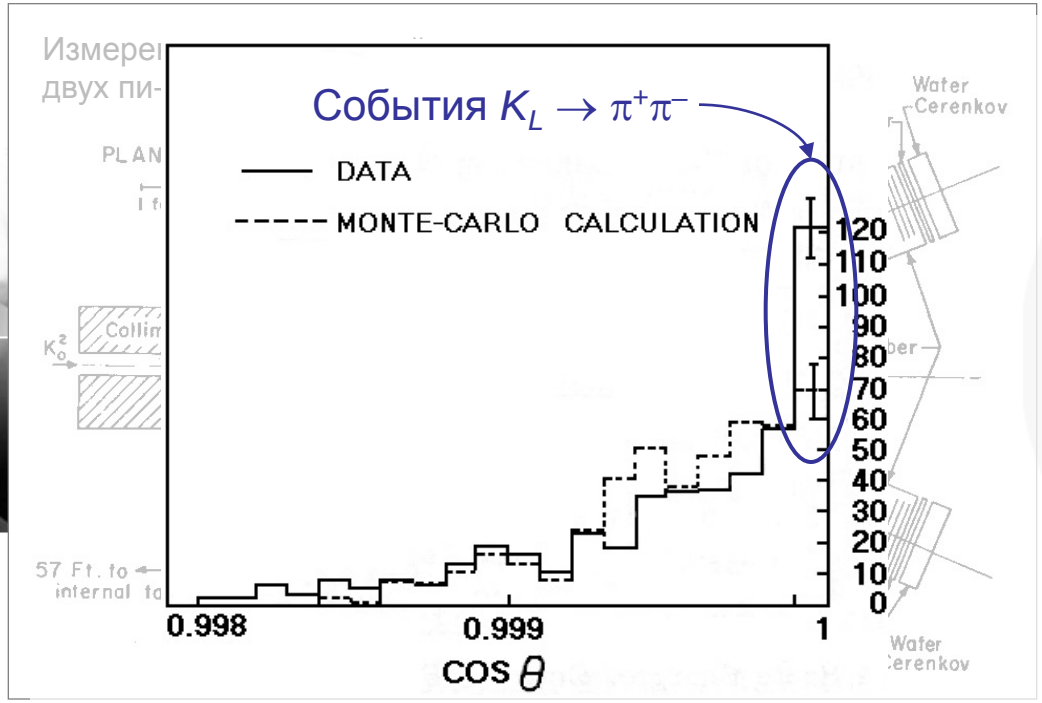
- Есть два типа нейтральных К-мезонов: коротко- и долгоживущие, K_L и K_S

  Первые быстро распадаются на 2 пи-мезона, $K_S \to (\pi\pi)^0$, вторые же обычно распадаются на 3, $K_L \to (\pi\pi\pi)^0$, что подавлено по энергии, и их распад протекает в 580 раз медленнее. Такое поведение объясняется различием в CP-четностях: у 2-х пи-мезонов (а, значит, и у K_S) она положительная, у 3-х (и K_L) - отрицательная.

- Однако, Кронин, Фитч и другие обнаружили в 1964 г. CP-нарушающий распад $K_L \to \pi^+\pi^-$

Jim Cronin

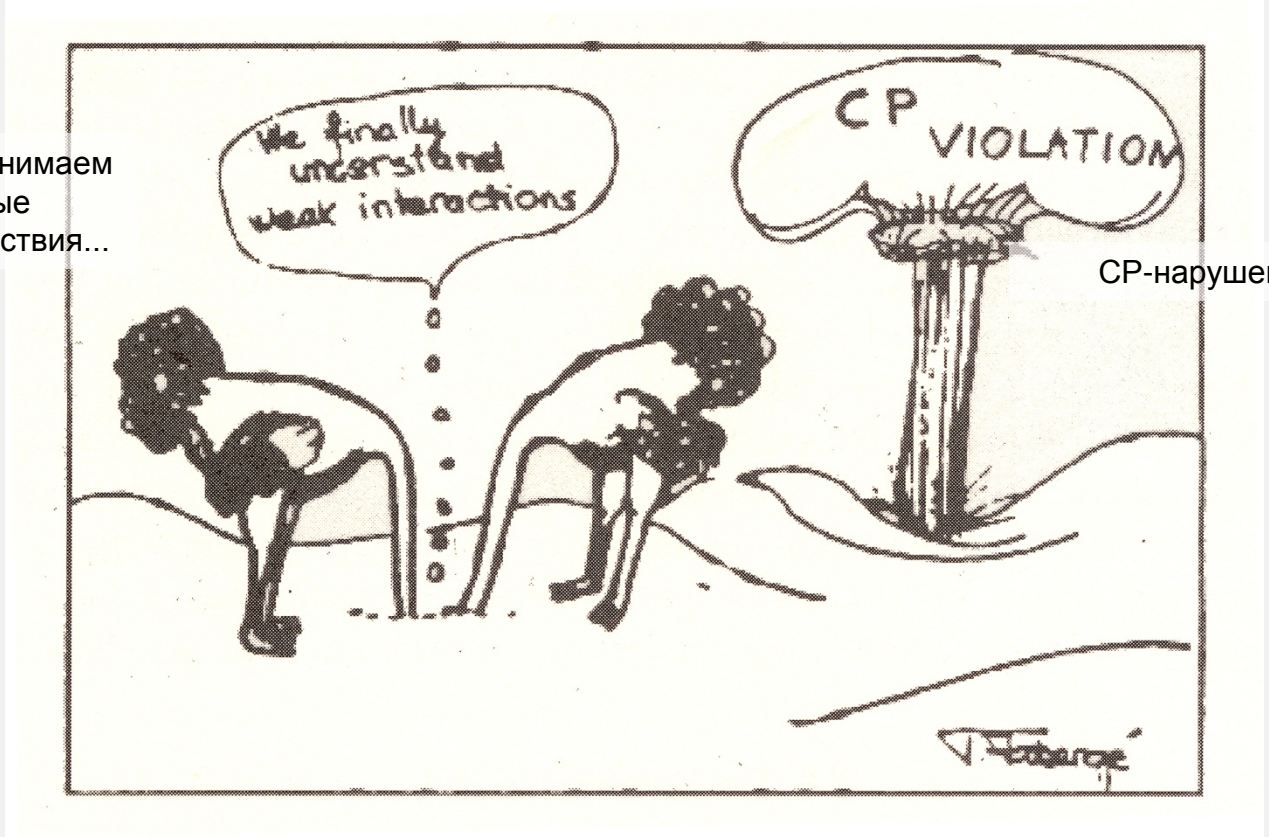
Val Fitch



Наиболее точное на сегодняшний день измерение отношения амплитуд:

$$|\varepsilon| = \left|\frac{A(K_L \to \pi^+\pi^-)}{A(K_S \to \pi^+\pi^-)}\right| = (2.282 \pm 0.017) \times 10^{-3}$$

Наконец, мы понимаем слабые взаимодействия...



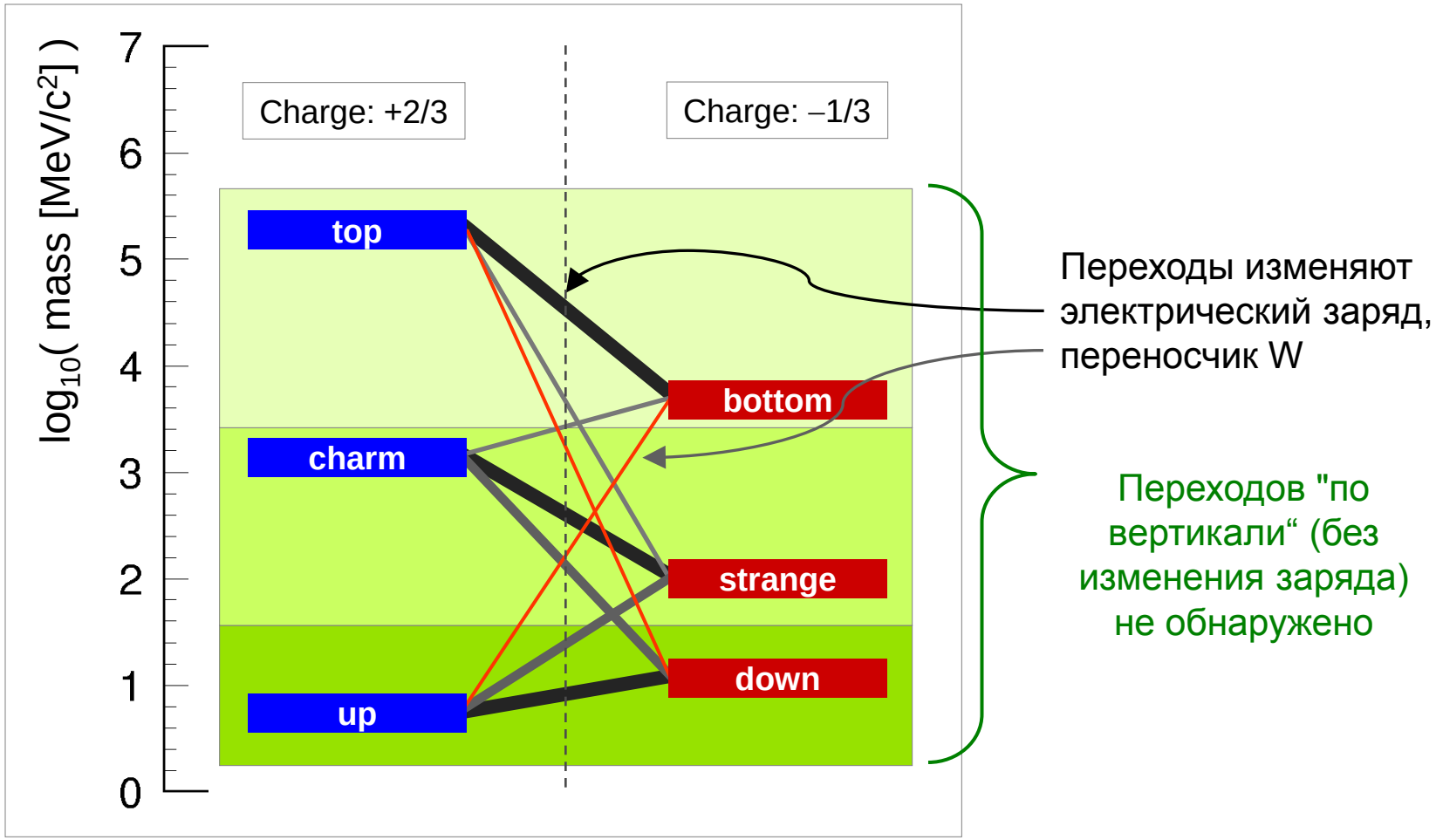
CP-нарушение

Рисунок, показанный Кабиббо в 1966 году

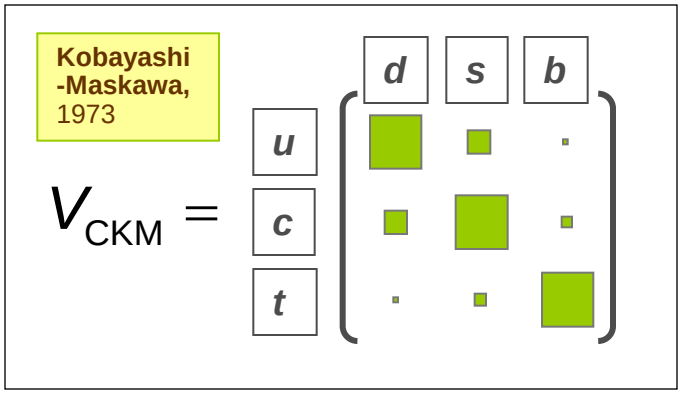
Нобелевская премия по физике 2008 года:

Кобаяши и Москава предсказали 3-е поколение кварков исходя из CP-нарушения

Слабые переходы между поколениями кварков



Переходы между тремя поколениями

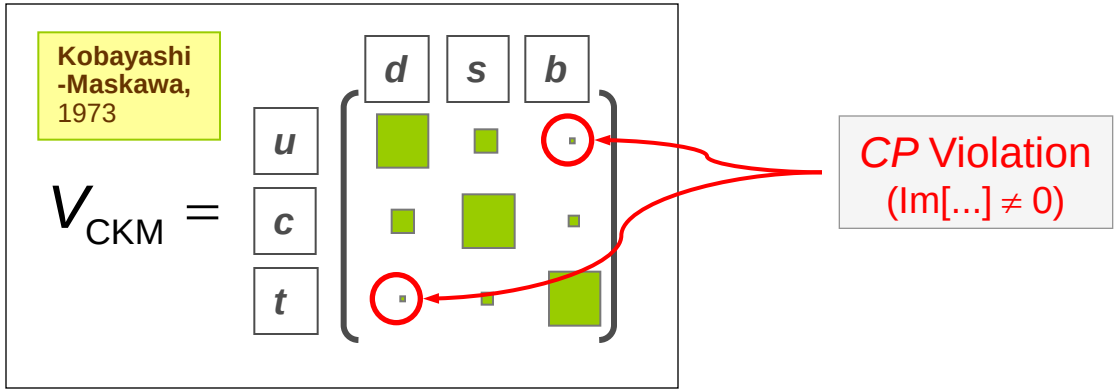


Переходы описываются унитарной матрицей Кабиббо-Кобаяши-Москава (аналог ортогональной матрицы поворотов при смене квантового базиса)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Объяснение переходов между поколениями: кварки существуют в виде массовых (штрихованных) состояний, являющихся смесью разных поколений. При распаде происходит переход в какое-то одно поколение.Поворот базиса поколений в массовый базис описывается данной унитарной матрицей.

Переходы между тремя поколениями

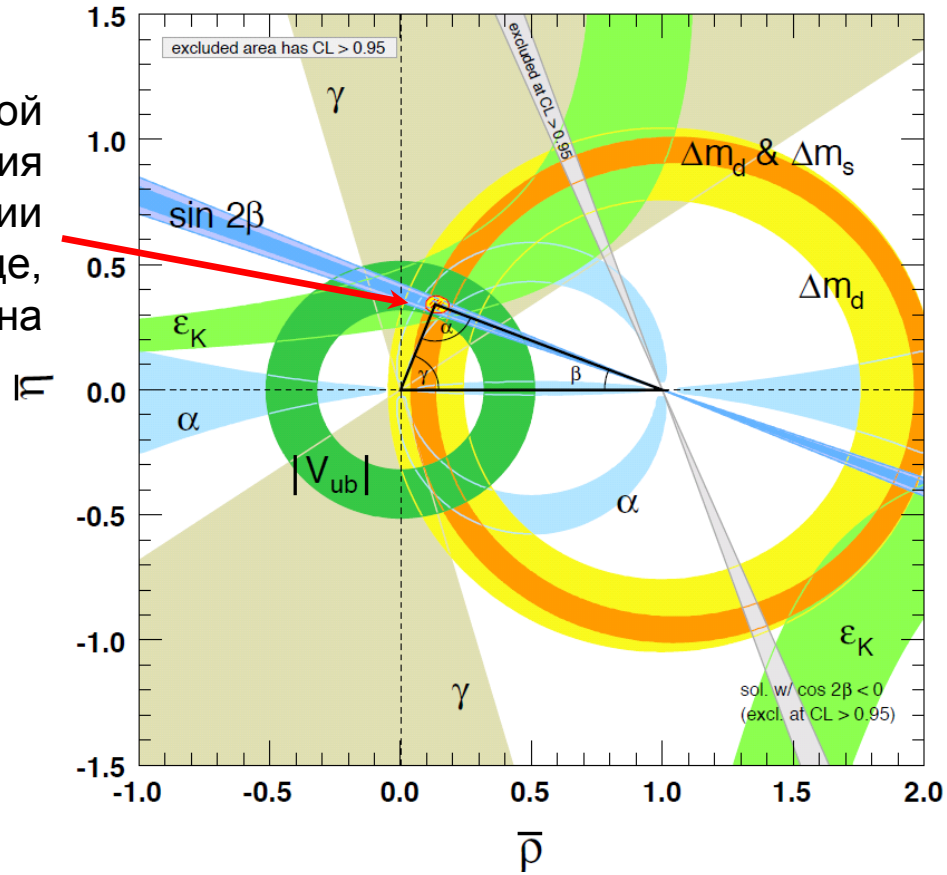


Идея Кобаяши и Москава: число свободных параметров матрицы 3x3 уже слишком велико (= 4), чтобы ее можно было свести к действительной ортогональной, используя произвольность в выборе фаз кварков. У матрицы поворотов 3-хмерного пространства их 3, остается один параметр, который не может быть действительным. Мнимость из матрицы перетекает в лагранжиан. Но это противоречит T-инвариантности (смена направления времени означает комплексное сопряжение i -> -i), и означает CP-нарушение в силу CPT.

Переходы t->d, b->u оказались очень маленькими, из-за них и CP-нарушение мало.

Треугольник унитарности

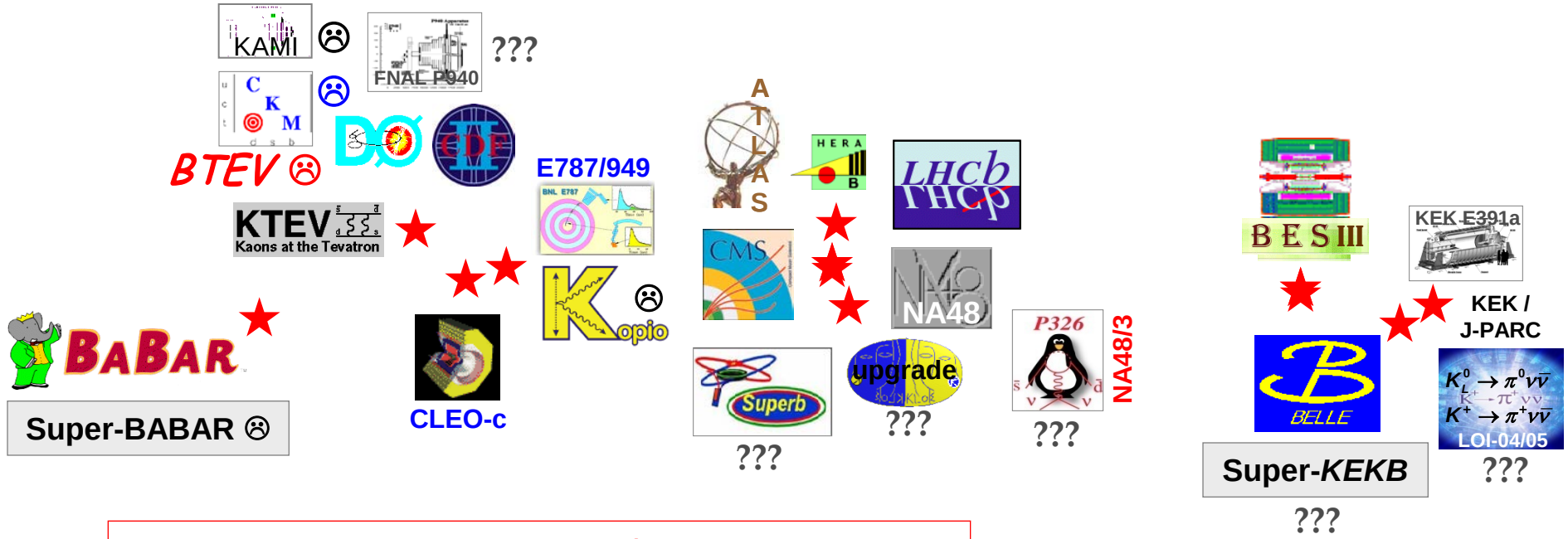
Треугольник унитарности на комплексной плоскости - удобная параметризация мнимости унитарной матрицы. При отсутствии CP-нарушения и действительной матрице, треугольник схлопывается в отрезок на действительной оси.



Удивительно, что разные измерения хорошо согласуются друг с другом, и все CP-нарушающие эффекты можно описать вего одним параметром. Предсказание 1973 года оказалось поразительно общим и точным, за это Кобаяши и Москава получили Нобелевскую премию.

Эксперименты по изучению матрицы СКМ и CP-нарушения

В случае 2-х поколений, в матрице 2x2 не возникает CP-нарушения (слишком мало параметров). Поэтому исследование 3-го поколения кварков оказалось очень важным.



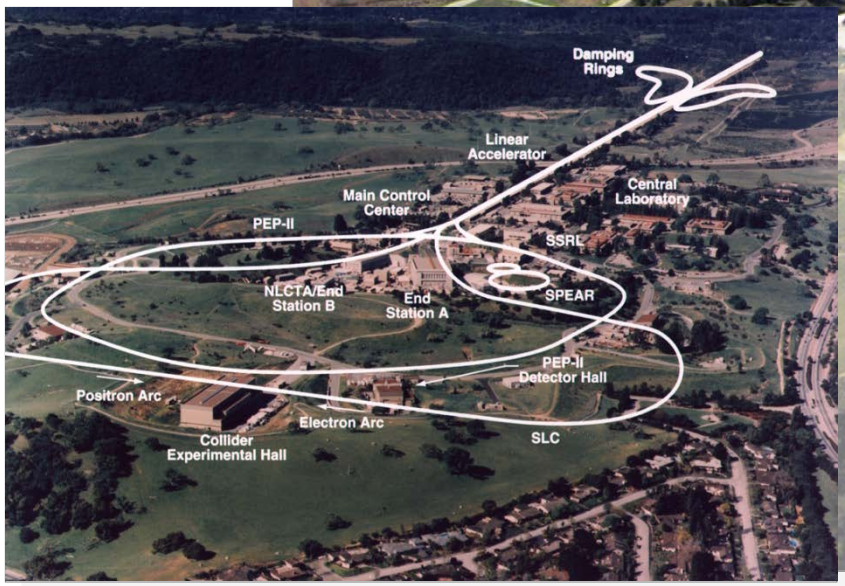
Планируемые (еще не одобренные)

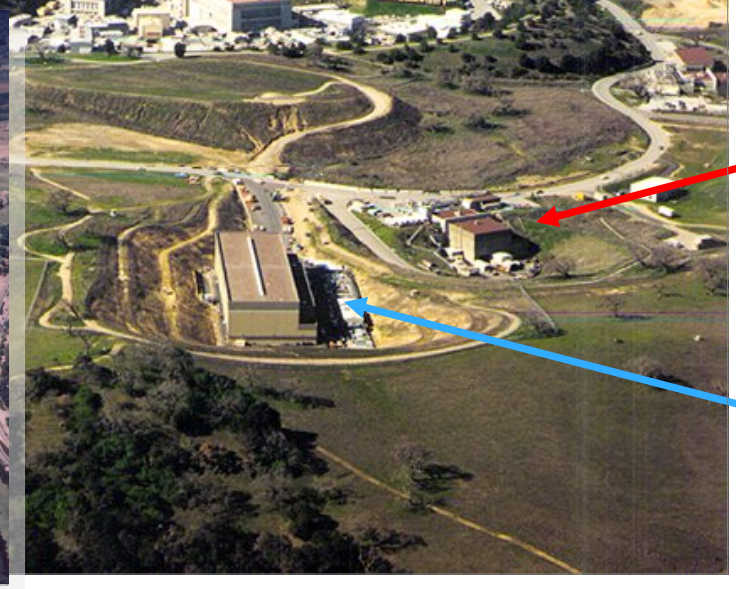
Начавшие работу или строящиеся

Работающие или недавно закончившие работу

Новые проекты

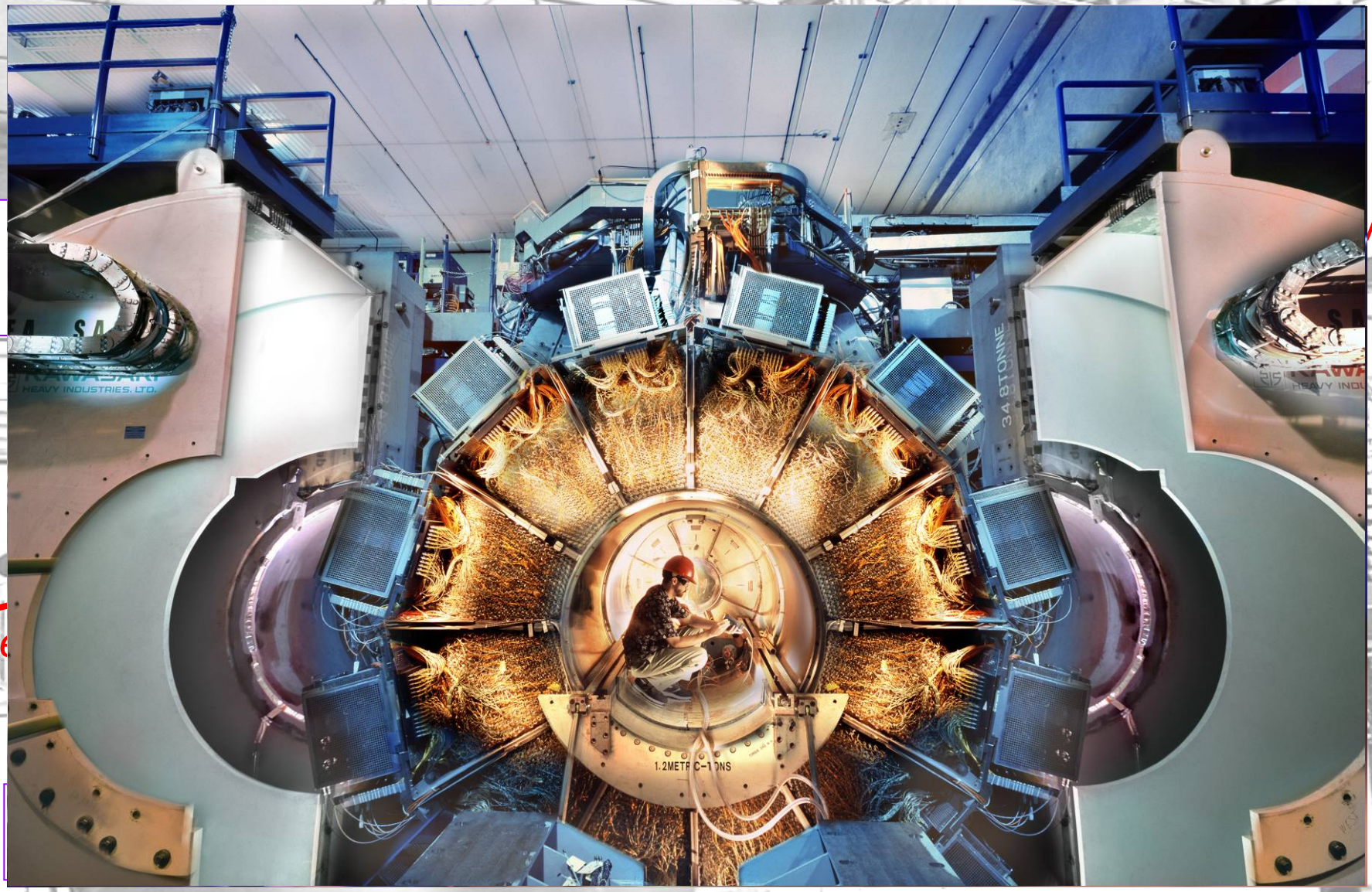
[redacted]



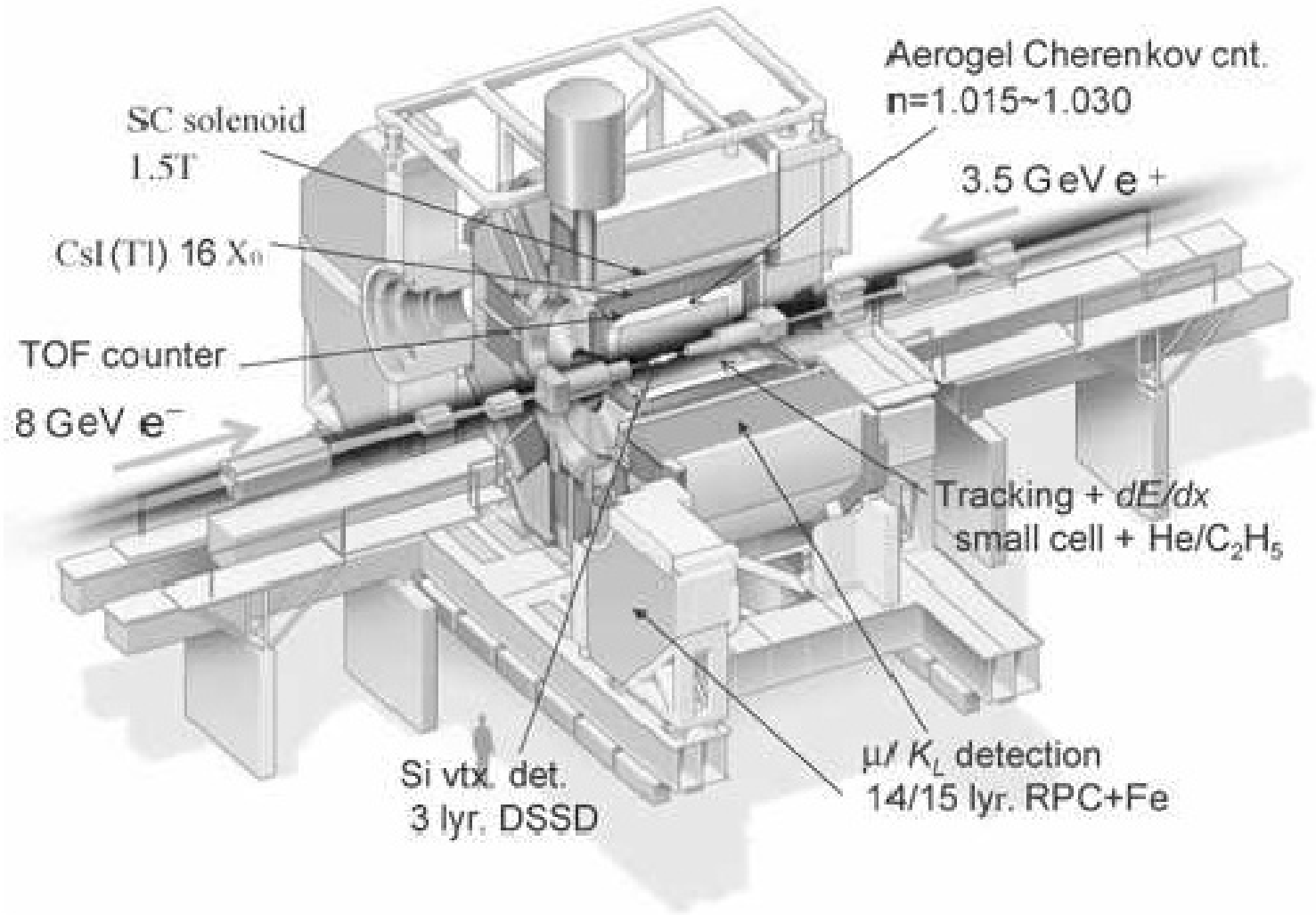


BABAR

Детектор BABAR



Детектор BELLE



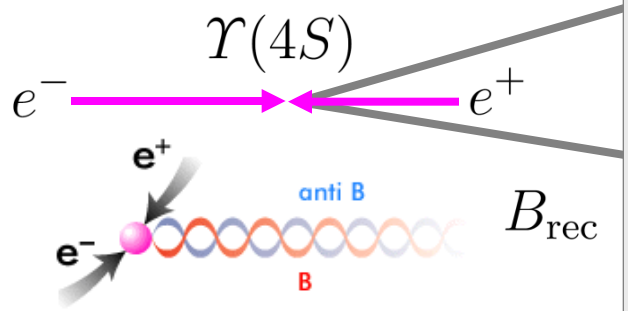
Примеры CP-нарушений в B-мезонах (с b-кварком)

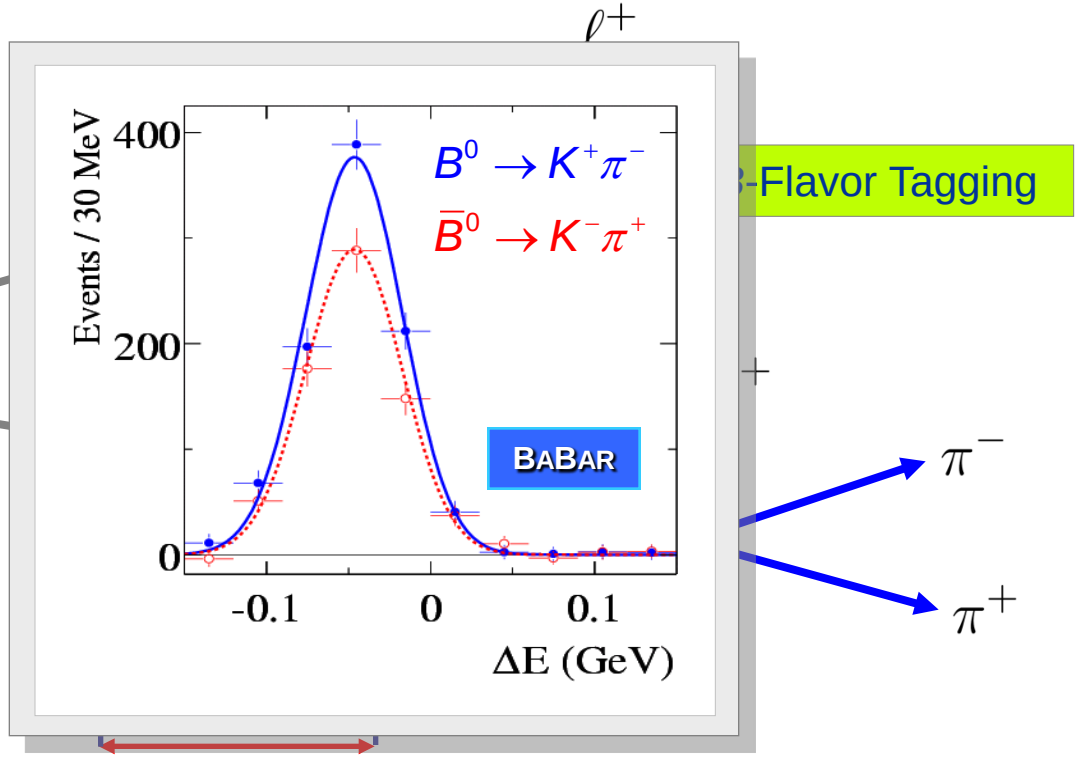
PEP-2 (SLAC)

$E_{e^-} = 9\,\mathrm{GeV} \qquad E_{e^+} = 3.1\,\mathrm{GeV}$

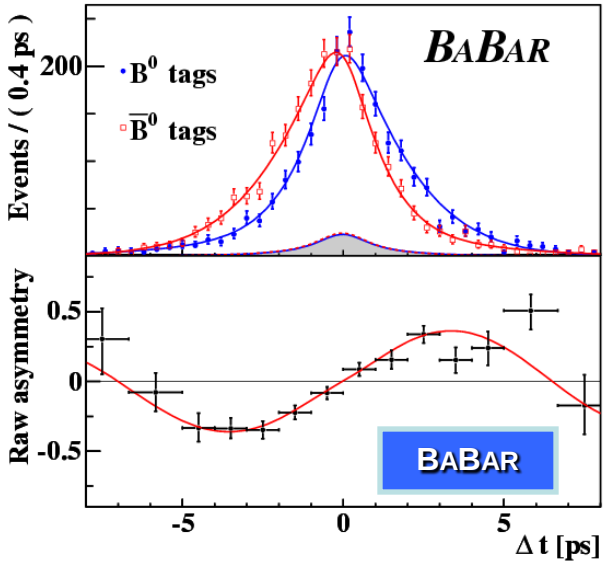
$\sqrt{s} = 10.58\,\mathrm{GeV}$

$\langle \beta\gamma \rangle_{\Upsilon(4S)} = 0.56$



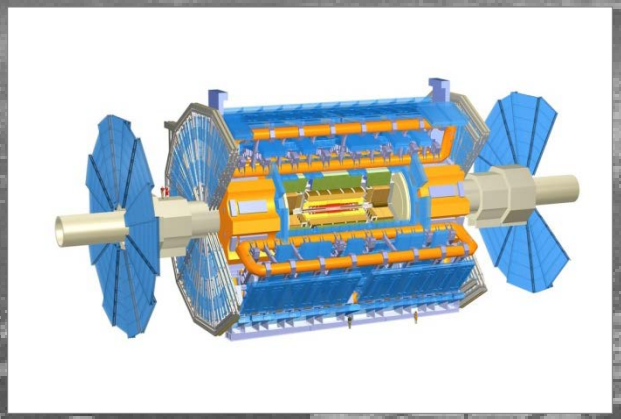


$\Delta t \equiv t_{\mathrm{rec}} - t_{\mathrm{tag}}$

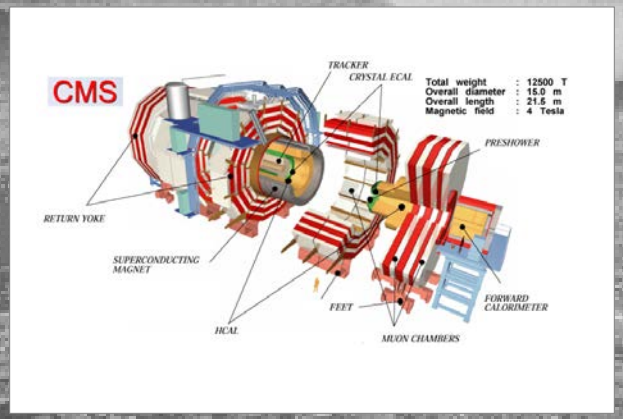


Будущие эксперименты по CP-нарушению на LHC

ATLAS



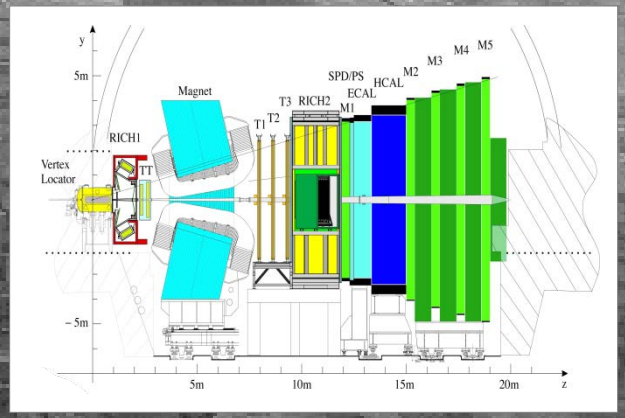
CMS



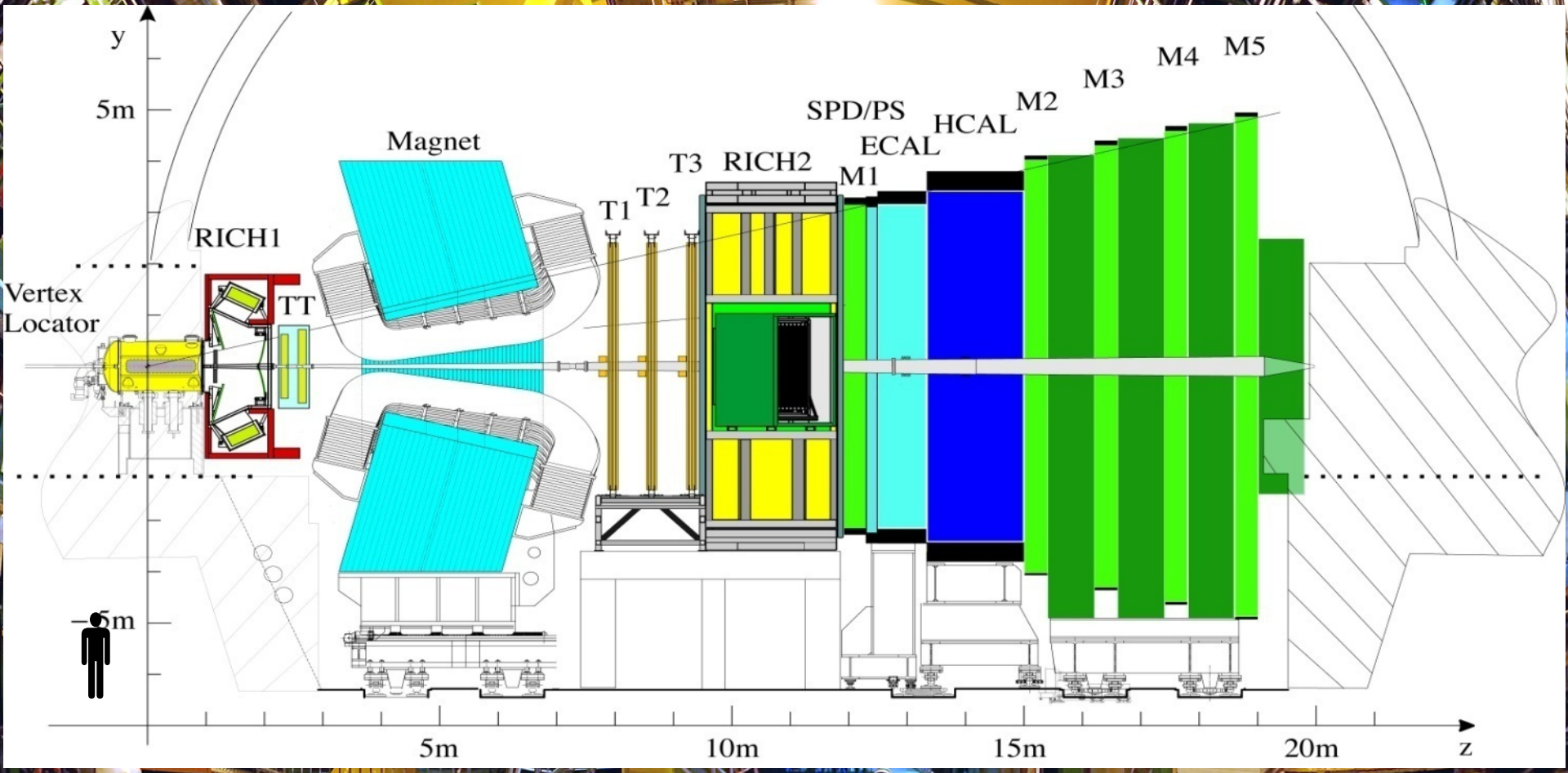
ATLAS и CMS рассчитаны на поиск новых тяжелых частиц.

LHCb спроектирован для изучения частиц, содержащих b-кварк (более легких)

LHCb



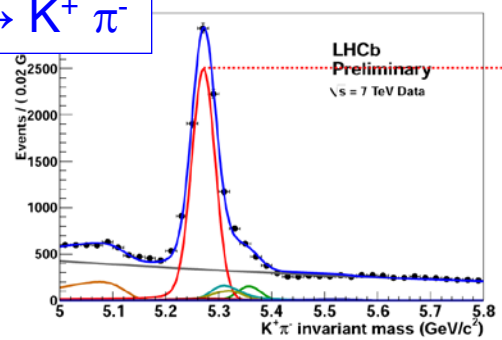
LHCb detector



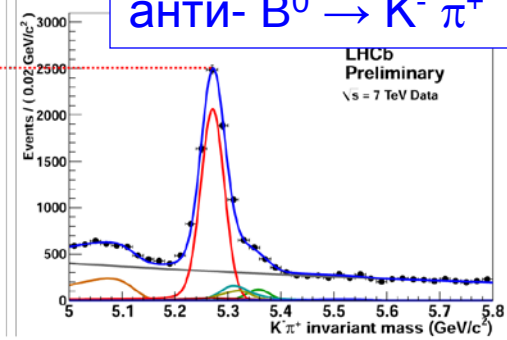
LHCb: первые результаты

Асимметрия между распадами $B_{(s)}^0$ и анти-$B_{(s)}^0$

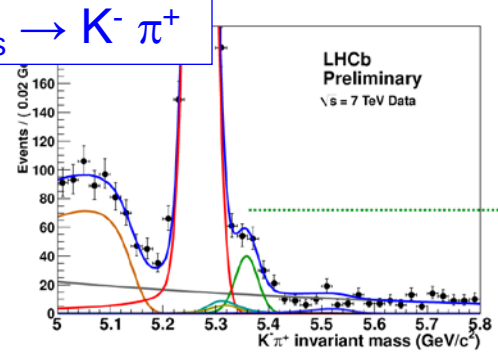
$B^0 \to K^+ \pi^-$



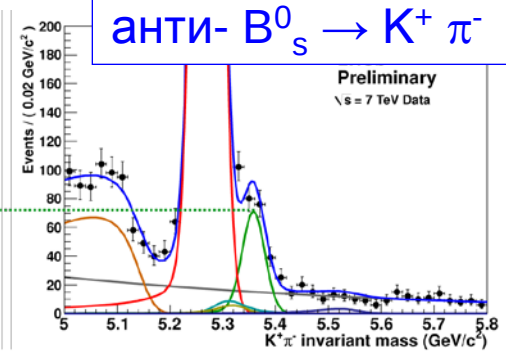
анти- $B^0 \to K^- \pi^+$



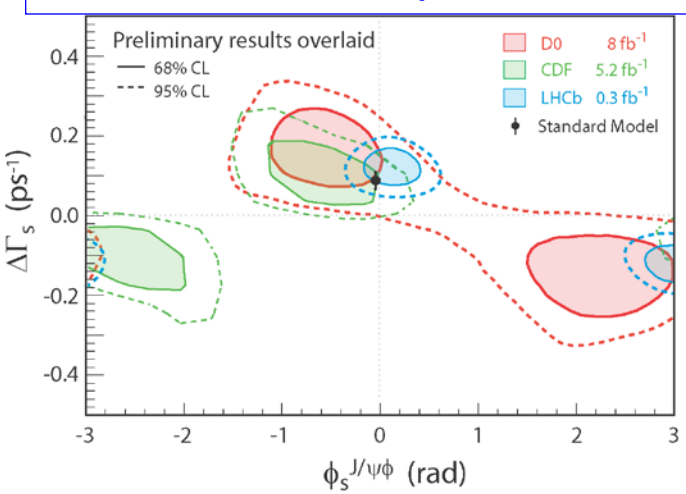
$B^0_s \to K^- \pi^+$

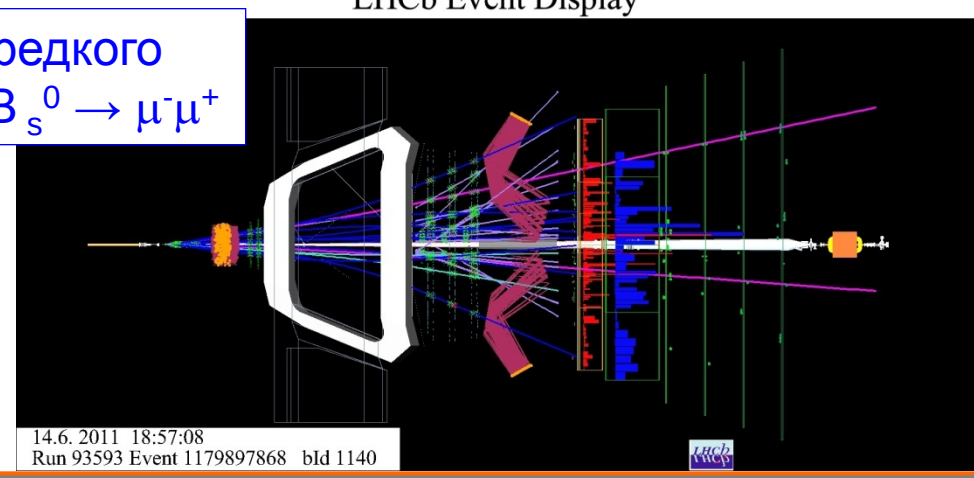
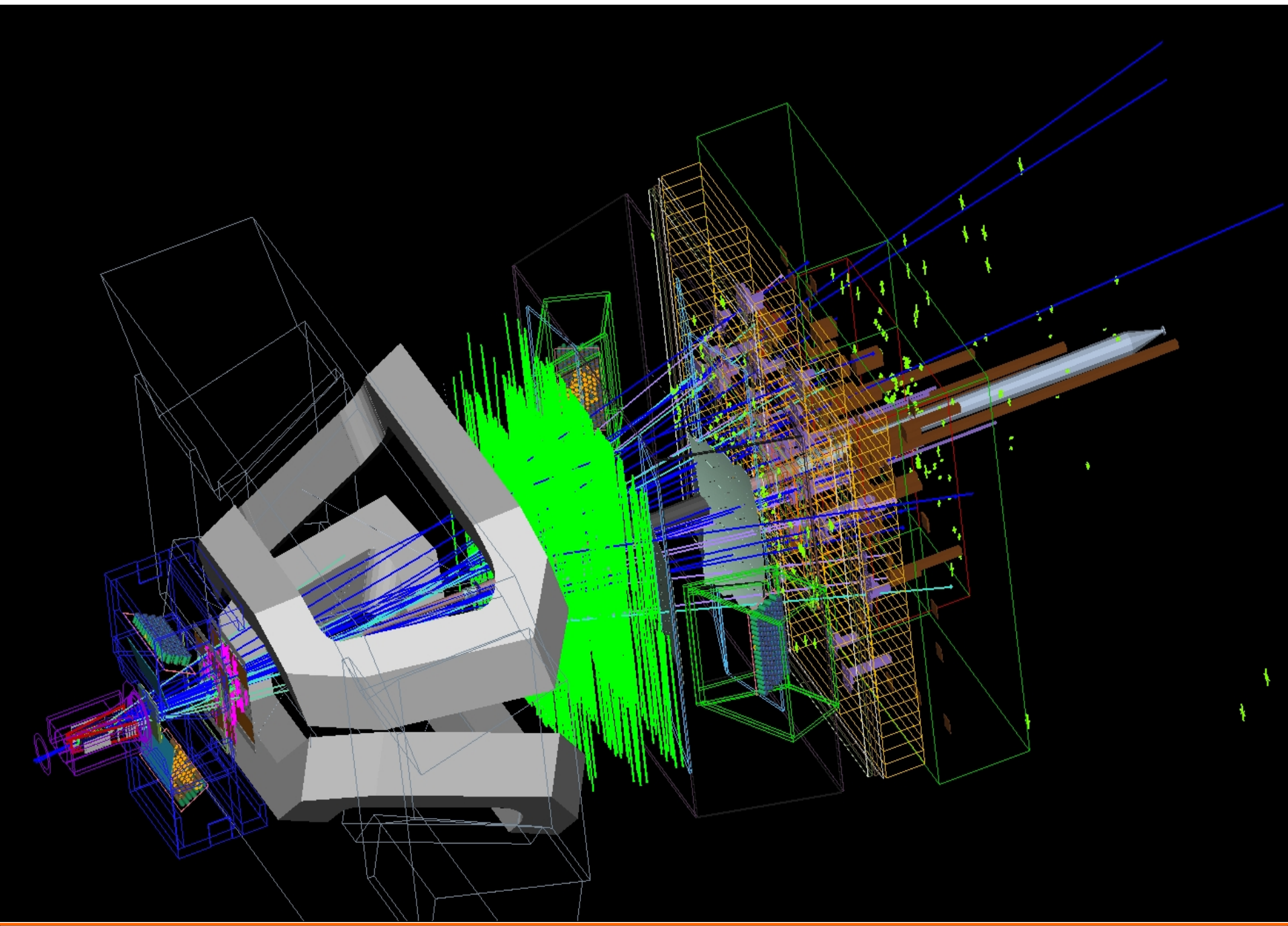


анти- $B^0_s \to K^+ \pi^-$



Сравнение предсказаний CP-нарушения в B_s^0 - мезоне с экспериментом



Поиск редкого распада $B_s^0 \to \mu^-\mu^+$

LHCb Event Display