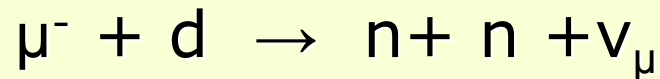
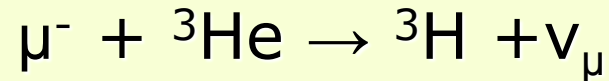
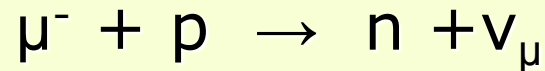


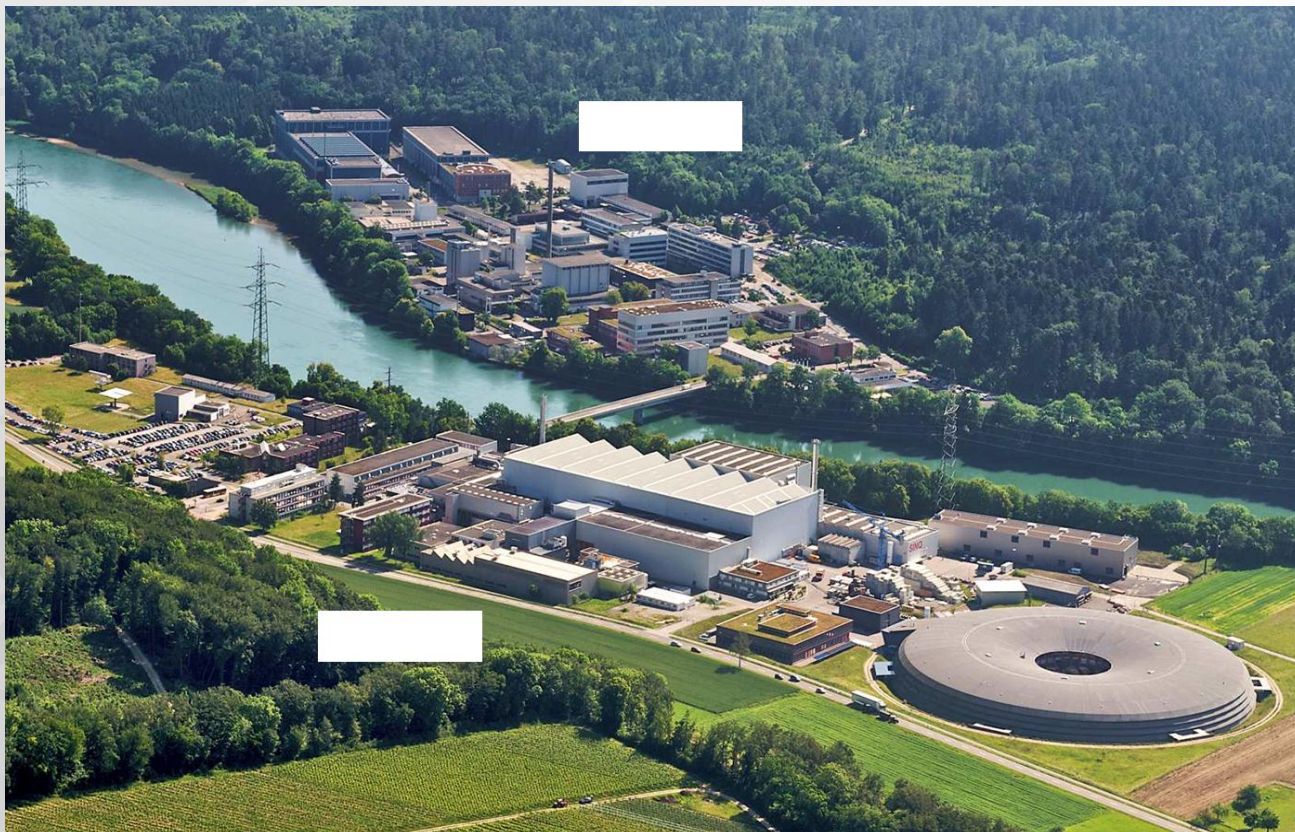
Исследования на мюонном канале Швейцарской мезонной фабрики

Мюонный катализ ядерного
dd- и dt- синтеза.

Мюонный захват легкими ядрами:



*Сотрудничество со Швейцарской мезонной фабрикой
Институт Пауля Шеррера PSI
с 1986 года*



Штат 1500 чел. Бюджет 12 млрд. руб.

Протонные ускорители - генераторы мюонных пучков

Пучок протонов → мишень → пи-мезоны →
мюоны

Лаборатория	Ускоритель	Энергия протонов	Ток	Коэффициент заполнения
PSI Швейцария	циклотрон	600 МэВ	3000 мкА	100 %
TRIUMPF Канада	циклотрон	500 МэВ	100 мкА	100 %
LAMPF США	Линейный ускоритель	800 МэВ	1000 мкА	10%
ММФ ИЯИ, Москва	Линейный ускоритель	160 МэВ	100 мкА	1%
ПИЯФ Гатчина	Синхроциклотрон	1000 МэВ	2 мкА	50%

PSI meson factory

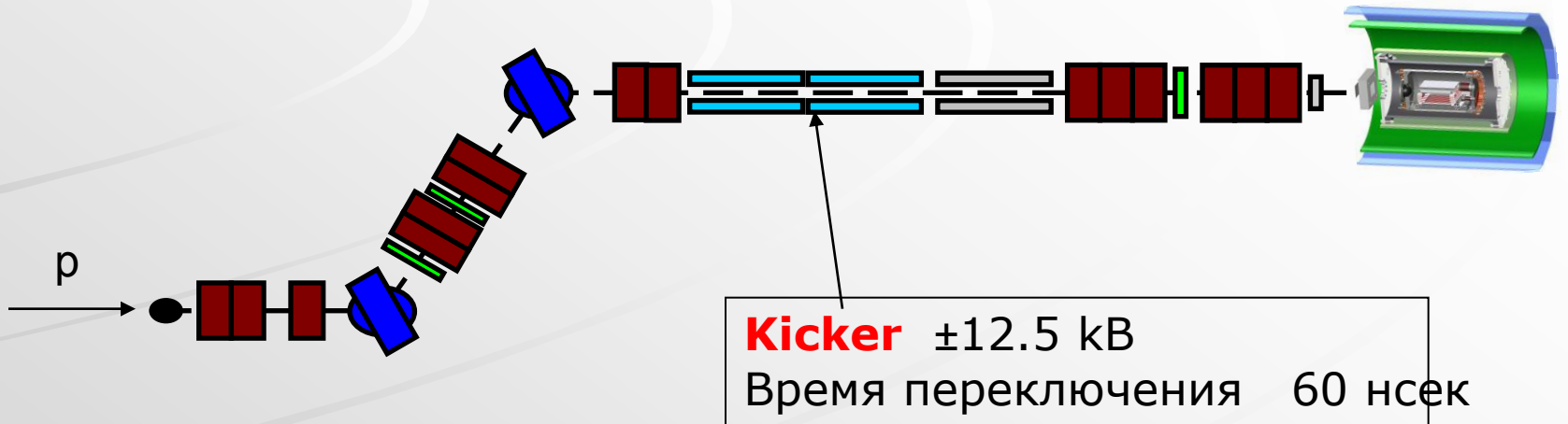


600 MeV protons
3 mA extracted proton beam
100% duty factor

Циклотрон PSI сегодня самый мощный в мире ускоритель протонов средних энергий

В PSI создан уникальный по интенсивности и качеству мюонный канал

«Мюон по запросу» «Muon-on-Request»



Средняя частота следования мюонов в пучке ~ 100 kHz.

Требуется попадание в камеру только одного мюона за период измерения - $25\mu\text{s}$.

Скорость набора статистики при использовании Kicker увеличилась в три раза.

Программа физических исследований

Исследование мюонного катализа ядерного dd- и dt- синтеза
1979-1987 (эксперименты в ПИЯФ)
1987- 1996 (эксперименты в PSI)

Исследование ядерного мюонного захвата легкими ядрами

(протон, дейтрон, He3)

$\mu^- + 3\text{He} \rightarrow 3\text{H} + \nu_\mu$ (1993 г завершен)

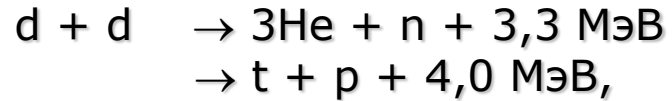
$\mu^- + \text{p} \rightarrow \text{n} + \nu_\mu$ (1997-2007 анализ завершен в 2012 г)

$\mu^- + \text{d} \rightarrow \text{n} + \text{n} + \nu_\mu$ (ведутся измерения)



Исследование мюонного катализа ядерного dd - и dt - синтеза

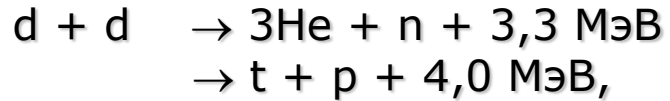
Как преодолеть Кулоновский барьер ?



Для преодоления **Кулоновского барьера** нужна энергия $\sim 5 \text{ кэВ}$ (50 млн градусов)

Солнце, бомба, термоядерные установки

Как преодолеть Кулоновский барьер ?

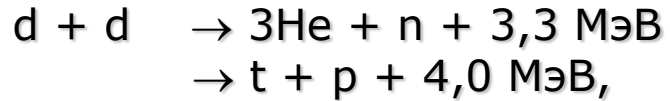


Для преодоления **Кулоновского барьера** нужна энергия $\sim 5 \text{ кэВ}$ (50 млн градусов)

Солнце, бомба, термоядерные установки

Холодный синтез ???

Как преодолеть Кулоновский барьер ?

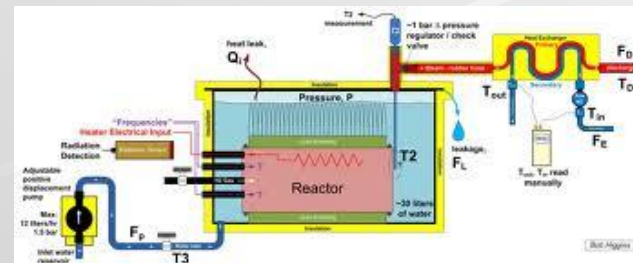


Для преодоления **Кулоновского барьера**

нужна энергия $\sim 5 \text{ кэВ}$ (50 млн градусов)

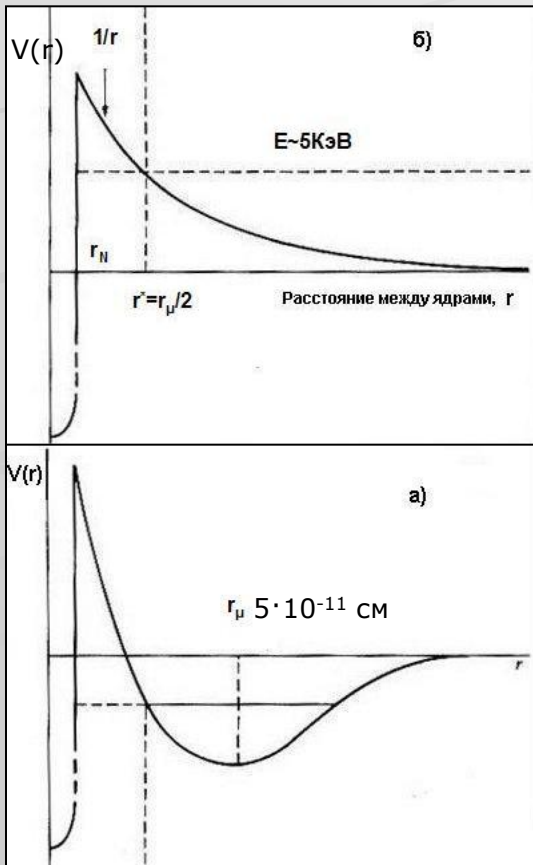
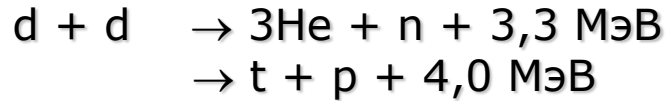
Солнце, бомба, термоядерные установки

Холодный синтез ???



Rossi 2012 год H2+Ni

Мюонный катализ dd - и dt - синтеза

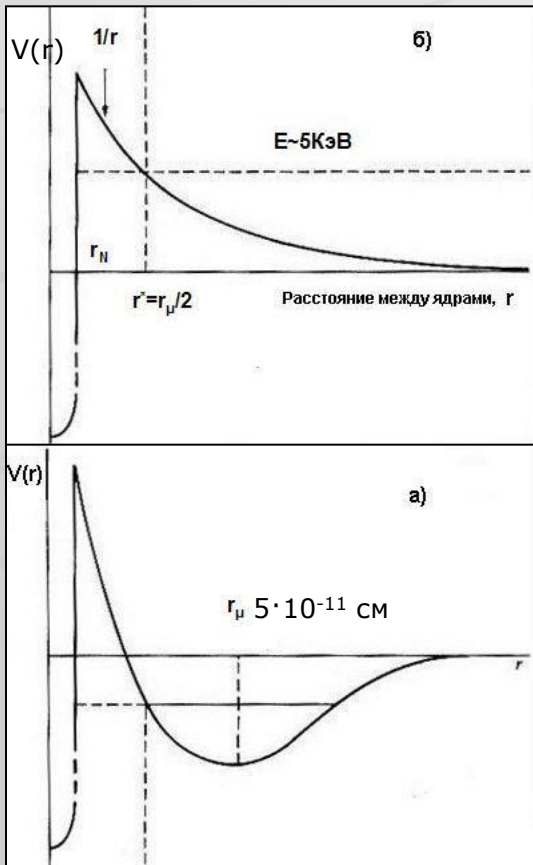
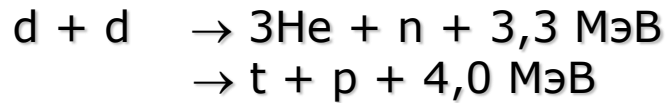


1948 год

А.Д.Сахаров

Если образуется молекула $(dd\mu)^+$ аналог $(dde)^+$ т.е. $(D_2)^+$, то барьер резко снижается и синтез идет со скоростью $\sim 10^{-10}$ сек

Мюонный катализ dd - и dt - синтеза



1954 год

Я.Б.Зельдович

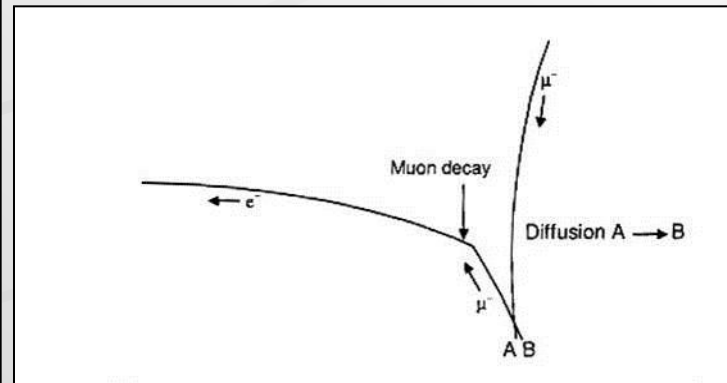
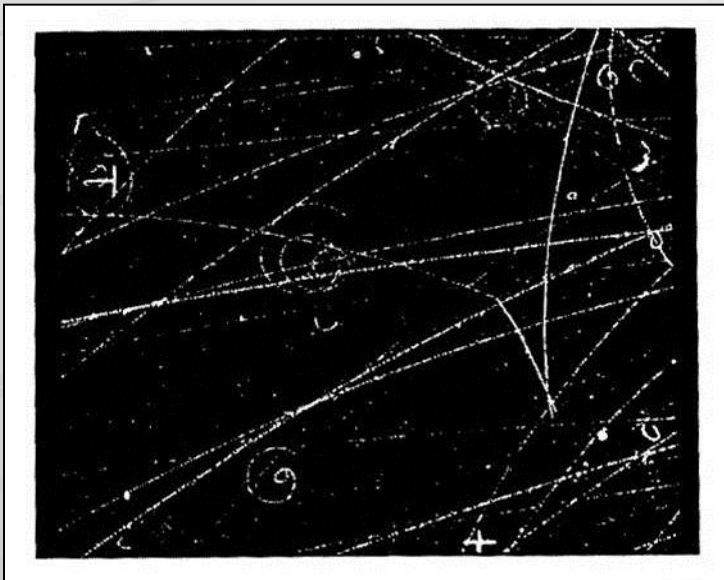
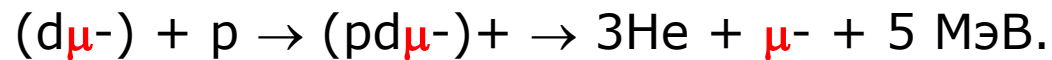
предложил механизм образования $(dd\mu^-)^+$:



Открытие мюонного катализа ядерного синтеза.

1956 год

L.Alvarez впервые зарегистрировал реакцию μ -синтеза



New York Times

“Новый революционный метод получения энергии.....”

Проблемы на пути практического использования мюонного катализа

Для воспроизводства энергии, затраченной на получение мюона,
необходимо не менее 2000 циклов катализа



Проблемы на пути практического использования мюонного катализа

Для воспроизводства энергии, затраченной на получение мюона, необходимо не менее 2000 циклов катализа

Проблема №1

Измеренная скорость реакции оказалась малой, **в соответствии с теорией Зельдовича:**

за время жизни мюона (2.2 микросекунды) он успевает произвести не более одного цикла катализа.

Проблемы на пути практического использования мюонного катализа

Для воспроизводства энергии, затраченной на получение мюона, необходимо не менее 2000 циклов катализа

Проблема №1

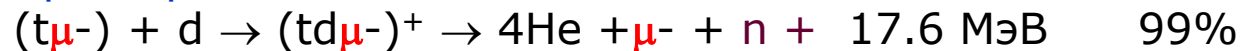
Измеренная скорость реакции оказалась малой, **в соответствии с теорией Зельдовича:**

за время жизни мюона (2.2 микросекунды) он успевает произвести не более одного цикла катализа.

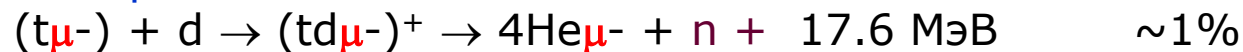
Проблема №2

Прилипание мюона к ядру гелия:

Кроме реакции



идет реакция



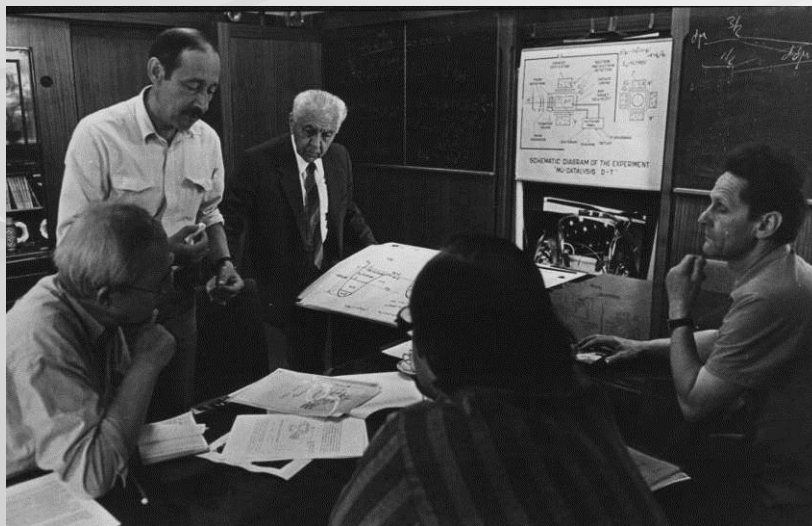
Неожиданное наблюдение

1964 год

Дубна. Группа В.П.Джелепова

Скорость $dd\mu$ синтеза, измеренная при температуре 240 К, оказалась существенно выше измеренной Альварезом при температуре жидкого водорода.

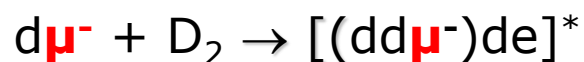
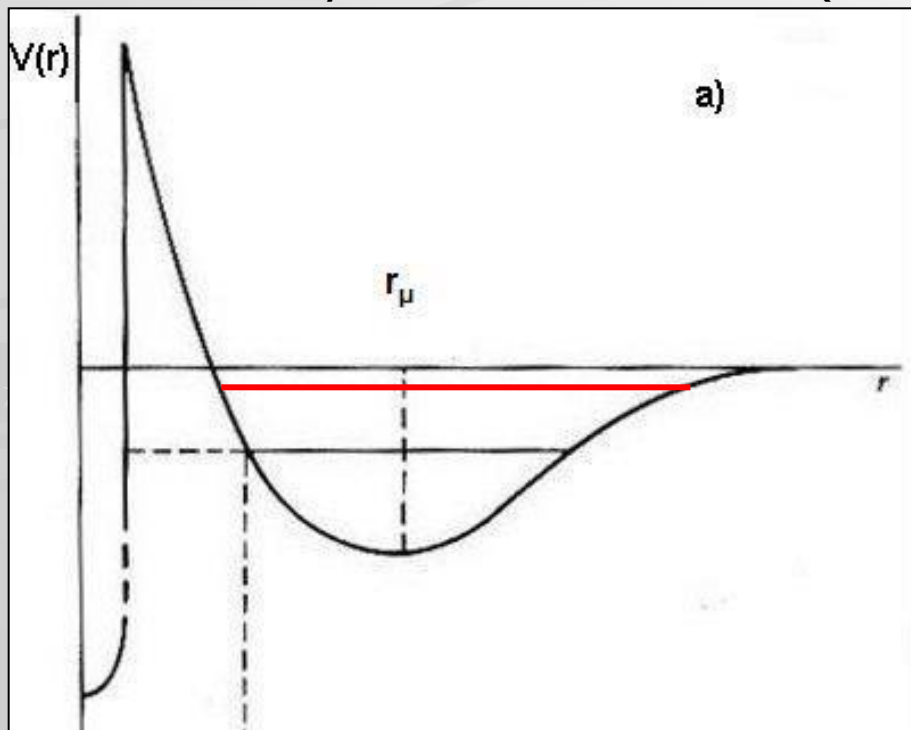
По теории Зельдовича не должно быть заметной зависимости от температуры



Резонансное образование $dd\mu^-$ - и $dt\mu^-$ -молекул

1966 год

Е.А.Весман сформулировал гипотезу резонансного образования $dd\mu^-$ -молекулы в случае, если выделение энергии при образовании этой молекулы меньше 4.5 эВ (энергия связи D_2 молекулы)

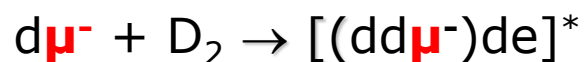
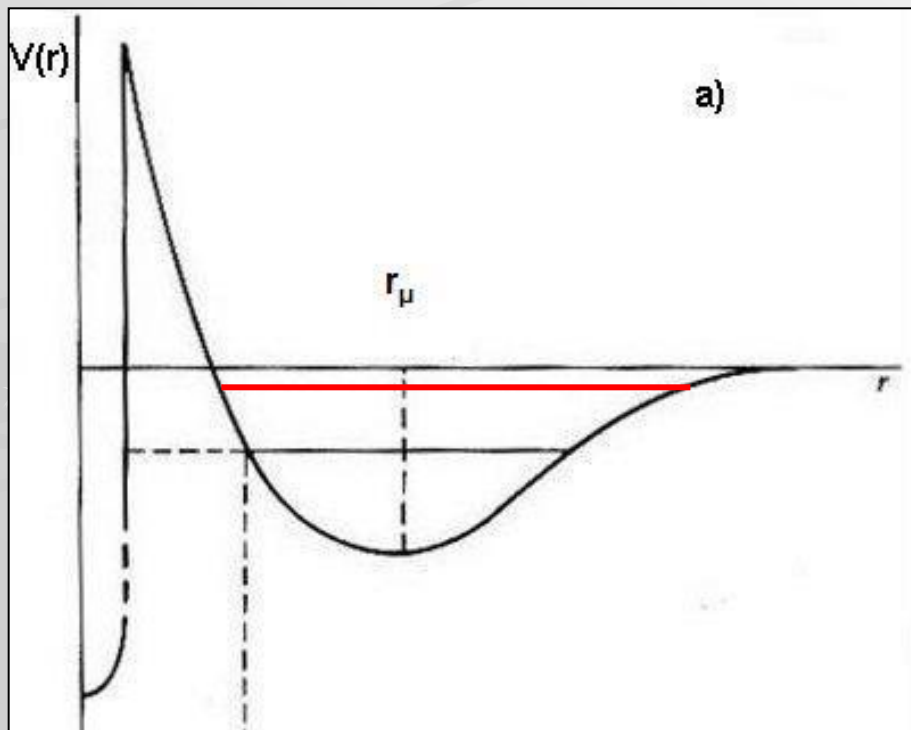


Процесс зависит от температуры

Резонансное образование $dd\mu^-$ - и $dt\mu^-$ -молекул

1966 год

Е.А.Весман сформулировал гипотезу резонансного образования $dd\mu^-$ -молекулы в случае, если выделение энергии при образовании этой молекулы меньше 4.5 эВ (энергия связи D_2 молекулы)



Процесс зависит от температуры

Но существует ли такой уровень в $dd\mu^-$ -молекуле с энергией связи $\epsilon^*(dd\mu^-) < 4.5$ эВ ???

Слабосвязанные состояния в $dd\mu$ - и $dt\mu$ - молекулах

1977 год

Группа Л.И.Пономарева
(расчет)

$$\varepsilon^*(dd\mu) \approx -2 \text{ эВ}$$

$$\varepsilon^*(dt\mu) \leq -1 \text{ эВ}$$



Слабосвязанные состояния в $dd\mu$ - и $dt\mu$ - молекулах

1977 год

Группа Л.И.Пономарева
(расчет)

$$\varepsilon^*(dd\mu) \approx -2 \text{ эВ}$$

$$\varepsilon^*(dt\mu) \approx -1 \text{ эВ}$$

Современные расчеты

$$\varepsilon^*(dd\mu) = -1.965 \text{ эВ}$$

$$\varepsilon^*(dt\mu) = -0.660 \text{ эВ}$$



Слабосвязанные состояния в $dd\mu$ - и $dt\mu$ - молекулах

1977 год

Группа Л.И.Пономарева
(расчет)

$$\varepsilon^*(dd\mu) \approx -2 \text{ эВ}$$

$$\varepsilon^*(dt\mu) \approx -1 \text{ эВ}$$

Современные расчеты

$$\varepsilon^*(dd\mu) = -1.965 \text{ эВ}$$

$$\varepsilon^*(dt\mu) = -0.660 \text{ эВ}$$

1977 год

**С.С.Герштейн,
Л.И.Пономарев**

Используя модель Весмана,
описали результат Дубны и
**предсказали очень высокую
скорость $dt\mu$ - катализа.**

1978 год

Мю- каталитный бум

Эксперименты на всех существующих мюонных каналах:

Дубна, PSI, Канада, США, Япония

Теоретики со всего мира

До ста публикаций в год

Специальный журнал

Конференции

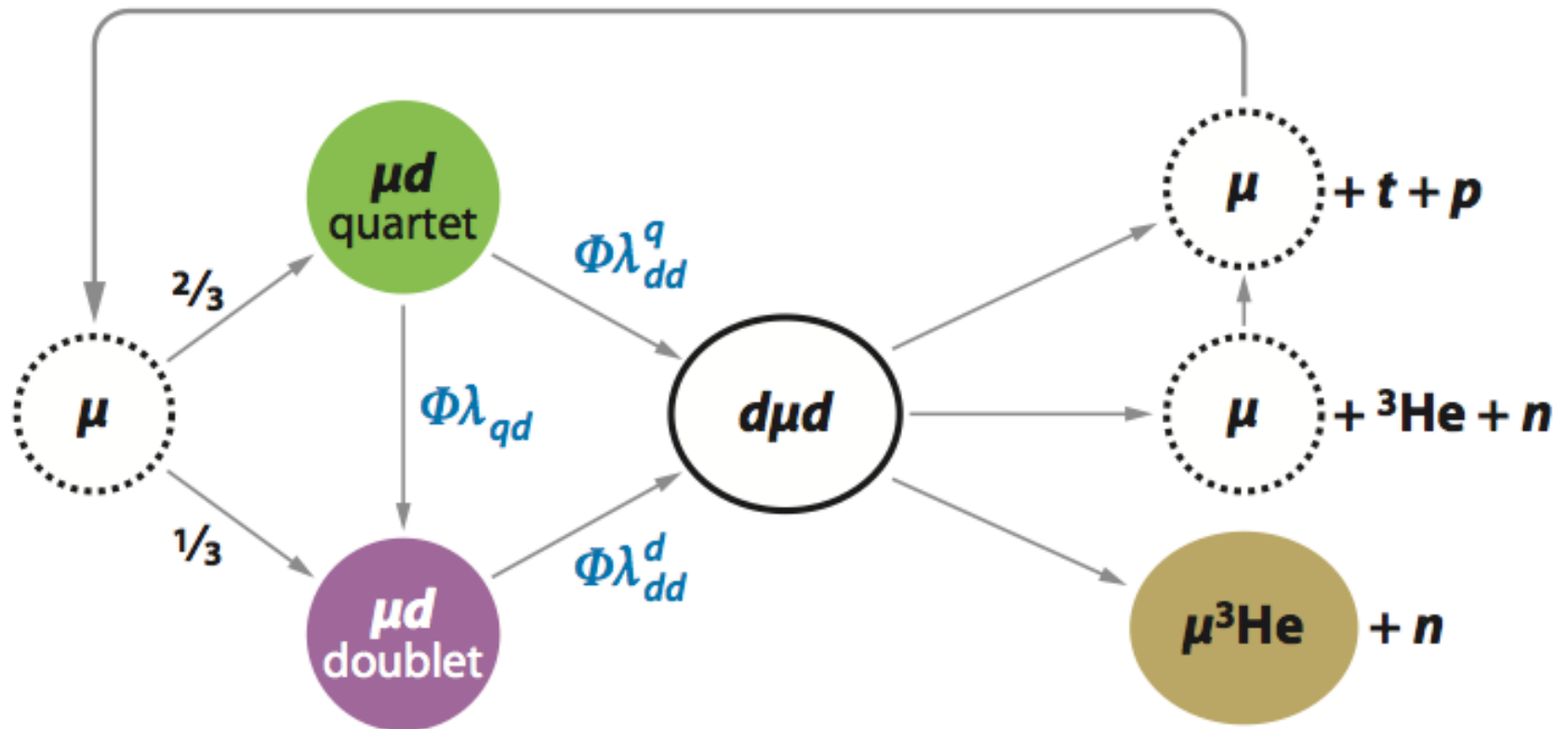
ПИЯФ включился в эту программу в 1979 году

1979-1987 Разработка экспериментального метода

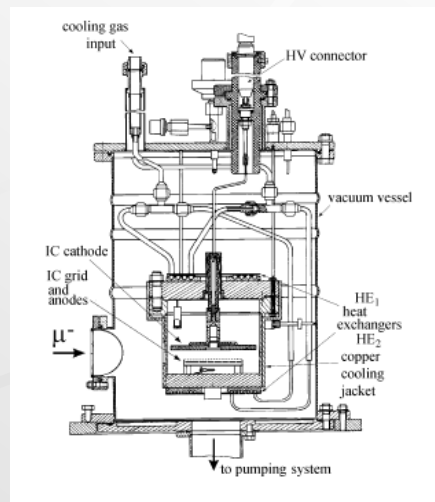
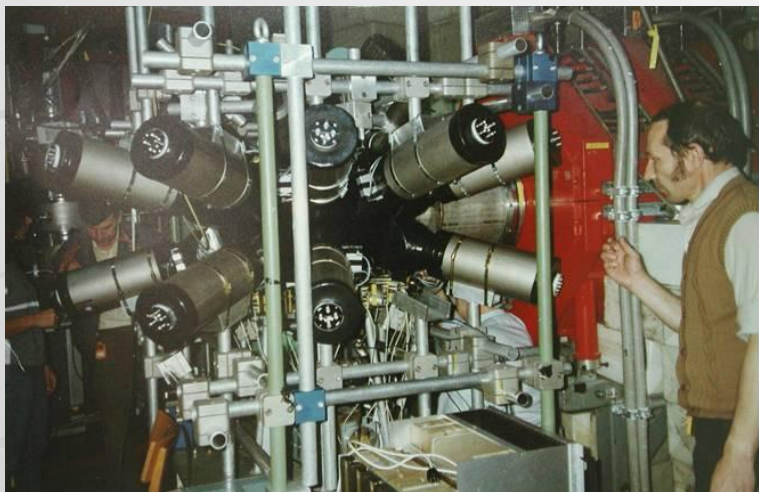
и первые исследования $dd\mu$ -синтеза в ПИЯФ

1987-1996 Исследование $dd\mu$ - и $dt\mu$ -синтеза в PSI

Разработанный в ПИЯФ экспериментальный метод позволяет регистрировать все каналы $dd\mu$ -синтеза с высокой абсолютной точностью в диапазоне температур 30К – 350К



Гатчинская установка для исследования мюонного катализа dd - и dt - синтеза на мюонном канале Швейцарской мезонной фабрики.



D2 газ
Давление
до 80 атм

T = 30K - 350K

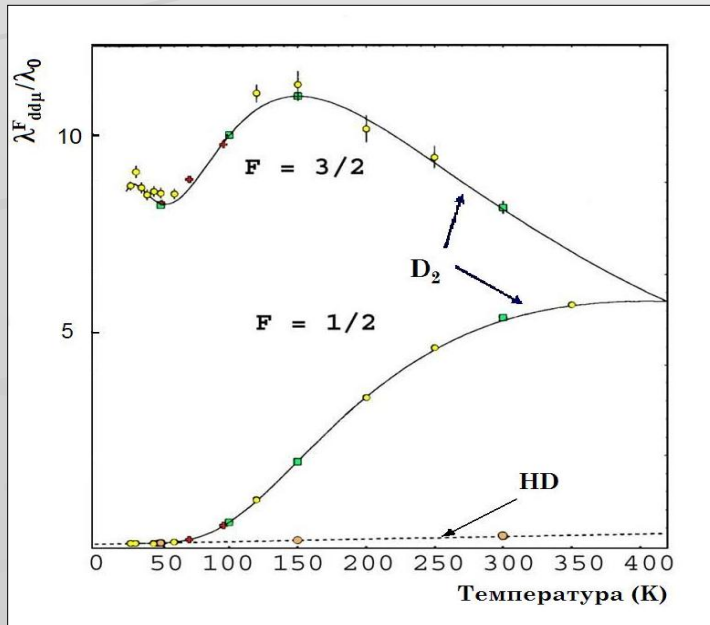
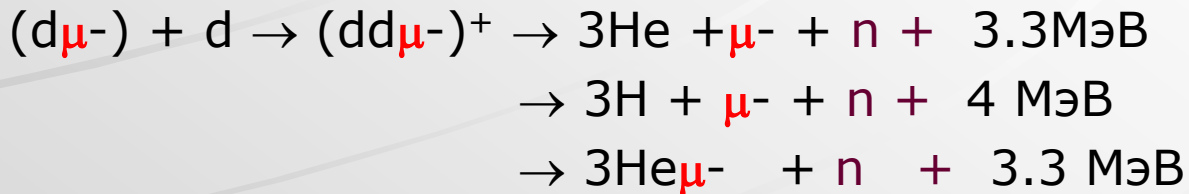
Фиксация температуры
± 0.5K

С помощью этой установки были измерены все основные параметры $dd\mu$ -синтеза,.

Полученные результаты составляют сегодня основную базу мировых данных по $dd\mu$ -синтезу, используемую для сравнения с теорией мю-катализа

dd μ - синтез

Сравнение с теорией



Энергия первого уровня dd μ - молекулы

$$\varepsilon^*(\text{fit}) = -1,9651(7)\text{ eV}$$

$$\varepsilon^*(\text{теория}) = -1.9646(5)\text{ eV}$$

Вероятность прилипания мюона к ядру ^3He

$$\omega_d(\text{эксп}) = 12.24(6)\%$$

$$\omega_d(\text{теория}) = 12.3(4)\%$$

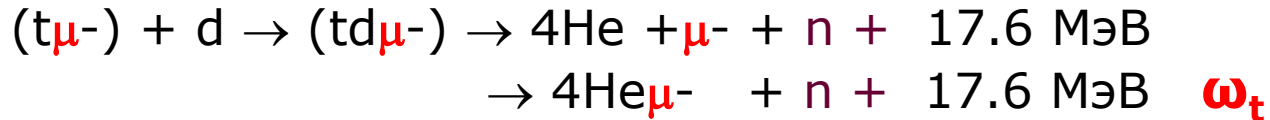
Единственное расхождение с теорией:

вероятность спин-флипа в столкновениях $d\mu$ атомов с D_2 молекулой оказалась почти в два раза меньше теоретической.

Линии – фит экспериментальных данных
теоретическими распределениями.
М.Файфман

$dt\mu$ - синтез

предельное число циклов катализа



Высокая скорость образования $td\mu$ -молекулы.

За время жизни мюона могло бы быть **около 300 циклов катализа**

Более сильным оказалось ограничение по прилипанию мюона к 4He .

Результат прямого измерения вероятности прилипания в нашем эксперименте:

$$\omega_t(\text{экспер}) = 0.58(4)\%$$

Т.е. предельное число циклов $td\mu$ -катализа есть 175

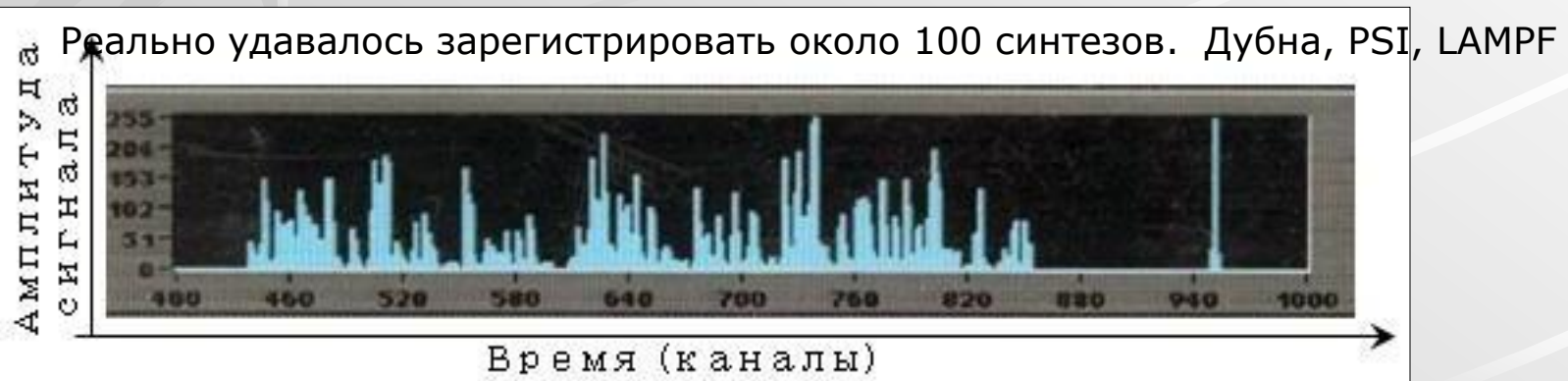
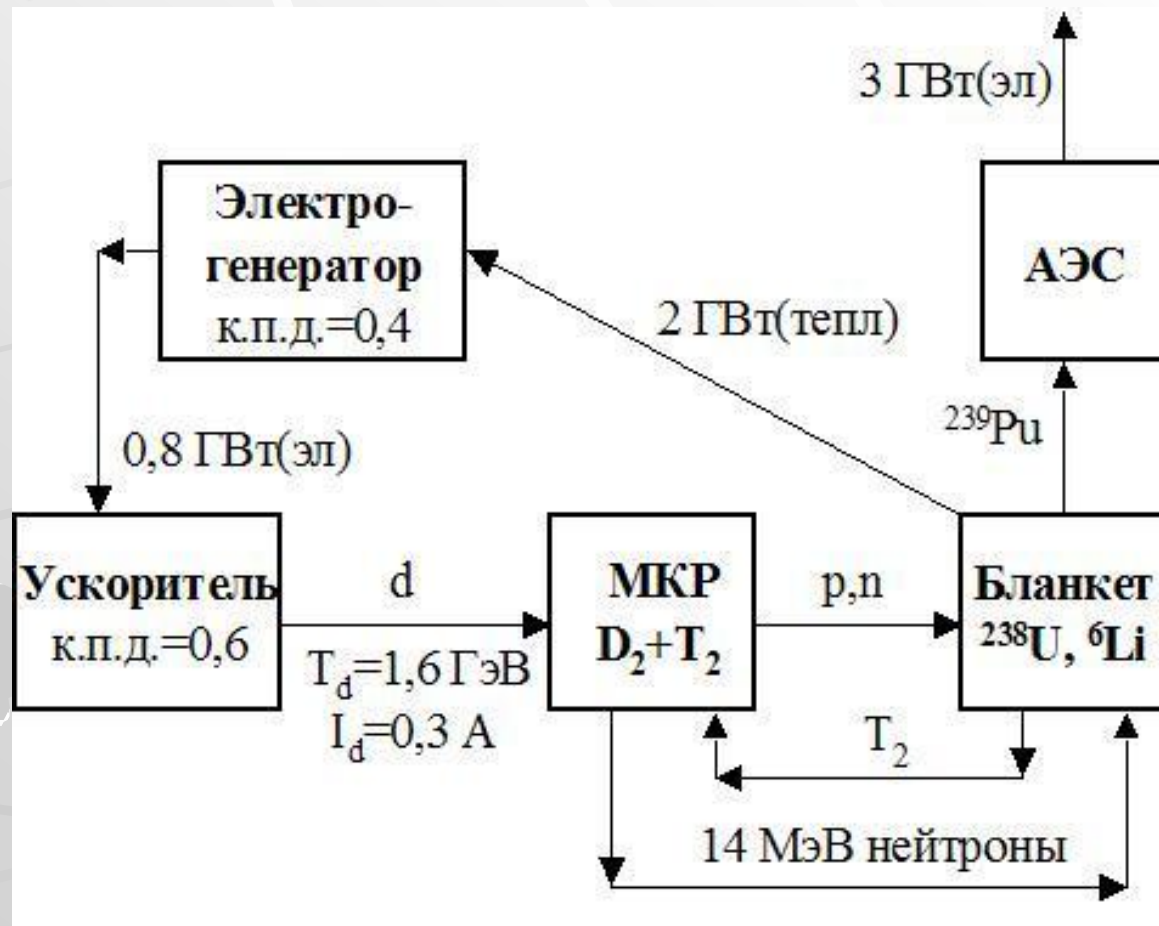


Схема гибридного мезокаталитического реактора Ю.В.Петрова



В данной схеме предполагается использовать сильноточный ускоритель дейтронов на энергию 1.6 ГэВ с токами в пучке $\sim 0,3 \text{ А}$. В этом случае тепловая энергия, выделяемая за счет деления ^{238}U в blankets составит 2 ГВт , а количество наработанного плутония-239 будет достаточным для питания четырёх АЭС, работающих на тепловых нейтронах, каждая из которых отдаёт в сеть $\sim 0,8 \text{ ГВт}$.

Итоговые публикации по мюонному катализу

- **High Precision Study of Muon Catalyzed Fusion in D2 and HD Gases**

Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра, ОИЯИ, том 42, 361-414 (2011)

D.Balin, V.Ganzha, S.Kozlov, E.Maev, G.Petrov, M.Soroka, G.Shapkin, G.Semenchuk, V.Trofimov, A.Vasiliev, A.Vorobyov, N.Voropaev (ПИЯФ), M.Faifman (КИ, Москва).

C.Petitjean, B.Gartner, B.Clauss, J.Marton, J.Zmeskal, N.Case, K.Crowe, P.Rammel, F.Hartmann (PSI, Wien, Berkely, Munich).

- **Мюонный катализ реакций ядерного синтеза**

А.А.Воробьев. Сообщение на заседании Президиума РАН в марте 2004 года.
Вестник РАН, том 75 №6, 512-521 (2005)

Эксперимент MuCap

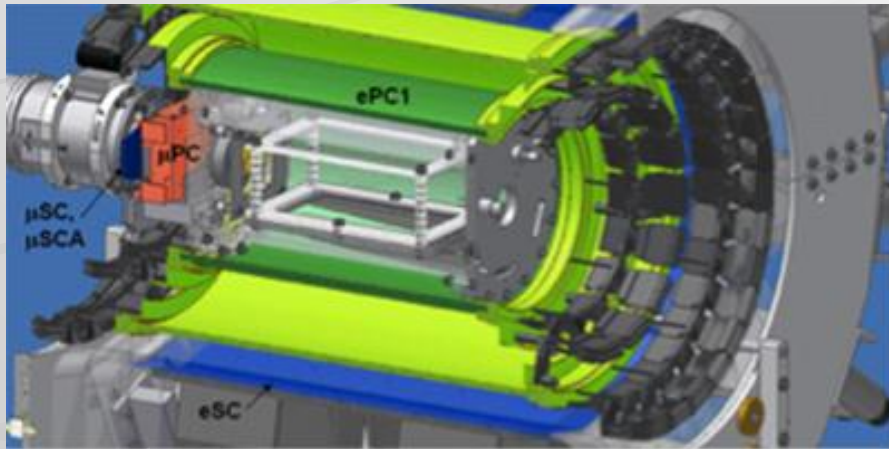
$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$$

PHYSICS

spotlighting exceptional research

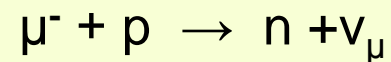
American Physical Society

Synopsis: Sizing Up Quark Interactions



[Phys. Rev. Lett. **110**, 012504 \(2013\)](#)

Published January 3, 2013



**Measurement of Muon Capture on the Proton to 1% Precision
and Determination of the Pseudoscalar Coupling g_P**

V. A. Andreev et al. (MuCap Collaboration)

PHYSICS

spotlighting exceptional research

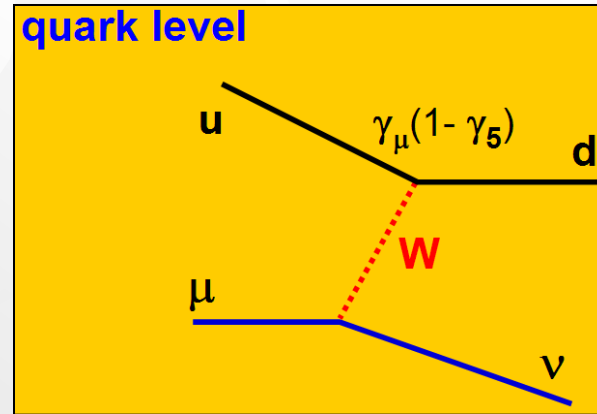
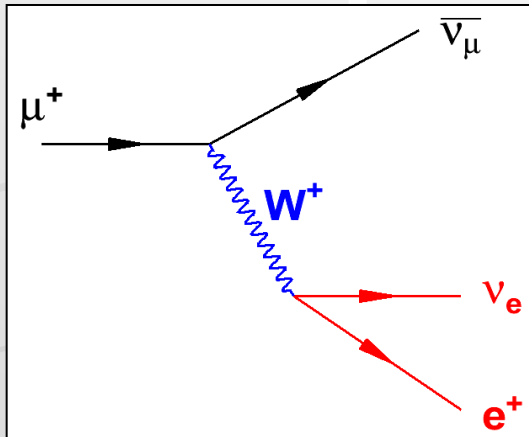
American Physical Society

Even though the radioactive decay of nuclei is mainly driven by the weak force, interactions between the quarks that make up the protons and neutrons in the nucleus can also affect the process. Calculating these effects with quantum chromodynamics (QCD), the theory describing the strong force interactions between quarks, is, however, mathematically cumbersome at the low energies associated with the nucleus. Instead, calculations are more tractable using an effective QCD theory, in which interactions are between bound quarks (mesons, protons and neutrons). Now, researchers running the muon capture (MuCap) experiment at the Paul Scherrer Institute in Switzerland have **confirmed a long-standing prediction of the theory, known as chiral perturbation theory, boosting confidence that it can be used to accurately describe quark interactions in simple nuclei.** Muon capture is like a beta-decay process run in reverse: a muon (a particle with the same charge as an electron, but 200 times the mass) interacts with a proton to produce a neutron and a neutrino. Among other factors, a dimensionless quantity called the “pseudoscalar coupling,” determines the rate of the reaction.

Chiral perturbation theory says the coupling factor has a value of $G_p=8.26$, without a lot of wiggle room. But experimental data going back to the 1960s have shown the coupling could be anywhere between 2 and 14. The MuCap collaboration, which measures the rate of the muon capture process by stopping a beam of muons in a low-density gas of pure hydrogen, has analyzed 30 terabytes of data to extract the pseudoscalar coupling with unprecedented precision. The value of their result, reported in *Physical Review Letters*, is 8.06 ± 0.55 —in excellent agreement with the theoretical prediction.

– Jessica Thomas

На уровне кварков слабое взаимодействие универсально



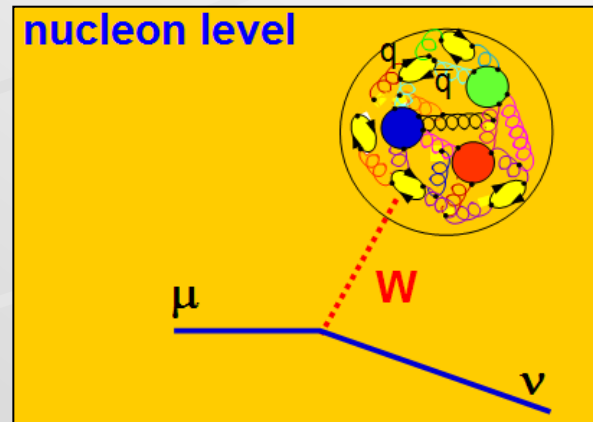
А что происходит со слабым взаимодействием внутри нуклона?

$$n \rightarrow p + e^- + \text{anti } \nu_e$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow n + \mu$$

$$\text{anti } \nu_e + p \rightarrow n + e^+$$

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$$



chiral perturbation theory

В Стандартной Модели слабое взаимодействие с участием нуклонов описывается четырьмя формфакторами

$$V_\alpha = g_V(q^2) \gamma_\alpha + \frac{i g_M(q^2)}{2 M_N} \sigma_{\alpha\beta} q^\beta$$
$$A_\alpha = g_A(q^2) \gamma_\alpha \gamma_5 + \frac{g_P(q^2)}{m_\mu} q_\alpha \gamma_5$$

Векторный	$g_V(q^2)$
Магнитный	$g_M(q^2)$
Аксиальный	$g_A(q^2)$
Псевдоскалярный	$g_P(q^2)$



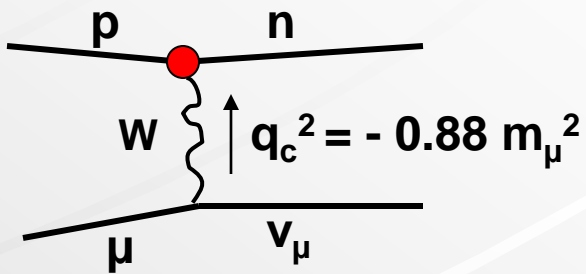
В Стандартной Модели слабое взаимодействие в нуклонной системе описывается четырьмя формфакторами

$$V_\alpha = g_V(q^2) \gamma_\alpha + \frac{i g_M(q^2)}{2 M_N} \sigma_{\alpha\beta} q^\beta$$

$$A_\alpha = g_A(q^2) \gamma_\alpha \gamma_5 + \frac{g_P(q^2)}{m_\mu} q_\alpha \gamma_5$$

- Векторный $g_V(q^2)$
- Магнитный $g_M(q^2)$
- Аксиальный $g_A(q^2)$
- Псевдоскалярный $g_P(q^2)$

μ p-захват дает уникальную возможность измерить величину $g_P(q_c^2 = -0.88 m_\mu^2)$



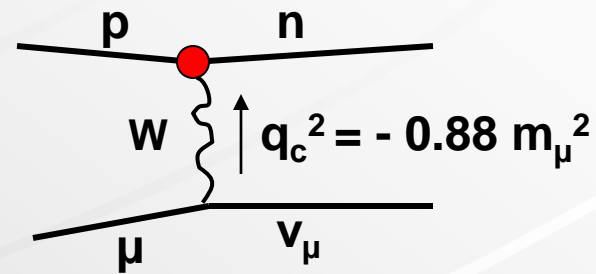
В Стандартной Модели слабое взаимодействие в нуклонной системе описывается четырьмя формфакторами

$$V_\alpha = g_V(q^2) \gamma_\alpha + \frac{i g_M(q^2)}{2 M_N} \sigma_{\alpha\beta} q^\beta$$

$$A_\alpha = g_A(q^2) \gamma_\alpha \gamma_5 + \frac{g_P(q^2)}{m_\mu} q_\alpha \gamma_5$$

- Векторный $g_V(q^2)$
- Магнитный $g_M(q^2)$
- Аксиальный $g_A(q^2)$
- Псевдоскалярный $g_P(q^2)$

μ р-захват дает уникальную возможность измерить величину $g_P(q_c^2 = -0.88 m_\mu^2)$



Предыдущие измерения $g_P(q_c^2) = \text{от } 2 \text{ до } 14$

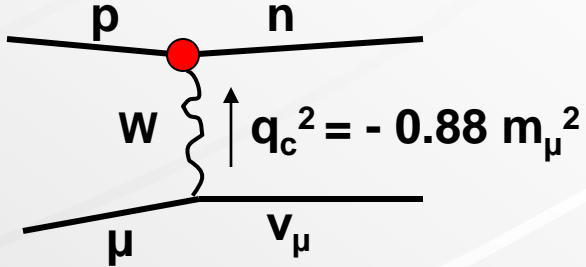
В Стандартной Модели слабое взаимодействие в нуклонной системе описывается четырьмя формфакторами

$$V_\alpha = g_V(q^2) \gamma_\alpha + \frac{i g_M(q^2)}{2 M_N} \sigma_{\alpha\beta} q^\beta$$

$$A_\alpha = g_A(q^2) \gamma_\alpha \gamma_5 + \frac{g_P(q^2)}{m_\mu} q_\alpha \gamma_5$$

- Векторный $g_V(q^2)$
- Магнитный $g_M(q^2)$
- Аксиальный $g_A(q^2)$
- Псевдоскалярный $g_P(q^2)$

μ p-захват дает уникальную возможность измерить величину $g_P(q_c^2 = -0.88 m_\mu^2)$



Предыдущие измерения $g_P(q_c^2) =$ от 2 до 14

$$g_P(\text{MuCap}) = 8.06 \pm 0.55$$

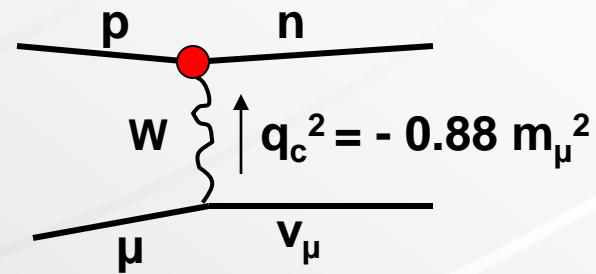
В Стандартной Модели слабое взаимодействие в нуклонной системе описывается четырьмя формфакторами

$$V_\alpha = g_V(q^2) \gamma_\alpha + \frac{i g_M(q^2)}{2 M_N} \sigma_{\alpha\beta} q^\beta$$

$$A_\alpha = g_A(q^2) \gamma_\alpha \gamma_5 + \frac{g_P(q^2)}{m_\mu} q_\alpha \gamma_5$$

- Векторный $g_V(q^2)$
- Магнитный $g_M(q^2)$
- Аксиальный $g_A(q^2)$
- Псевдоскалярный $g_P(q^2)$

μ -захват дает уникальную возможность измерить величину $g_P(q_c^2 = -0.88 m_\mu^2)$



Предыдущие измерения $g_P(q_c^2) = \text{от } 2 \text{ до } 14$

$$g_P(\text{MuCap}) = 8.06 \pm 0.55$$

$$g_P(\text{theory}) = 8.26 \pm 0.23$$

"....boosting confidence that the **chiral perturbation theory** can be used to accurately describe quark interactions in simple nuclei."

Из поздравлений внутри MuCap коллаборации

“.....Success of our experiment is the result of lucky combination of several unique factors:

- unique experimental method,
- unique muon channel,
- unique MuCap collaboration.”

MuCap collaboration

Measurement of Muon Capture on the Proton to 1% Precision and Determination of the Pseudoscalar Coupling g_P

V.A. Andreev,¹ T.I. Banks,² R.M. Carey,³ T.A. Case,² S.M. Clayton,⁴ K.M. Crowe*,² J. Deutsch*,⁵ J. Egger,⁶ S.J. Freedman,² V.A. Ganzha,¹ T. Gorringer,⁷ F.E. Gray,^{8,2} D.W. Hertzog,^{4,9} M. Hildebrandt,⁶ P. Kammel,^{4,9} B. Kiburg,^{4,9} S. Knaack,^{4,9} P.A. Kravtsov,¹ A.G. Krivshich,¹ B. Lauss,⁶ K.R. Lynch,³ E.M. Maev,¹ O.E. Maev,¹ F. Mulhauser,^{4,6} C. Petitjean,⁶ G.E. Petrov,¹ R. Prieels,⁵ G.N. Schapkin,¹ G.G. Semenchuk,¹ M.A. Soroka,¹ V. Tishchenko,⁷ A.A. Vasilyev,¹ A.A. Vorobyov,¹ M.E. Vznuzdaev,¹ and P. Winter^{4,9}

(MuCap Collaboration)

¹Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina 188350, Russia

²Department of Physics, University of California, Berkeley, and LBNL, Berkeley, CA 94720, USA

³Department of Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA

⁴Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA

⁵Institute of Nuclear Physics, Université Catholique de Lowain, B-1348, Lowain-la-Neuve, Belgium

⁶Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kentucky, Lexington, KY 40506, USA

⁸Department of Physics and Computational Science, Regis University, Denver, CO 80221, USA

⁹Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA



В списке авторов 13 сотрудников ПИЯФ

Co-spokespersons:

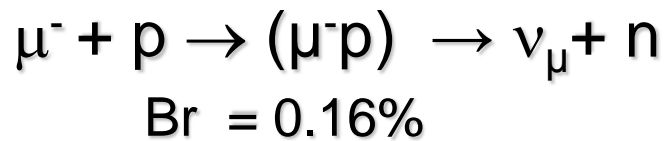
Claude Petitjean (PSI)

Peter Kammel (Univ.Illinois,USA)

Александр Васильев (ПИЯФ)

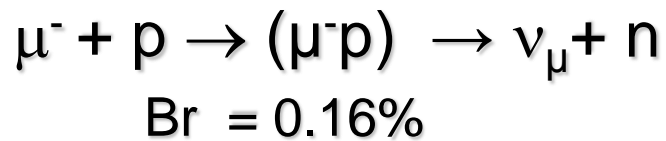
26 лет успешного сотрудничества

Эксперимент *MuCap*



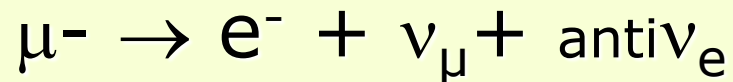
μp -захват дает уникальную возможность измерить величину псевдоскалярного формфактора,
но для этого пришлось решить целый ряд проблем.

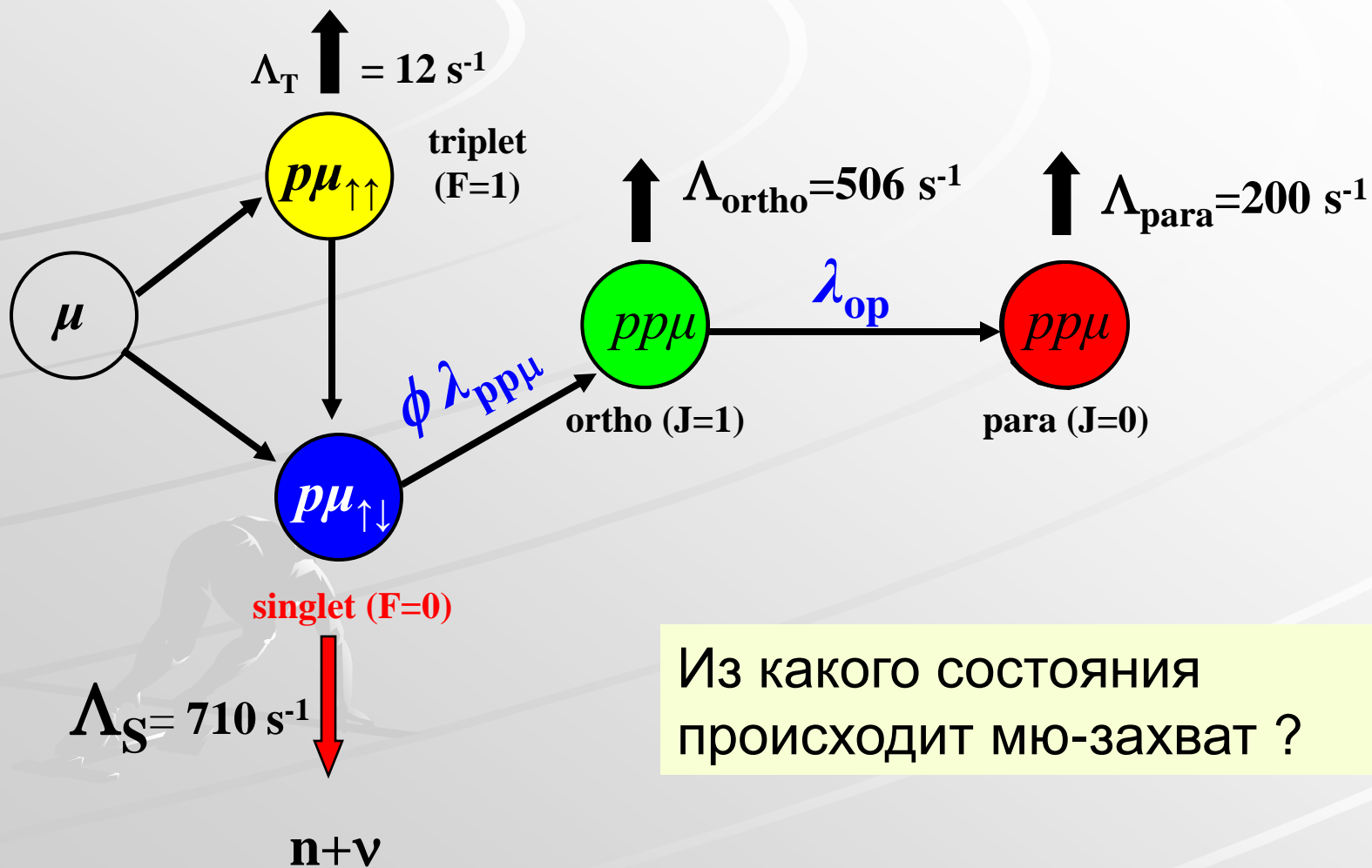
Эксперимент *MuCap*



μ p-захват дает уникальную возможность измерить величину псевдоскалярного формфактора,
но для этого пришлось решить целый ряд проблем.

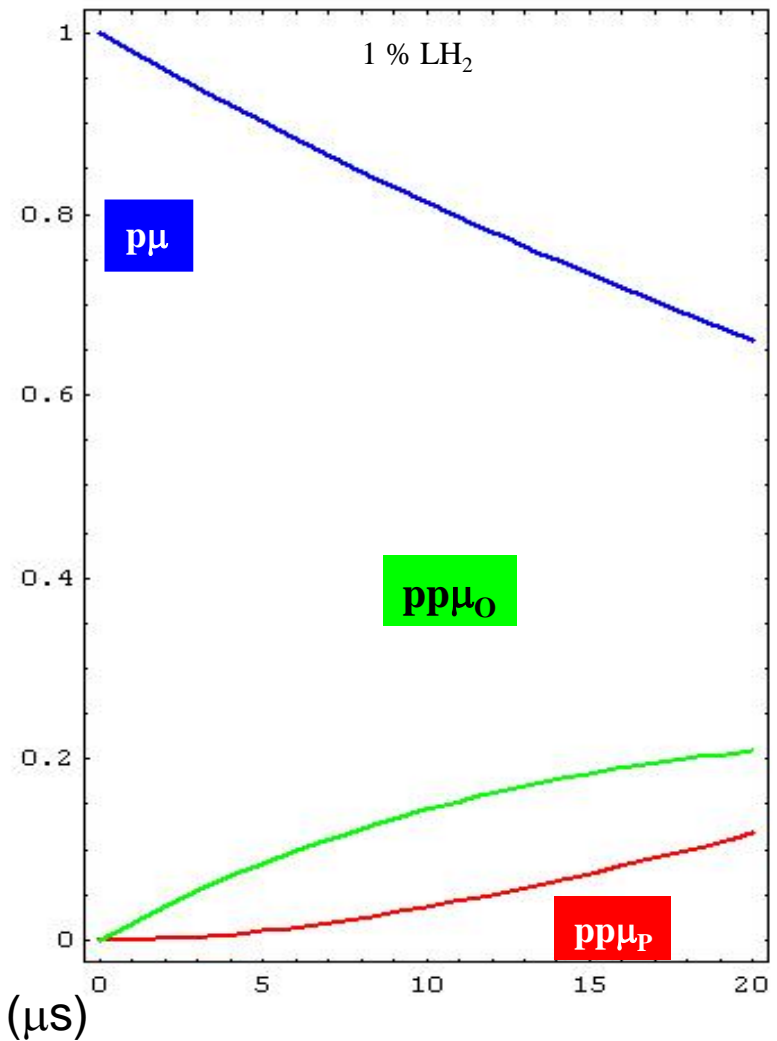
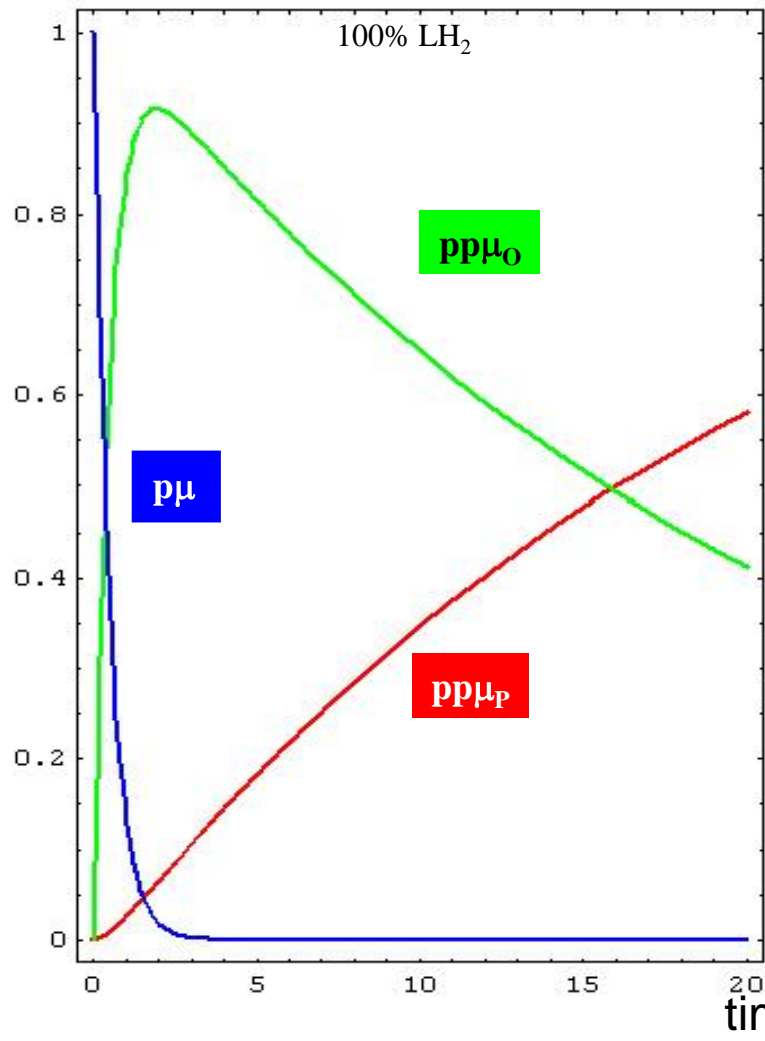
Конкуренция с в 700 раз более интенсивным мюонным распадом





Из какого состояния происходит мю-захват ?

$P\mu$ - $PP\mu(\text{ortho})$ - $PP\mu(\text{para})$ population



Точность измерения скорости мю-захвата

$$\frac{\delta\Lambda_S}{\Lambda_S} = 2\frac{\delta V_{ud}}{V_{ud}} + 0.466\frac{\delta g_v}{g_v} + 0.151\frac{\delta g_m}{g_m} + 1.567\frac{\delta g_a}{g_a} - 0.179\frac{\delta g_p}{g_p}$$

0.45% вклад в погрешность измерения Λ_S

$$\frac{\delta\Lambda_S}{\Lambda_S} \longleftrightarrow \frac{\delta g_p}{g_p}$$

Examples:

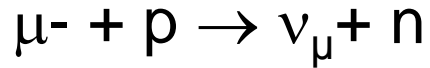
1.0%

6.1%

Теория предсказывает g_p
с ошибкой $\frac{\delta g_p}{g_p} = 3\%$

метод измерения скорости мю-захвата

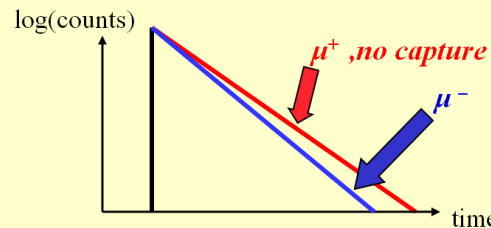
Детектирование нейтрона



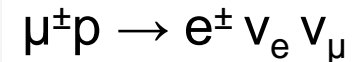
Br = 0.16%

$$\Lambda_C \leftarrow Nn/N\mu$$

Измерение времени жизни мюона



CPT inv

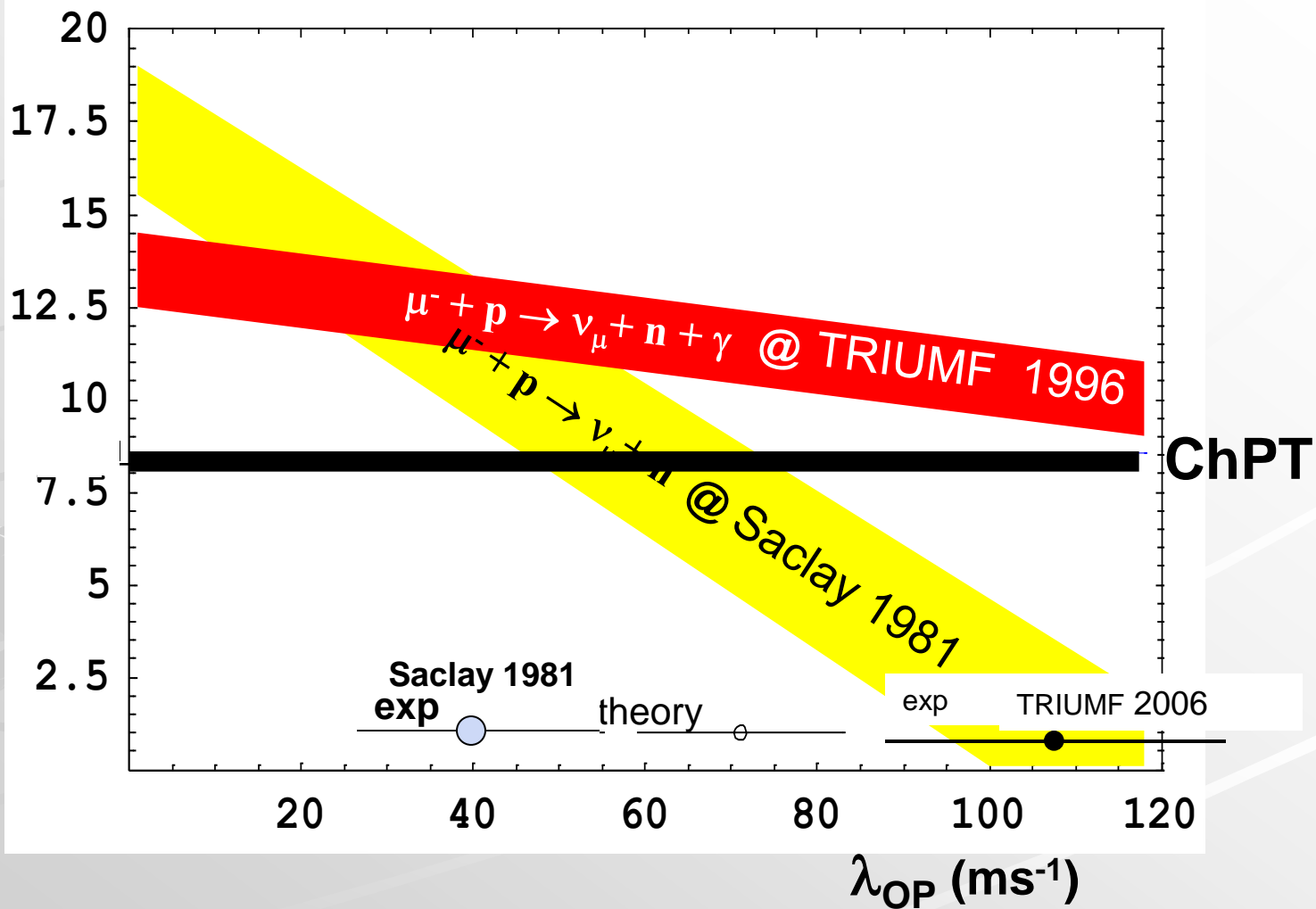


$$\Lambda_C = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$$

Year	Exptl.place	H ₂ target	Λ_C, s^{-1}	Method
1962 *)	Chicago	liquid	428 ± 85	neutron detection
1962	Columbia	liquid	515 ± 85	- " -
1962	CERN	liquid	450 ± 50	- " -
1963	Columbia	liquid	464 ± 42	- " -
1969	CERN	gas, 8 atm	651 ± 57	- " -
1974	Dubna	gas, 41 atm	686 ± 88	- " -
1981	Saclay	liquid	??	Life time measurement

*) First direct observation of μp -capture

g_p



Стратегия эксперимента МиСар



Стратегия эксперимента МиСар

• H₂ газовая мишень 10 atm

$(\mu^-p)_{1S}$



Стратегия эксперимента МиСар

- H₂ газовая мишень 10 atm

$(\mu^-p)_{1S}$

- Измеряется время жизни мюона $\Lambda_S = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$



Стратегия эксперимента МиСар

• H2 газовая мишень 10 atm

$$(\mu^-p)_{1S}$$

• Измеряется время жизни мюона $\Lambda_S = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$

10⁻⁵ точность для μ^- and для μ^+

$$\rightarrow \delta\Lambda_S/\Lambda_S = 1\%$$



Стратегия эксперимента МиСар

• H2 газовая мишень 10 atm

$(\mu^-p)_{1S}$

• Измеряется время жизни мюона $\Lambda_S = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$

10^{-5} точность для μ^- and для μ^+

$\rightarrow \delta\Lambda_S/\Lambda_S = 1\%$

$>10^{10}$ распадов мюона

Высокая скорость набора



Стратегия эксперимента МиСар

• H2 газовая мишень 10 atm

$(\mu^-p)_{1S}$

• Измеряется время жизни мюона $\Lambda_S = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$

10^{-5} точность для μ^- and для μ^+

$\rightarrow \delta\Lambda_S/\Lambda_S = 1\%$

$>10^{10}$ распадов мюона

Высокая скорость набора

• Надежное выделение точки остановки мюона

Нет стеночных эффектов

Стратегия эксперимента МиСар

• H2 газовая мишень 10 atm

$(\mu^-p)_{1S}$

• Измеряется время жизни мюона $\Lambda_S = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$

10⁻⁵ точность для μ^- and для μ^+

→ $\delta\Lambda_S/\Lambda_S = 1\%$

>10¹⁰ распадов мюона

Высокая скорость набора

• Надежное выделение точки остановки мюона

Нет стеночных эффектов

• Низкий уровень фона

< 10⁻⁴

Стратегия эксперимента МиСар

H2 газовая мишень 10 atm

$(\mu^-p)_{1S}$

Имеряется время жизни мюона $\Lambda_S = 1/\tau_{\mu^+} - 1/\tau_{\mu^-}$

10⁻⁵ точность для μ^- and для μ^+

→ $\delta\Lambda_S/\Lambda_S = 1\%$

>10¹⁰ распадов мюона

Высокая скорость набора

Надежное выделение точки остановки мюона

Нет стеночных эффектов

Низкий уровень фона

< 10⁻⁴

Ультра чистый протий

примесь Z>1 меньше 10 ppb (1 ppb = 10⁻⁹)

примесь дейтерия меньше 100 ppb

eSC hodoscope

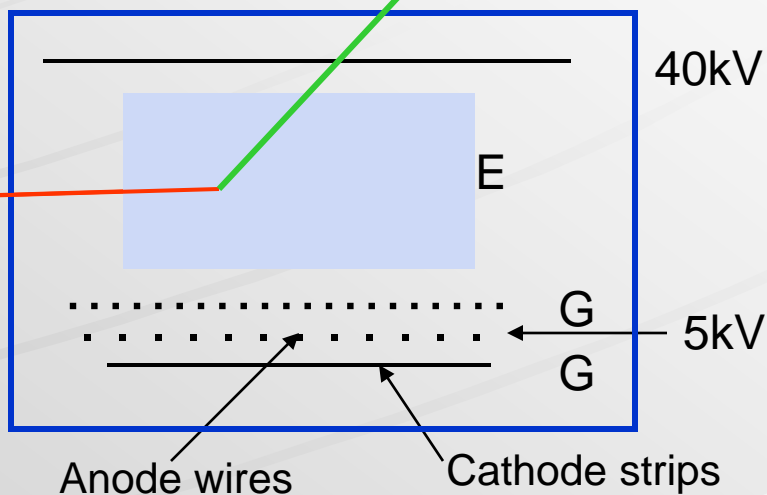
ePC2

ePC1

e

μ SC

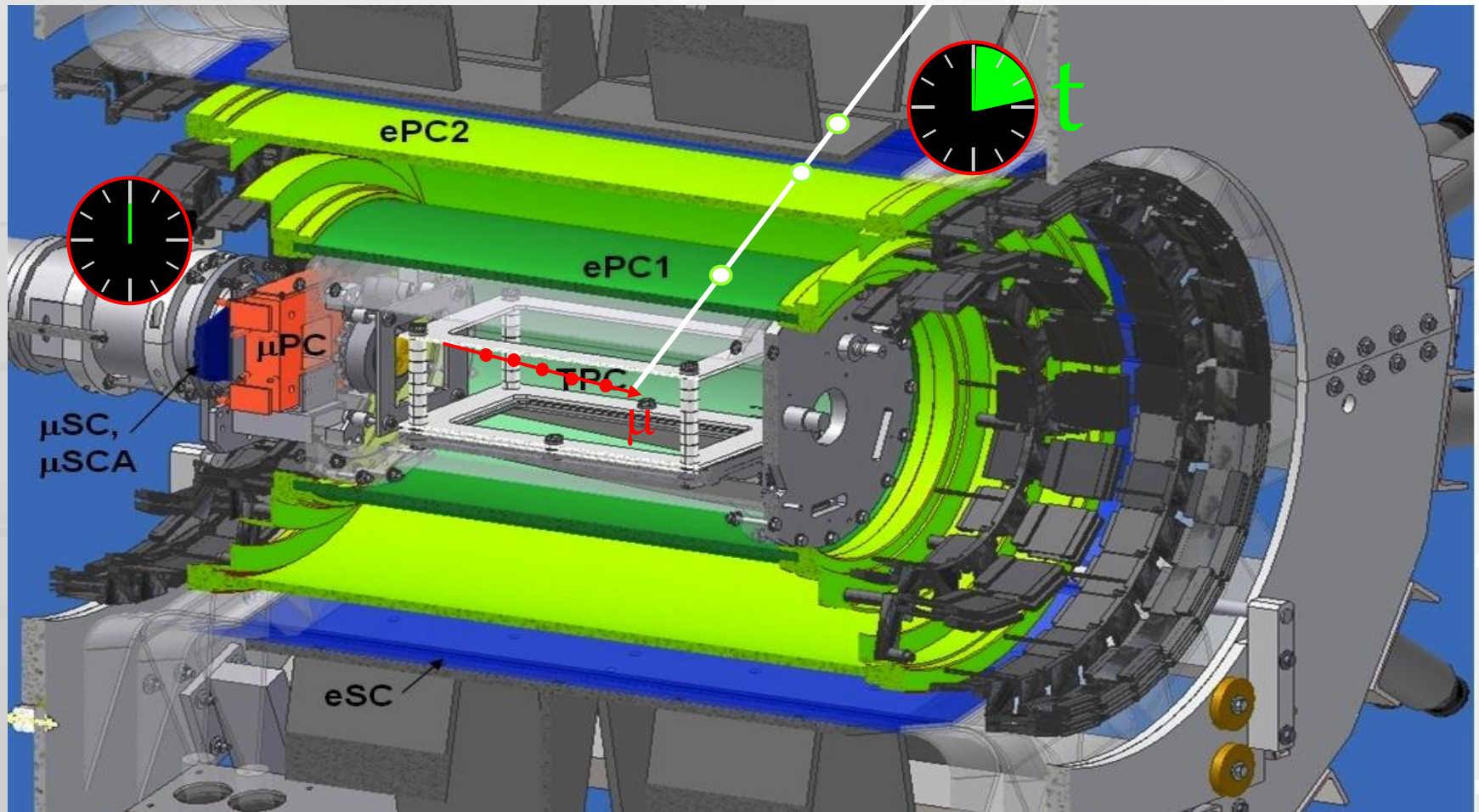
μ PC



$$t_{\mu} = t_{eSC} - t_{\mu SC}$$

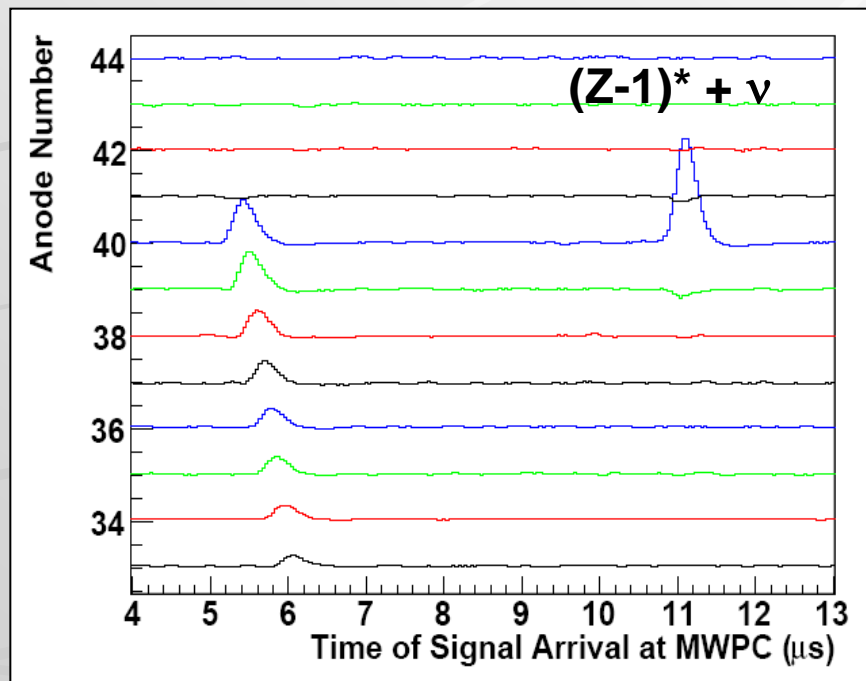
Водородная время-проекционная камера TPC

MuCap Technique

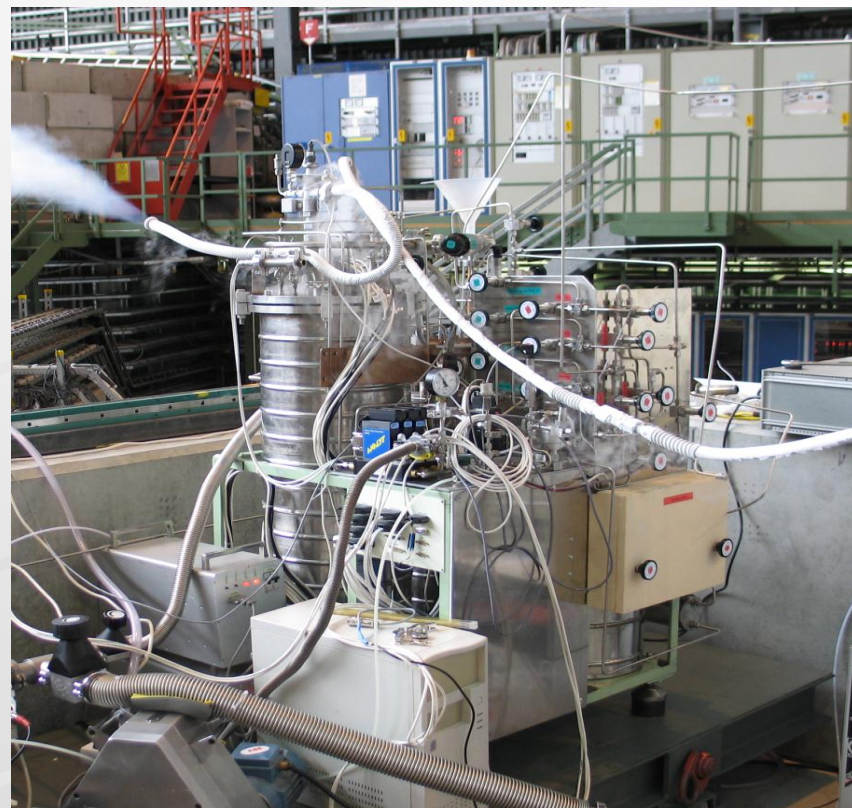




Система циркуляционной очистки



Обеспечена требуемая чистота H_2
Все $Z > 1$ примеси менее 10^{-8}



Степень чистоты контролирует сама ТРС

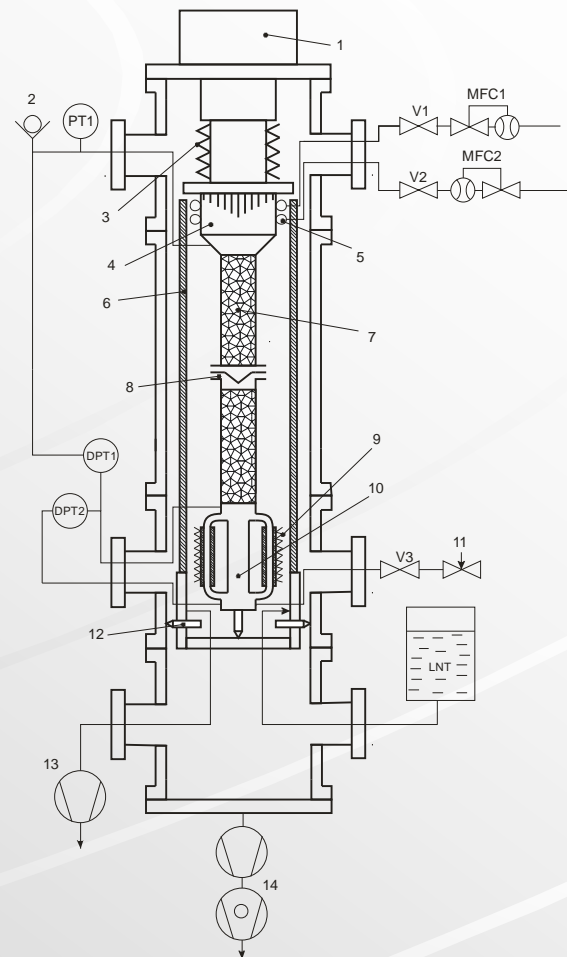
Nucl. Instrum. Meth., A578:485–497, 2007.

Изотопная очистка



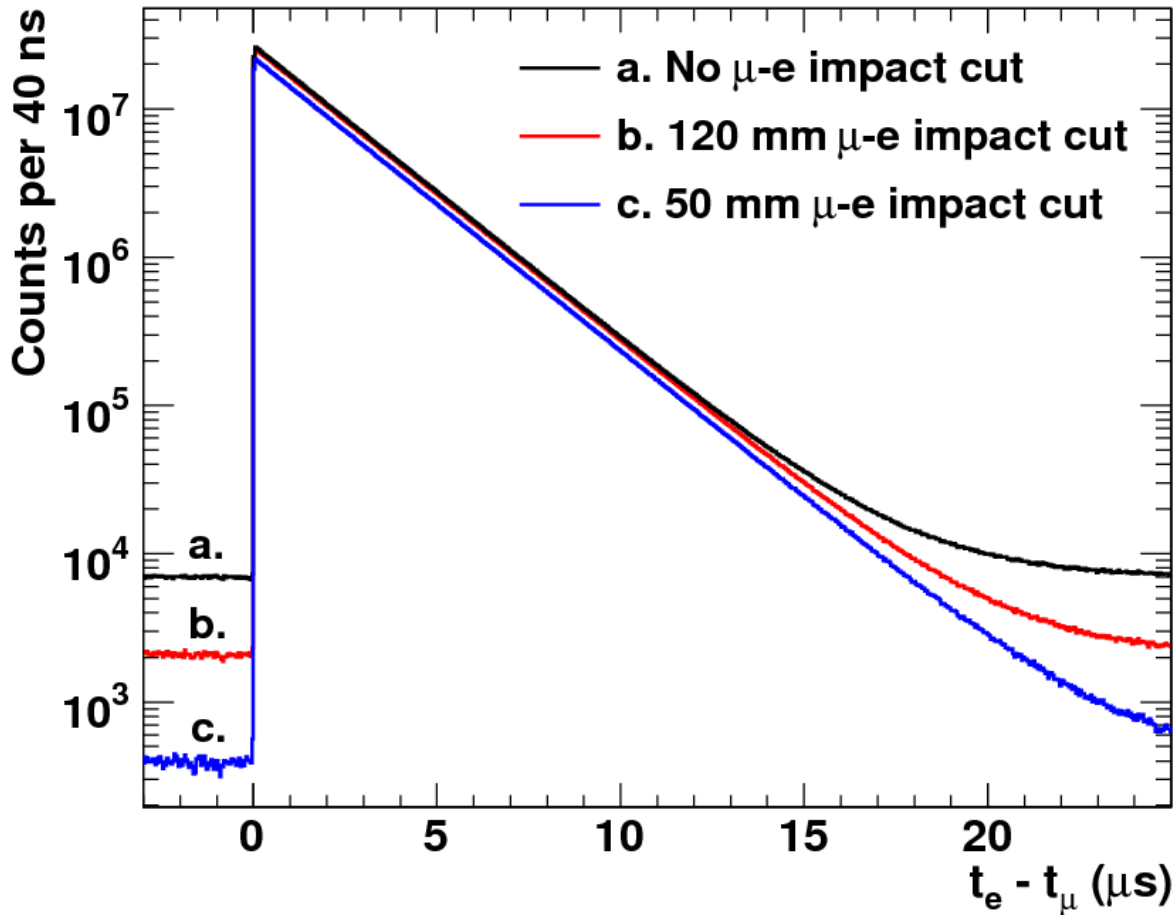
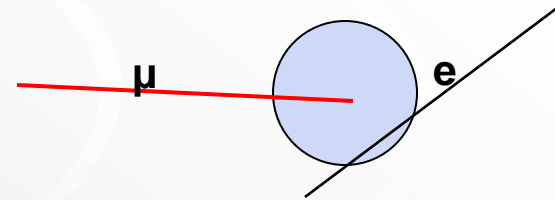
$$\Lambda_d = \frac{1}{\tau_{\mu^-}} - \frac{1}{\tau_{\mu^+}}$$

Требования к изотопной чистоте:
примесь протия – не более 100 ppb



В эксперименте МиСар
получен САМЫЙ изотопно
чистый в мире водород
< 6 ppb

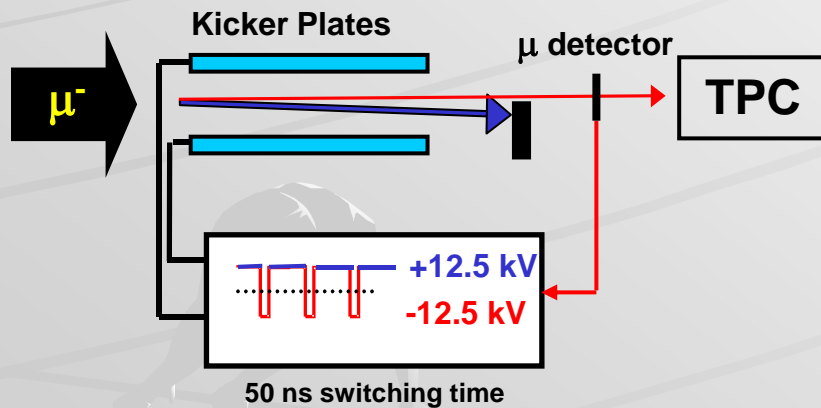
Уровень фона



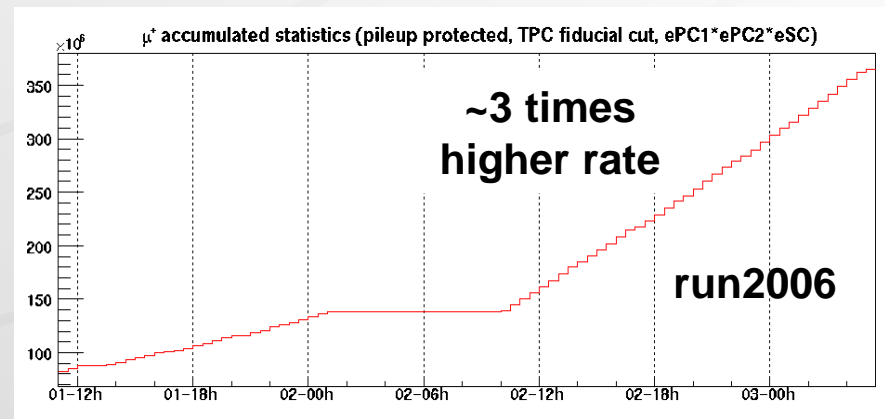
impact cut can reduce the background to a level of 10^{-4} - 10^{-5}

Скорость набора статистики

Интенсивность мюонного канала ~ 70 kHz мюонов
MuCar мог использовать ~ 7 kHz (pile up)
Новая система (**Muon-on-demand**), сооруженная в 2005 году,
позволила увеличить интенсивность полезного пучка до 20 kHz.



Muon-on demand system



Интенсивность пучка на входе TPC **20 kHz**
Набор отобранных событий **4kHz**
Статистика отобранных событий **$3.3 \cdot 10^8$ /day**
 10^{10} событий за 30 рабочих дней

Статистика отобранных событий

	2004	2005	2006	2007	total
μ^-	1.6×10^9	3.5×10^9	8×10^9	6.2×10^9	2×10^{10}
μ^+	0.5×10^9	1.4×10^9	4×10^9	4×10^9	5.5×10^9

**В 2007 году были опубликованы результаты анализа данных 2004 года
PRL 99,032002(2007)**

Определение скорости Λ_S

$$\lambda_{\mu}^{-} = \lambda_0 + \Lambda_S + \Delta\lambda_{p\mu p}$$

MuLan 1ppm

$$\lambda_{\mu}^{+} + \Delta\lambda_{\mu p}$$

$$\Lambda_S(\text{R06}) = 717.3 \pm 7.73_{\text{stat}} \pm 5.55_{\text{syst}} \text{ s}^{-1}$$

$$\Lambda_S(\text{R07}) = 713.1 \pm 8.33_{\text{stat}} \pm 4.34_{\text{syst}} \text{ s}^{-1}$$

$$\Lambda_S(\text{R04}) = 713.5 \pm 12.5_{\text{stat}} \pm 8.6_{\text{syst}} \text{ s}^{-1}$$

MuCap
PRL 2007

Окончательный результат

✦ Capture Rate

$$\Lambda_S (\text{MuCap}) = 714.9 \pm 5.4_{\text{stat}} \pm 5.1_{\text{syst}} \text{ s}^{-1}$$

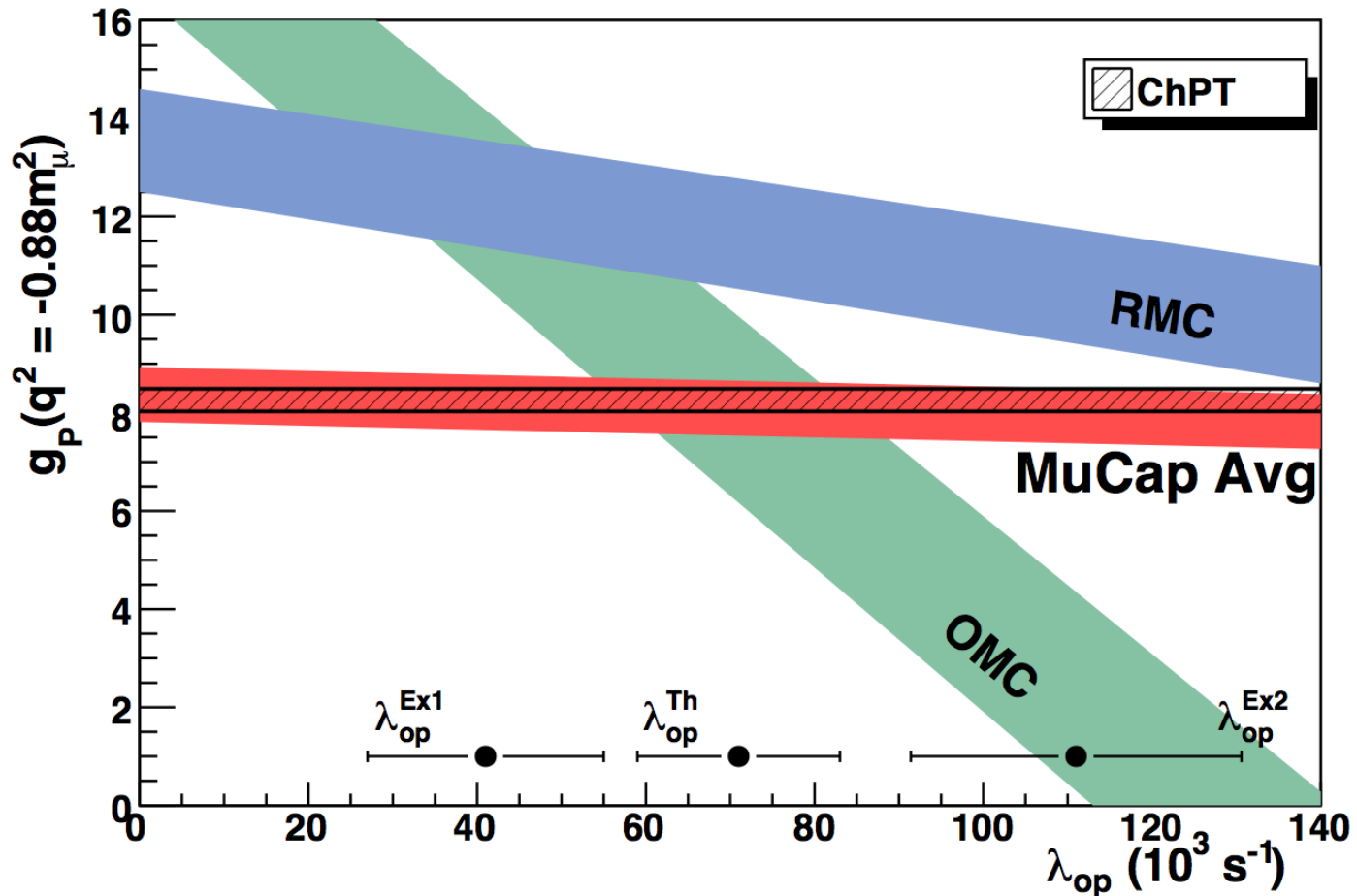
$$\Lambda_S (\text{theory}) = 712.7 \pm 3.0_{g_A} \pm 3.0_{RC} \text{ s}^{-1}$$

$$g_P(\text{theory}) = 8.26 \pm 0.23$$

✦ Pseudoscalar Coupling

$$g_P(\text{MuCap}) = 8.06 \pm 0.48_{(\text{ex})} \pm 0.28_{(\text{th})}$$

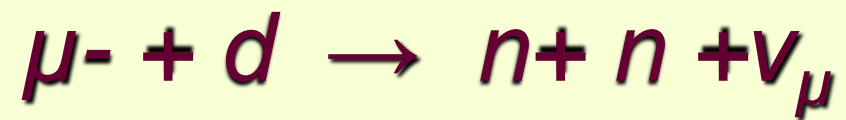
$$\text{✦} \quad \text{for } g_A(0) \rightarrow -1.275 \quad g_P(\text{MuCap}) \rightarrow 8.34$$



$$g_p(\text{MuCap}) = 8.06 \pm 0.55$$

$$g_p(\text{theory}) = 8.26 \pm 0.23$$

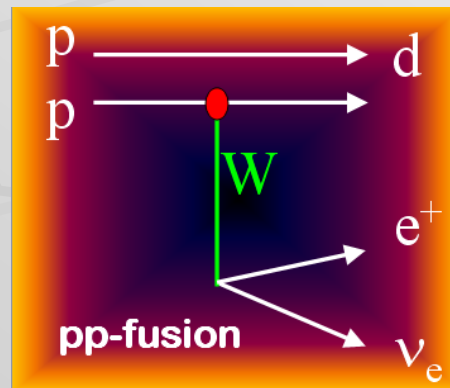
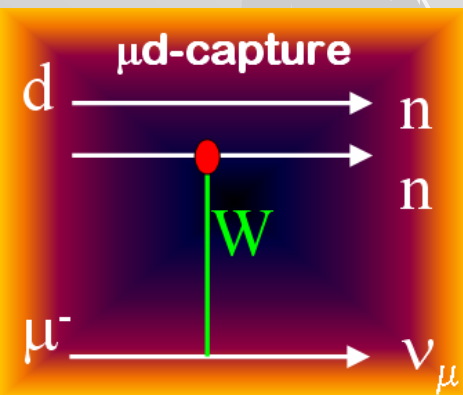
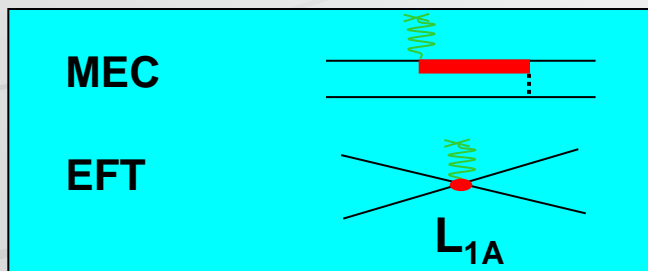
Эксперимент MuSun



Мотивация эксперимента MuSun



Измерение скорости μd захвата с точностью 1%



Основная реакция на Солнце



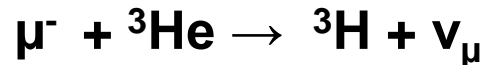
Детекторы нейтрино SNO



model-independent connection via EFT & L_{1A}

Ранее мы уже измерили скорость мюонного захвата ядром He-3

Physics Letters B417,224 1998)

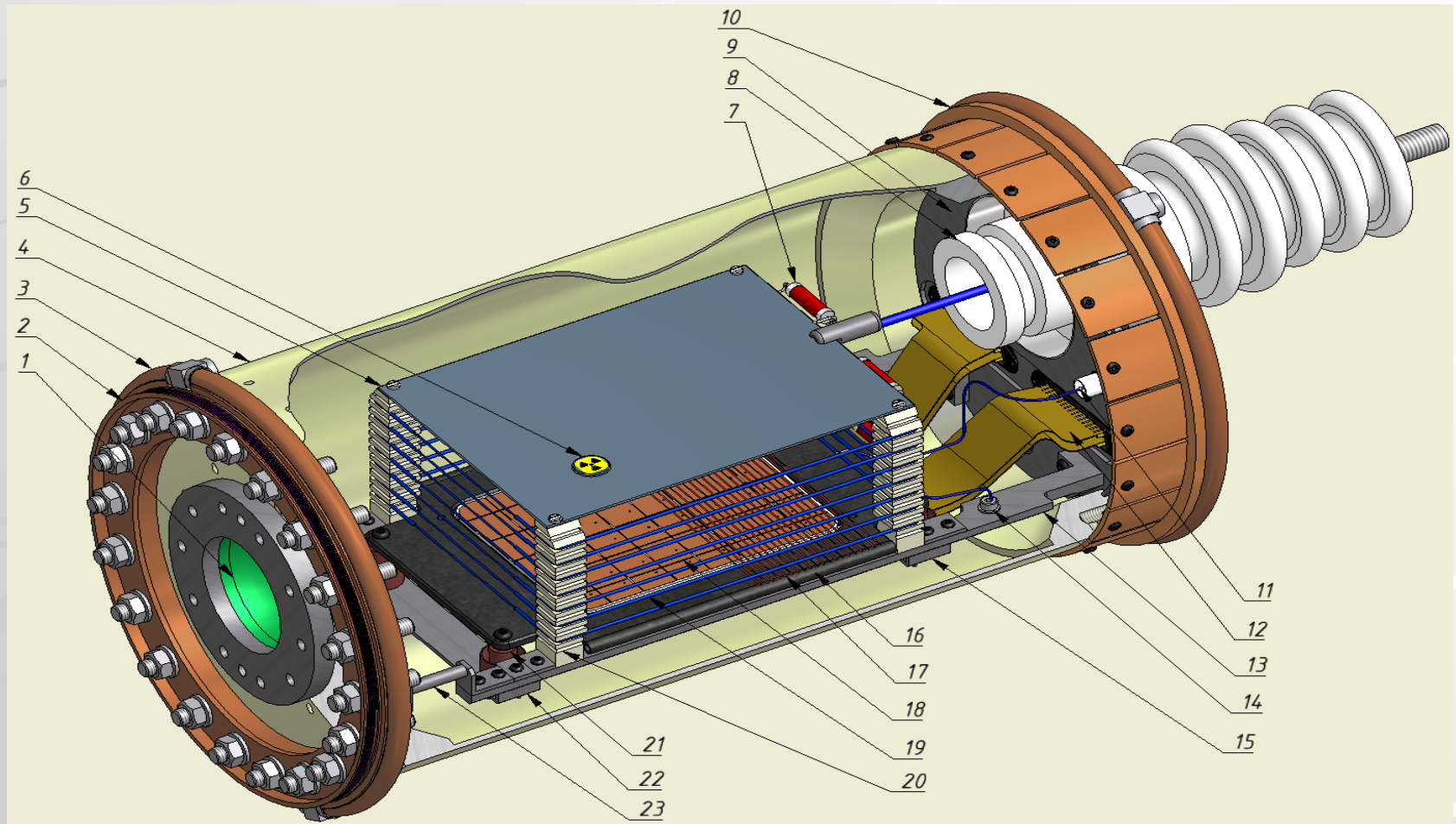


$$\Lambda_{\text{stat}} = 1496 \pm 4 \text{ s}^{-1}$$

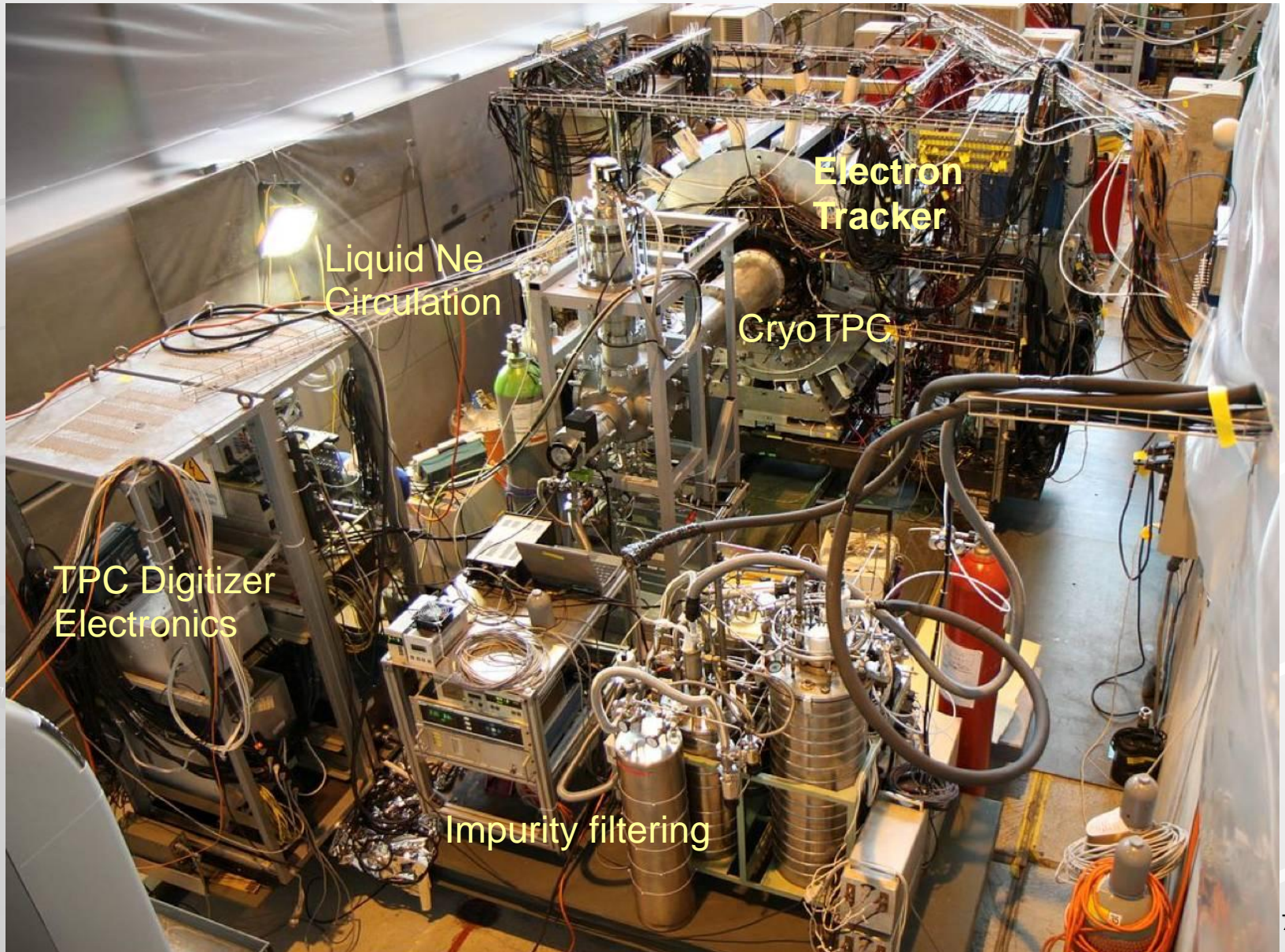
The world precision was improved by a factor of 50

С завершением эксперимента MuSun будет получен полный набор прецизионных данных о мюонном захвате в двух- и трех- нуклонных системах

Cryo_TPC



Пробный сеанс в 2011 году



Эксперимент MuSun

Статус и планы

- **В 2011 году проведен пробный измерительный сеанс .**
- **В 2012 году осуществлен запуск нового мюонного канала,
сооруженного специально для эксперимента MuSun.**
- **В 2013 году намечен трех-месячный измерительный сеанс**

Спасибо за внимание

