



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»*

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики

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

А.И.Болоздыня

Введение в ядерную физику

Лекция №10

Антиматерия

Лекция №10

Антиматерия

- 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. Оказалось, что 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).

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

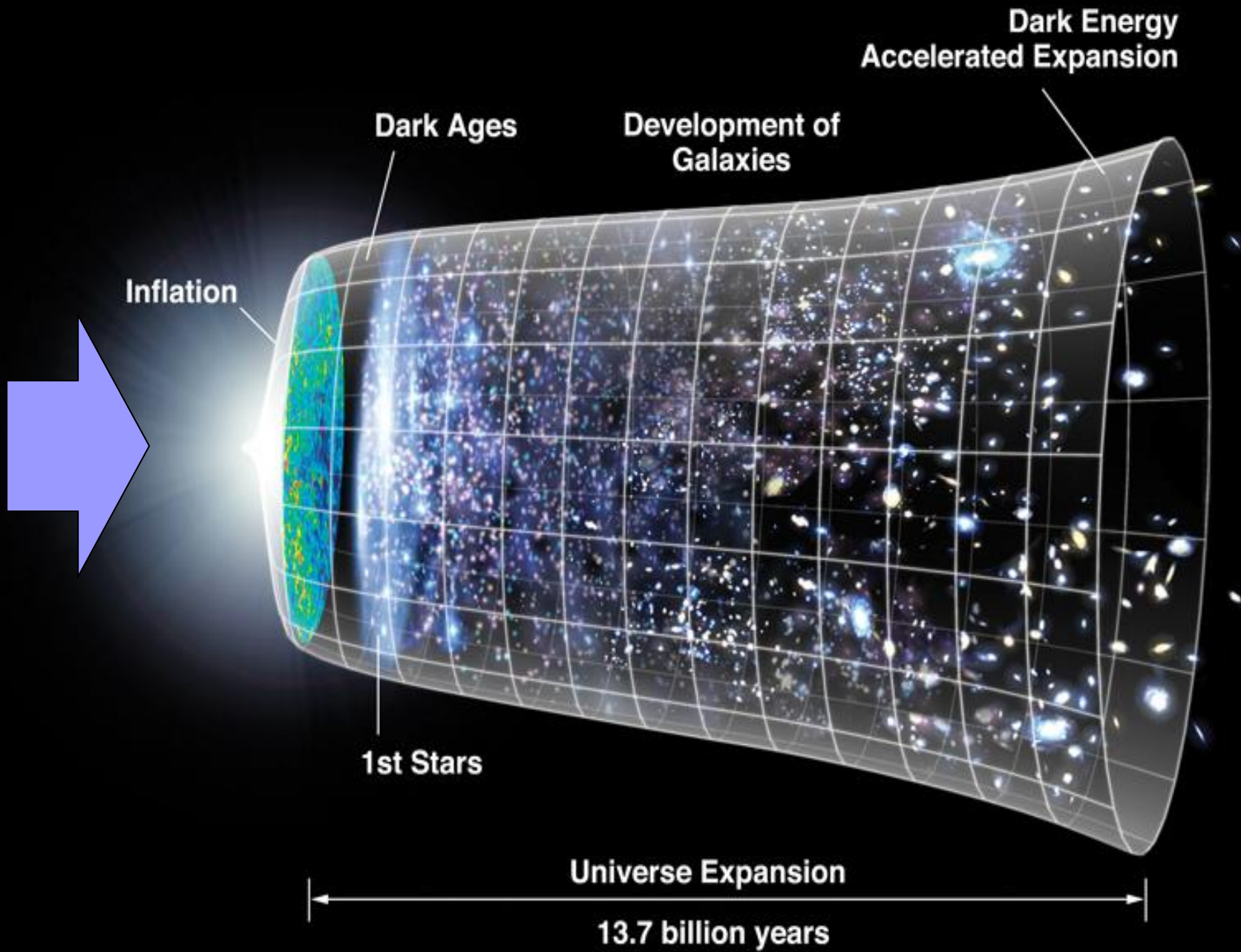
Решение уравнения Дирака для свободной частицы показывает, что каждому значению импульса частицы **p** соответствуют два значения энергии

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

Вопрос: каков физический смысл состояний с отрицательной энергией?

Ответ: у каждой частицы должна быть античастица  два следствия:

- 1) из состояния с нулевыми квантовыми числами частица и античастица рождаются **парой**;
- 2) частица и античастица при взаимодействии **аннигилируют** в кванты поля, которые в свою очередь могут рождать пары частица-античастица.

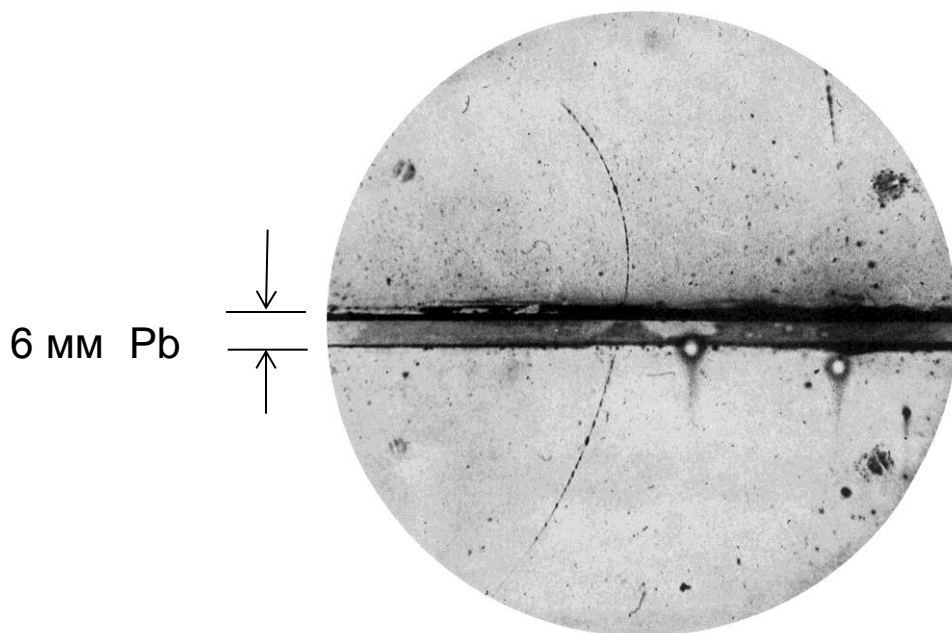


2. Позитрон

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

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

Позитрон был открыт в 1932 году американским физиком Карлом Андерсоном (Н.п.1936) при наблюдении рождения пары электрон-позитрон космическим излучением в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле (впервые предложено Д. Скобельцыным в 1923 г.)

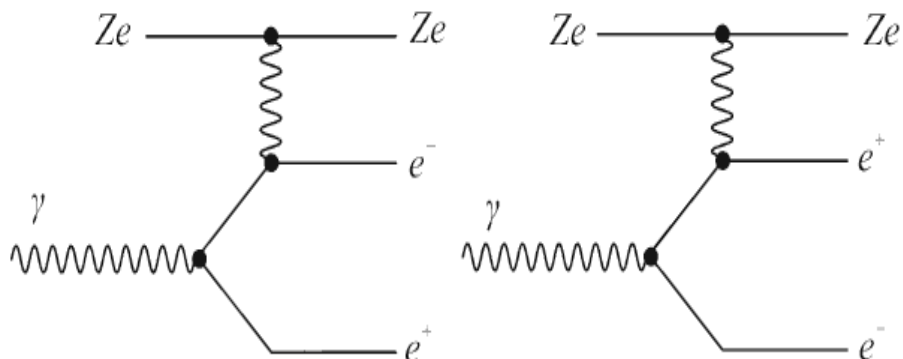
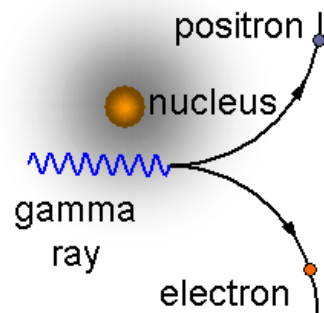


Пол Дирак
(1902–1984)
Н.п.1933



Карл
Андерсон
(1905–1991)
Н.п.1936

Рождение пар



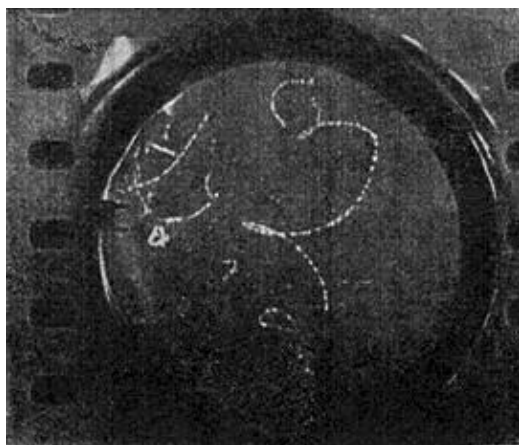
Электрон-позитронные пары могут рождаться γ -квантами достаточно больших энергий в **кулоновском поле атомного ядра**.

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

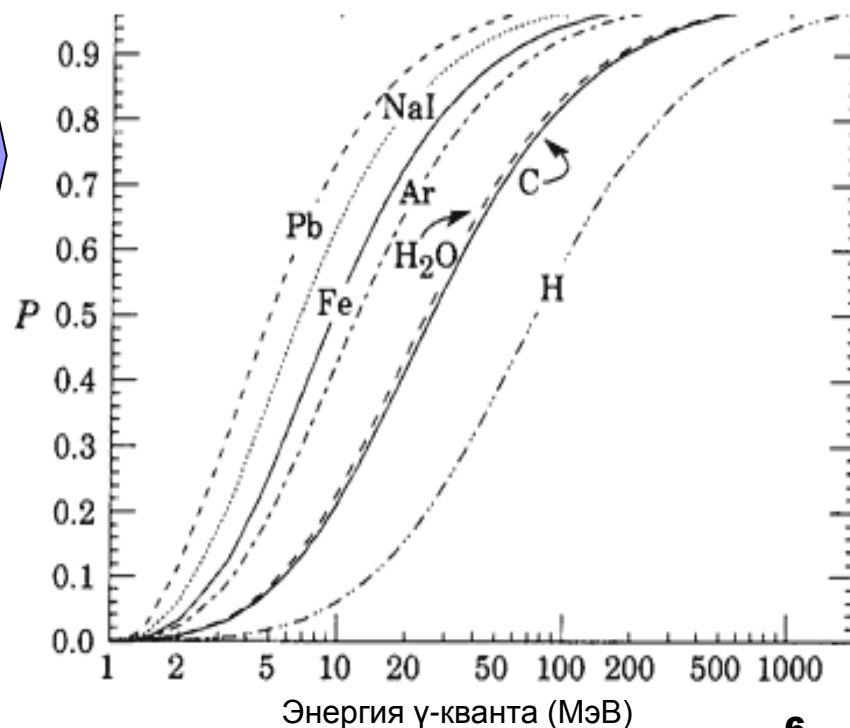
Зависимость вероятности образования электрон-позитронной пары в кулоновском поле атомного ядра от энергии фотона.



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



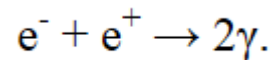
Рождение пары электрон-позитрон в камере Вильсона, заполненной криптоном



Аннигиляция

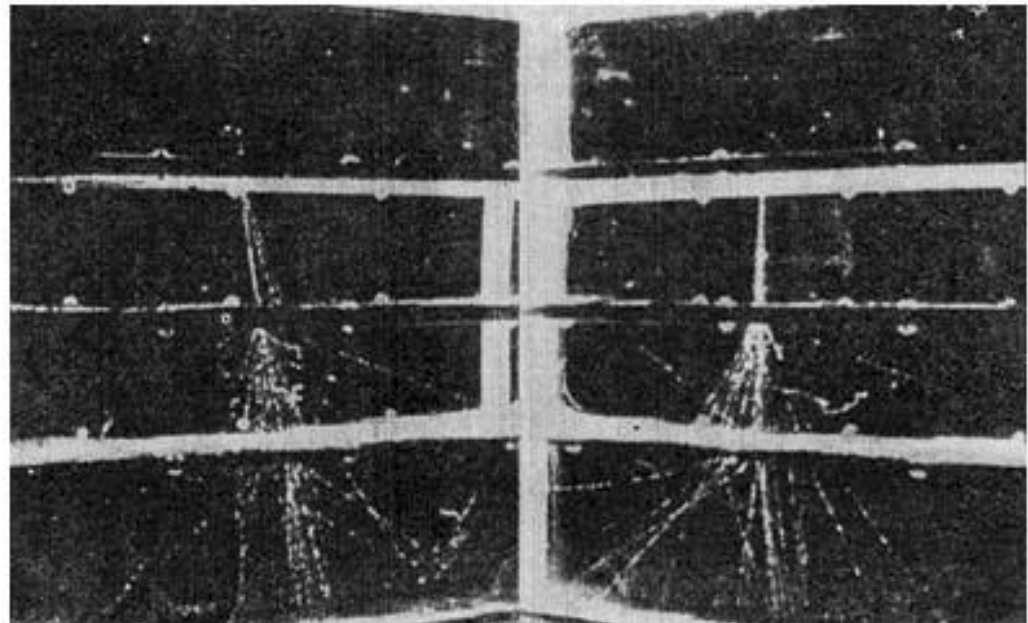
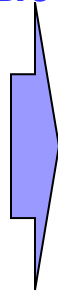
Позитрон был первой обнаруженной частицей из целого класса частиц, которые получили название **античастицы**.

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

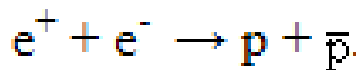


При взаимодействии частиц высокой энергии с веществом процессы рождения и аннигиляции частиц и античастиц приводят к рождению большого количества вторичных частиц \Rightarrow возникают **каскадные ливни**

Развитие ливня в свинцовых пластинах, помещённых в камеру Вильсона

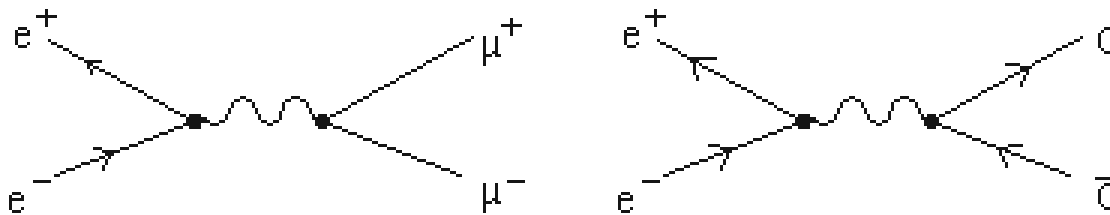


При достаточно высокой энергии аннигилирующих частиц возможно их превращение в более тяжёлые частицы, например,

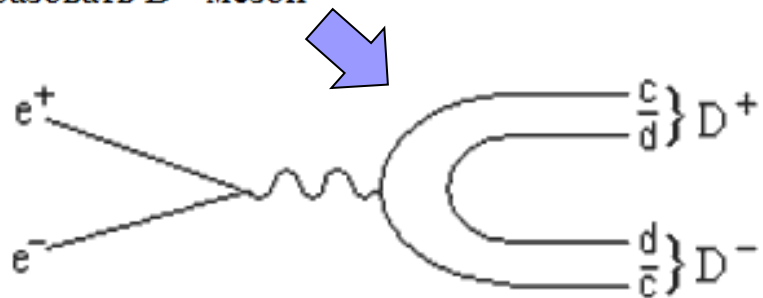
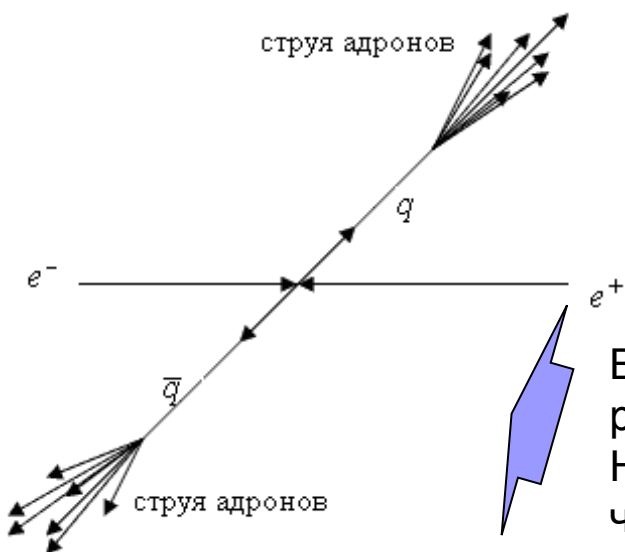


В результате аннигиляции электрона и позитрона рождается виртуальный фотон.

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



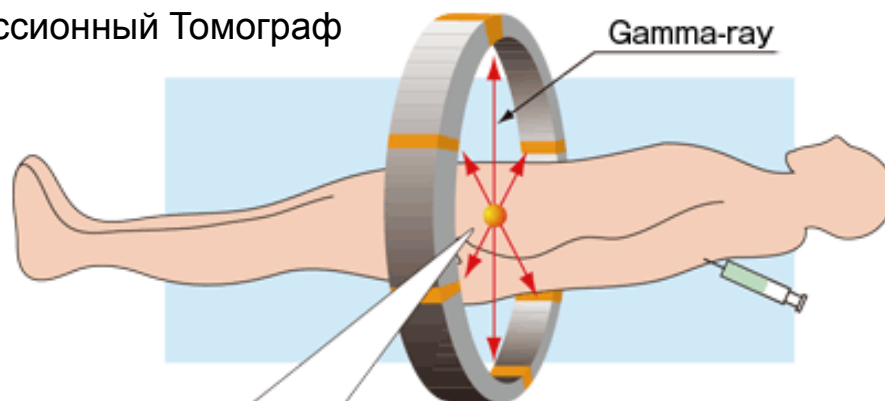
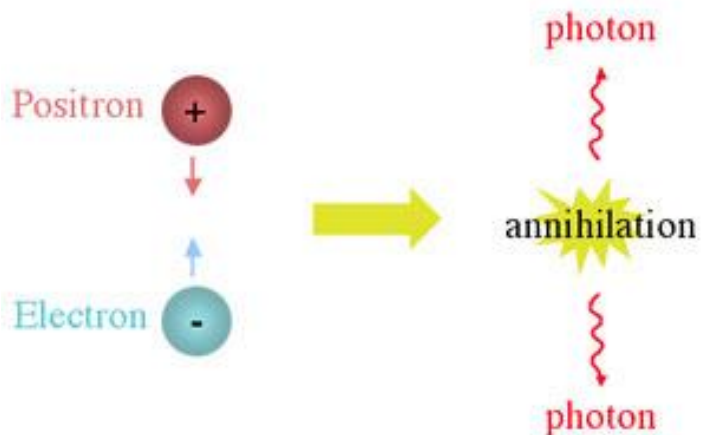
Т.к. кварки являются цветными объектами и не могут существовать в свободном состоянии, то если образовалась пара $c\bar{c}$ -кварков, c -кварк может, подхватив из вакуума \bar{d} -кварк, образовать D^+ -мезон, а \bar{c} -кварк, подхватив из вакуума d -кварк, может образовать D^- -мезон



В коллайдерах рождение пары кварков может приводить к рождению интенсивных *адронных струй*.
Наблюдение адронных струй – одно из доказательств того, что кварки реально существуют.

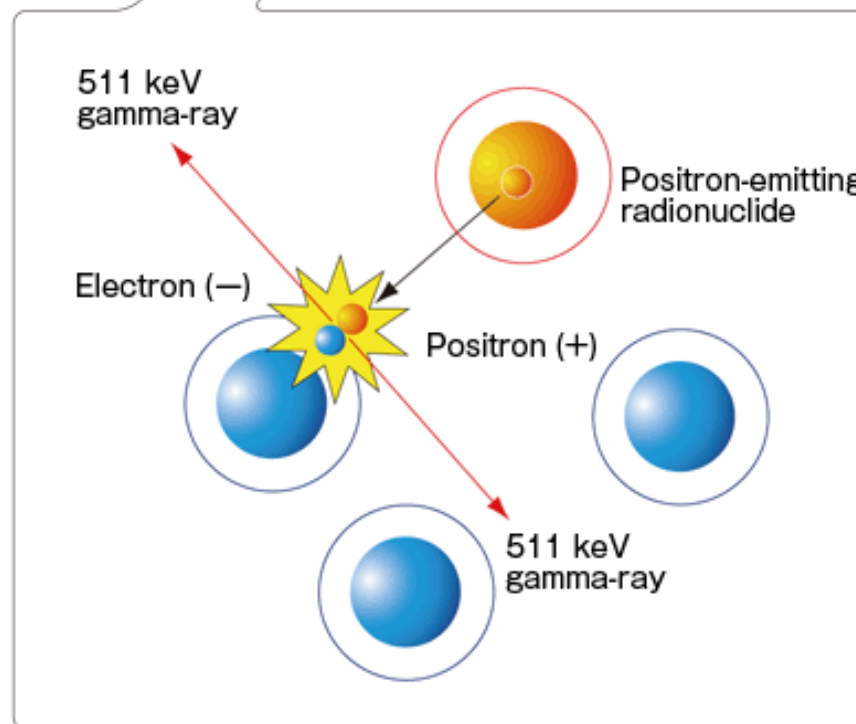
Использование аннигиляции позитронов от изотопов в ядерной медицине:

ПЭТ: Позитронно-Эмиссионный Томограф

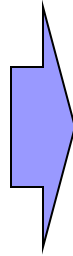


Positron-emitting radionuclide and half-life

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

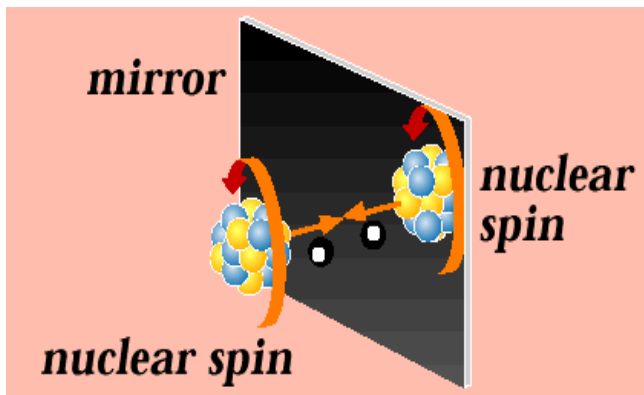
Зарядовое сопряжение C переводит частицу в античастицу, оставляя неизменными пространственные переменные x , импульс p и момент импульса J :

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

Истинно нейтральные частицы (частица \equiv античастица) : γ - квант, π^0 - мезон

Зарядовая чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и не сохраняется в слабых взаимодействиях (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* **11**

Характеристики частиц и античастиц

Характеристика		Частица	Античастица
Масса		M	
Спин		J	
Чётность	фермион	+(-)1	-(+)-1
	бозон	+(-)1	+(-)1
Электрический заряд		+(-)Q	-(+)-Q
Магнитный момент		+(-)μ	-(+)-μ
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)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

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

Эмилио Сегре
(1905 – 1989)



4. Антипротон

Антипротон — античастица по отношению к протону имеет отрицательный электрический заряд и отрицательное барионное число, прочие свойства совпадают со свойствами протона.

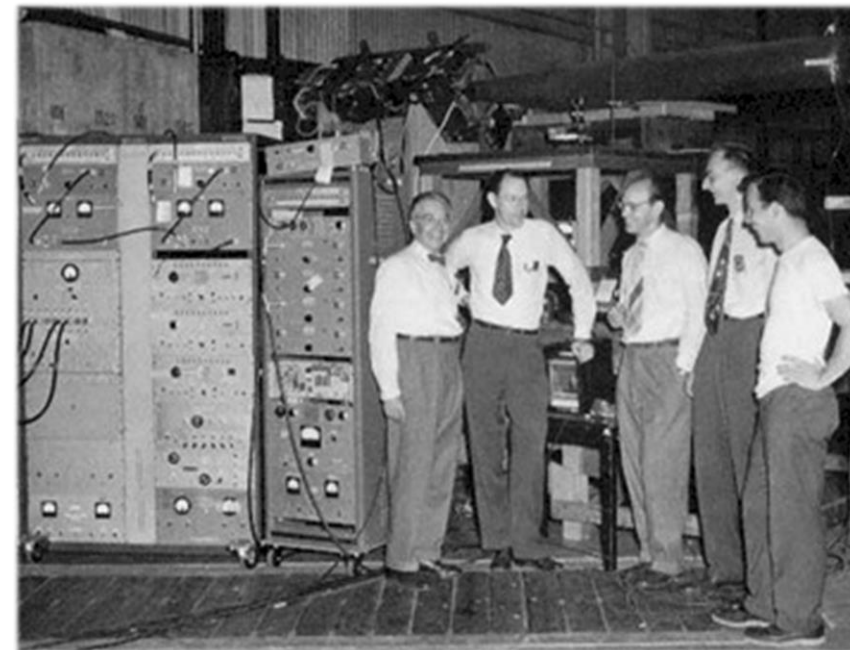
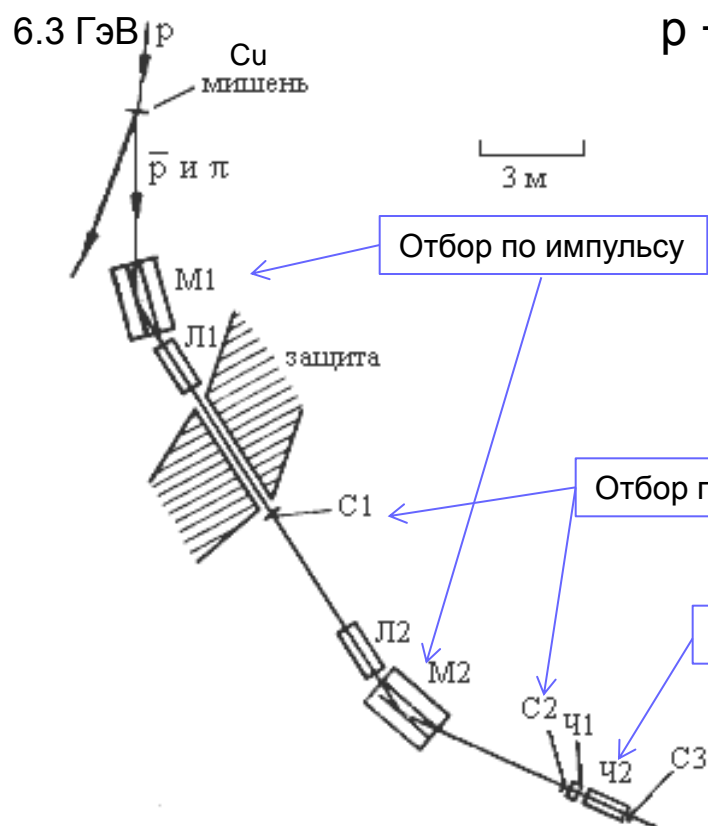


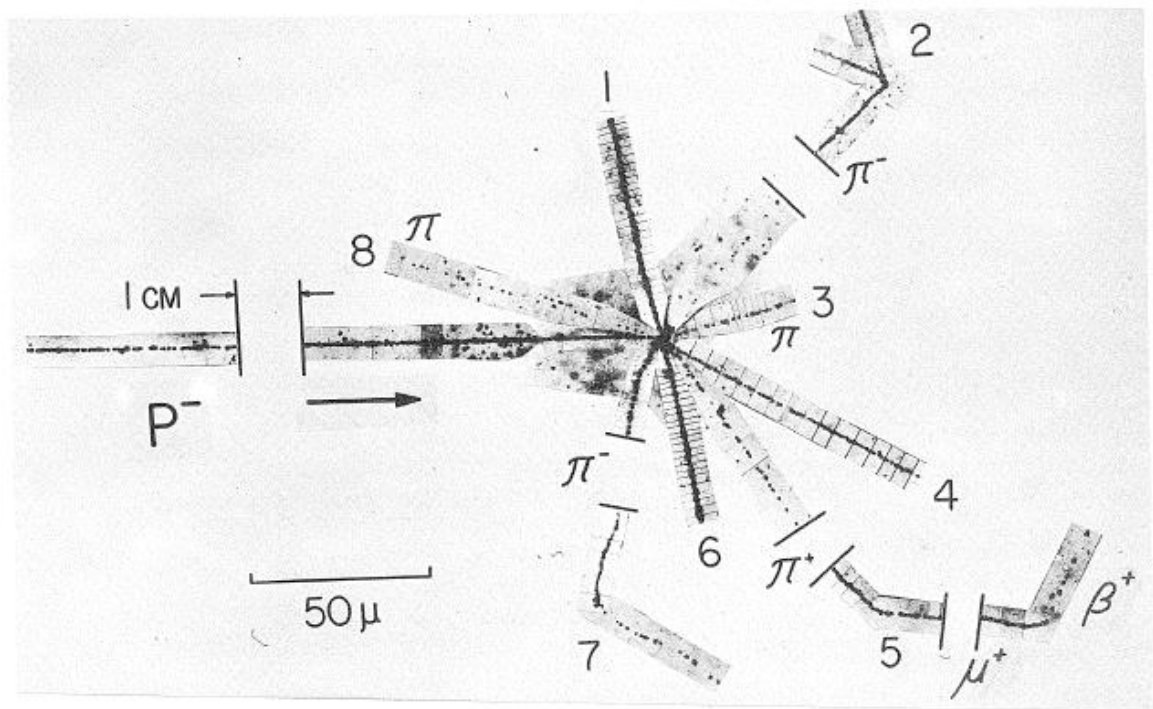
Предсказан П.Дираком в Нобелевской речи в 1933 г.

Открыт в 1955 году Э.Сегрэ и О.Чемберленом (Н.п.1959) на специально построенном ускорителе протонов в Калифорнийском университете в Беркли



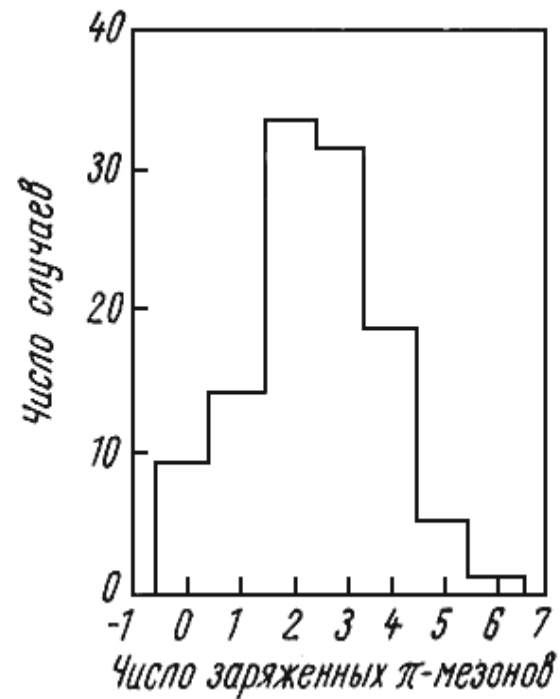
Овен
Чемберлен
(1920 – 2006)



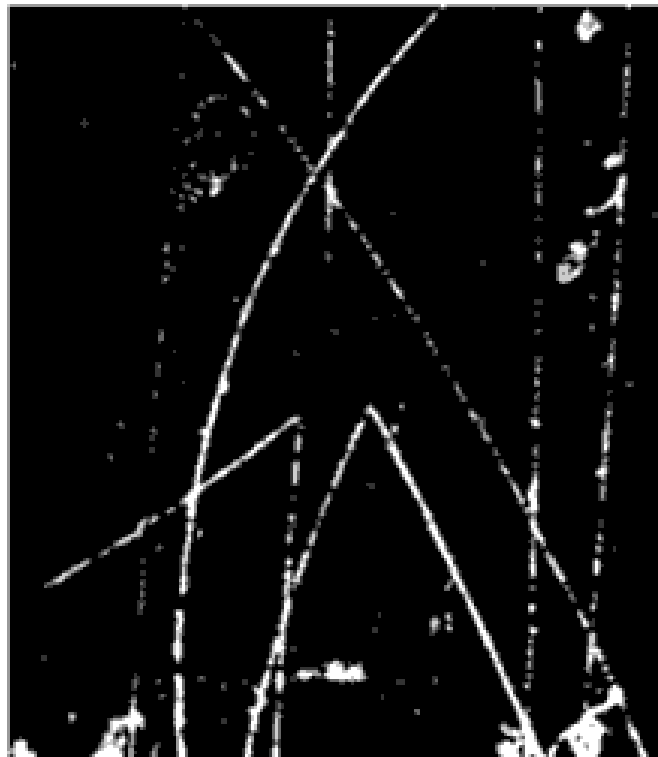
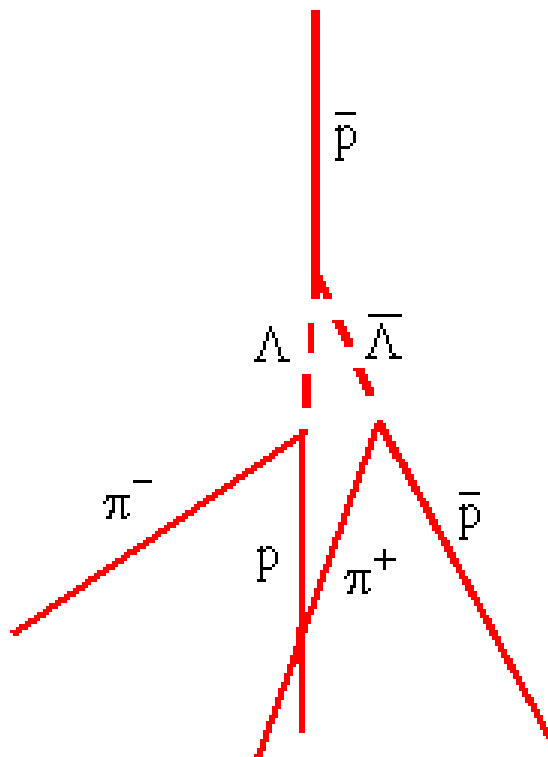
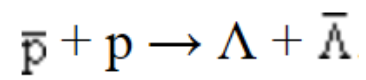


Аннигиляция антипротона с протоном в ядерной эмульсии в эксперименте Г. Гольдхабера (1955 LBNL)

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



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



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

Протоний

При столкновении медленного *антипротона с атомом водорода* может образоваться *водородоподобный атом*, состоящий из протона и антипротона - **протоний**.

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

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

где $R_y = 13.60569253$ эВ – постоянная Ридберга.

Энергия связи основного состояния атома протония ($n = 1$) **-12.47 кэВ**.

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

Протоний аннигилирует в π -мезоны с их последующим распадом:

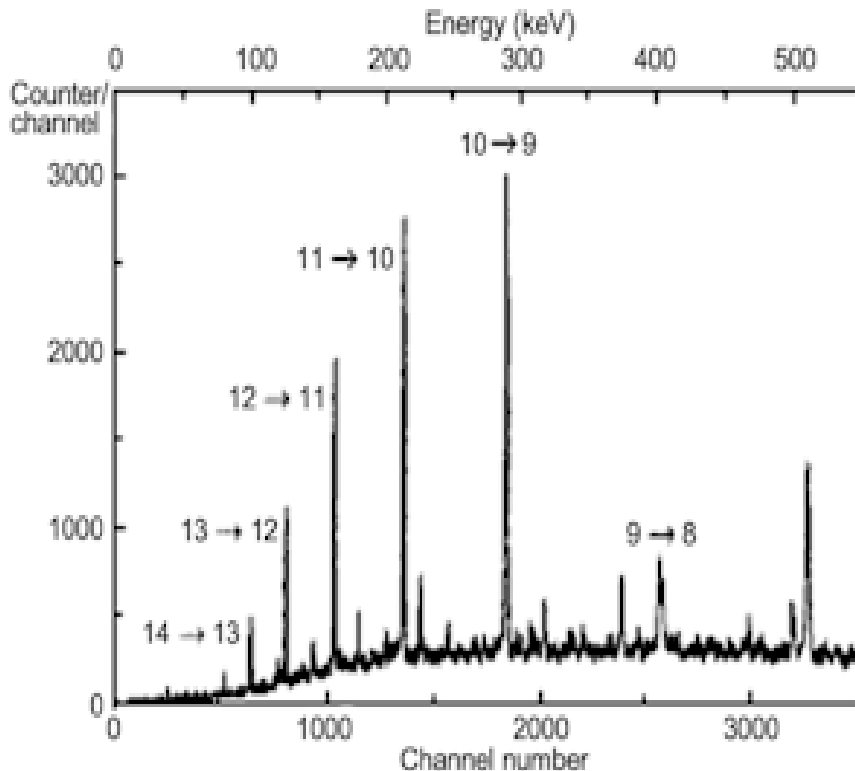
50% энергии уносят нейтрино и антинейтрино, 16% - электроны и позитроны

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.

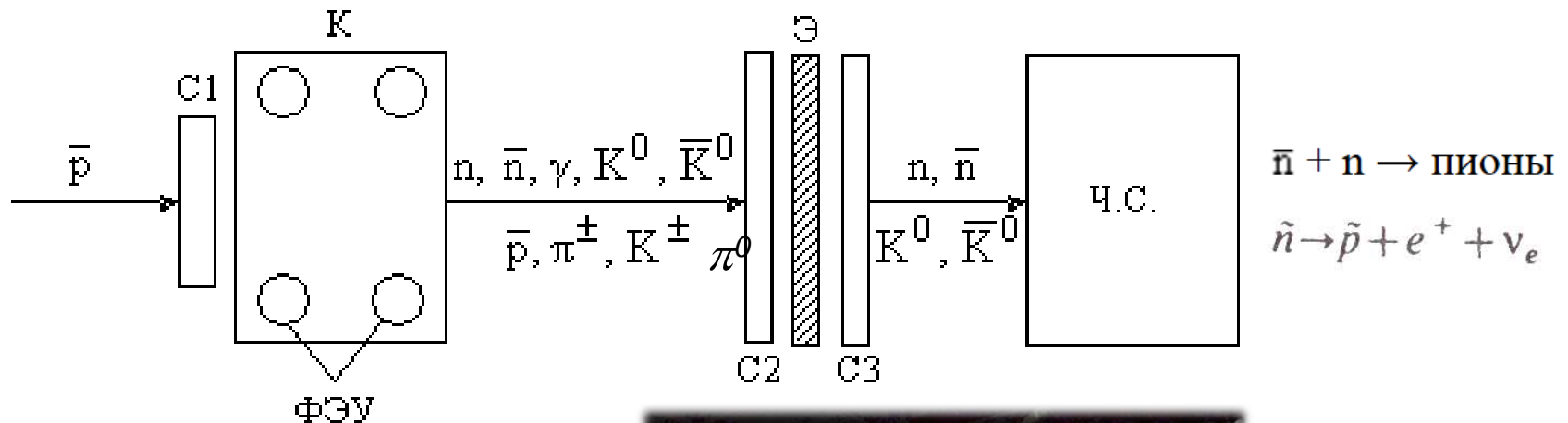
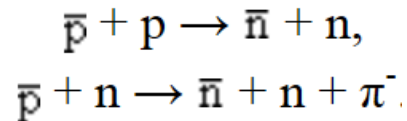
Из-за большой массы антипротонов их орбиты расположены глубоко внутри электронных оболочек и находятся вблизи атомного ядра



Характеристический спектр, возникающий при облучении мишени из ^{176}Yb пучком медленных антипротонов, который свидетельствует об образовании антипротонного атома

5. Антинейтрон

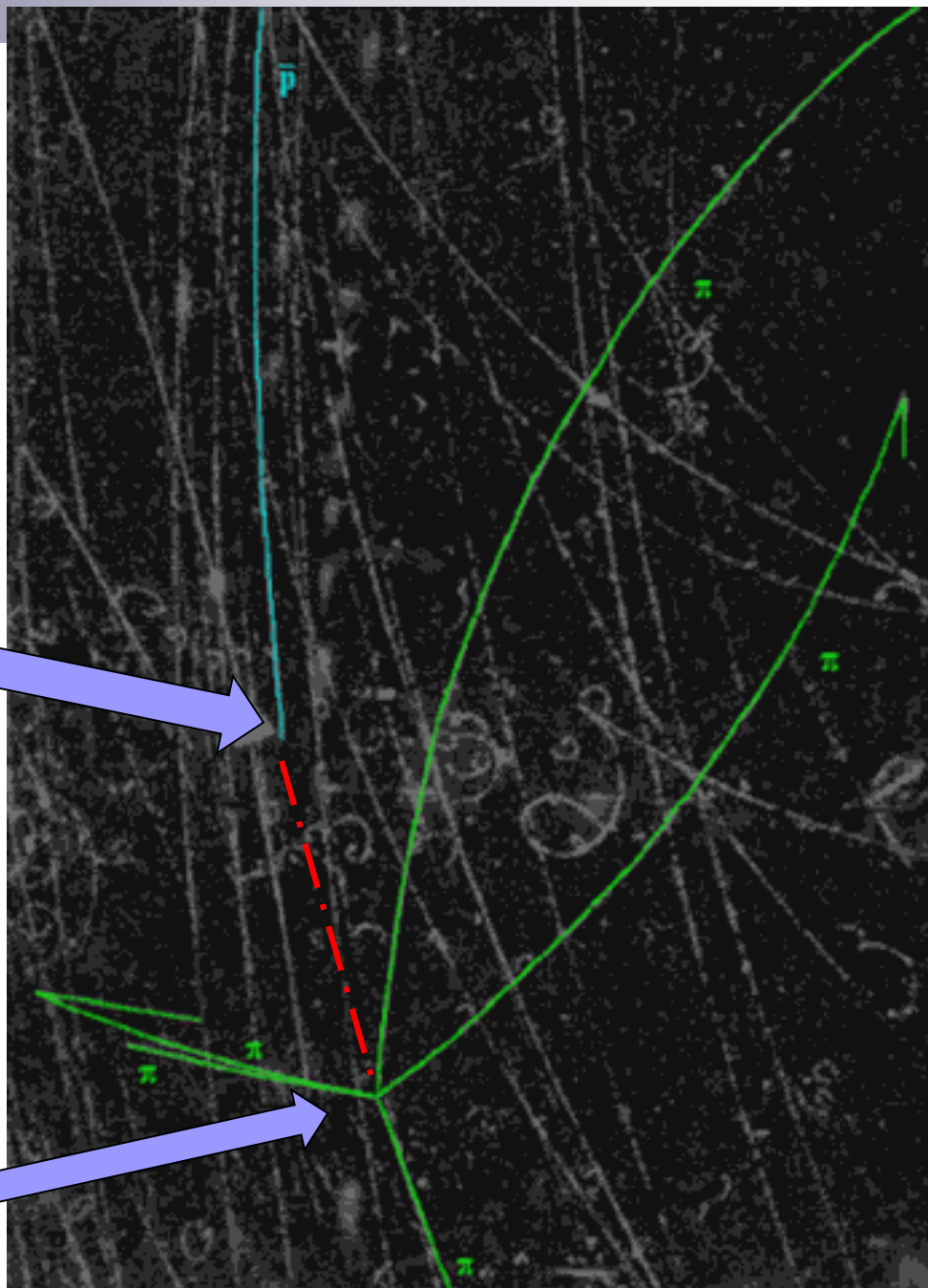
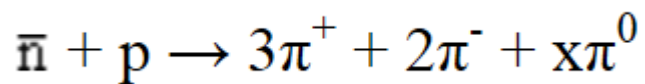
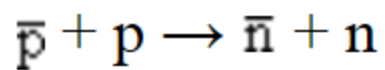
Антинейтрон был открыт в 1956 году в антипротон-протонных столкновениях на ускорителе **Беватрон** в LBNL (Беркли) Б. Корком, Г. Ламбертсоном, О. Пиччони и В. Венцелем.



С1-С3 сцинтилл. счетчики
 К - конвертер (ж. сцинт.)
 Э - свинцовый экран
 ЧС – Черенковский счетчик из свинцового стекла



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



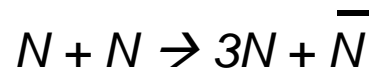
Характеристики нейтрона и антинейтрона

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

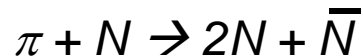
6. Взаимодействие антинуклонов с веществом

Рождение антинуклонов

- Антинуклон рождается нуклоном при пороговой энергии 5,6 ГэВ



- Пионом при пороге 3,6 ГэВ



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

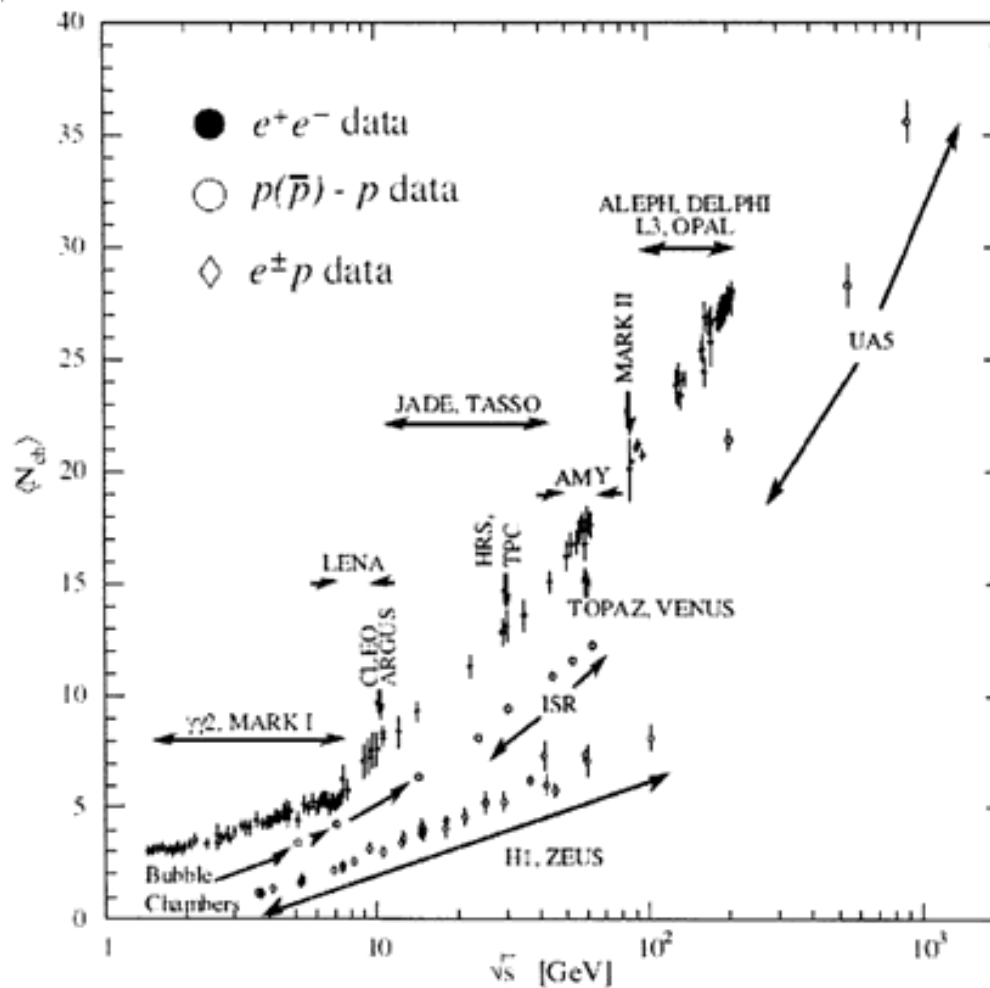
Аннигиляция антинуклонов при низких энергиях

Аннигиляция *за счет разных* барионных зарядов → 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

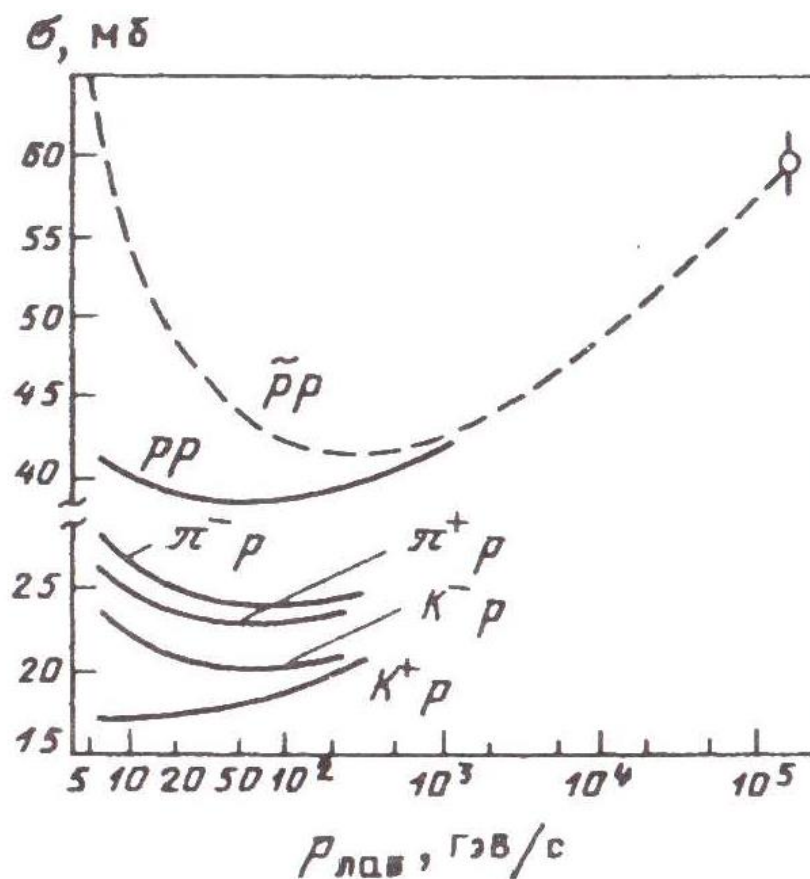


- *Поведение сечений* → теорема Померанчука (1958):

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



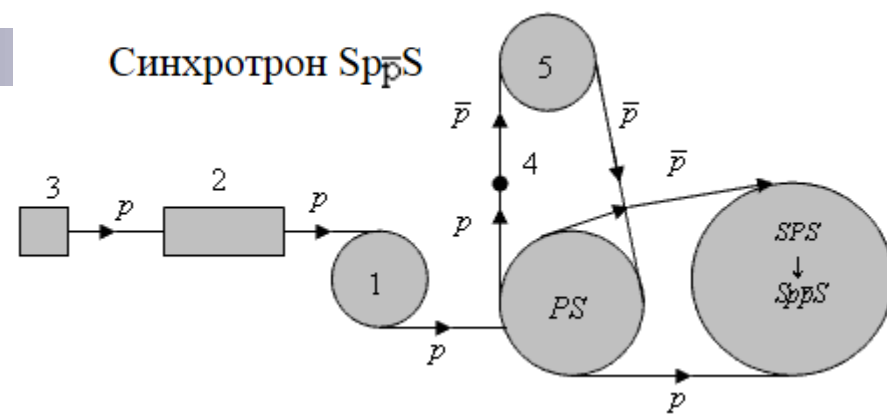
Исаак Яковлевич
Померанчук
(1913-1966)



- 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.)

Синхротрон $Sp\bar{p}S$



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

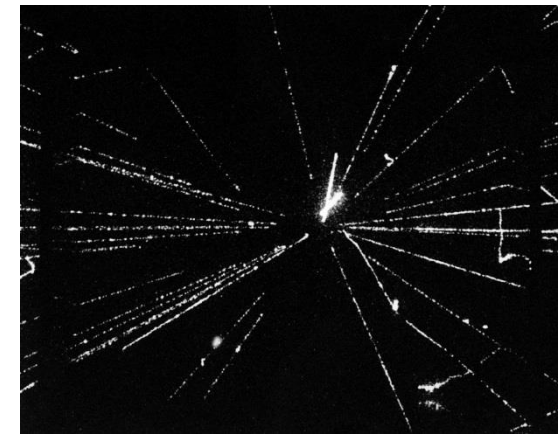
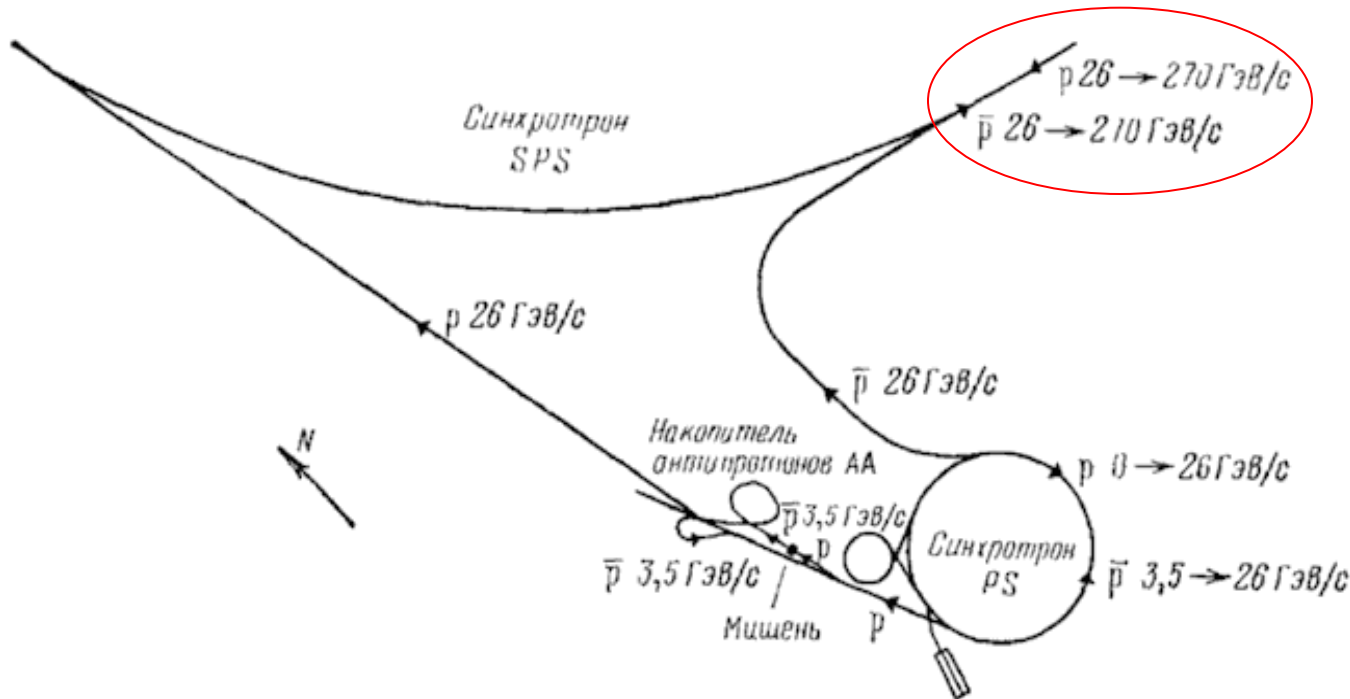
$Sp\bar{p}S$ – основное кольцо протон-антипротонного суперсинхротрона на энергию 270 ГэВ.

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



Характеристики W^\pm - и Z -бозонов

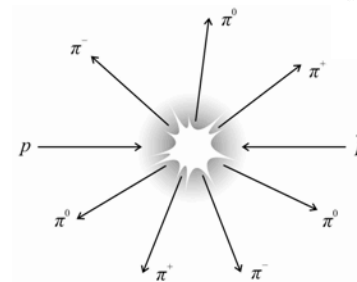
Характеристика	W^\pm -бозон	Z -бозон
Спин J	1	1
Электрический заряд	± 1	0
Масса, ГэВ	80.398 ± 0.025	91.1876 ± 0.0021
Ширина распада, ГэВ	2.141 ± 0.041	2.4952 ± 0.023
Каналы распада, %	$e^+ \nu$ 10.75 ± 0.13	$e^+ e^-$ 3.363 ± 0.004
	$\mu^+ \nu$ 10.57 ± 0.15	$\mu^+ \mu^-$ 3.366 ± 0.007
	$\tau^+ \nu$ 11.25 ± 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



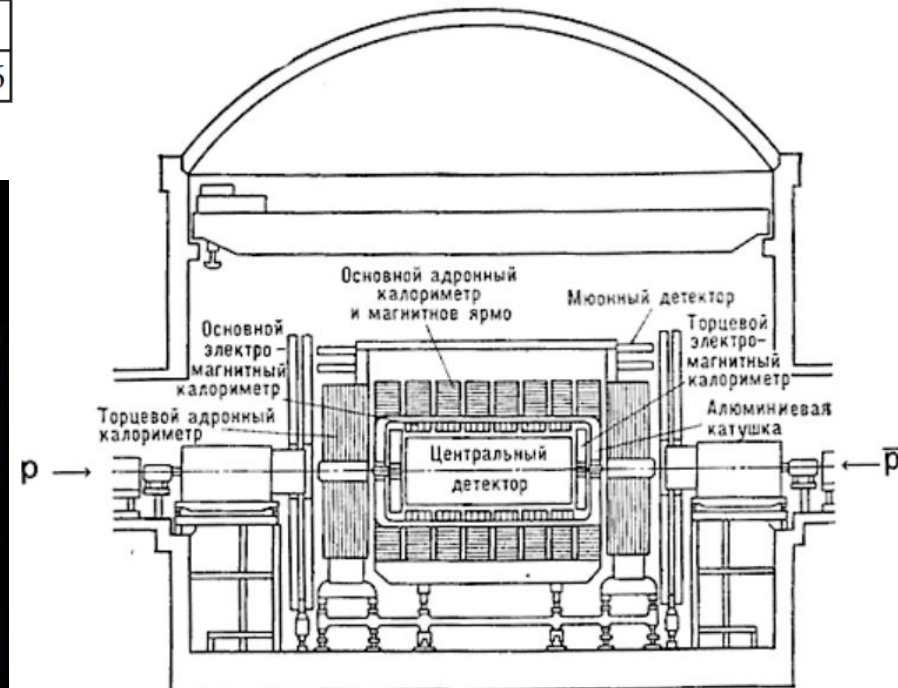
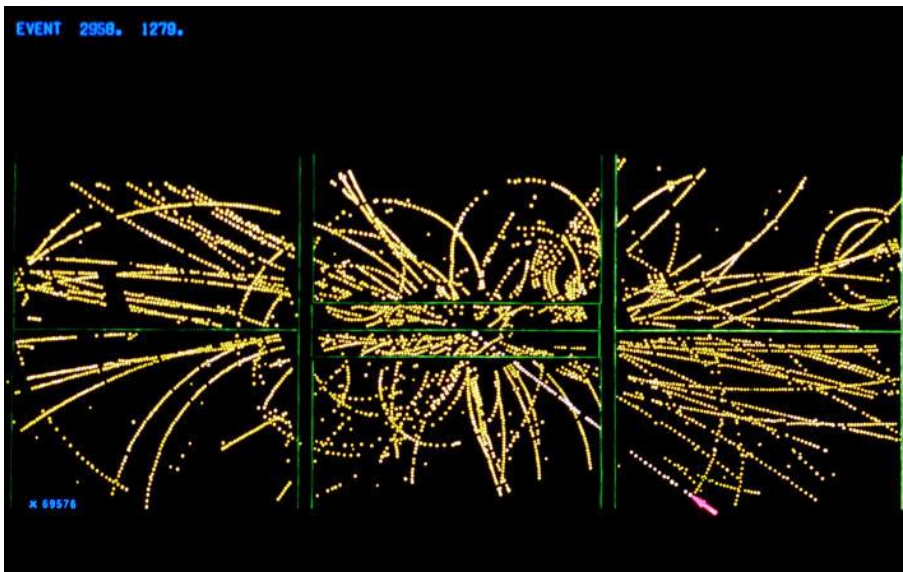
Карло Руббиа
(р. 1934)



Симон ван дер Meer
(1925 – 2011)



Н.п. 1984



Детектор UA1

7. Антиядра

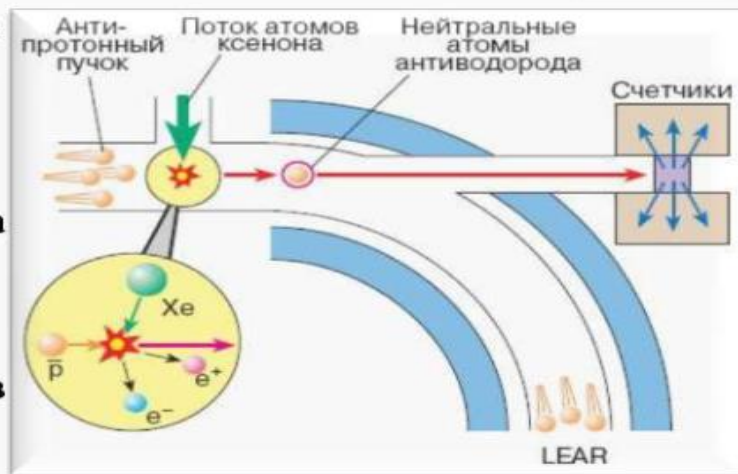
**Первые искусственные античастицы –
ядра антидейтерия,
содержащие антипротон и антинейтрон,
были синтезированы в 1965 году
(Leiderman и др.) в Европейской лаборатории физики
элементарных частиц
(CERN, Женева, Швейцария) и Брукхейвенской
национальной лаборатории (США)**



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

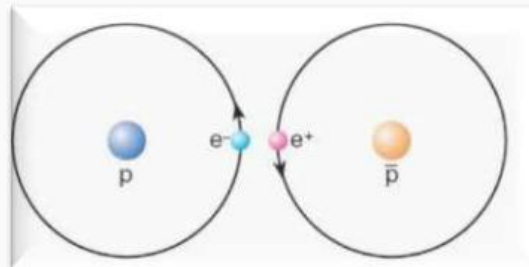
**Затем ядра антигелия-3
(два антипротона и
антинейтрон) и
антитрития (антипротон и
два антинейтрона) были
синтезированы в 1969 году
Ю. Прокошкиным и др. на 70-
ГэВ протонном ускорителе в
Институте физики высоких
энергий (Протвино, СССР)**

**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)**



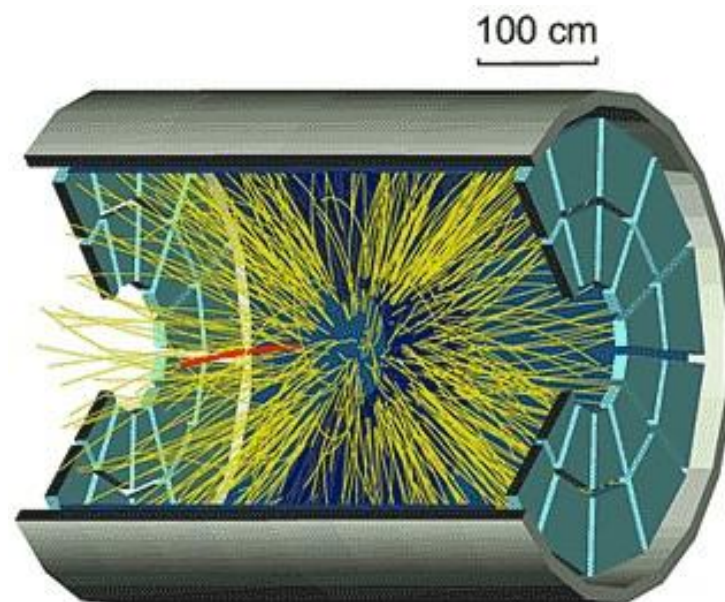
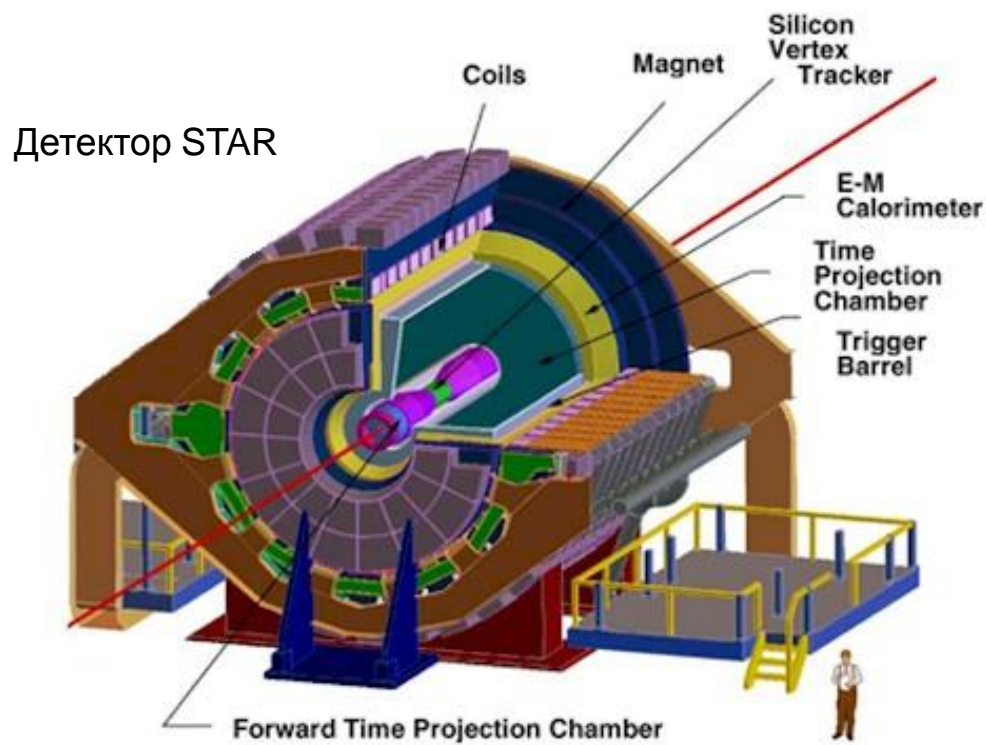
**Схема установки, позволившей
впервые получить атомы
антиводорода**

**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 ${}^4\overline{\text{He}}$)

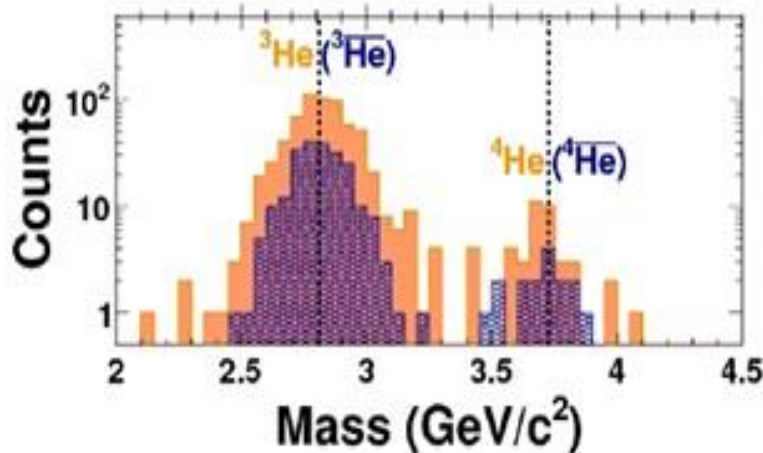
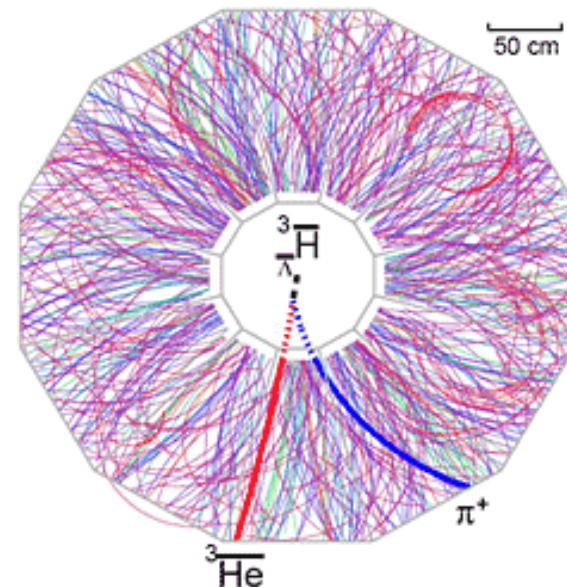
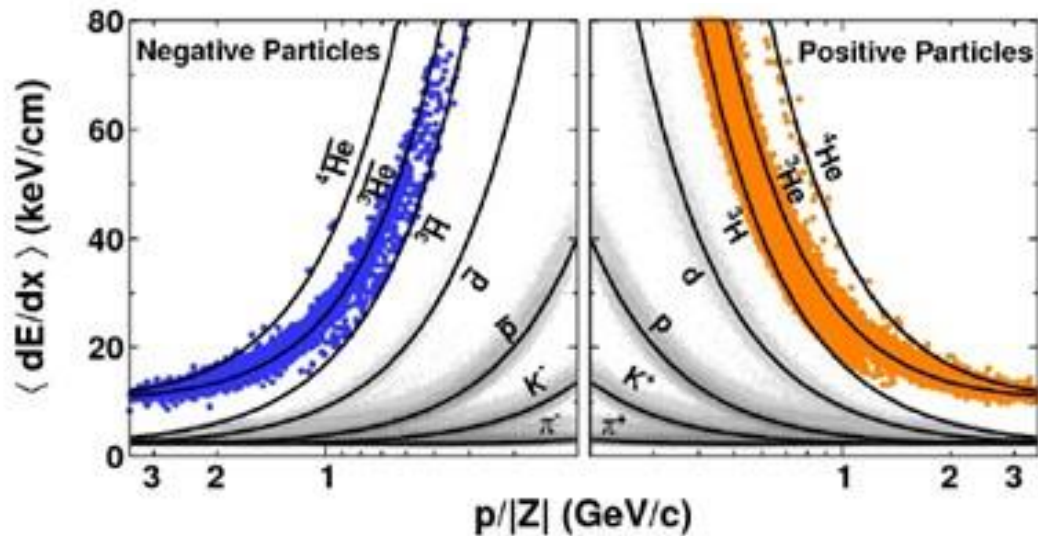


Трехмерное изображение треков, в трековой системе, окруженной секционированной системой времени-пролета.

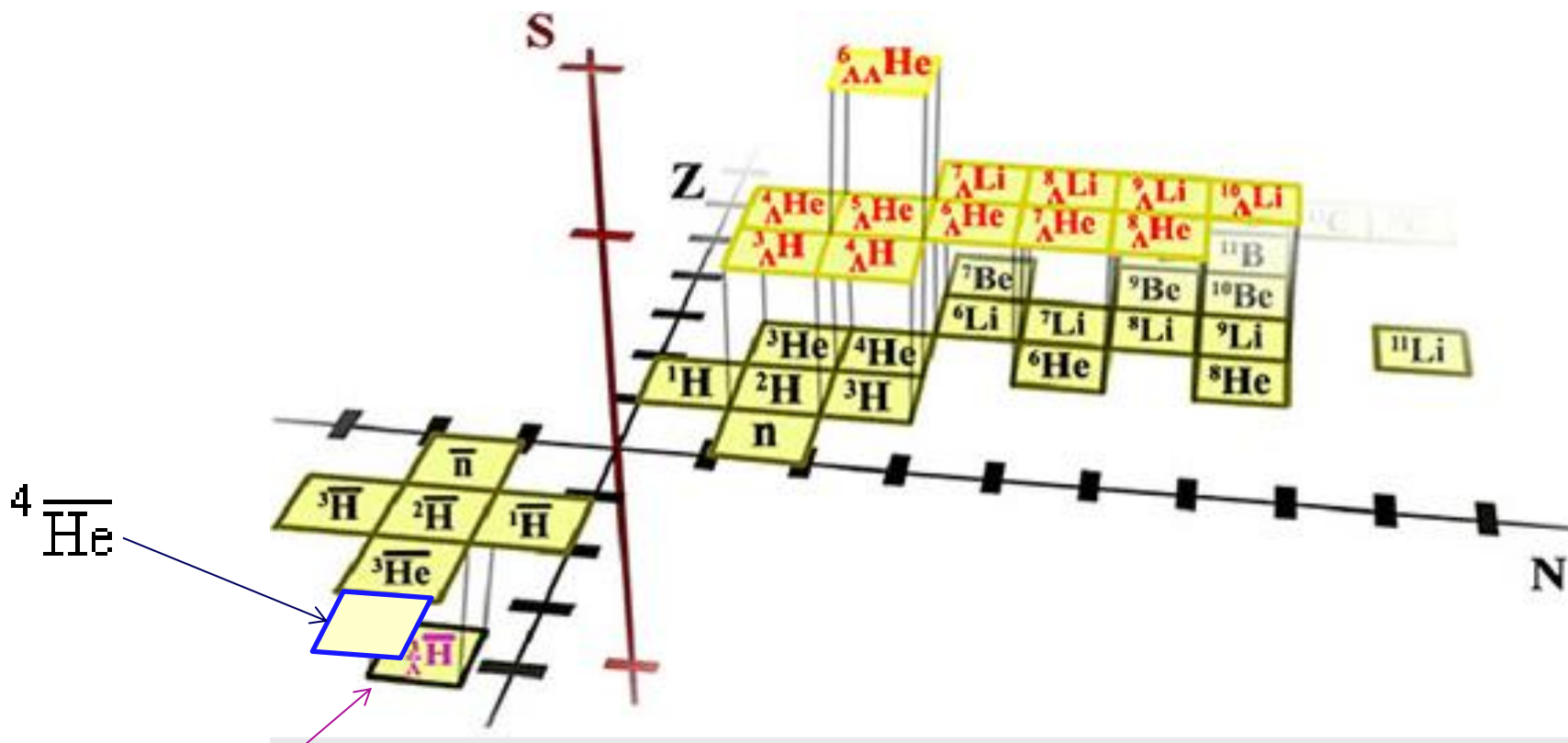
Энергия столкновения Au+Au в с.ц.м. 100 ГэВ/нуклон

Идентификация частиц

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



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



${}^4\overline{\text{He}}$

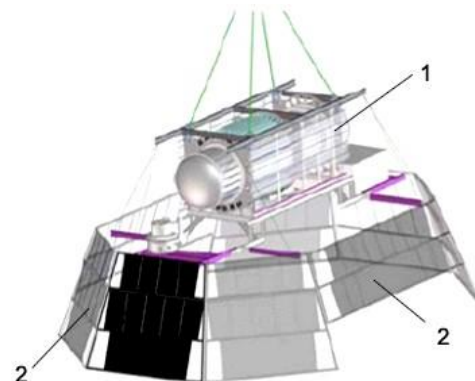
Антигипертритон

Таблица химических *антиэлементов*.

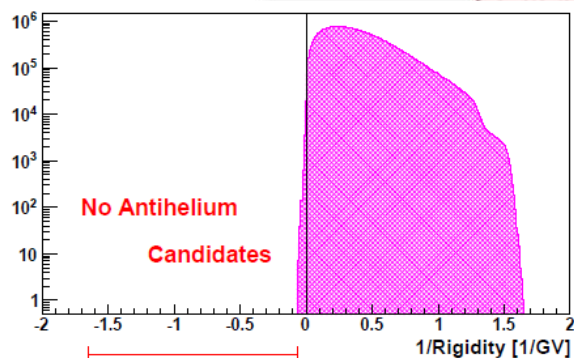
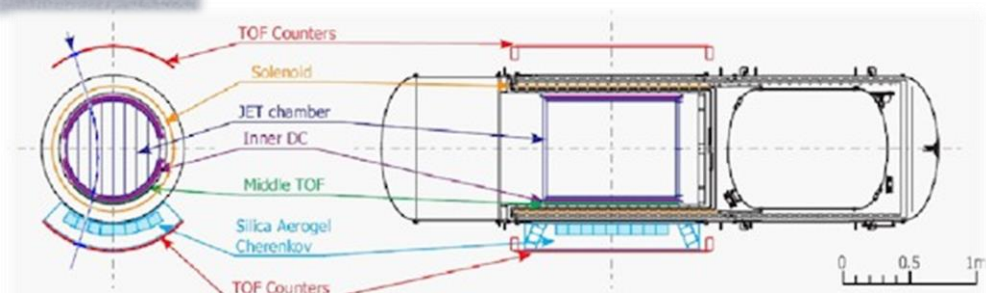
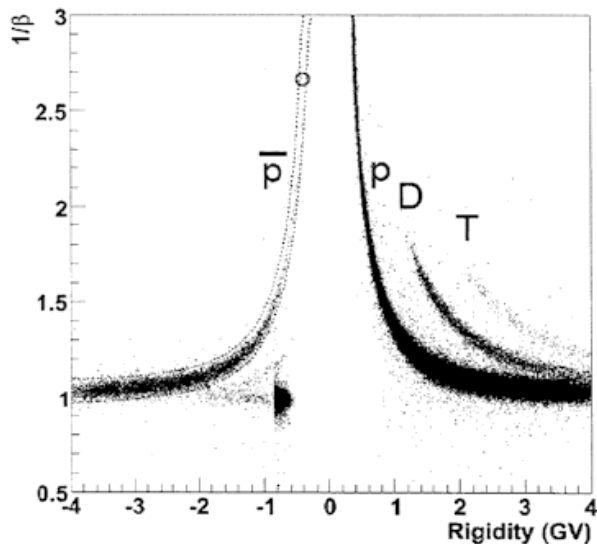
8. Поиск античастиц в космосе

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

Тяжёлые античастицы могли бы возникать при аннигиляции частиц тёмной материи.



Эксперимент BESS-Polar II в Антарктике

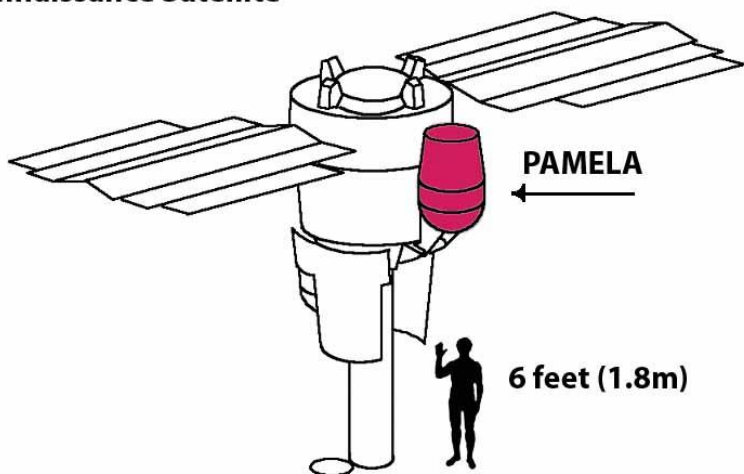


Exclude thermal WIMPs with masses in the range 3-20 GeV if they annihilate dominantly into quark pairs

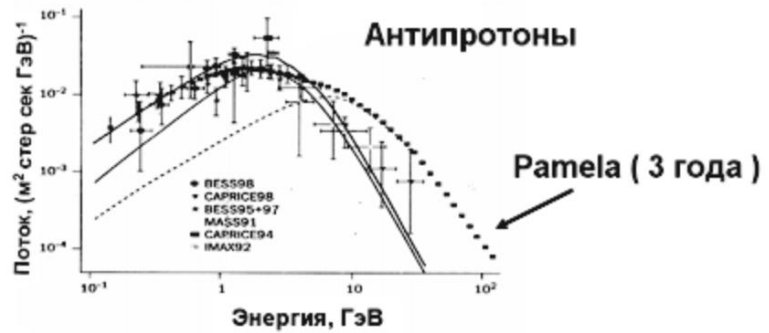


a Payload for **Antimatter Matter** Exploration and **Light-nuclei Astrophysics**

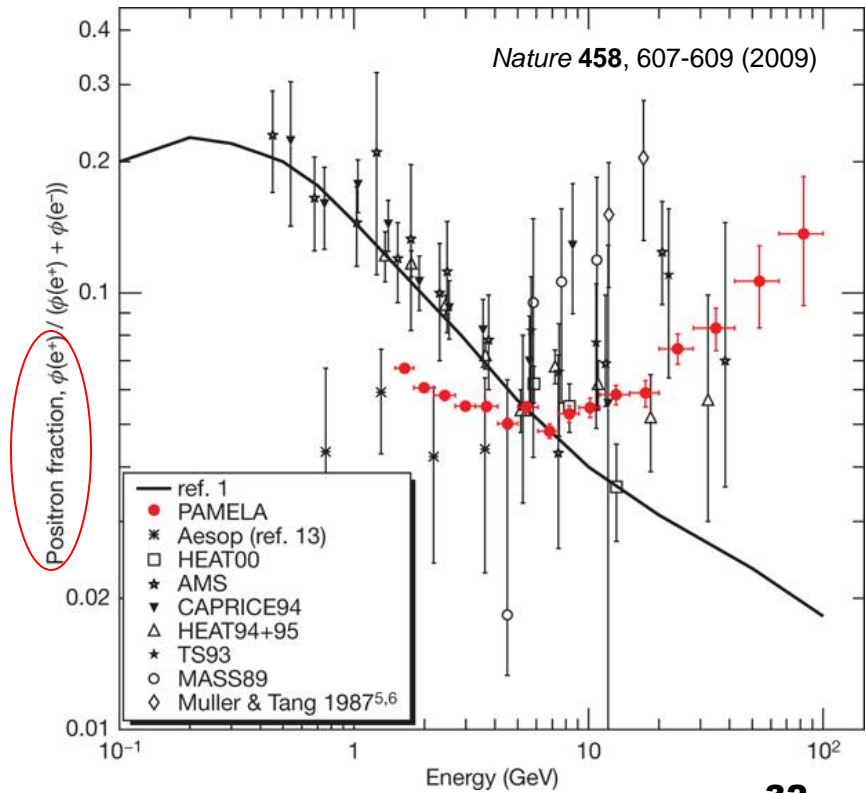
Resurs-DK
Reconnaissance Satellite

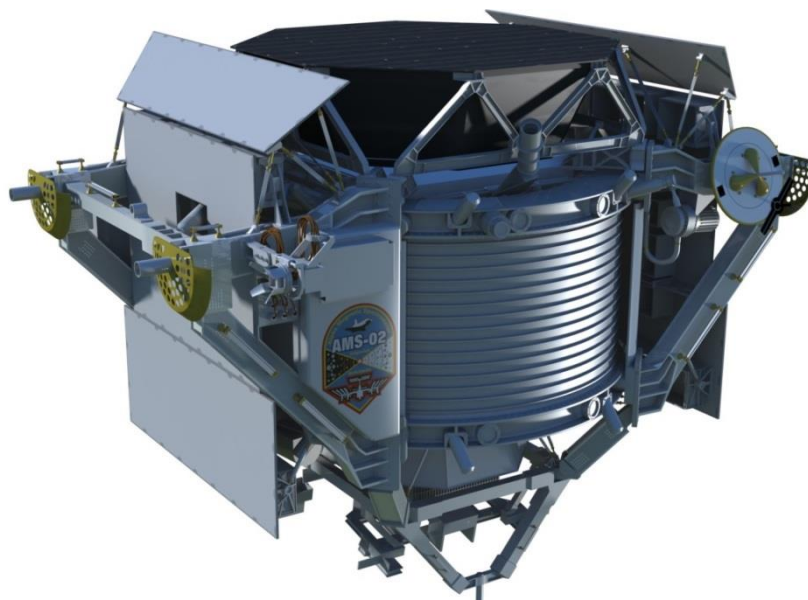


ВЫВОД №1:
В ближнем космическом пространстве
отсутствует сколько-нибудь заметное
количество антивещества



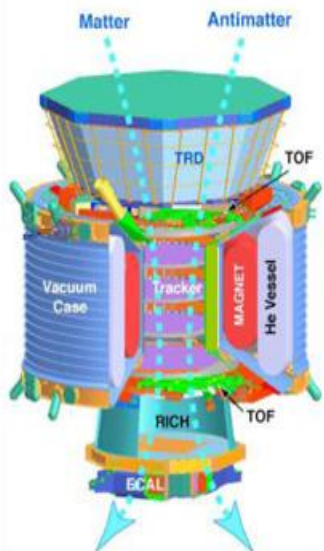
Эффект Памелы





Сэмюэл Тинг
(1936, Н.п.1976)

AMS: A TeV Magnetic Spectrometer in Space



Data Signature of Various Particles in Each Detector

	e^-	P	Fe	e^+	\bar{p}	\bar{He}
TRD						
TOF						
Tracker + Magnet						
RICH						
ECAL						
Physics example	Cosmic Ray Physics Strangelets			Dark matter		Antimatter

Alpha Magnetic Spectrometer предназначен для изучения состава космических лучей, поиска антиматерии и тёмной материи.

Первая версия прибора (AMS-01) была установлена на орбитальной станции МИР в 1998 году и зарегистрировала около одного миллиона ядер гелия.

Вторая версия (AMS-02) установлена на МКС 19 мая 2011 года .

Руководитель проекта С.Тинг

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