



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»*

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики

<http://enpl.mephi.ru/>

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №24

Антиматерия

Лекция №24

Антиматерия

“Зачем среди ночной поры
встречаются антимирь?”

Андрей Вознесенский

1. Введение
2. Позитрон
3. Зарядовое сопряжение
4. Антипротон
5. Антинейтрон
6. Взаимодействие антинуклонов с веществом
7. Антиядра
8. Поиск античастиц в открытом космосе



1. Введение

Открытия электрона Дж. Томсоном и атомного ядра Э. Резерфордом радикально изменили представление о строении материи на масштабах $<10^{-8}$ см. На таких масштабах проявляются квантовые свойства объектов, которые не подчиняются законам классической физики: наблюдаются дискретные состояния ядерных систем, процессы имеют вероятностный характер и описываются с помощью волновой функции.

Наряду с привычными из классической физики величинами энергии и импульса в квантовой физике появляются величины, не имеющие аналогов в классической физике, в частности, **спин** (собственный механический момент частицы). Поведение электрона как частицы со спином $\frac{1}{2}$ описывается релятивистским обобщением **уравнения Шрёдингера - уравнением П.Дирака** (1928 г./Н.п.1933).

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[c \left(\alpha_x \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_y \frac{\partial}{\partial y} + \alpha_z \frac{\partial}{\partial z} \right) + \beta mc^2 \right] \psi.$$

Решение уравнения Дирака для свободной частицы показывает, что каждому значению импульса **p** соответствуют два значения энергии

$$E = \pm (m^2 c^4 + c^2 p^2)^{1/2}$$

Вопрос: каков физический смысл состояний с отрицательной энергией?

Ответ: у каждой частицы должна быть античастица  отсюда два следствия:

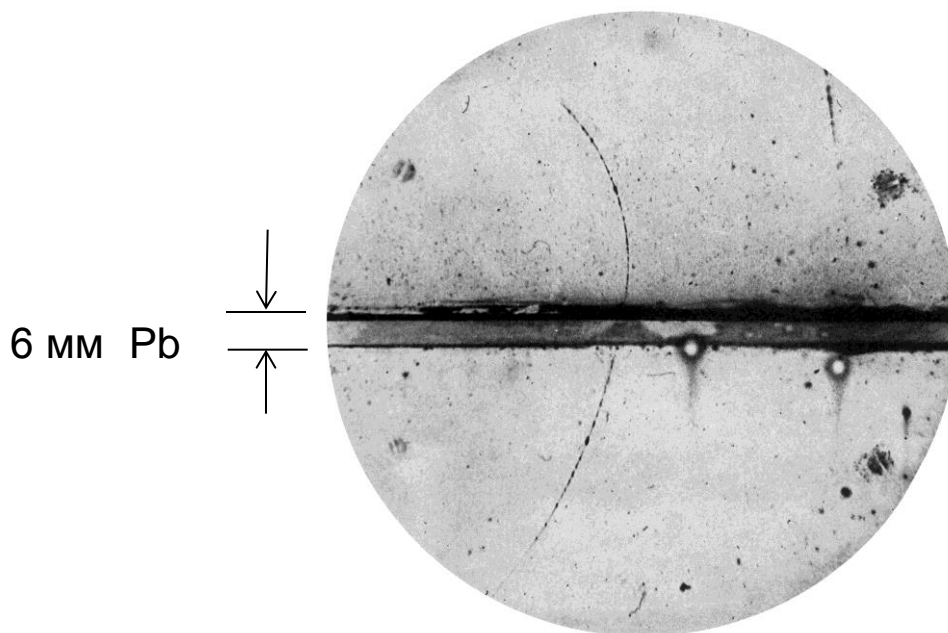
- 1) из состояния с **нулевыми** квантовыми числами частица и античастица рождаются **парой**;
- 2) частица и античастица при взаимодействии **аннигилируют**, т.е. исчезают, превращаясь в другие частицы

2. Позитрон

В соответствии с теорией Дирака электрон и его античастица (позитрон) могут рождаться *парой*, и на этот процесс должна быть затрачена энергия, равная энергии покоя двух этих частиц:

$$0,511 \text{ МэВ} \times 2 = 1,022 \text{ МэВ}$$

Позитрон был открыт в 1932 году американским физиком Карлом Андерсоном (Н.п.1936) при наблюдении рождения электрон-позитронных пар космическим излучением с помощью камеры Вильсона, помещённой в магнитное поле, что было впервые предложено Д. Скобельцыным в 1923 г.

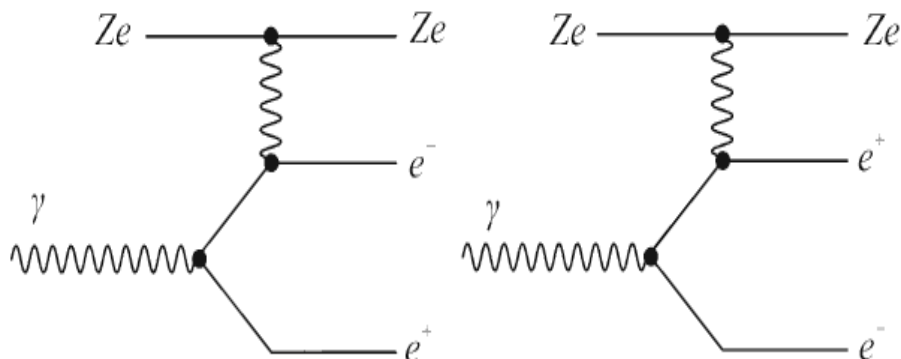
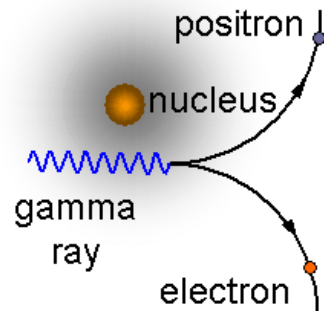


Пол Дирак
(1902–1984)
Н.п.1933



Карл
Андерсон
(1905–1991)
Н.п.1936

Рождение пар гамма-квантами

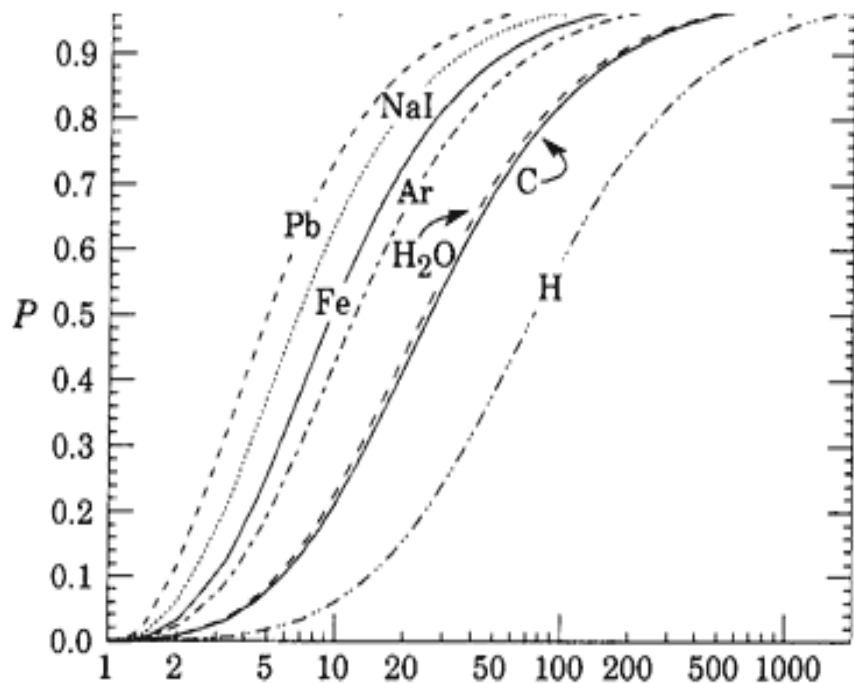


Электрон-позитронные пары могут рождаться γ -квантами с энергией несколько МэВ в **кулоновском поле атомного ядра**.

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + E_n$$

Эффективное сечение этого процесса пропорционально квадрату заряда ядра Z^2 .

Зависимость вероятности образования электрон-позитронной пары в кулоновском поле атомного ядра от энергии фотона.



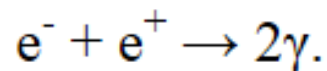
Визуализация рождения пары электрон-позитрон в камере Вильсона, заполненной криптоном

Энергия γ -кванта (МэВ)

Аннигиляция

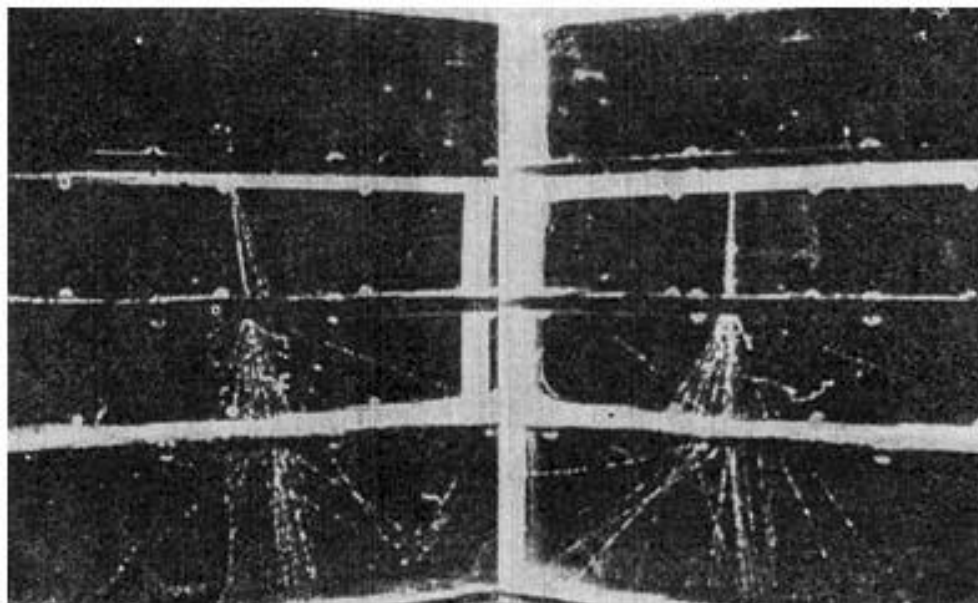
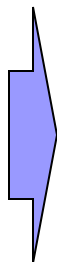
Позитрон был первой обнаруженной частицей из нового класса частиц, которые получили название **античастицы**.

Позитрон является стабильной частицей и может в пустом пространстве существовать, так же как электрон, бесконечно долго. Однако при взаимодействии медленного электрона и позитрона происходит их **аннигиляция**: электрон и позитрон исчезают, а вместо них рождаются два γ -кванта:



При взаимодействии частиц высокой энергии с веществом процессы рождения и аннигиляции частиц и античастиц приводят к рождению большого количества вторичных частиц – происходит формирование **каскадных ливней**

Пример: развитие ливня в свинцовых пластинах, помещённых в камеру Вильсона

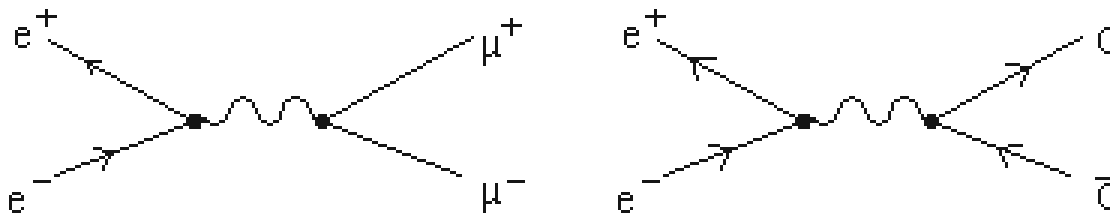


При достаточно высокой энергии возможны превращения в более тяжёлые частицы, например,

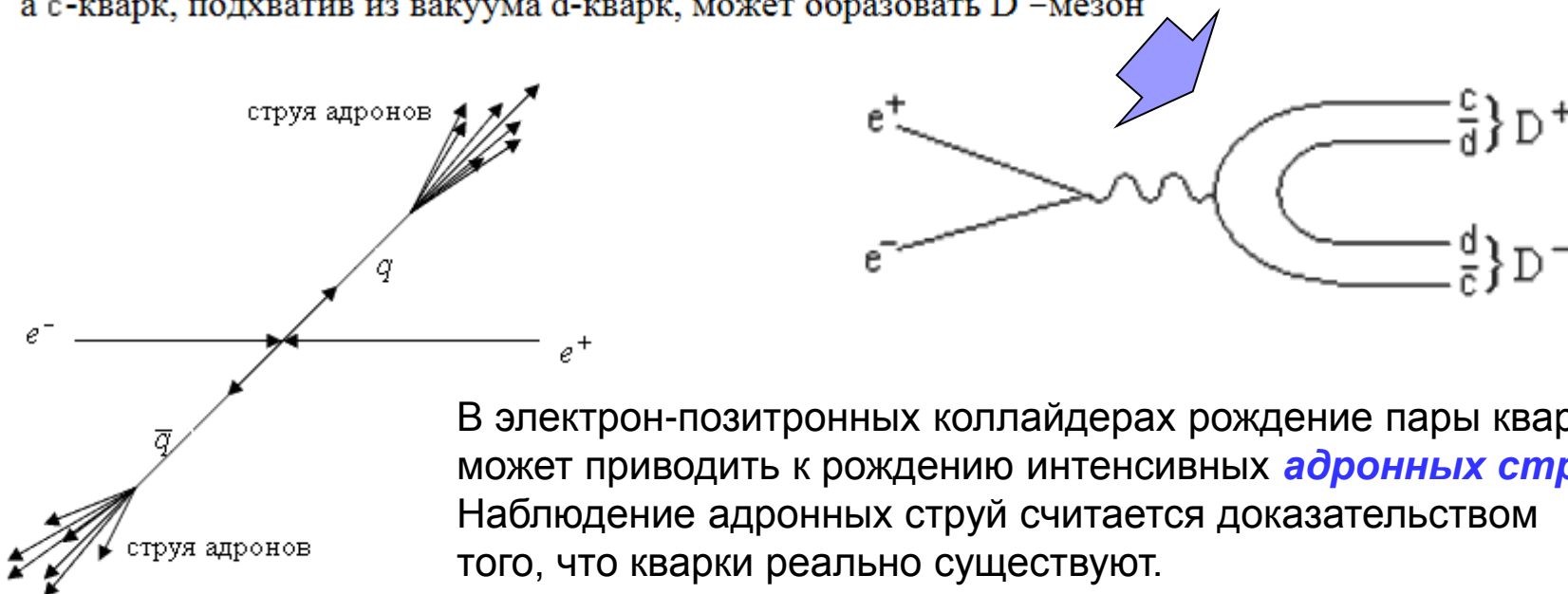


При аннигиляции электрона и позитрона рождается виртуальный фотон

При достаточно больших энергиях виртуальный фотон в свою очередь может родить любые частицы, например, пару мюонов $\mu^+\mu^-$ или **кварков**.



Т.к. кварки являются цветными объектами и не могут существовать в свободном состоянии, то если образовалась пара $c\bar{c}$ -кварков, c -кварк может, подхватив из вакуума \bar{d} -кварк, образовать D^+ -мезон, а \bar{c} -кварк, подхватив из вакуума d -кварк, может образовать D^- -мезон



В электрон-позитронных коллайдерах рождение пары кварков может приводить к рождению интенсивных **адронных струй**. Наблюдение адронных струй считается доказательством того, что кварки реально существуют.

Позитроны образуются при распаде β^+ -радиоактивных ядер.

В качестве источника позитронов широко используется изотоп ^{22}Na .

Период полураспада изотопа ^{22}Na равен 2.6 года.

В 90% случаев (но не всегда!) распад происходит в результате β^+ -распада



с образованием стабильного изотопа $^{22}\text{Ne}_{10}$

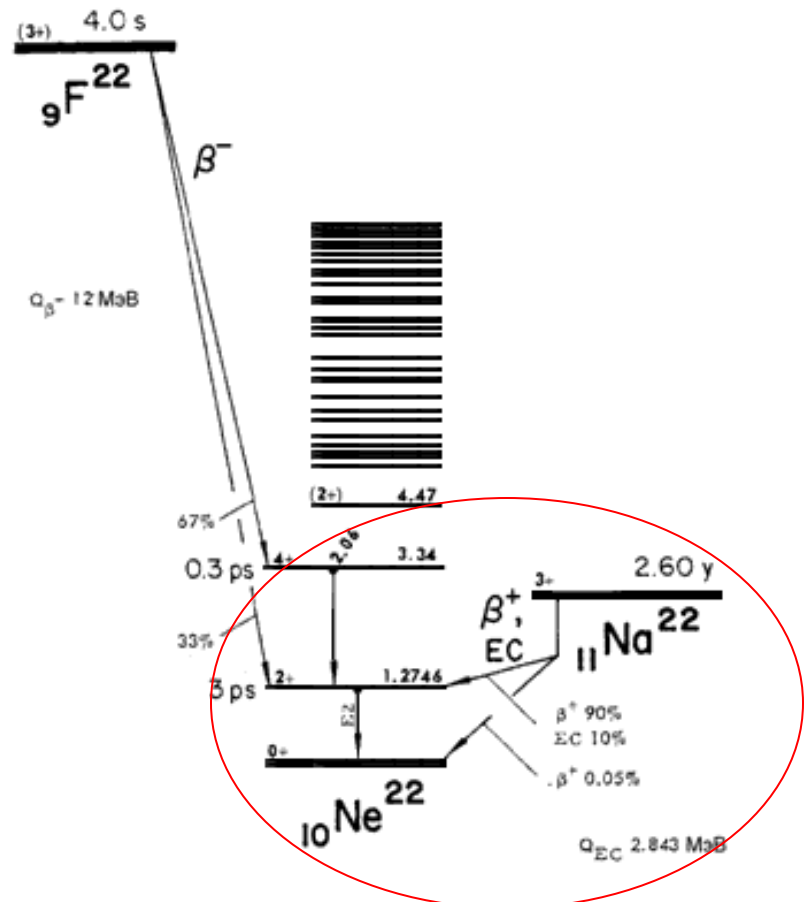
Первое возбуждённое состояние $^{22}\text{Ne}_{10}$

$$E^* = 1.27 \text{ МэВ}, J^P = 2^+.$$

Вероятность распада ^{22}Ne в основное состояние $J^P = 0^+$ составляет 0.05%.

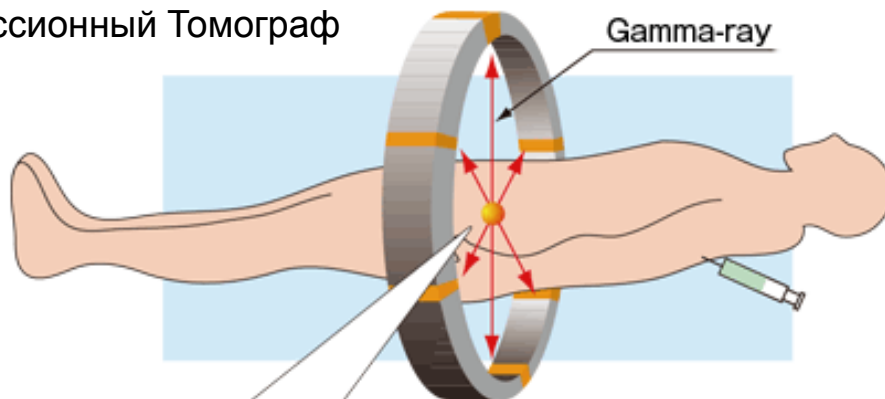
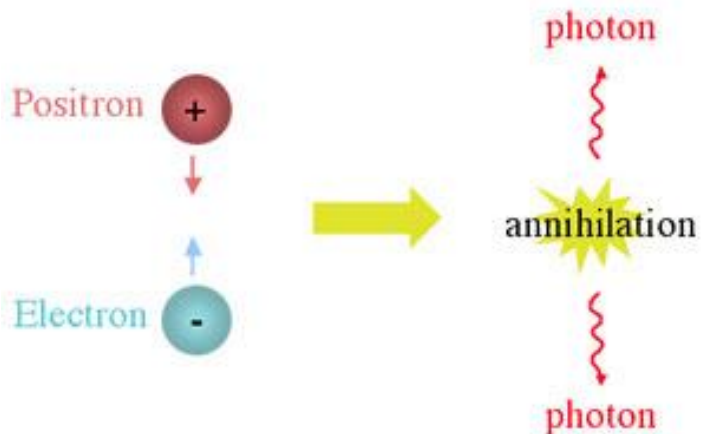
Время жизни позитрона небольшой энергии в конденсированной среде с плотностью электронов 10^{24} см^{-3}

$$\tau \approx 10^{-10} \text{ сек}$$



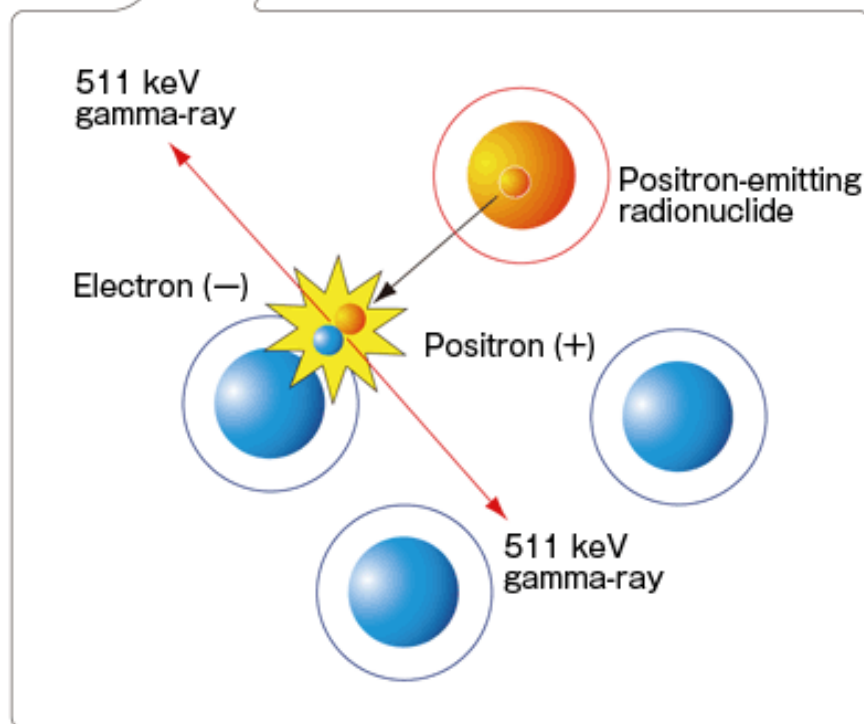
Использование аннигиляции позитронов от изотопов в ядерной медицине:

ПЭТ: Позитронно-Эмиссионный Томограф



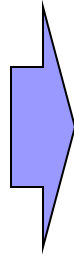
Positron-emitting radionuclide and half-life

Nuclide	Half-life
^{11}C (carbon-11)	20 min
^{13}N (nitrogen-13)	10 min
^{15}O (oxygen-15)	2 min
^{18}F (fluorine-18)	110 min



3. Зарядовое сопряжение

В 1932 г. открыт e^+
В 1938 г. открыты μ^+ и μ^-
В 1947 г. открыты π^+ и π^-



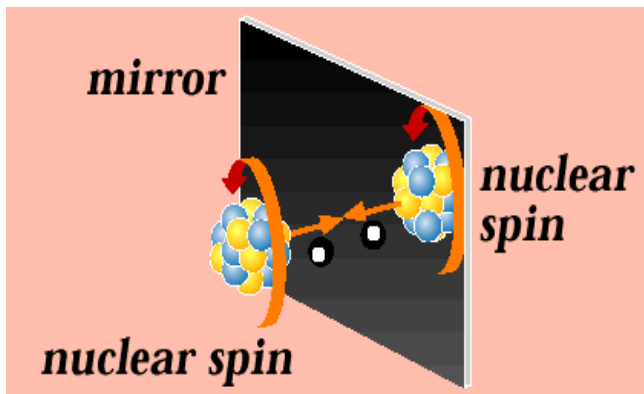
Симметрия природы относительно существования частиц и античастиц называется **принципом зарядового сопряжения**

Зарядовое сопряжение C переводит частицу в античастицу, оставляя неизменными пространственные переменные x , импульс p и момент импульса J :

$$x, p, J, Q, B, L_e, L_\mu, L_\tau, s, c, b, t \xrightarrow{C} x, p, J, -Q, -B, -L_e, -L_\mu, -L_\tau, -s, -c, -b, -t$$

Существуют также истинно нейтральные частицы: γ -квант, π^0 - мезон
Зарядовая чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и не сохраняется в слабых взаимодействиях (впервые показано м-м Ву в 1957 г.).

В слабых взаимодействиях наблюдается CP -инвариантность: $CP=1$



Теорема Людерса-Паули в релятивистской теории поля: в любом взаимодействии произведение трёх инверсий – зарядового сопряжения C , зеркального отражения P , обращения времени T -- является инвариантом: $CPT=1$

Следствие: равенство массы, спина и времени жизни для частиц и античастиц

Характеристики частиц и античастиц

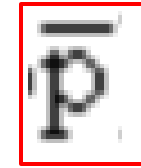
Характеристика		Частица	Античастица
Масса		М	
Спин		J	
Чётность	фермион	$+(-)1$	$- (+)1$
	бозон	$+(-)1$	$+ (-)1$
Электрический заряд		$+(-)Q$	$- (+)Q$
Магнитный момент		$+(-)\mu$	$- (+)\mu$
Барионное число		$+B$	$-B$
Лептонные числа		$+L_e, +L_\mu, +L_\tau$	$-L_e, -L_\mu, -L_\tau$
Изоспин		I	
Проекция изоспина		$+(-)I_3$	$- (+)I_3$
Странность		$- (+)s$	$+ (-)s$
Очарование (Charm)		$+(-)c$	$- (+)c$
Bottom		$- (+)b$	$+ (-)b$
Top		$+(-)t$	$- (+)t$
Время жизни		τ	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e \quad \bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$	

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e$$

4. Антипротон

Эмилио Сегре
(1905 – 1989)

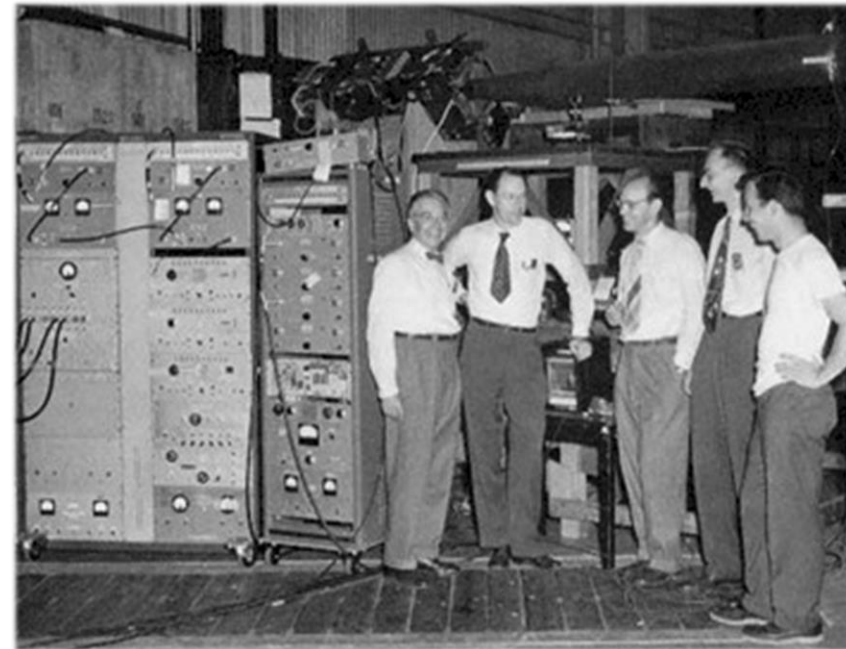
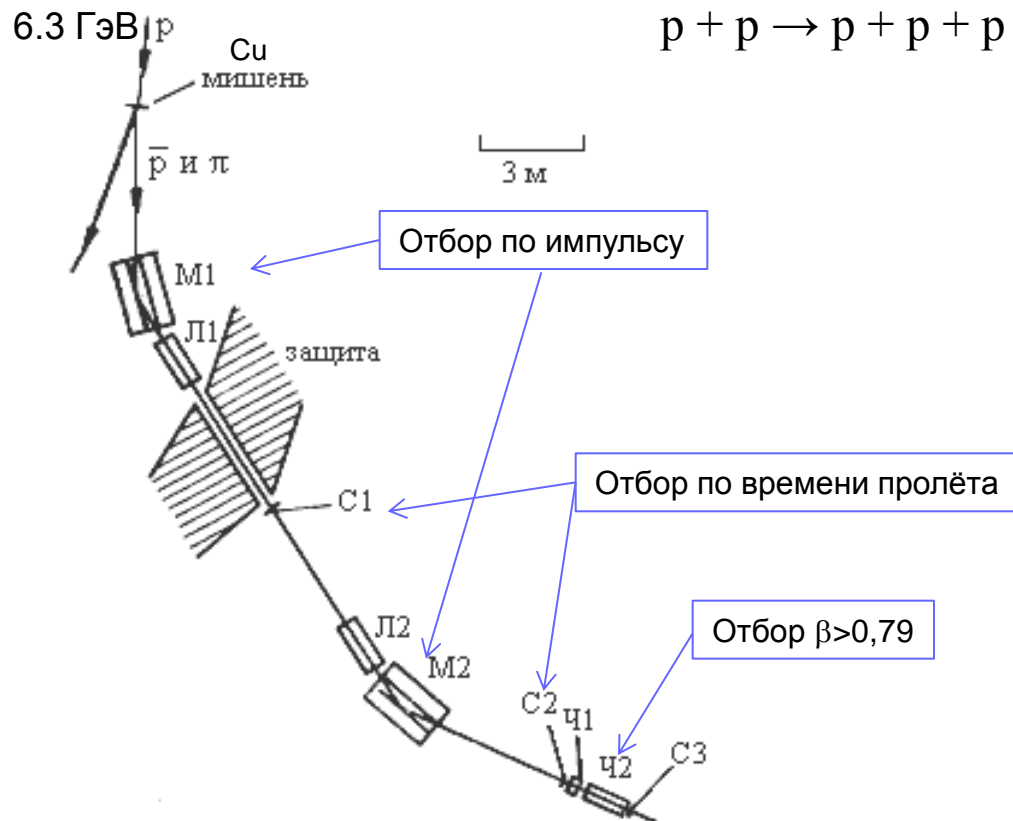


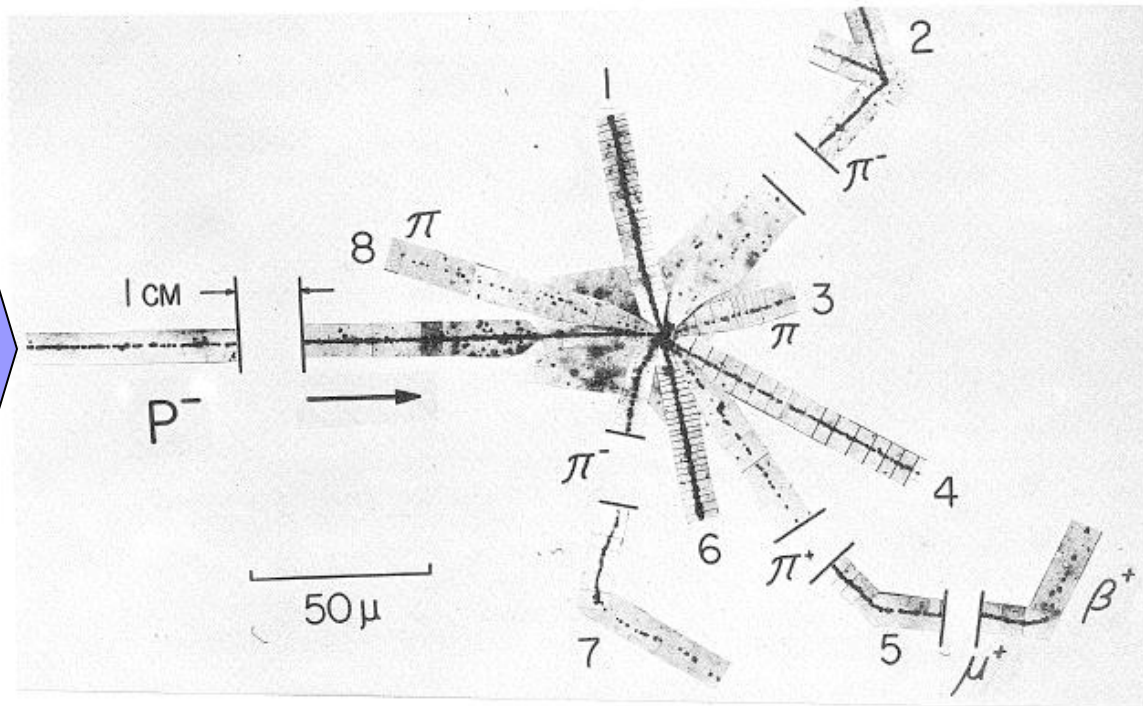
Овен
Чемберлен
(1920 – 2006)



$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$$

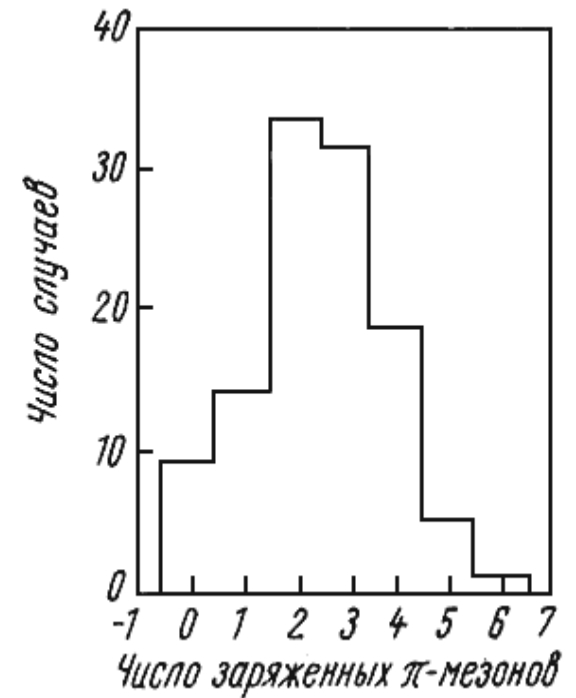
Антипротон — античастица по отношению к протону имеет отрицательный электрический заряд и отрицательное барионное число, прочие свойства совпадают со свойствами протона. Предсказан П.Дираком в Нобелевской речи в 1933 г. Открыт в 1955 году Э.Сегрэ и О.Чемберленом (Н.п.1959) на специально построенном для этого ускорителе протонов в Калифорнийском университете в Беркли





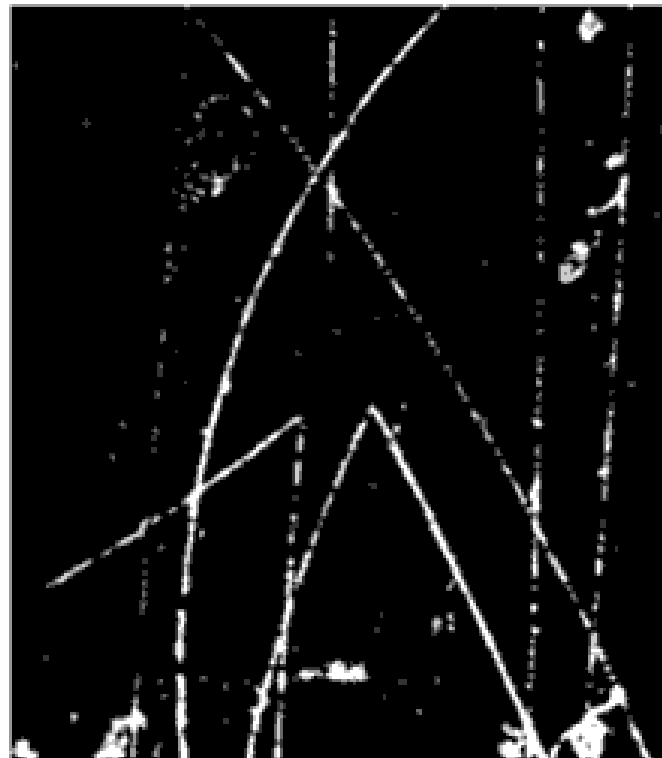
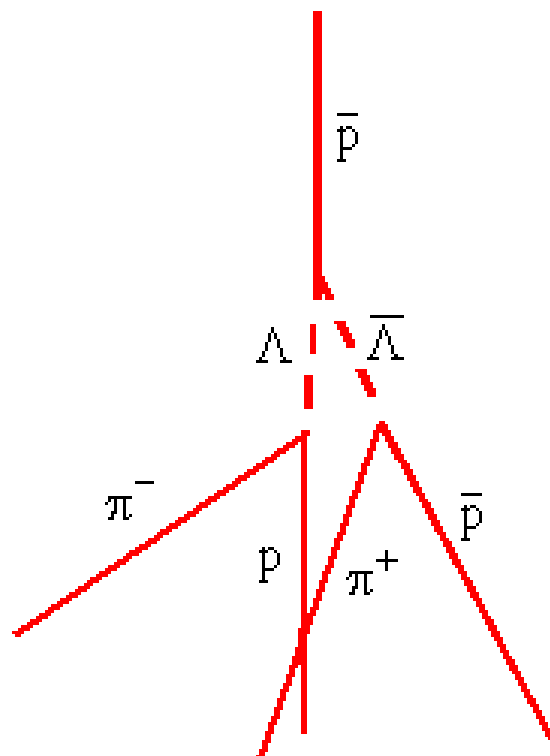
Аннигиляция антипротона с протоном в ядерной эмульсии
(эксперимент Г. Гольдхабера в 1955 г. в LBNL)

$$M(p^-)/M(p) = 1.013 \pm 0.034$$



Число заряженных π -мезонов,
образующихся при
аннигиляции антипротонов в
фотоэмульсии

$$\bar{p} + p \rightarrow \Lambda + \bar{\Lambda}$$



Образование пары $\Lambda\bar{\Lambda}$ при столкновении $p\bar{p}$ в пузырьковой камере

Протоний

При столкновении **медленного антипротона** с **атомом водорода** может образоваться атом, состоящий из протона и антипротона. Такой атом называется **протоний** (символ ***Pn***).

Протоний (*prot-onium*) представляет собой водородоподобный атом, отличающийся от атома водорода тем, что вместо электрона в нем находится антипротон. Приведенная масса протония

$$\mu(p\bar{p}) = \frac{M(p)M(\bar{p})}{M(p) + M(\bar{p})} = \frac{M(p)}{2}$$

Радиус боровской орбиты протония

$$R(p\bar{p}) = \frac{\hbar}{\mu(p\bar{p}) \cdot c} \frac{n^2}{\alpha} = 0,576 \cdot 10^{-11} n^2 \text{ см} = \frac{1}{918} R(H)$$

т.е. в **918** раз меньше радиуса атома водорода $R(H)$!

Энергия термов протония

$$E(p\bar{p}) = -\mu(p\bar{p})c^2 \frac{\alpha^2}{2n^2} = \frac{M(p)}{2m_e} \frac{Ry}{n^2} = -\frac{12.47}{n^2} \text{ кэВ},$$

Ry = 13.60569253 эВ – постоянная Ридберга.

Энергия связи основного состояния атома протония $n = 1$ составляет –12.47 кэВ.

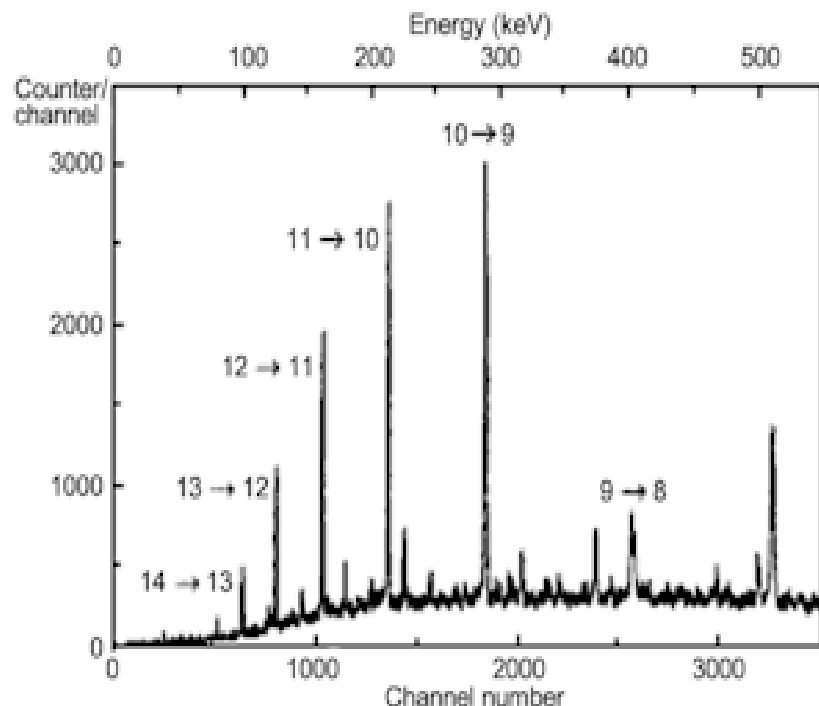
Время жизни протония составляет от 10^{-11} сек в нижних состояниях с $n=1$
до 10^{-6} сек в верхних состояниях с $n=30$.

Протоний **бозон**

Протоний аннигилирует в π -мезоны с их последующим распадом:
50% энергии уносят нейтрино и антинейтрино, 16% - электроны и позитроны

Антипротонный атом

При взаимодействии медленных антипротонов с веществом могут образовываться **антипротонные атомы**, в которых один из электронов заменён на антипротон. Сигналом об образовании антипротонного атома служит характерное излучение, образующееся при переходе антипротона с одной боровской орбиты на другую. Из-за большой массы антипротонов орбиты антипротонных атомов расположены глубоко внутри электронного облака и находятся вблизи атомного ядра

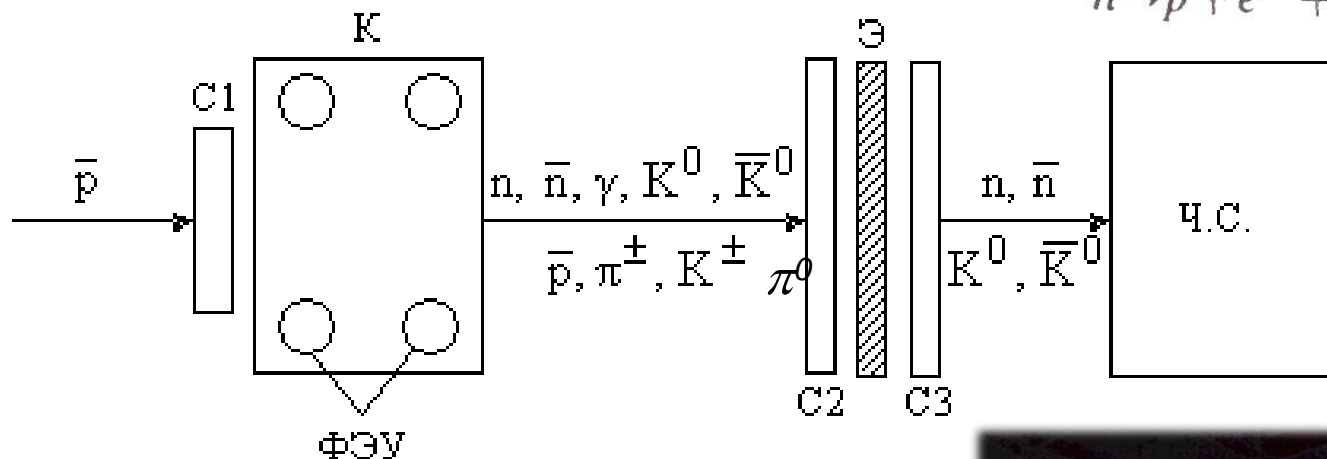
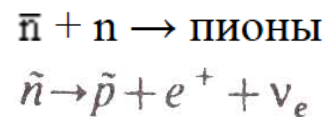
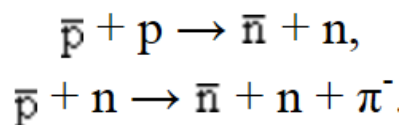


Характеристический спектр гамма-излучения, возникающего при облучении мишени из ^{176}Yb пучком медленных **антипротонов**.

Линейчатый характер спектра свидетельствует об образовании антипротонного атома

5. Антинейтрон

Антинейтрон был открыт в 1956 году в антипротон-протонных столкновениях на ускорителе **Беватрон** в лаборатории **LBNL** Б. Корком, Г. Ламбертсоном, О. Пиччони и В. Венцелем.



$C1-C3$ - сцинтилл. счетчики

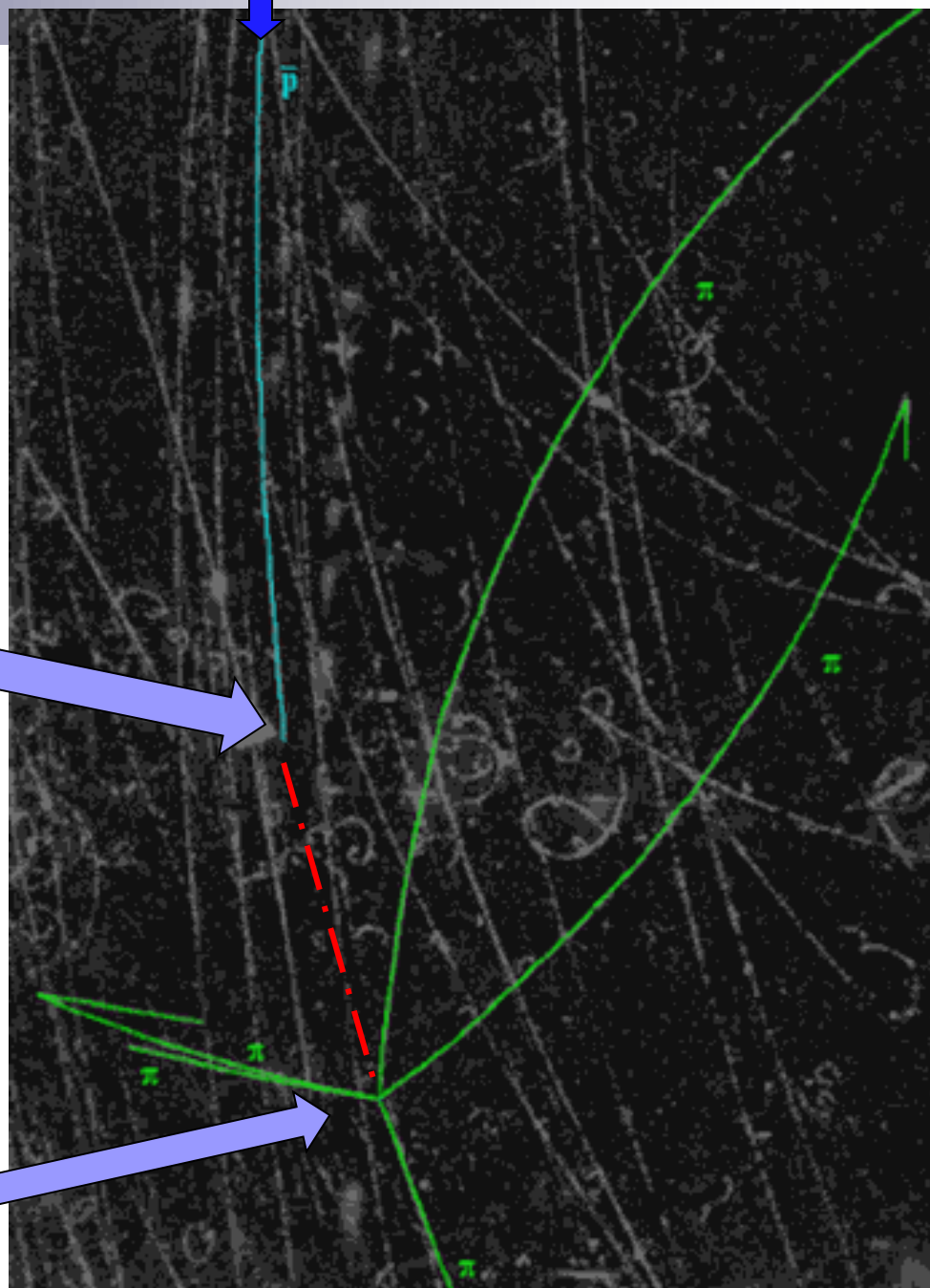
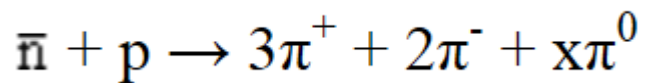
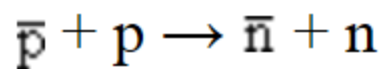
K - конвертер (ж. сцинт.)

Ξ - свинцовый экран

ЧС – Черенковский счетчик из свинцового стекла



Образование и аннигиляция
антинейтрона были подтверждены
фотоснимками событий в
пропановой пузырьковой камере
(Беркли, 1958)



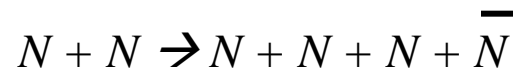
Характеристики нейтрона и антинейтрона

Характеристика	Нейтрон	Антинейтрон
Кварковый состав	udd	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$
Масса mc^2 , МэВ	939.56536±0.00008	
Спин, \hbar	1/2	
Чётность	+1	-1
Электрический заряд	0	0
Барионный заряд	+1	-1
Изоспин	1/2	
Проекция изоспина	-1/2	+1/2
Величина магнитного момента, μ_N	1.9130427± 0.0000005	
Знак магнитного момента	-1	+1
Время жизни, с	885.7±0.8	
Схема распада	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e$	

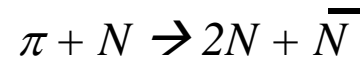
6. Взаимодействие антинуклонов с веществом

Рождение антинуклонов

- Антинуклон рождается нуклоном при пороговой энергии **5,6 ГэВ**



- Пионом при пороге **3,6 ГэВ**



- Порог на ядре понижается за счет фермиевской энергии нуклонов в ядре (~25 МэВ), однако число рождаемых антинуклонов меняется слабо из-за поглощения в ядре

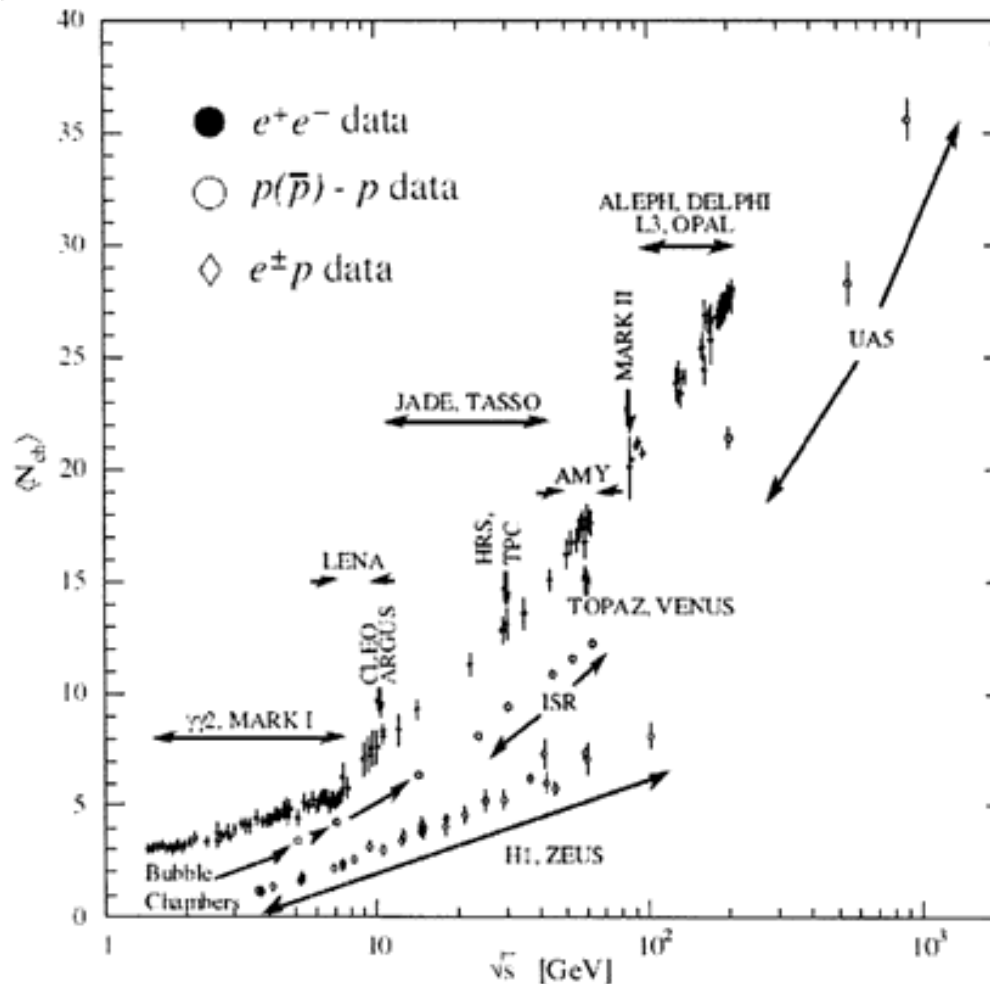
Аннигиляция антинуклонов при низких энергиях

Аннигиляция *за счет разных* барионных зарядов \rightarrow высвобождается энергия $2m_N c^2$

Продукты аннигиляции **95% π + 5% K - мезонов**

Взаимодействие антинуклонов с нуклонами при высоких энергиях

- Множественность частиц, рождённых при аннигиляции, растёт с энергией

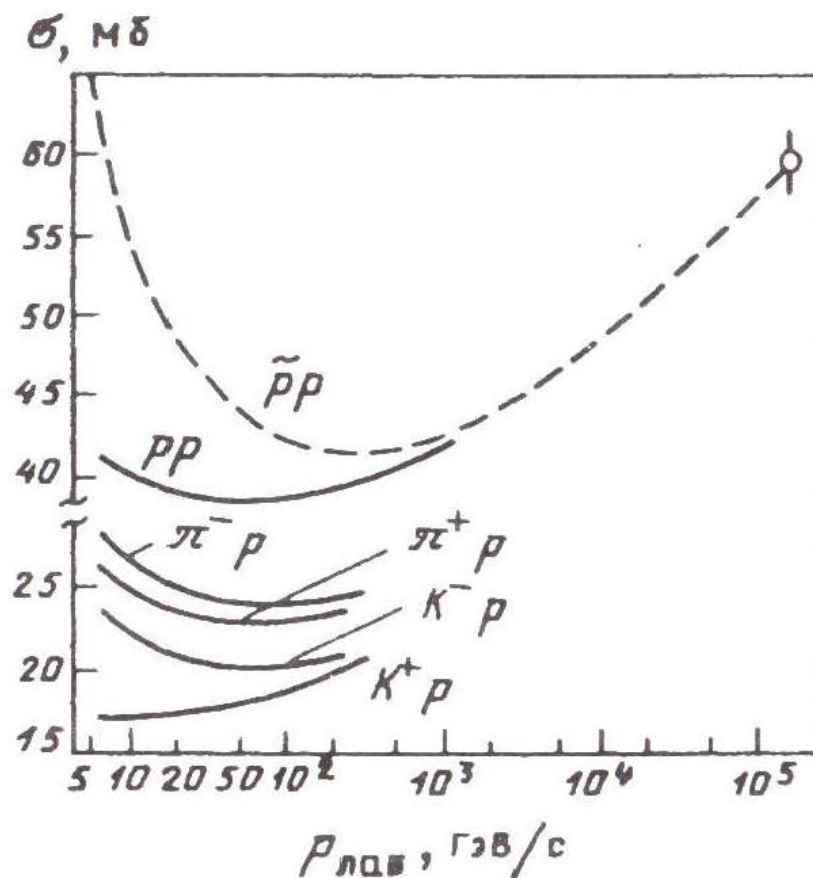


- *Поведение сечений* → теорема Померанчука (1958):

Разность полных сечений взаимодействия частицы с частицей, и с её же античастицей стремится к **0** при $s \rightarrow \infty$, где s — квадрат полной энергии частиц в системе центра масс



Исаак Яковлевич
Померанчук
(1913-1966)



• Открытие W и Z бозонов

Протон-антипротонный коллайдер в ЦЕРНе обеспечивал $UA1$ и $UA2$ эксперименты, в которых были открыты W и Z бозоны. (Нобелевская премия Carlo Rubbia и Simon van der Meer в 1984 г.)

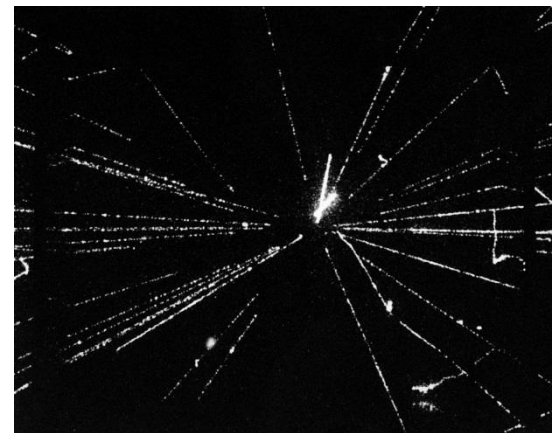
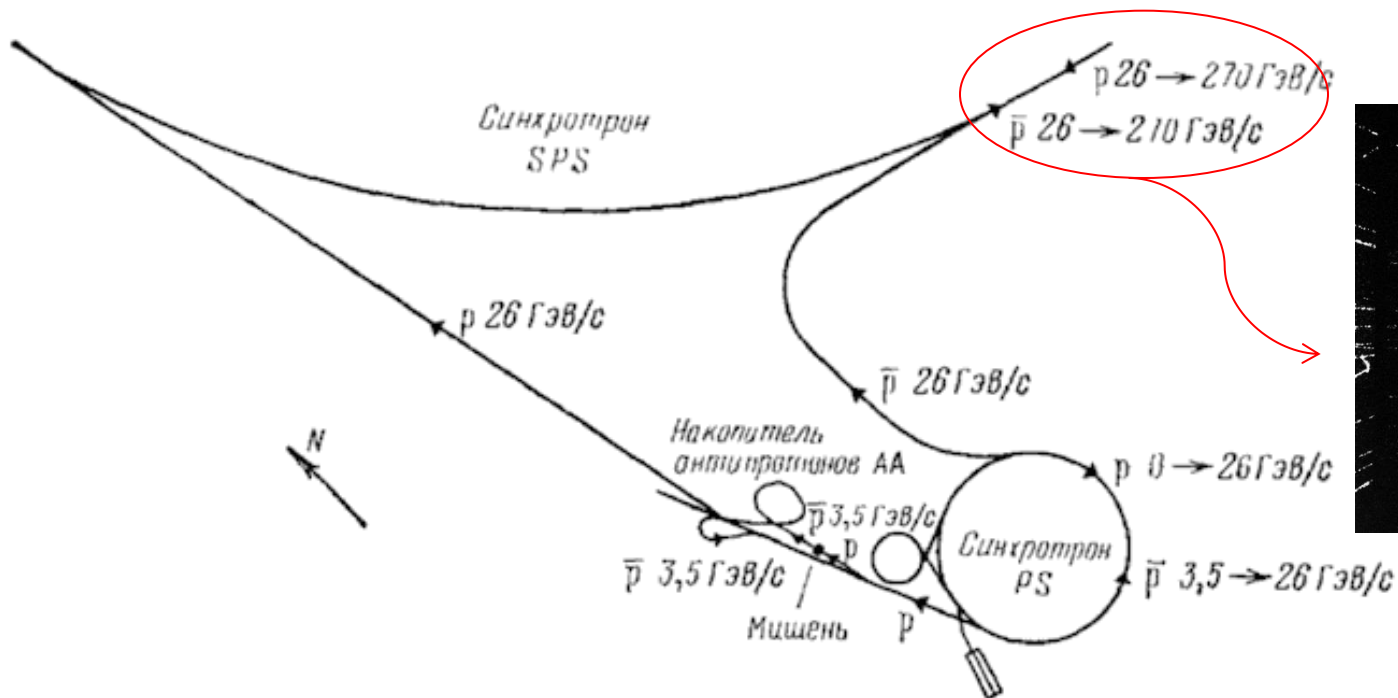
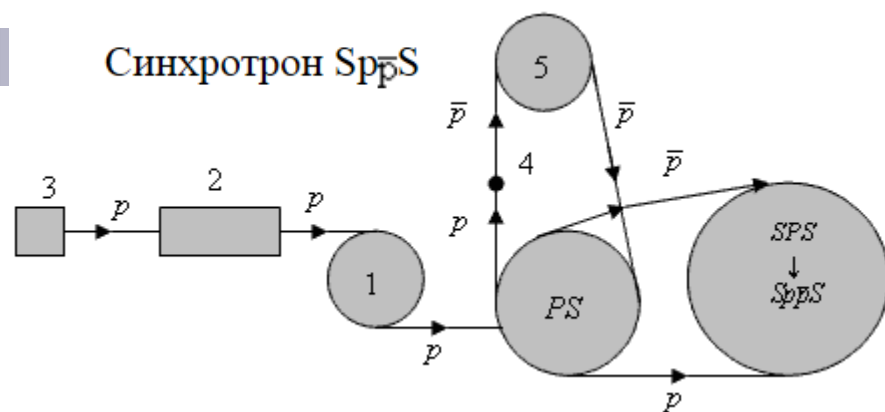
Блок-схема ускорительного комплекса $Spp\bar{S}$ (не в масштабе).

$Spp\bar{S}$ – основное кольцо протон-антипротонного суперсинхротрона на энергию 270 ГэВ.

PS – протон-антипротонный синхротрон на энергию 26 ГэВ.

1 – предварительный синхротрон (бустер) на энергию 800 МэВ, 2 – линейный ускоритель протонов на энергию 50 МэВ. 3 – источник ионов, 4 – мишень для получения антипротонов с энергией 3.5 ГэВ. 5 – накопитель антипротонов с энергией 3.5 ГэВ

Синхротрон $Spp\bar{S}$



Характеристики W^\pm - и Z -бозонов

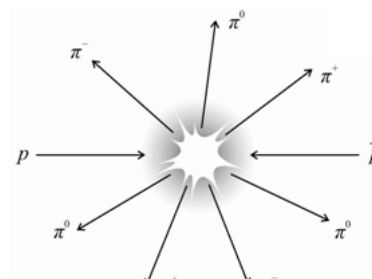
Характеристика	W^\pm -бозон	Z -бозон
Спин J	1	1
Электрический заряд	± 1	0
Масса, ГэВ	80.398 ± 0.025	91.1876 ± 0.0021
Ширина распада, ГэВ	2.141 ± 0.041	2.4952 ± 0.023
Каналы распада, %	$e^+ \nu$ 10.75 ± 0.13	$e^+ e^-$ 3.363 ± 0.004
	$\mu^+ \nu$ 10.57 ± 0.15	$\mu^+ \mu^-$ 3.366 ± 0.007
	$\tau^+ \nu$ 11.25 ± 0.20	$\tau^+ \tau^-$ 3.370 ± 0.08
	адроны 67.60 ± 0.27	$\nu \bar{\nu}$ 20.00 ± 0.06
		адроны 69.91 ± 0.06



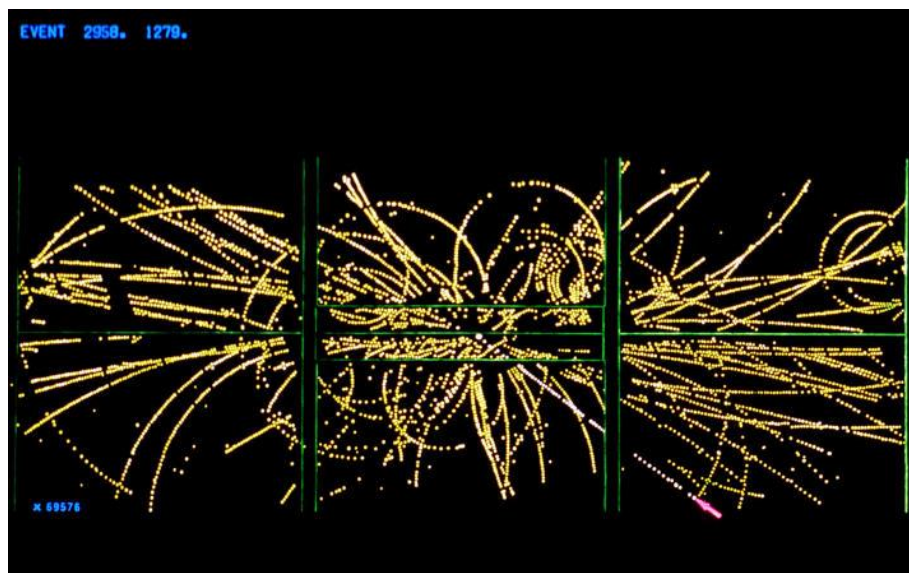
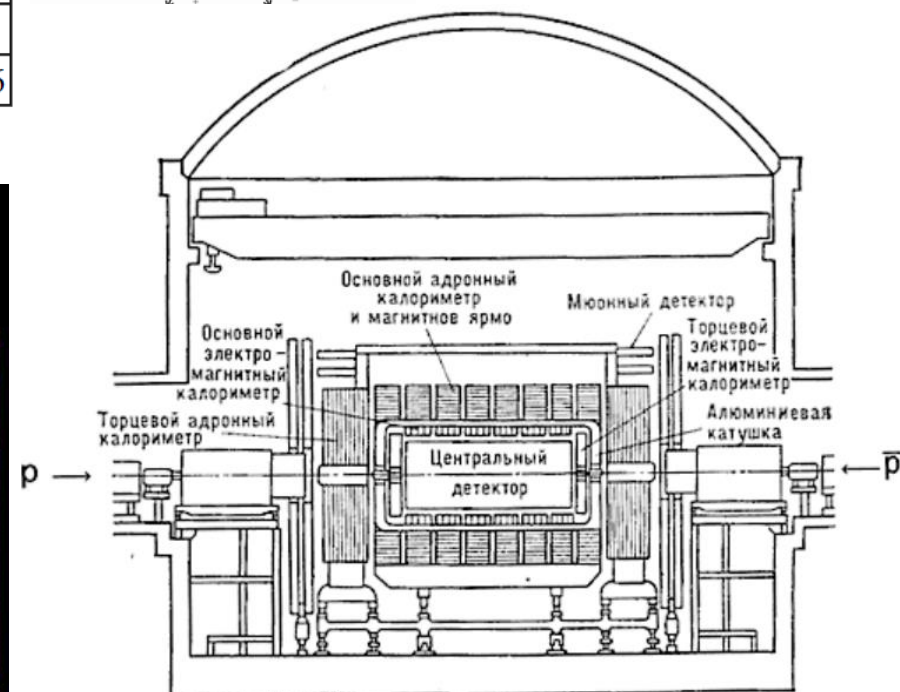
Карло Руббиа
(р. 1934)



Симон ван дер Meer
(1925 – 2011)



Н.п. 1984



Детектор UA1

7. Антиядра

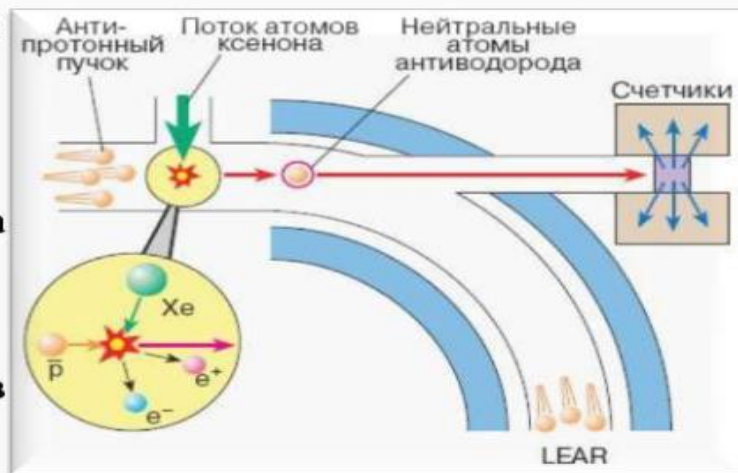
**Первые искусственные античастицы –
ядра антидейтерия,
содержащие антипротон и антинейтрон,
были синтезированы в 1965 году
(Leiderman и др.) в Европейской лаборатории физики
элементарных частиц
(CERN, Женева, Швейцария) и Брукхейвенской
национальной лаборатории (США)**



Установка, с помощью которой обнаружено новое ядро антивещества – ядро антитрития в ИФВЭ. Слева направо: В.И. Рыкалин, В.И. Петрухин

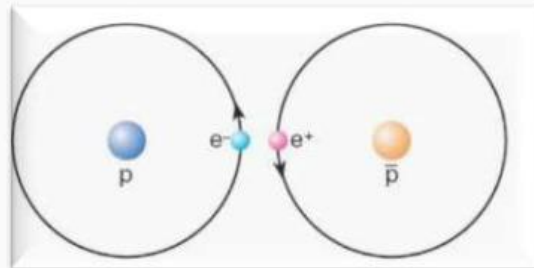
**Затем ядра антигелия-3
(два антипротона и
антинейтрон) и
антитрития (антипротон и
два антинейтрона) были
синтезированы в 1969 году
Ю. Прокошкиным и др. на 70-
ГэВ протонном ускорителе в
Институте физики высоких
энергий (Протвино, СССР)**

**В ЦЕРНе на
низкоэнергетическом
антипротонном кольце
интернациональная команда
под руководством Вальтера
Элерта (W.Oelert)
синтезировала в 1995 году
первые девять атомов
антивещества – антиводорода
в результате столкновений
антипротонов и атомов
ксенона
(антипротоны полетали через
газообразный ксенон
примерно 3 миллиона раз в
секунду)**



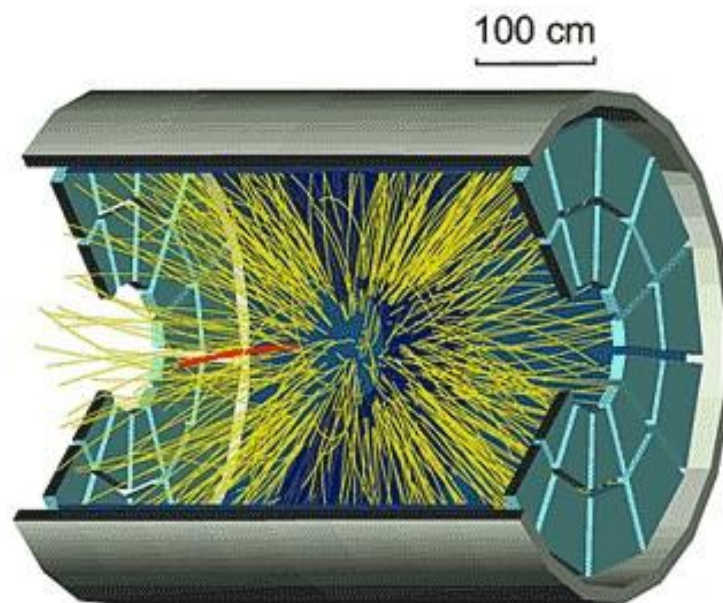
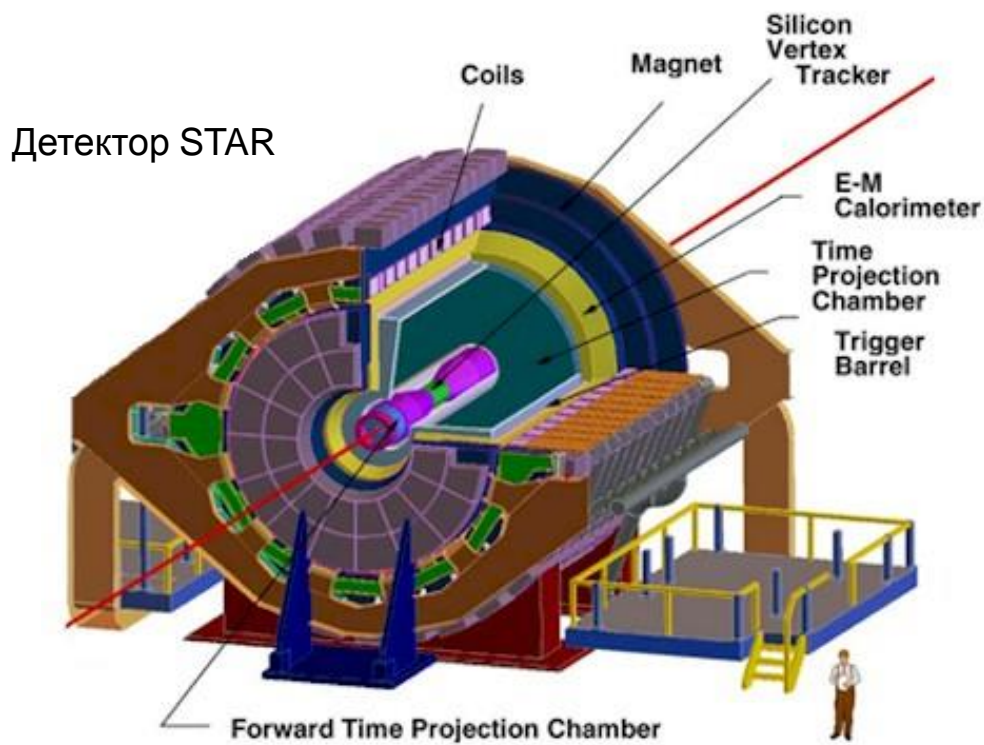
**Схема установки, позволившей
впервые получить атомы
антиводорода**

**В 1996 году в
Национальной
ускорительной Ферми
лаборатории (Fermi
National Accelerator
Laboratory, Batavia, USA)
также были получены
антиатомы водорода.**



Изотоп антигелия-3 впервые наблюдался в 1970 году группой Ю. Д. Прокошкина на протонном синхротроне У-70 в ИФВЭ

Изотоп антигелия-4 был впервые зарегистрирован в 2010 году на ионном коллайдере RHIC (BNL) в столкновениях пучков ионов золота детектором **STAR** (18 событий были определены как рождение ${}^4\overline{\text{He}}$)

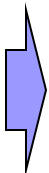


Трехмерное изображение треков, в трековой системе, окруженной секционированной системой времени-пролета.

Энергия столкновения Au+Au в с.ц.м. 100 ГэВ/нуклон

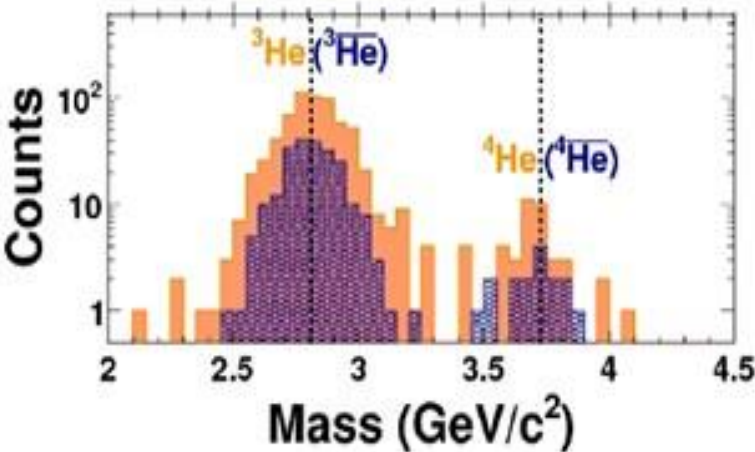
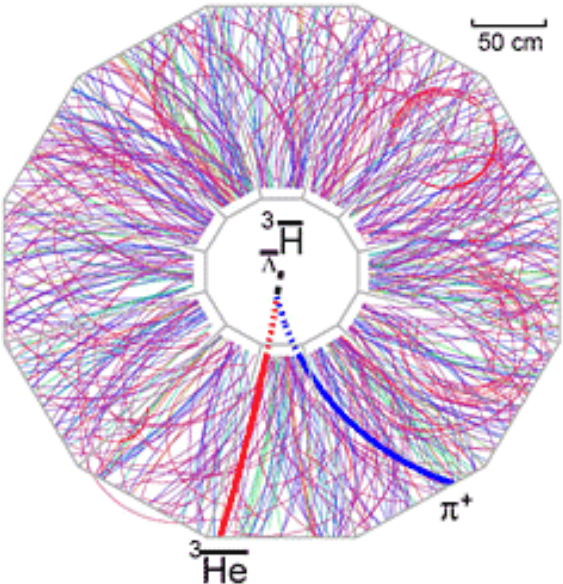
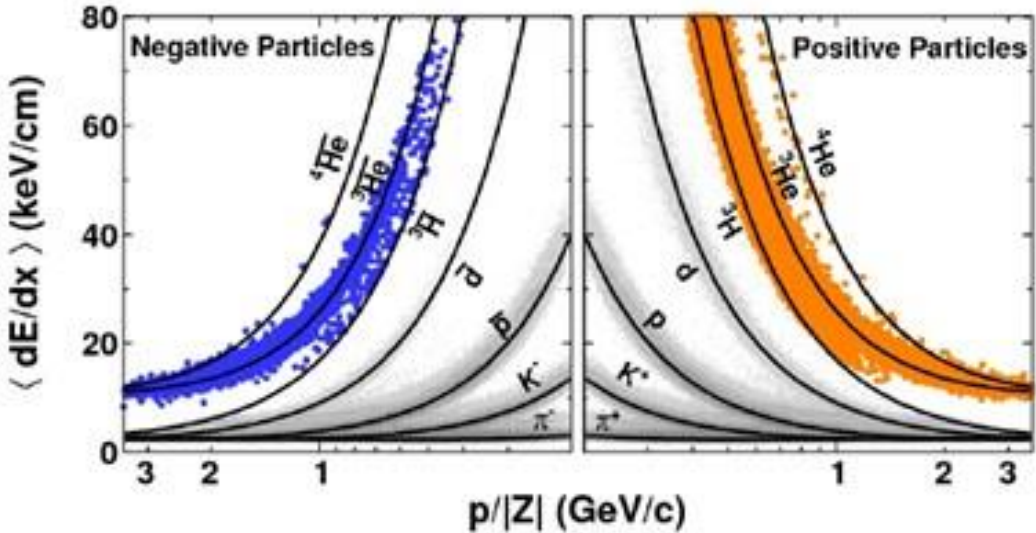
Идентификация частиц

$$p/|Z| = pc/q = BR,$$



где B - индукция магнитного поля, R - ларморовский радиус, а p - проекция импульса на плоскость, перпендикулярную направлению поля B , q - заряд

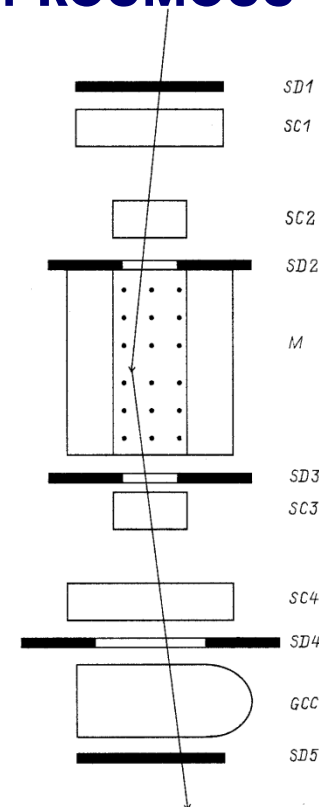
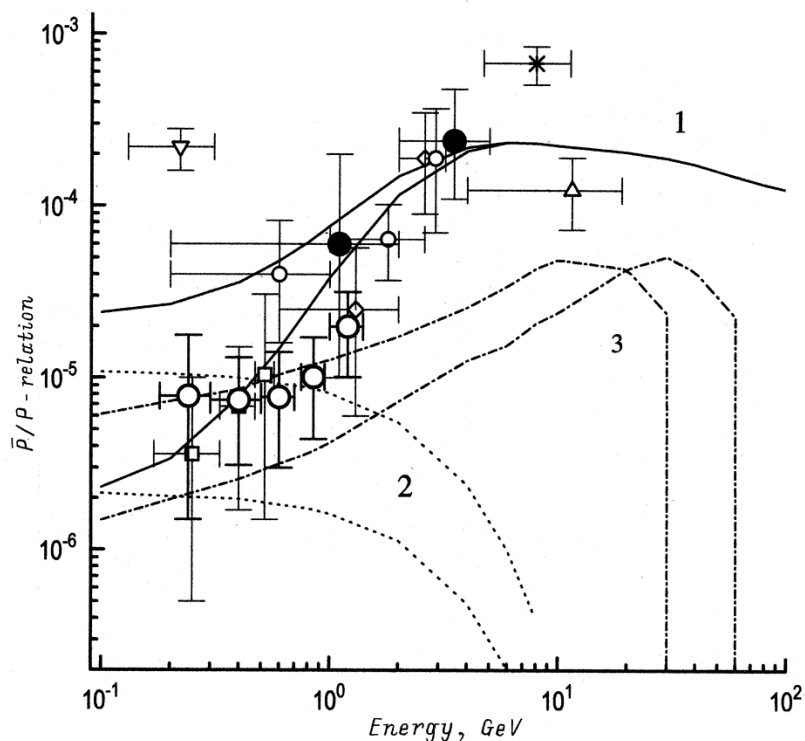
Зависимость $\langle dE/dx \rangle$ от магнитной жесткости $p/|Z|$



Зависимость количества событий от массы детектируемых ядер (антиядер), определенная по времени пролета

8. Поиск античастиц в открытом космосе

Э. Богомолов из Ленинградского Физико-технического института в **1969-1971** гг. используя магнитный спектрометр в ходе стратосферных полётов на аэростатах, **впервые** зарегистрировал **антипротоны** в космических лучах

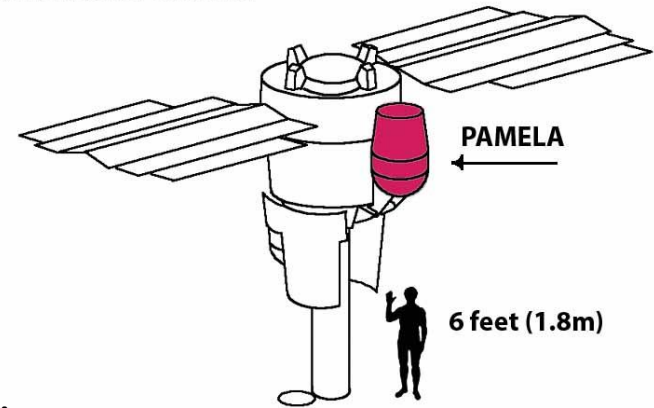


SD1- SD5 – сцинтилляц. детекторы
GCC - газовый черенковский счетчик,
SC1-SC4 – искровые камеры,
M магнит

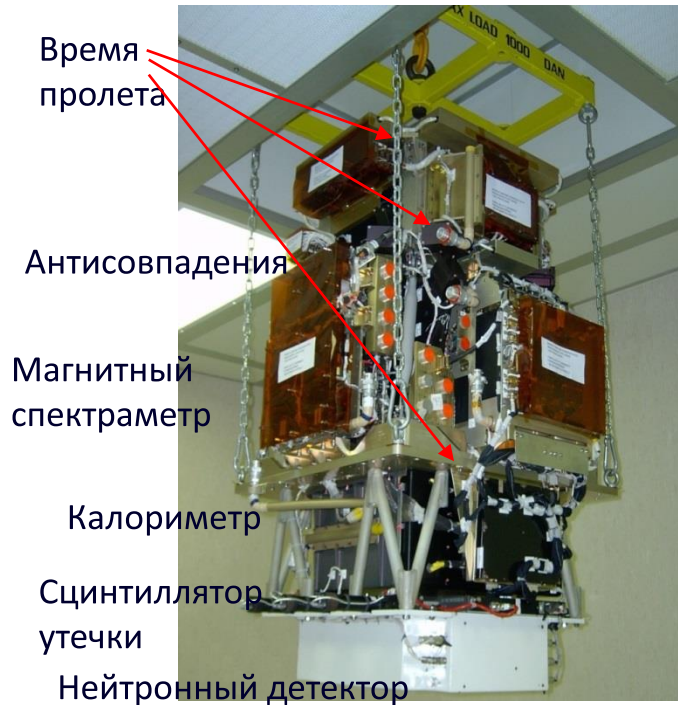
Экспериментальные и расчетные значения отношения потоков антипротонов и протонов в галактических космических лучах. Эксперименты: ∇ — Buffington [7], \bullet — Bogomolov [8,12], $*$ — Golden [14], \square — BESS'93, 94 [10], \circ — IMAX [9], \diamond — CAPRICE [11], \triangle — MASS2 [13], \bigcirc — BESS'95 [15]. Расчеты: 1 — взаимодействия космических лучей с межзвездной материей (период солнечного максимума и минимума) [16]; 2 — испарения первичных черных дыр, $0.2-1 \cdot 10^{-2} pc^{-3} \cdot yr^{-1}$ [17]; 3 — аннигиляции суперсимметричных частиц массой 30–60 GeV в темном гало Галактики [18].



a Payload for Antimatter Matter Exploration
and Light-nuclei Astrophysics



Магнитный спектрометр PAMELA на
ИСЗ РЕСУРС ДК-1 (с 15.06.2006)



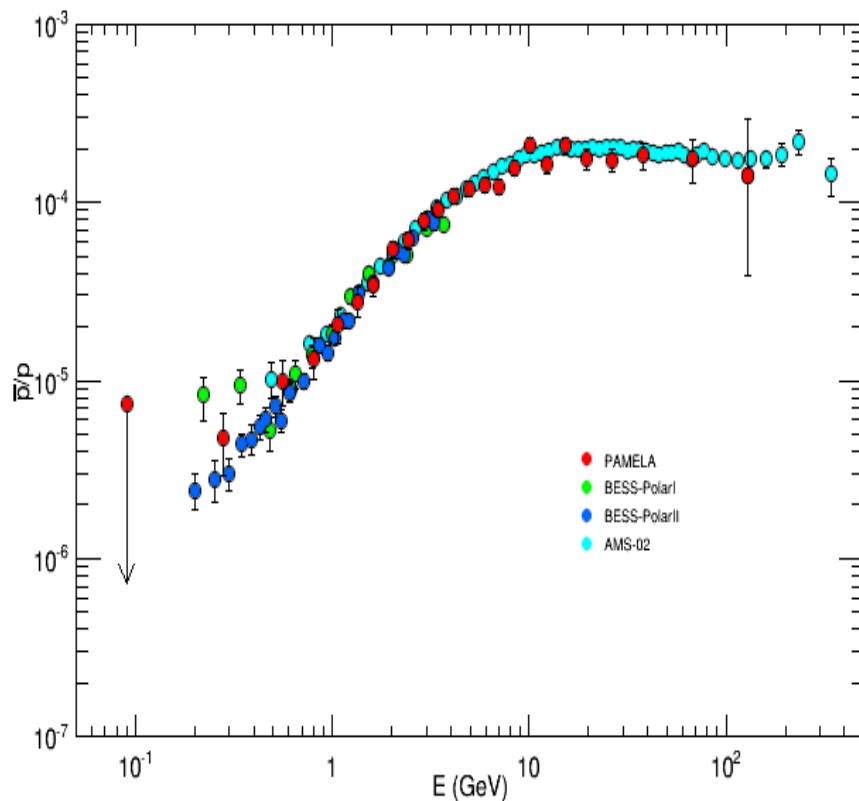
Научные задачи:

- Поиск антиматерии
- Изучение природы темной материи
- Изучение генерации и распространения космических лучей
- Изучение солнечной физики и солнечной модуляции
- Изучение земной магнитосферы
- Изучение спектра электронов (локальные источники)

Параметры установки:

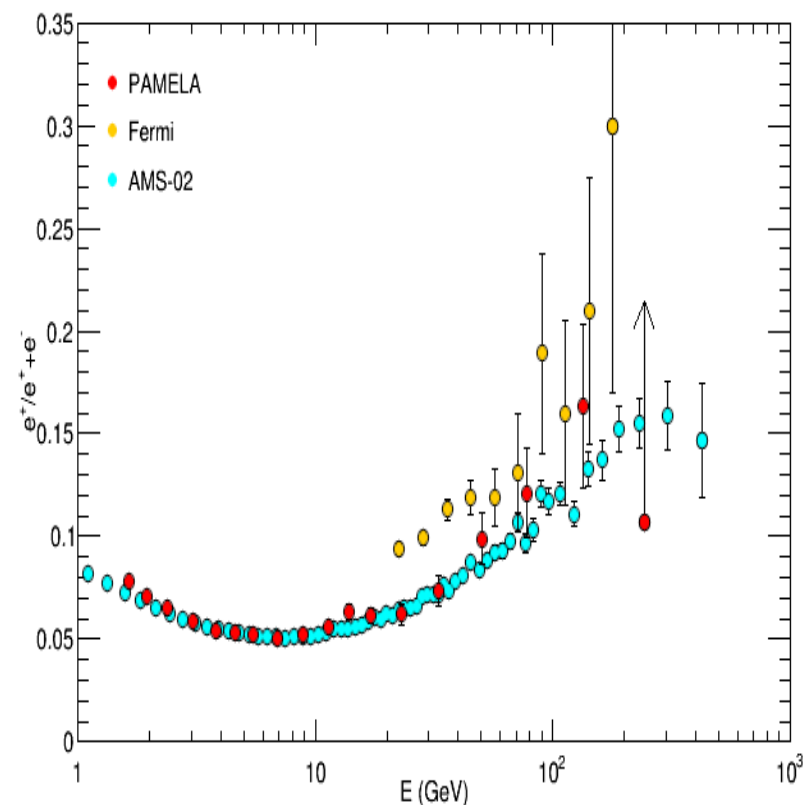
- Геометрический фактор $21.5 \text{ см}^2\text{ср}$;
- Пространственное разрешение в проекции вдоль маг. поля 3 мкм;
- Магнитное поле 0,43 Тл;
- Временное разрешение $\sim 200 \text{ пс}$;
- Толщина калориметра (W) $50 \text{ г/см}^2 = 16X_0$;
- Энергопотребление 355 Вт;
- Габариты 90 x 90 x 125 см;
- Масса 470 кг.

Антипротоны



ВЫВОД №1: В ближнем космическом пространстве отсутствует сколько-нибудь заметное количество антивещества. Однако при больших энергиях есть избыток – это результат вторичных взаимодействий

Позитроны



ВЫВОД №2: Аномальный позитронный эффект PAMELA может быть связан с (1) аннигиляцией тёмной материи (2) нестабильностью вакуума



Вместо заключения:

If we accept the view of complete symmetry between positive and negative electric charge so far as concerns the fundamental laws of Nature, we must regard it rather as an accident that the Earth (and presumably the whole Solar system), contains a preponderance of negative electrons and positive protons.

PAUL A. M. DIRAC
Theory of electrons and positrons
Nobel Lecture, December 12, 1933

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Глава XVII.
2. Б. С. Ишханов, Э. И. Кэбин. АНТИМАТЕРИЯ.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/antimatter/index.html>
3. Ядерная физика в Интернете. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
4. П.А.М. Дирак. Воспоминания о необычайной эпохе **УФН 153** (1987) 105–134