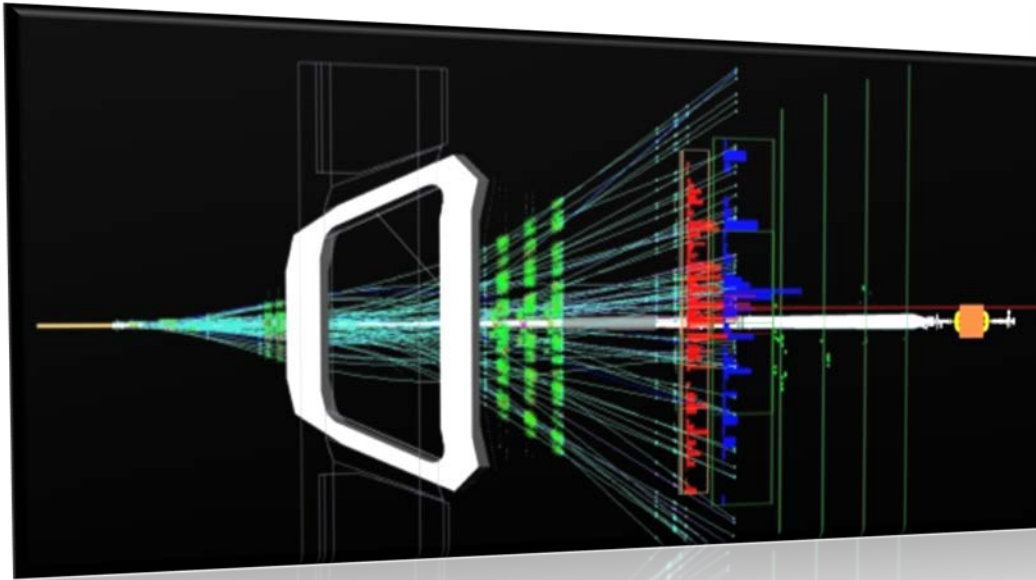


LHCb – цели и компоненти на детектора



Петър Ванков
ЦЕРН, 06.10.2015



План на лекцията

- ✓ Материя
- ✓ Антиматерия
- ✓ Космологичен аспект
- ✓ Симетрии
- ✓ Нарушение на CP
- ✓ B физика
- ✓ Експериментът LHCb

~ 2500 звезди = ~ 1/100 000 000 от броя на звездите в нашата галактика – Млечния път

< 1000 светлинни години от нас (1% от диаметъра на Млечния път)

Млечен път: 250 000 000 000 звезди
диаметър 100 000 - 120 000 с.г.

Нашето звездно небе
съдържа само малка
част от най-ярките и
най-близки до нас
звезди в червения кръг



~ 400 000 000 000 галактики в
наблюдаемата Вселена

Млечния път е само една от тях ...

Тъмната страна на Вселената

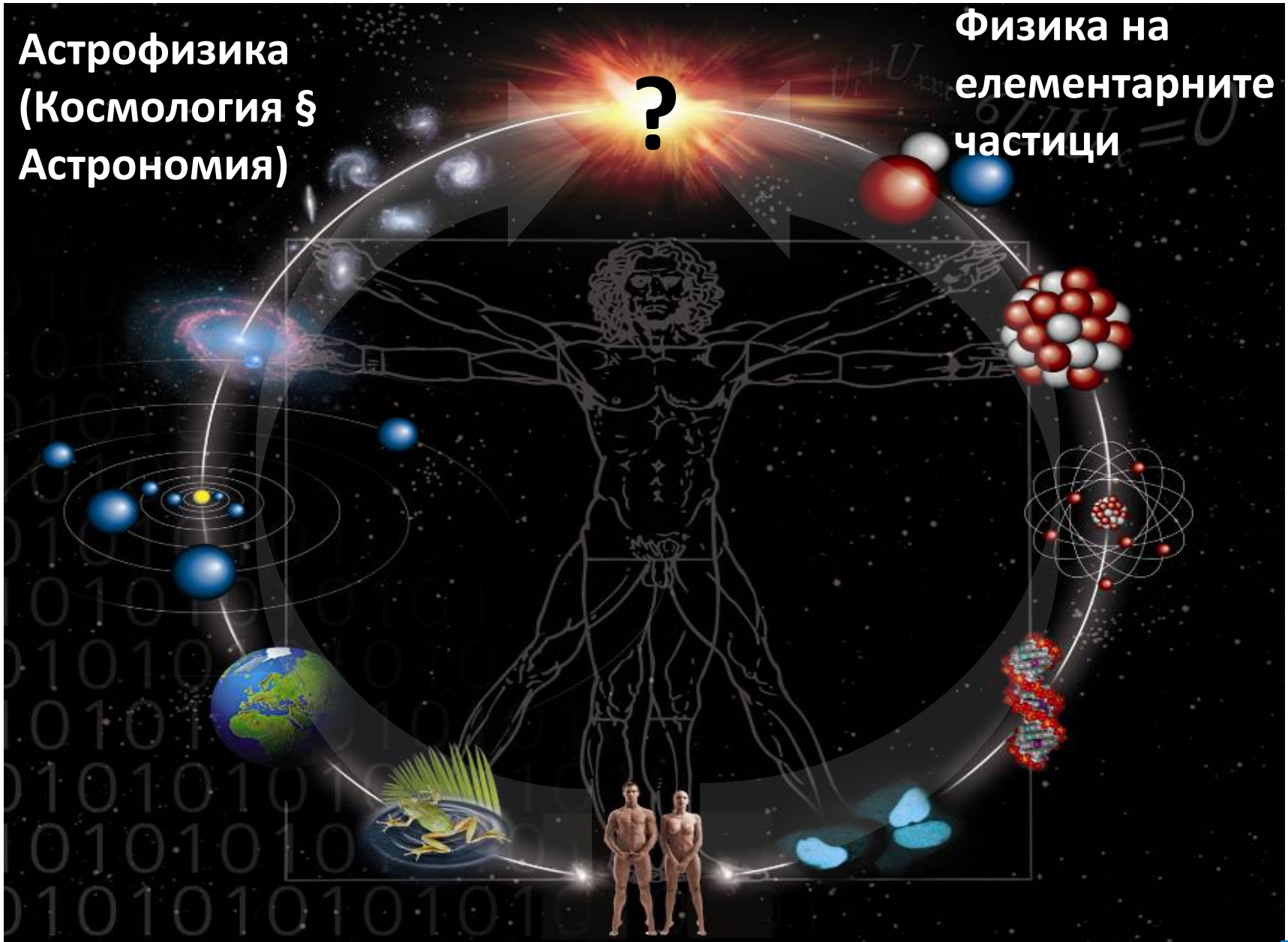


Антиматерия?

Две изследователски области

Астрофизика
(Космология &
Астрономия)

Физика на
елементарните
частици



Структура на материята

Кварки



Лептони

6 x 3 = 18 кварки

6 лептона

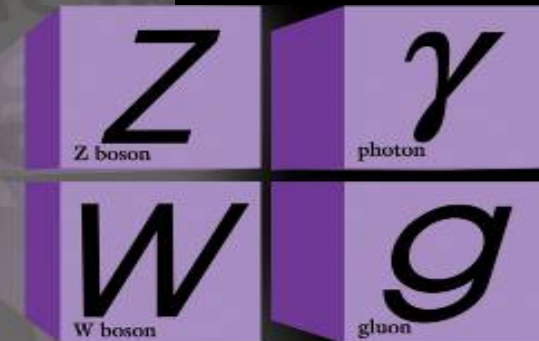
1 фотон

3 векторни бозона (W^+ , W^- , Z^0)

8 глюона

Общо: 36 елементарни частици

Сили



- Стандартен Модел (СМ) - теоретичната основа на физиката на елементарните частици
 - Обединява квантовата механика, специалната теория на относителността и квантовата теория на полето
 - Описва ~ всички лабораторни данни

Маса

- Масата е „обменната честота“ между силата и ускорението
Но ... какво представлява масата?

$$F = ma$$

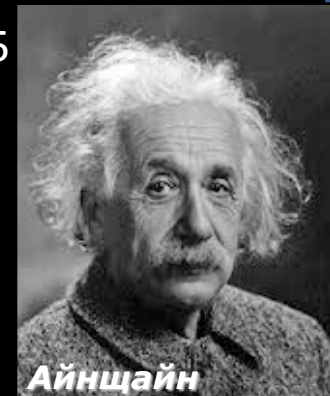
1687



- Масата е енергия
Но ... какъв е произхода на масата?

$$E = mc^2$$

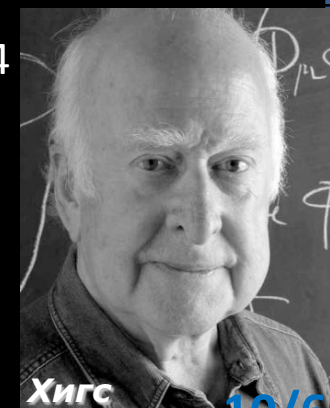
1905



- Масата е “триене” с полето на Хигс

$$m: \psi\psi\phi$$

1964



Античастици: предсказанието на Дирак

Теоретично предсказание на антиматерията: Пол Дирак, 1928



$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \Rightarrow E = \pm \sqrt{p^2 + m^2}$$

Дирак, 1931:

Частичка с отриц. енергия = Античастица с полож. енергия

Важно теоретично постижение !

Съществуването на антиматерията е постулирано преди да бъде експериментално потвърдено.

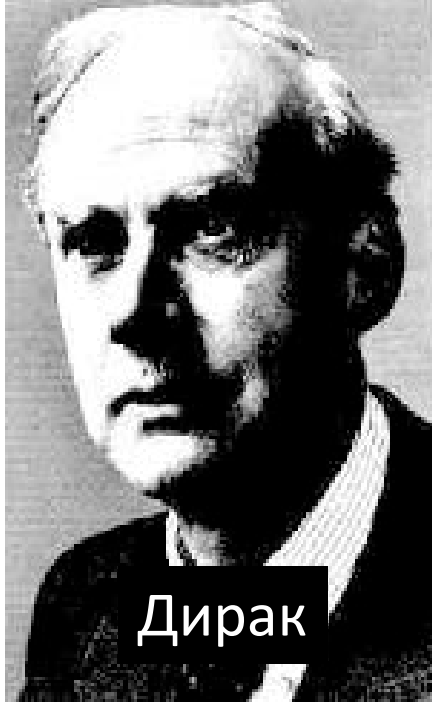
На всяка материална частица съответства античастица, с еднаква маса, но с противоположен електричен заряд.

Например:

Електрон (ел. заряд = -1) \rightarrow Позитрон (ел. заряд = +1)

Антиматерия

(Нобелова награда, 1933г)

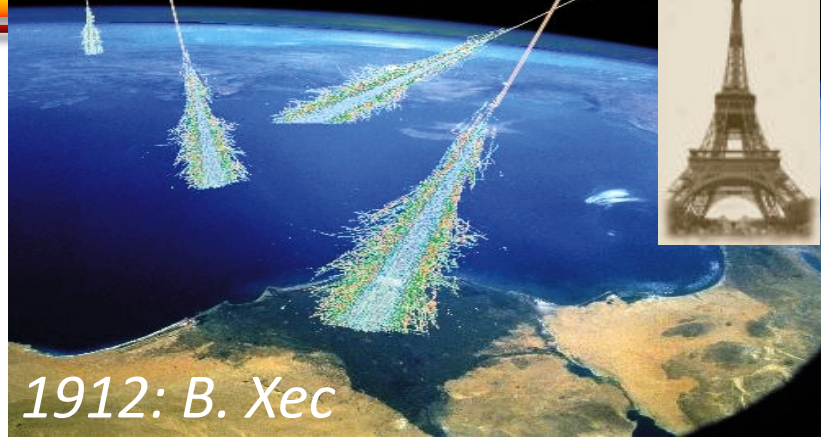


Дирак



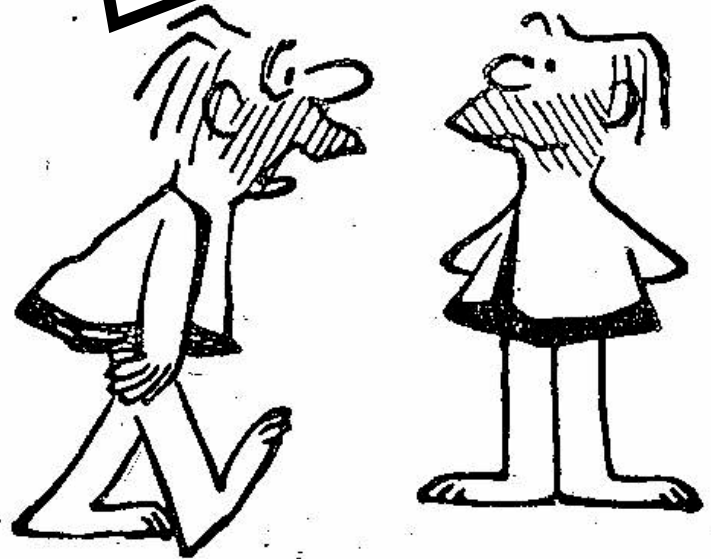
АнтиДирак

Космични лъчи, 1909: Т. Улф

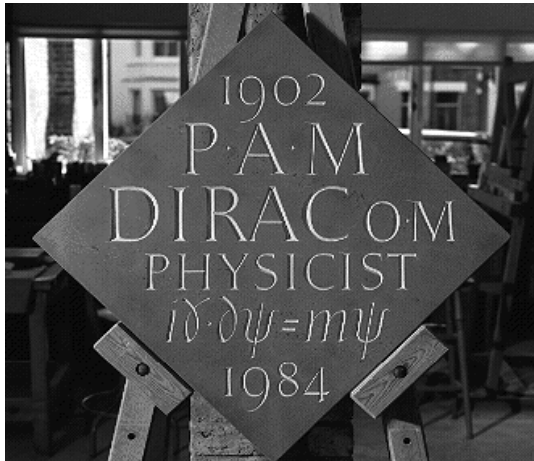


1912: В. Хес

Човече, тези космични лъчи
направо ме убиват.



Уестминстърско
абатство



1902
P.A.M
DIRAC O.M
PHYSICIST
 $i\hbar \cdot d\psi = m\psi$
1984

Антиматерия: откриване



Карл Андерсън

През 1932 г. Карл Андерсън експериментално наблюдава позитрона изследвайки космични лъчи.



Детектор: **Уилсънова камера**

- камера с преситени водни или спиртни пари.

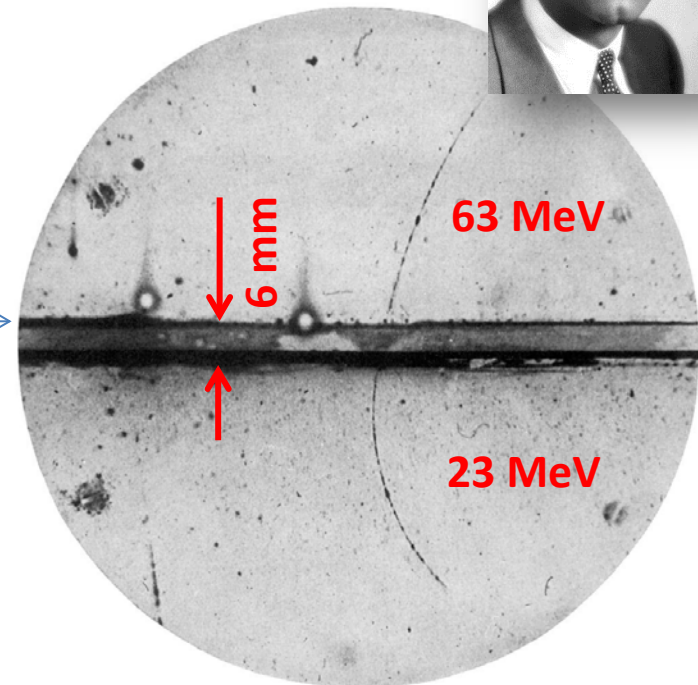
Преминаващите заредени частици създават йонни двойки, около които се образуват капчици и очертават траекторията им;

- **магнитно поле**

Входяща частица

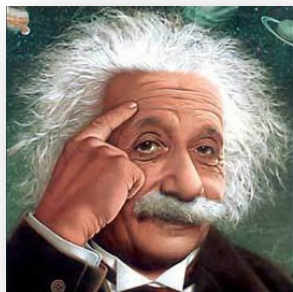
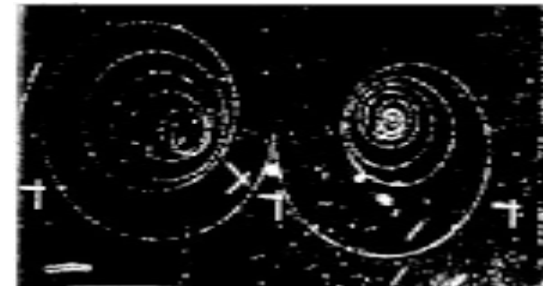
Оловна плоскост

Изходяща частица



Антиматерия: откриване

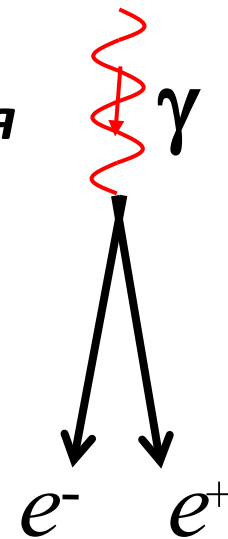
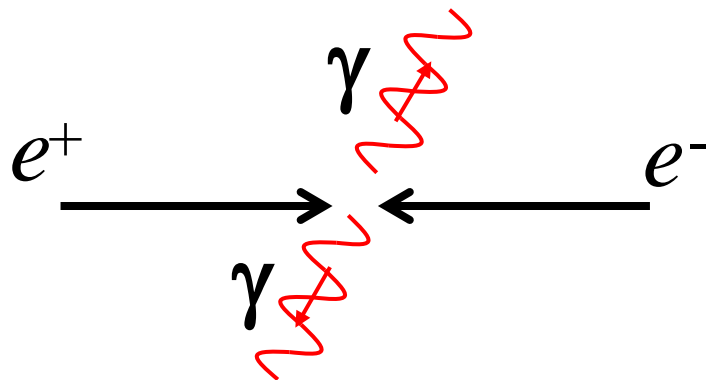
През 1936 г. К. Андерсън потвърждава откритието си чрез наблюдение на процеса:
 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ (в оловна плоскост и γ от ThC_2 (ториев карбид))
(Нобелова награда, 1936 г.)



Алберт Айнщайн: $E=mc^2$

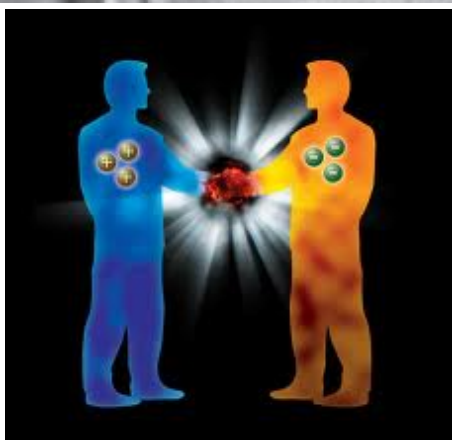
Еквивалентност м/у маса и енергия
(Масата всъщност е кондензирана енергия)

Материя + Антиматерия = светлина ! (анихилация)



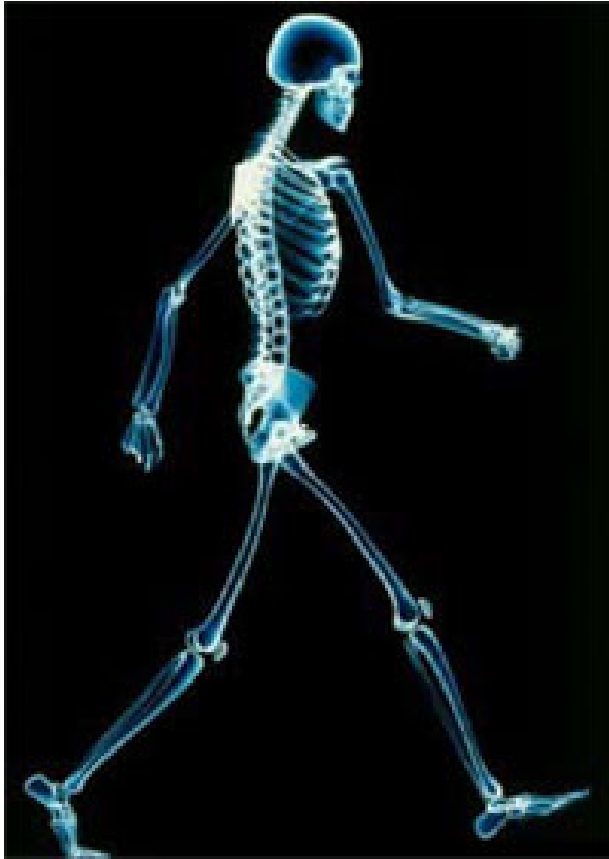
Раждане на 2-ка e^-e^+

Те – от материя ли са или от антиматерия



= 1000 1-Мтон
ядрени взрива

Антиматерия



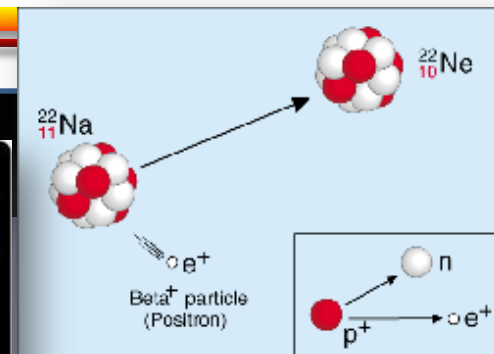
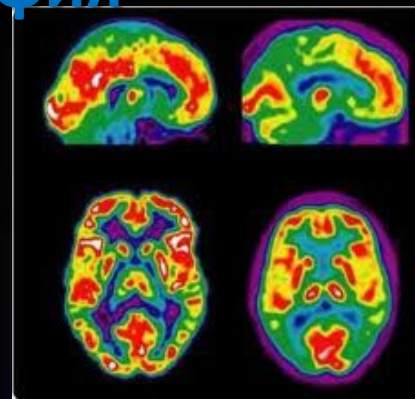
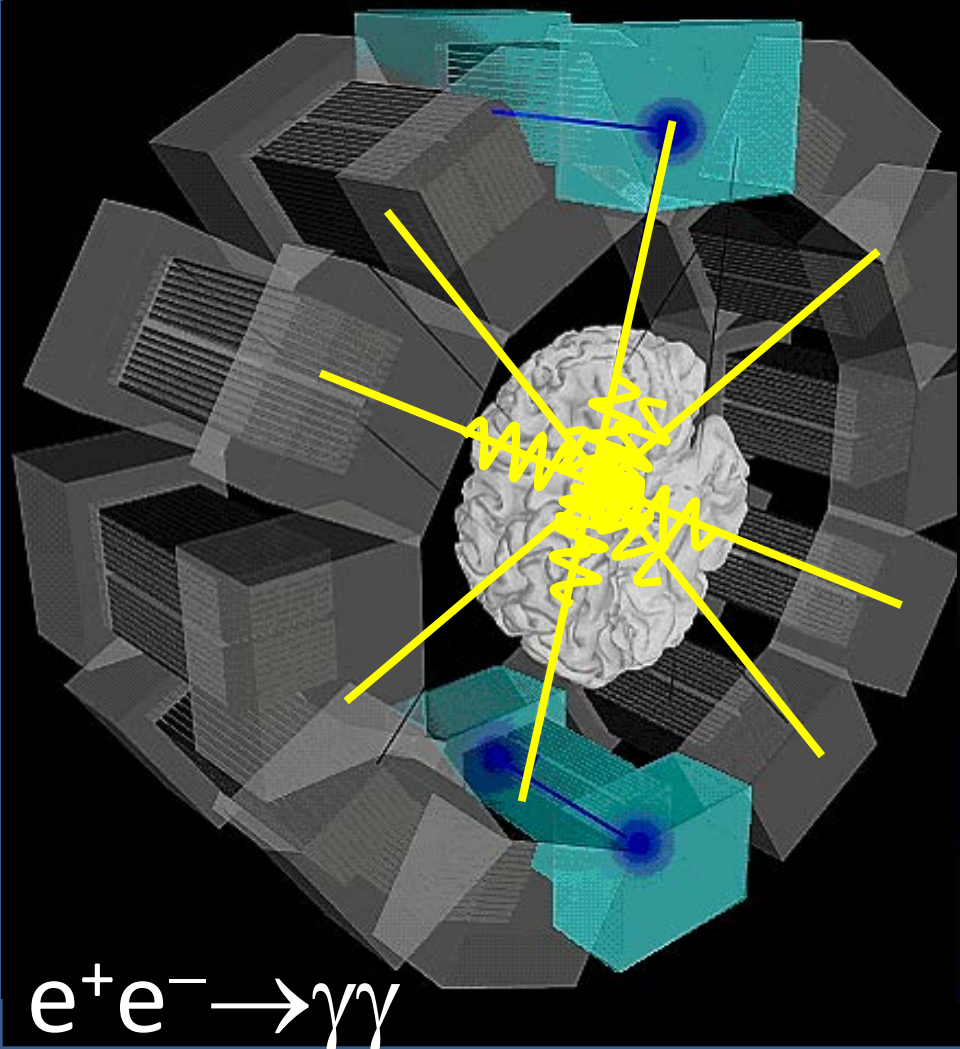
Вашето тяло излъчва антиматерия!

80 kg човек = 180 e^+ /час.

Източник: ^{40}K ,
погълъщан чрез въздух, вода, храна.

Антиматерията е полезна ...

Позитрон-Емисионна Томография



Елементарни частици

Поколение

кварки

лептони

I

II

III

Ел. заряд

I

II

III

Ел. заряд



(1968)



(1974)



(1995)

$+2/3 e$



(1968)



(1968)



(1977)

$-1/3 e$

$-2/3 e$



$+1/3 e$



(1897)



(1936)



(1975)

$-1 e$



(1956)



(1962)



(2000)

$0 e$

$+1 e$



$0 e$

Материя

6 x 3 = 18 кварки + 18 анти-кварки
 6 лептона + 6 анти-лептона
 1 фотон
 3 векторни бозона (W^+ , W^- , Z^0)
 8 глюона

Общо: **60 елементарни частици !**

Антиматерия

Класификация

Мезони: $q\bar{q}$

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Бариони: qqq

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

(1955)



*Кварки. Неутрини. Мезони. Всички тези проклети частици, които не виждаш...
Заради това се пропих.
Но сега вече, мога да ги виждам.*

Загадката

Защо наблюдаваме толкова малко антиматерия?



Космологичен аспект

В началото бе ...

Големия взрив

Преди $(13.73 \pm 1.12) \times 10^9$ години

Math, Science, History

UNRAVELLING THE MYSTERIES

That all started with the

BiG BANG



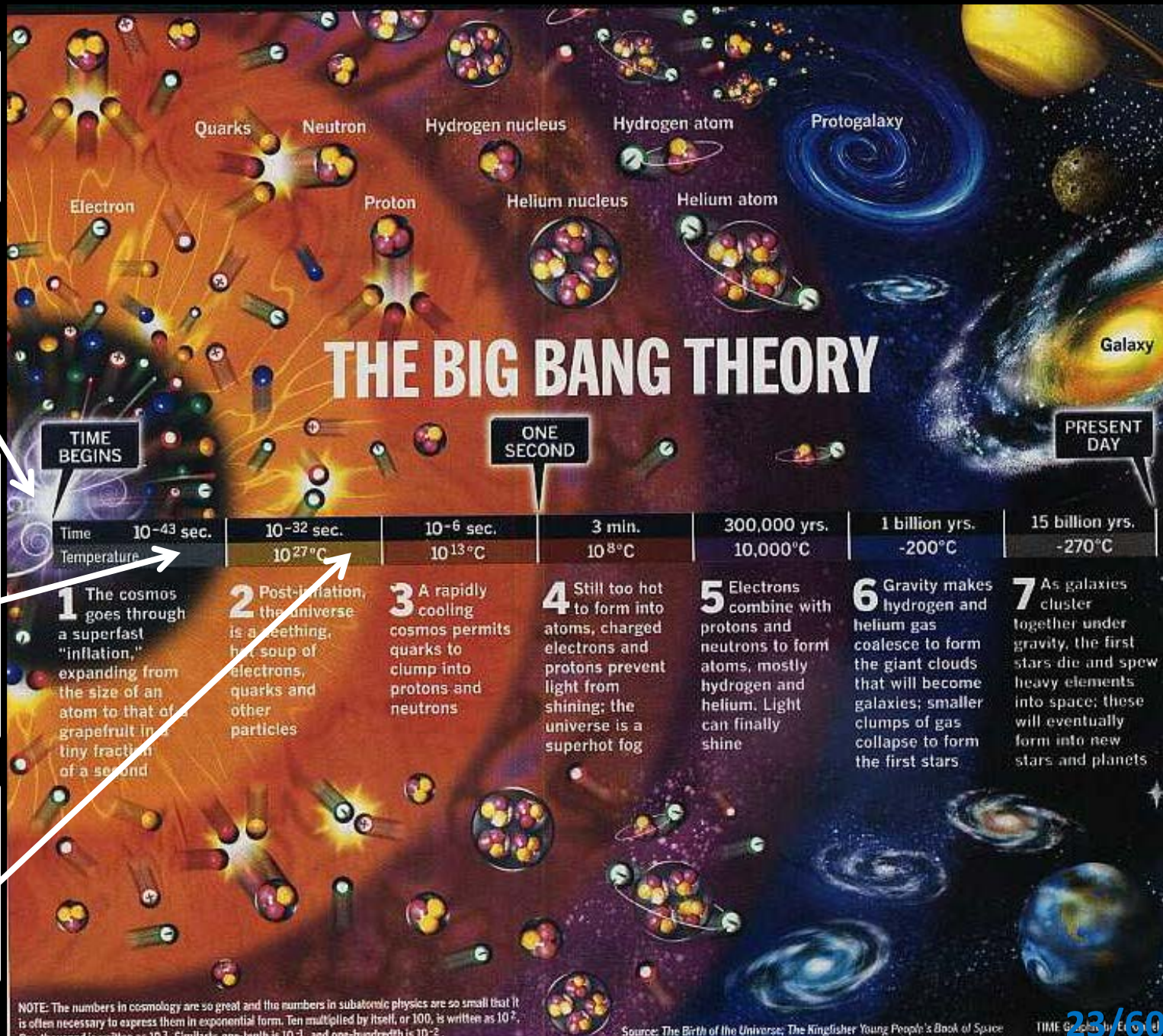
Едвин Хъбъл (1889-1953): Вселената се разширява

Фред Хойл (1915-2001): "Big Bang"

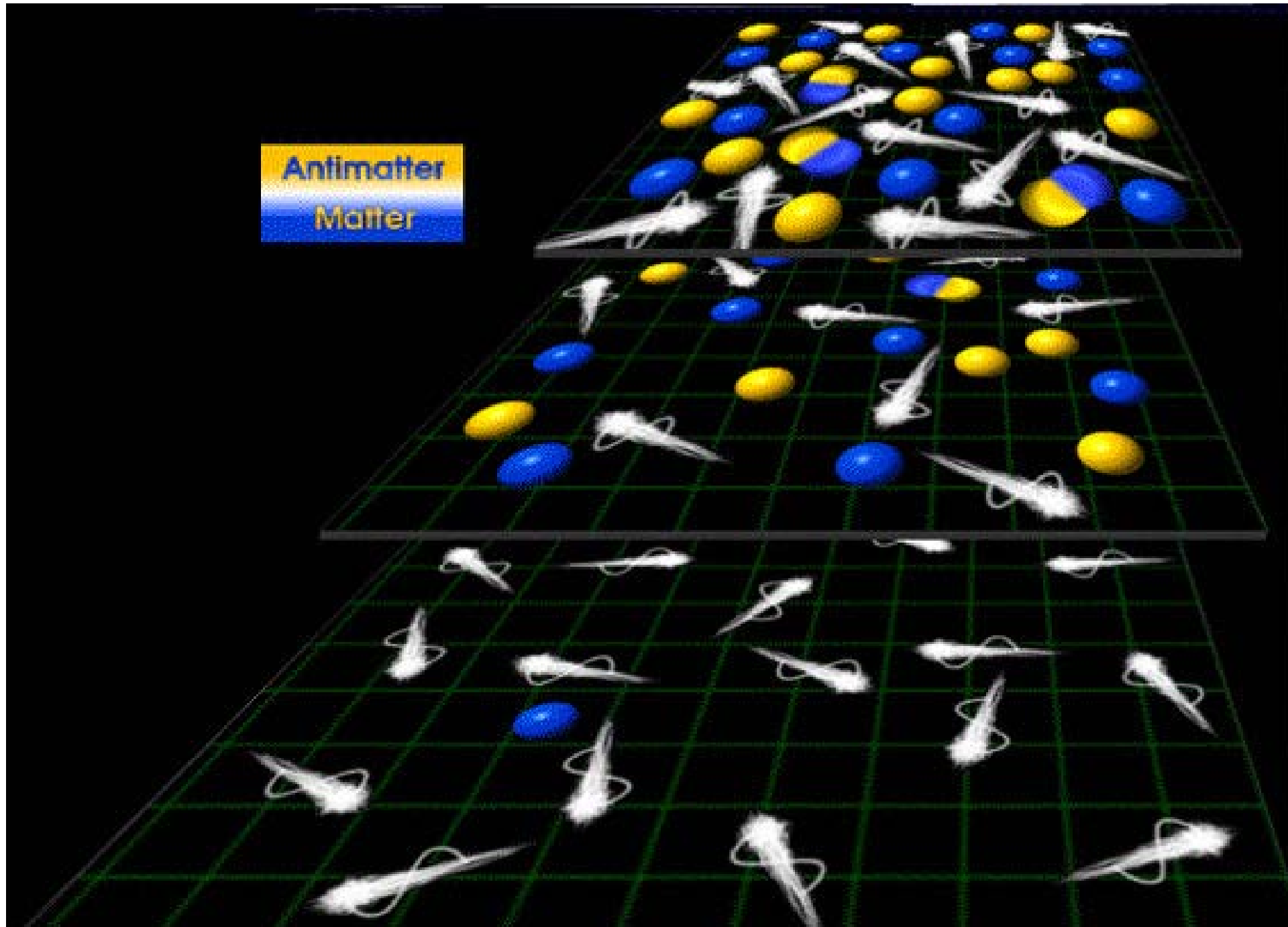
Равен брой
частици и
античастици

Развива се
дисбаланс,
~ 1000000001
частици към
999999999
античастици

Повечето
частици
анихилират с
античастиците

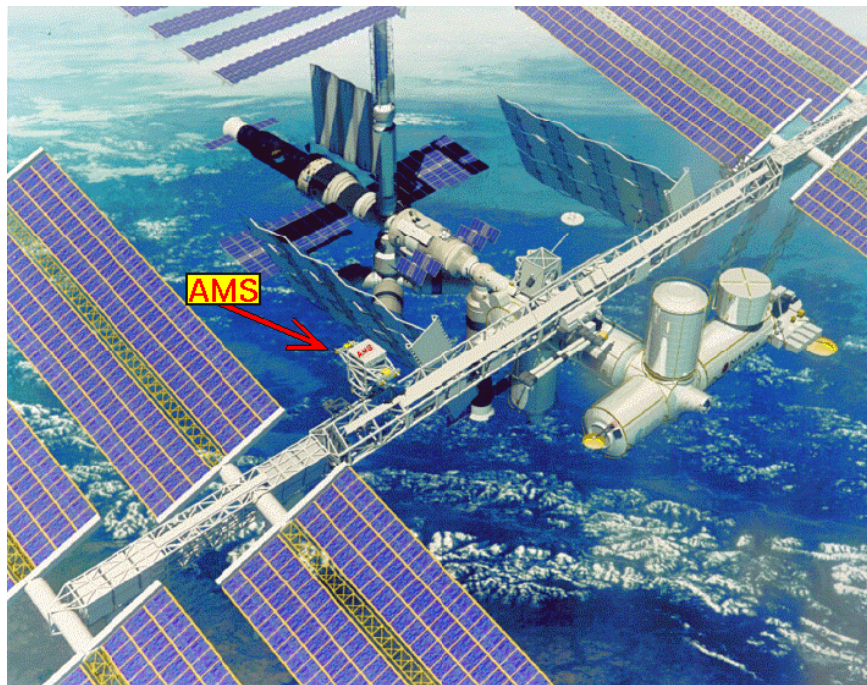


Antimatter
Matter

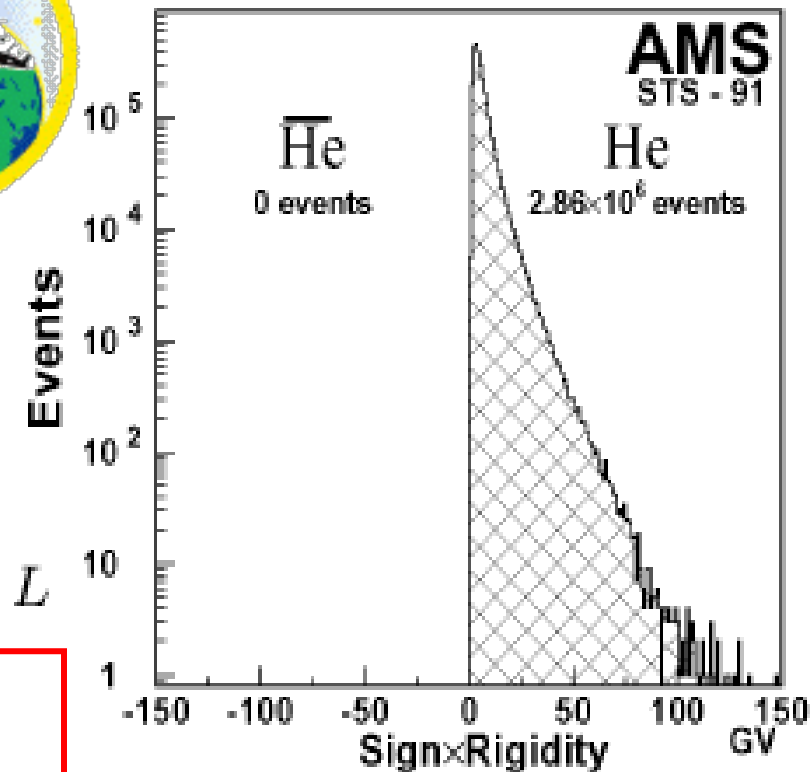


В търсене на антиматерия във Вселената

Експеримента **AMS** (Alpha Magnetic Spectrometer):
*Измерване броя на He-ядра в откритото пространство
(в космичните лъчи преди да взаимодействат с
атмосферата на Земята, 400км над повърхността)*



В търсене на антиматерия във Вселената

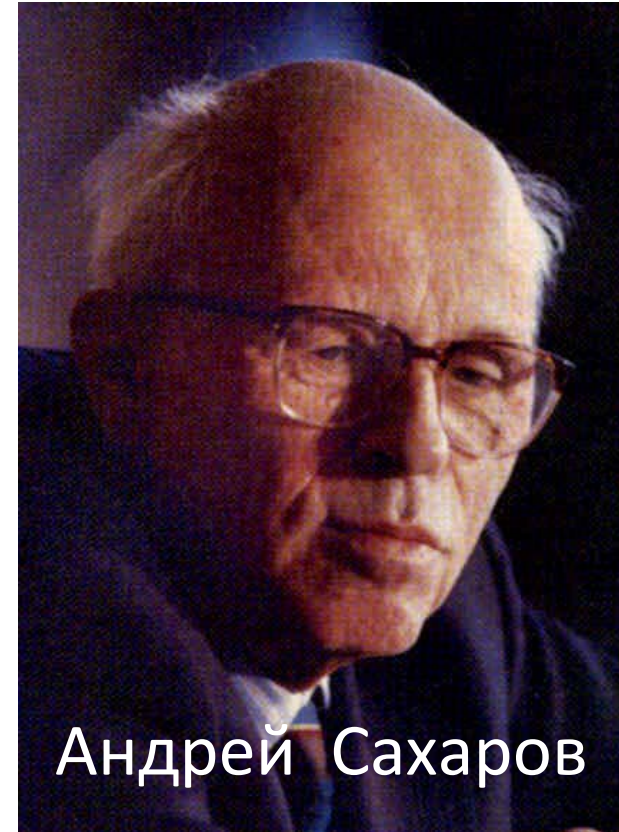


- Няма доказателства за оригиналната, “първична”, космическа антиматерия.
 - Липса на антиядра в космичните лъчи от нашата галактика
 - Липса на интензивна γ -емисия от аниhilацията на далечни галактики с антиматерия

$$\frac{N_{\bar{He}}}{N_{He}} < 1.1 \cdot 10^{-6} @ 95\% CL$$

Условията на Сахаров

- През 1966 г. Андрей Сахаров формулира следните условия за свят доминиран от материя:
 1. Взаимодействие, което нарушава запазването на барионното число;
 2. Вселена, която не е в равновесие;
 3. Взаимодействие, което нарушава C и CP;
- Стандартния модел (SM), позволява CP нарушение
- Въпреки това, то не е достатъчно да обясни цялата асиметрия м/у материя и антиматерия
 - Т.е необходим е някакъв друг източник на CP, неописан от SM → **Нова Физика!**



Нобелова награда за мир,
1975

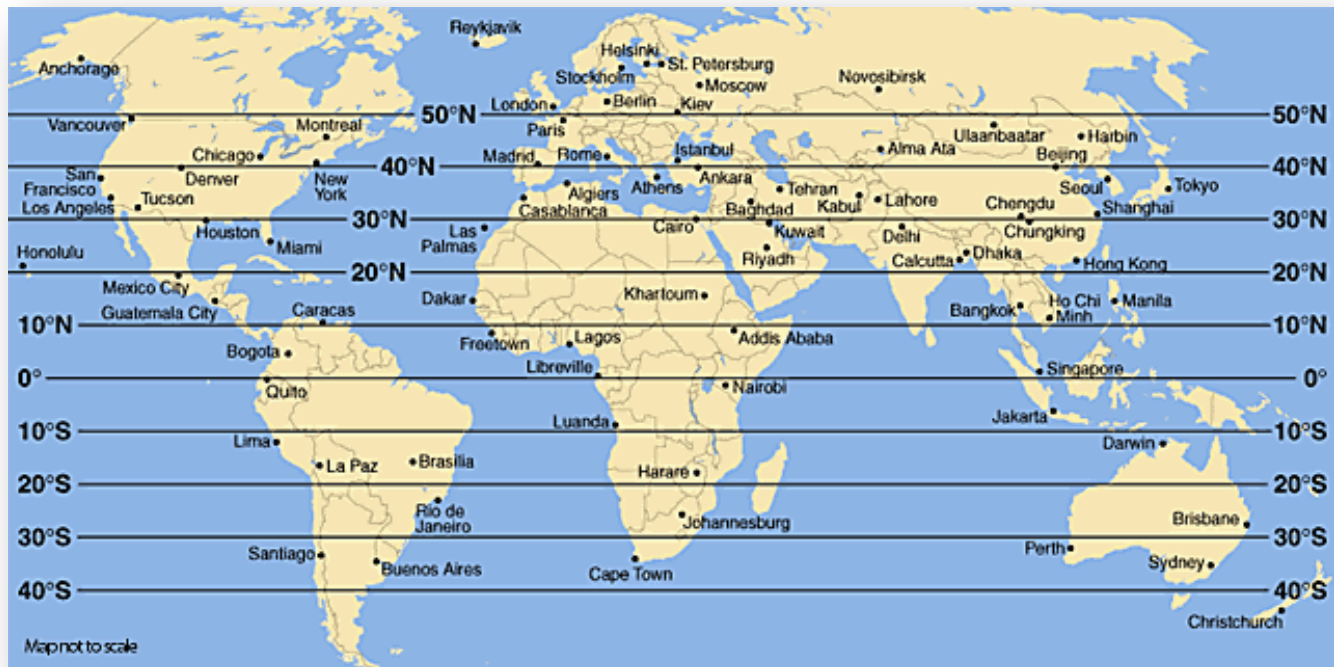
Хората вярват в симетрията ...



Инструкция към **Абел Тасман**, изследовател на Австралия (1642):

„Тъй като множество богати мини и други съкровища са открити в страни северно от екватора, между 15° и 40° географска ширина, то, **няма никакво съмнение**, че подобни, богати на съкровища страни съществуват и южно от екватора.

Провинциите Перу и Чили, богати на сребро и злато, намиращи се южно от екватора, са откровено доказателство за това“



Симетрии

Симетриите играят важна роля в света на физиката.

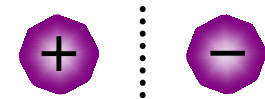
Теорема на Е. Ньотер, 1915: симетрия \rightarrow запазваща се величина

- Приложения на теоремата на Ньотер (непрекъснати симетрии):
- Пример 1
 - Симетрия при трансляция в пространството ($x \rightarrow x + \Delta x$)
 - Запазване на импулса ($dp/dt = 0$)
- Пример 2
 - Симетрия при трансляция във времето ($t \rightarrow t + \Delta t$)
 - Запазване на енергията ($dE/dt = 0$)

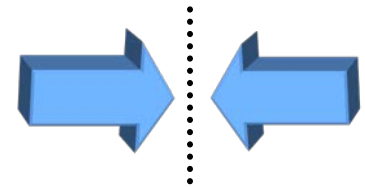
Дискретни симетрии

С, Р и Т трансформации

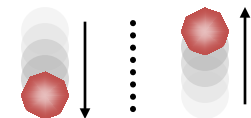
С – зарядово спрягане : сменя заряда на частицата, $Q \rightarrow -Q$
($e^+ \rightarrow e^-$, $K^- \rightarrow K^+$)



Р – пространствено отражение, четност: $x, y, z \rightarrow -x, -y, -z$

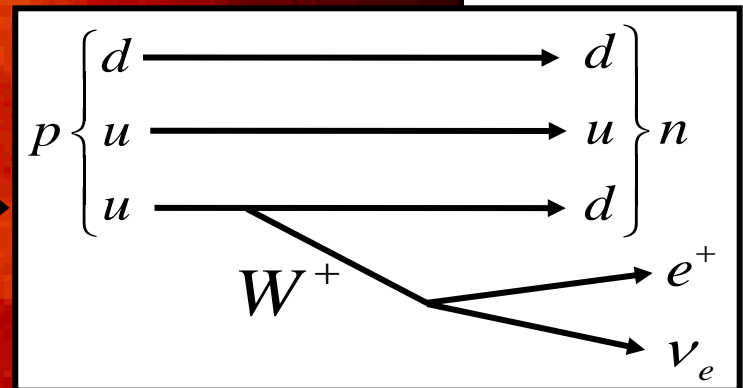
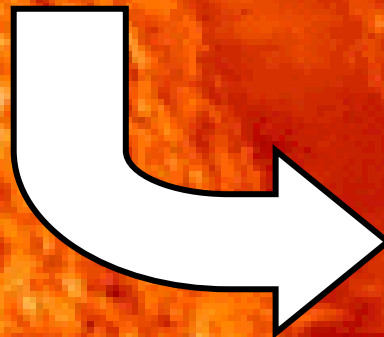
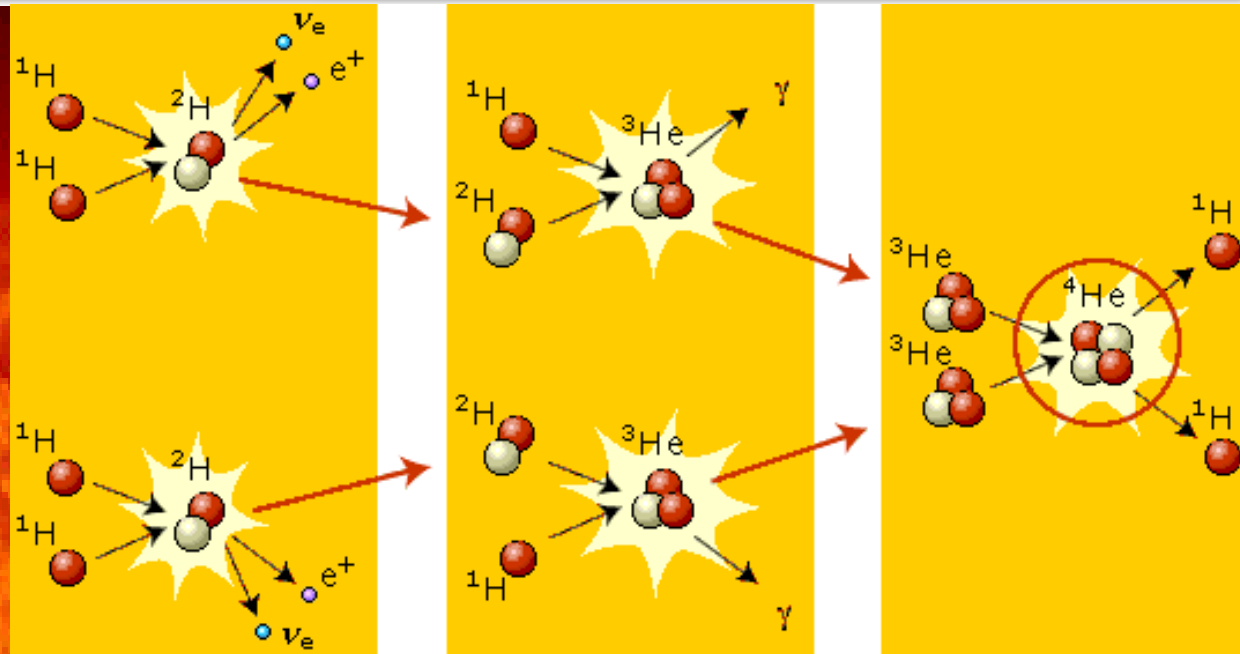


Т – обръщане на времето, сменя посоката на движение



Инвариантни ли са законите на физиката спрямо тези дискретни трансформации?

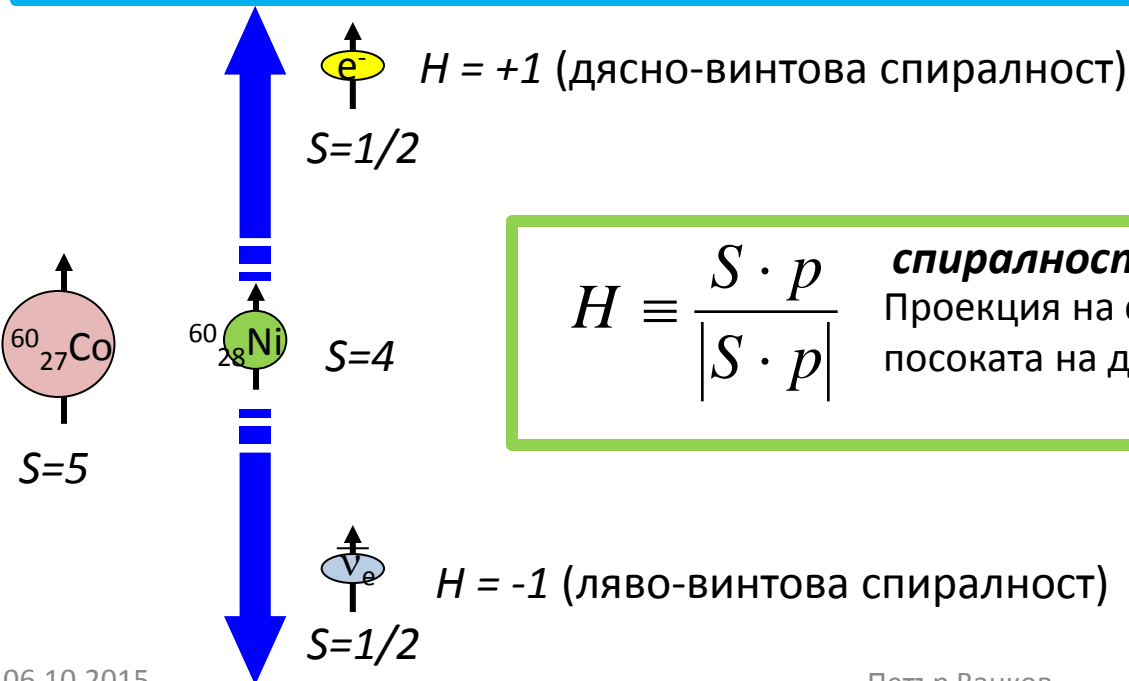
Слабо взаимодействие



Огледална симетрия, P

1956 г. – Лий и Янг подлагат на съмнение инвариантността на огледалната симетрия при слабите взаимодействия.

Мадам **Чиен-Шиунг Ву** предлага експеримент за проверка на огледалната симетрия: *Измерване на спина на продуктите на разпад на поляризирани радиоактивни ядра:* ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$



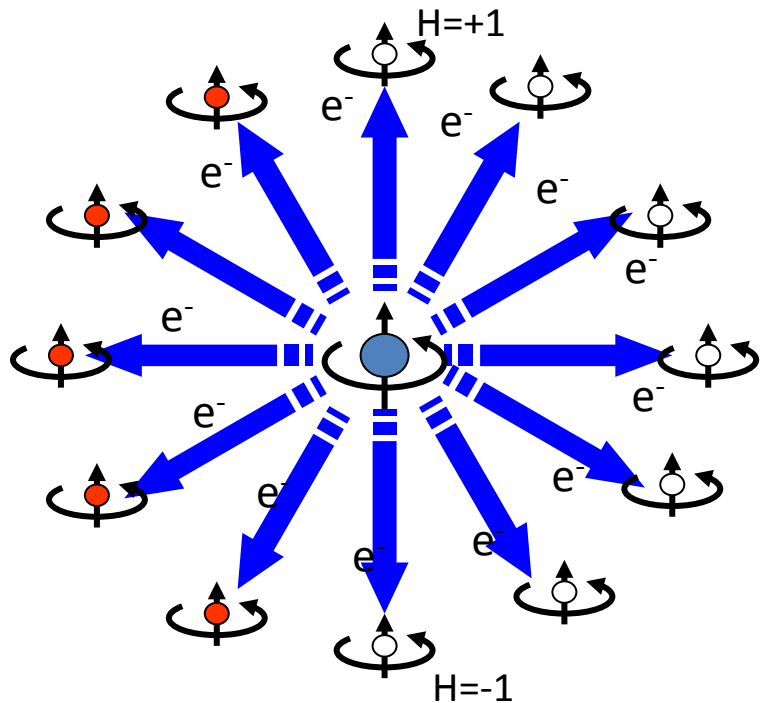
$$H \equiv \frac{S \cdot p}{|S \cdot p|}$$

спиралност:
Проекция на спина в/у посоката на движение

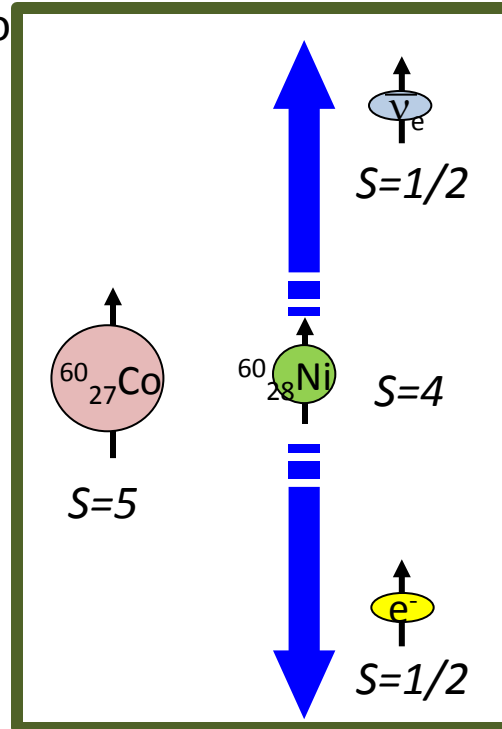


Огледална симетрия, P

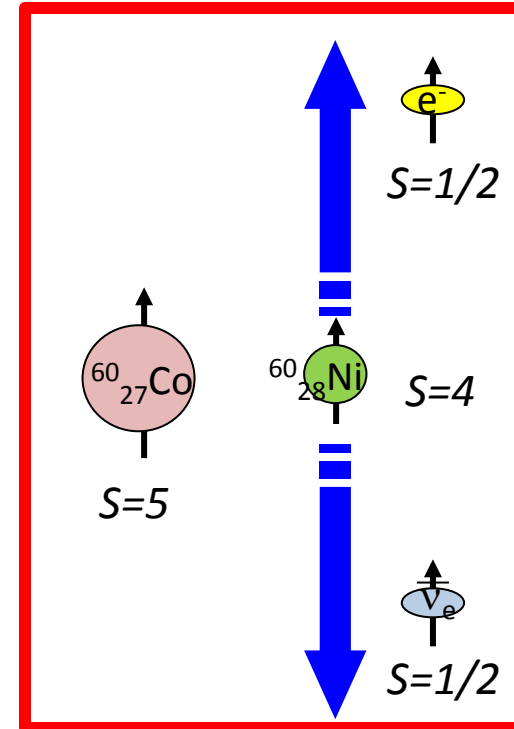
Всъщност, всяка ориентация на разпада би трябвало да е еднакво вероятна, тъй като нищо не забранява дадена ориентация на спина спрямо посоката на движение.



Да

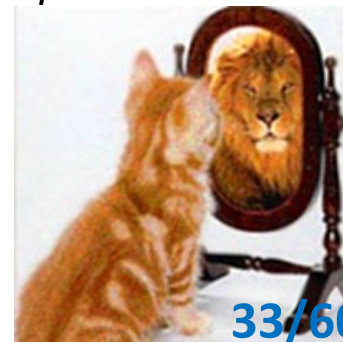


Не



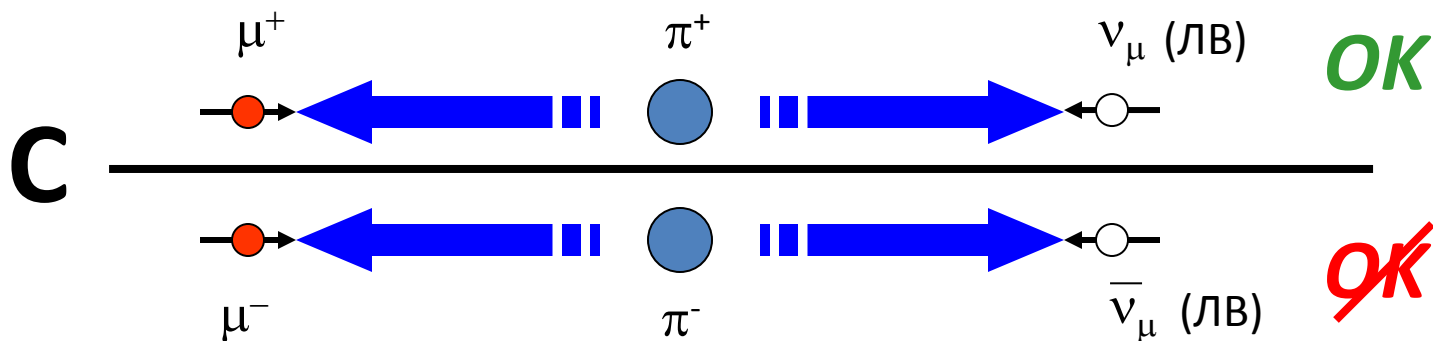
Резултат: Електроните се излъчват предимно в посока обратна на спина на ^{60}Co .

Следователно P е нарушена в слабото взаимодействие!
 - В природата съществуват само дясно-винтови
 антинеутрини (ляво-винтови неутрини).



Зарядово спрягане, C

- Запазва ли се C (операцията при която частицата са заменя с античастица (не само смяна на ел. заряда))?
- C е дискретна симетрия като P, $C^2=1$.



- Противоречие!, Следователно C също е нарушена!

CPT инвариантност

C и P са нарушени, ами CPT?

Важна теорема от Квантовата теория на полето:

Всички взаимодействия са инвариантни по отношение на комбинираната C, P и T трансформация.

Следствие:

- Частиците и античастиците имат еднакви маси и времена на живот.

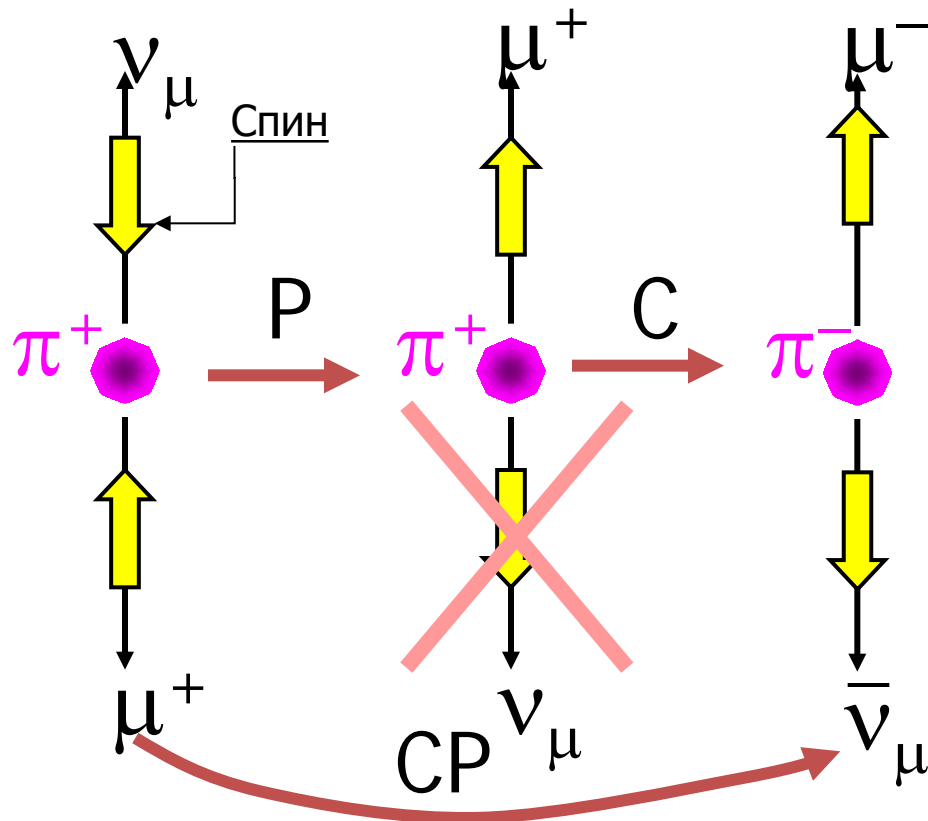
“Any Lorentz-invariant local quantum field theory is invariant under the successive application of C, P and T”

G. Lüders, W. Pauli (1954); J. Schwinger (1951)



Комбинирана CP четност

- Точна симетрия ли е $C+P \equiv CP$?
 - CP симетрията е пространствено отражение $(x,y,z \rightarrow -x,-y,z)$ последвано от зарядово спрягане $(X \rightarrow \bar{X})$



Изглежда, че CP се запазва в слабите взаимодействия ...

Комбинирана CP четност

Какво представлява K^0 ? \rightarrow електронеутрален, “странен” мезон

- Кваркова структура: $K^0 = \bar{s}d, \bar{K}^0 = s\bar{d}$
- Раждат се при силните взаимодействия
- Няма по-лек странен мезон
- \rightarrow Разпада им трябва да **не** запазва странността
- Силното взаимодействие запазва странността
- \rightarrow Разпада им е ч/з слабото в-вие.
- Осцилира ($K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$)

Странност, S:

$$S_{K^0} = 1, S_{\bar{K}^0} = -1$$

Структура vs. Маса/време на живот

Когато говорим за разпада на K^0 :

$$K_1 = (K^0 + \bar{K}^0) / \sqrt{2}$$

(CP-четно състояние, +1)

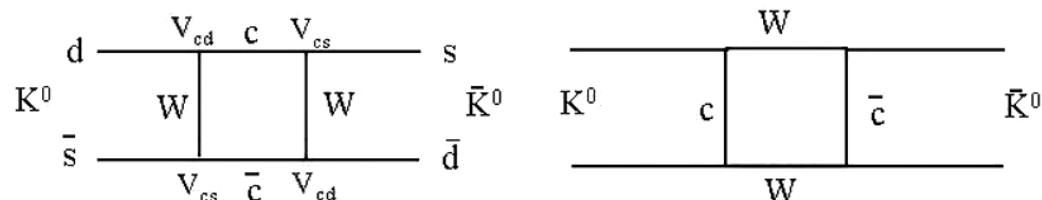
$$K_2 = (K^0 - \bar{K}^0) / \sqrt{2}$$

(CP-нечетно състояние, -1)

Времена на живот:

$$\tau_1 = 0.89 \times 10^{-10} \text{ sec}$$

$$\tau_2 = 5.2 \times 10^{-8} \text{ sec} \text{ (~600 пъти по-голямо!)}$$



Комбинирана CP четност

CP=+1 **CP=+1**

$$K_1 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$$

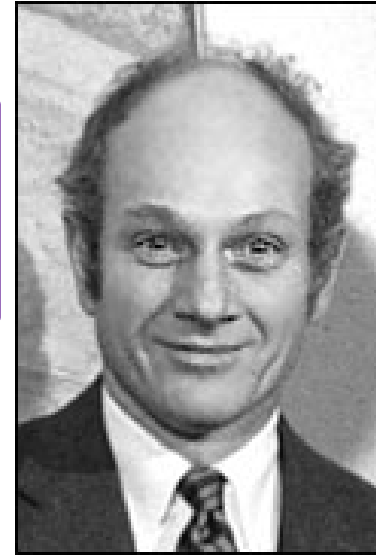
$$K_1 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

CP=-1 **CP=-1**

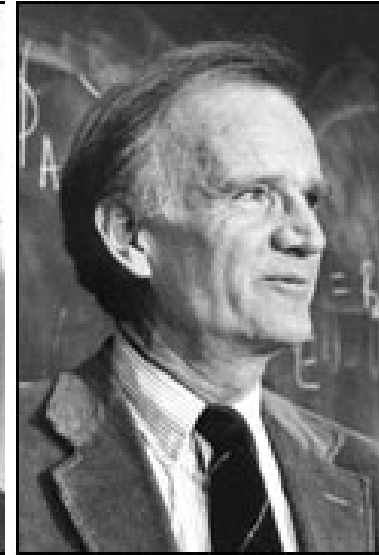
$$K_2 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$$

$$K_2 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

Само CP-четни (CP-нечетни) състояния могат да се разпаднат на 2 пиона (3 пиона).

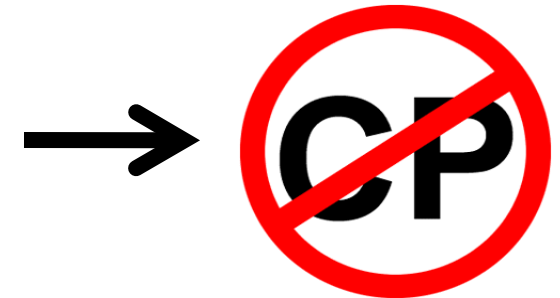


James Cronin



Val Fitch

1964г., Дж. Кронин, Вал Фитч, Р. Търли и Дж. Кристенсън
 \rightarrow 0.2% от случаите се наблюдава $K_2 \rightarrow \pi\pi$



$$K_S \sim K_1 + \varepsilon_S K_2 \quad K_L \sim K_2 + \varepsilon_L K_1$$

ако CPT: $\varepsilon_S = \varepsilon_L = \varepsilon = 0.0023$

Рядък феномен:

- 22700 разпада на K_2
- От тях само 45 събития с $K_2 \rightarrow \pi\pi$

Комбинирана CP четност

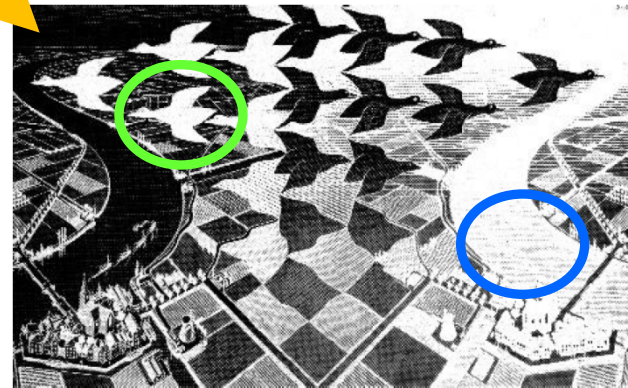
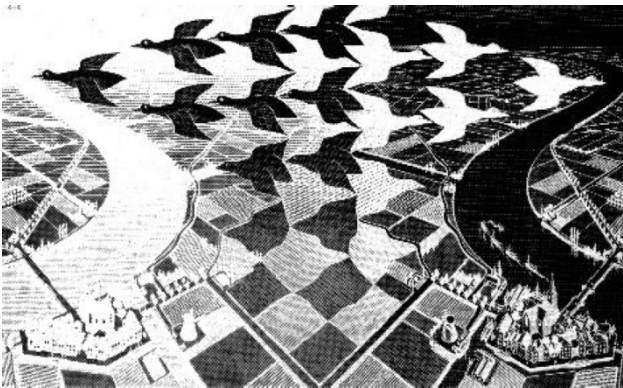
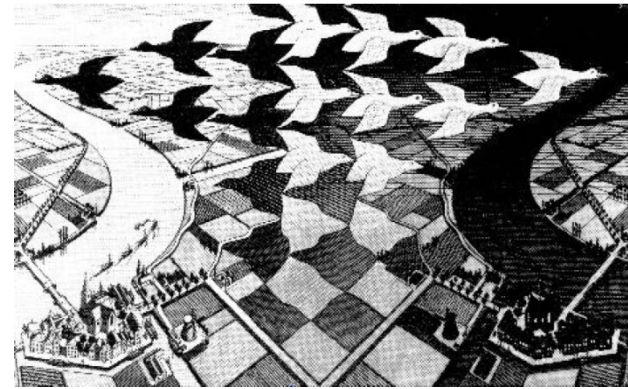
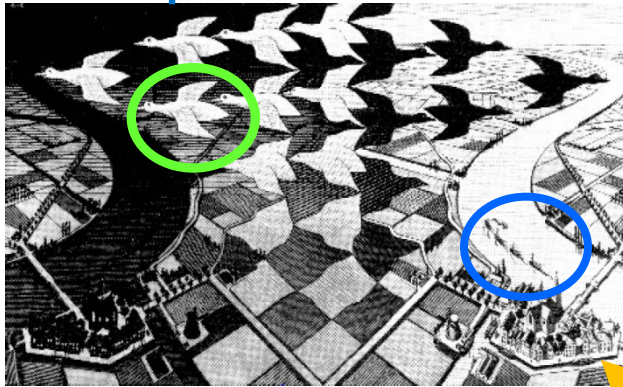
Комбинираната CP четност е нарушена.

В. Фитч, Дж. Кронин -1980г., нобелова награда по физика



CP-нарушение по Ешпер

материя



ЦВЯТ → АНТИ-ЦВЯТ

антиматерия

ЛЯВО → ДЯСНО

1. P, C и CP симетриите се запазват в EM и силното взаимодействия
2. P, C и CP симетриите се нарушават в слабото взаимодействие
3. т.2 е в синхрон с усл. на Сахаров за дисбаланс м/у материя и антиматерия

Само, че магнитуда на CP нарушението е недостатъчен ...

Трябва да има нещо повече ...

CP-нарушението в Стандартния модел

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

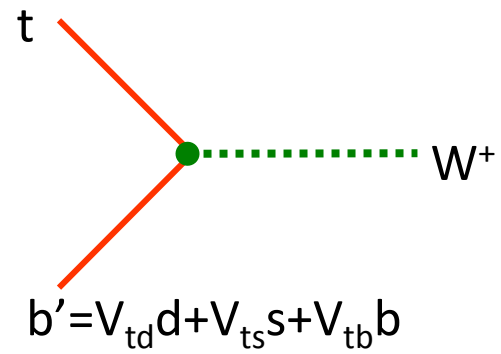
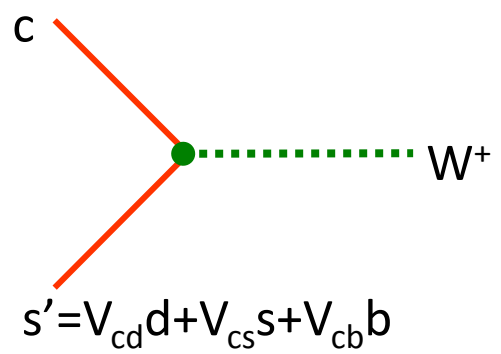
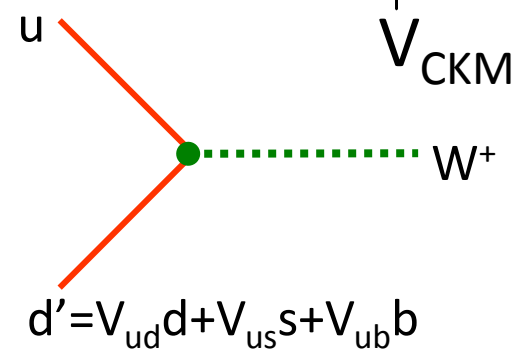
V_{CKM} – Матрица на Кабибо, Кобаяши и Маскава

1961

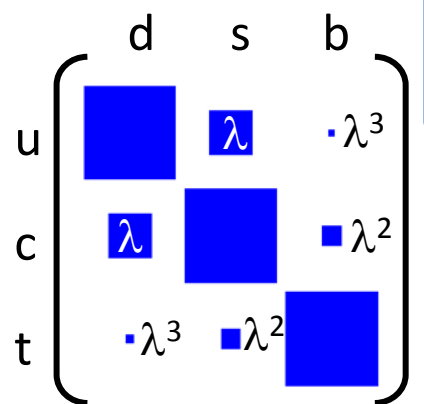
1972

- Елементите на V_{CKM} дават вероятността за преход долни \rightarrow горни кварки с излъчване на W бозон.

- Унитарна и комплексна 3×3 матрица



$\lambda = \cos(\theta_c) = 0.22$



d', s', b' – собствени с-я на Слабото в-е.
 d, s, b – собствени с-я на масата.

FNAL, 1977 – откриване на b ($4.2 \text{ GeV}/c^2$)
 1995 – откриване на t ($174 \text{ GeV}/c^2$)

3-то поколение кварки



\rightarrow защото V_{CKM} е комплексна.

CP-нарушението в Стандартния модел



Макото
Кобаяши



Тошихиде
Маскава



Нобелова награда за 2008г.

Н. Кабибо

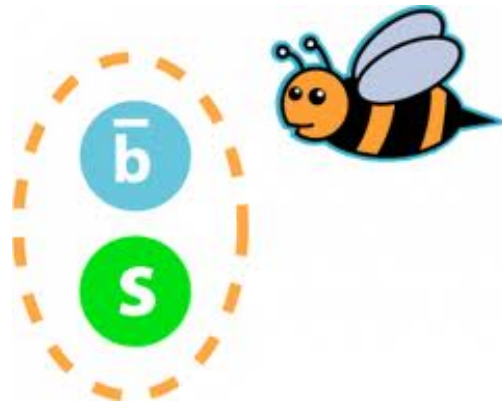
"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

Bottom (Beauty): B (“bee”) мезони

В края на 80те се разбира, че най-доброто място за тест на СКМ механизма за CP-нарушение е не K^0 мезона, а B^0 мезона.

Защо B^0 ?: *Защото дава достъп до $\arg(V_{ub})=\gamma$ и $\arg(V_{td})=\beta$*

- Подобно на K^0 : B^0 може да осцилира в B^0 и обратно;
- Подобно на K^0 : Вълновата му функция се разлага на комбинация от масови (B_H/B_L) и CP(B_+, B_-) състояния;
- За разлика от K^0 : B^0 е тежък и има хиляди моди на разпад;
- Има сравнително голямо време на живот (ps).

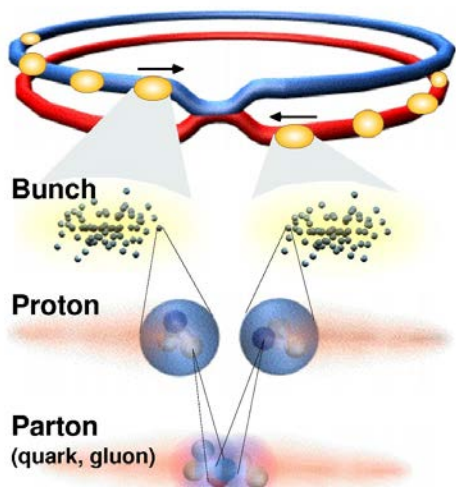


BOTTOM MESONS ($B = \pm 1$)

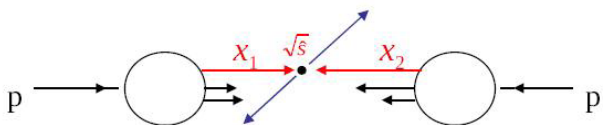
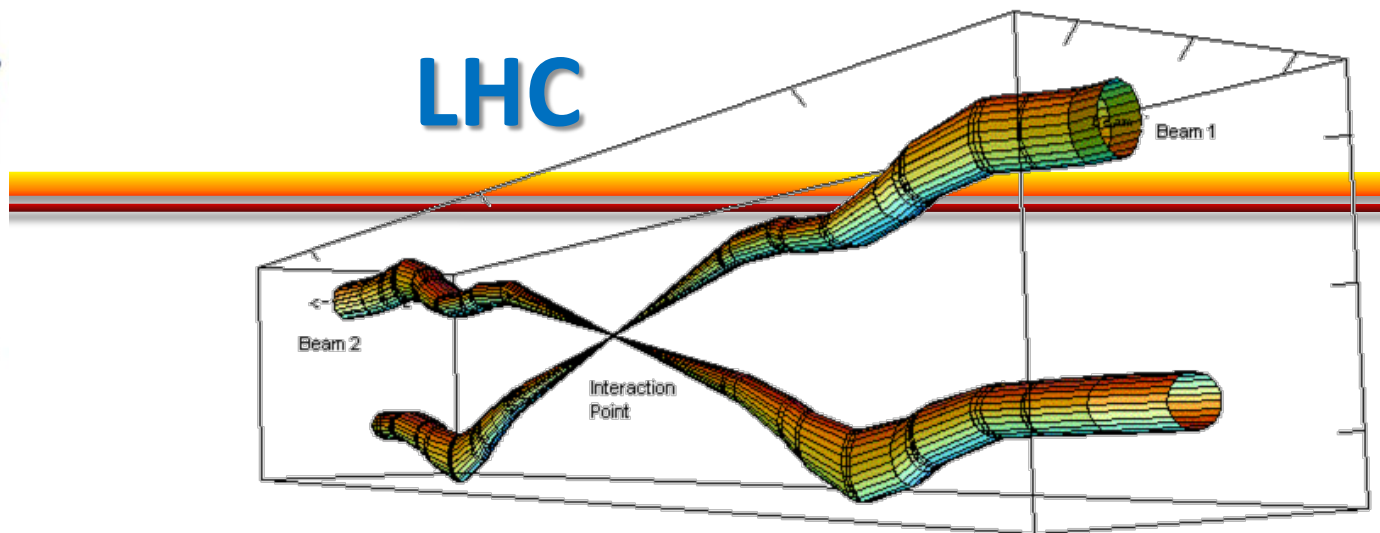
$$B^+ = u\bar{b}, B^0 = d\bar{b}, \bar{B}^0 = \bar{d}b, B^- = \bar{u}b, \text{ similarly for } B^{*'}\text{'s}$$

BOTTOM, STRANGE MESONS ($B = \pm 1, S = \mp 1$)

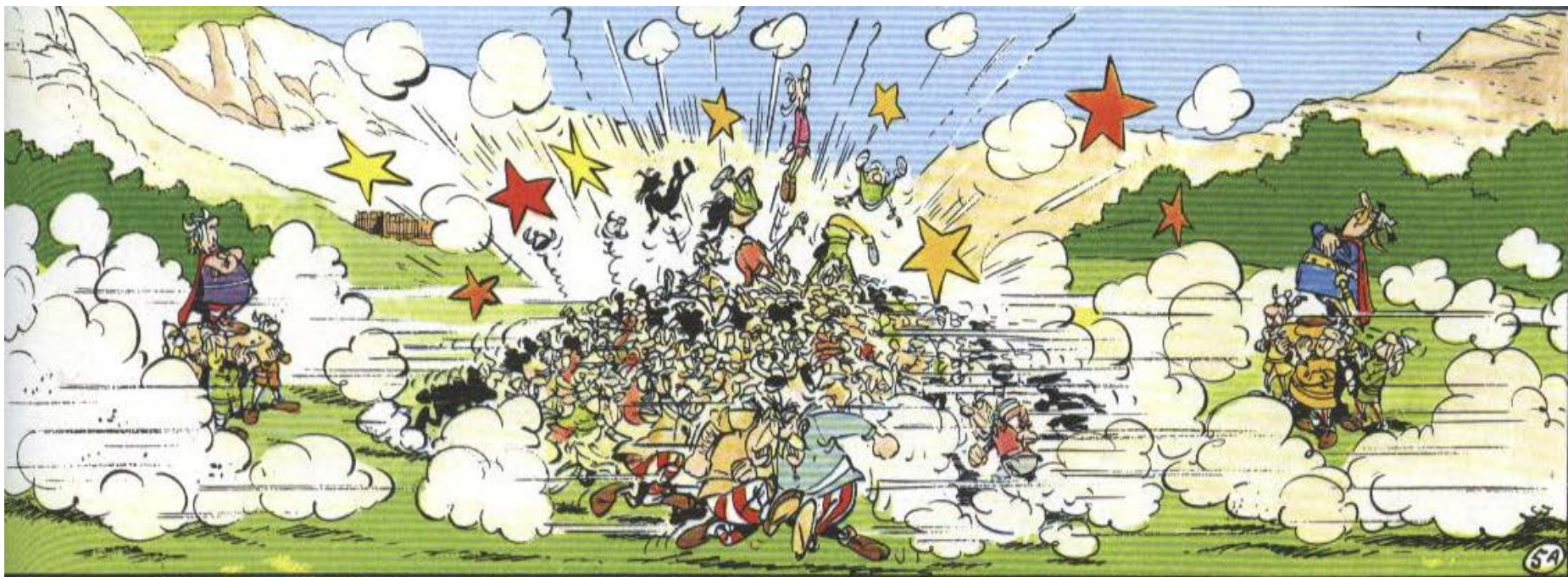
$$B_s^0 = s\bar{b}, \bar{B}_s^0 = \bar{s}b, \text{ similarly for } B_s^{*'}\text{'s}$$



LHC

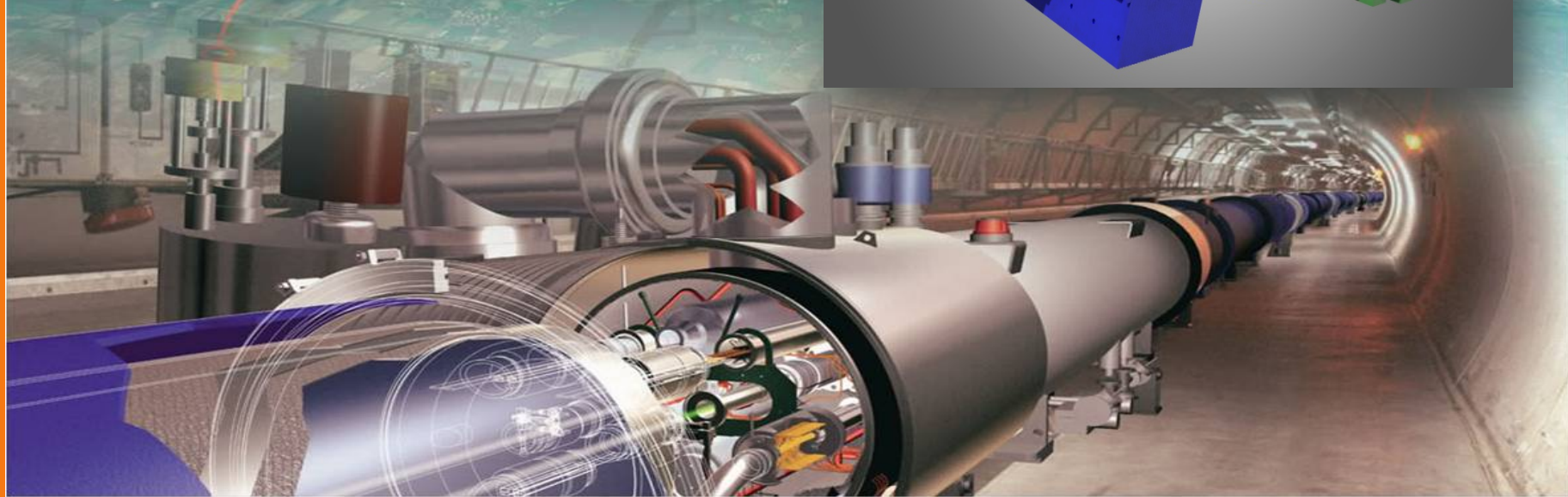
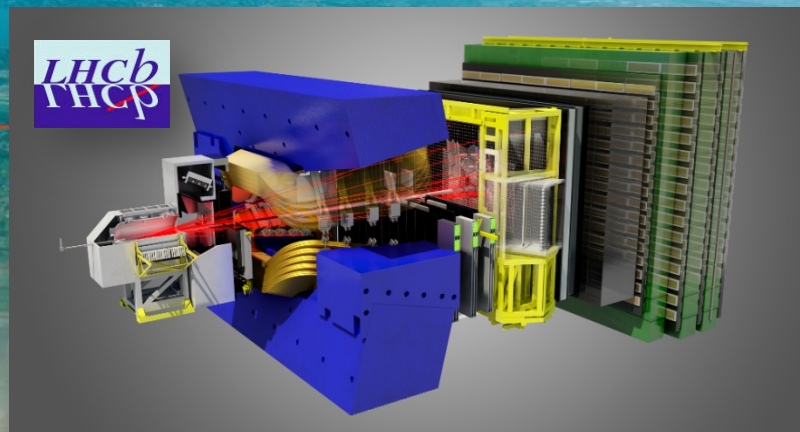


- Ъгъл на пресичане = $300 \mu\text{rad}$
- Протонните групи са фокусирани до $16 \mu\text{m}$.



LHCb: Експеримент за прецизно измерване на CP-нарушението и редки B разпади

-700 физици, 50 института, 15 държави
(България не участва)



Къде се намира?



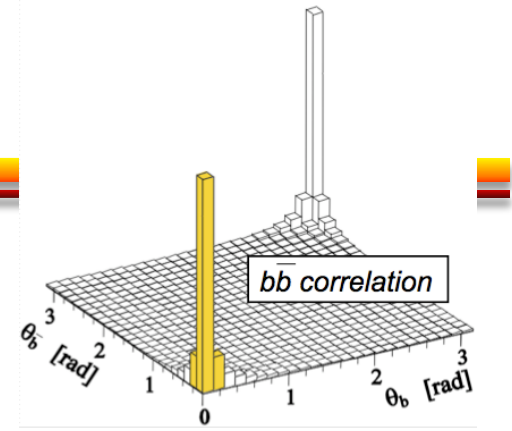
CMS, ATLAS и LHCb

ATLAS

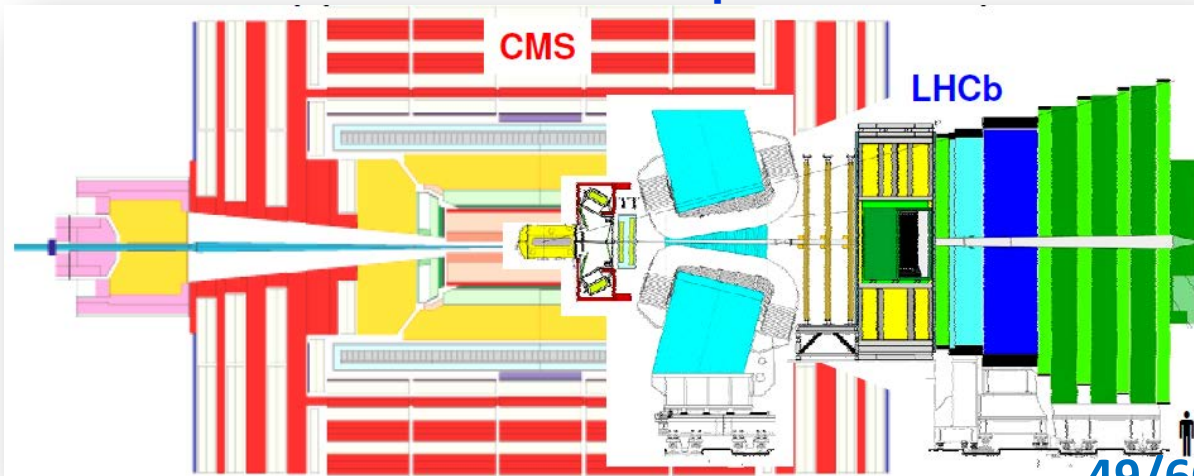
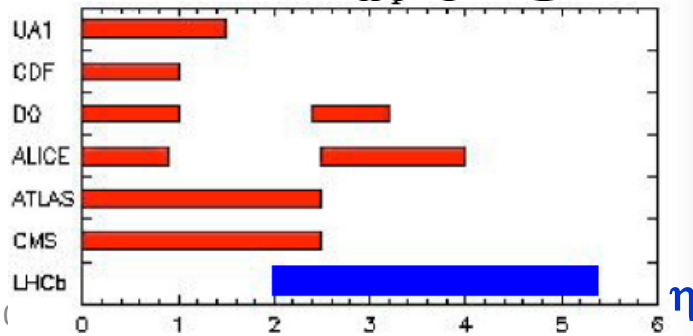
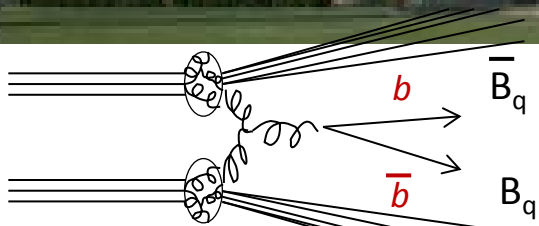
Диаметър 25 m
 Дължина 46 m
 Тежест 7000 t
 Маг. Поле 2 T + 0.5 T

CMS

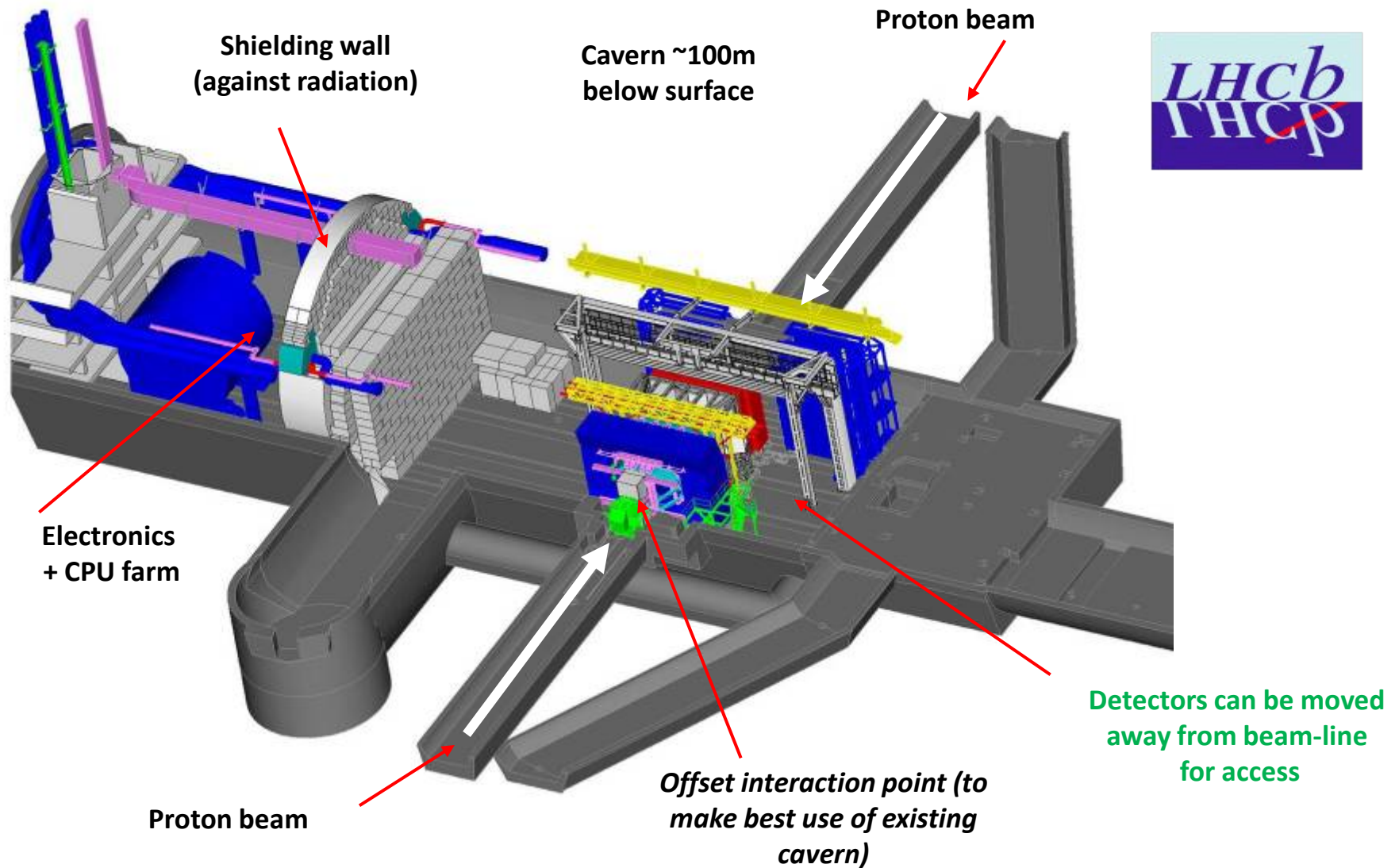
15 m
 21.5 m
 12550 t
 4 T



- Производството на $b\bar{b}$ е концентрирано в предно и задно направление
- LHCb е детектор с челна (предна) геометрия с изключително $2 < \eta < 6$ покритие



Каверна на LHCb



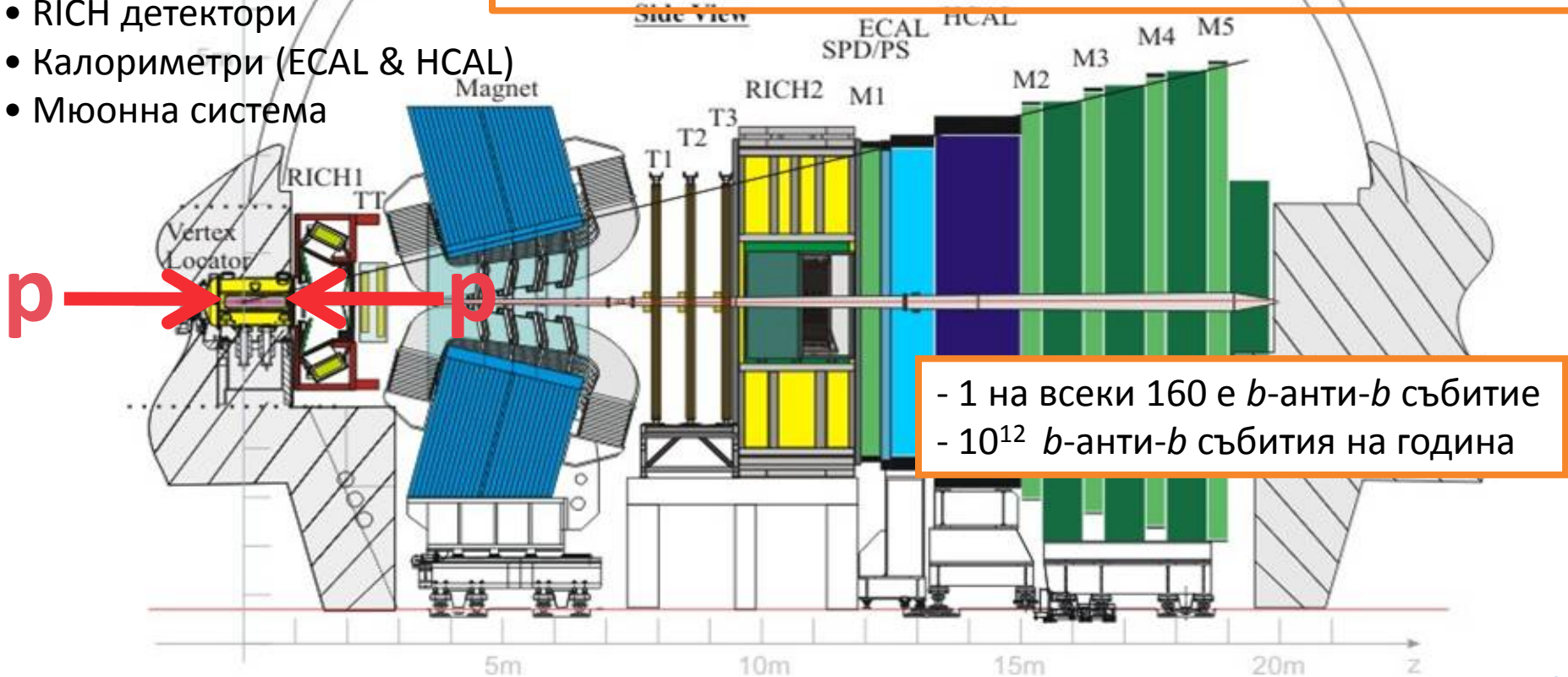
LHC beauty experiment (LHCb)

Главни компоненти:

- Si вертексен детектор
- Магнит
- Трекерни станции (вътрешни : Si, външни: газови камери)
- RICH детектори
- Калориметри (ECAL & HCAL)
- Мюонна система

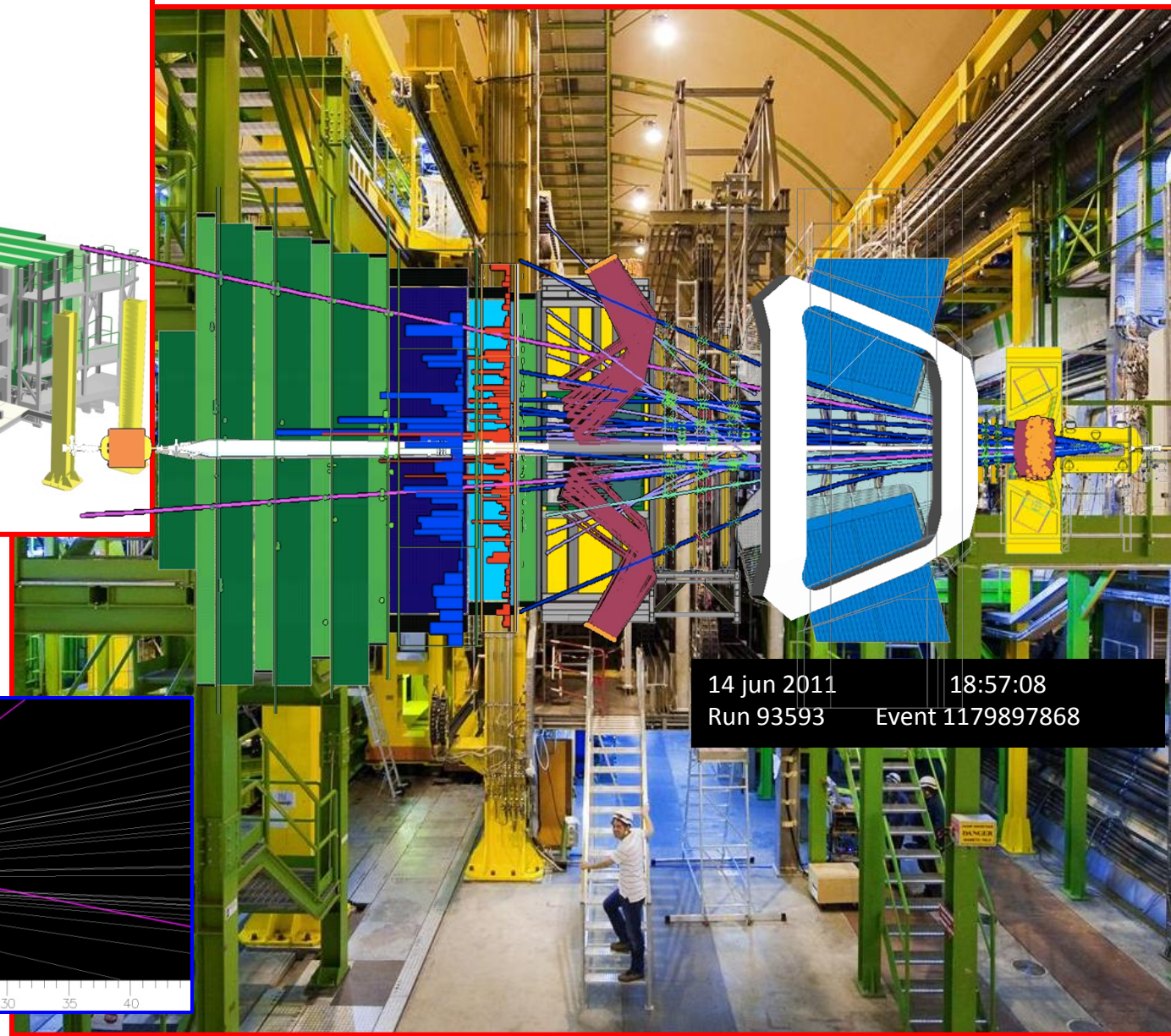
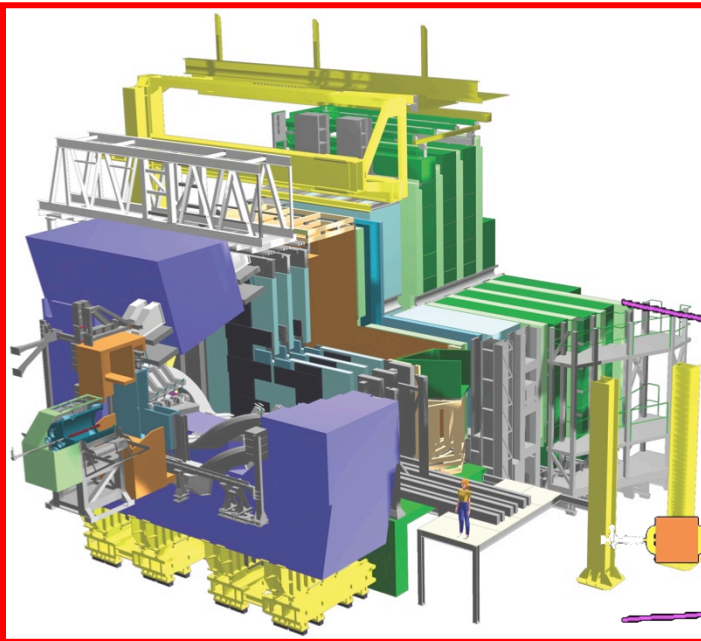
Цел:

- ✓ Изучаване на B -мезоните и техните разпади.
- ✓ Търсене на нови сили и частици, които биха обяснили наблюдавания дисбаланс м/у материя и антиматерия ч/з провеждането на прецизни измервания в системата на B -мезона.

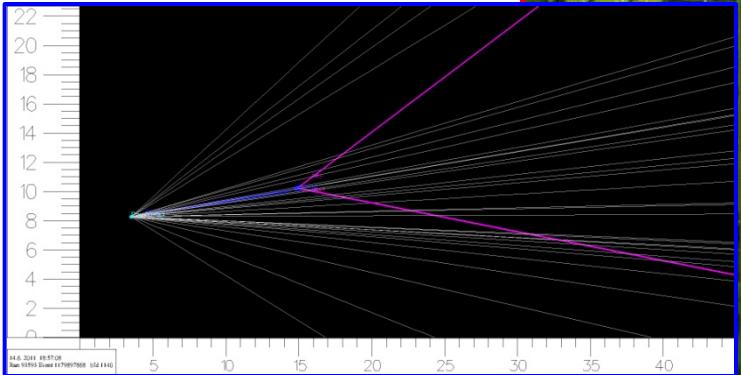


- 1 на всеки 160 е b -анти- b събитие
 - 10^{12} b -анти- b събития на година

По-реалистичен изглед

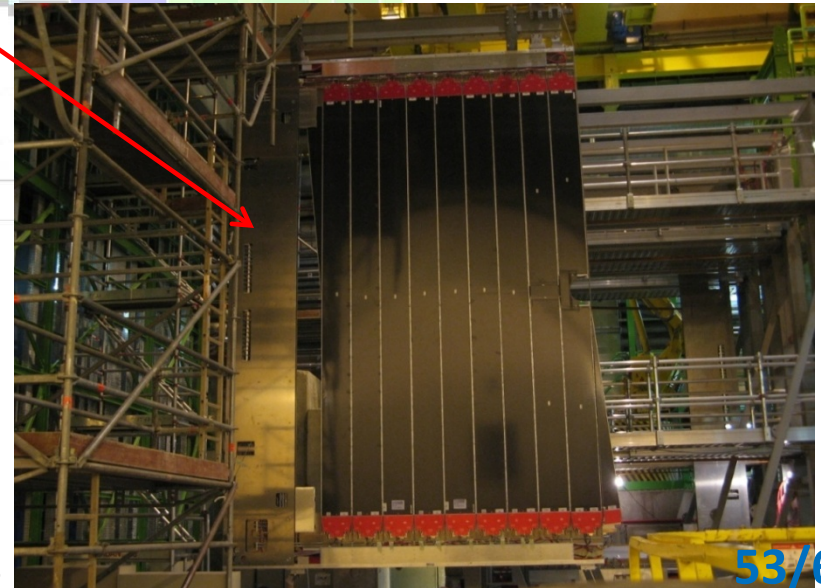
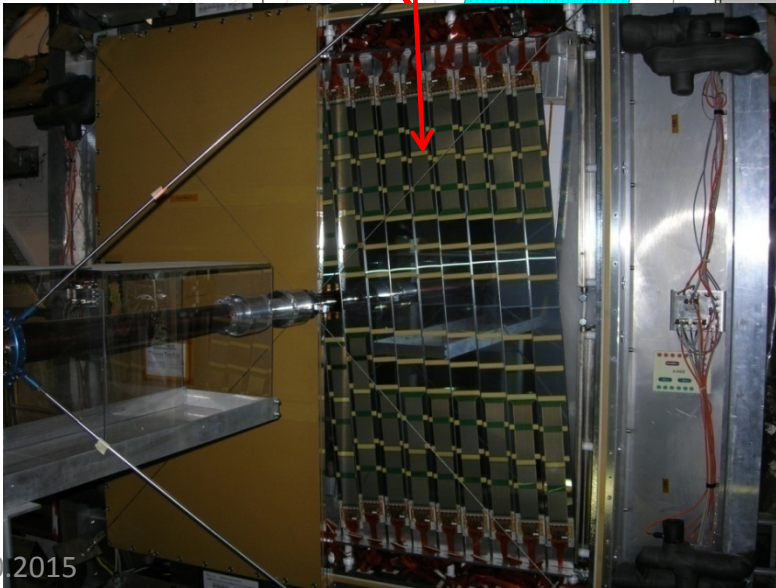
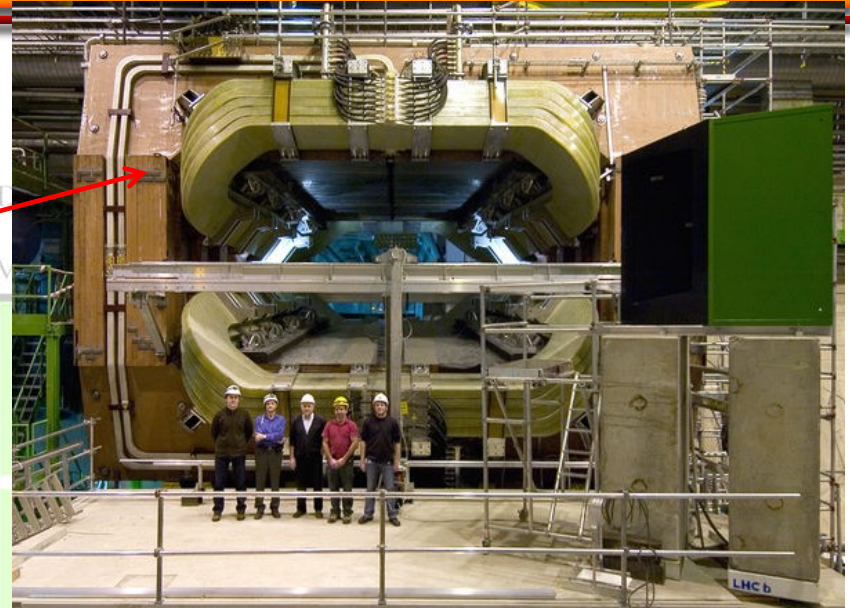
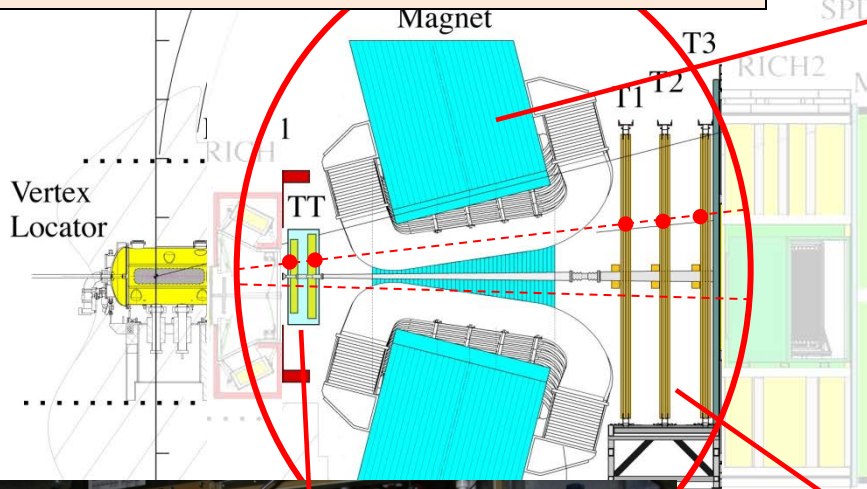


14 jun 2011 18:57:08
Run 93593 Event 1179897868



LHCb – тракерна система

Реконструиране на трековете на заредените частици /Измерване на импулса



10m

LHCb – външен тракер

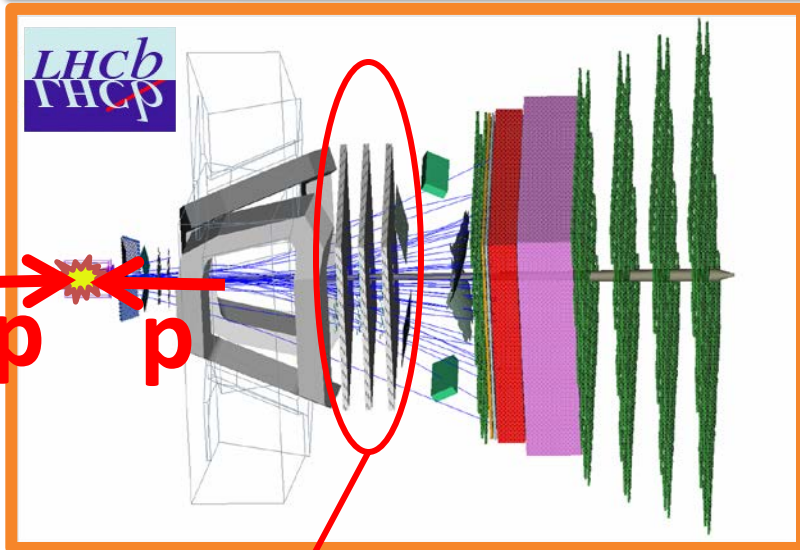


Външен тракер

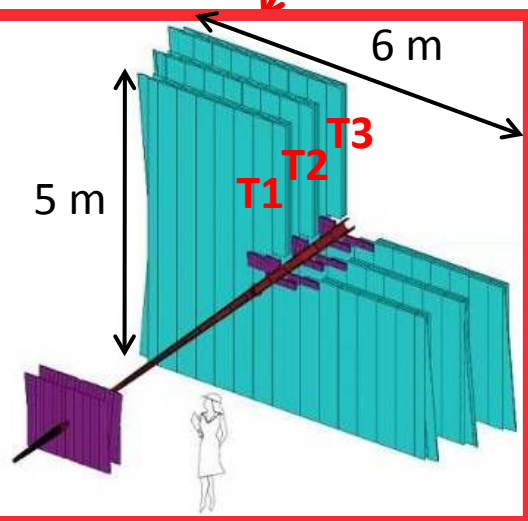
Високо ефективен и точен газов тракер

Модулен дизайн

Брой канали:
53.760



ОТ: 3 станции с модули при 0° , -5° , 5° , 0°



ЛНСb – външен тракер

сламка



Сламка:

- Радиус: 2.5 mm
- Дължина: 2.5 m

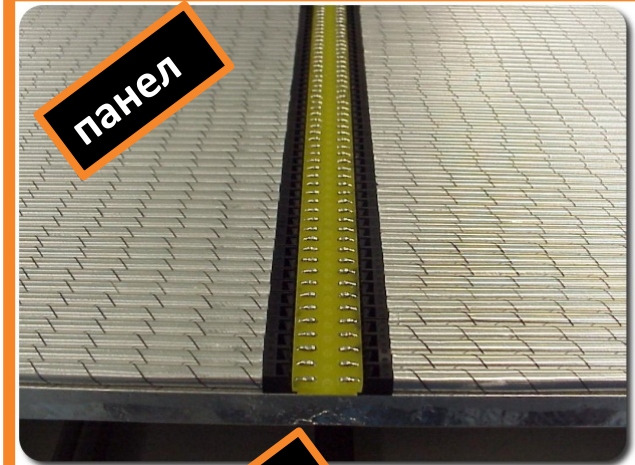
Газ:

- Ar/CO₂ (70:30)
- Циркулация: 1 обем/2 часа

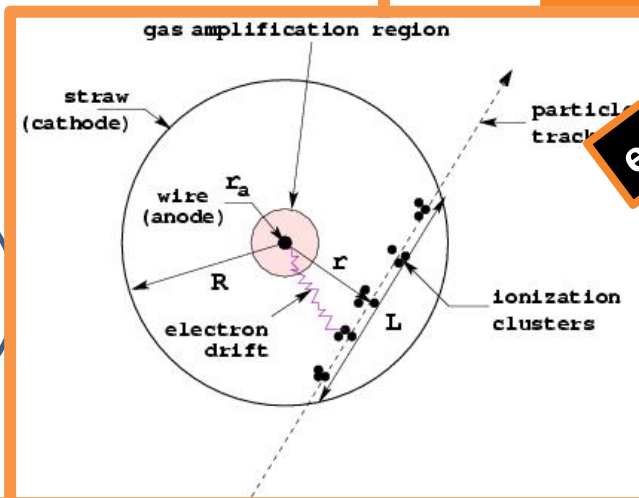
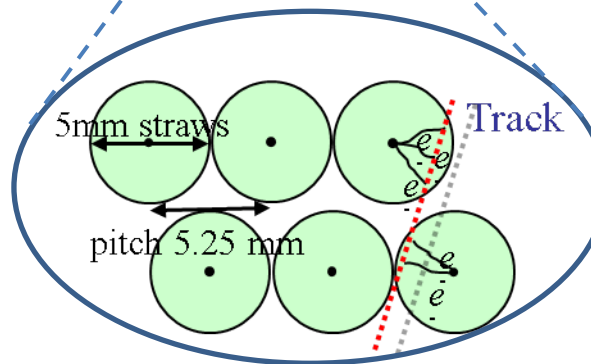
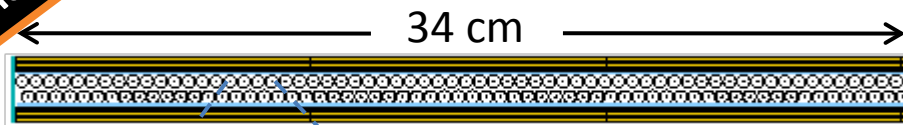
Голям (F) модул:

- размери: 34 cm x 490 cm
- 2 панела x 2 x 64 = 256 канала

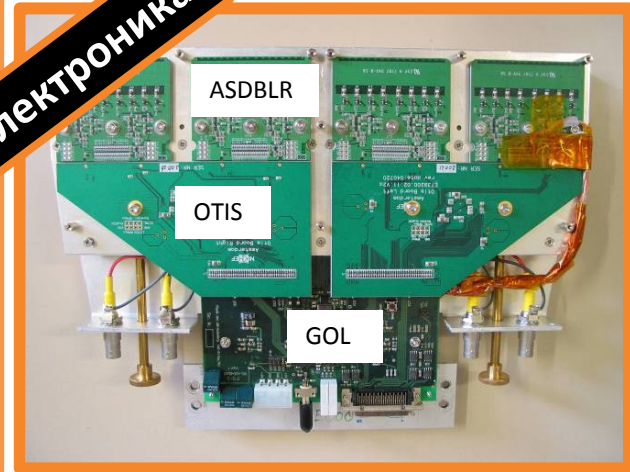
панел



модул



електроника

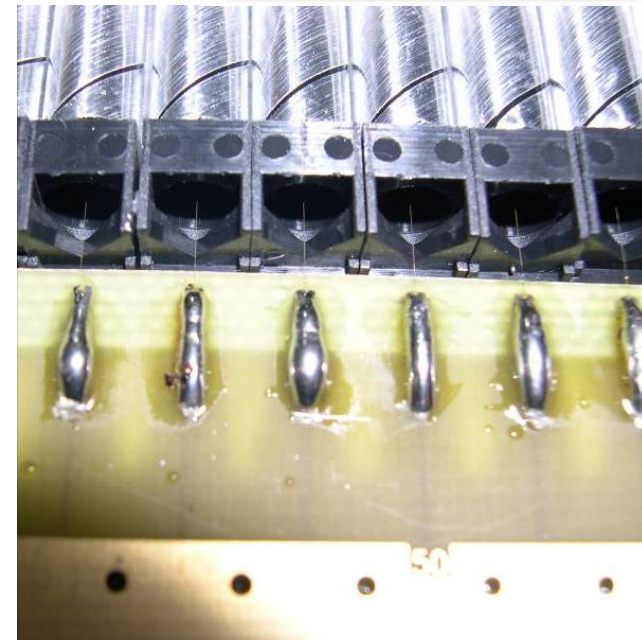
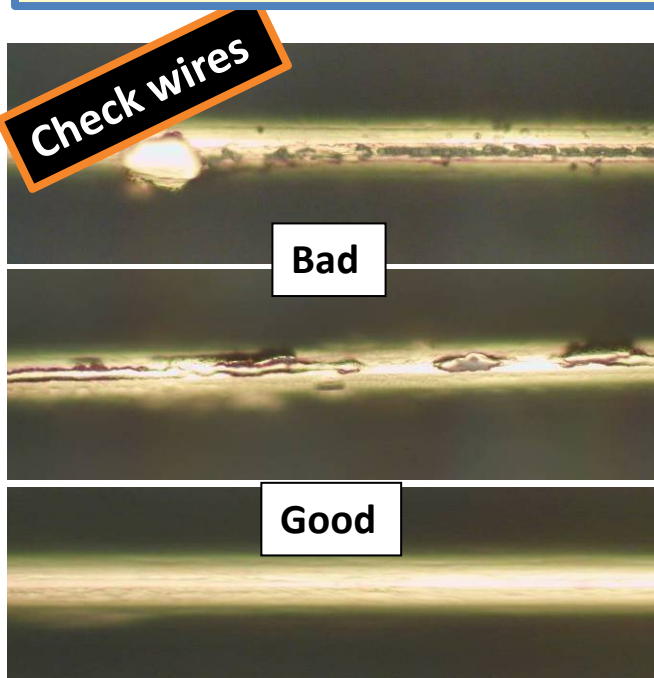


LHCb – външен тракер

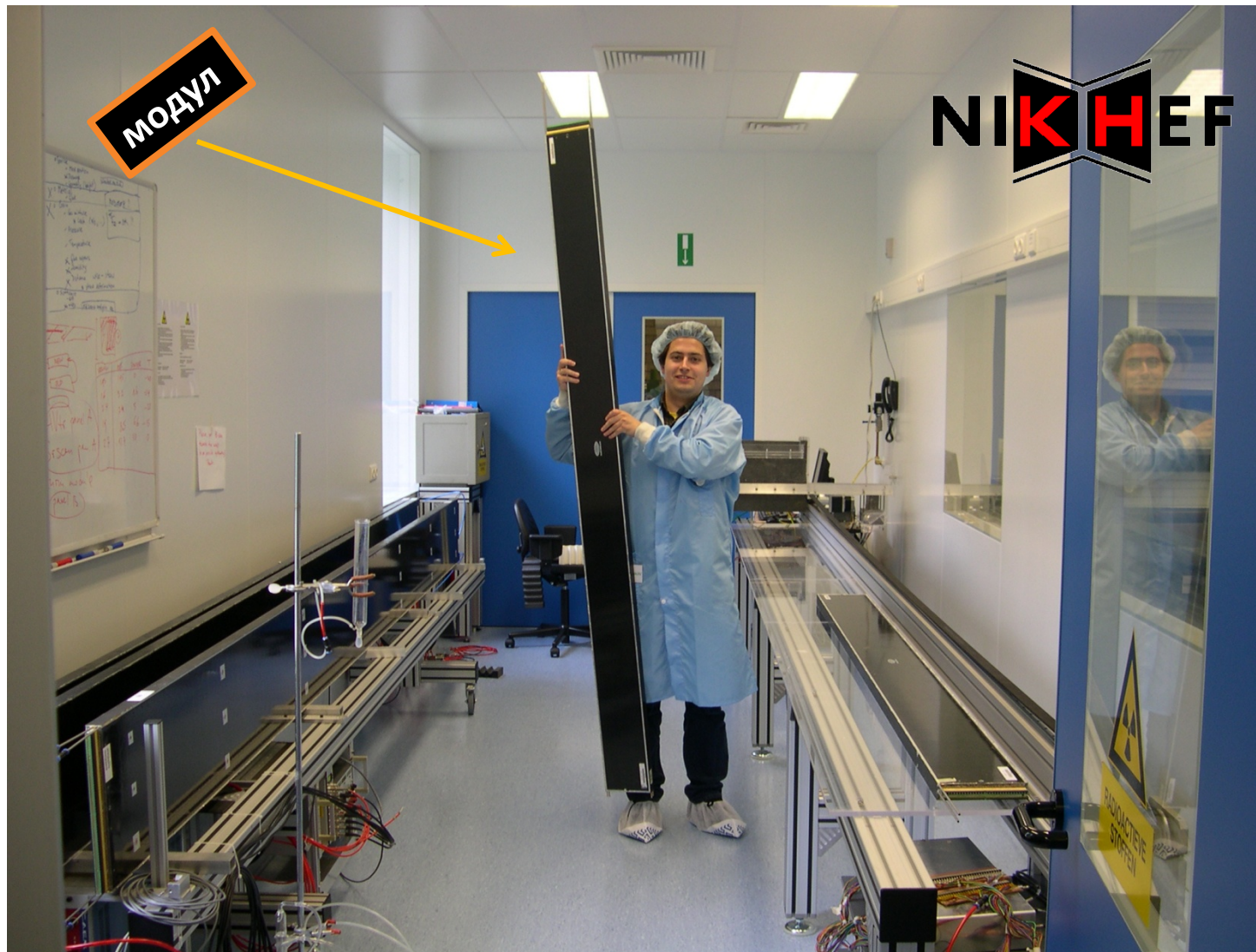
Валидиране и контрол по качеството

- Качество на анодната жица (визуален тест с микроскоп)
- Сила на триене м/у анодните локатори и катодната сламка
- Позиция на анодната жица в сламката
- Сила на опъване (натегнатост) на анодната жица
- Херметичност на модула
- Трениране с високо напр. и регистрираща газова смес
- Финално валидиране с радиоактивен източник

Wire tension check



LHCb – външен тракер



LHCb – в търсене на нова физика



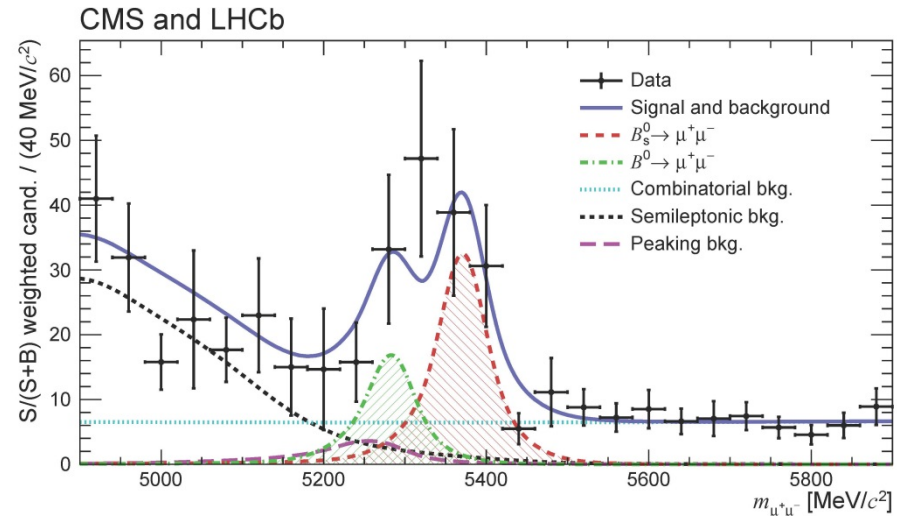
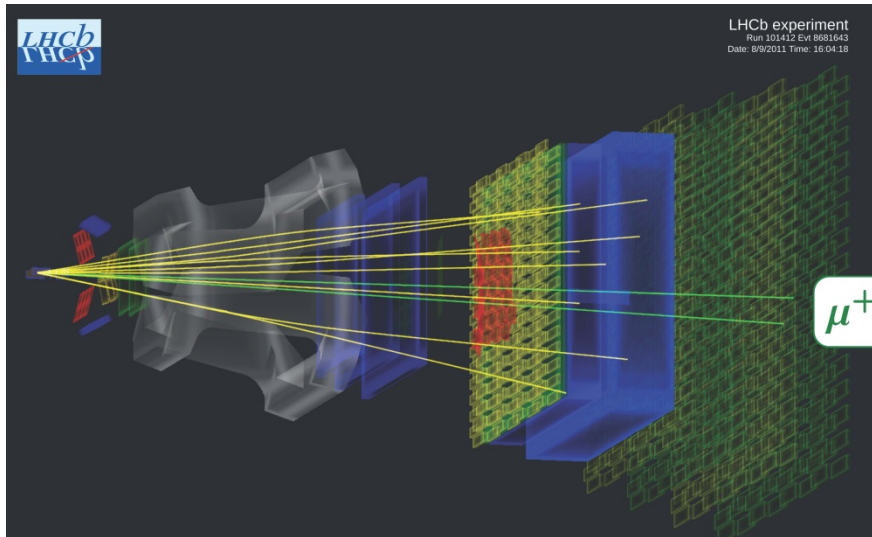
Изследване на редки B разпади: $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Very precise SM predictions [PRL 112 (2014) 101801]:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

$$\mathcal{B}(B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$

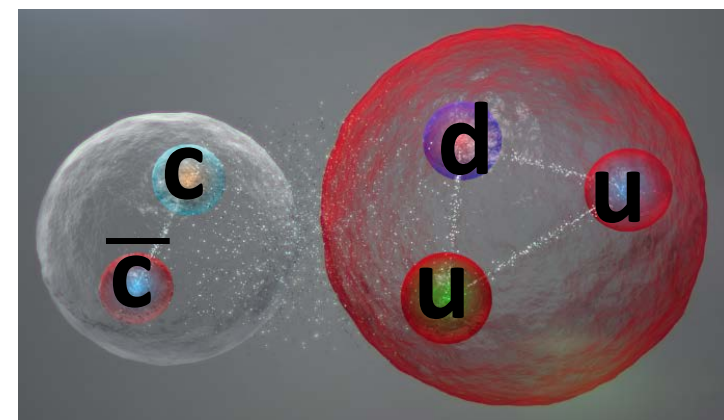
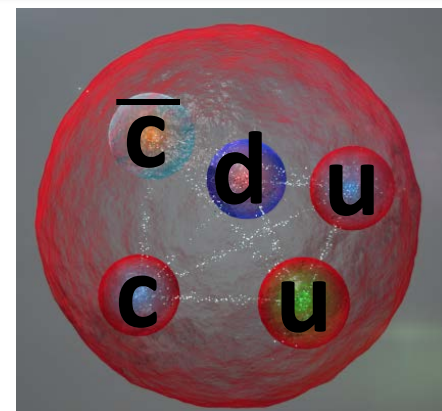
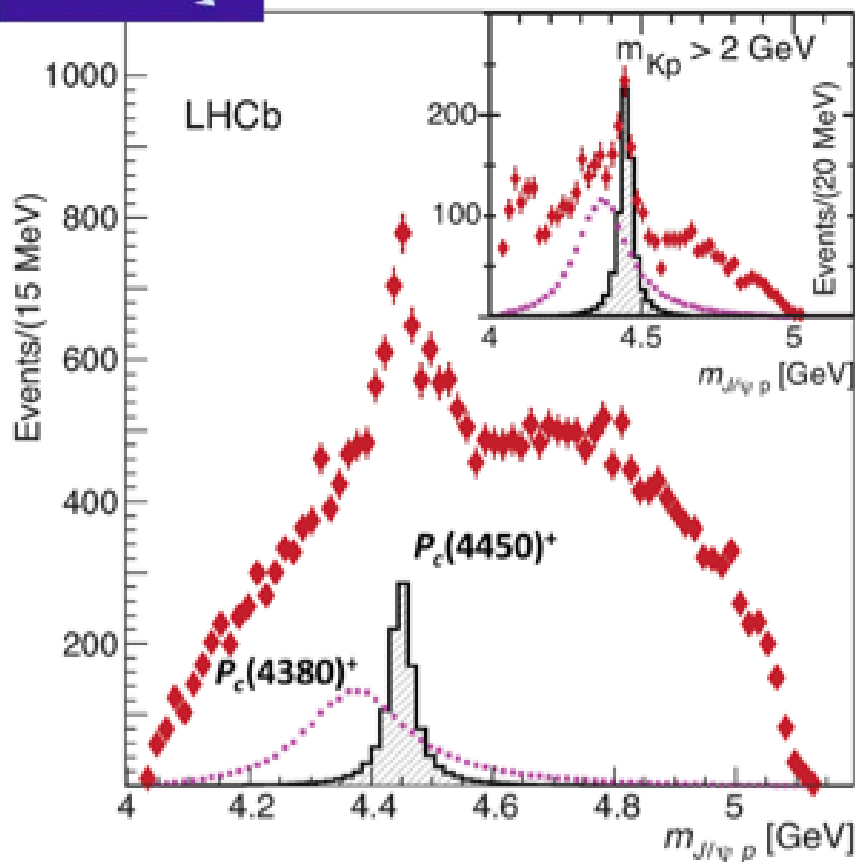
SUSY=supersymmetry



$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 2.8_{-0.6}^{+0.7} \times 10^{-9} \quad 6.2\sigma$$

$$\mathcal{B}(B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 3.9_{-1.4}^{+1.6} \times 10^{-10} \quad 3.2\sigma$$

Пентакварки



The mass of J/ψ -proton ($J/\psi p$) combinations from $L_b \rightarrow J/\psi p K$ decays. The data are shown as red diamonds. The predicted contributions from the $P_c(4380)^+$ and $P_c(4450)^+$ states are indicated in the purple and black distributions, respectively. Inset: the mass of $J/\psi p$ combinations for a restricted range of the $K p$ mass, where the contribution of the wider $P_c(4380)^+$ state is more pronounced. (The other contributions from conventional hadrons, which are responsible for the remaining features in the data distributions, are not displayed.)

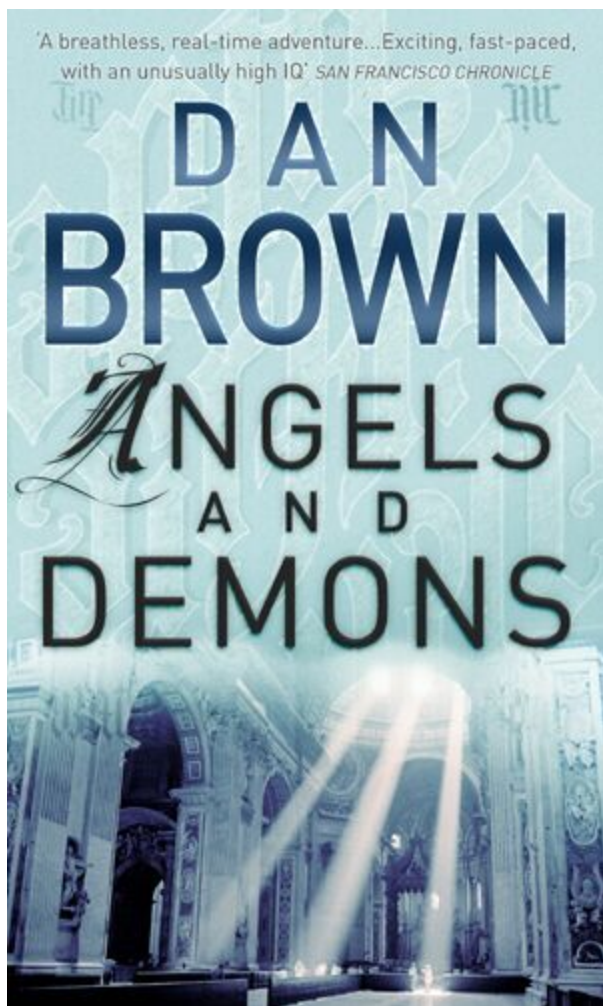
Заключение

- Липсата на антиматерия в наблюдаемата Вселената е един от най-интригуващите проблеми на съвременната наука
- Нарушение на CP е необходимо за Вселена обитавана не само от фотони ...
- CP -нарушението може да бъде обяснено от CM , само с наличието на 3 поколения елементарни частици
- CM не предоставя достатъчно “количество” CP -нарушение за обяснение на дисбаланса м/у материя и антиматерия
- В CERN се провеждат редица експерименти за изучаване свойствата на антиматерията
- LHCb тества CM и търси нови източници на CP -нарушение

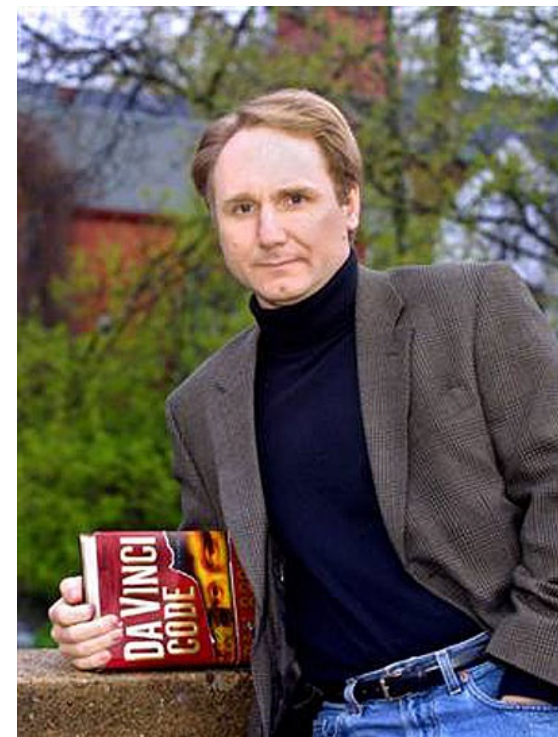


Допълнителна информация

Истина или фикция?



Дан Браун



Допълнителна информация

<http://angelsanddemons.cern.ch/antimatter/making-antimatter>

Antimatter at CERN

Antimatter is produced in many experiments at CERN. In collisions at the Large Hadron Collider the antiparticles that are produced cannot be trapped because of their very high energy - they annihilate harmlessly in the detectors. **The Antiproton Decelerator** at CERN produces much slower antiprotons that can be trapped. These antiprotons can then be studied to explore questions such as: do antiparticles fall upwards? Antimatter production in practice.

At CERN, **protons with an energy of 26 GeV** (about 30 times their mass at rest) collide with nuclei inside a metal cylinder called a target. About **four proton-antiproton pairs** are produced in every million collisions. The antiprotons are separated from other particles using **magnetic fields** and are guided to the Antiproton Decelerator, where they are **slowed down from 96% to 10% of the speed of light**. They are ejected and run through beam pipes into experiments to be trapped and stored.

Small, very small quantities

Even if CERN used its accelerators only for making antimatter, it could produce no more than about **1 billionth of a gram per year**. To make **1 g** of antimatter - the amount made by Vetra in the movie - would therefore take about **1 billion years**.

The **total amount of antimatter** produced in CERN's history is less than **10 nanograms** - containing only enough energy to power a **60W light bulb for 4 hours**.

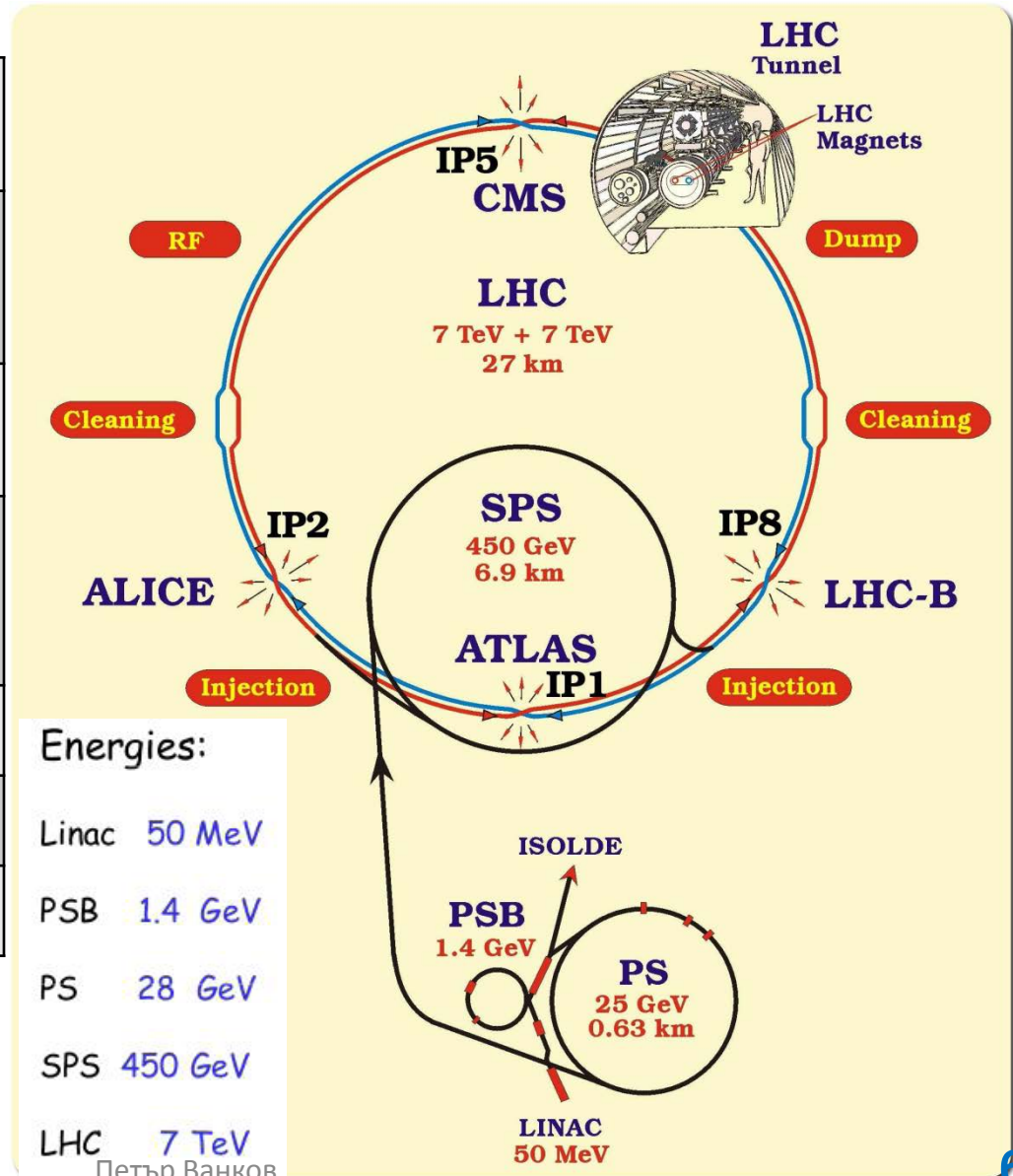
The efficiency of antimatter production and storage is very low. About 1 billion times more energy is required to make antimatter than is finally contained in its mass. Using $E = mc^2$, we find that 1 gram of antimatter contains:

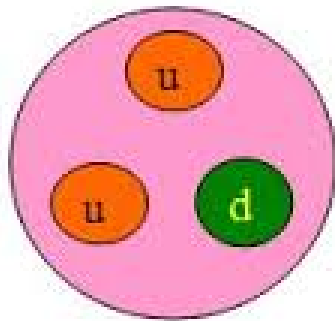
$$0.001 \text{ kg} \times (300,000,000 \text{ m/s})^2 = 90,000 \text{ GJ} = 25 \text{ million kWh}$$

Taking into account the low production efficiency, it would need 25 million billion kWh to make one single gram! Even at a discount price for electric power, this would cost more than a million billion Euros!

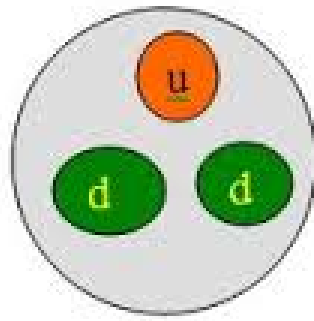
LHC

Енергия/сноп	7 TeV
Дължина на ринга	26.66 km
Магнитно диполно поле	8.33 T
Честота на пресичане на групите	40 MHz
Групи/сноп	2808
Протони/група	10^{11}
Светимост	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

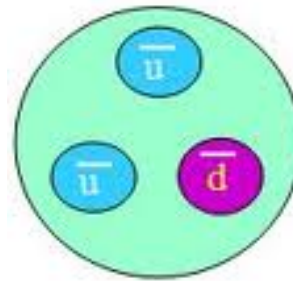




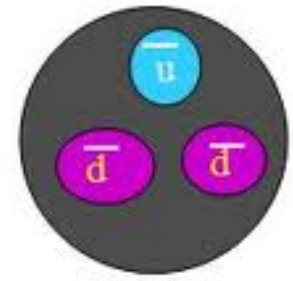
Proton



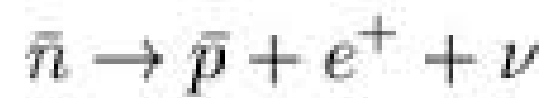
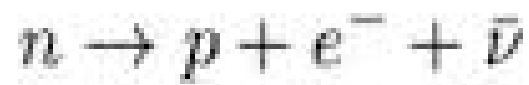
Neutron

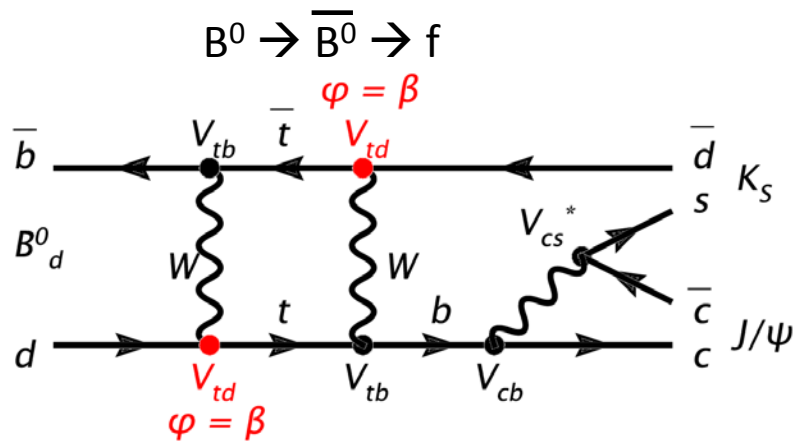
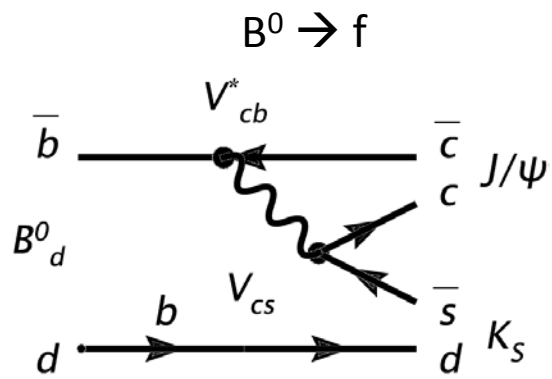


Anti-Proton



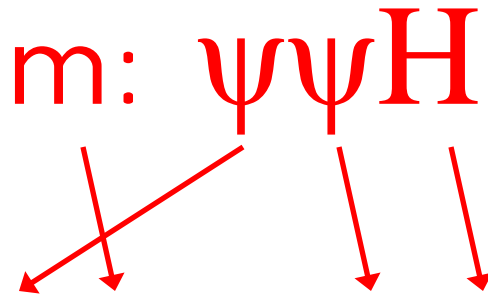
Anti-Neutron



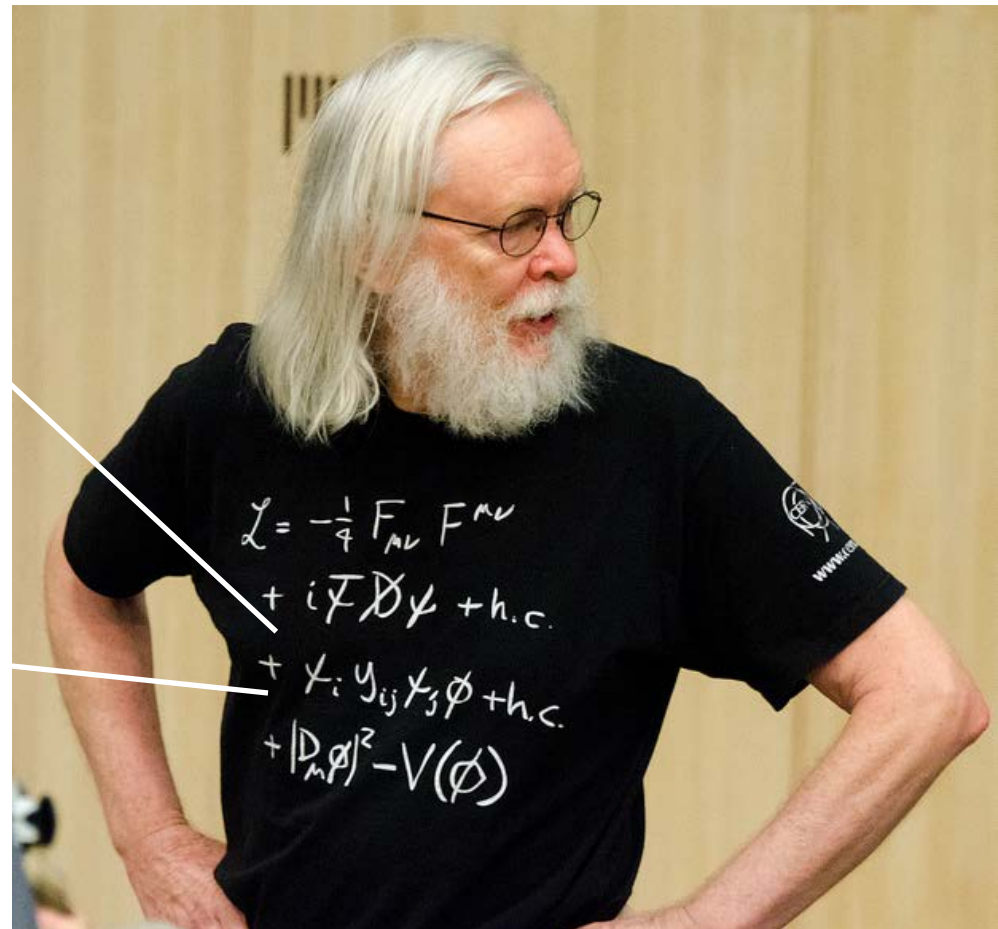


What is mass ?? Anno 1964

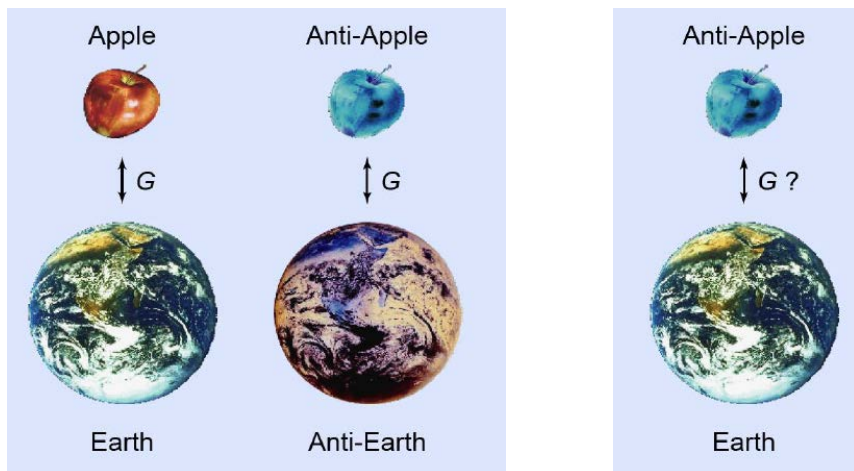
Mass of elementary particles is due to

$$m: \psi\psi H$$


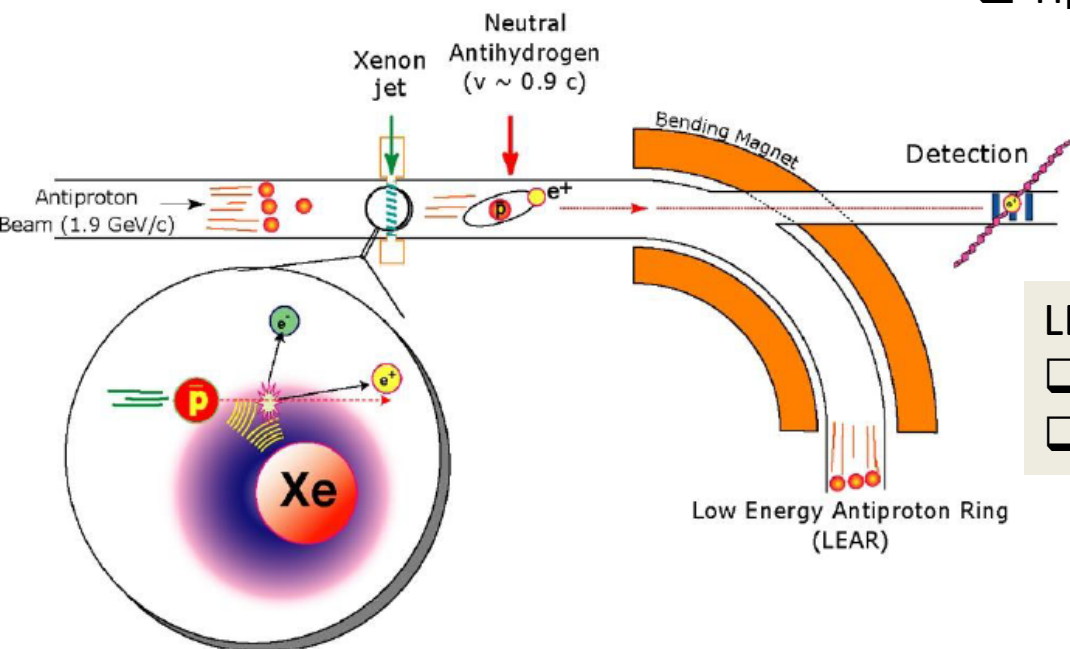

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi$$



Експерименти с антиматерия



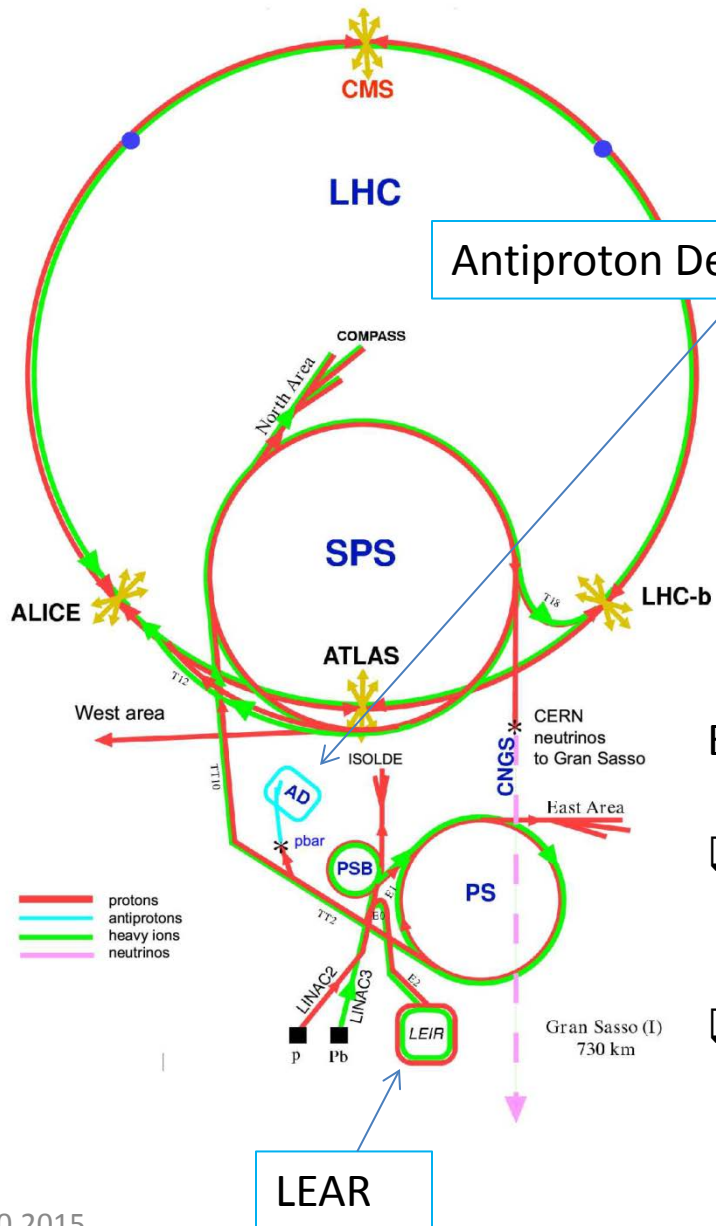
- Необходима е неутрална антиматерия
- Производство на анти-протони
 - ускорител
 - анти-протонна фабрика
 - де-ускорител (забавител)
 - натрупване
- Най-простия анти-атом е анти-водорода
- Производство на анти-водород
 - съхраняване (trap)
 - Изследване (спектроскопия)



LEAR @ CERN, 1995:

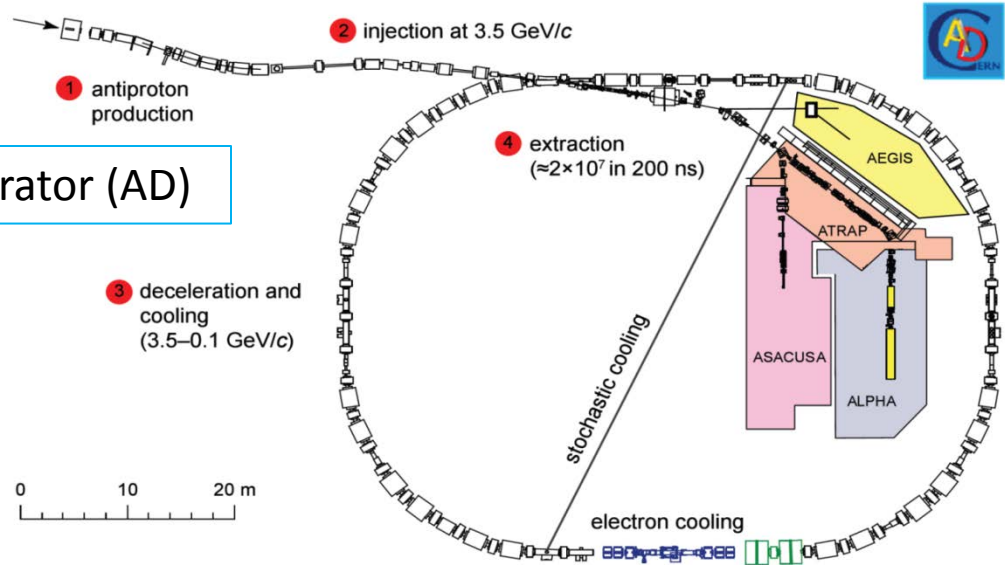
- получени са първите $9 \bar{\text{H}}$ атоми
- релативистки, краткоживущи (100 ns)

Експерименти с антиматерия



Antiproton Decelerator (AD)

AEGIS zone at the AD

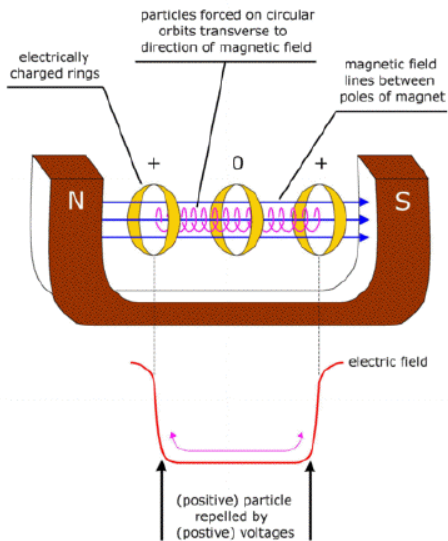


Експерименти:

- ATHENA, ATRAP, ALPHA, ASACUSA – производство, детектиране и спектроскопия на \bar{H}
- AEGIS – тестване на гравитацията с антиматерия

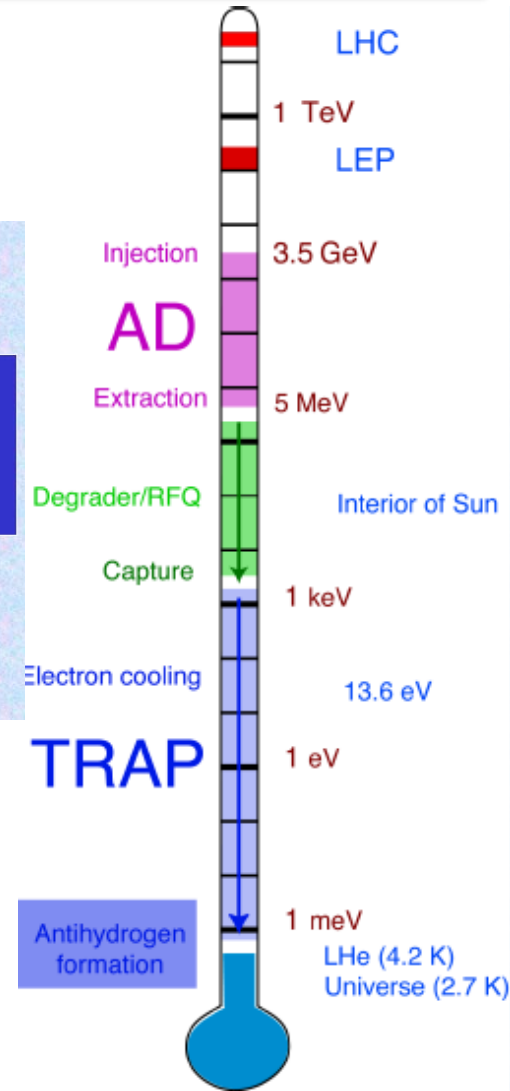
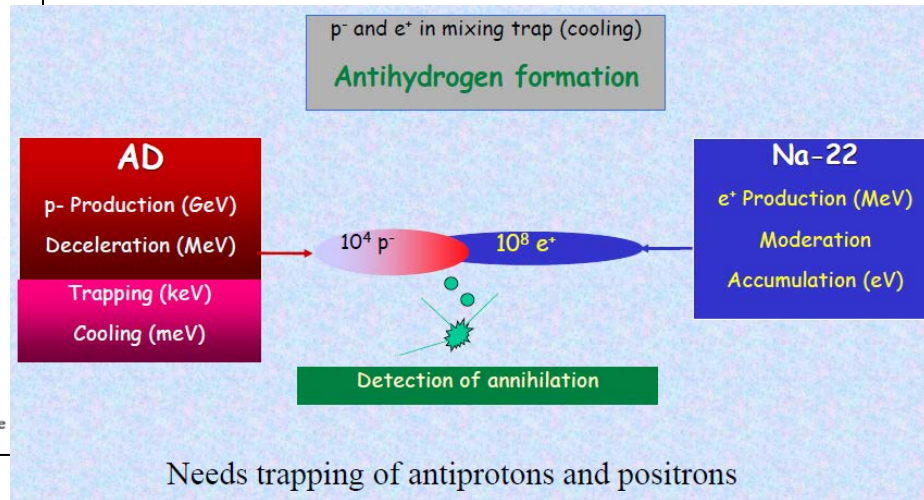
Експерименти с антиматерия

HOW A TRAP WORKS



Particles fired into such a ring system are completely trapped by the electric and magnetic fields applied.

Капан (trap) на Пенинг-Малмберг



За прецизно изучаване свойствата на \bar{H} :

- Необходимо е \bar{H} да се забавят (охладят)
- ATHENA и ATRAP използват отделни източници на \bar{p} и e^+ , като ги охладят по отделно до криогенни температури
- 2002, ATHENA произвежда първите бавни \bar{H}
- ALPHA успява да задържи \bar{H} за цели 16 минути