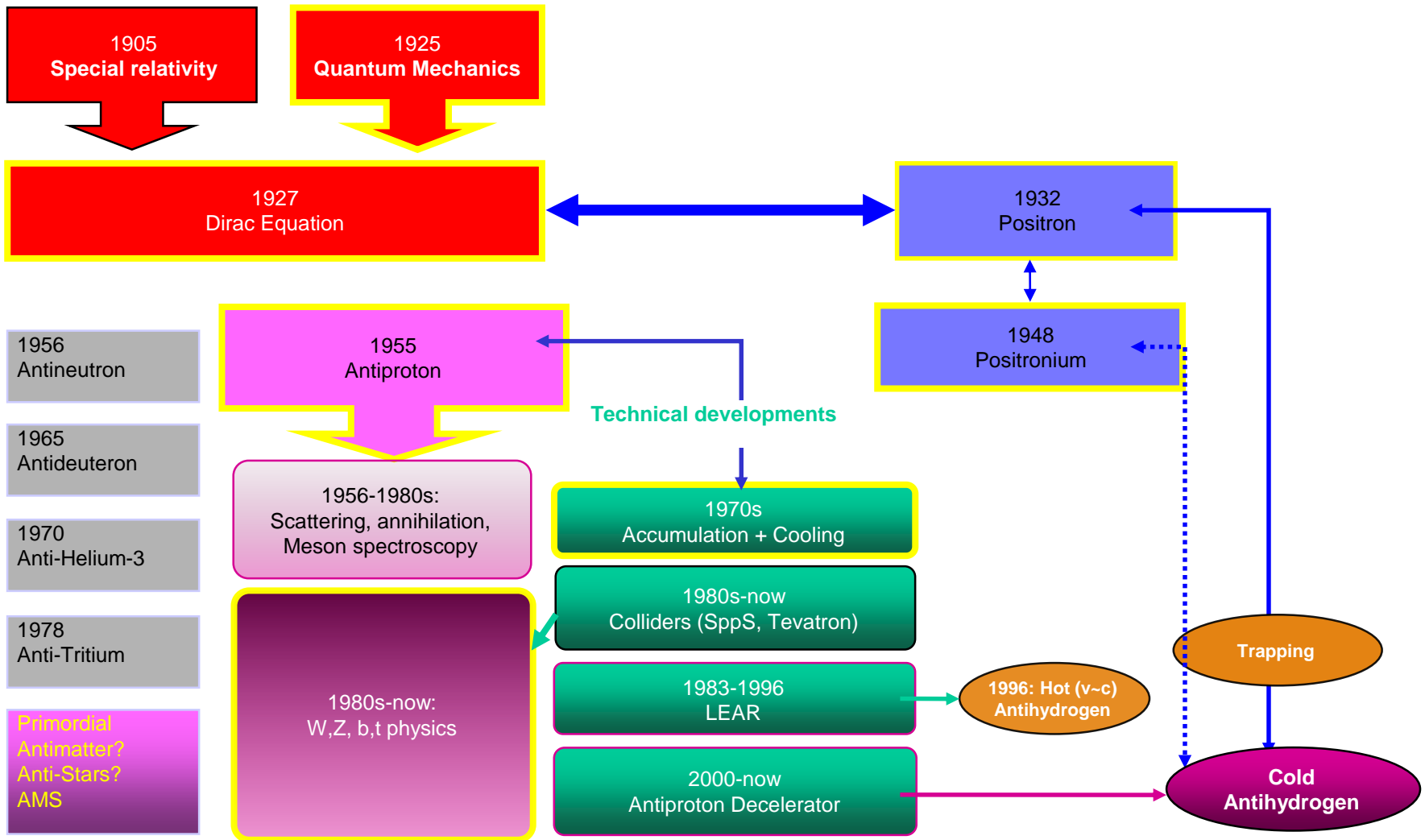




Антиматерия

Росен Матев, CERN
26 юли 2017

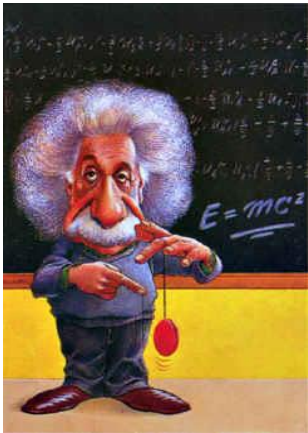
История



Теория на относителността (1905)

Не е открито движение на Земята спрямо “етера”.

Скоростта на светлината не зависи от скоростта между източника и наблюдателя.



Айнщайн:

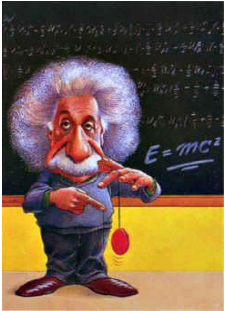
- Няма преференциална инерциална отправна система
- Скоростта на светлината е константа

Следствие:

- Пространство-времето не е абсолютно,
- а координатите се подчиняват на Лоренцовите трансформации

$$\begin{aligned}t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$

Теория на относителността (1905)



Пространството и времето са “равни”

Уравнения на
Максуел са
инвариантни!

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{J}\end{aligned}$$

Вторият принцип на Нютон не работи. Вместо него:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^4$$

Уравнение на Шрьодингер (1926)

$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

$$\begin{aligned} E &\rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \\ p &\rightarrow -i\hbar \nabla \end{aligned}$$

Частичката се описва от вълнова функция $\psi(x)$

Величините се описват от оператори действащи на $\psi(x)$

Релативистична теория

Шрьодингер: $E = p^2 / 2m$ класическа механика

Клайн-Гордън: $E^2 = p^2 + m^2$ релативистична механика

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow -\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi = -\hbar^2 \nabla^2 \psi + m^2 \psi$$

Не запазва броя частици!
Описва бозони

Уравнение на Дирак

Кое уравнение описва релативистични електрони?

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

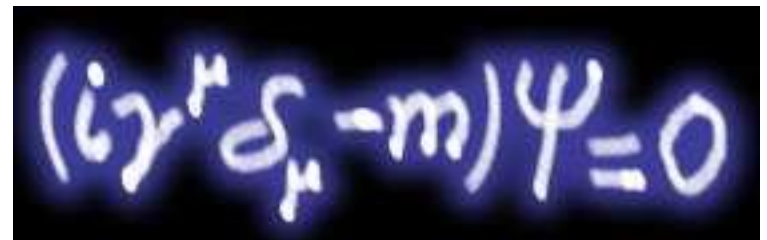
$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

Линейно уравнение
изпълняващо ЗЗЕ

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi = -i (\alpha_x \frac{\partial}{\partial x} \psi + \dots) + \beta m \psi$$

Решение:

- α, β са 4x4 матрици (“ γ^μ ”)
- ψ има 4 компоненти (“спинор”)


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

Отрицателни решения (собствени стойности)
за енергията!

Какво е ψ ?

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

Електрон, спин нагоре
Електрон, спин надолу
?
?

1929: положителен електрон = протон ?

1930: съществува анти-електрон!

Откриване на позитрона (1932)

C. D. Anderson. "The positive electron", Phys. Rev., **43**, 491 (1933).

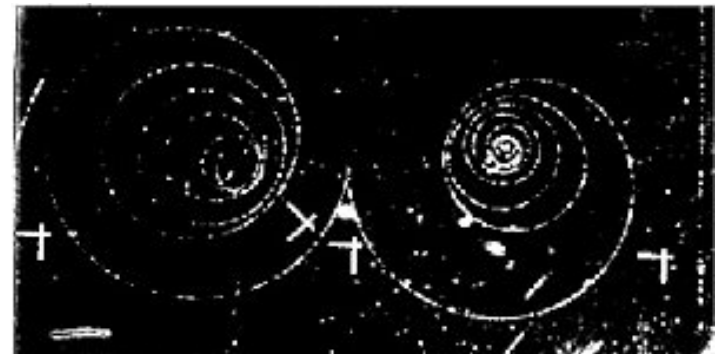
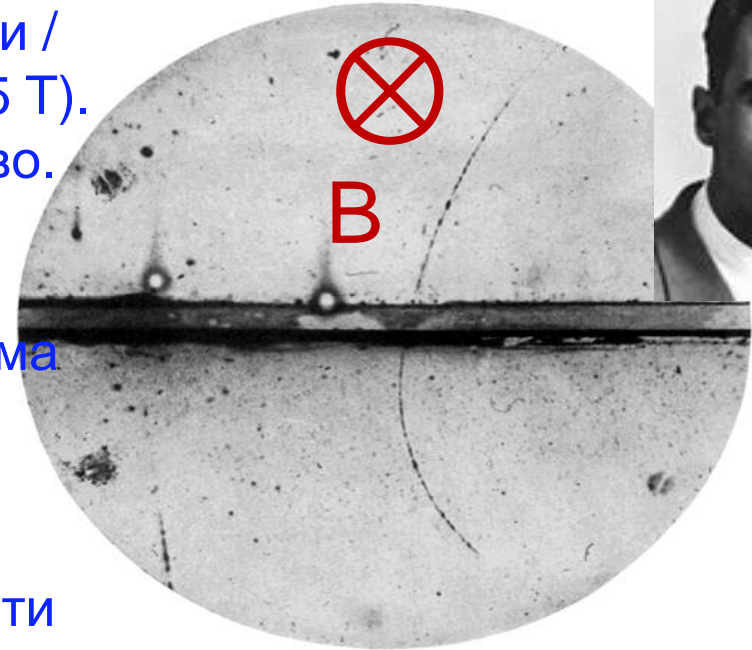
Мъглинна камера (преситени водни / спиртни пари) в магнитно поле (1.5 T). Две части разделени от 6 mm олово.

По-голямо закривяване долу => частицата е навлязла от горе => има положителен заряд.

От закривяването и дължината =>

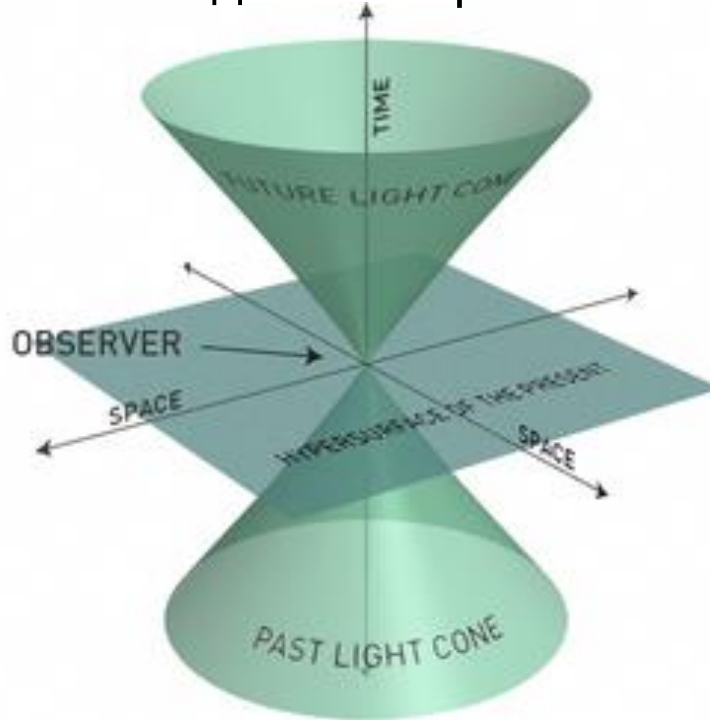
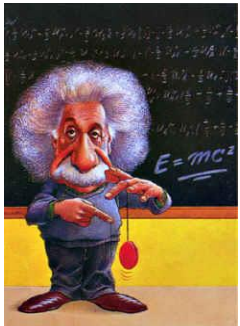
- зарядът е не по-голям от два пъти този на протона
- масата е не по-голяма от 1/20 масата на протона

Дирак: защо експерименталните физици не са го видели по-рано?



Антиматерията според КТП?

Относителност: светлинният конус определя възможните причинно-следствени връзки между събития



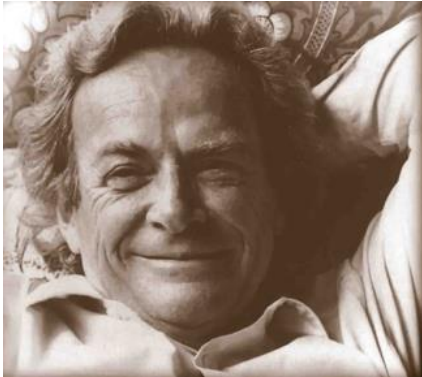
За всеки наблюдател има ясно разграничение между минало и бъдеще

КТП = квантова теория на полето

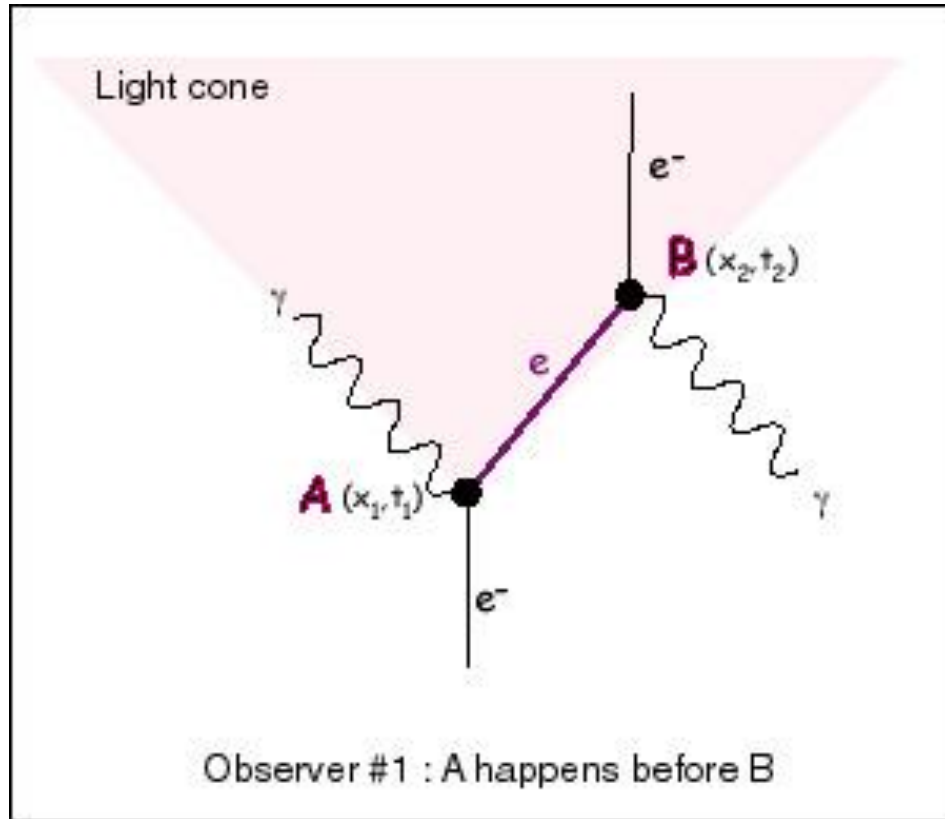
Нямаме вълнова функция описваща електрона, а оператор, който “ражда” и “унищожава” частици.

Всички енергии са положителни

Защо съществува антиматерията?



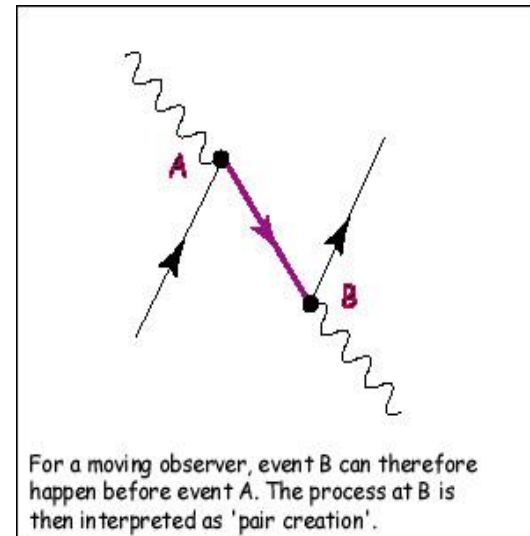
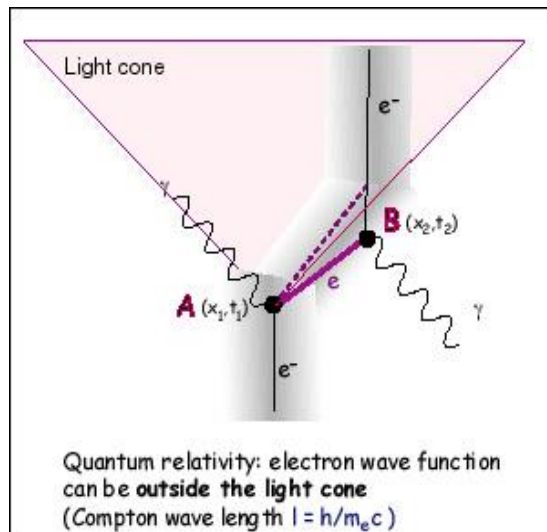
R. P. Feynman



Електрон излъчва фотон в точка А, изминава дадено разстояние и поглъща друг фотон в точка В.

Причинност

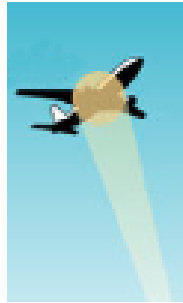
Вълновата функция е локализирана не по-добре от
Комптъновата дължина на вълната ($\lambda \sim 1/m$).



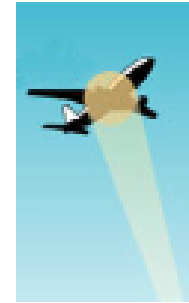
“One observer’s electron is the other observer’s positron”

- Или причинността е стриктно спазена и имаме отрицателни E ,
- или стриктно положителни E и движение назад във времето.

Аналогия: самолет над крив път

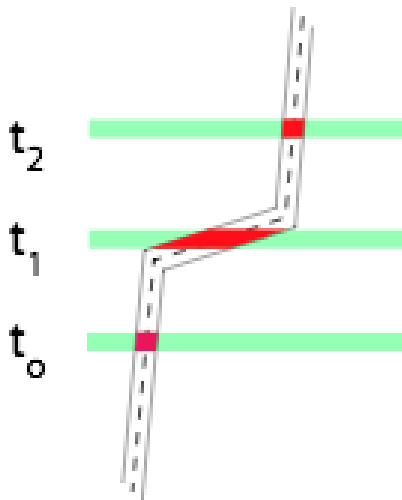


Observer A



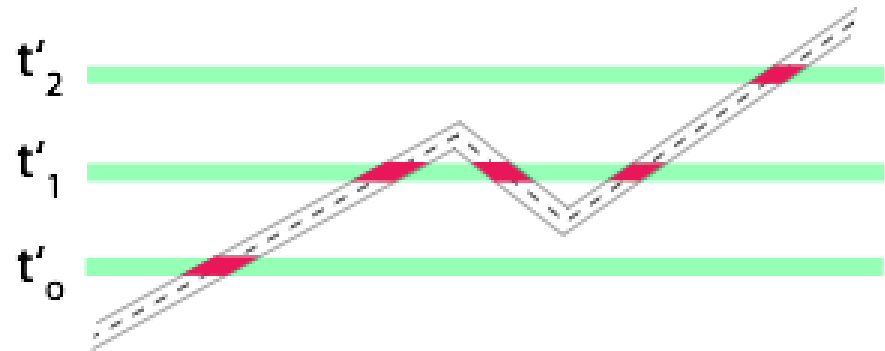
Observer B

Time



Една улица

Наблюдателят вижда тясна ивица



Една улица и две нови улици
появяващи се от “никъде”

Big Bang

Ражда се еднакво количество материя и антиматерия (?)



Къде е антиматерията?

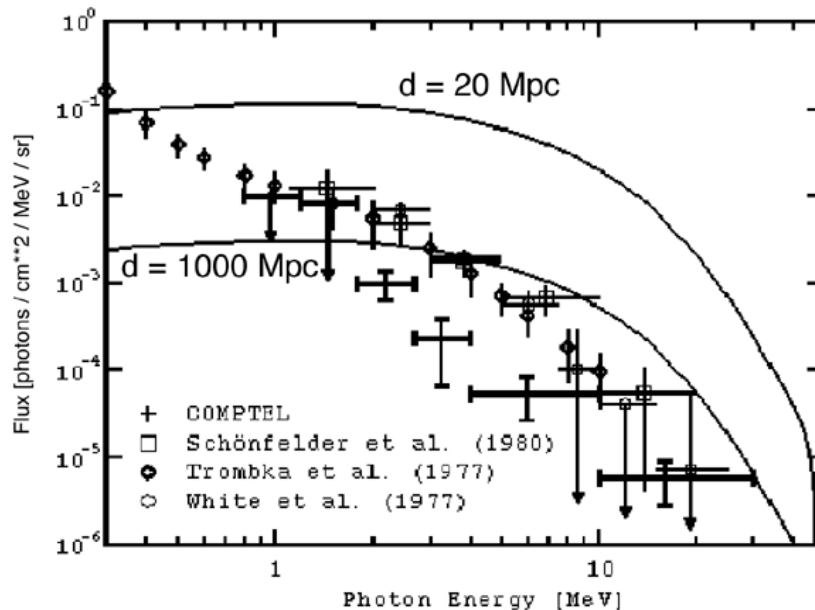
3 degrees K

Къде е антиматерията?

Възможно ли е да има области от материя и антиматерия? Аниhilацията на границата щеше да доведе до остатъчно дифузно лъчение от гама-кванти.

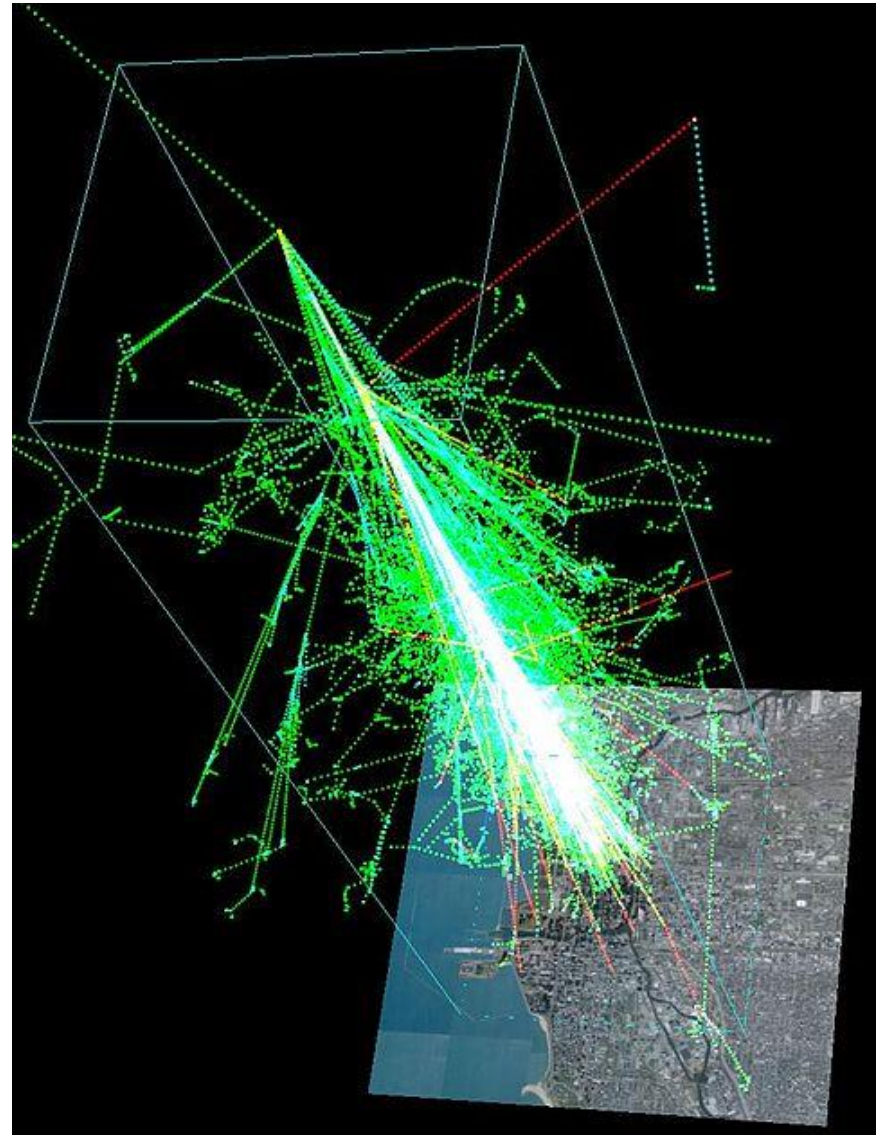


Не се наблюдава на излишък в интервала (0.1 - 10 MeV region):



Къде е антиматерията?

- Античастици се раждат в атмосферните порои
- Но какъв е зарядът на първичната (анти)частица?
- Може да се измери само извън атмосферата...



Експериментът AMS

AMS (Alpha Magnetic Spectrometer):
измерва броя на He ядра 400км над
повърхността на Земята.

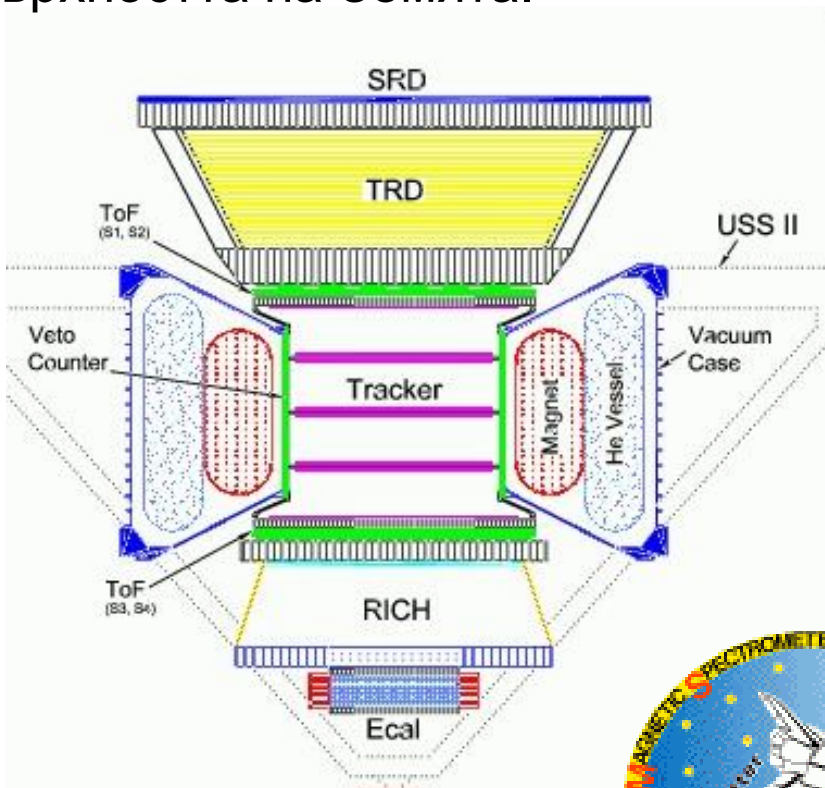
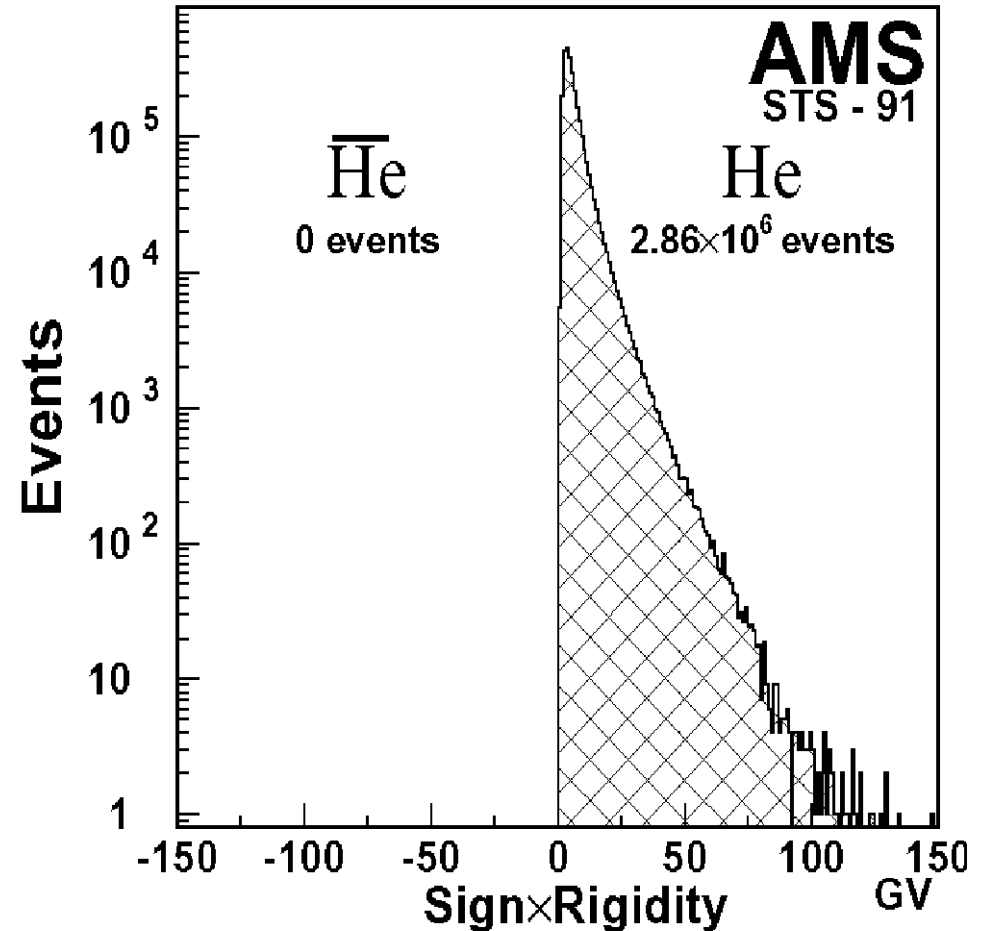


Photo taken from Mir (1998)



AMS: резултати

- Липсват анти-ядра в галактическите космични лъчи
- Липсва интензивна емисия на γ кванти от аниhilацията на далечни галактики
- Няма доказателства за наличието на “първична” антиматерия!



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

AMS-02



Operations Control Center
(Room 946 @ CERN)

Условията на Сахаров

Как да създадем свят доминиран от бариони (материя) започвайки от $B=0$ симетрично състояние (1967)?

1. Нарушение на барионното число B
 - В противен случай ни трябват асиметрични начални условия
2. Нарушение на C и CP симетриите
 - В противен случай B -нарушаващите взаимодействия ще произведат равни количества материя и антиматерия
3. 1 и 2 се случват във фаза, която не е в равновесие
 - В противен случай плътностите ще са равни поради CPT симетрията и принципа на детайлното равновесие.



Стандартният модел позволява CP нарушение.

Но това не може да обясни, че $N_{\text{бариони}}/N_{\text{фотони}} \cong 6 \cdot 10^{-10}$ без някакъв друг източник на CP нарушение.

Симетрии

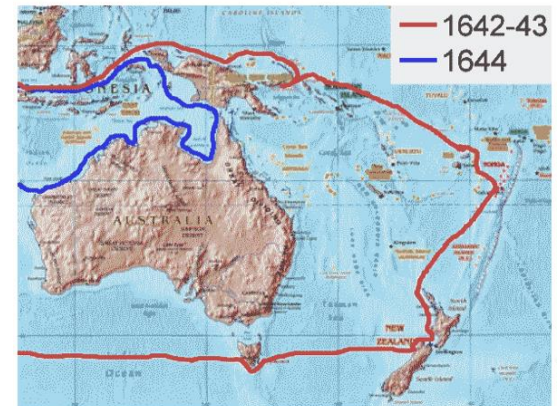
Инструкция от нидерландската източноиндийска компания, 1642:

*„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 страни съществуват на юг** от екватора. Провинциите на Перу и Чили богати на сребро и злато, намиращи се южно от екватора, са откровено доказателство за това.“*

Абел Тасман открил Австралия, Нова Зеландия (1642) и Фиджи (1643)



Abel Tasman



Симетрии

Ключова роля в света на физиката

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

Например, за непрекъснати симетрии:

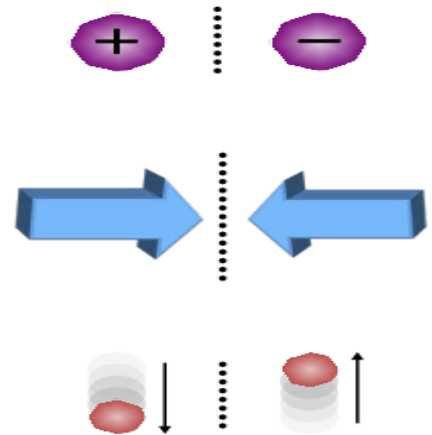
- Симетрия при трансляция в пространството ($x \rightarrow x + a$):
закон за запазване на импулса
- Симетрия при трансляция във времето ($t \rightarrow t + a$):
закон за запазване на енергията

Дискретни симетрии

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

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

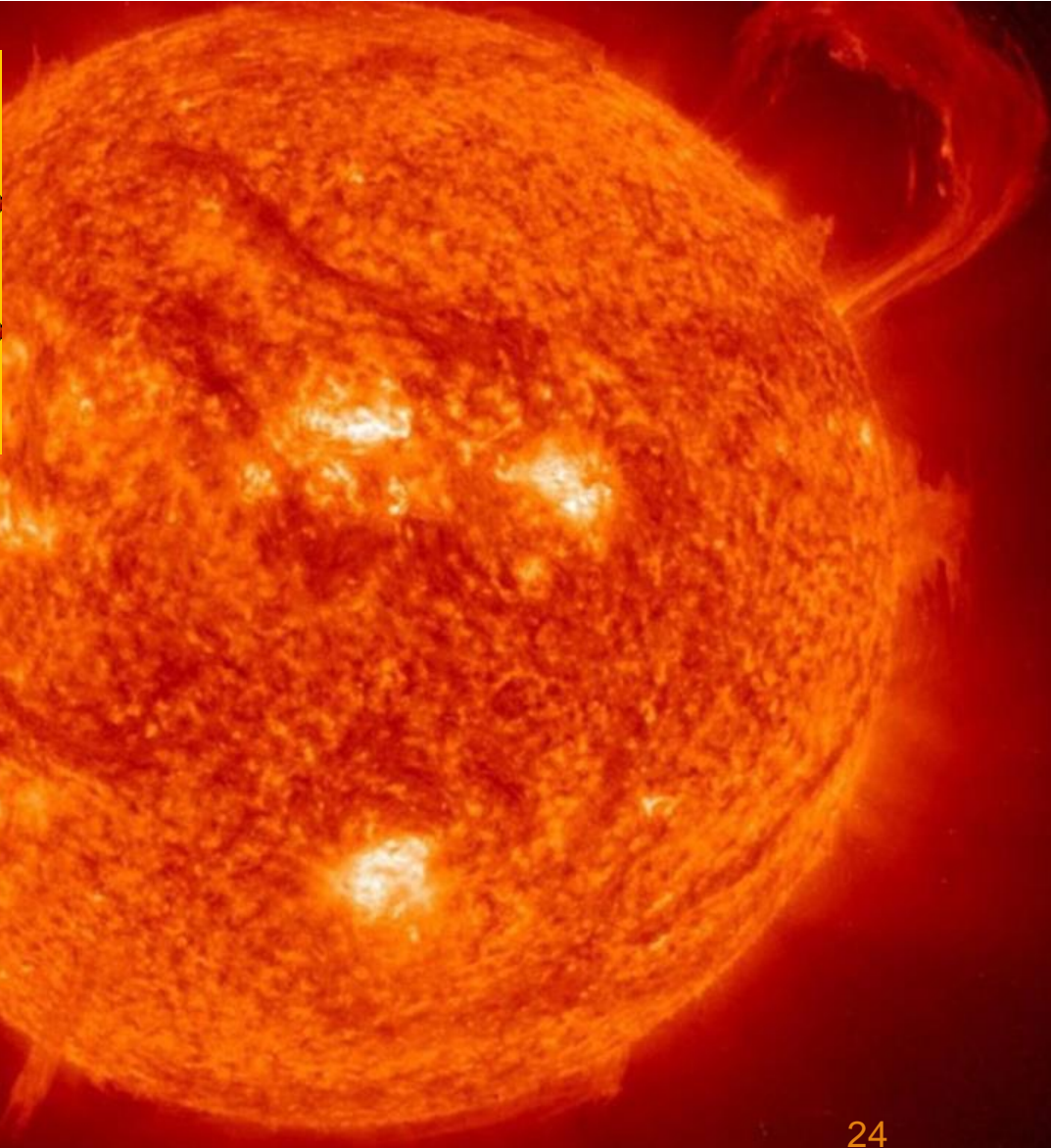
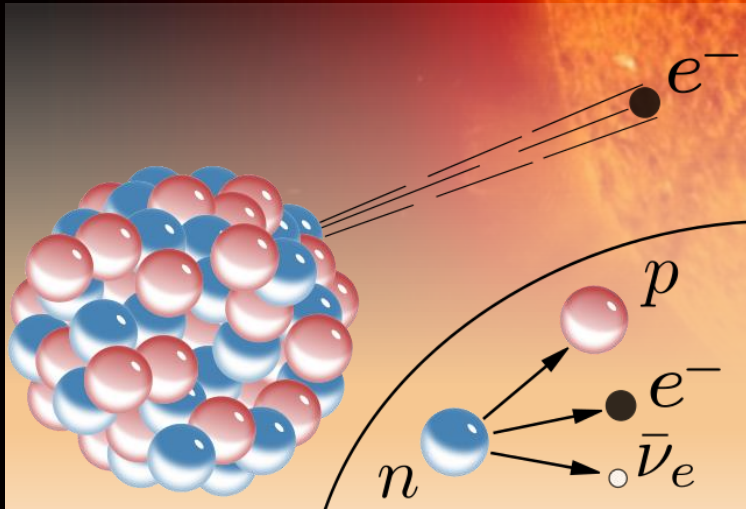
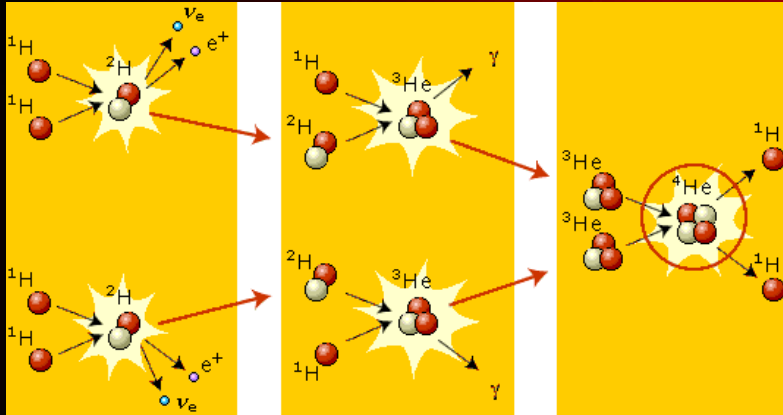
T – обръщане на времето, сменя посоката на движение



Quantity		<i>P</i>	<i>C</i>	<i>T</i>
Time	<i>t</i>	<i>t</i>	<i>t</i>	$-t$
Space vector	<i>x</i>	$-x$	<i>x</i>	<i>x</i>
Momentum	<i>p</i>	$-p$	<i>p</i>	$-p$
Spin	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	$-s$
Electrical field	<i>E</i>	$-E$	$-E$	<i>E</i>
Magnetic field	<i>B</i>	<i>B</i>	$-B$	$-B$

Инвариантни ли са законите на физиката спрямо тези трансформации?

Слабо взаимодействие



Огледална симетрия (P)

Експеримент на Мадам Чиен-Шиунг Ву за проверка на огледалната симетрия.

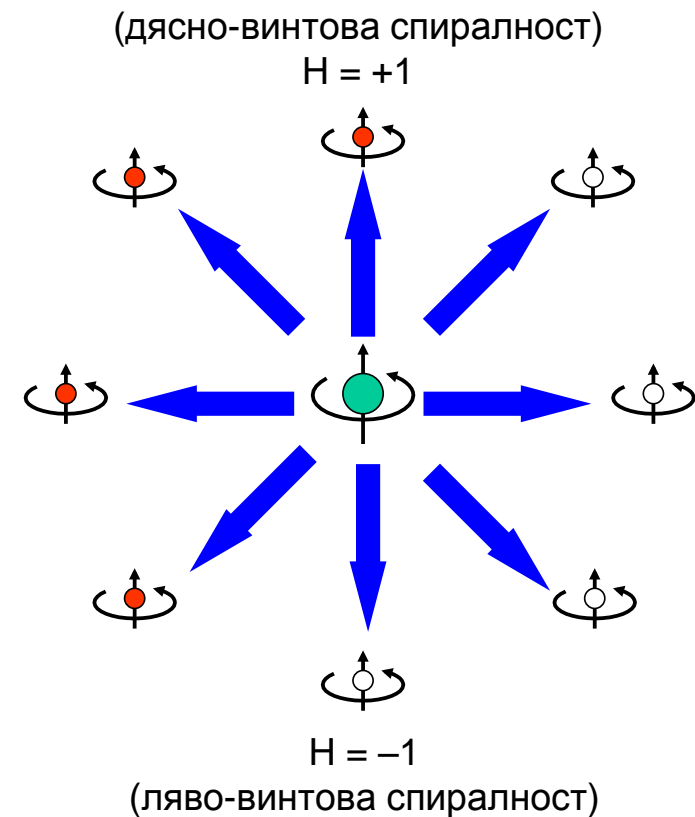
Измерване на спина на продуктите на разпад на **поляризирани** радиоактивни ядра:
 ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + e^{-} + \nu_e$



Спиралността (H) е проекцията на спина върху посоката на движение

$$P: H \rightarrow -H$$

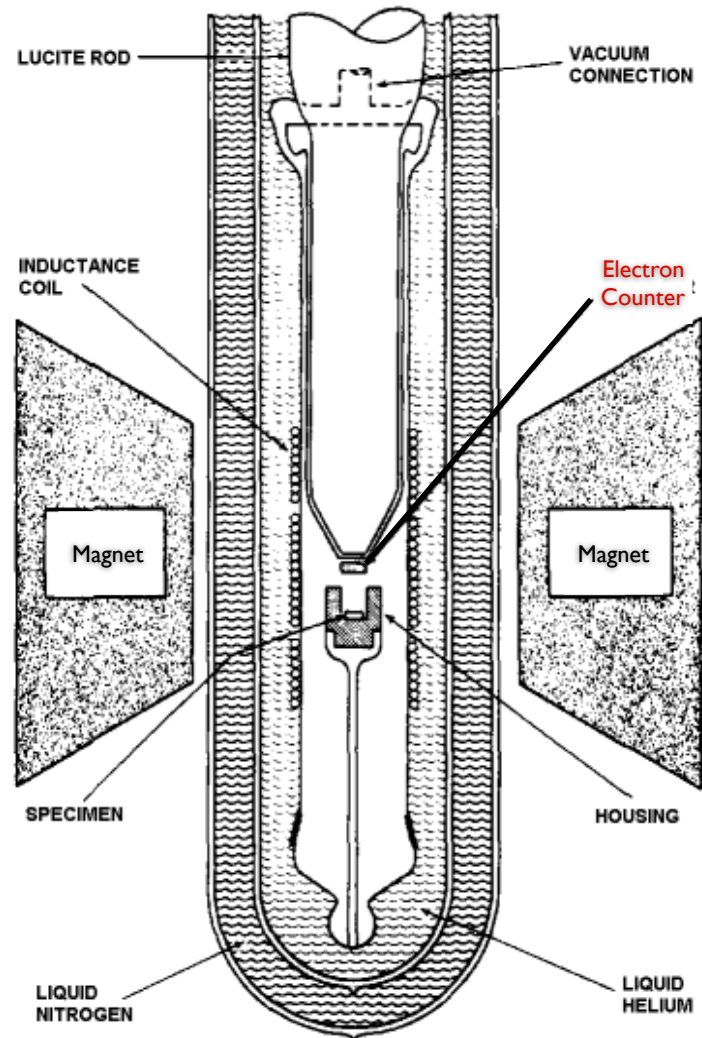
Ако четността (P) се запазва, няма причина разпадите да не са симетрични относно H



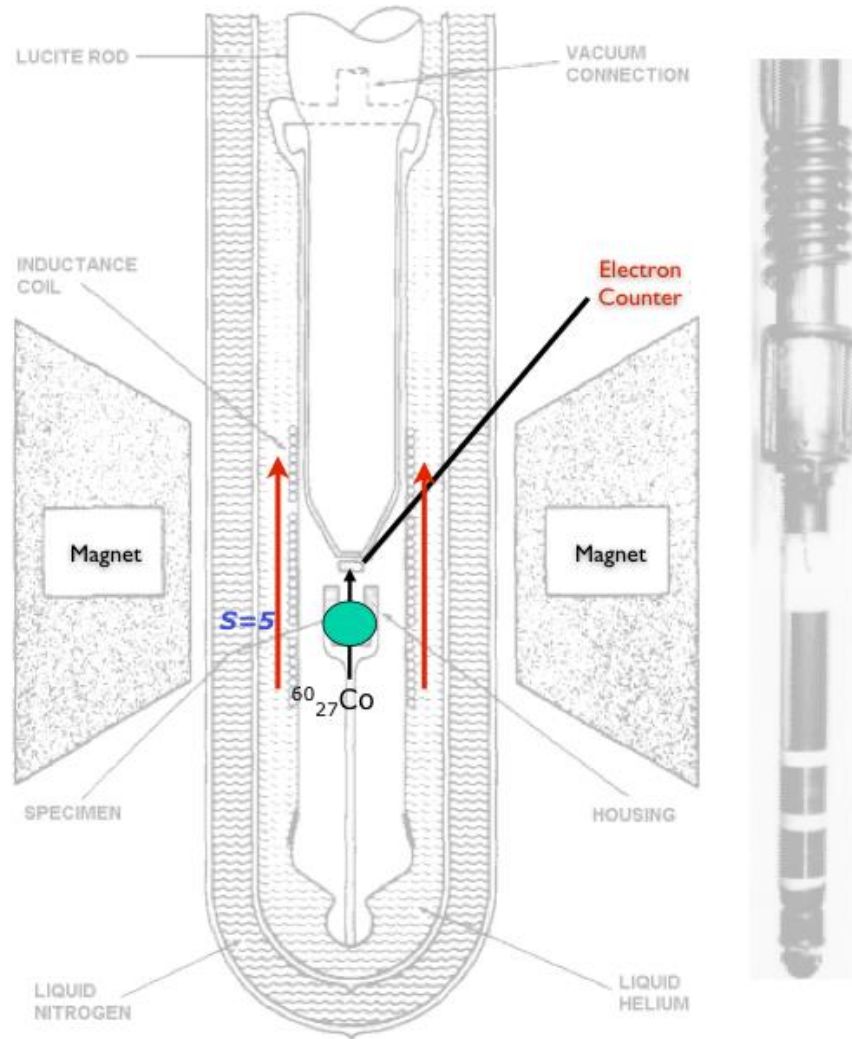
Експеримент на Ву

Как се набавя проба от ^{60}Co със спинове в дадена посока?

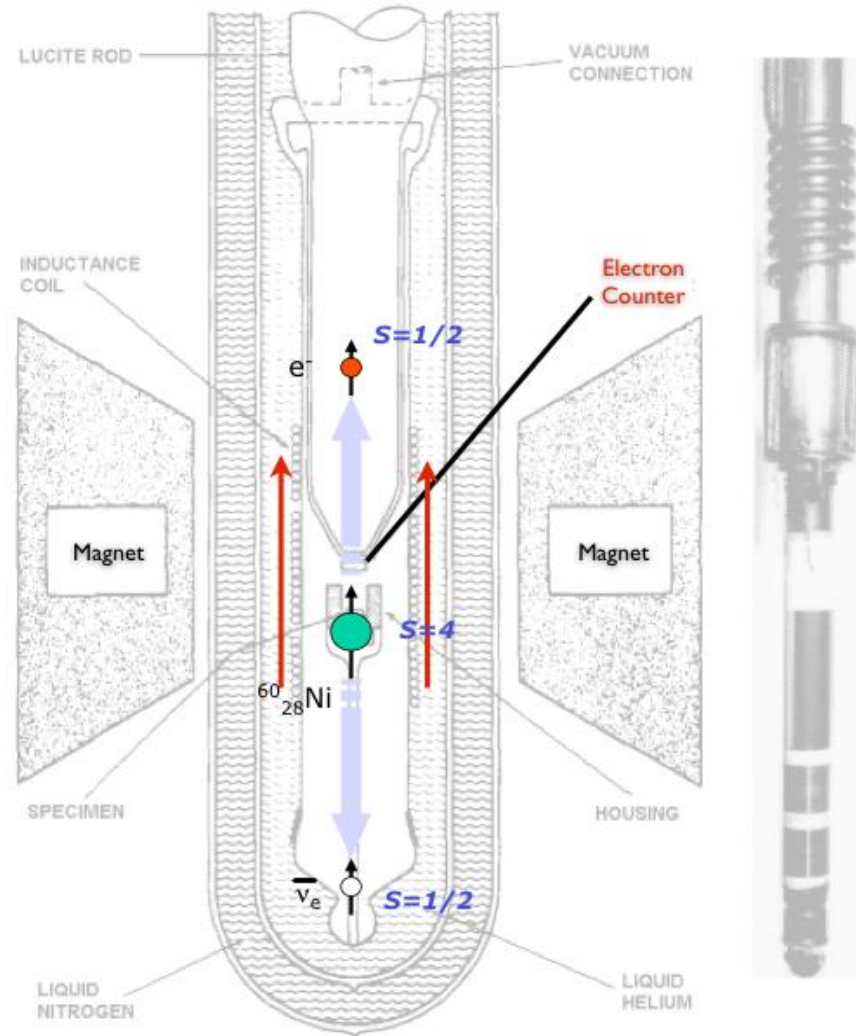
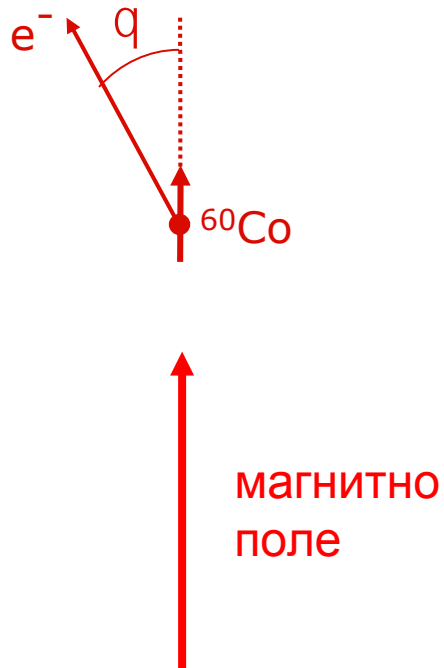
Течният хелий не е достатъчно студен, използвано е “адиабатично размагнитване” ($\sim 0.01\text{ K}$).
Изключително предизвикателство за 1956!



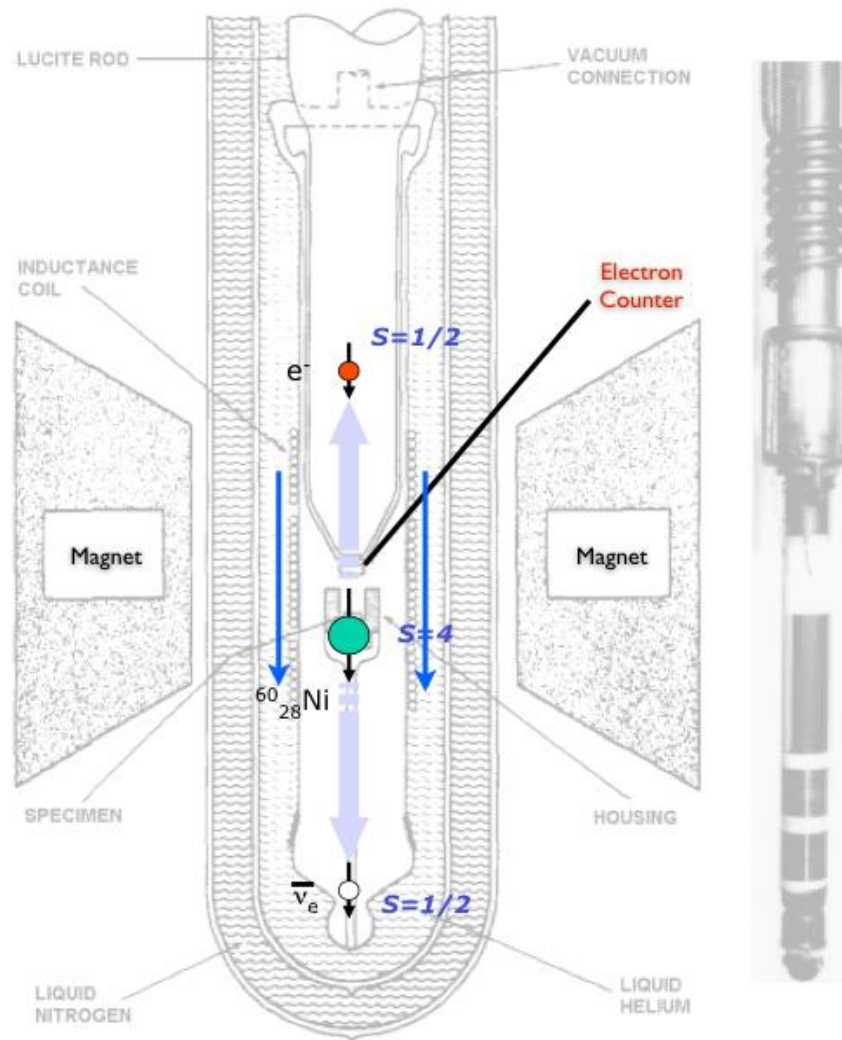
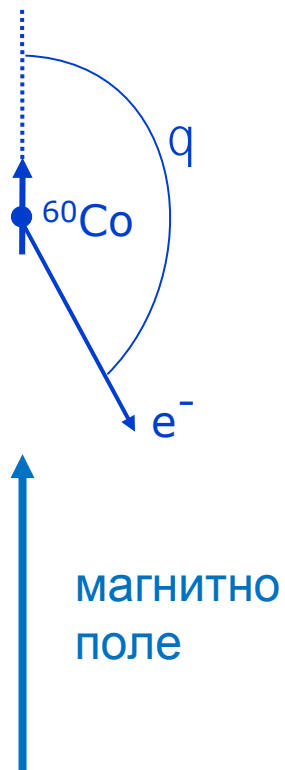
Експеримент на Ву



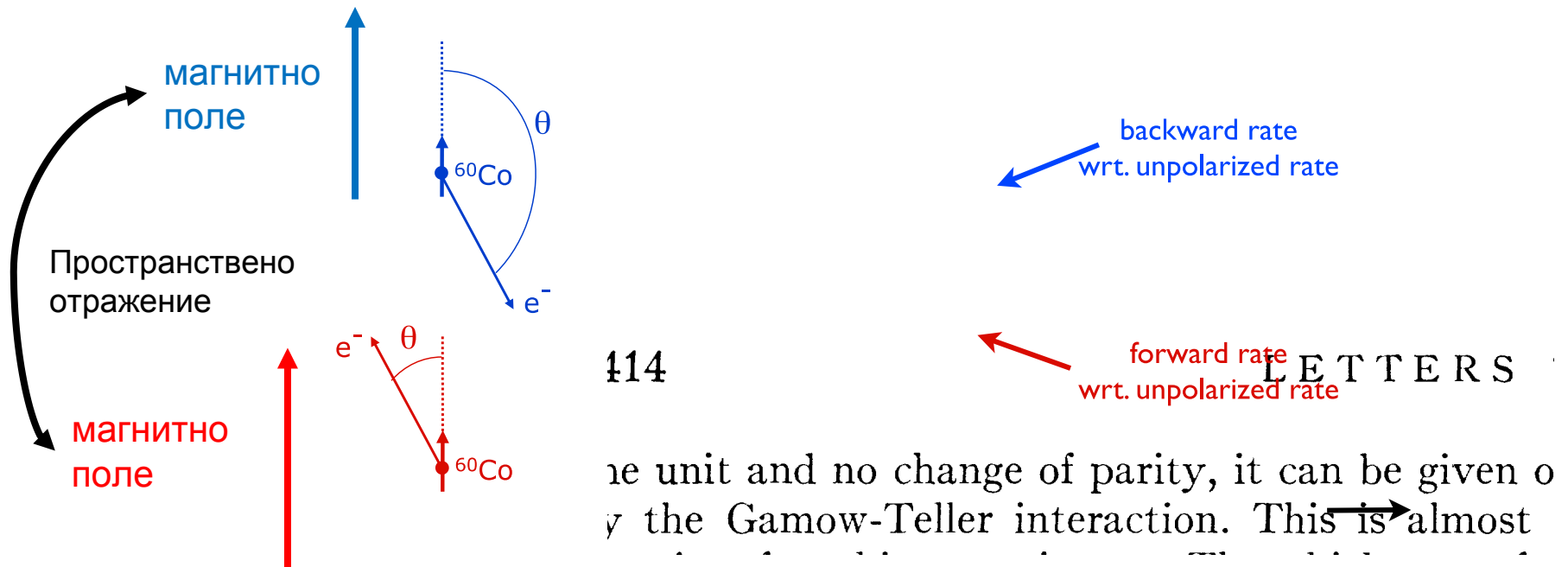
Експеримент на Ву



Експеримент на Ву



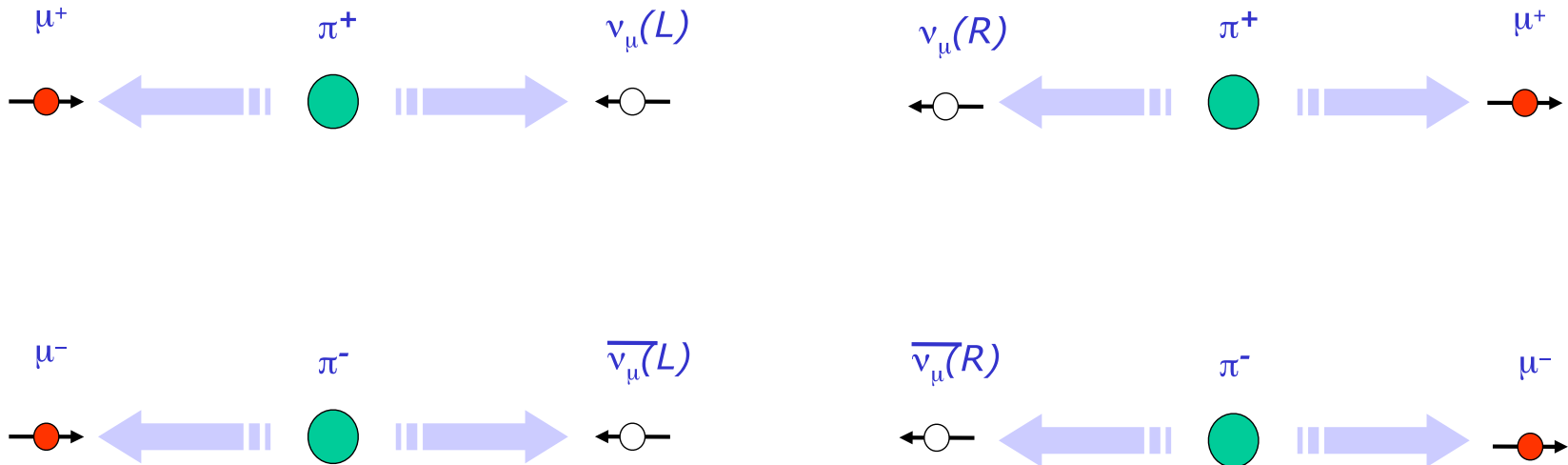
Експеримент на $\beta\gamma$: резултати



- Скоростта на броене е различна в поляризирания и неполяризирания случай
- Смяната на посоката на магнитното поле сменя скоростта на броене!
- Електроните се излъчват преференциално в посока обратна на спина ($H = -1$, ляво-винтови)
- Следователно анти-неутрината са само дясно-винтови

C и CP симетрии

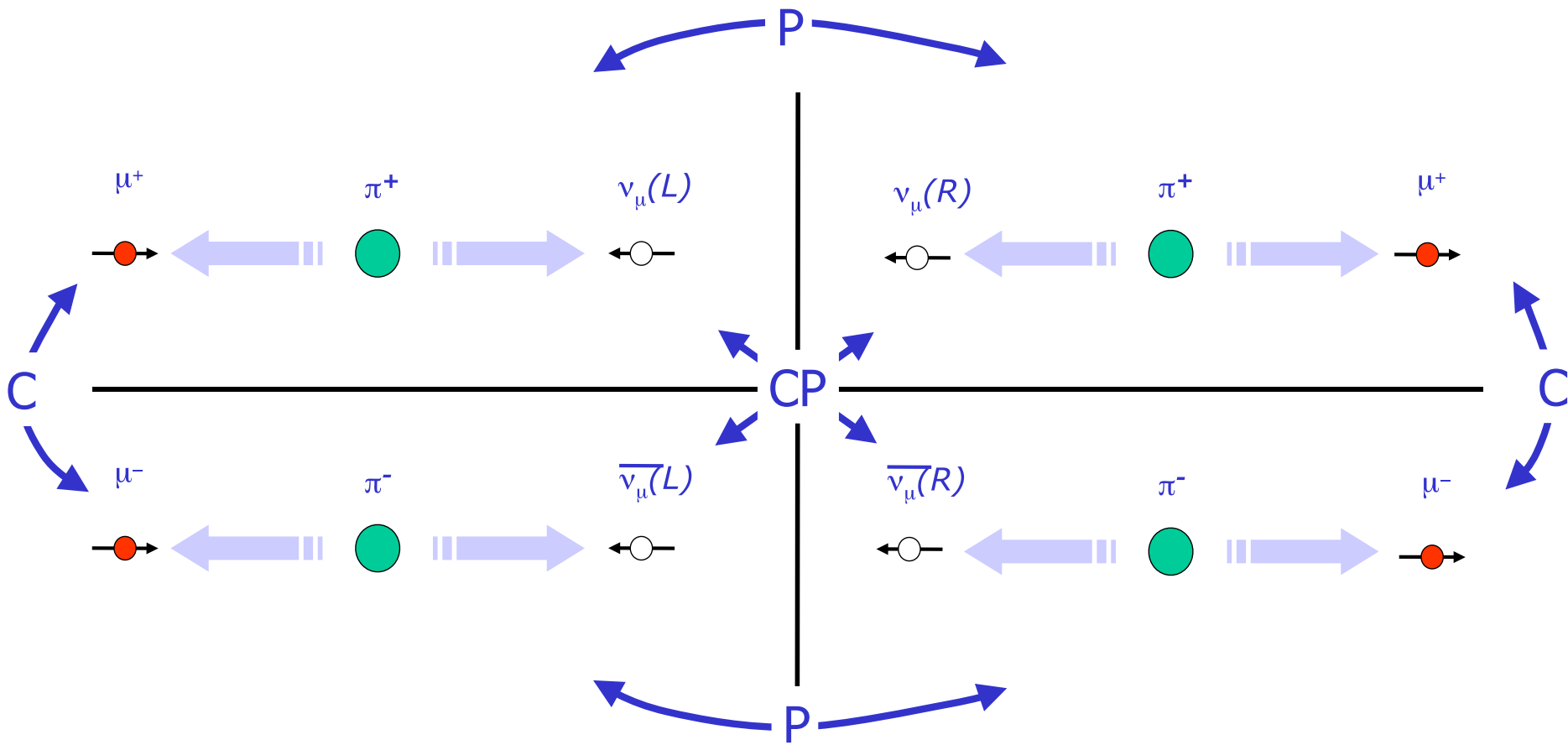
Ледерман и колектив измерват разпада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



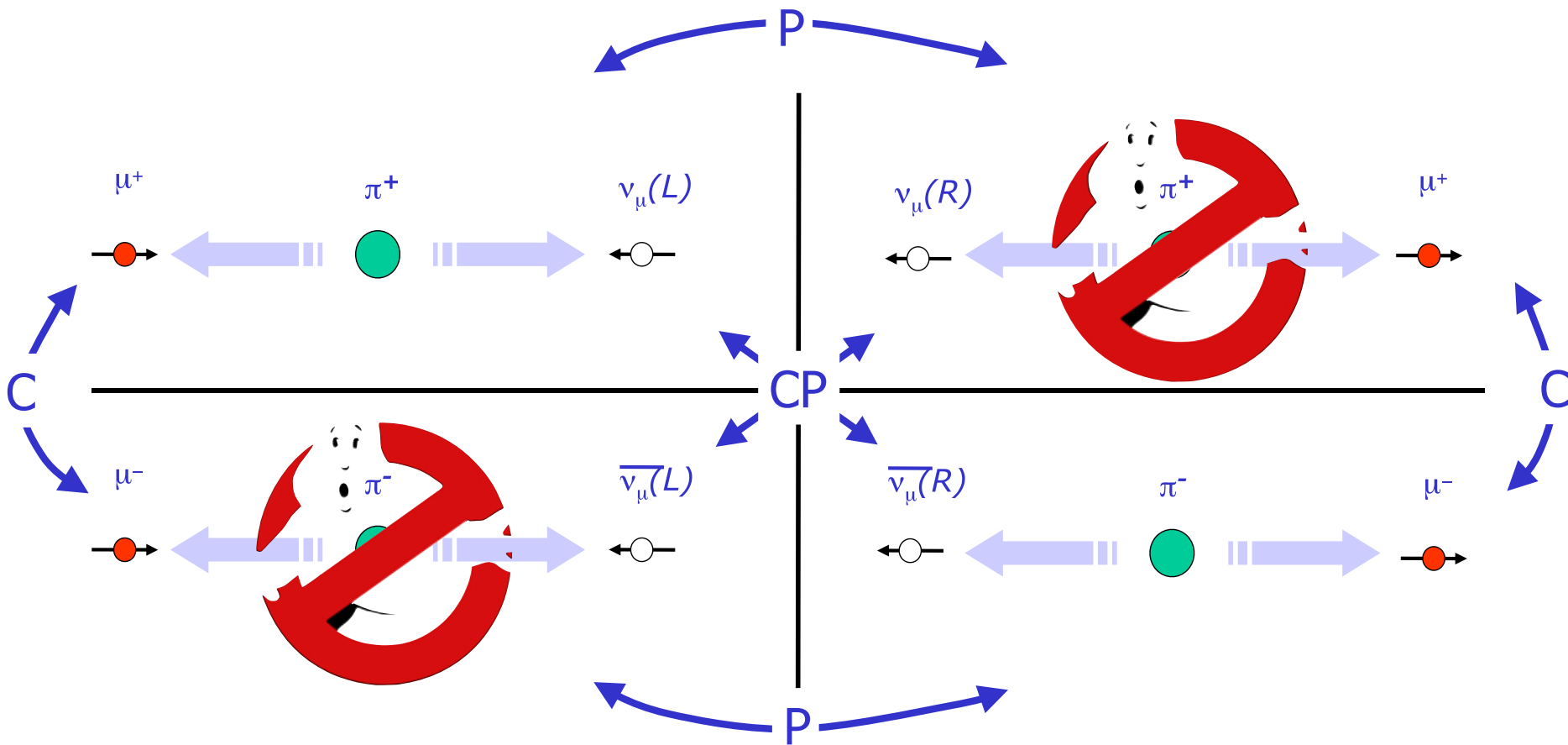
π има спин 0; μ, ν_μ имат спин 1/2

- Спиновете са противоположно ориентирани
- Спиралността е еднаква
- Бонус: измерват спиралността на неутриното и анти-неутриното

C и CP симметрии



C и CP симетрии



C- и P-симетриите са нарушени от слабото взаимодействие, но изглежда, че CP се запазва

CPT инвариантност

Теорема: **всички взаимодействия са инвариантни по отношение на комбинираната C, P и T трансформация.**

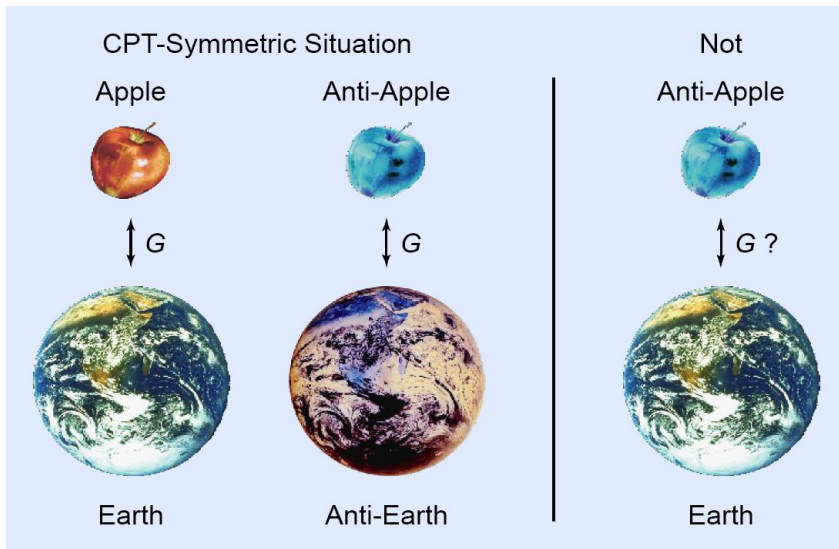
- G. Lüders, W. Pauli (1954); J. Schwinger (1951)
- Условия
 1. Лоренцова инвариантност
 2. Принцип на локалност
 3. Причинност
 4. Вакуума има най-ниска енергия
 5. Пространство-времето е плоско
 6. Частиците са точкови

Следствие: частиците и античастиците имат еднакви маси и времена на живот.

Гравитация и антиматерия



CPT не ограничава гравитацията!



Принцип на еквивалентност

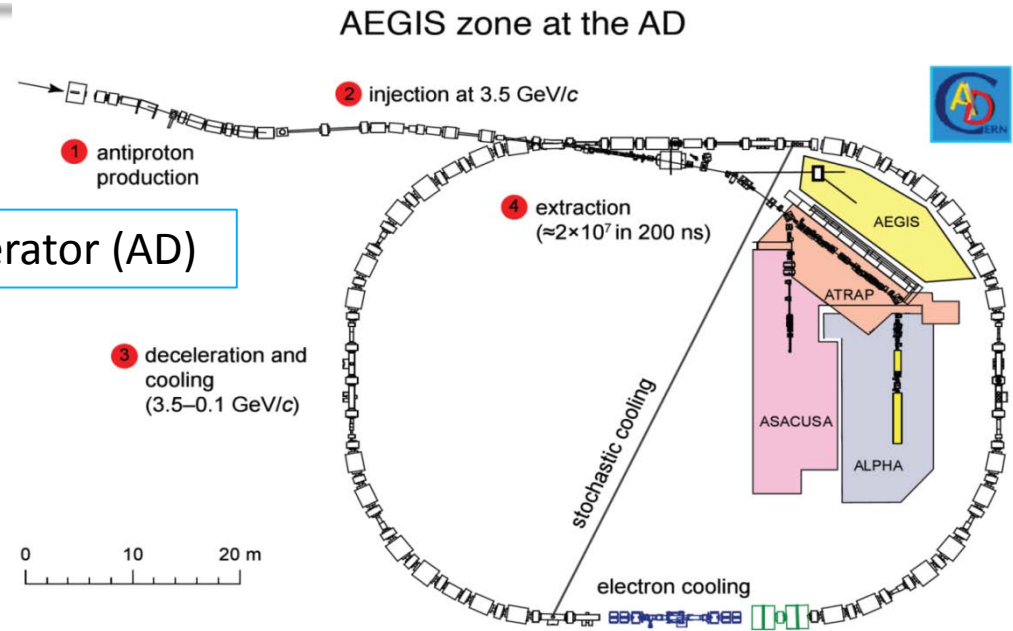
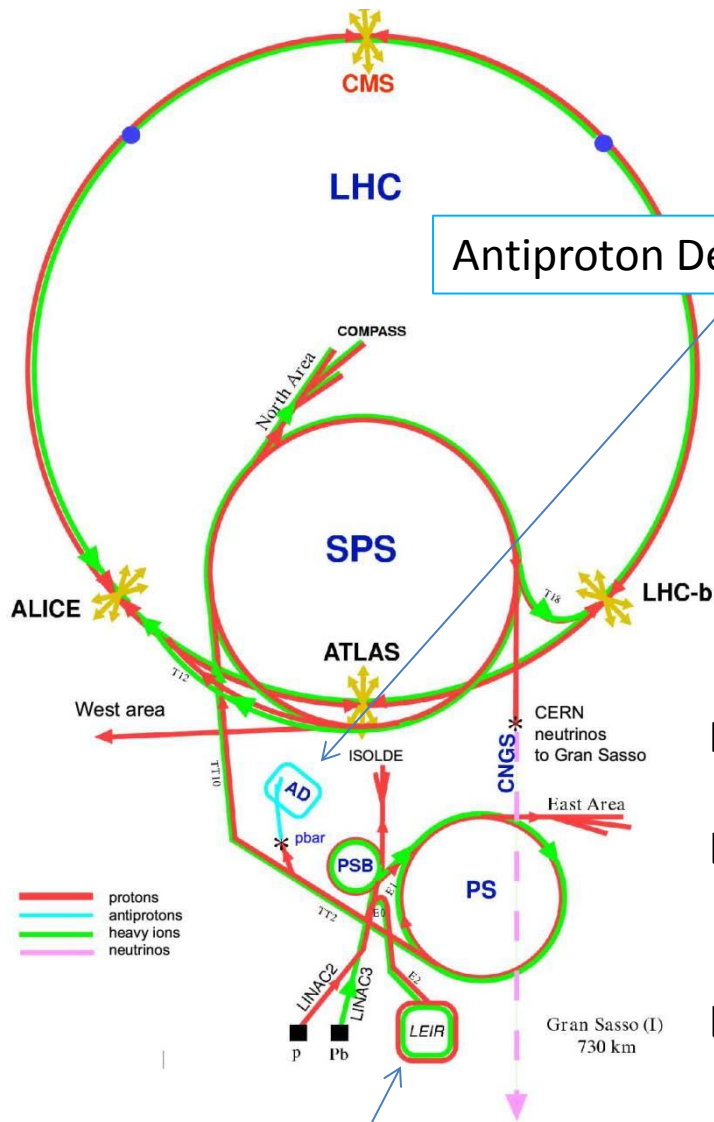
Няма начин да различим локално между гравитационен потенциал и ускорение.

- Необходима е неутрална антиматерия
- Производство на анти-протони: ускорител, анти-протонна фабрика, забавител, натрупване
- Най-простият анти-атом е анти-водорода
- Производство и захващане на анти-водород

LEAR @ CERN, 1995:

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

Експерименти с антиматерия

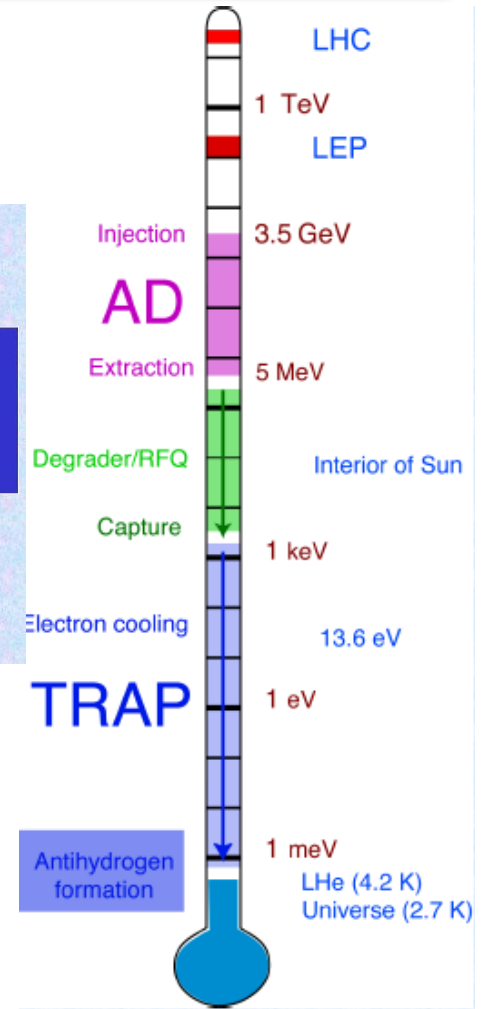
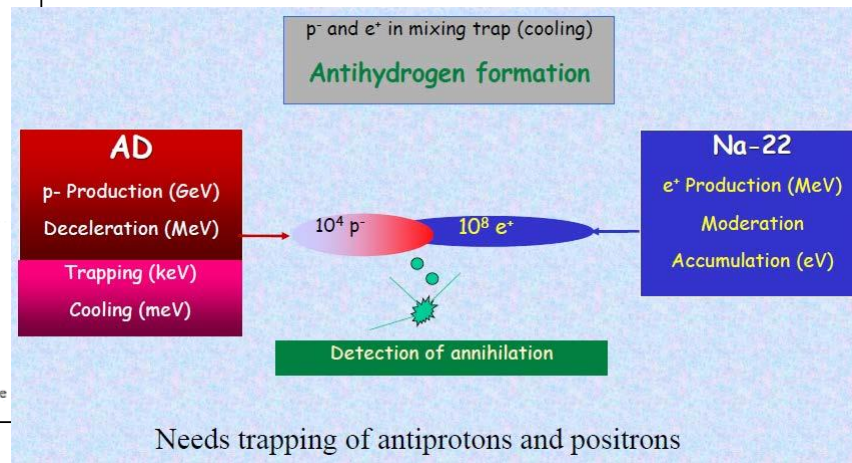
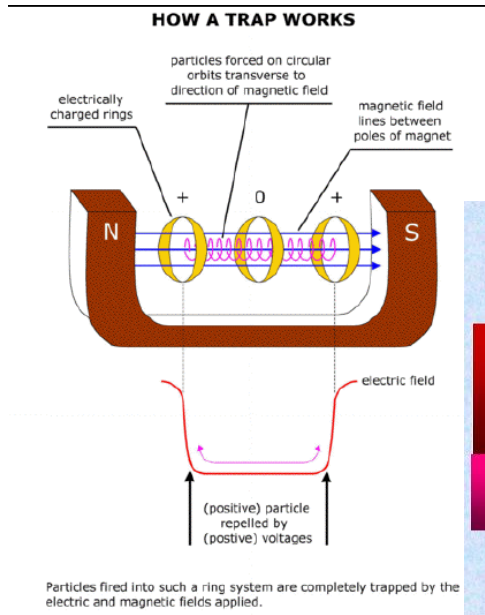


Експерименти:

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

Експерименти с антиматерия

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 охлаждат по отделно до криогенни температури
- 2002, ATHENA произвежда първите бавни \bar{H}
- ALPHA успява да задържи \bar{H} за цели 16 минути

Комбинирана CP четност

Какво представлява K^0 ? → 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
- → Разпада им трябва да **не** запазва странността
- Силното взаимодействие запазва странността
- → Разпада им е ч/з слабото в-вие.
- Осцилира ($K^0 \longleftrightarrow \bar{K}^0$)

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)

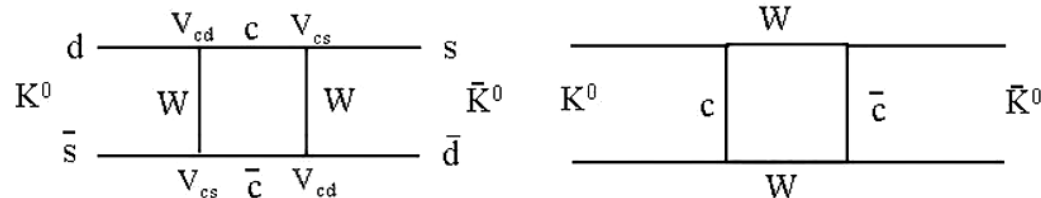
$$K_2 = (K^0 - \bar{K}^0) / \sqrt{2}$$

(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

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

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

CP=+1

CP=-1

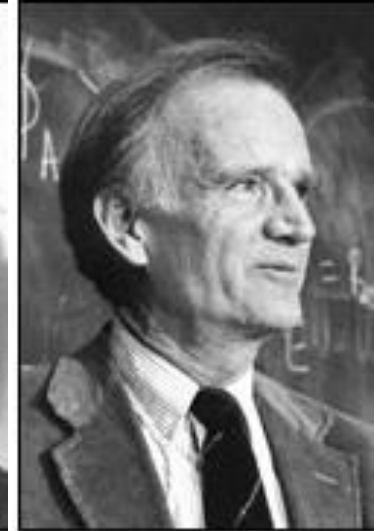
$$K_2 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$$

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

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
 → 0.2% от случаите се наблюдава $K_2 \rightarrow \pi\pi$



$$K_S \sim K_1 + \epsilon_S K_2 \quad K_L \sim K_2 + \epsilon_L K_1$$

ако CPT: $\epsilon_S = \epsilon_L = \epsilon = 0.0023$

Рядък феномен:

- 22700 разпада на K_2

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

CP нарушението в Стандартния модел

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

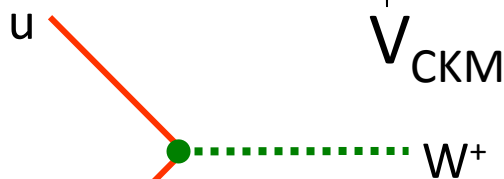
V_{CKM} – Матрица на Кабибо, Кобаяши и Маскава

1961

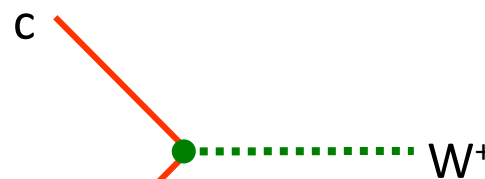
1972

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

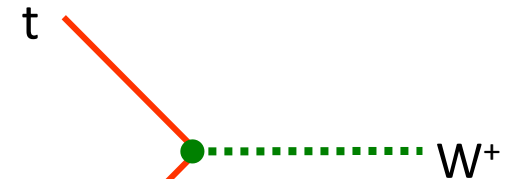
- Унитарна и комплексна 3x3 матрица



$$d' = V_{ud}d + V_{us}s + V_{ub}b$$

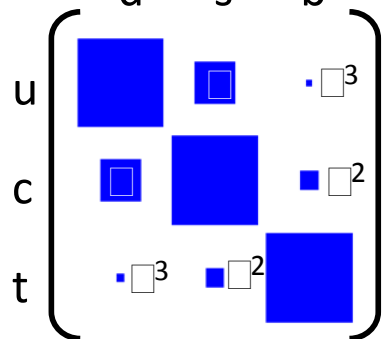


$$s' = V_{cd}d + V_{cs}s + V_{cb}b$$



$$b' = V_{td}d + V_{ts}s + V_{tb}b$$

$$\sin^2(\theta_c) = 0.22$$



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

Комплексна матрица \rightarrow



CP нарушението в Стандартния модел



Н. Кабибо



Макото
Кобаяши



Тошихиде
Маскава



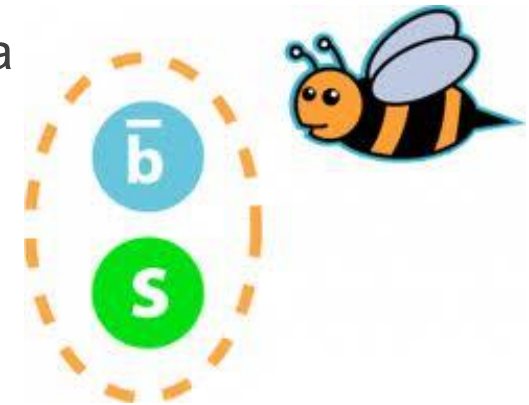
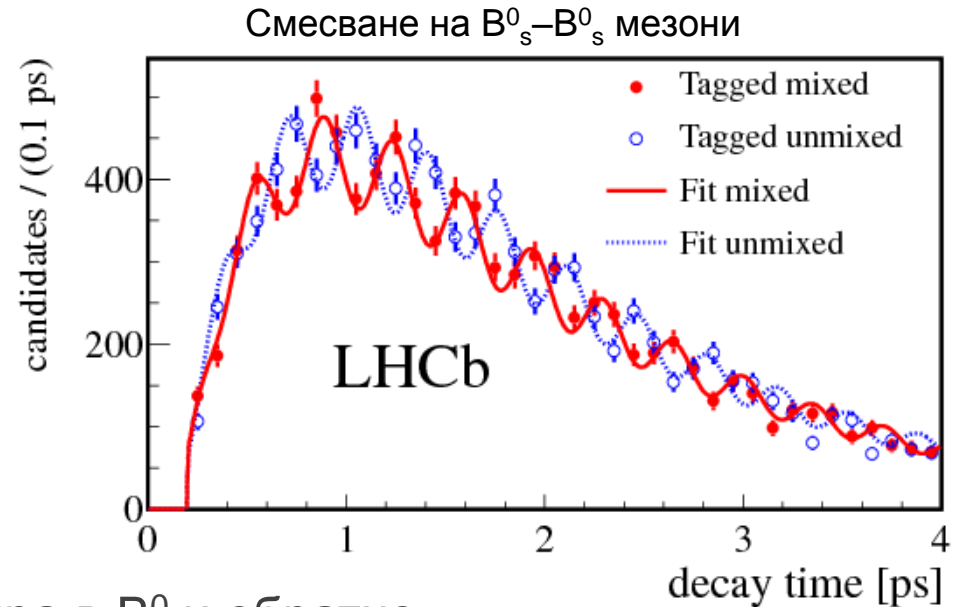
Нобелова награда за 2008г.

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

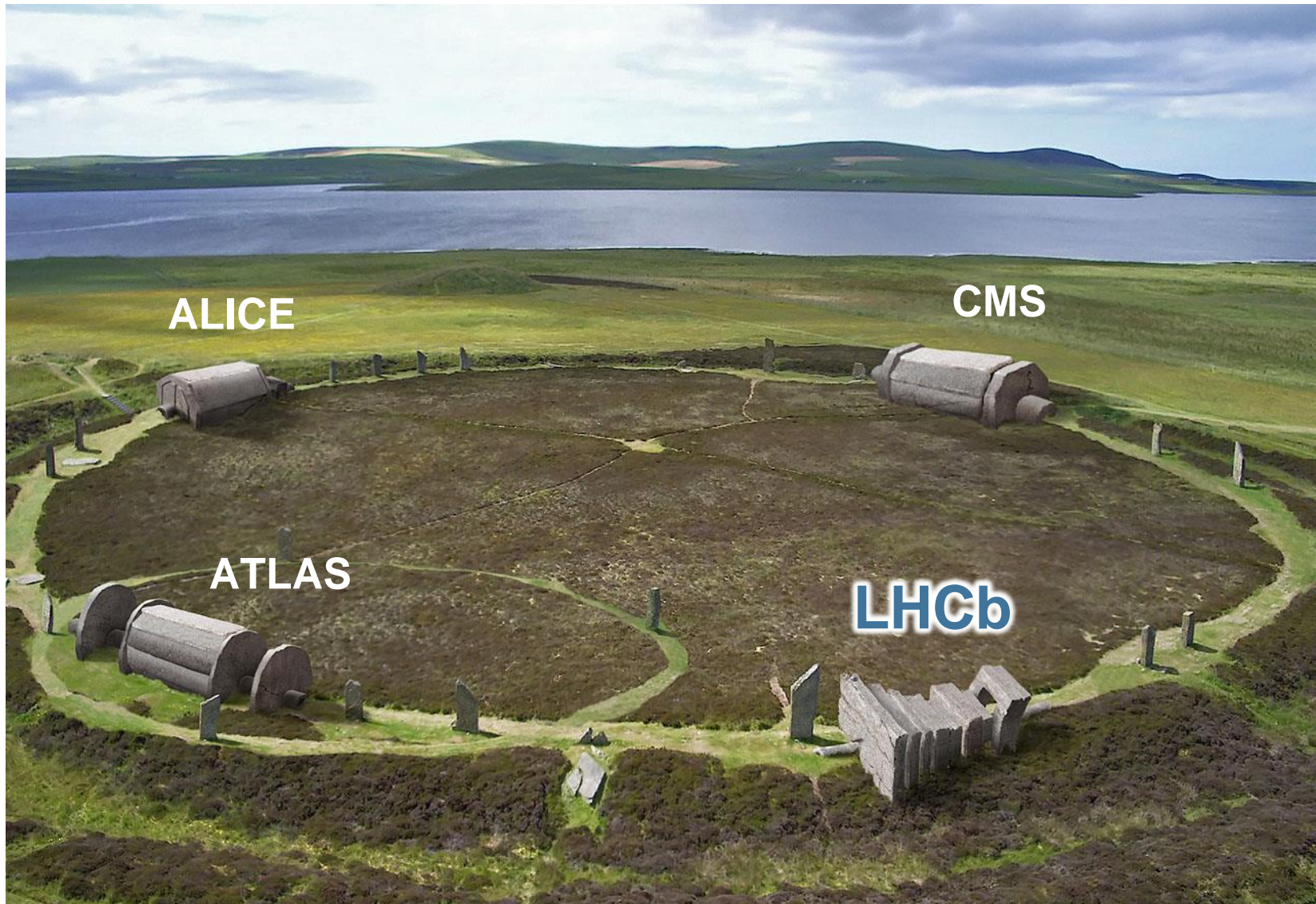
Bottom (beauty) мезони

В края на 80те се разбира, че най-доброто място за тест на СКМ механизма за CP-нарушение е не K^0 , а B^0 мезона.
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 много моди на разпад
- Има сравнително голямо време на живот (ps).



Къде се намира LHCb?



ATLAS, CMS и LHCb

ATLAS

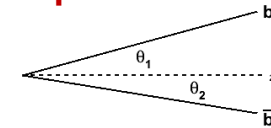
CMS

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

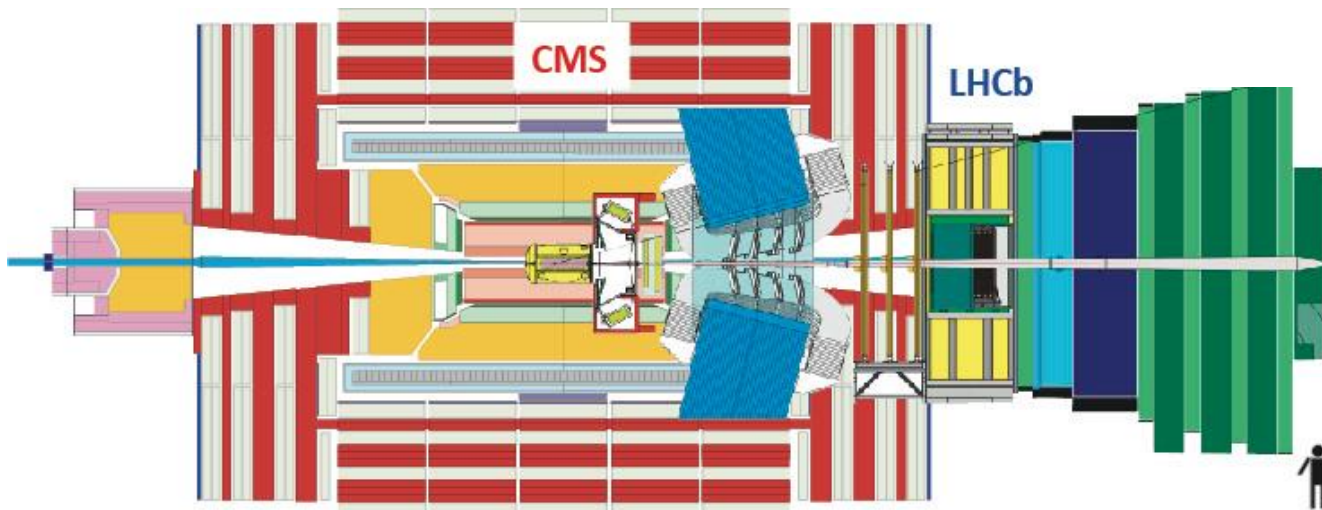
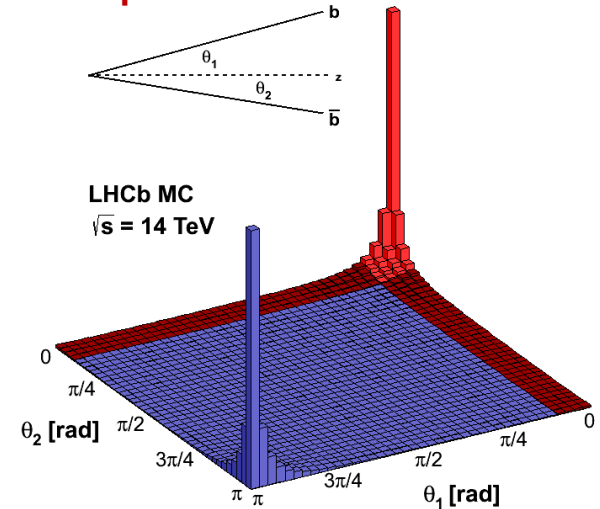
15 m
 21.5 m
 12550 t
 4 T



Производството на $b\bar{b}$ е концентрирано в предно и задно направление

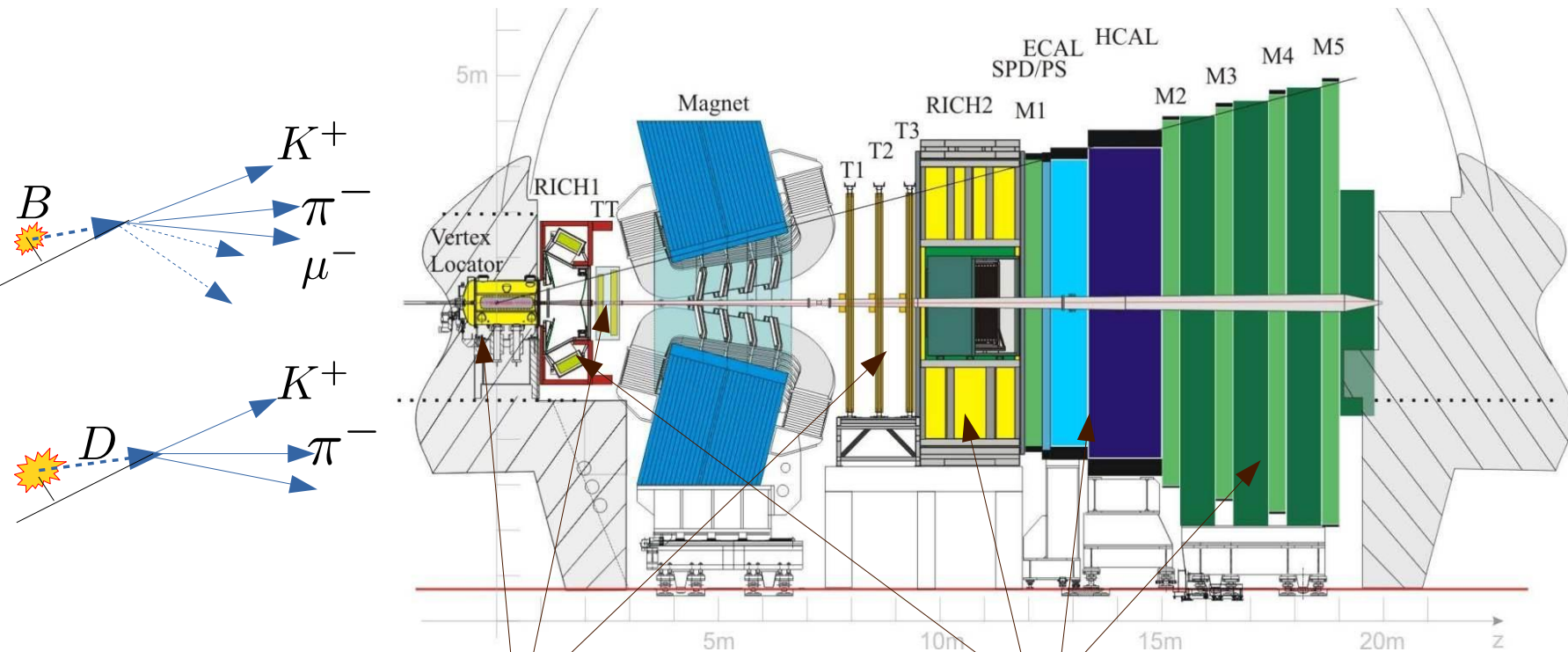


LHCb MC
 $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$





Детекторът LHCb



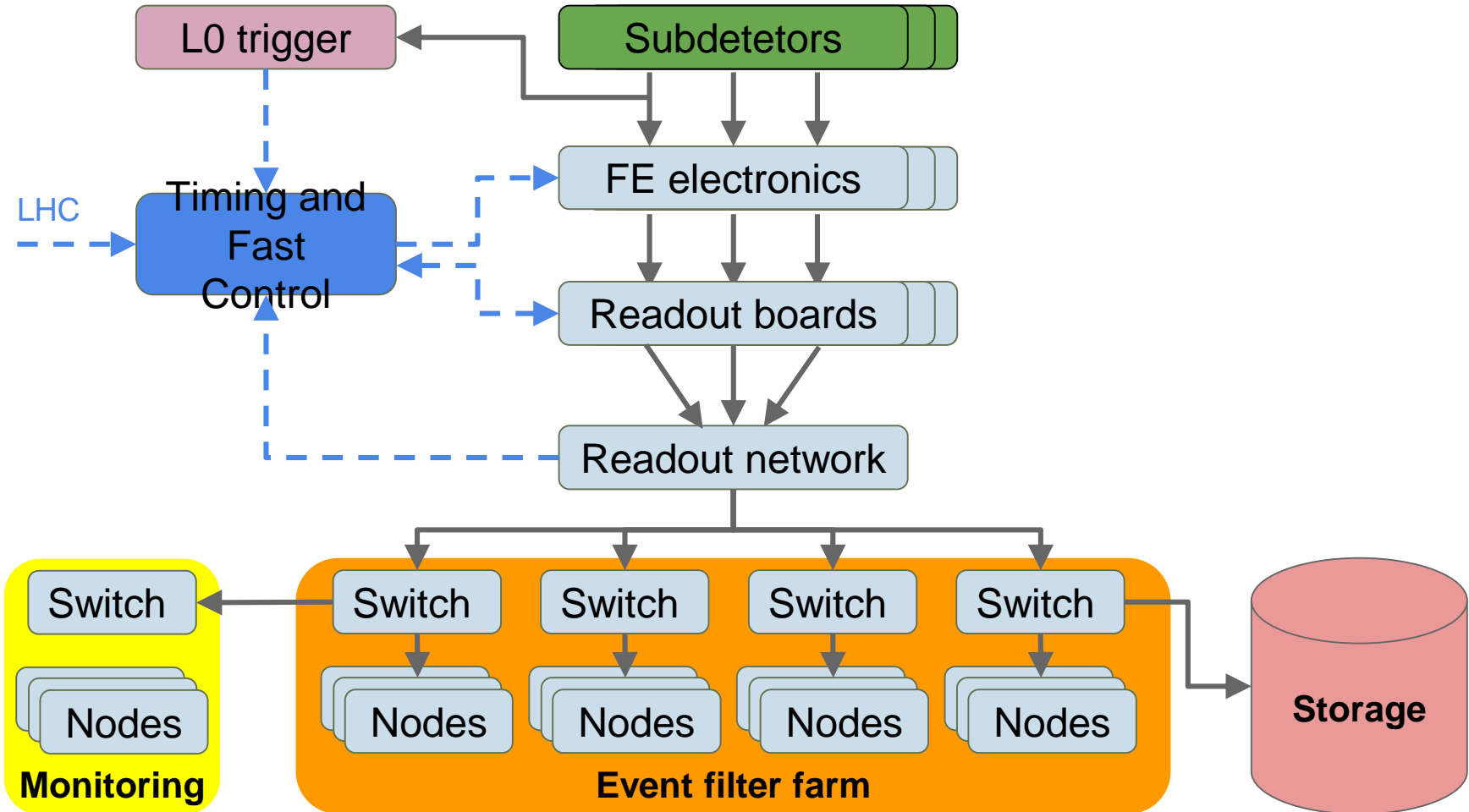
Детектиране на трекове и точки на взаимодействие

Идентифициране на частици и първичен тригер

Раждат се ~ 45 kHz $b\bar{b}$ двойки и ~ 1 MHz cc двойки

при $E_{\text{сцм}} = 13$ TeV и светимост $L = 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Инфраструктура за набиране на данни



JINST 3 (2008) S08005

Ферма за филтриране на събития

- 62 sub-farms
- 50880 логически ядра
- 900 нови сървъра за Run II
- Почти два пъти повече изчислителна мощност
- Само сървърите струват >5 MCHF

- Специален софтуер за реконструкция и селекция на интересни събития



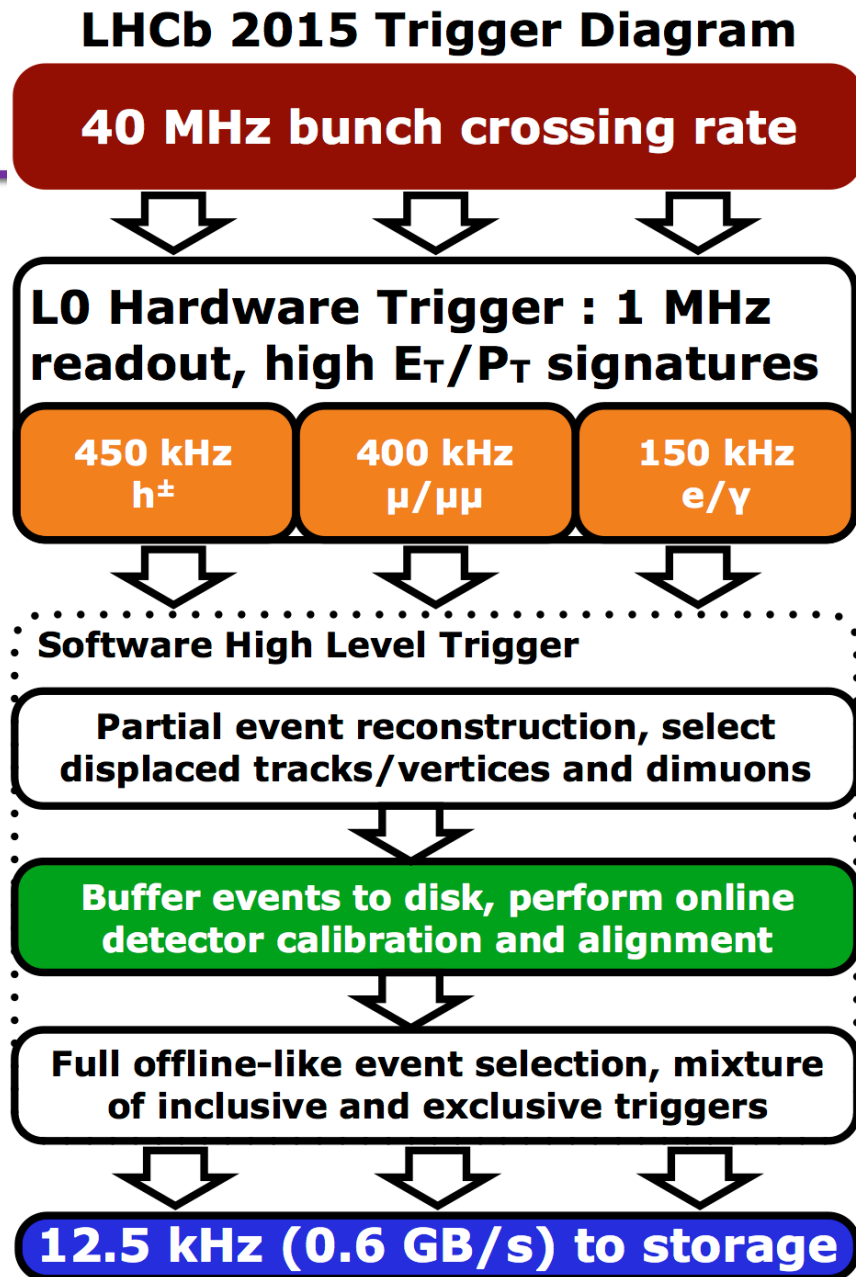
Run II тригер

Хардуерна селекция (L0)

- Ограничена информация
- Взима решение за 4 μ s
- Селектира 1 MHz

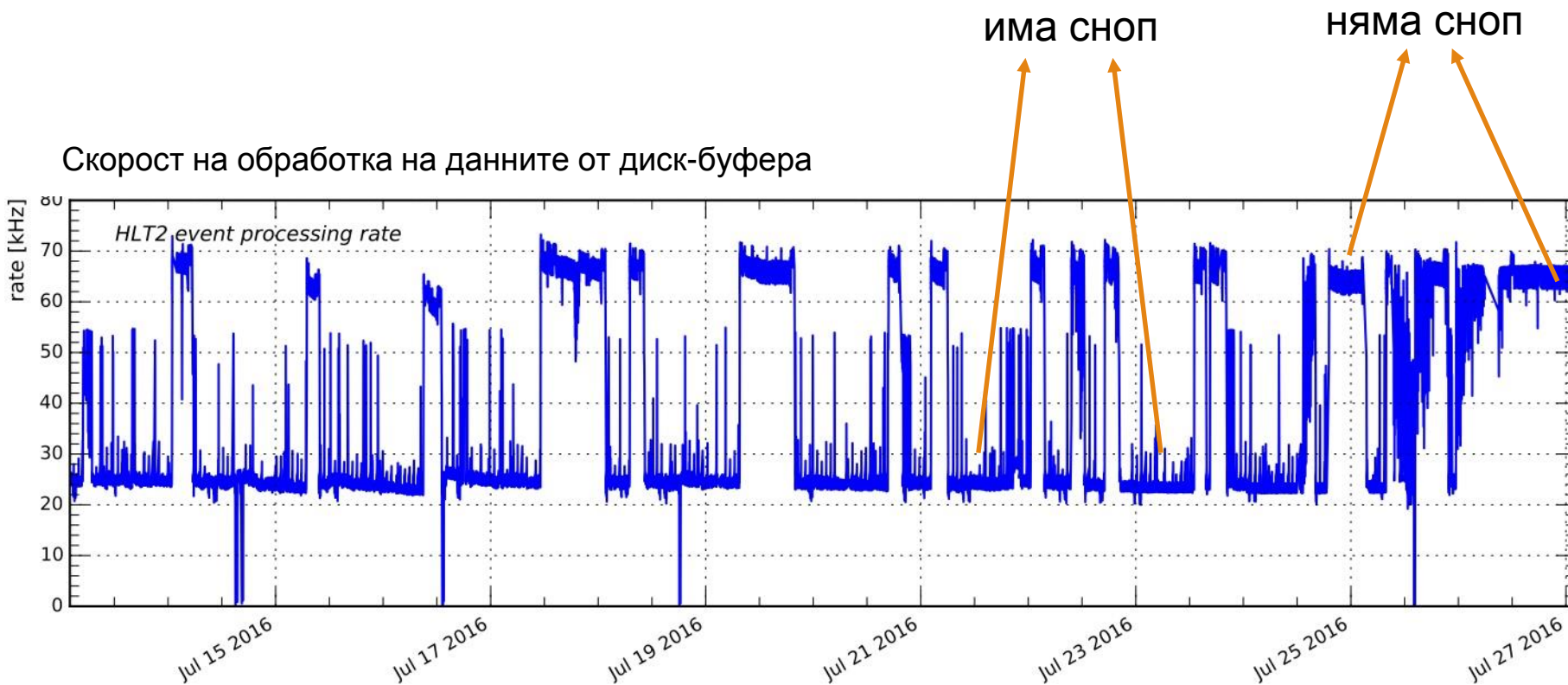
Софтуерна селекция (HLT)

- Две фази
- HLT 1 – синхронна с LHC, събитията се записват
- HLT 2 – несинхронна
- В крайна сметка остават 12.5 kHz интересни събития



Асинхронен тригер

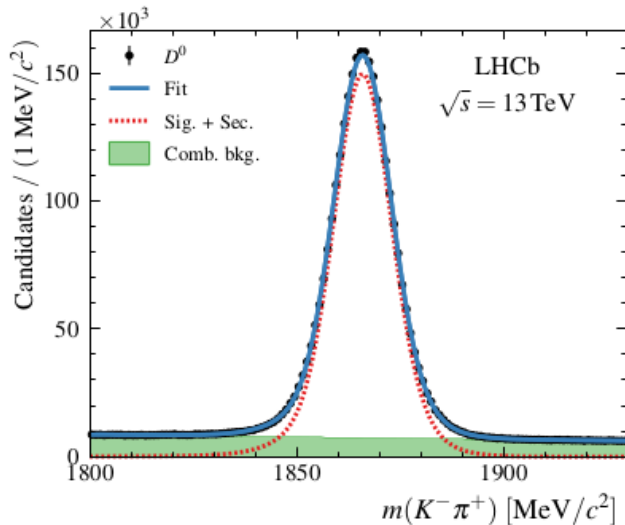
- Стабилен сноп само ~30-70% от времето
- Записваме данни на твърди дискове (10'000 ТВ) и правим втора селекция (HLT 2) докато LHC “не работи”
- Изчислителните ресурси се използват максимално



Непосредствен анализ на данните

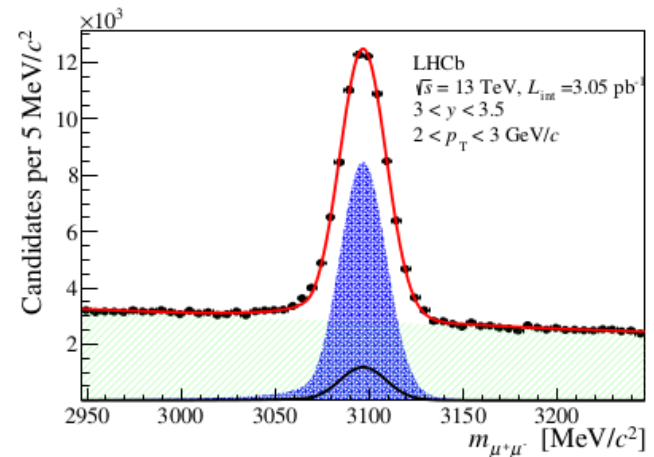
- Обикновено данните се изпращат “офлайн” и се реконструират, селектират, и анализират
 - Отнема време, месец(и)!
- TURBO: анализ използвайки данните директно от тригера!
 - Високо качеството на реконструкцията и калибровките
- **Първи резултати само седмица след набирането на данните!**

Measurements of prompt charm production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV



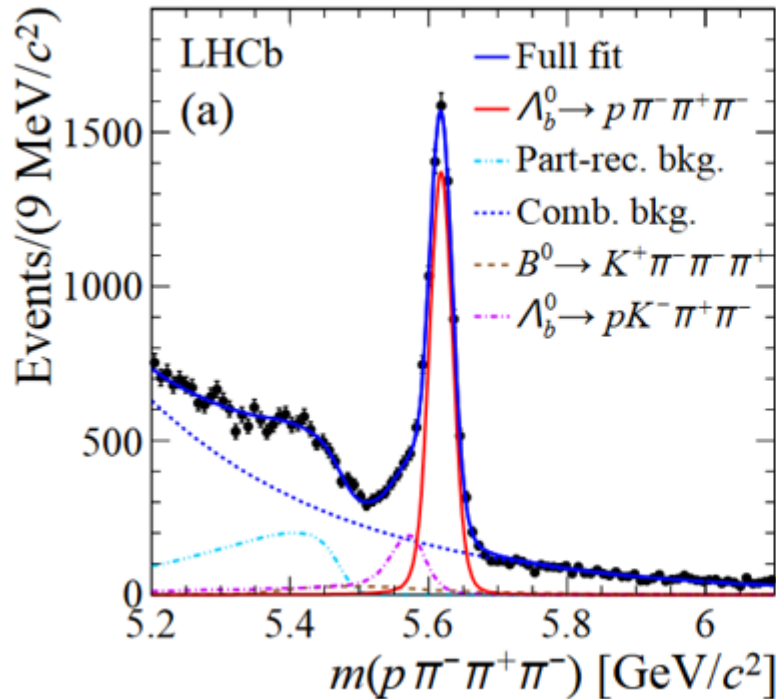
JHEP 03 (2016) 159

Measurement of forward J/ψ production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

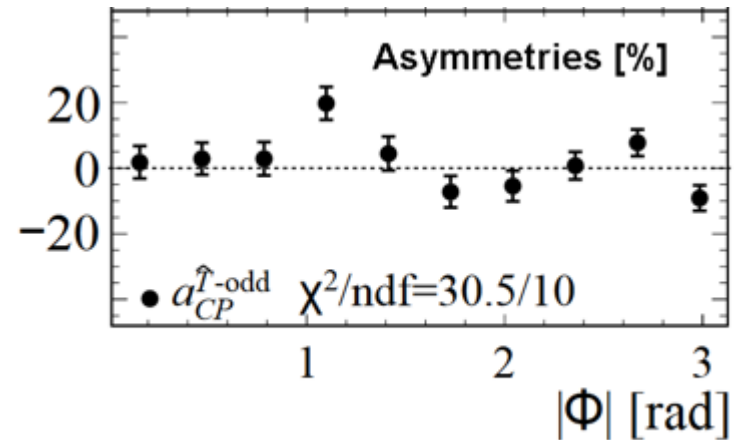


JHEP 10 (2015) 172

CP-нарушение с В бариони



Nature Physics 13, 391–396 (2017)

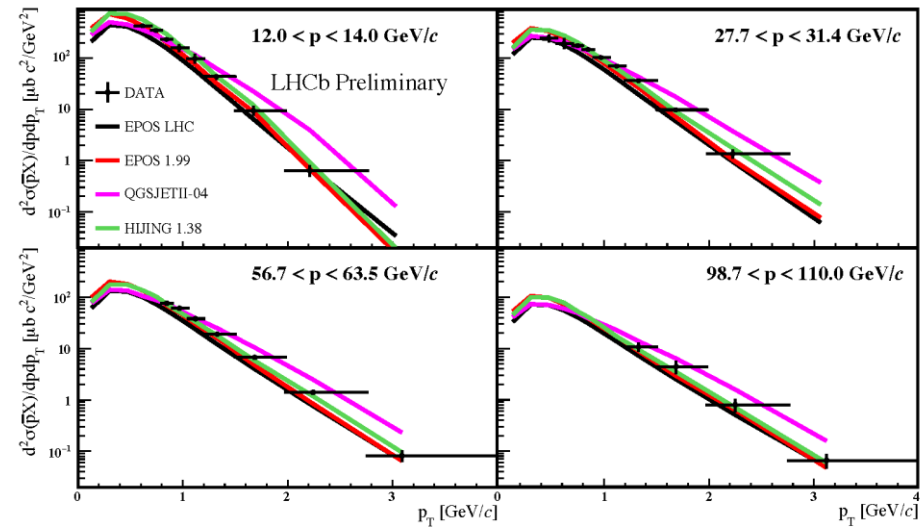
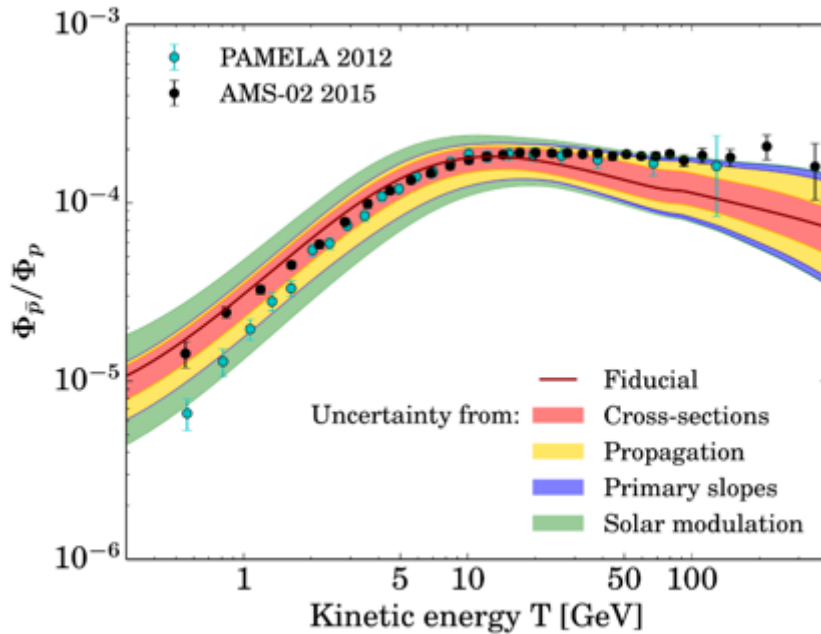


6000 разпада на Λ_b^0 барион

Индикация за разлика в пространственото разпределение на разпадите на барионите и антибарионите (3.3 “sigma”).

За първи път CP-нарушение в разпади на бариони.

Космични антипротони



[52nd Rencontres de Moriond EW](#)

Антипротони биха се раждали от взаимодействието на тъмна материя с познати частици, но също така чрез стандартни процеси при сблъсък на космични лъчи с хелиеви атоми.

Важно да познаваме точно тези стандартни процеси.

Заключение

- Липсата на антиматерия в наблюдаемата Вселена е един от най-интригуващите проблеми на съвременната наука
- Нарушение на CP е необходимо за Вселена обитавана не само от фотони
- SM 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 SM и търси нови източници на CP -нарушение