

Будущее измерений аномального магнитного момента мюона

Логашенко И.Б.

Институт Ядерной Физики СО РАН (Новосибирск)

Всероссийское совещание по
прецизионной физике и фундаментальным
физическим константам

Дубна, 1-4 декабря

АНОМАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

- **Гиромагнитное отношение, g** , связывает магнитный момент частицы и ее спин:

$$\vec{\mu}_s = g \frac{e}{2m} \vec{S}$$

- Уравнение Дирака предсказывает, что для частицы со спином $\frac{1}{2}$ гиромагнитное отношение равно 2

- Измеренные значения g :

$g_e \approx 2.002$	}	точечные частицы
$g_\mu \approx 2.002$		
$g_p \approx 5.586$	}	составные частицы
$g_n \approx -3.826$		

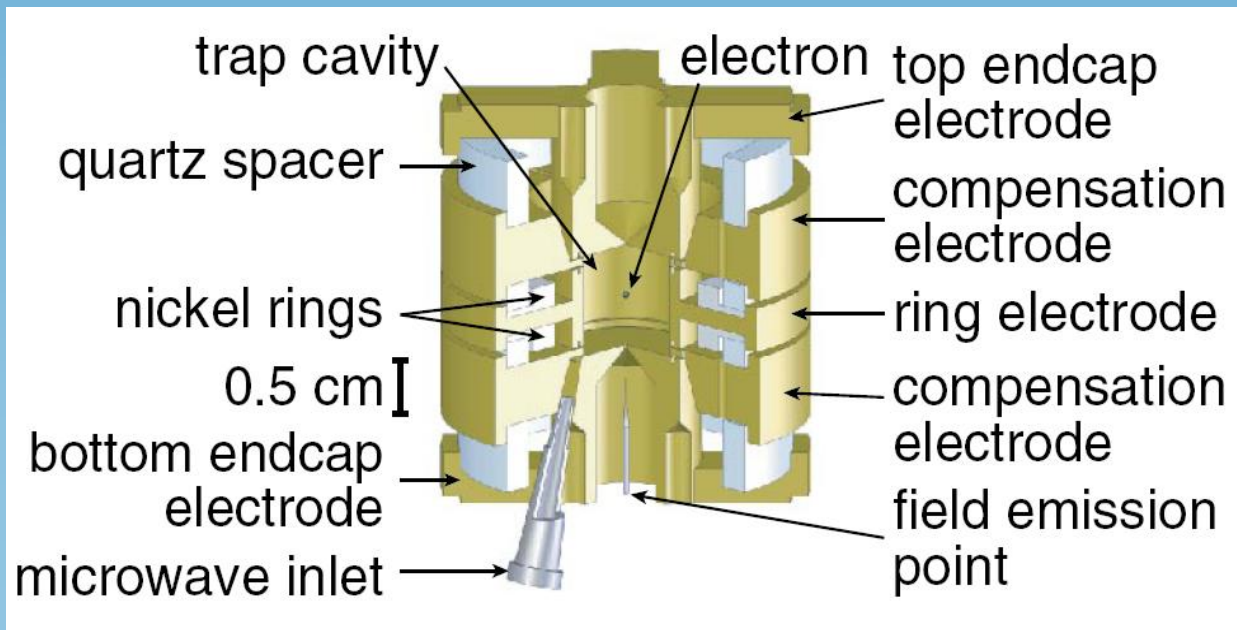
Аномальный магнитный момент: $a = (g-2)/2$

(g-2) электрона

Наиболее точно измерен аномальный магнитный момент электрона

D. Hanneke, S. Fogwell, G. Gabrielse, Phys.Rev.Lett.100:120801,2008

$$a_e = (115\,965\,218\,073 \pm 28) \times 10^{-14} \text{ (0.24 ppb)}$$



(g-2) мюона в Стандартной Модели

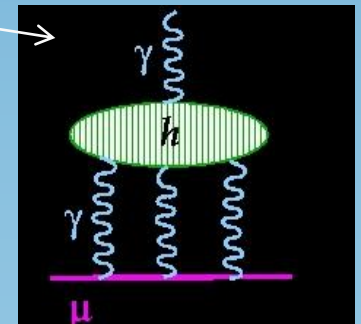
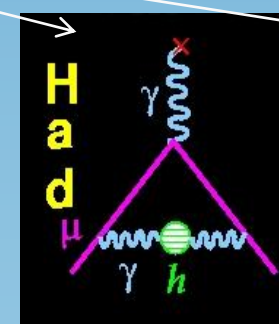
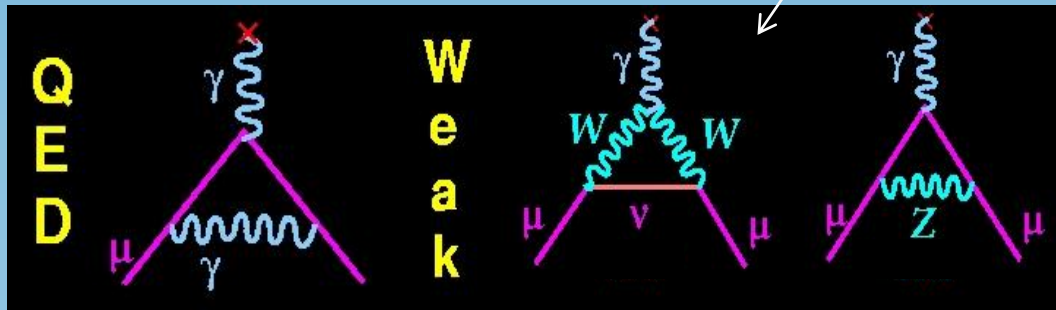
Все существующие взаимодействия вносят вклад в аномальный магнитный момент:

$$a_{\mu} = a_{\mu}^{QED} + a_{\mu}^{Had} + a_{\mu}^{Weak} + a_{\mu}^{New Physics}$$

Вклад взаимодействий кроме КЭД в $(g-2)_{\mu}$ в $\sim \left(m_{\mu}/m_e\right)^2 \approx 40000$ раз больше чем в $(g-2)_e$

(g-2) мюона гораздо чувствительней к вкладу взаимодействий за рамками Стандартной Модели, чем (g-2) электрона

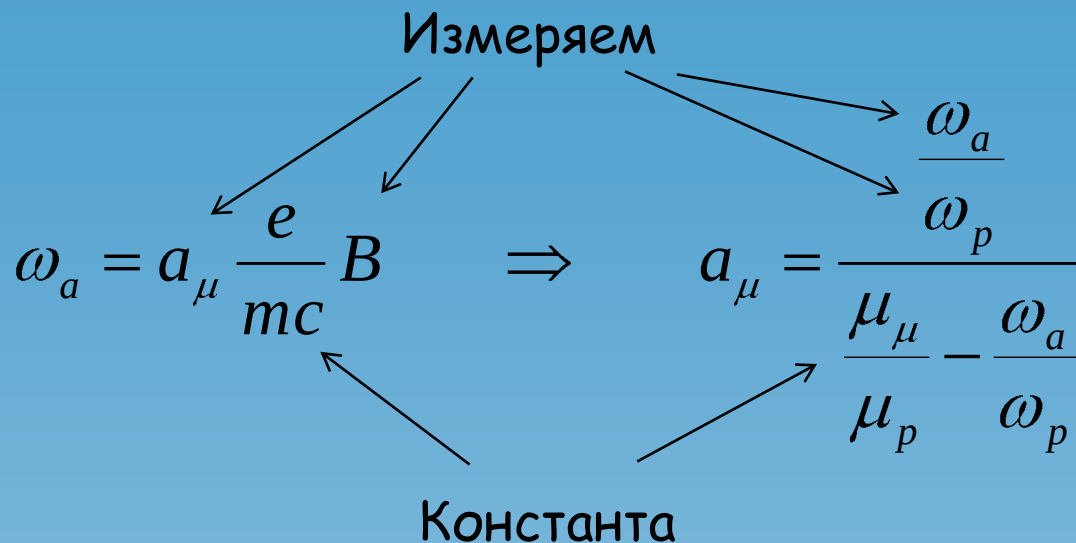
$$a_{\mu}^{theory} = 116\,591\,834\,(2)\,(41)\,(26) \times 10^{-11} \text{ (0.42 ppm)}$$



Рассчитаны с высокой точностью

Определяет точность расчета

(g-2) мюона



New value for λ
(CODATA 2006/2008)

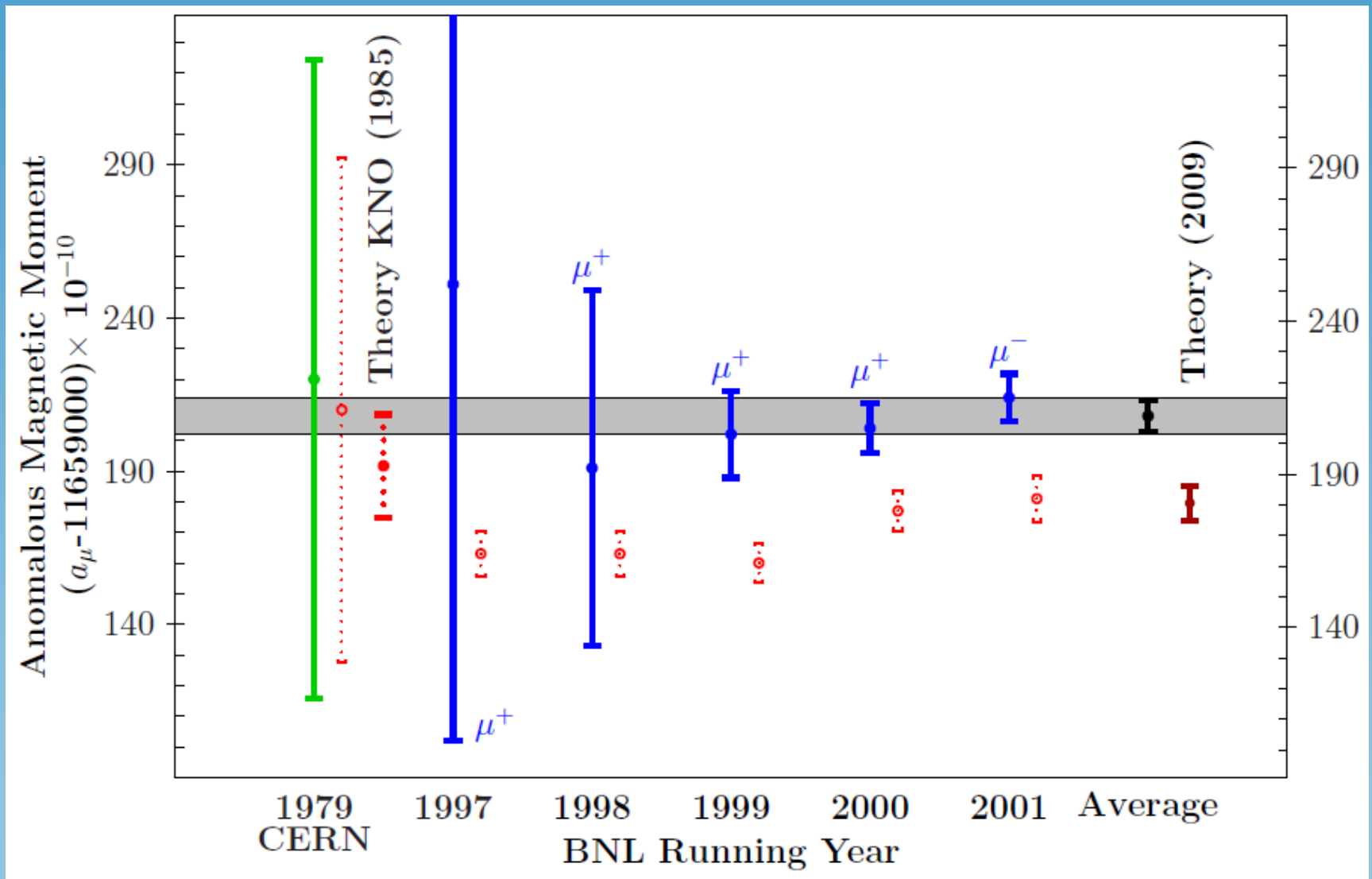
$$\lambda^{2008} = \frac{\mu_\mu}{\mu_p} = 3.183\,345\,137\,(85)$$

$$a_\mu^{exp} = 116\,592\,089\,(63) \times 10^{-11} \text{ (0.54 ppm)}$$

$$a_\mu^{theory} = 116\,591\,834\,(41)\,(26)\,(2) \times 10^{-11} \text{ (0.42 ppm)}$$

$$\Delta a_\mu = (255 \pm 80) \times 10^{-11} \text{ (3.2 } \sigma \text{)}$$

$(g-2)$ мюона

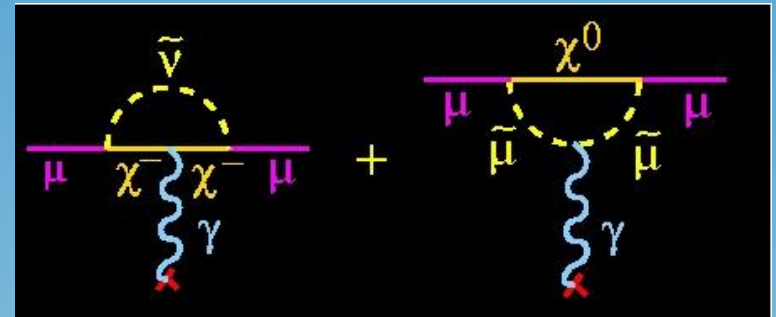
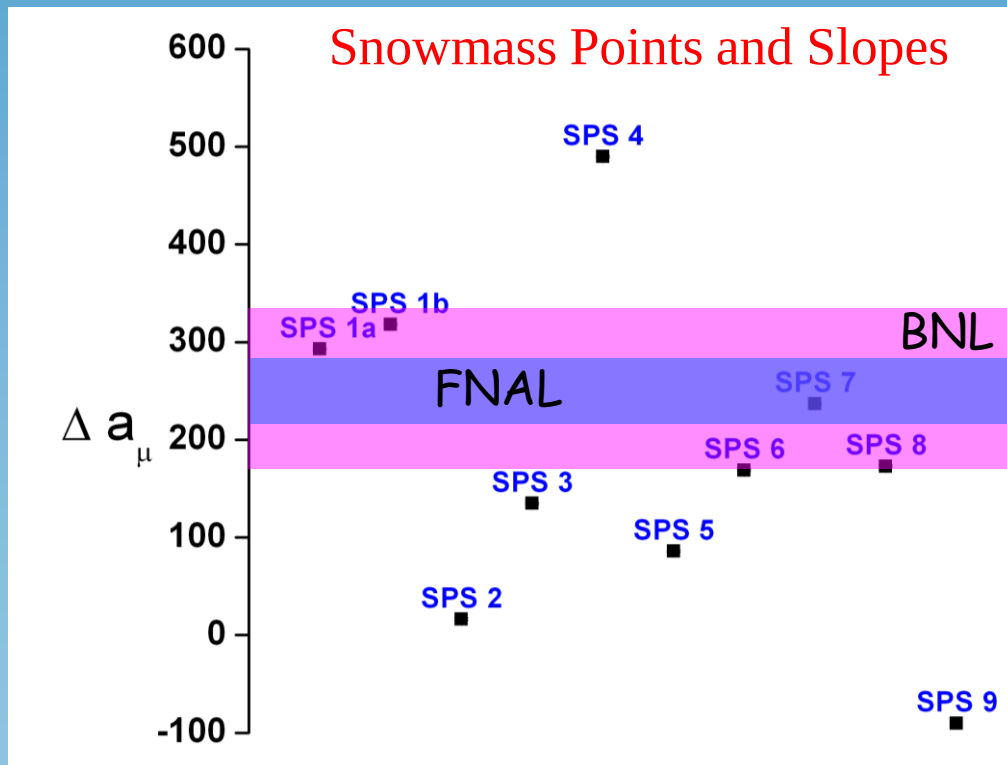


Courtesy F. Jergerlehner, arXiv:0902.3360

Вклады за рамками СМ

Что может дать вклад на уровне 300×10^{-11} (в раза больше EW)?

$$a_\mu(\text{SUSY}) \simeq (\text{sgn} \mu) 130 \times 10^{-11} \tan \beta \left(\frac{100 \text{ GeV}}{\tilde{m}} \right)^2$$



- Чувствителен к $\tan(\beta)$ и $\text{sign}(\mu)$
- Существенно ограничивает класс возможных моделей суперсимметрии (при любом значении a_μ)

История измерений $(g-2)$ мюона

CERN I (1958-1962):

Первое измерение, точность 0.4%

CERN II (1962-1968):

Накопительное кольцо, магнитная фокусировка, точность 270 ppm

CERN III (1969-1976):

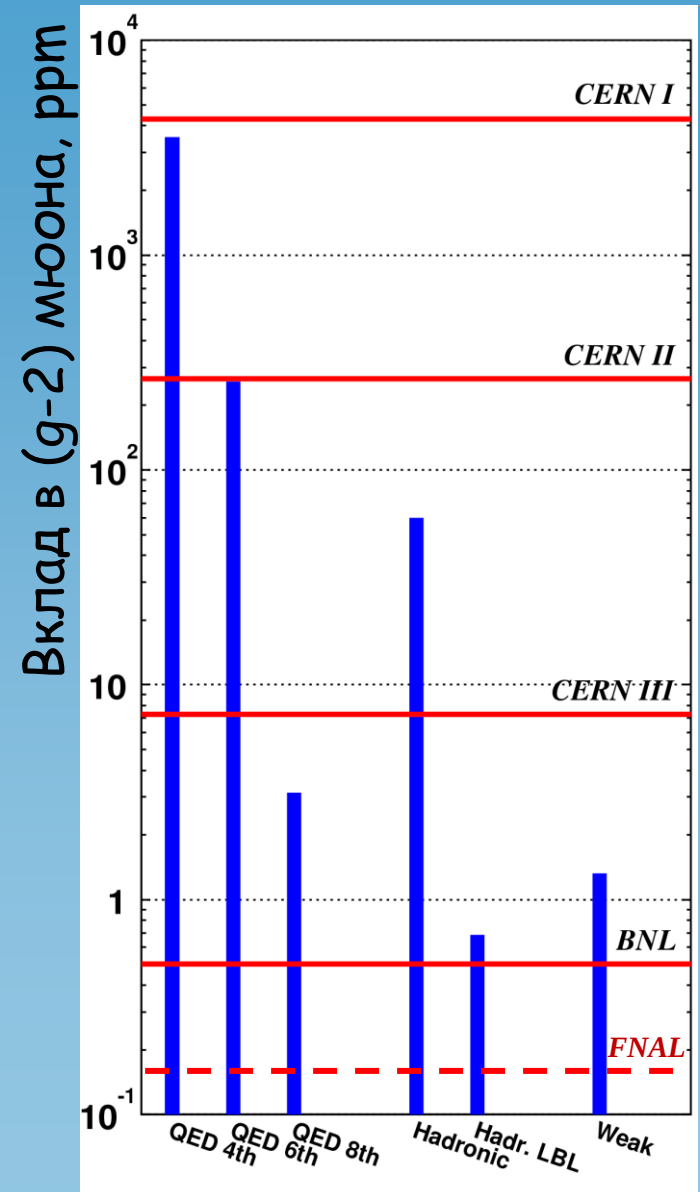
Magic γ , электростатическая фокусировка, μ^+ и μ^- , точность 7 ppm

BNL (1990-2003):

Мюонная инжекция, точность 0.5 ppm

Fermilab (2012?-):

Улучшения во всех аспектах, Q-метод, точность 0.14 ppm



Постановка эксперимента

ω_a - частота прецессии спина относительно импульса

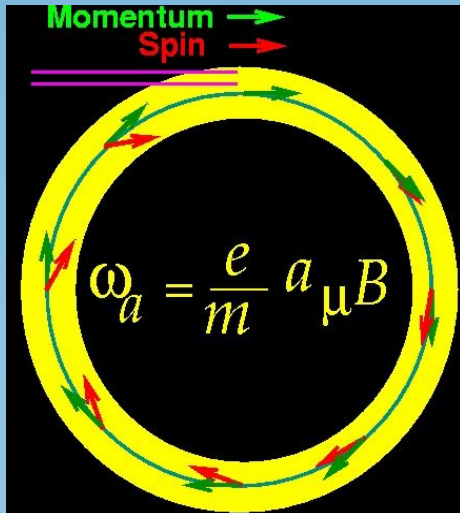
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

$\searrow \quad \quad \quad \searrow$
 $= 0 \quad \quad \quad = 0$

$$\gamma_{\text{magic}} = 29.3$$

$$p_{\text{magic}} = 3.09 \text{ GeV}/c$$

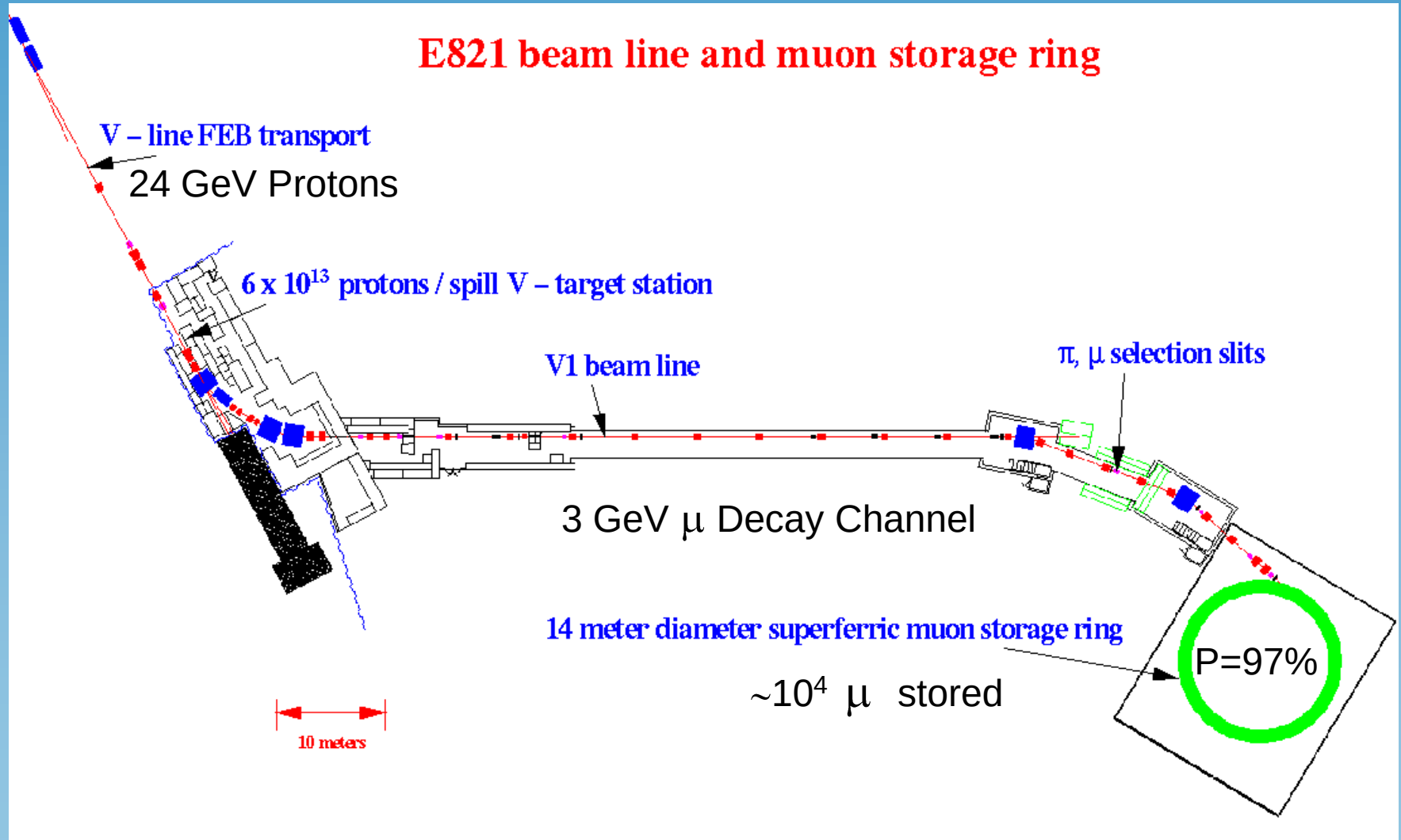
Вкладом
гипотетического
ЭДМ можно
пренебречь



Измеряем частоту прецессии спина
3 ГэВ-ных мюонов в однородном
магнитном поле

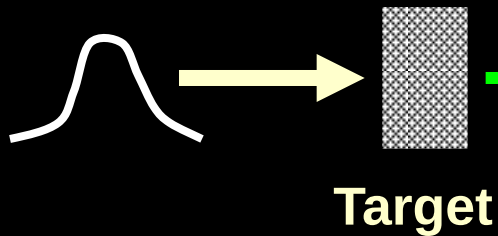
Эксперимент в БНЛ (1984-2003)

E821 beam line and muon storage ring



Experimental Technique

25ns bunch of
 5×10^{12} protons
 from AGS



Pions

$p = 3.1 \text{ GeV}/c$

p^-

$\mu^- \bar{\nu}_\mu$

Inflector

$x_c \approx 77 \text{ mm}$

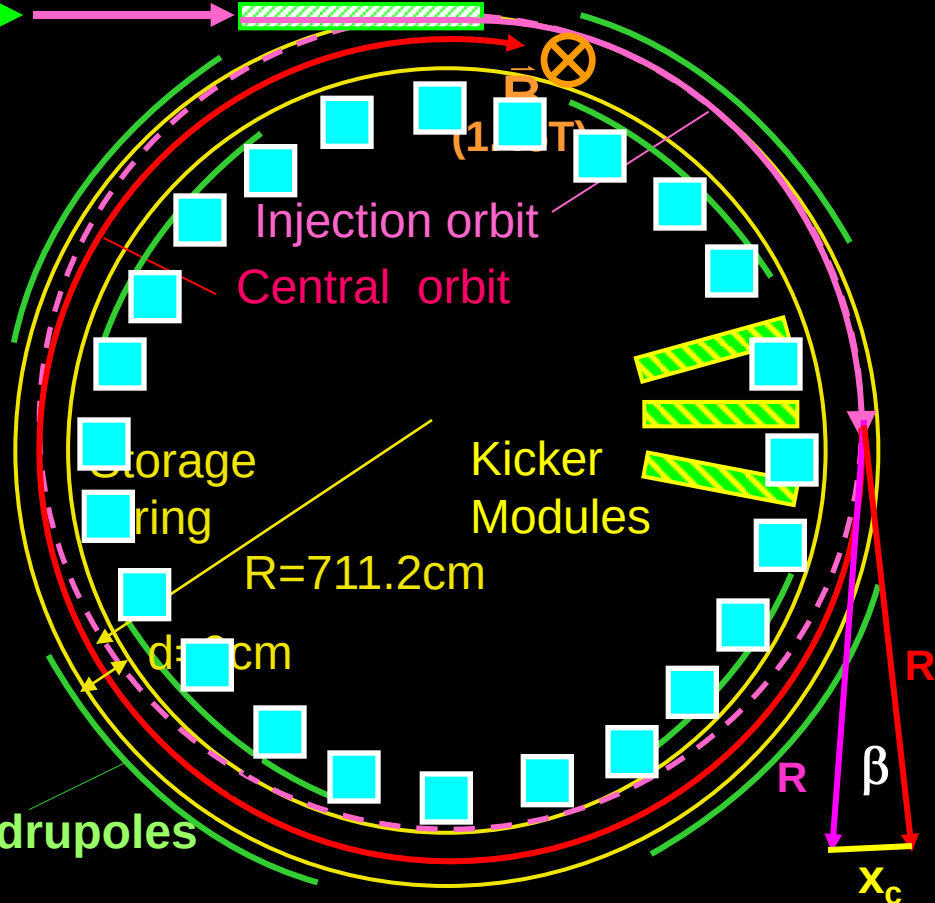
$\beta \approx 10 \text{ mrad}$

$B \cdot dl \approx 0.1 \text{ Tm}$

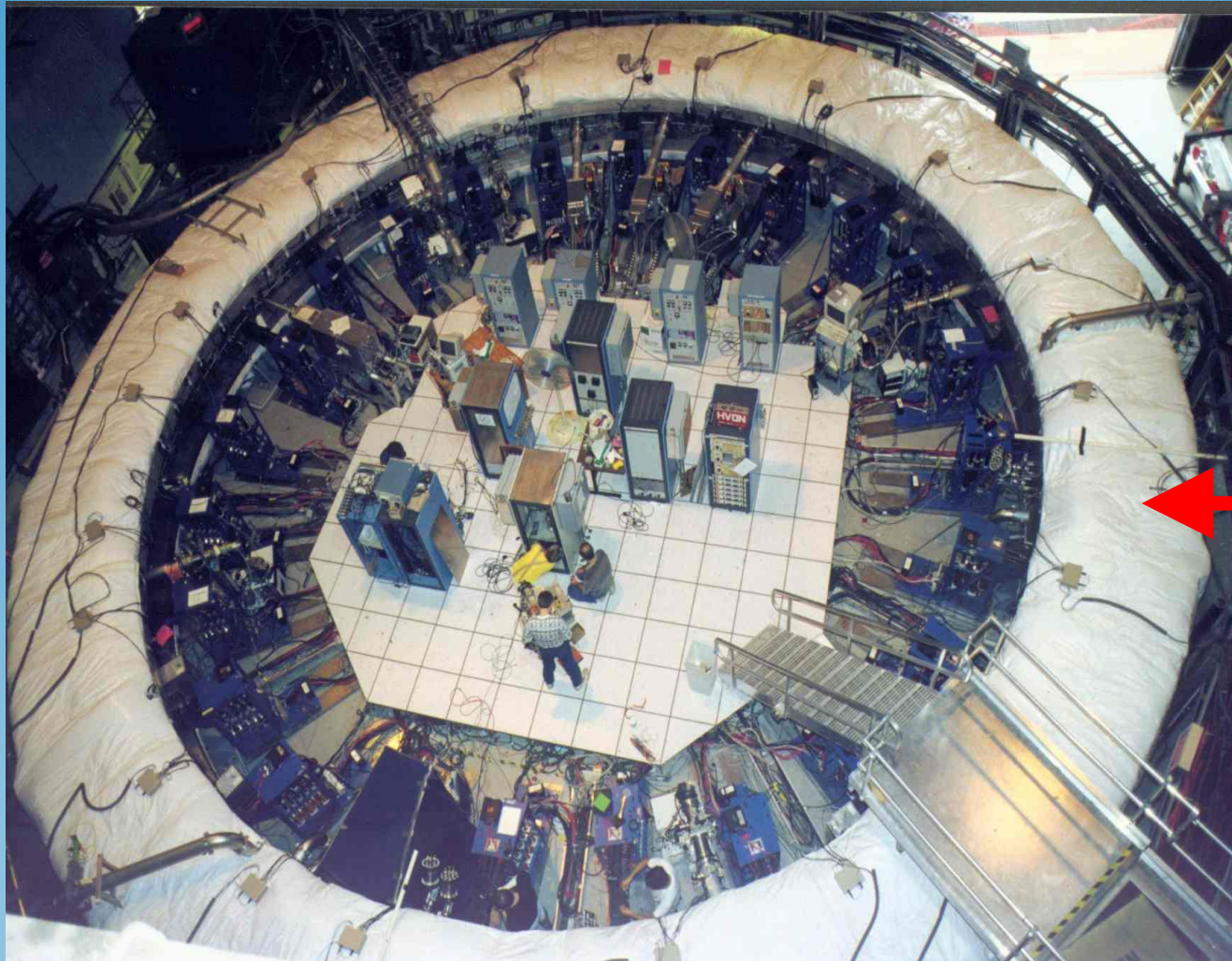
- Muon polarization
- Muon storage ring
- injection & kicking
- focus with Electric Quadrupoles
- 24 electron calorimeters

$$\vec{\omega}_a = - \frac{e}{m} a_\mu \vec{B}$$

Electric Quadrupoles



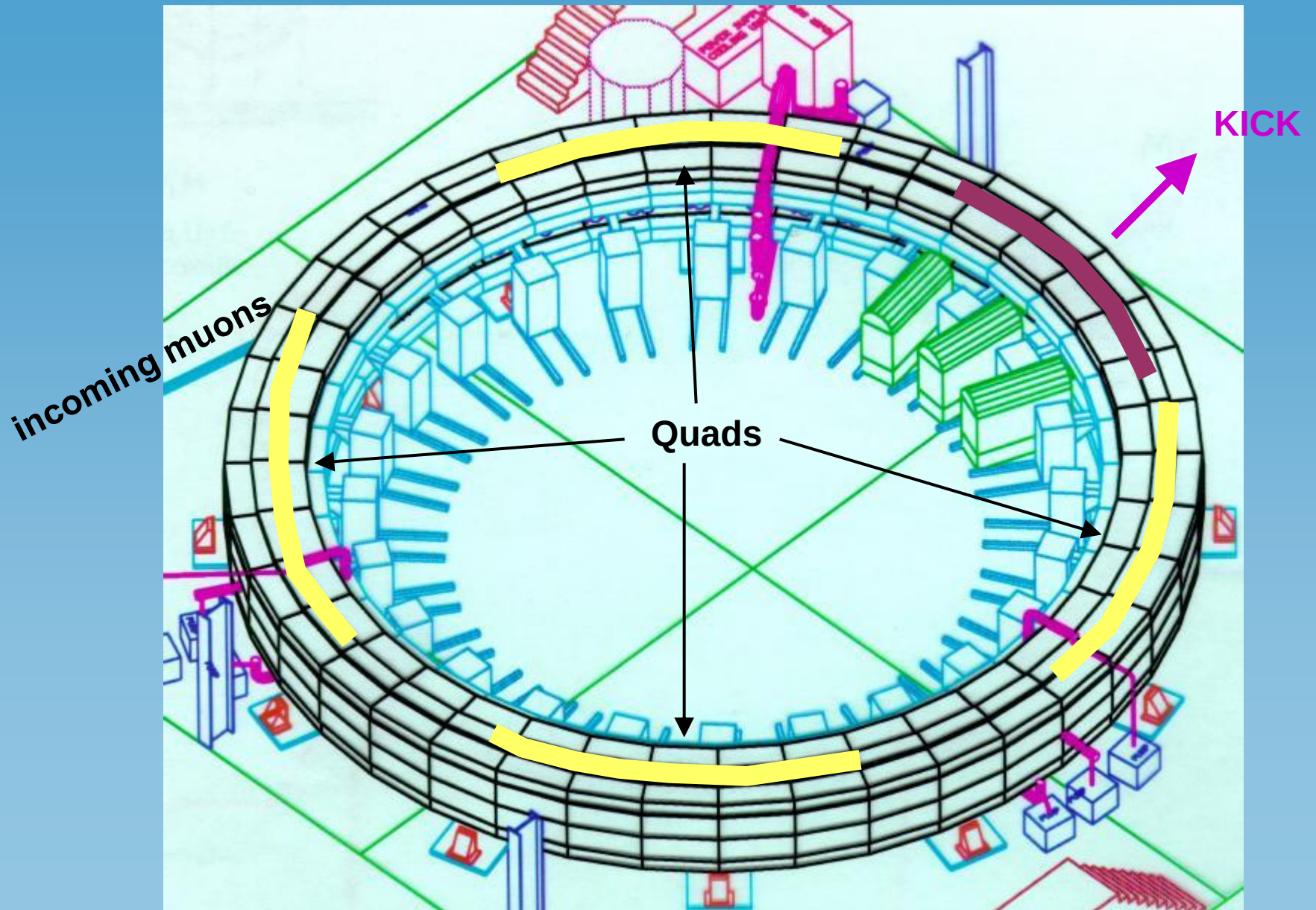
Мюонное накопительное кольцо



$R=7.112\text{ m}$
 $B=1.45\text{ T}$

$P_{\mu} = 3.094\text{ GeV/c}$ $\gamma\tau = 64.4\text{ }\mu\text{s}$
 $\tau_{\text{cyc}} = 149\text{ ns}$ $\tau_a = 4.37\text{ }\mu\text{s}$

Мюонное накопительное кольцо



Измерение магнитного поля

- Абсолютная калибровка относительно сферического датчика ЯМР на основе воды

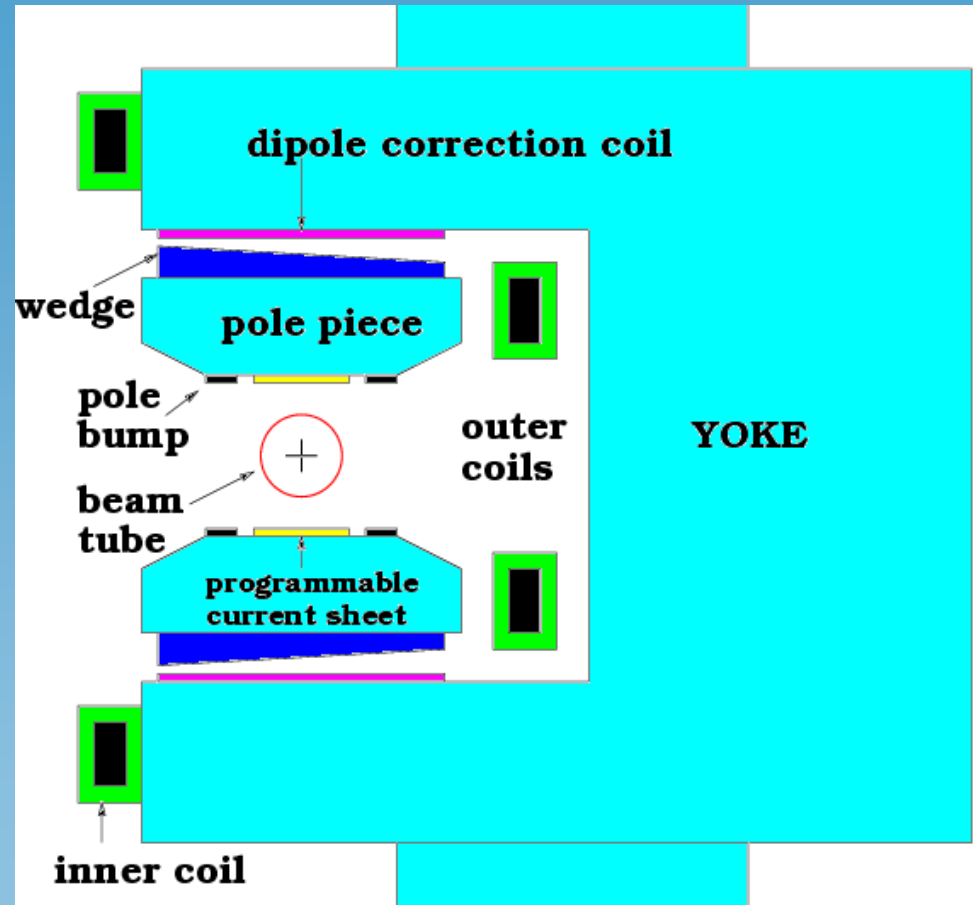
В начале и конце сезона

- Измерение поля с помощью 17 датчиков ЯМР, расположенных на подвижной тележке

Раз в несколько дней

- Постоянное мониторингирование и поддержание поля с помощью 150 неподвижных датчиков ЯМР

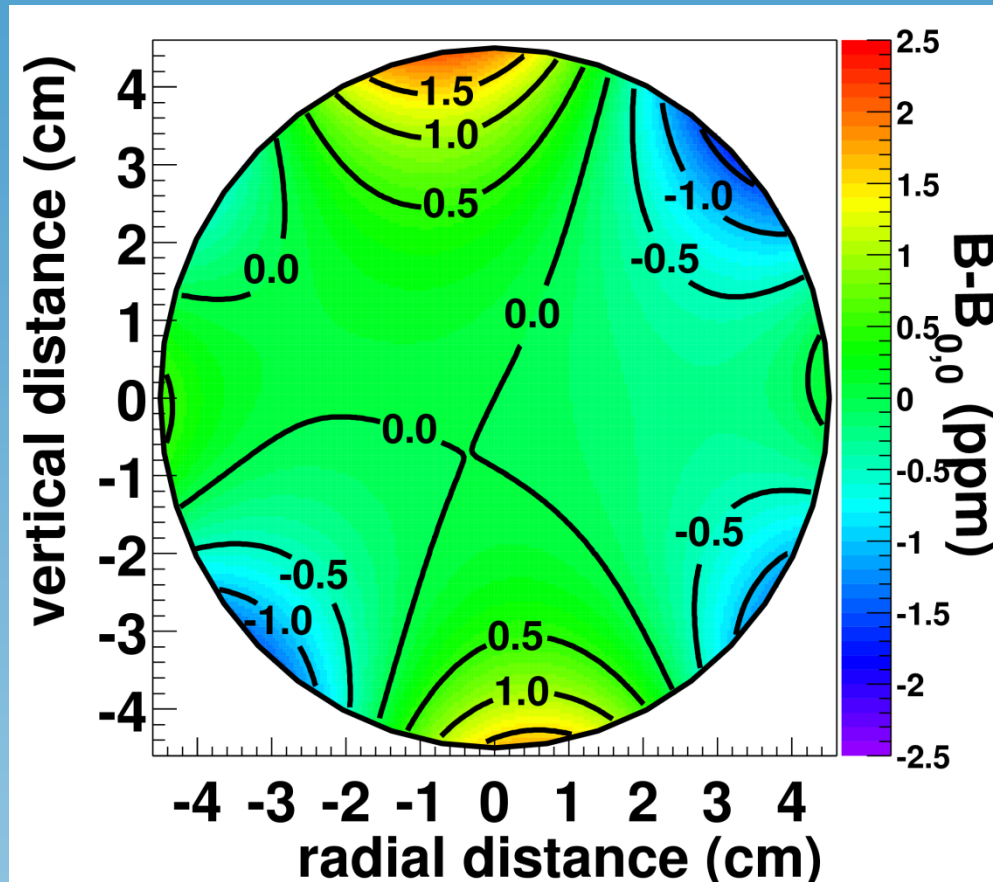
Непрерывно



Вместо поля измеряется частота ЯМР протона (ω_p)

Измерение магнитного поля

Тележка с датчиками ЯМР



Среднее по траектории мюона
магнитное поле по данным
2001 года



Вакуумная камера

Измерение частоты прецессии

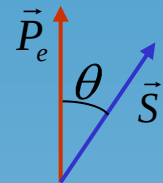
Основная идея: использовать нарушение четности в распаде мюона

$$\mu^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu + e^+$$

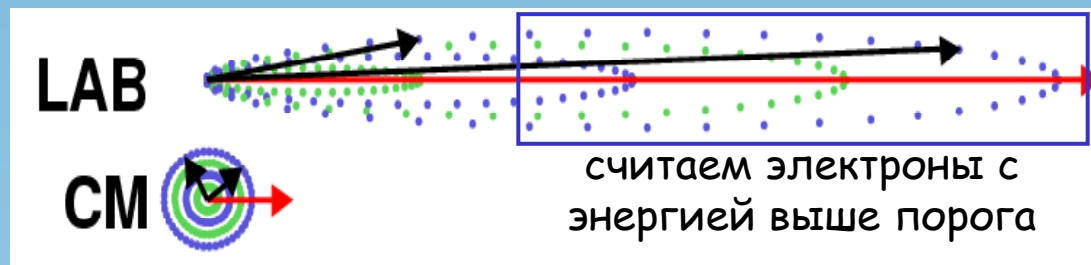
$$\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e + \nu_\mu + e^-$$

В системе ц.м.:

$$\frac{dN}{dE d\Omega} = n(E) \left[1 + A \cos\theta \right]$$



- Электроны высокой энергии в лабораторной системе соответствуют электронам, вылетевшим вперед в системе ц.м.
- В системе ц.м. количество электронов, вылетевших вперед, зависит от направления спина мюона



$$N_{E > E_{thr}} = N_0 e^{-t/\gamma\tau} \left[1 + A \cos(\omega t + \varphi) \right]$$

Измерение частоты прецессии

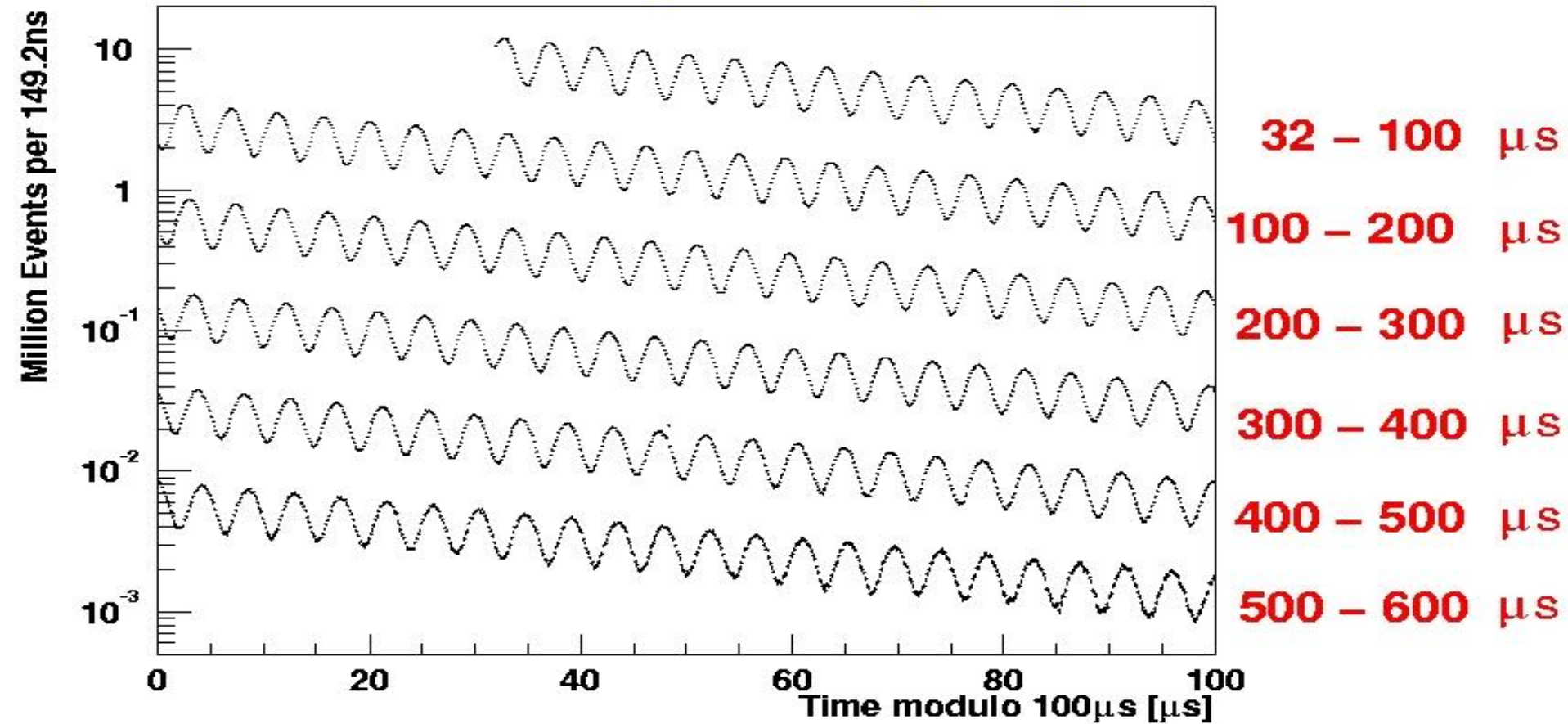


Измерение частоты прецессии

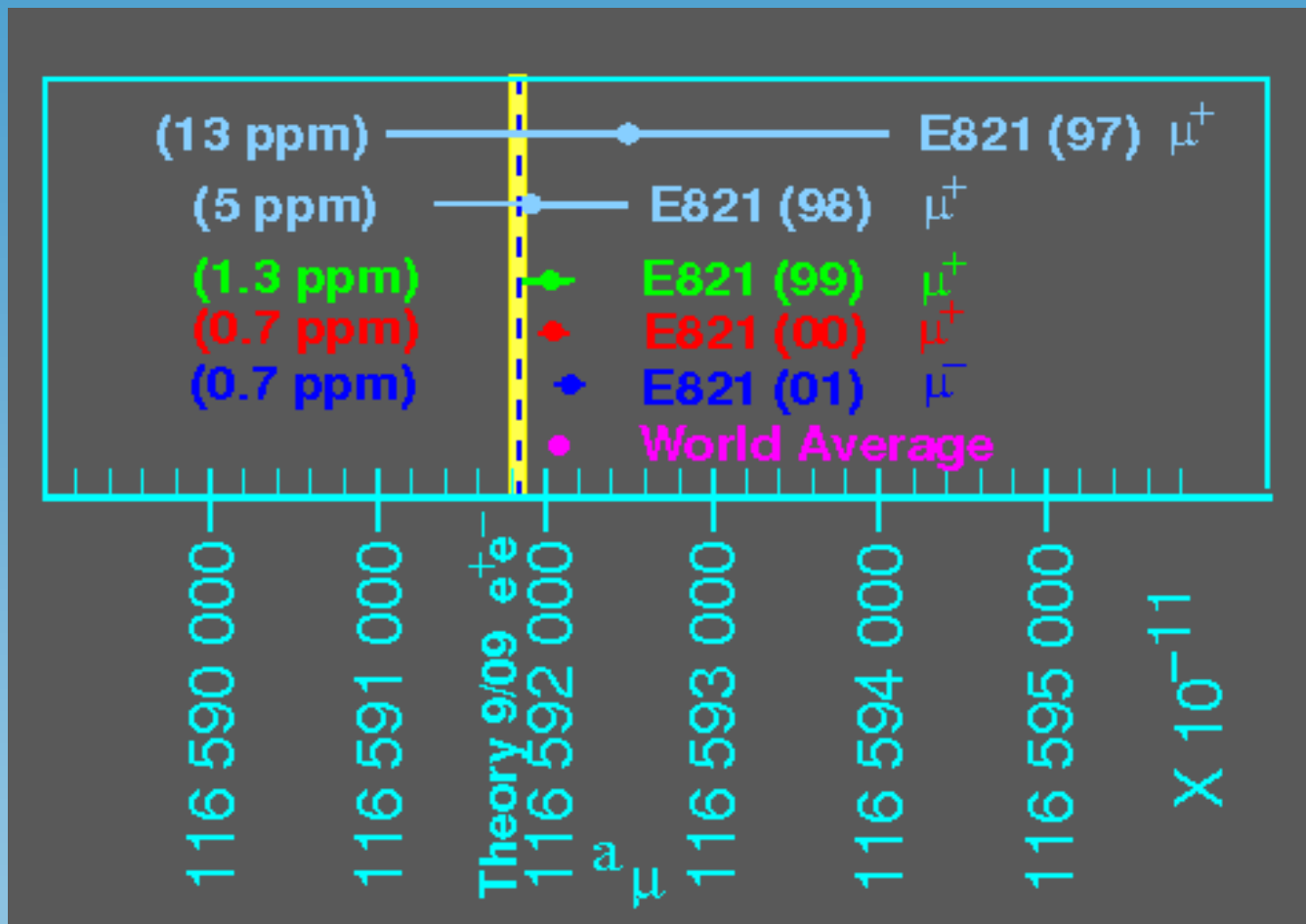
$$4 \times 10^9 e^-, E_{e^-} \geq 1.8 \text{ GeV}$$

$$f(t) \simeq N_0 e^{-\lambda t} [1 + A \cos \omega_a t + \phi]$$

electron time spectrum (2001)



Результаты измерений

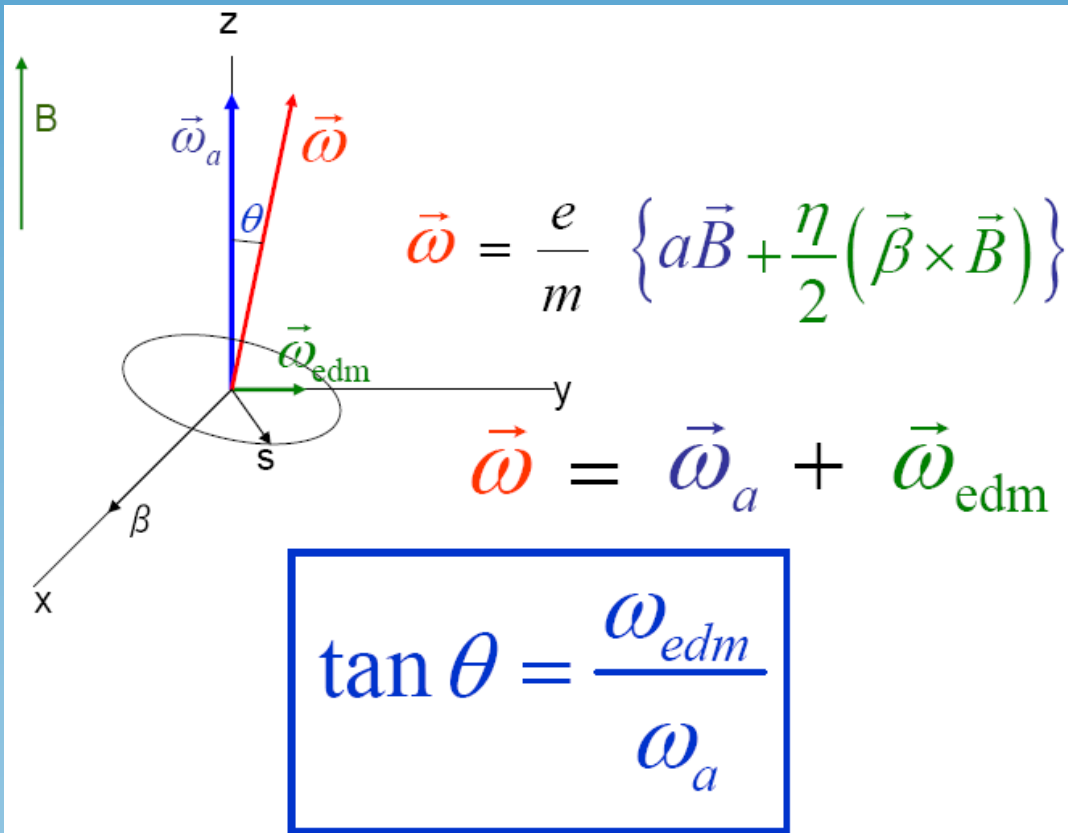


Carey, et al., PRL 82, 1632 (1999)
 Brown, et al. PRL 86, 2227 (2001)
 Bennett, et al. PRL 92, 161802 (2004)

Brown, et al. PRD 62, 091101 (2000)
 Bennett, et al. PRL 89, 101804 (2002)
 Bennett, et al. PRD 73, 072003 (2006)

Измерение ЭДМ мюона

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

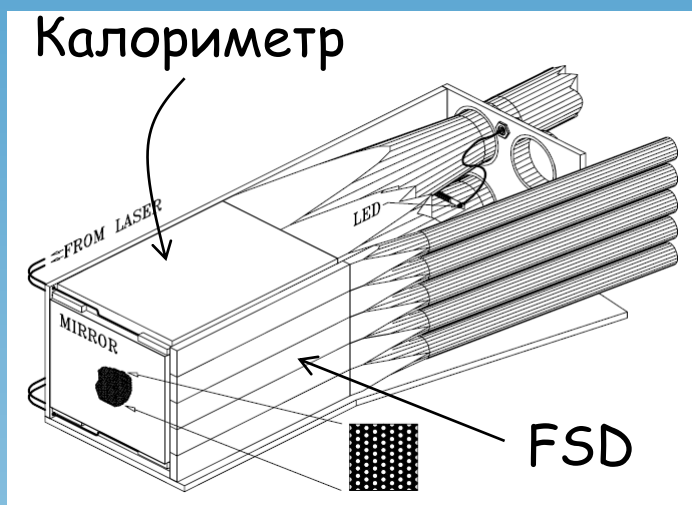


При ненулевом ЭДМ мюона плоскость прецессии наклоняется

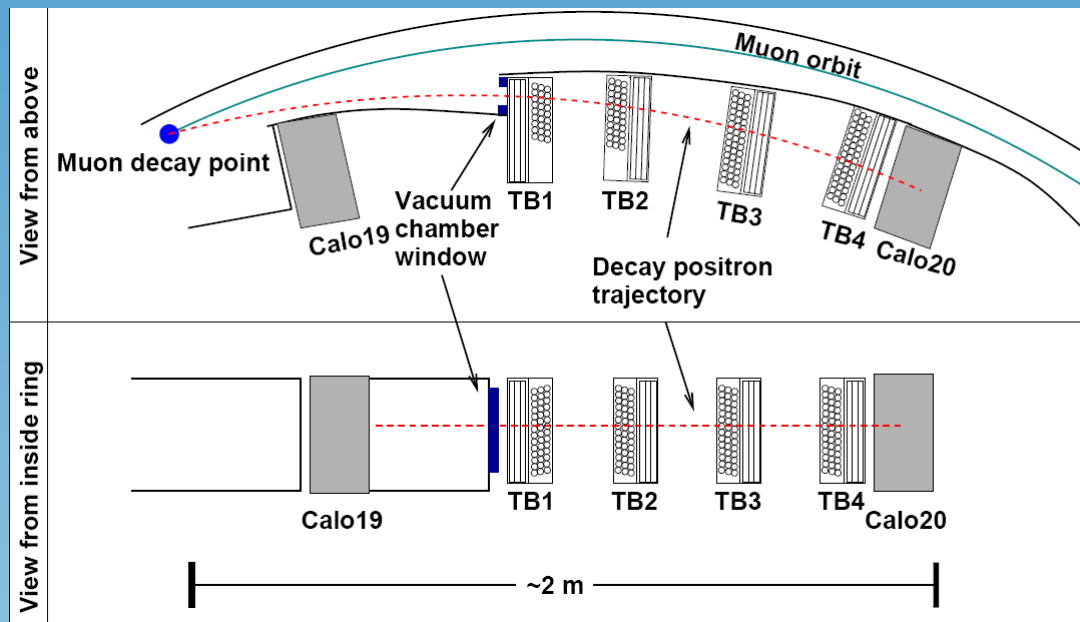
Измеряем осцилляции в разнице числа электронов, зарегистрированных выше и ниже плоскости орбиты (фаза сдвинута на $\pi/2$ относительно фазы $g-2$)

Измерение ЭДМ мюона

Для измерения осцилляций верх-низ предусмотрено несколько регистрирующих систем

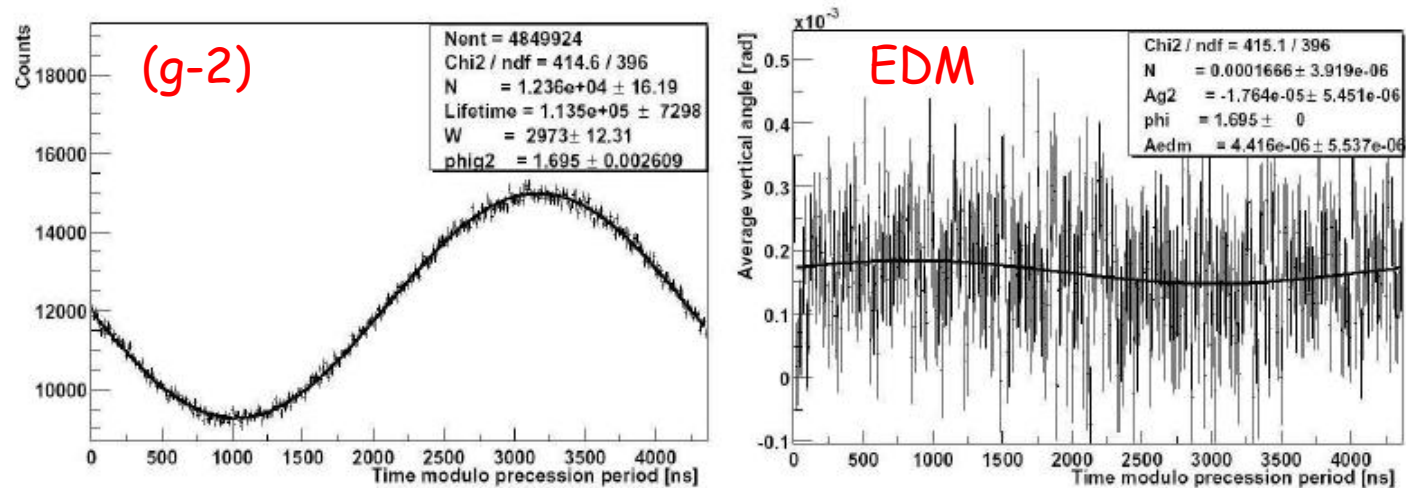


Сцинтилляционные пластины (FSD) и двухкоординатный сцинтилляционный счетчик (PSD) спереди калориметра



Traceback - годоскоп из дрейфовых трубочек для регистрации трека вылетевшего электрона и восстановления точки вылета (вершины распада мюона)

Измерение ЭДМ мюона



(g-2): количество треков от времени (пересчитанное на один период осцилляций)

ЭДМ: средний угол к плоскости орбиты от времени (пересчитанное на один период осцилляций)

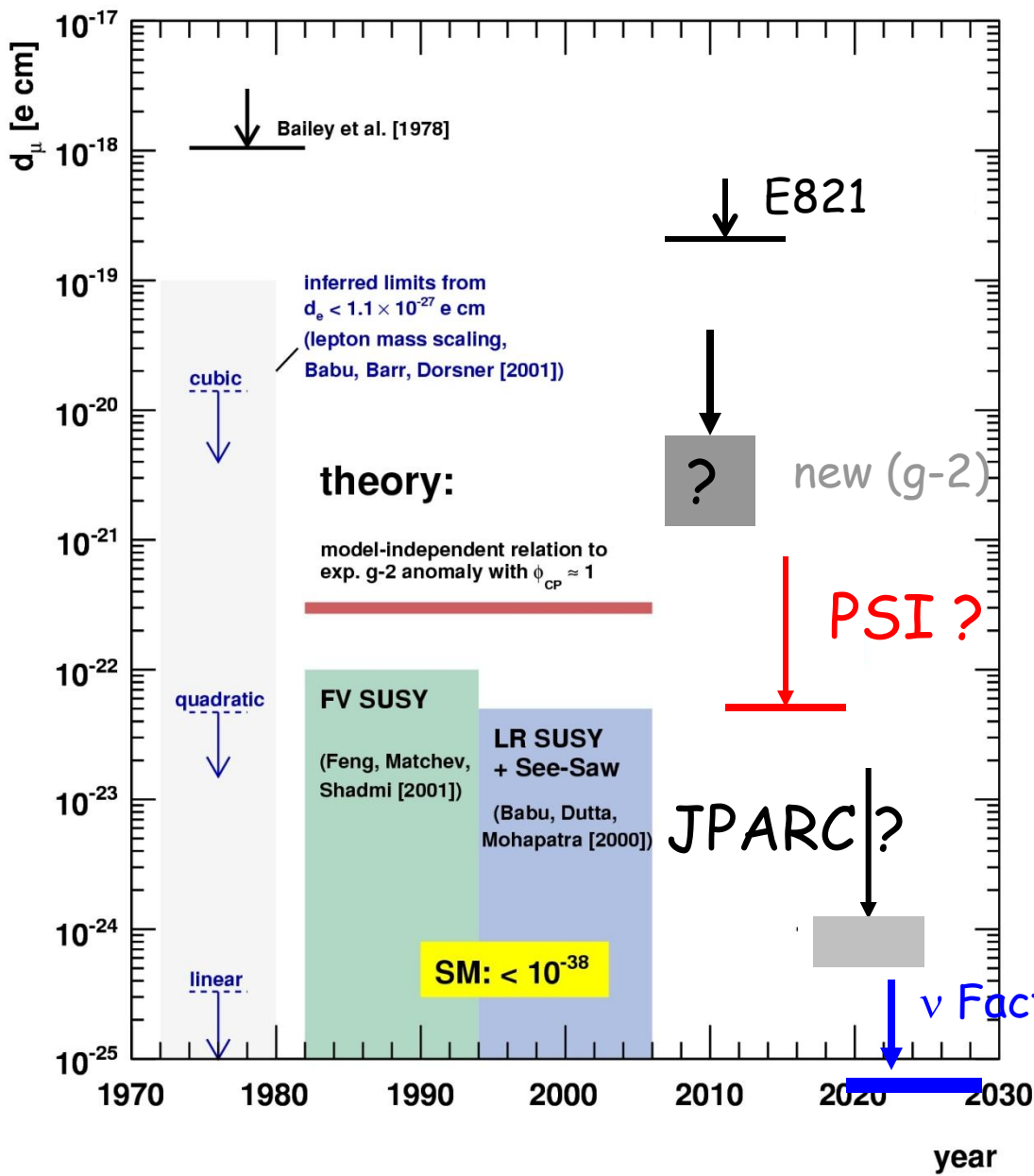
Точность измерения ограничивается статистикой

$$|d_{\mu}| \leq 1.9 \times 10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ (95\% C.L.)}$$

$$d_{\mu^-} + d_{\mu^+} = (-0.2 \pm 1.3) \times 10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

G.W.Bennett et al., PRD80,
052008, 2009

Измерение ЭДМ мюона



$$a_\mu^{\text{NP}} = 300(100) \times 10^{-11}$$



$$d_\mu^{\text{NP}} \simeq 3 \times 10^{-22} \left(\frac{a_\mu^{\text{NP}}}{3 \times 10^{-9}} \right) \tan \phi_{CP} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

where ϕ_{CP} is a CP violating phase.

Специализированные эксперименты

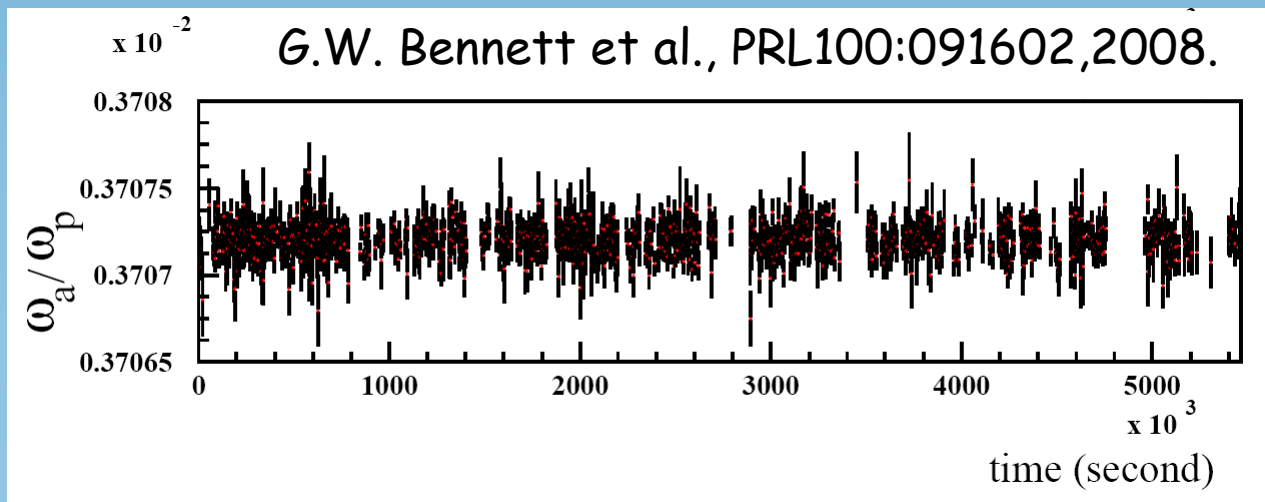
Тест СРТ

1. Сравнение результатов измерений для μ^+ и μ^-

$$\text{CPT: } a_{\mu}^+ \equiv a_{\mu}^- \left\{ \begin{array}{l} R_{\mu^+} = \frac{\omega_a}{\omega_p}(\mu^+) = 0.0037072048 \text{ (25)} \\ R_{\mu^-} = \frac{\omega_a}{\omega_p}(\mu^-) = 0.0037072083 \text{ (26)} \end{array} \right.$$

$$\varepsilon = \frac{R_{\mu^+} - R_{\mu^-}}{\frac{1}{2}(R_{\mu^+} + R_{\mu^-})} = (-9.4 \pm 9.7) \times 10^{-7}$$

2. Поиск дневных вариаций - сигнал не обнаружен



Эксперимент в Fermilab

Цель нового эксперимента:

**измерить аномальный
магнитный момент мюона
с точностью 0.14 ppm
(0.1 ppm стат. + 0.1 ppm сист.)**

Ключевое улучшение:

**Увеличение статистики в
20 раз**

Срок:

**Начало набора статистики
в 2015, набор за 2 года**

The New $(g - 2)$ Experiment:

A Proposal to Measure the Muon Anomalous Magnetic Moment to ± 0.14 ppm Precision

New $(g - 2)$ Collaboration: R.M. Carey¹, K.R. Lynch¹, J.P. Miller¹,
B.L. Roberts¹, W.M. Morse², Y.K. Semertzidis², V.P. Druzhinin³, B.I. Khazin³,
I.A. Koop³, I. Logashenko³, S.I. Redin³, Y.M. Shatunov³, Y. Orlov⁴, R.M. Talman⁴,
B. Casey⁵, J. Johnstone⁵, D. Harding⁵, A. Klebaner⁵, A. Leveling⁵, J-F. Ostiguy⁵,
N. Mokhov⁵, D. Neuffer⁵, M. Popovic⁵, S. Strigono⁵, M. Syphers⁵, G. Velev⁵,
S. Werkema⁵, F. Happacher⁶, G. Venanzoni⁶, P. Debevec⁷, M. Grosse-Perdekamp⁷,
D.W. Hertzog⁷, P. Kammel⁷, C. Polly⁷, K.L. Giovanetti⁸, K. Jungmann⁹,
C.J.G. Onderwater⁹, N. Saito¹⁰, C. Crawford¹¹, R. Fatemi¹¹, T.P. Gorringe¹¹,
W. Korsch¹¹, B. Plaster¹¹, V. Tishchenko¹¹, D. Kawal¹², T. Chupp¹³,
C. Ankenbrandt¹⁴, M.A. Cummings¹⁴, R.P. Johnson¹⁴, C. Yoshikawa¹⁴, André
de Gouvêa¹⁵, T. Itahashi¹⁶, Y. Kuno¹⁶, G.D. Alkhazov¹⁷, V.L. Golovtsov¹⁷,
P.V. Neustroev¹⁷, L.N. Uvarov¹⁷, A.A. Vasilyev¹⁷, A.A. Vorobyov¹⁷, M.B. Zhalov¹⁷,
F. Gray¹⁸, D. Stöckinger¹⁹, S. Baefler²⁰, M. Bychkov²⁰, E. Frlež²⁰, and D. Počanić²⁰

¹Department of Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA

²Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA

³Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

⁴Newman Laboratory, Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA

⁵Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL 60510, USA

⁶Laboratori Nazionali di Frascati, INFN, I-00044 Frascati (Rome), Italy

⁷Department of Physics, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL 61801, USA

⁸Department of Physics, James Madison University, Harrisonburg, VA 22807, USA

⁹Kernfysisch Versneller Instituut, Rijksuniversiteit,

Groningen, NL 9747 AA Groningen, The Netherlands

¹⁰KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

¹¹Department of Physics, University of Kentucky, Lexington, Ky 40506, USA

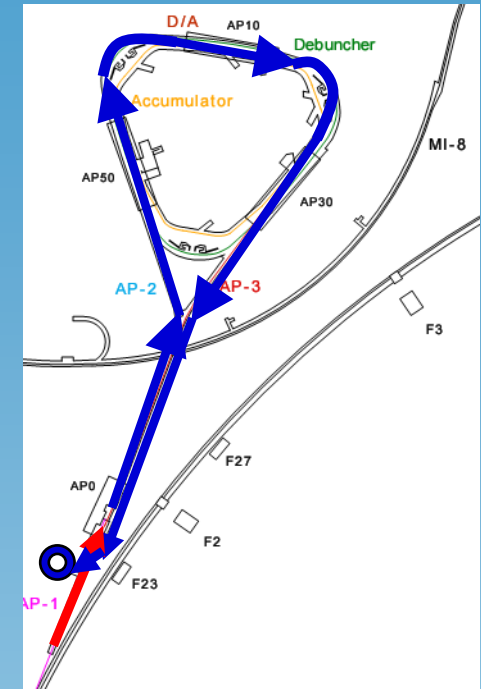
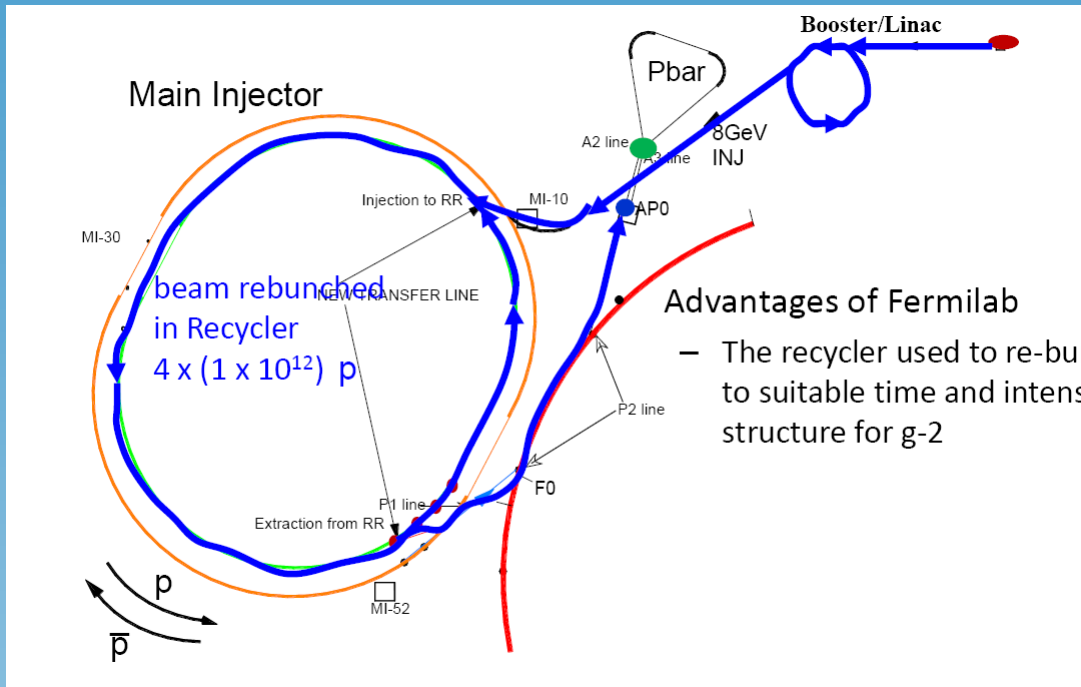
Систематические ошибки

Systematic uncertainty (ppm)	1998	1999	2000	2001	E821 final	P989 Goal
Magnetic field – ω_p	0.5	0.4	0.24	0.17		0.07
Anomalous precession – ω_a	0.8	0.3	0.31	0.21		0.07
Statistical uncertainty (ppm)	4.9	1.3	0.62	0.66	0.46	0.1
Systematic uncertainty (ppm)	0.9	0.5	0.39	0.28	0.28	0.1
Total Uncertainty (ppm)	5.0	1.3	0.73	0.72	0.54	0.14

Эксперимент в FERMILAB – третий в ряду экспериментов,
использующих методику “magic γ ”

Улучшение точности за счет улучшений всех аспектов измерения

Транспортировка пучка



Уникальные возможности Fermilab

- формирование пучка в виде сгустков правильной структуры
- эффективная длина канала распада пионов 900 м
- возможность использования мюонов из распада пионов под 0°

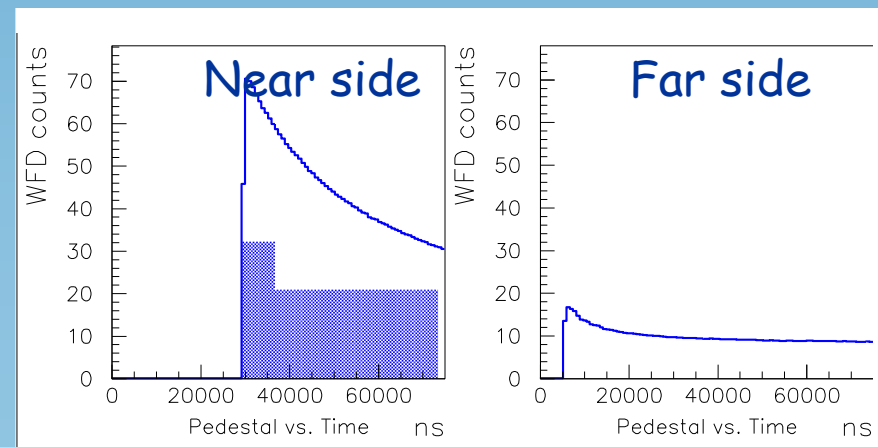
Транспортировка пучка

parameter	BNL	FNAL	gain factor FNAL/BNL
Y_π pion/p into channel acceptance	$\approx 2.7\text{E-}5$	$\approx 1.1\text{E-}5$	0.4
L decay channel length	88 m	900 m	2
decay angle in lab system	3.8 ± 0.5 mr	forward	3
$\delta p_\pi / p_\pi$ pion momentum band	$\pm 0.5\%$	$\pm 2\%$	1.33
FODO lattice spacing	6.2 m	3.25 m	1.8
inflexor	closed end	open end	2
total			11.5

Увеличение
эффективности
накопления в
>10 раз

parameter	FNAL/BNL
p / fill	0.25
π / p	0.4
π survive to ring	0.01
π at magic P	50
Net	0.05

Пионный фон меньше в
20 раз



Проявление пионного фона

Магнитное поле

Source of Uncertainty	1998	1999	2000	2001	New (g-2)
Absolute Calibration	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Calibration of Trolley	0.3	0.20	0.15	0.09	0.06
Trolley Measurements of B0	0.1	0.10	0.10	0.05	0.02
Interpolation with the fixed probes	0.3	0.15	0.10	0.07	0.06
Inflector fringe field	0.2	0.20	-	-	
uncertainty from muon distribution	0.1	0.12	0.03	0.03	0.02
Other*		0.15	0.10	0.10	0.05
Total	0.5	0.4	0.24	0.17	0.11

- Новое здание с устойчивым полом и термостабилизацией
- Улучшение процедур калибровок

Измерение частоты прецессии

В первом приближении: $N(t) = N_0 e^{-t/\gamma\tau} [1 + A \cos(\omega t + \varphi)]$

Однако при большой статистике становятся заметны
мелкие детали

Дополнительные эффекты:

- Изменение коэффициента усиления
- Наложение сигналов
- Когерентные бетатронные колебания (СВО)
- Выбывание мюонов

Способы учета:

- Модификация подгоночной функции

СВО,
выбывание мюонов

- Коррекция исходных данных

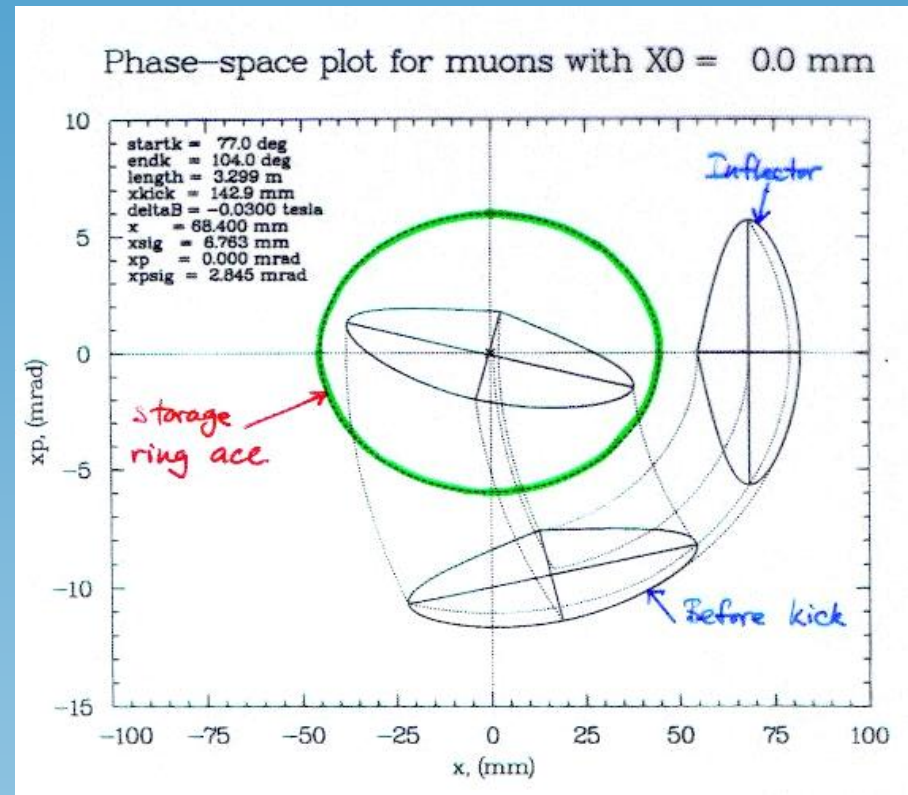
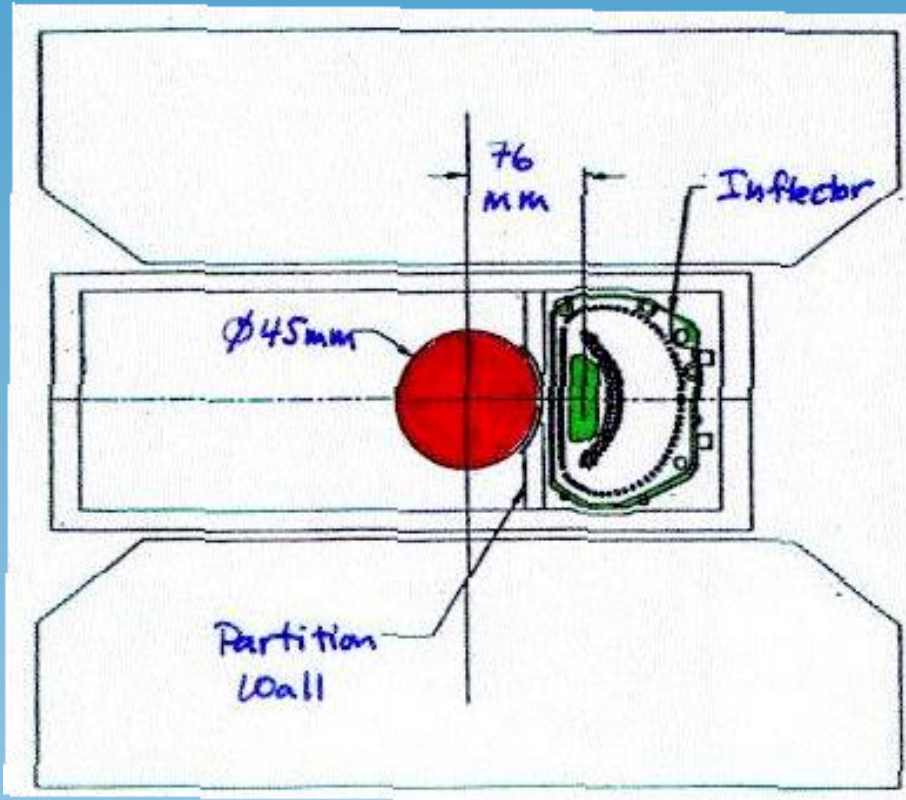
Коэффициент усиления,
наложение сигналов

Измерение частоты прецессии

$\sigma_{\text{systematic}}$	1999	2000	2001	Future
Pile-up	0.13	0.13	0.08	0.04
AGS Background	0.10	0.10	0.015*	
Lost Muons	0.10	0.10	0.09	0.02
Timing Shifts	0.10	0.02	0.02	
E-Field, Pitch	0.08	0.03	0.06*	0.03
Fitting/Binning	0.07	0.06	0.06*	
CBO	0.05	0.21	0.07	0.04
Beam Debunching	0.04	0.04	0.04*	
Gain Change	0.02	0.13	0.13	0.02
total	0.3	0.31	0.21	~0.07

Когерентные бетатронные колебания

Апертура инфлектора меньше фазового объема кольца



Пучок совершает колебания и "дышит" с частотой

$$\omega_{CBO} = \left(-\sqrt{1-n} \right) \omega_C$$

Когерентные бетатронные колебания

Почему мы видим СВО в данных?

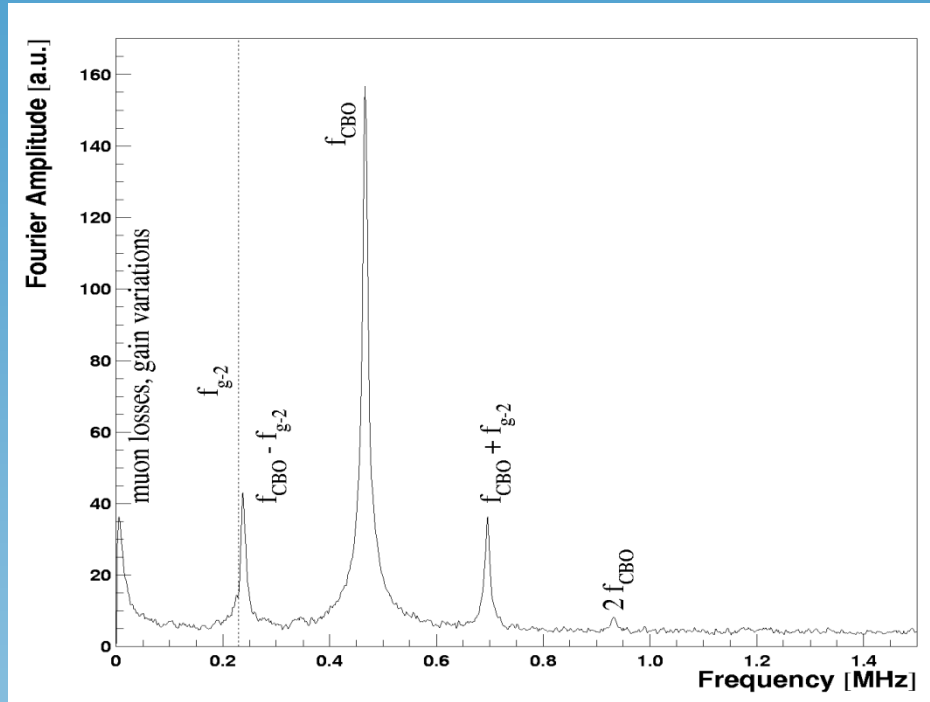
- Эффективность калориметра зависит от положения вершины распада мюона и от энергии электрона
- Время пролета электрона от точки распада мюона до калориметра зависит от положения вершины распада и от энергии электрона

Модификация функции подгонки

$$\frac{dN}{dt} = N_0(t) e^{-\frac{t}{\tau}} \left[1 + A(t) \cos(\omega_a t + \phi(t)) \right] \left\{ \begin{array}{l} N_0(t) = N_0 \left[1 + A_N e^{-\frac{t}{\tau_{CBO}}} \cos(\psi_{CBO} t + \phi_N) \right] \\ A(t) = A_0 \left[1 + A_A e^{-\frac{t}{\tau_{CBO}}} \cos(\psi_{CBO} t + \phi_A) \right] \\ \phi(t) = \phi_0 \left[1 + A_\phi e^{-\frac{t}{\tau_{CBO}}} \cos(\psi_{CBO} t + \phi_\phi) \right] \end{array} \right.$$

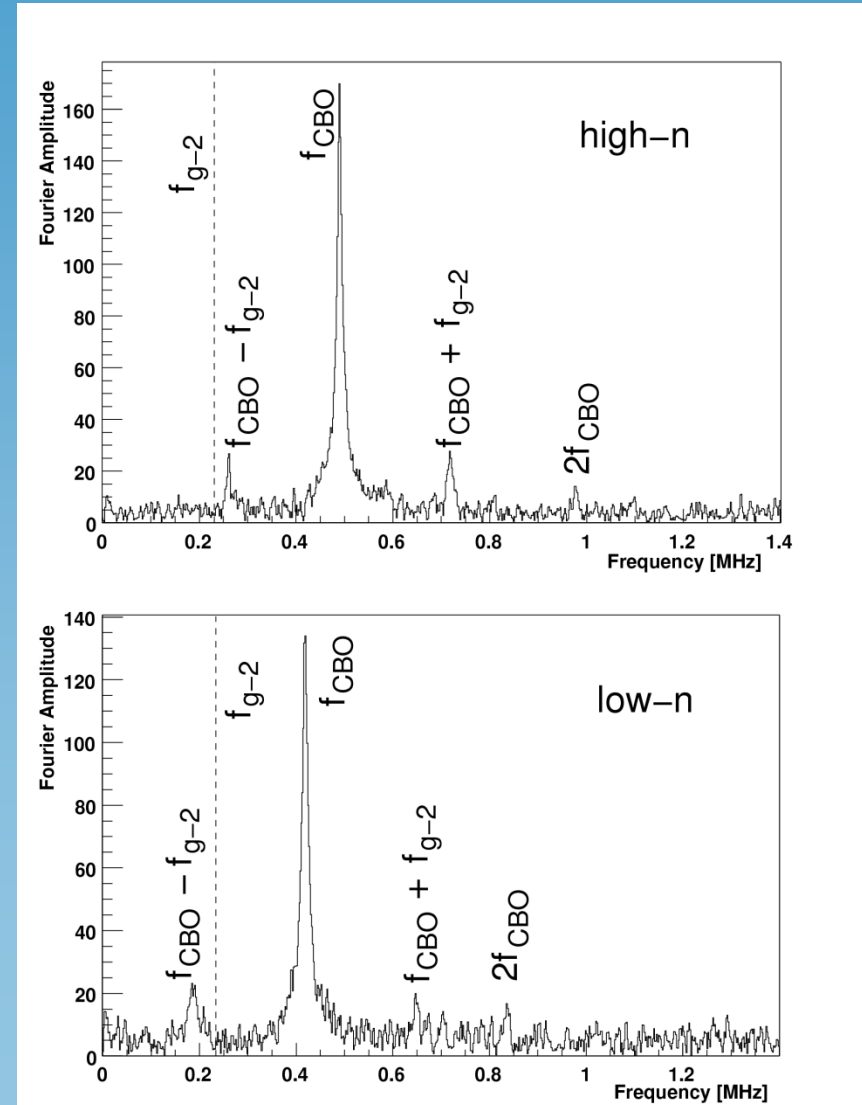
Когерентные бетатронные колебания

2000 data



ω_{CBO} is too close to $2\omega_a$!

2001 data



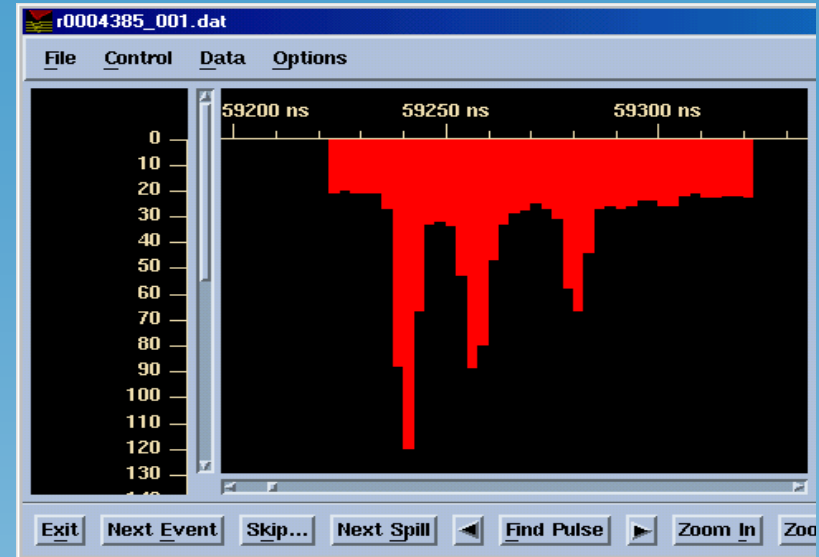
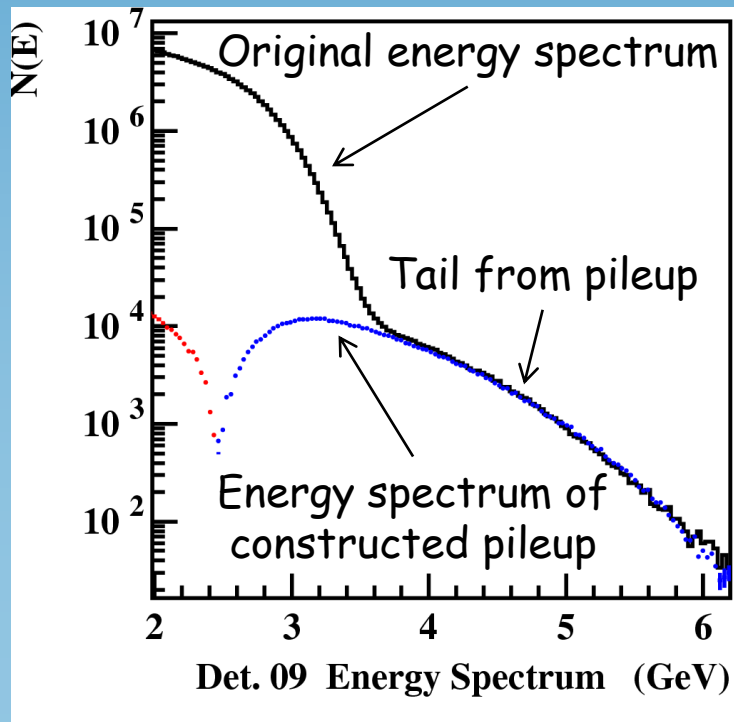
Когерентные бетатронные колебания

Способы уменьшения влияния СВО в новом эксперименте

- Выбор “правильных” напряжений на квадрупольях (задает величину n)
- Модернизация кикера для достижения оптимального удара
- “Размазывание” СВО с помощью магнитного мультиполя, включенного на несколько микросекунд сразу после инжекции
- Уменьшение амплитуды СВО с помощью резонатора

Наложение сигналов

Электроны, прилетевшие в пределах 3-5 нс, реконструируются как один электрон. Доля таких электронов (~1% сначала) меняется со временем, что приводит к систематическому сдвигу ω_a



Благодаря оцифровке "хвоста" сигнала, удается статистически восстановить и вычесть вклад наложений с точностью 5-10%

Наложение сигналов

Способы уменьшения влияния наложения сигналов в новом эксперименте

- Больше число сгустков при меньшем числе протонов в сгустке (БНЛ: 4.4 Гц × 5 Tr/fill → FNAL: 18 Гц × 1 Tr/fill)
- Сегментированный калориметр (4×5, 5×5, 5×7)
- Новая электроника - непрерывная оцифровка
- Новый метод анализа (Q-method) - измеряем выделившуюся энергию как функцию времени. Наложение сигналов не играет никакой роли!

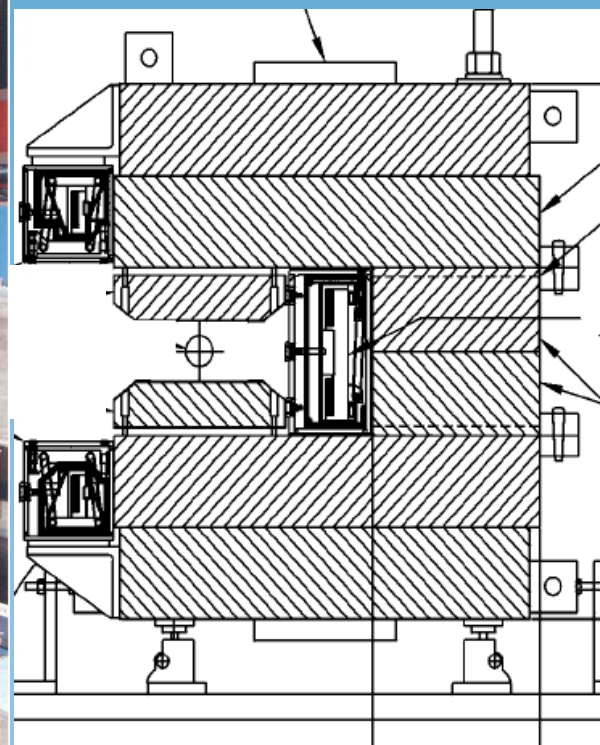
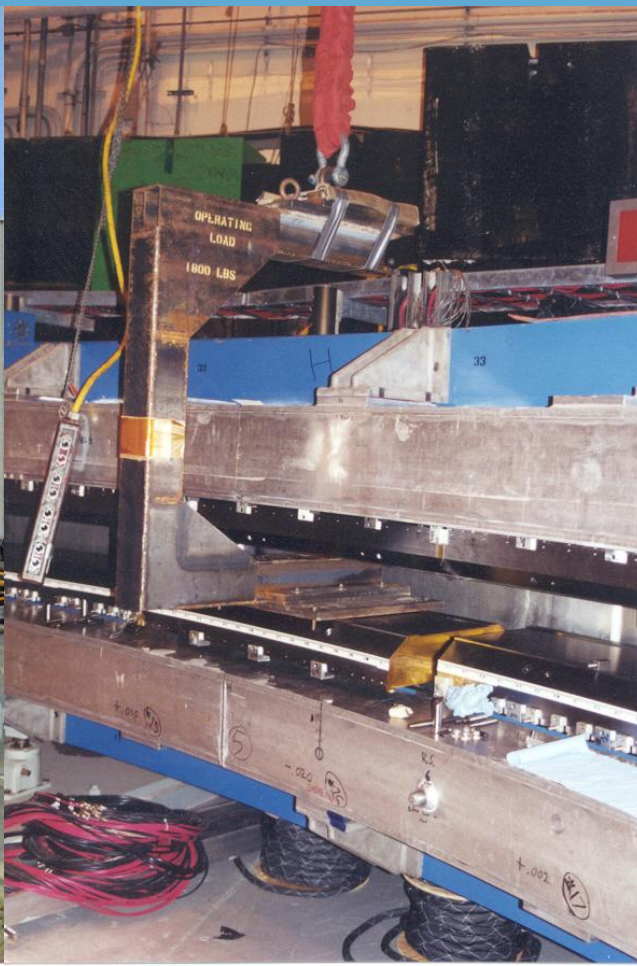
$$\underbrace{\frac{dN}{dt}(t) = \int_{E_{thr}} \frac{dN}{dEdt}}_{\sigma_{stat}} \quad \underbrace{\frac{d\tilde{N}}{dt}(t) = \int_{E_{thr}} A(E) \frac{dN}{dEdt}}_{0.9 \sigma_{stat}} \quad \underbrace{\frac{dQ}{dt}(t) = \int_0 \frac{dN}{dEdt}}_{1.1 \sigma_{stat}}$$

T-method Q-method

Перенос эксперимента из БНЛ

В новом эксперименте предполагается использовать то же накопительное кольцо, что и в БНЛ

Планируется перевезти сверхпроводящие обмотки целиком, а остальные составляющие кольца - по деталям.



Перенос эксперимента из БНЛ



- Transport coils to and from barge via Sikorsky aircrane
- Ship through St Lawrence → Great Lakes → Calumet SAG
- Subsystems can be transported overland, but probably more cost effective to ship steel on barge as well.

Сикорский S64F
Грузоподъемность 12.5 Т
Внешняя обмотка 8Т

from Chris Polly



Проект эксперимента в JPARC

New g-2 experiment at J-PARC

October 14, 2009

Tsutomu Mibe (三部 勉)

KEK

tsutomu.mibe@kek.jp



New approach: Going to lower momentum

- ◆ Disadvantages
 - ◆ No longer at magic momentum.
 - ◆ Muon decays more quickly.
- ◆ ... However, experimental apparatus can be **compact**.
 - ◆ Better accuracy of B-field, e.x. 1 ppm local accuracy with MRI application
 - ◆ Stronger B-field, i.e. more precession
 - ◆ Better environmental control
 - ◆ temperature, EM noise shielding etc.
 - ◆ Completely different systematics than the BNL E821
- ◆ Ok, but how do we deal with the $\beta \times E$ term?
 - ◆ **Zero electric field**

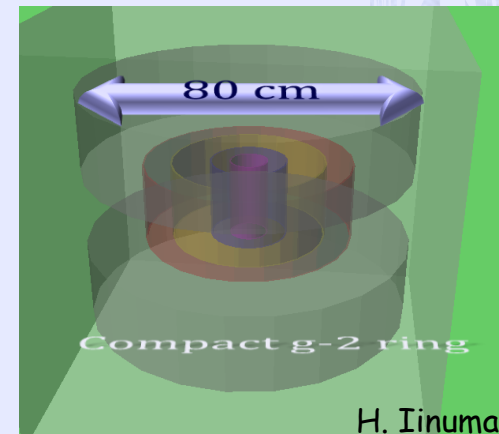
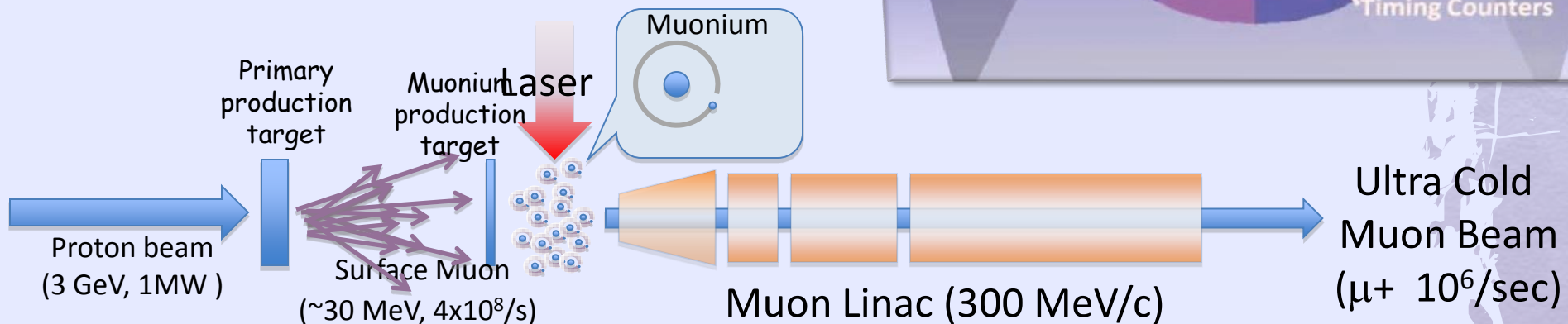
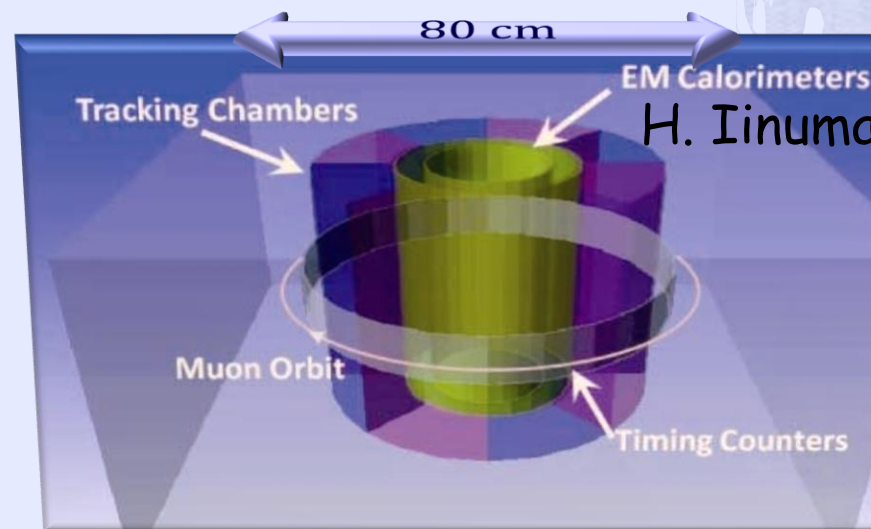


図1：オープンMRI装置の概観図

New Generation of Muon g-2@J-PARC

- ◆ New generation of muon g-2 experiment is being explored at J-PARC
 - ◆ To establish the deviation by improving the statistics and systematics
 - ◆ To further explore new physics
- ◆ With completely new technique
 - ◆ Off magic momentum with **ultra-cold muon beam** at 300 MeV/c
 - ◆ Stored in ultra-precision B field **without E-field** so that the $\beta \times E$ term drops

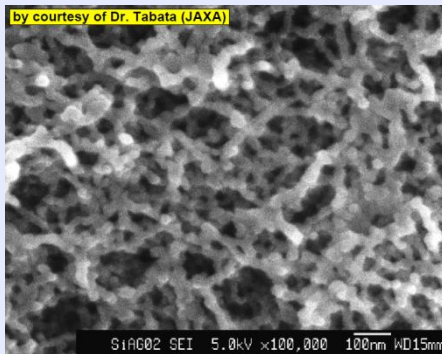


Muon source

40000 times more muons than RAL is required.

Muonium production

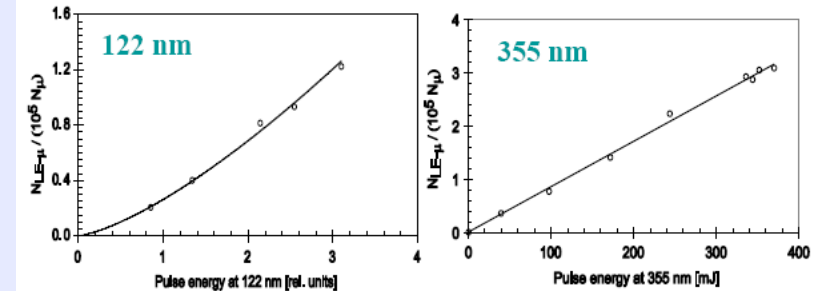
- ◆ Upto **300** times more surface muons are expected at J-PARC.
- ◆ Colder muoniums (2000K → 300K)
- ◆ High density aerogel (RIKEN/Chiba-U)



- ◆ **Measurement of yield, and space-time distributions @TRIUMF**

Laser ionization

- ◆ High power laser (RIKEN)
 - ◆ **100** times higher power.
 - ◆ Linearity probably holds (need confirmation by data).



- ◆ Exercise laser ionization of Mu from a room temp. target.
- ◆ **Plan to do these series of tests at RAL**

BNL, FNAL, and J-PARC

◆ complimentary

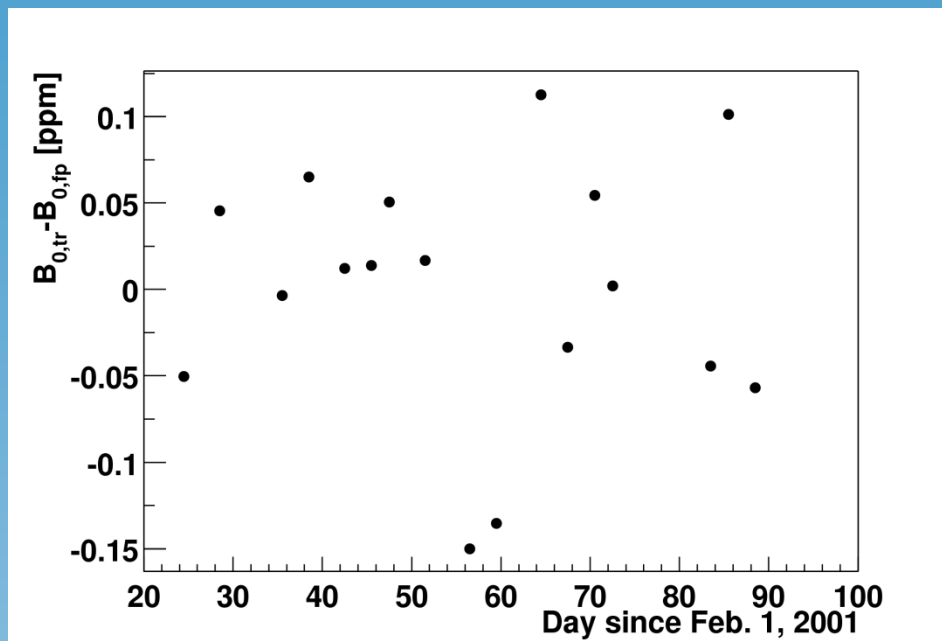
	BNL-E821	Fermilab	J-PARC
Muon momentum	3.09 GeV/c		0.3 GeV/c
gamma	29.3		3
Storage field	B=1.45 T		3.0 T
Focusing field	Electric quad		None
# of detected μ^+ decays	5.0E9	1.8E11	1.5E12
# of detected μ^- decays	3.6E9	-	-
Precision (stat)	0.46 ppm	0.1 ppm	0.11 ppm

Заключение

1. Аномальный магнитный момент мюона измерен в БНЛ с точностью 0.54 ppm
2. Разница между измеренным значением и предсказанием СМ составляет ~ 3 стандартных отклонений
3. Планируется новый эксперимент в Fermilab с целью улучшить точность измерения в 4 раза
4. Независимо от того, подтвердит ли новый эксперимент отличие от предсказания СМ, более точное значение аномального магнитного момента мюона поможет ограничить спектр возможных значений параметров расширений Стандартной Модели (даже с учетом измерений на LHC)
5. За последние два десятилетия произошел большой прогресс в улучшении точности предсказания СМ. Много современных работ посвящено дальнейшему улучшению точности

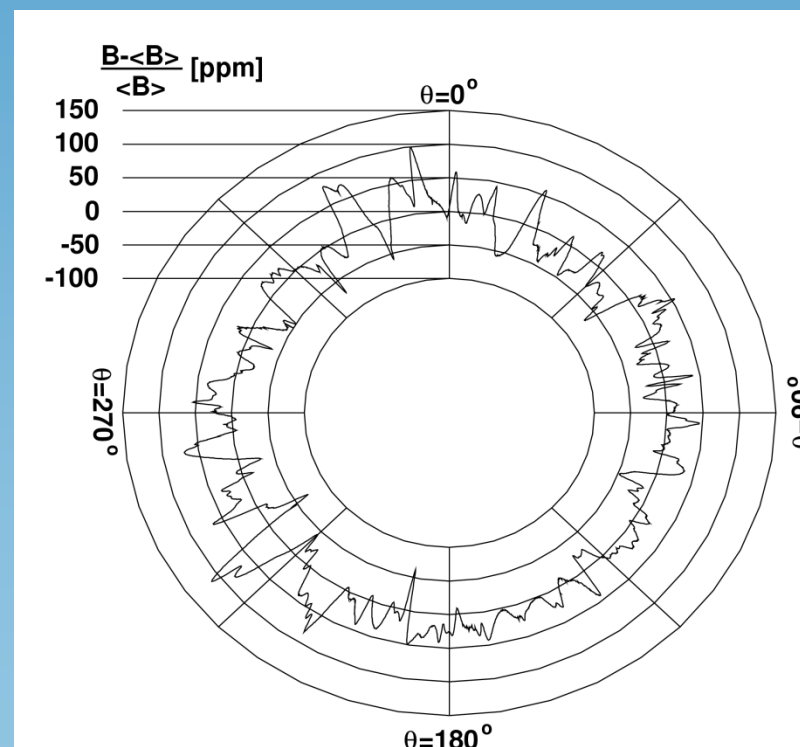
Дополнительные слайды

Магнитное поле



Difference between field measurements by trolley and fixed probes as a function of time (2001 data)

Field value around the ring.



Измерение ЭДМ

<i>Particle</i>	<i>Present EDM limit (e-cm)</i>	<i>SM value (e-cm)</i>
p	7.9×10^{-25}	
n	2.9×10^{-26}	$\simeq 10^{-32}$
^{199}Hg	3.1×10^{-29}	
e^{-}	$\sim 1.6 \times 10^{-27}$	$< 10^{-41}$
μ	1.8×10^{-19} (E821)	$< 10^{-38}$

References: n PRL 97, 131801 (2006)
 $p, ^{199}\text{Hg}$ PRL 102, 101601 (2009)
 e^{-} PRL 88, 071805 (2002)
 μ arXiv:0811.1207v2 [hep-ex]

Выбывание частиц

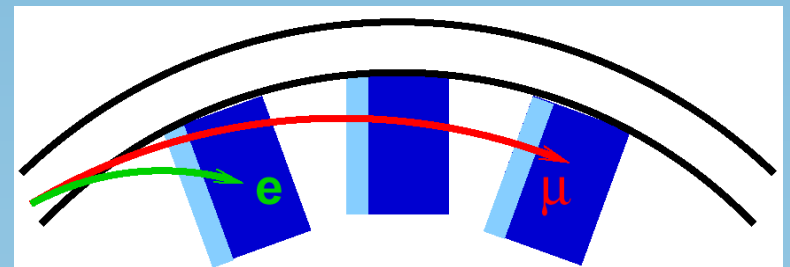
Muon losses are minimized by
scraping:

- First few microseconds beam is moved up to clear the edge of acceptance
- The residual losses are 0.1-0.5%

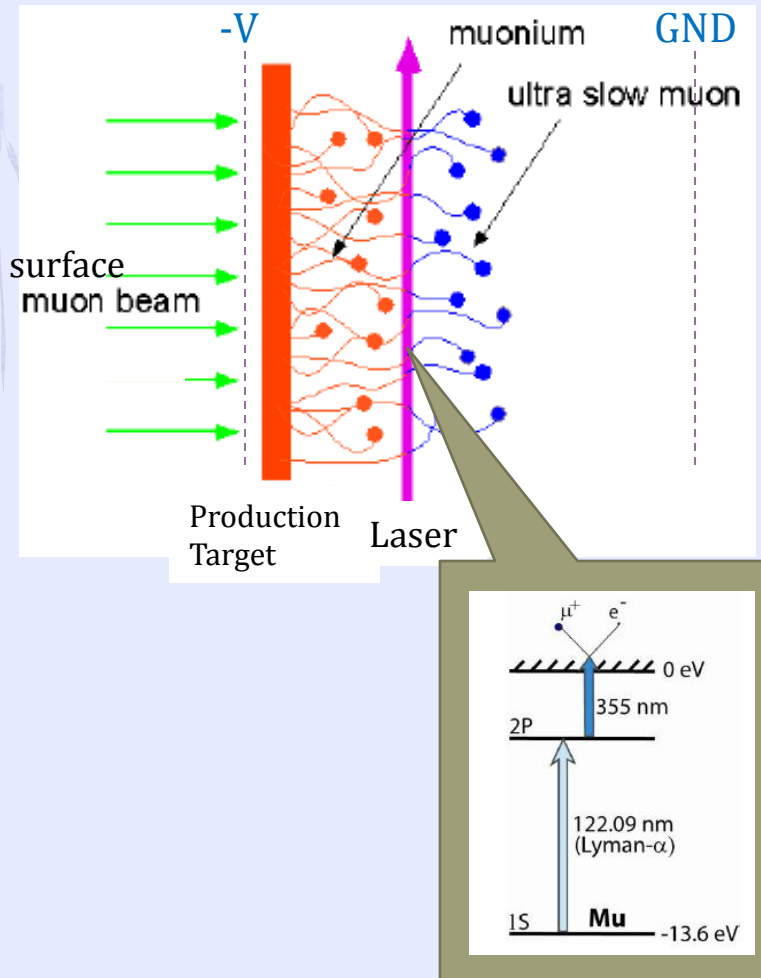
Modification to the fit
function

$$N(t) \rightarrow N(t) \times \exp \left(-A_L \int_{t_0}^t C(t') dt' \right)$$

Function $C(t)$ is measured
from the data, using detector
coincidences



Ultra-slow muon



◆ Surface muon beam

- ◆ Polarization $\sim 100\%$
- ◆ Momentum $p(\mu^+) \sim 27 \text{ MeV}/c$

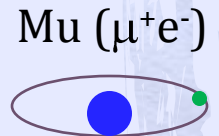
◆ Muonium production

- ◆ Surface muon stops in the target
- ◆ Formation of muonium by electron capture
- ◆ Thermal diffusion to vacuum
- ◆ $\rho_{\text{Mu}}(E) = \exp(-E/kT)$
- ◆ $p \sim 2.6 \text{ keV}/c$ ($p_T \sim 2.1 \text{ keV}/c$) @300K

◆ Laser resonant ionization

- ◆ $1S \rightarrow 2P \rightarrow \text{unbound}$
- ◆ $122\text{nm}(\text{Lyman-}\alpha) + 355\text{nm}$

- ◆ Initially realized at KEK, a dedicated BL operated at RAL $\sim 20 \mu^+/\text{sec}$



Re-acceleration to $300 \text{ MeV}/c \rightarrow$ pencil muon beam $p_L/p_T \sim 10^{-5}$