

Цели эксперимента **DIRAC** и полученные результаты

Б.Б. Левченко, ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ

CERN (сервер документов)

Collaboration DIRAC

DIRAC: A High Resolution Spectrometer for Pionium Detection

Dimeson **R**elativistic **A**tom **C**omplex
(акроним)

PS212

Lifetime measurement of $\pi^+\pi^-$ atoms to test low energy QCD predictions

CERN-SPSLC-95-1

Proposal to the SPSLC **1995**



Collaboration DIRAC (project, consortium)

DIRAC is MC production and analysis grid environment of the CERN LHCb experiment.

The DIRAC software framework is designed to create services for distributed computations in various environments such as grids, clouds and clusters.

*Одним из примеров программного обеспечения для организации распределённых систем обработки данных является платформа **DIRAC**.*



DIRAC collaboration

	CERN <i>Geneva, Switzerland</i>		Tokyo Metropolitan University <i>Tokyo, Japan</i>
	Czech Technical University <i>Prague, Czech Republic</i>		IFIN-HH <i>Bucharest, Romania</i>
	Institute of Physics ASCR <i>Prague, Czech Republic</i>		JINR <i>Dubna, Russia</i>
	Nuclear Physics Institute ASCR <i>Rez, Czech Republic</i>		SINP of Moscow State University <i>Moscow, Russia</i>
	INFN-Laboratori Nazionali di Frascati <i>Frascati, Italy</i>		IHEP <i>Protvino, Russia</i>
	University of Messina <i>Messina, Italy</i>		Santiago de Compostela University <i>Santiago de Compostela, Spain</i>
	KEK <i>Tsukuba, Japan</i>		Bern University <i>Bern, Switzerland</i>
	Kyoto University <i>Kyoto, Japan</i>		Zurich University <i>Zurich, Switzerland</i>
	Kyoto Sangyou University <i>Kyoto, Japan</i>		

7 стран, 17 институтов, соавторов-95(2003), 60(2019)

Важные даты

1994/5 г — Предложение эксперимента DIRAC, CERN /SPSLC 95-1, SPSLC/P 284
«Lifetime measurement of $\pi^+\pi^-$ atoms to test low energy QCD predictions»

1998 г - пучок ZT8, восточный холл PS, сборка 2-х плечевого магн. спектром.

1999 г. - начало набора данных

Число публикаций по экспериментальным данным DIRAC

10 (2004-2019)

Но ! Составляющие и сопутствующие части (1996-2019)

Технологическая

- First level trigger of the DIRAC exp.
- A prototype Cherenkov counter for DIRAC
- Third level trigger of the DIRAC exp.
- The time-of-flight detector of the DIRAC
- The multilevel trigger system of the DIRAC
- Drift chamber readout system of the DIRAC
- Data acquisition software for the DIRAC
- DIRAC: A high resolution spectrometer for pionium detection
- High resolution scintillating-fibre hodoscope
- A novel aerogel Cherenkov detector for DIRAC-II
- C4F10 Cherenkov detector for DIRAC-II
- Micro-Drift Chamber as a precise vertex detector

Методическая

- DC field control of decay processes in a $(\pi^+\pi^-)$ atom:
- A Monte Carlo calculation of the pionium break-up probability
- Dead time losses and their measurement in DIRAC

Теоретическая

- Estimation of $\pi^+\pi^-$ atoms production rate
- Breakup of relativistic $\pi^+\pi^-$ atoms in matter
- The estimation of production rates of π^+K^- , π^-K^+ and $\pi^+\pi^-$ atoms at 450 GeV/c
- Direct calculation of the probability of pionium ionization
- Finite-size effect on two-particle production
- Finite-size correction to the pionium lifetime
- +10

Конференции

Диссертации

<http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/publ.html>

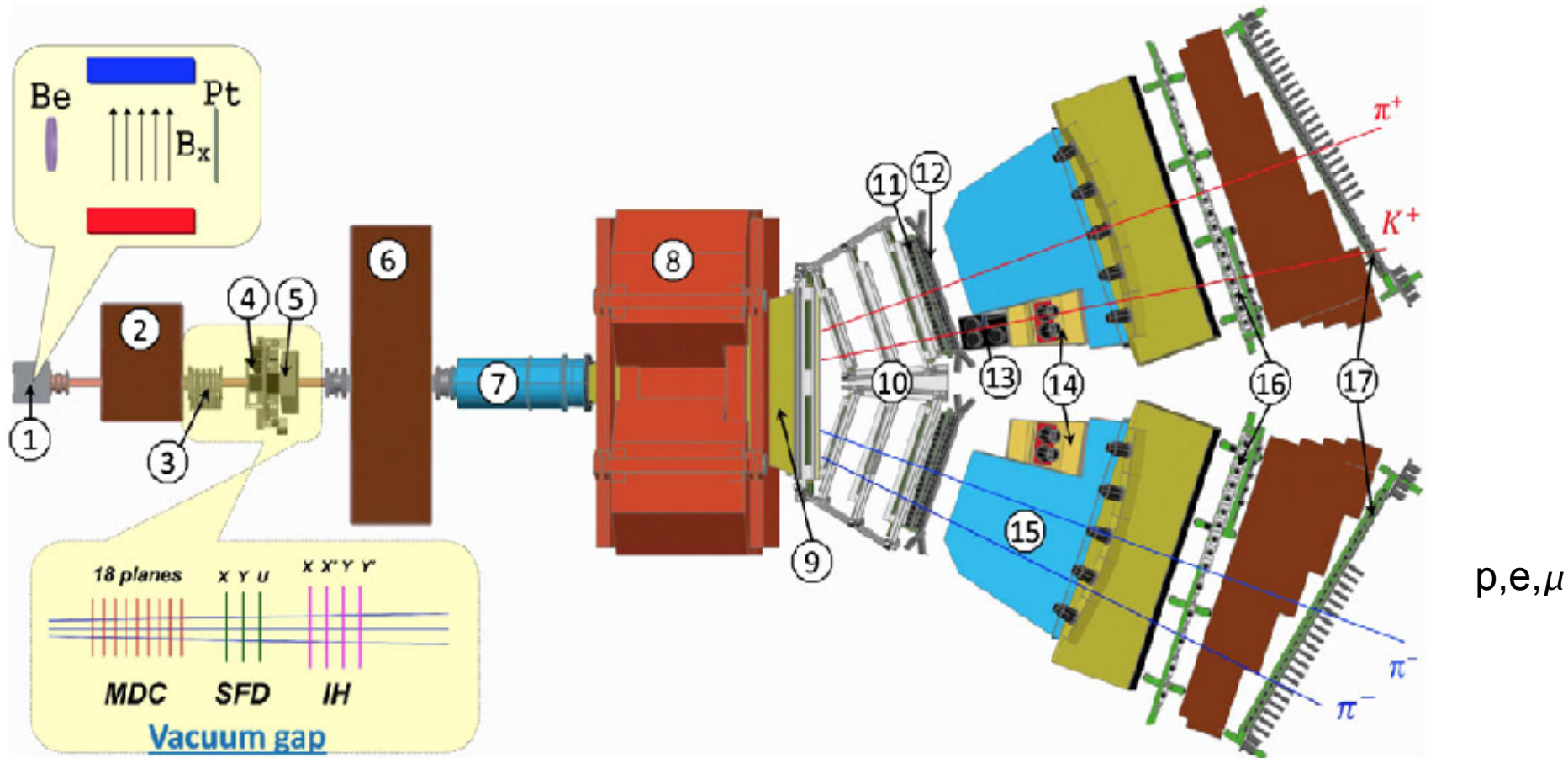
Создание спектрометра DIRAC



Л.Л.Неменов (руководитель эксперимента) и Н.А.Русакович
у трековых детекторов установки DIRAC, CERN. **30.06.1999**

Спектрометр DIRAC

1



1-мишень и В-поле, 2-защита, 3-MDC, 4-SFD, 5-IH, 6-защита, 7-вакуум, 8-магнит, 9-вакуум, 10-дрейфовая камера, 11-V годоскоп, 12-H годоскоп, 13-черенков (аэрогель), 14-черенков (тяж. газ), 15-черенков (азот), 16-preshower, 17-мюонный детектор

Начало истории DIRAC

(из архива KEK-library)

Элементарные релятивистские атомы -

Л.Л. Неменов, ЯФ, 41 (1985) 980-990

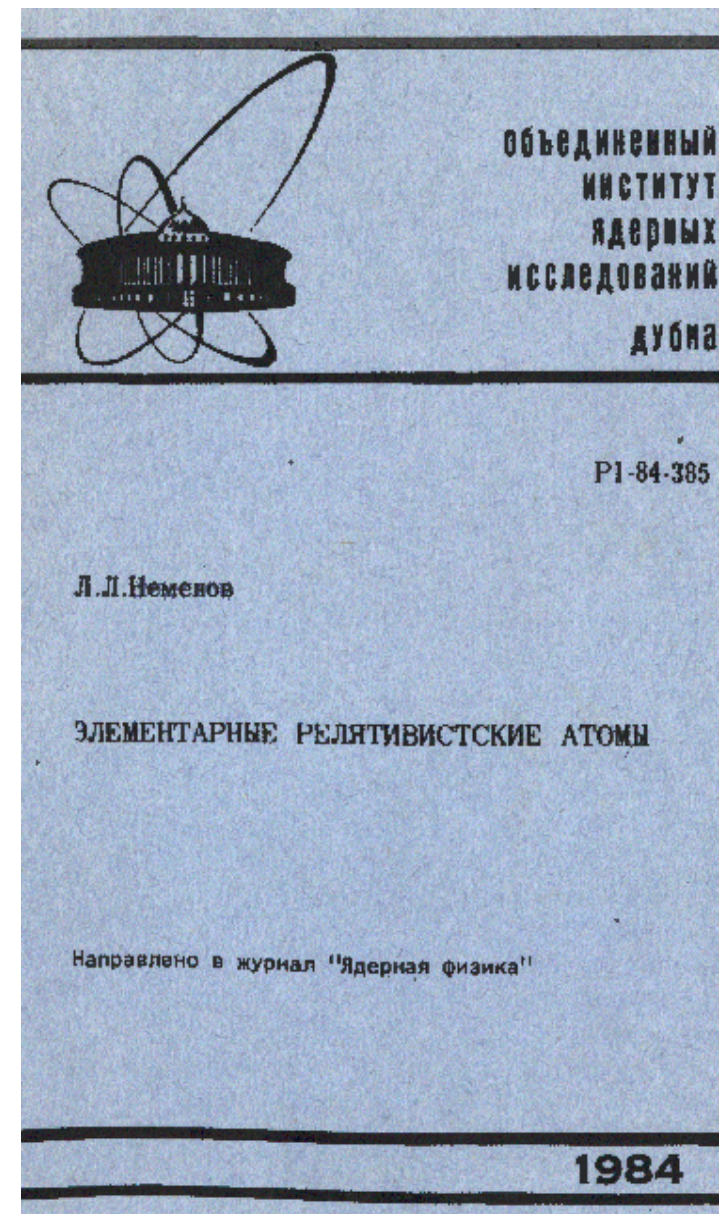
Sov.J.Nucl.Phys. 41 (1985) 629,

SERPUKHOV-174 (Serpukhov, IHEP) PHYSICS OF RELATIVISTIC DIMESON ATOMS

(Предложен: 1986, Утвержден: 1986-04,
Начат: 1986-05, завершен: 1991)

Изучение кулоновских взаимодействий π^+ и π^- -мезонов в конечных состояниях при относительных импульсах пионов менее 10 МэВ/с. Первое наблюдение (π^+, π^-) атомов. Экспериментальное определение времени жизни (π^+, π^-) атома.

В настоящей работе показано, что на существующих ускорителях высоких энергий возможно наблюдение атомов, образованных двумя пионами ($A_{2\pi}$), двумя каонами (A_{2K}), π^+K^- ($A_{\pi K}$), π^-K^+ ($A_{K\pi}$). Для



$$\frac{d\sigma^A(n, L)}{dQ} = (2\pi)^3 \frac{Q_0}{M_A} |\psi_{nL}(0)|^2 \frac{d\sigma^{(-)}}{d\vec{p}d\vec{q}}$$

Эпоха созиданий

Строятся:

ЦЕРН (CERN, 1954), **ОИЯИ** (1956), **SLAC** (1962), **ИФВЭ** (Протвино, 1963), **FNAL**(1987), **ИЯФ** (Новосибирск, 1957, ВЭП-1, 1963, ВЭПП-2, 1965)

Создаются :

КЭД (~ **1949**), теория Янга-Миллса (**1954**, эмбрион КХД), кварковая модель (**1964**)
квантовый генератор (**1954**), фотоумножитель (**1958**) → Черенковские детекторы

Открываются:

-пионы(**1947-50**, КЛ, аэростат, фотоэмул.); много других «элементарных» частиц
-структура ДНК (**1953**); , позитроний (**1951**); реликтовое излучение (**1965**)

Присуждаются:

1958 г., Нобелевская премия за открытие и объяснение эффекта Черенкова

Мыслятся:

-Полёты в дальний космос на атомных ракетопланах;
-И.А. Ефремов, «Туманность Андромеды»(**1956**), отрывки печатались в газетах
«Пионерская правда» (1957) и «Комсомольская правда» (1959);
-проект «Переброс стока сибирских рек в Ср.Азию»

**«Нам нет преград ни в море ни на суше,
Нам не страшны, ни льды, ни облака.
Пламя души своей, знамя страны своей
Мы пронесем через миры и века.»**

Из «Марш энтузиастов», 1940, Дунаевский И., Д'Актиль А.

Экзотические атомы - обзоры

Energy Level Displacements in Pi-Mesonic Atoms (Phys.Rev 96 (1954)774

S. Deser, M. L. Goldberger, K. Baumann, W. Thirring,

$$\Gamma/E_0 = (8/9) (qr_B) | (a_1 - a_3)/r_B |^2$$

✓ **New Atoms. (Positronium and Mesonic Atoms)**, Il Nuovo Cimento, 4(S3) (1956) 1209

S. de Benedetti

Мезоатомы, УФН, 61(1957) 27

Д. Д. Иваненко и Г. Е. Пустовалов

Mesische Atome, Fortschritte der Physik 6, 30-49 (1958)

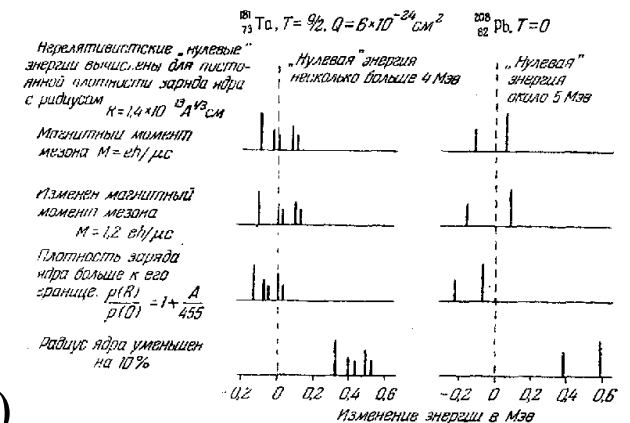
D. D. Ivanenko und G. E. Pustovalov

Mesonic atoms, Reports on Progress in Physics, 21,(1958)

D. West

π^- , K^- , μ^- атомы, e^+e^-

2. Uretsky J., Palfrey J. Phys.Rev., 1961, 121, p.1798.



50-e

Аннигиляция e+e-

$${}^3\sigma_{2\gamma} = 0,$$

$${}^1\sigma_{2\gamma} = 4\sigma_{2\gamma} = 4\pi r_0^2 \frac{c}{v}$$

$$r_0 = e^2/mc^2$$

- классический радиус e-

С учетом спина γ и e

**Аннигиляция на лету,
непрерывный спектр**

$$|\psi(0)|^2 = \frac{2\pi\xi}{1 - \exp[-2\pi\xi]}$$

Позитроний

$$|\psi(\cdot)|^r = (\cdot/\pi)(\cdot nr_B)^{-r}$$

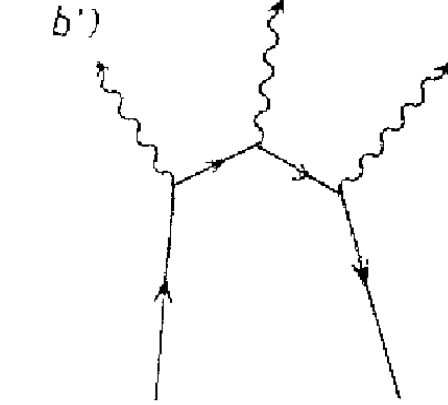
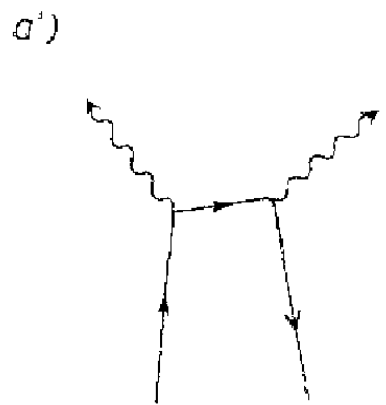
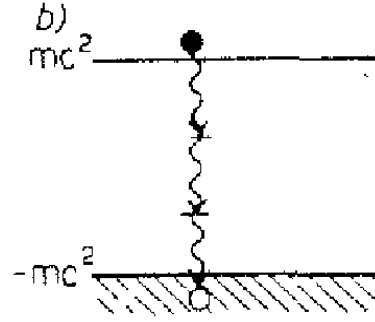
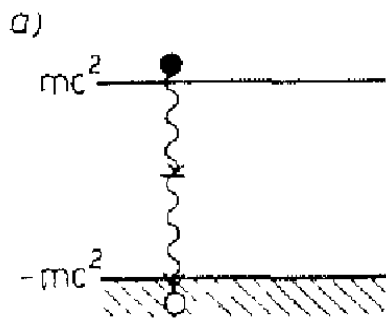
Парапозитроний (синглет)

$$\Gamma = 1/{}^1\tau_{2\gamma} = v {}^1\sigma_{2\gamma} |\psi(0)|^2$$

$${}^1\tau_{2\gamma} = 1.25 \cdot 10^{-10} \text{ сек}$$

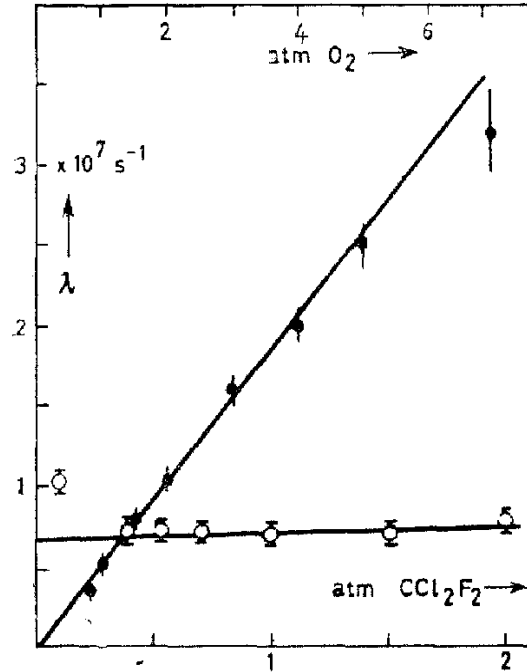
Орто-позитроний (триплет)

$$\frac{{}^1\tau_{2\gamma}}{{}^3\tau_{3\gamma}} = \frac{4}{9\pi} (\pi^2 - 9)\alpha = \frac{1}{1115} \approx \frac{\alpha}{8}$$



Позитроний: обнаружение и свойства

M. Deutsch, Prog. in Nucl. Phys., 3, 131 (1953)



Зависимость от давления вероятности аннигиляции в газах (кислород, фреон)

A_{2e} спектр фотонов

3S непрерывный спектр

1S - дискретное значение $\sim \text{мс}^2$

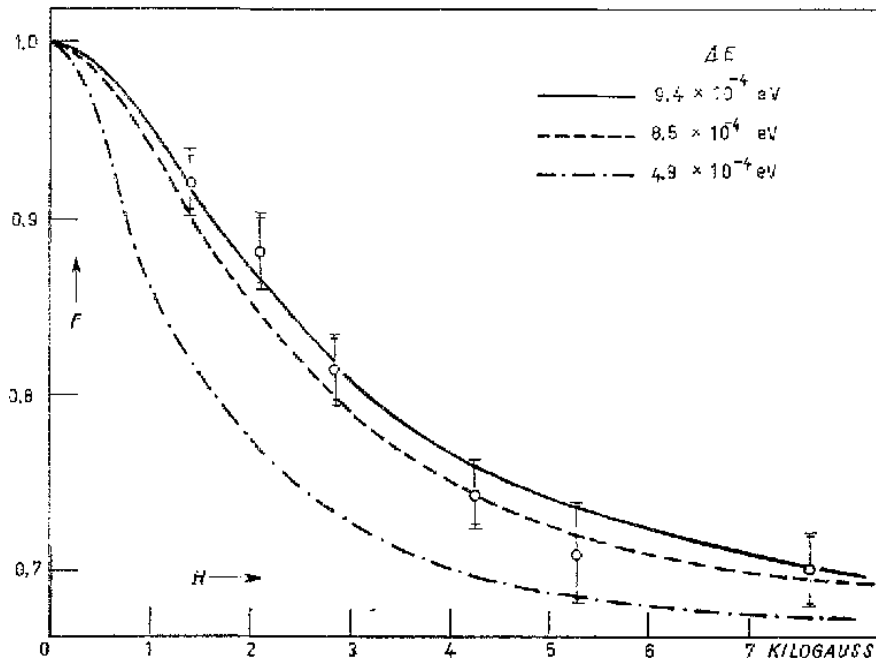
-Химические свойства,

- тонкая структура спектра ($\sigma 1 \sigma 2$),

-эффект Зеемана в магнитном поле (смешивание сингл, и трипл., подавление 3S)

$\sim 20\%$ позитронов формируют A_{2e}

Только e^+ с энергией $> (I-6.8)$ эВ формируют позитроний



1969

Экзотические атомы

Самоил Михелевич Биленький, 91

Образование и распад $(\mu^+\mu^-)$ -атомов, ЯФ, т10(1969)812

С.М.Биленький, Нгуен Ван Хьеу, Л.Л. Неменов, Ф.Г.Ткебучава (поступила в редакцию 01/05/69)

Рассмотрено рождение $(\mu^+\mu^-)$ -атомов в реакциях с участием адронов и γ -квантов. Рассмотрен распад таких систем. Обсуждаются атомы, образованные π^- и K^- -мезонами.

→ $\pi^- + p \rightarrow (\mu^+\mu^-) + n, \quad \sigma_1 \sim 3 \cdot 10^{-37} \text{ см}^2,$

ОИЯИ- кузница президентов

в 3S_1 -состоянии $(\mu^+\mu^-) \rightarrow e^+ + e^-, \quad \tau_1 = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ сек.}$

Зарядовая четность системы фермион-антифермион $C = (-1)^{L+S}$

→ $\gamma + Z \rightarrow (\mu^+\mu^-) + Z, \quad \sigma_0 = Z^2 \cdot 10^{-37} \text{ см}^2, \quad \tau_0 = \frac{2}{m_\mu \alpha^5} = 6 \cdot 10^{-13} \text{ сек.}$

→ Вероятность распада $(\pi^+\pi^-)$ атома (J. Uretsky)

$$w_\pi = 2,2 \cdot 10^{-8} |a_2 - a_0|^2 m_\pi^3$$

Оценка времени жизни $(\pi^+\pi^-)$ атомов:

$$\tau_\pi = 3,8 \cdot 10^{-16} \text{ сек.}$$

→ $(K^-\pi^+) \dots w_{\pi K} = 3,8 \cdot 10^{-8} |b_1 - b_3|^2 \mu^3 \quad I=1/2, 3/2$

Таким образом, получено представление о порядке величин

Генезис (Γένεσις)

при $E \rightarrow 0$ фаза s -волны δ_0 пропорциональна импульсу частицы

$$a = \lim_{E \rightarrow 0} \left(-\frac{\delta_0(k)}{k} \right) \quad f|_{E \rightarrow 0} = -a$$

длина рассеяния есть амплитуда рассеяния (с обратным знаком) в пределе нулевой энергии частицы

$$\sigma = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell + 1) \sin^2 \delta_{\ell} \quad \sigma|_{E \rightarrow 0} = 4\pi a^2$$

В случае, если длина рассеяния $a > d$ (размер потенциальной ямы), то волновая функция «втягивается» в область взаимодействия, в яме возникает **связанное состояние частицы, E_b** .

$$a = \frac{1}{k} = \frac{\hbar}{\sqrt{2\mu\varepsilon_b}}$$

если в потенциальной яме имеется слабо связанное s -состояние, длина рассеяния частицы такой ямы положительна, а её величина a полностью определяется **энергией связи частицы**.

Доступ к сакральным параметрам (кварковый конденсат в вакууме)

$$M_\pi^2 = (m_u + m_d) \frac{|\langle 0 | \bar{u}u | 0 \rangle|}{F_\pi^2} \quad \text{Gell-Mann}$$

$$M_\pi^2 = M^2 - \frac{\bar{l}_3}{32\pi^2 F^2} M^4 + O(M^6),$$

$$M^2 = (m_u + m_d) \lim_{m_u, m_d \rightarrow 0} \frac{|\langle 0 | \bar{u}u | 0 \rangle|}{F_\pi^2}, \quad F = \lim_{m_u, m_d \rightarrow 0} F_\pi.$$

LO KTB (Tomozawa, Weinberg, 1966)

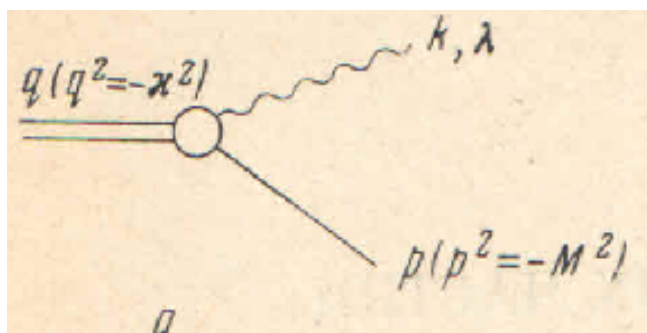
$$a_0^0 = \frac{7M_\pi^2}{32\pi F_\pi^2} = 0,16, \quad a_0^2 = -\frac{M_\pi^2}{16\pi F_\pi^2} = -0,045$$

NNLO KTB (Gasser, Leutwyler, 1984)

$$a_0^0 \stackrel{p^2}{=} 0,156 \xrightarrow{p^4} 0,200 \xrightarrow{p^6} 0,216$$

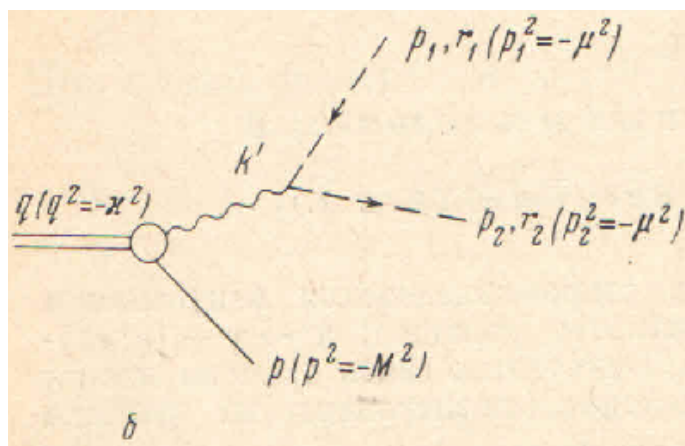
1972 Атомные распады элементарных частиц, ЯФ, т15(1972)1047

Л.Л. Неменов



Рассмотрены распады элементарных частиц, сопровождающиеся испусканием атомных систем. Вычислена относительная вероятность распадов

$\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}(1), \eta^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}^{(1)}(2), \eta^0 \rightarrow \gamma + A_{2\mu}$
образовавшихся в результате внутренней конверсии



$$\rho_{\text{атомн}} = \frac{W_{\text{атомн}}}{W_{\gamma}} = \frac{32\pi\alpha |Q| \kappa}{m^3 (\kappa^2 - M^2)} \left(1 - \frac{m^2}{\kappa^2 + M^2}\right) \sum_{n, L, j} |\Psi_{nLj}(0)|^2 \times \\ \times \left[R_T(Q, k) + \frac{m^2}{Q_0^2} R_L(Q, k) \right],$$

$$\rho(\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}) \approx \rho(\eta^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}) = 0,60\alpha^4 = 1,70 \cdot 10^{-9}.$$

Делается вывод, что при энергии A_{2e} более 1ГэВ, время жизни в триплетном состоянии

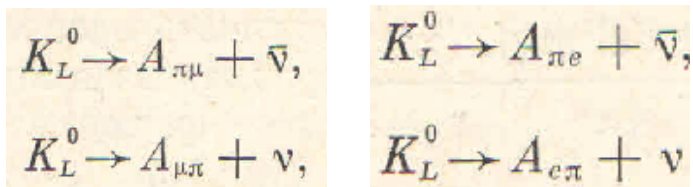
$$\tau_{\text{т.с}} \sim 10^{-4} \text{ сек}$$

что позволяет атому пролететь расстояние $\sim 50-100$ м

Дана оценка развала позитрония в веществе кулоновским полем ядер, процесс, конкурирующий с аннигиляцией (e^+e^-).

1972 Атомные распады K_L -мезонов, ЯФ, т16(1972)125

Л.Л. Неменов

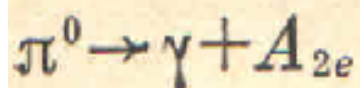


Взаимодействие с
веществом и схема эксп-та.

1976 Оценка интенсивности пучков релятивистских позитрониев на ускорителях высоких энергий, ЯФ, т24(1976)524

О.Е. Горчаков, А.В. Купцов, Л.Л. Неменов

Методом Монте Карло вычислены интенсивности и энергетические характеристики пучков позитрониев для пучков протонов 13, 30, 70, 400 и 5000 ГэВ



Относительная вероятность распада с испусканием A_{2e}

$$\rho = W(\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}) / W(\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma) = 1,70 \cdot 10^{-9}$$

Описан прообраз экспериментальной установки, её элементы (толщина мишени, чистящее магн. поле, сильное магн. поле для развала A_{2e} и регистрации e^+ , e^-)

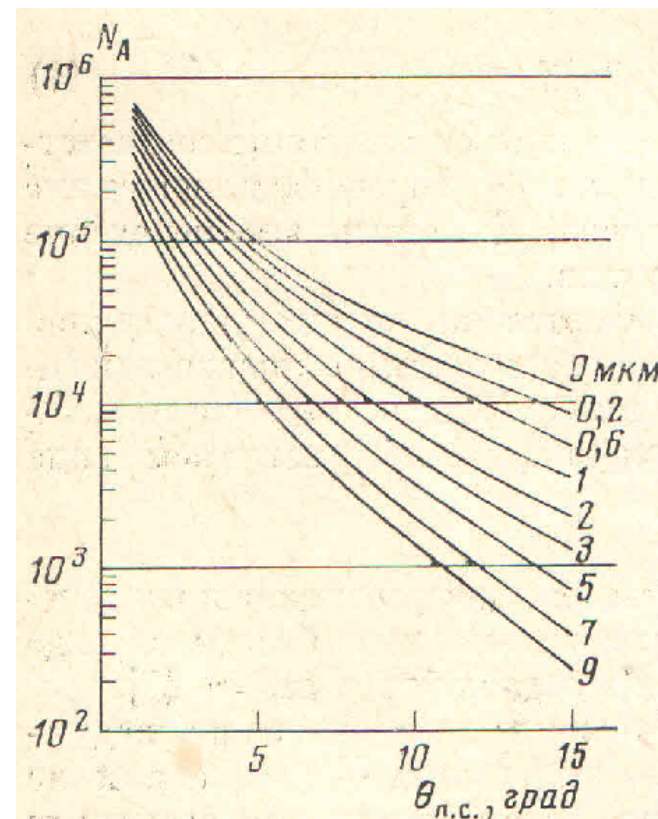


Рис. 2. Количество позитрониев, которое можно зарегистрировать за 250 час на ускорителе ИФВЭ экспериментальной установкой с апертурой 10^{-4} стерад в зависимости от угла и толщины мишени

1975 Осцилляции интенсивности в пучках релятивистских позитрониев и их применение для проверки специальной теории относительности
Л.Л. Неменов, Дубна P1-0145, 1975

Движение позитрониев в магнитных полях приводит к осцилляции их интенсивности

1978

ОБРАЗОВАНИЕ ПОЗИТРОНИЕВ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ

А. А. АХУНДОВ ¹⁾, Д. Ю. БАРДИН, Л. Л. НЕМЕНОВ

ЯФ, т27(1978)1542

Рассмотрена генерация позитрониев при взаимодействии электронов с веществом. Вычислены энергетические и угловые характеристики образующихся пара- и ортопозитрониев. Сделана оценка выхода позитрониев в пара- и ортосостоянии, который может быть достигнут на существующих ускорителях электронов (кольцевых и линейных). Показано, что электронные ускорители являются источниками достаточно интенсивных и хорошо сформированных пучков позитрониев.

ИЯФ (Новосибирск, 1957, ВЭП-1, 1963, ВЭПП-2, 1965)

При энергии электронов 1 Гэв и интенсивности кольцевого ускорителя 10^{13} c^{-1} на вольфрамовой мишени (1 мкм) будет образовываться **1200 A2e** в пара- и **24** в ортосостоянии в час.

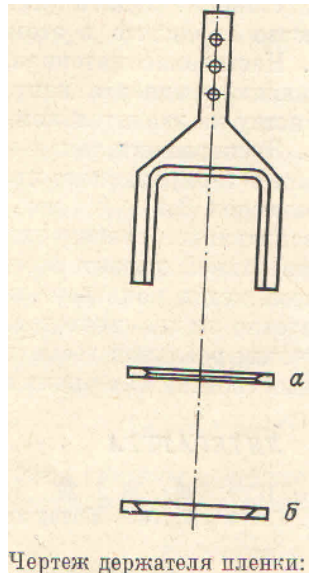
На линейном ускорителе при энергии электронов 10 Мэв и интенсивности $6 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$ (ток 10 мА) на вольфрамовой мишени будут образовываться **35** пара- и **11** ортопозитрониев в 1 сек.

1980

Применение углеродной пленки для генерации пучков вторичных частиц на протонных синхротронах, ПТЭ, тЗ(1980)41

Л.Л. Неменов, Ю.А. Плис, В.М. Плотко, Н.М. Тараканов, В.Н. Чепегин

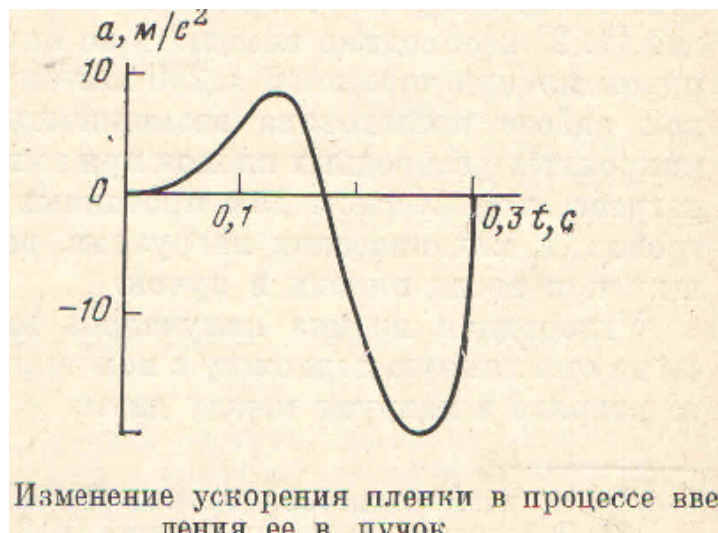
- Отрабатывалась технология производства плёнки толщиной до ~ 200 мкг/см² (напыление)
- А) крепления на мишень (армирование нитью паука - не разрушает пленку при сгорании в пучке)
- Б) тепловой режим под пучком, в магнитном поле,
- В) ускорение и деформации при вводе в пучок
- Г) профиль пучка после взаимодействия разной длительности



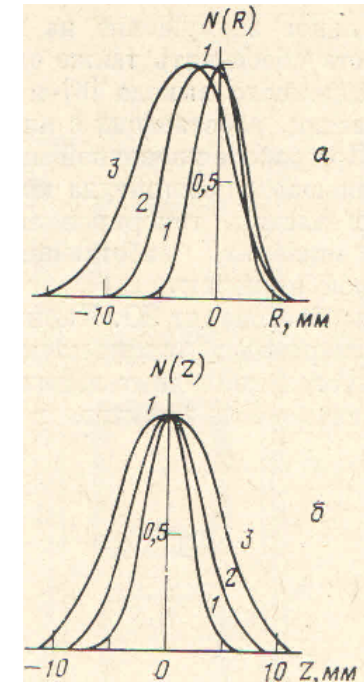
А)

Δ	$I = 3 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11}$	10^{12}	$2 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{13}$
110	780	920	1050	1250	1490	2800
220	920	1100	1250	1490	1770	3300

Б)



В)



Р

В

Г) 2,3- 0.5, 1.5 сек

Проведенные эксперименты показывают, что углеродные пленки толщиной ~ 1 мкм являются эффективными мишенями для генерации позитронного пучка. Пленки выдерживают импульсный нагрев до 2000 К.

СЕРП-Е-119 Физика релятивистских позитрониев

1984 Наблюдение ультрарелятивистских позитрониев, ЯФ,40 (1984) 139-147

1989 Измерение сечения взаимодействия ультрарелятивистских атомов позитрония с углеродом, ЯФ,50 (1989) 7-18

$$\sigma_{\text{tot}} = (16^{+16}_{-6}) \cdot 10^{-19} \text{ см}^2 / \text{атом}$$

1990 Измерение коэффициента внутренней конверсии гамма-кванта в атом позитрония A_{2e} и вероятности распада $\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}$, ЯФ,51 (1990) 1040

$$\rho_A = (0,92 \pm 0,14) \cdot 10^{-9}$$

$$\rho_\pi = (1.84 \pm 0.29) \times 10^{-9}$$

1990 Measurement of the Branching Ratio for the π^0 Meson Decay Into a Photon and a Positronium Atom, Phys.Lett. B236 (1990) 116

$$\rho_\pi = (1.84 \pm 0.29) \times 10^{-9}$$

$$\rho = W(\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}) / W(\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma) = 1,70 \cdot 10^{-9}$$

1983

Наблюдение ультррелятивистских позитрониев PI-83-894

Г.Д. Алексеев и др.

В этой работе осуществлена схема формирования и детектирования пучка позитрониев, предложенная Л.Л. Неменовым

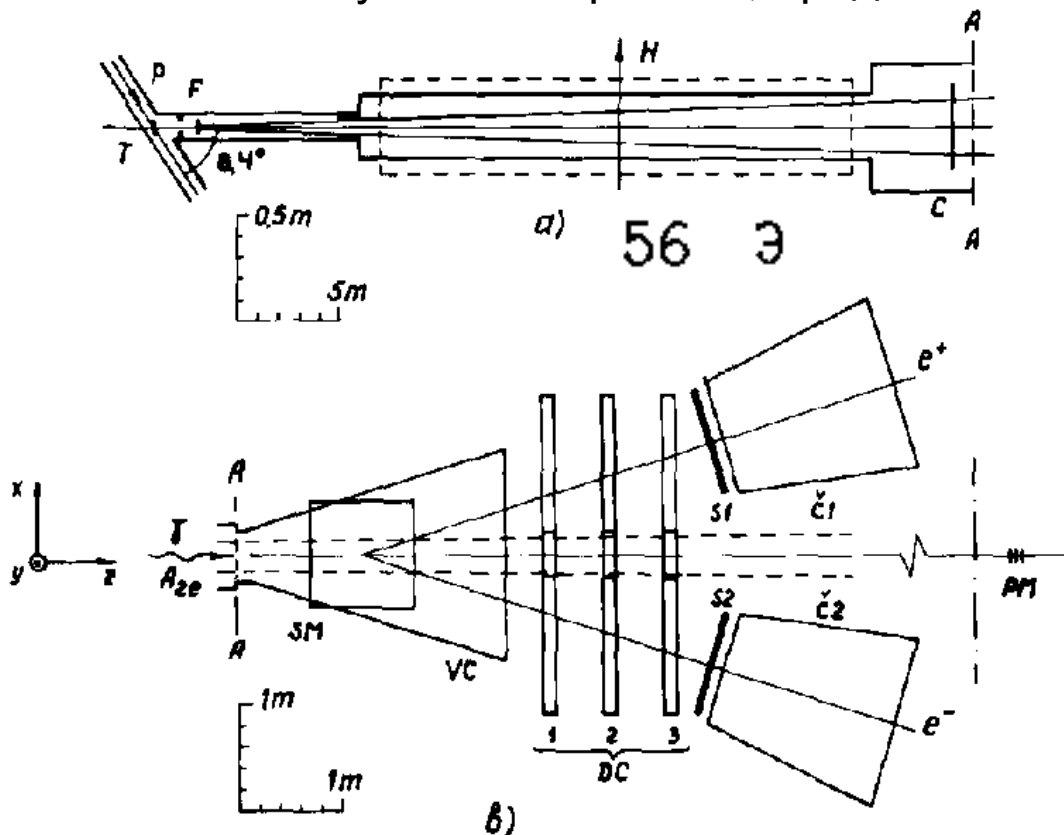


Рис.1. Схема установки. а/схема канала: Р - пучок протонов; М - пленочная мишень; П - пленка из лавсана; КЛ - коллиматор; Н - горизонтальное магнитное поле; К - конвертор из плексигласа; б/ схема расположения магнита и детекторов: СМ - полюс магнита СП-73; ВК - вакуумная камера; ДК1, ДК2, ДК3 - пакеты дрейфовых камер; S1, S2 - сцинтилляционные счетчики; Ч1, Ч2 - газовые черенковские счетчики.

СМ (H=4600 Э)

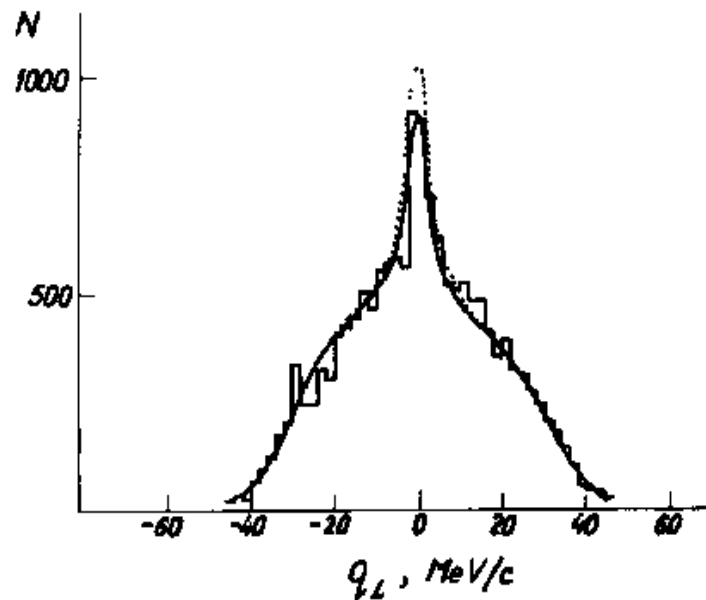
Результаты измерения числа атомов A_{2e} и γ -квантов

Тип события	Число событий	Мониторный счет
A_{2e}	277 ± 40	$(6,76 \pm 0,21) \cdot 10^9$
γ -квант	1366 ± 42	$3,85 \cdot 10^5$

СЕРП-Е-174 Физика релятивистских двух-мезонных атомов (ПОЗИТРОНИЙ)
(1986-1991)

1984 Элементарные релятивистские атомы - ЯФ, 41 (1985) 980
Л.Л. Неменов

1990 Наблюдение эффекта кулоновского взаимодействия в пионной паре
во взаимодействиях $p + Ta \rightarrow \pi^+ \pi^- + X$ при энергии протона 70 Гэв, ЯФ, 52 (1990)
1046, Phys.Lett. B255 (1991) 146



1993 Observation of atoms consisting of π^+ and π^- mesons, Phys.Lett. B308 (1993)200

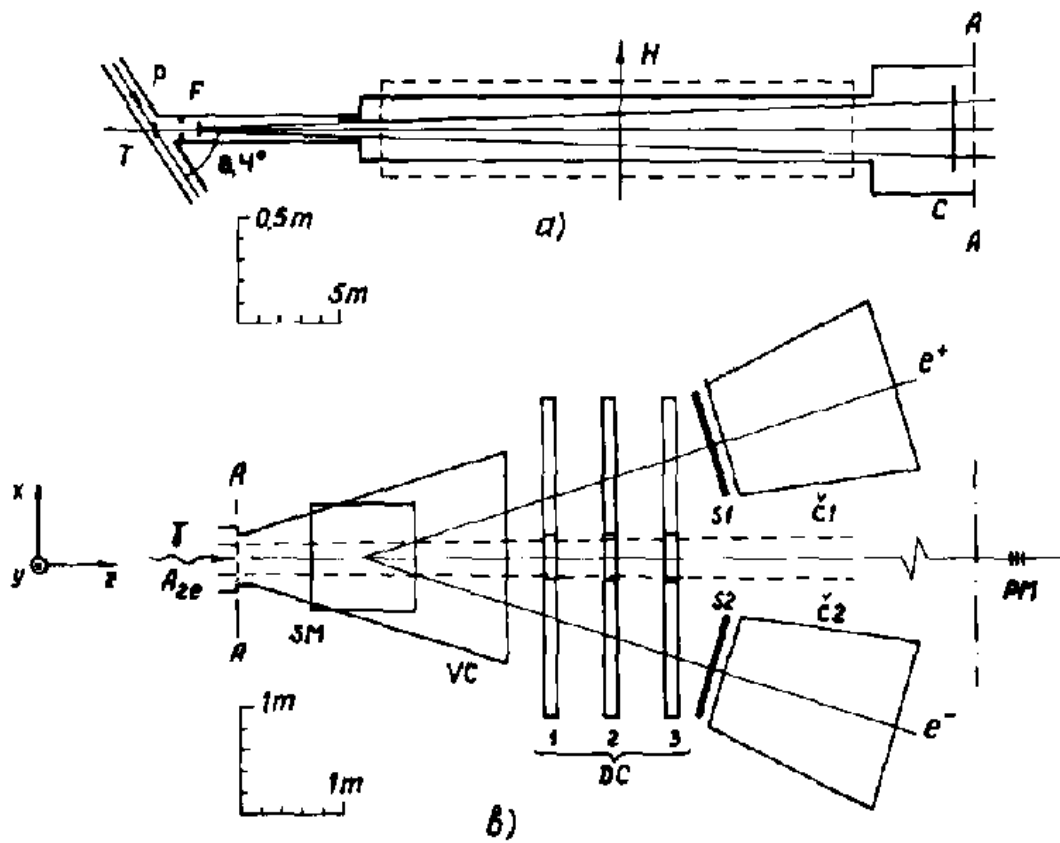
272±49 атомов

1994/5 г — Предложение эксперимента DIRAC, CERN /SPSLC 95-1, SPSLC/P 284
«Lifetime measurement of $\pi^+\pi^-$ atoms to test low energy QCD predictions»

1998 г - пучок ZT8, восточный холл PS, сборка 2-х плечевого магн. спектром.

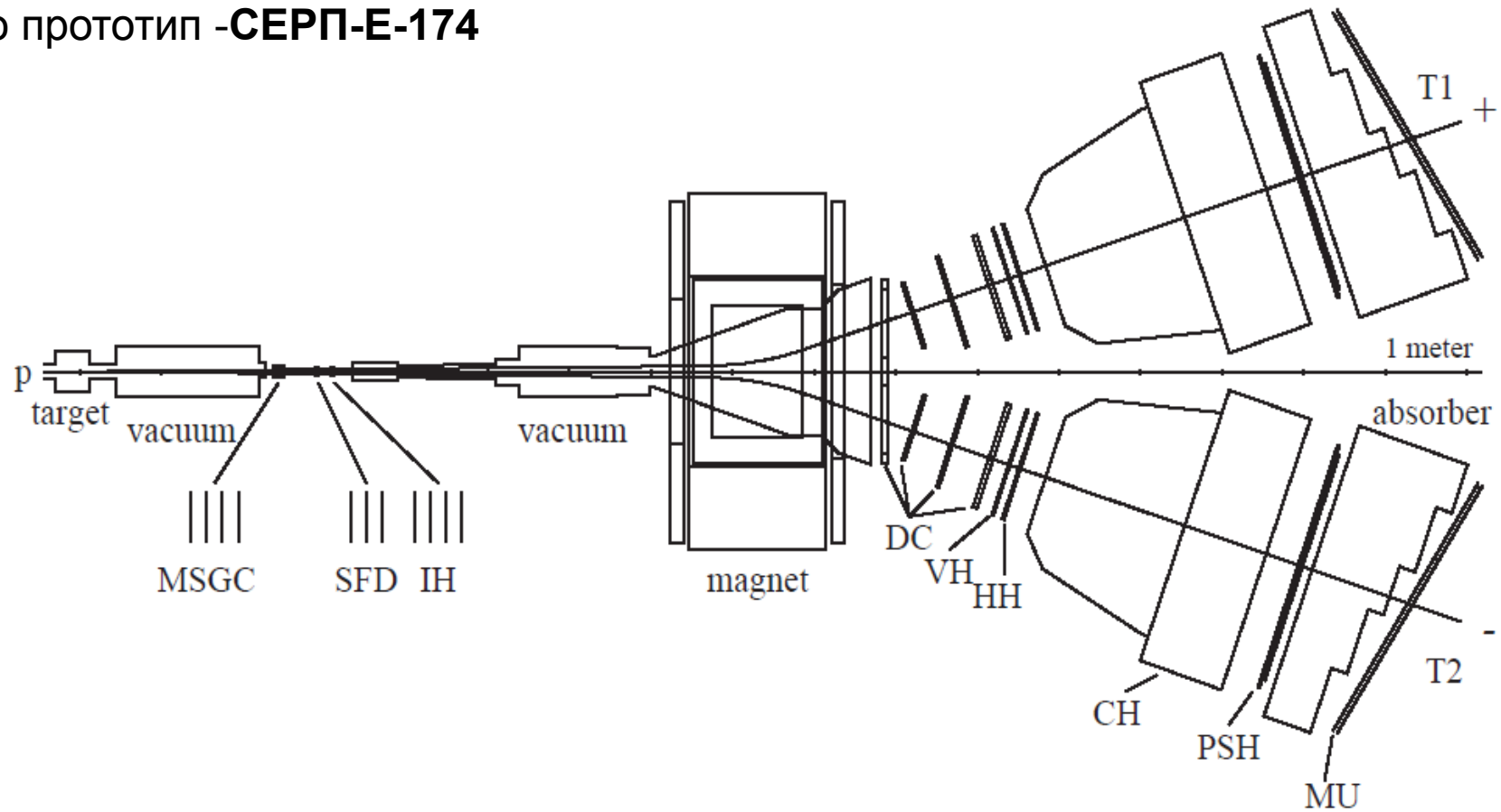
1999 г. - начало набора данных

Так выглядел спектрометр в СЕРП-E-174



Спектрометр DIRAC (вид сверху)

Его прототип - **СЕРП-Е-174**

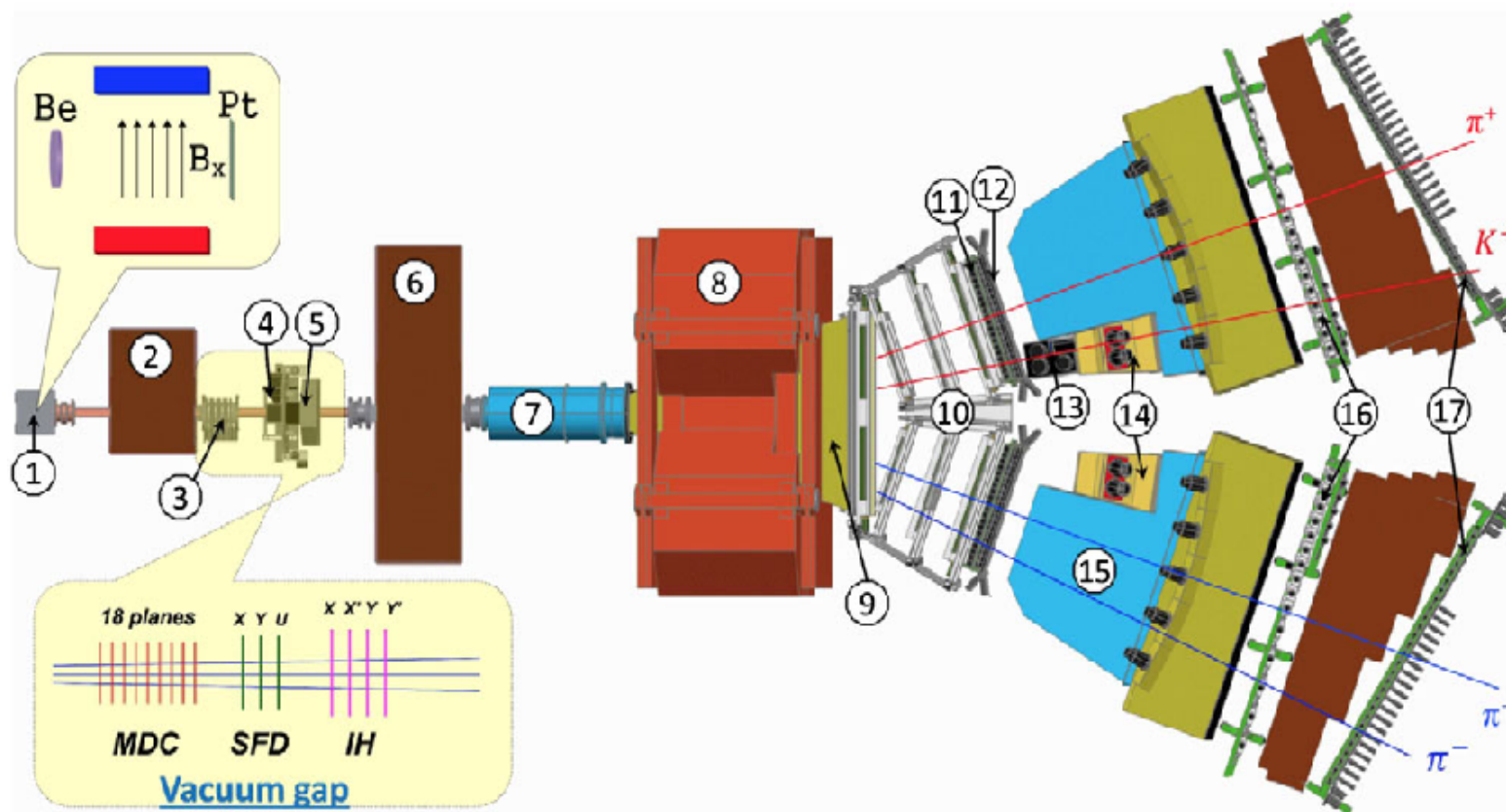


MSGC-микростриповые газове камеры, SFD- детектор из сцинтилирующих волокон, IH-ионизационный годоскоп, DC-дрейфовая камера, VH-, VV-вертикальны и горизонтальные годоскопы, CH-черенковский счётчик, PSH-преливненный детектор , MU-мюонный детектор

Спектрометр DIRAC

24 ГэВ, CERN PS

$$\Delta p/p \sim 3 \cdot 10^{-3}$$

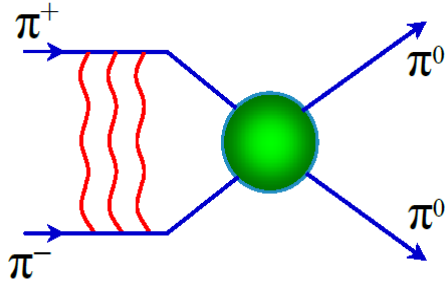


ρ, e, μ

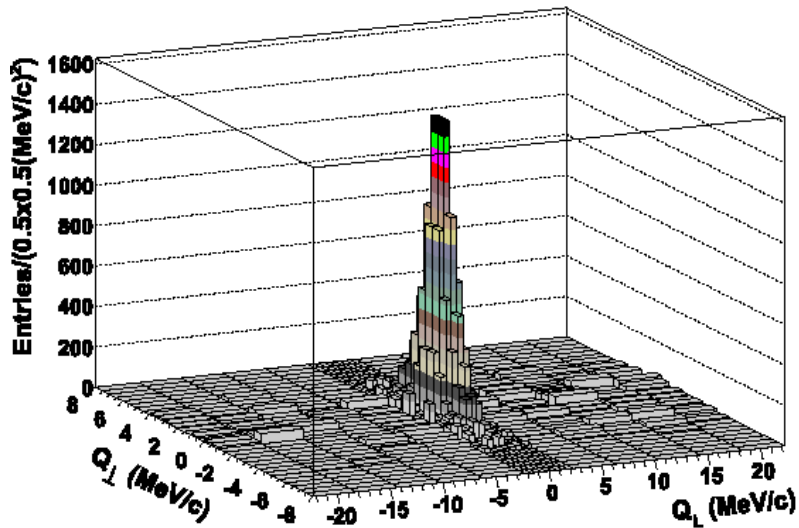
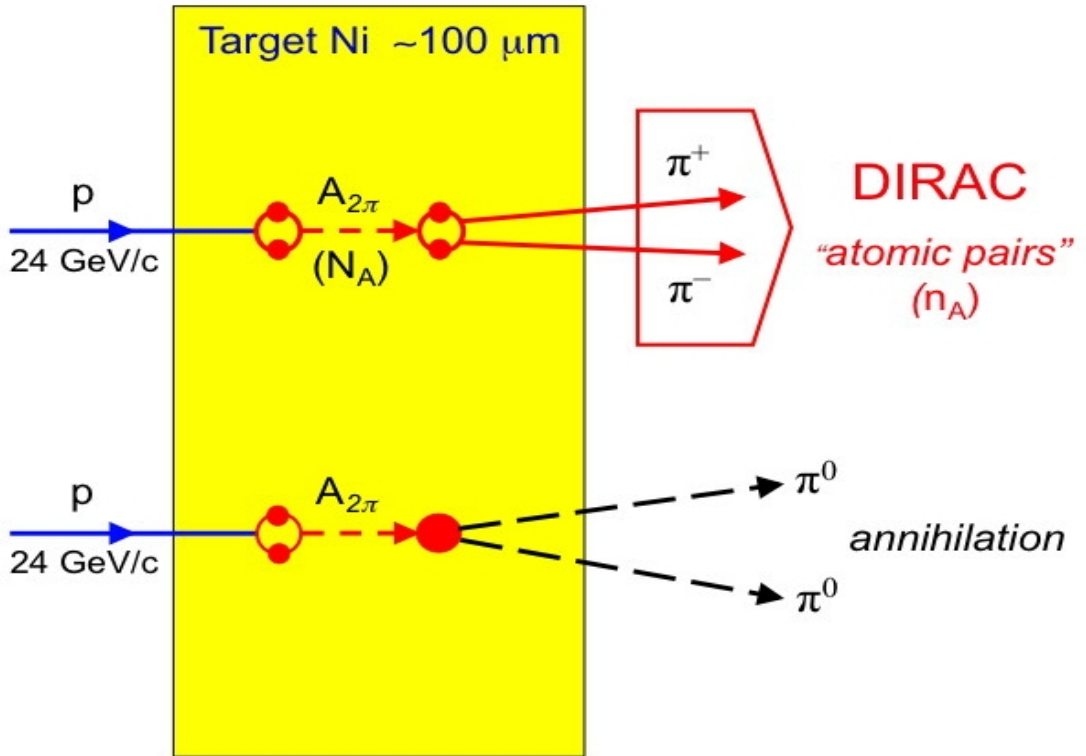
В области относительных импульсов < 3 МэВ, точность 0.55 (Q_L) и 0.1 МэВ/с (Q_T)

1-мишень и В-поле, 2-защита, 3-MDC, 4-SFD, 5-IH, 6-защита, 7-вакуум, 8-магнит, 9-вакуум, 10-дрейфовая камера, 11-V годоскоп, 12-H годоскоп, 13-черенков (аэрогель), 14-черенков (тяж. газ), 15-черенков (азот), 16-preshower, 17-мюонный детектор

Основные результаты: $\pi^+\pi^-$ атом ($A_{2\pi}$)

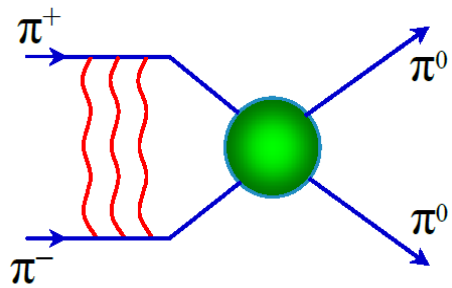


$Q < 3 \text{ MeV}/c$



При анализе данных, атом рассматривается как система со ∞ числом уровней энергий, взаимодействующая с атомами мишени. Находится однозначное соотношение между временем жизни и вероятностью развала атома.

Основные результаты: $\pi^+\pi^-$ атом ($A_{2\pi}$)



$$\pi^+ + \pi^- \rightarrow \pi^0 + \pi^0 \sim 99.6\%$$

SU(2)
 $SU(2)_L \times SU(2)_R$

$$r_{A_{2\pi}} = 390 \text{ фм} \quad E_{A_{2\pi}} = 1.86 \text{ КэВ}$$

S волновое $\pi\pi$ рассеяние

$$\frac{1}{\tau} \approx W_{\pi^0\pi^0} = R |a_0 - a_2|^2$$

$$R \propto |\psi_{nl}(0)|^2 \quad |\psi(0)|^2 = (1/\pi)(2nr_B)^{-3}$$

$$\tau_\pi = 3,8 \cdot 10^{-16} \text{ сек.} \quad 1969 \text{ г!}$$

$$(2,5 \pm 1,5) \cdot n^3 \cdot 10^{-15} \text{ с} \quad 1984 \text{ г}$$

21227 атомных пар

Измерения

КТВ

Время жизни, τ

$$(3.15^{+0.28}_{-0.26}) \text{ фс}$$

$$(2.9 \pm 0.1) \text{ фс}$$

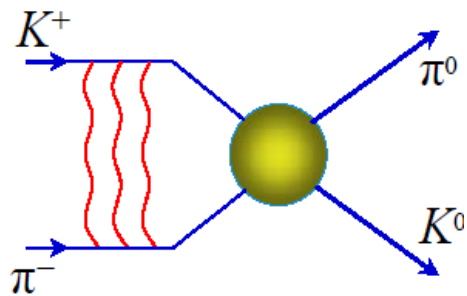
Длины рассеяния

$$(0.2533^{+0.0080}_{-0.0078} |_{\text{stat}} +0.0078 |_{\text{syst}}) M_{\pi^+}^{-1}$$

$$(0.265 \pm 0.004) M_{\pi^+}^{-1}$$

$$|a_0 - a_2|$$

Основные результаты: $\pi^- K^+$ $\pi^+ K^-$ атомы ($A_{K\pi}$)



SU(3)

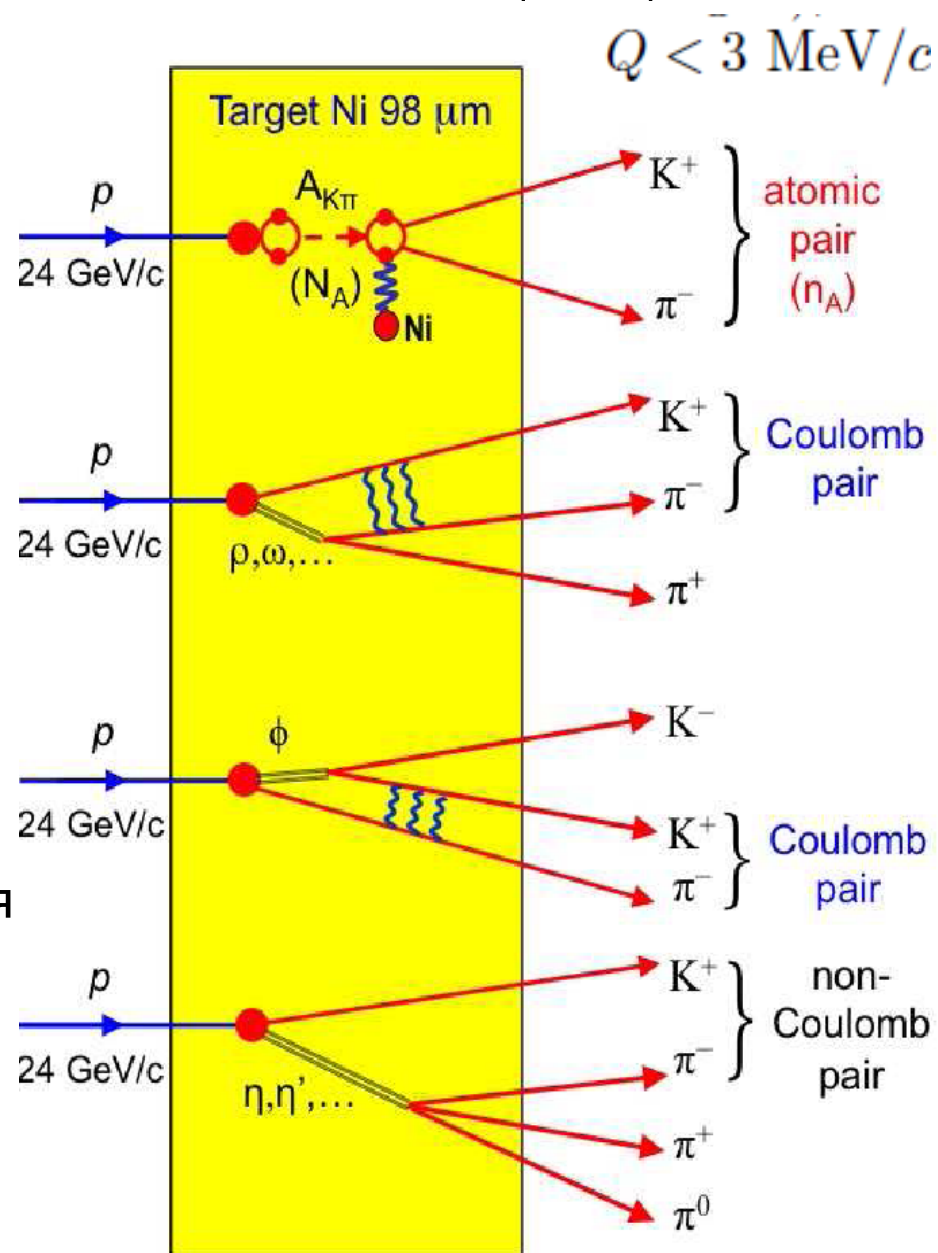
$SU(3)_L \times SU(3)_R$

$$\pi K \rightarrow \pi^0 K^0 \text{ или } \pi^0 \bar{K}^0$$

$$r_{A_{K\pi}} = 249 \text{ фм}$$

$$E_{A_{K\pi}} = 2.9 \text{ КэВ}$$

При анализе данных, атом рассматривается как система со ∞ числом уровней энергии, взаимодействующая с атомами мишени. Находится однозначное соотношение между временем жизни и вероятностью развала атома.



Основные результаты: π^-K^+ π^+K^- атомы ($A_{K\pi}$)

$$\Gamma_{\pi K} = \frac{1}{\tau} \simeq \Gamma(A_{K\pi} \rightarrow \pi^0 K^0 \text{ or } \pi^0 \bar{K}^0)$$
$$= 8\alpha^3 \mu^2 p^* (a_0^-)^2 (1 + \delta_K). \quad |a_0^-| = \frac{1}{3} |a_{1/2} - a_{3/2}|$$

Данные для Ni + Pt мишеней

349±62 (5.6 σ) атомов

	Измерения	КТВ
Время жизни, τ	$(5.5^{+5.0}_{-2.8})$ фс	(3.5 ± 0.4) фс
Длины рассеяния $ a_0^- M_\pi$	$0.072^{+0.031}_{-0.020}$	0.0745 ± 0.0020
		LQCD

B. Adeva *et al.*, Phys. Rev. D **96**, 052002 (2017).

Основные результаты: $\pi^+\pi^-$ долгоживущий атом ($A_{2\pi}^L$)

$$\Delta E^{ns-np} = E_{ns} - E_{np} \longrightarrow 2a_0 + a_2$$

$$\Delta E_{nl} = \Delta E_{nl}^{\text{em}} + \Delta E_{nl}^{\text{vac}} + \Delta E_{nl}^{\text{str}} \quad \Delta E_{n0}^{\text{str}} = A_n(2a_0 + a_2)$$

Теоретическое значение $\Delta E^{2s-2p} = (-0.59 \pm 0.01)$ эВ

Number of atoms generated on Be target: $N_A = 16960 \pm 290|_{\text{tot}}$

Number of long-lived atoms after Be target: $N_A^{L,\text{Be}} = 1153 \pm 104|_{\text{tot}}$

Number of atoms entered Pt foil: $N_A^{L,\text{Pt}} = 501_{-80}^{+184}|_{\text{tot}}$

Number of atomic pairs after Pt foil: $n_A = 436 \pm 157|_{\text{tot}}$

$$\tau_{2p} = \frac{1}{W_{2p-1s}} = 1,14 \cdot 10^{-11} \text{ c}$$

The lifetime of long-lived atom in simple approach:

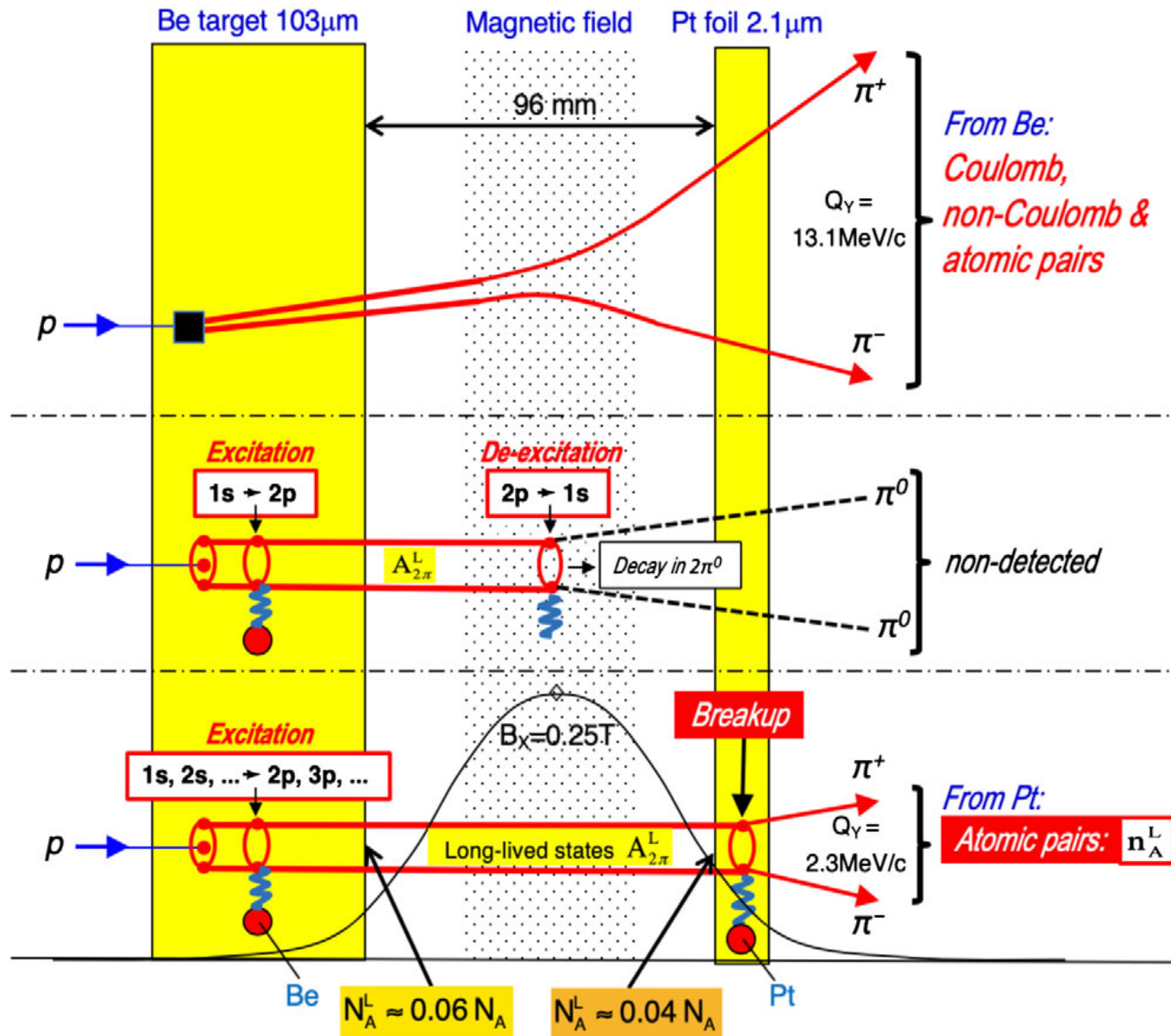
1984 г

$$\tau_L = \left(1.21 \pm 0.19|_{\text{stat}} \begin{matrix} +0.75 \\ -0.18 \end{matrix} |_{\text{syst}} \right) \times 10^{-11} = 1.21_{-0.26}^{+0.77}|_{\text{tot}} \times 10^{-11} \text{ s}$$

$$\text{QED: } \tau_{2p} = 1.17 \times 10^{-11} \text{ s} \quad \tau_{1s} = 3.15_{-0.26}^{+0.28}|_{\text{tot}} \times 10^{-15} \text{ s}$$

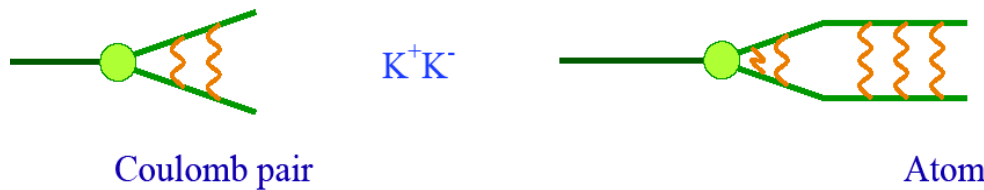
Долгоживущий атом

$$A_{2\pi}^L$$



«Я планов наших люблю громадьё, размаха шаги саженьи»

В.В. Маяковский



$$\begin{aligned} a_B &= [\alpha m_K/2]^{-1} = 109.6 \text{ fm} \quad \dots \text{ Bohr radius} \\ p_B &= \alpha m_K/2 = 1.80 \text{ MeV} \quad \dots \text{ Bohr momentum} \\ |E_{1s}| &= \alpha^2 m_K/4 = 6.57 \text{ keV} \quad \dots \text{ binding energy} \\ \tau(A_{2K}) &= [\Gamma(A_{2K})]^{-1} = ? \quad \dots \text{ lifetime} \end{aligned}$$

3. In October 2019 the dedicated paper will be submitted.

4. The experimental conditions needed for the KK atoms lifetime measurement on SPS and LHC will be formulated.

5. The proton-antiproton Coulomb pairs investigation will be done in June 2019.

L. Nemenov (JINR, DIRAC collaboration)
SPSC, October 2018

Предложение: Изучить экспериментально

Surprises from Bose-Einstein Correlations

I. V. Andreev,^{(1),(a)} M. Plümer,^{(2),(b)} and R. M. Weiner **Phys. Rev. Lett. 67(1991) 3475**

An investigation of the space-time extension of particle sources in the current-ensemble formalism shows that under quite general assumptions there exist a quantum-statistical ($\pi^+\pi^-$) correlation and a difference between ($\pi^0\pi^0$) and ($\pi^-\pi^-$) Bose-Einstein correlations. These effects are found to be enhanced for small momenta and radii.

Заключение

*«Кто привык за победу бороться,
С нами вместе пускай запоёт.
Кто весел — тот смеётся,
Кто хочет — тот добьётся,
Кто ищет — тот всегда найдёт!»*

Василий Иванович Лебедев-Кумач, 1936

Мф.7:7, Мф.7:8

Ссылки

Collaboration DIRAC , <http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/collab.html>

Proposal (1995)

Lifetime measurement of $\pi^+\pi^-$ atoms to test low energy QCD predictions

Proposal to the SPSLC <http://cdsweb.cern.ch/search?sysno=000222463CER>

2011

Последние результаты эксперимента DIRAC в CERN

по изучению $\pi^+\pi^-$ и πK атомов

Афанасьев Леонид Георгиевич, <http://theor.jinr.ru/~ffk11/talks/Afanasiev.pdf>

Ежегодные доклады на SPSC, CERN Administration and PAC Dubna (Л.Л. Неменов)

http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/present_list.html