

ГРОДНО – 2018

Поиски физики за пределами Стандартной модели.

Эксперимент MEG.

Одной из важнейших задач современной физики элементарных частиц является определение пределов применимости Стандартной модели (СМ) электрослабых взаимодействий, поиск явлений, выходящих за ее рамки и свидетельствующих тем самым о наличии «новой физики».

Наряду с поиском и исследованием новых процессов на вновь создаваемых ускорителях сигналы «новой физики» могут, в принципе, быть обнаружены при тщательных исследованиях с высокой точностью известных, в том числе и редких, процессов. Началу им положила работа Б.М. Понтекорво и Е.Р. Hincks 1948 года по поиску распада $\mu \rightarrow e \gamma$ выполненная на космических мюонах [1]. Теоретическим обоснованием этого эксперимента было предположение о μ -е универсальности сделанное Б.М. Понтекорво в 1947 году [2]. С формулировкой в 1953 году закона сохранения лептонного заряда, исследования редких распадов мюонов и пионов были направлены на его проверку.

- [1] B. Pontecorvo and E.P Hincks, Search for Gamma-Radiation in the 2.2- μ sec Meson Decay Process // Phys. Rev., 1948, vol.73, No.3, p.257-258**
- [2] B. Pontecorvo, Nuclear capture of mesons and the meson decay // Phys. Rev.,1947, 72, 246**
- [3] Б.М. Понтекорво Мезоний и антимезоний // ЖЭТФ, 1957,33, 2, 549-551.**

Почему мы говорим физика за пределами Стандартной модели?

В настоящее время готовятся следующие эксперименты:

$\mu \rightarrow e \gamma$ (PSI)

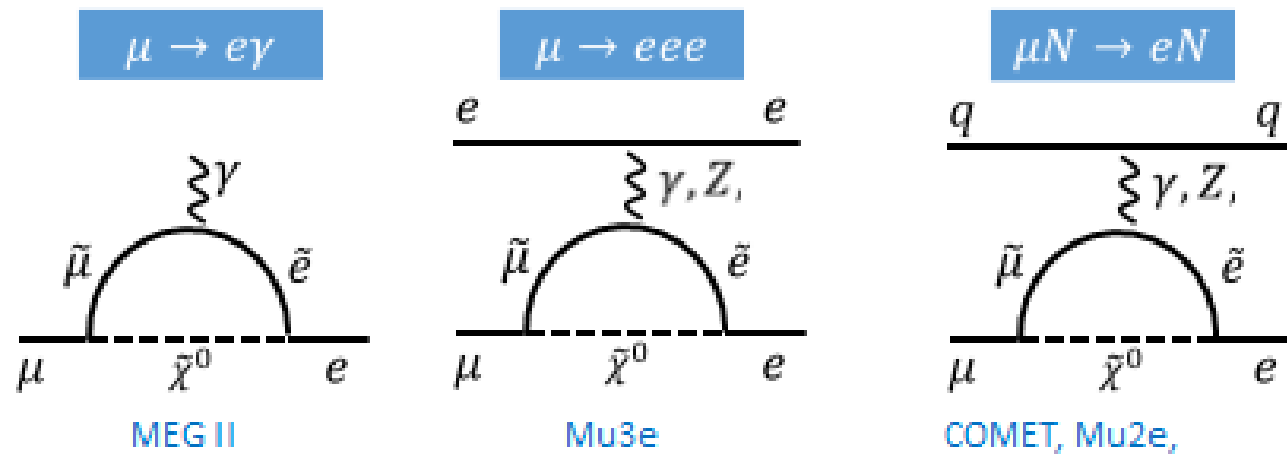
$\mu \rightarrow e e e$ (PSI)

$\mu N \rightarrow e N$ (FNAL)

$\mu N \rightarrow e N$ (KEK)

g-2 (FNAL)

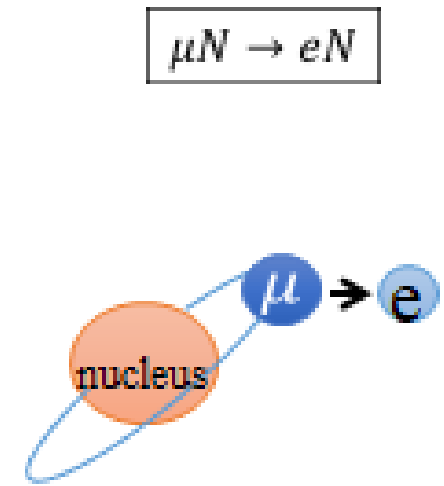
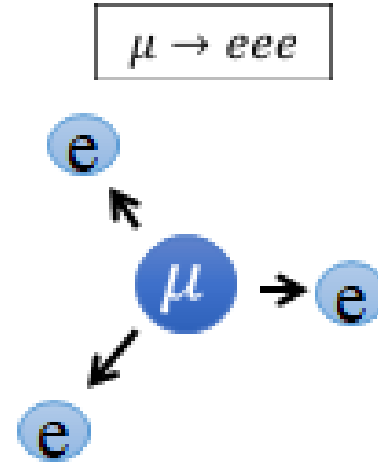
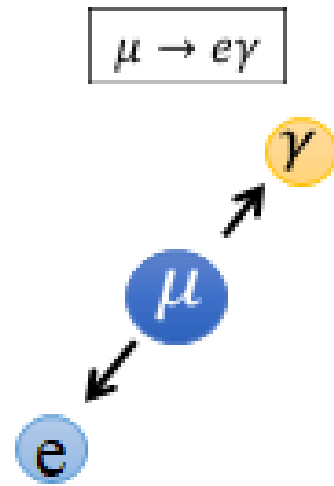
Моды распада мюона



Ожидается, что $\text{Br}(\mu \rightarrow e)$ больше чем $\text{Br}(\mu \rightarrow e e e)$ и $\text{Br}(\mu N \rightarrow e N)$ если процессы с промежуточным фотоном доминируют.

$\mu \rightarrow e \gamma$ и $\mu \rightarrow e e e$ также чувствительны к безфотонным процессам.

Сигнал и фон



Сигнал: угол между e и γ 180°
совпадения
 $E_\gamma = E_e = 52.8\text{MeV}$

общая вершина
совпадения
сумма $E_e = m_\mu$

$E_s = m_\mu$ - (энергия связи)

Фон: случайные e и γ
 $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$

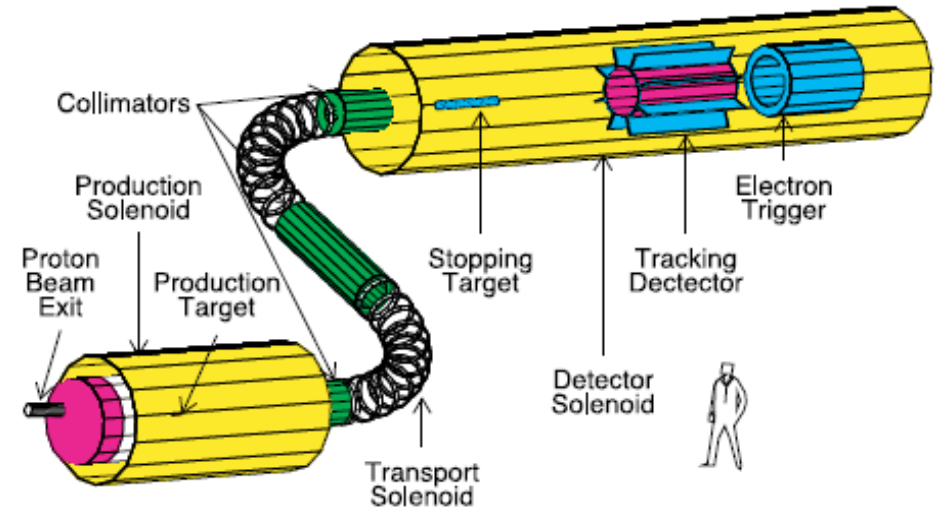
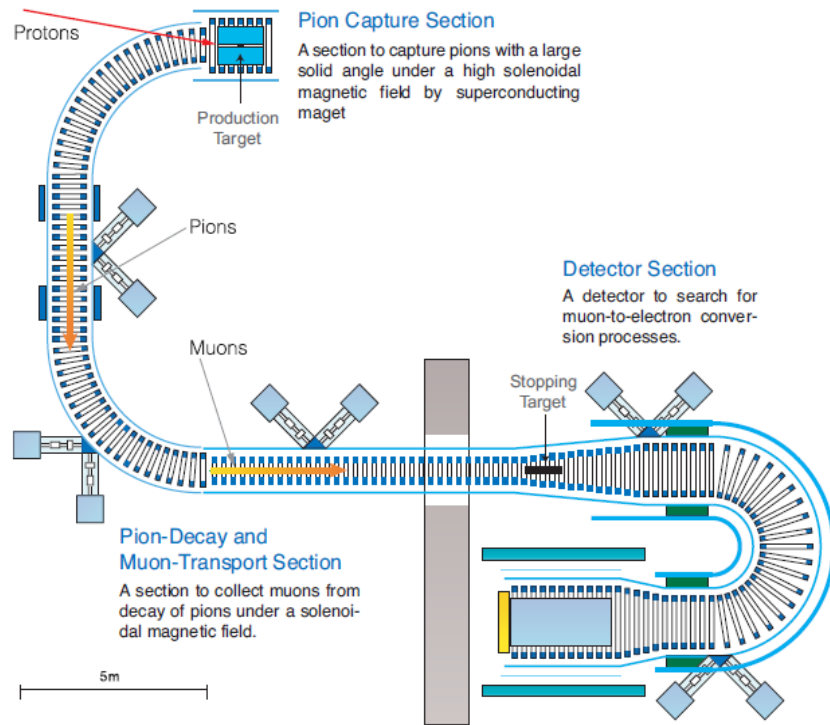
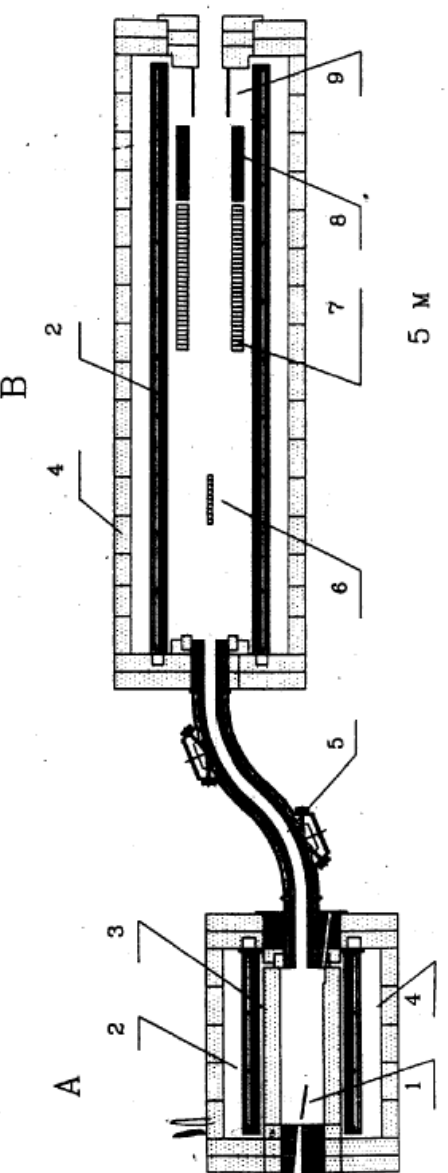
случайные $e \times 3$
 $\mu \rightarrow eee\nu\nu$

фон пучка
распад μ на орбите

разрешение детектора
DC пучок

разрешение детектора
DC пучок

импульсный пучок



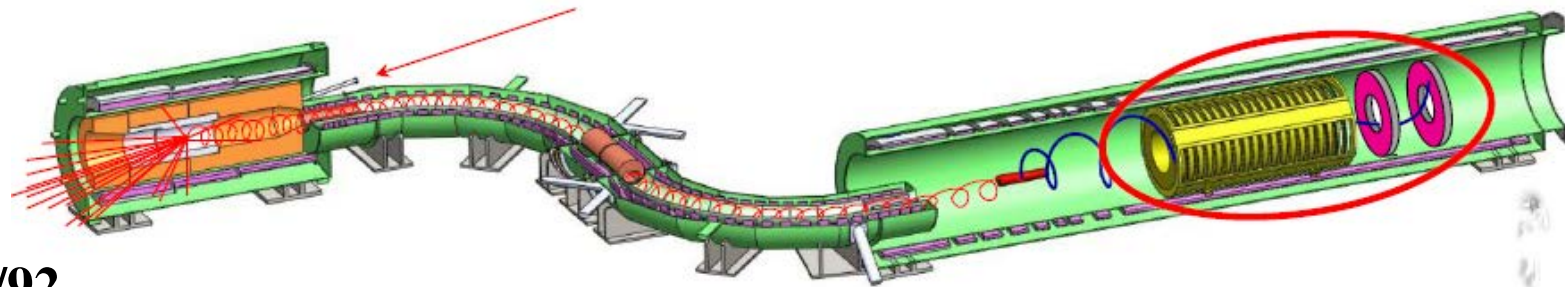
MECO (BNL, 1997), не реализован

COMET (KEK, 2009 - ?) , KEK/J-PARK, 2011-27,

An Experimental Search for Lepton Flavor Violating

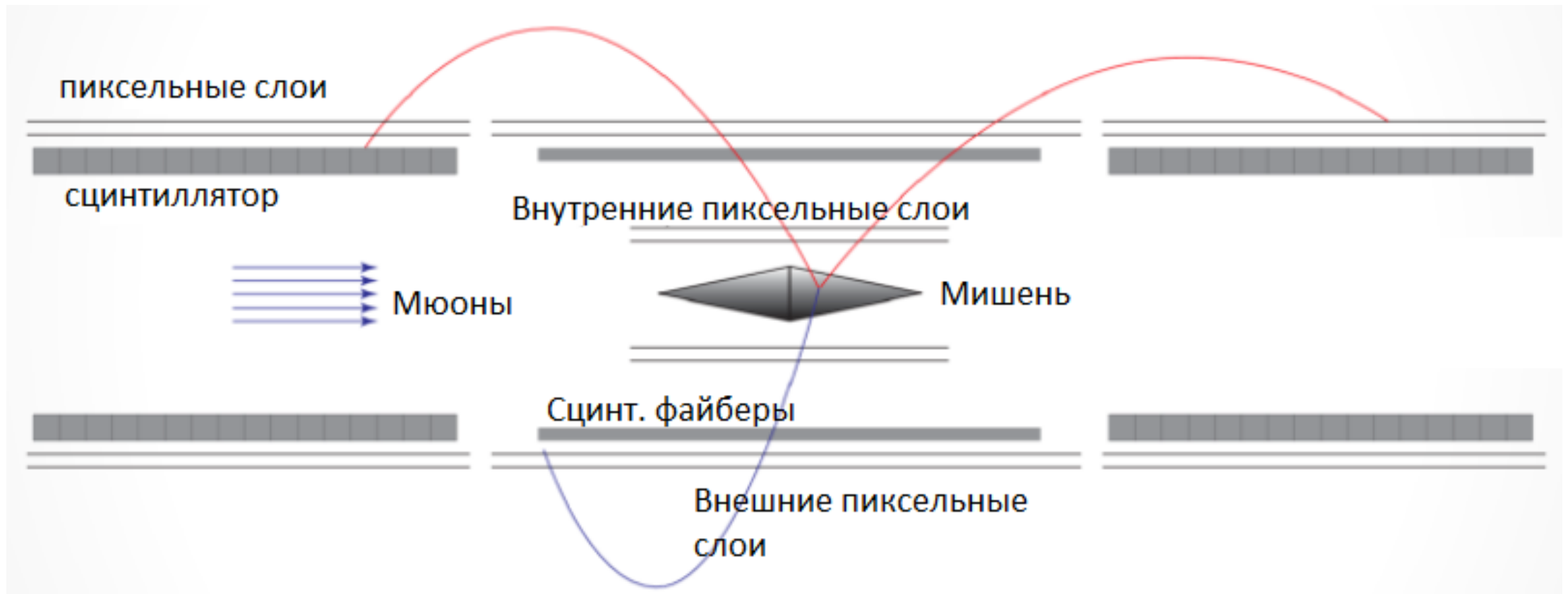
$\mu^- - e^-$ Conversion at

Sensitivity of 10^{-16}



Mu2e (FNAL, 2012-?), FNAL 973, Proposal to Search for $\mu N \rightarrow e N$ with Single Event Sensitivity Below 10^{-16}

MELC (MMF, 1992), Preprint INR – 789/92, November 1982, MELC experiment to search the $\mu N \rightarrow e N$ process, не реализован.



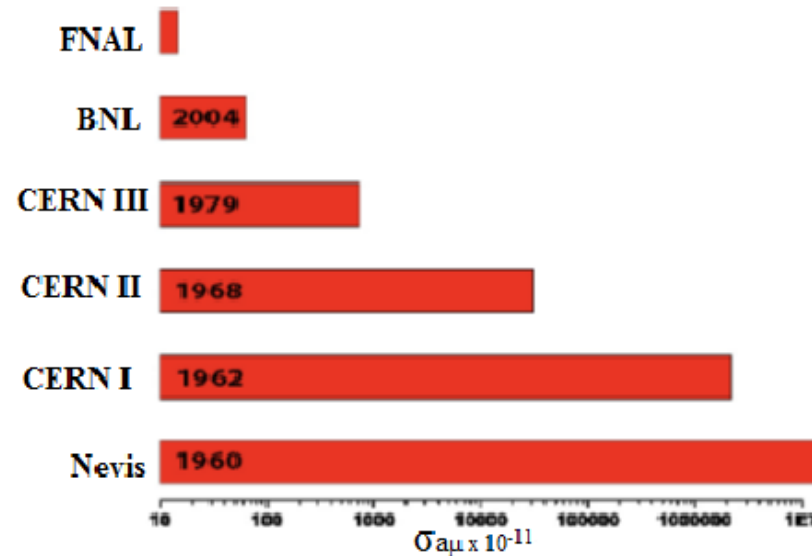
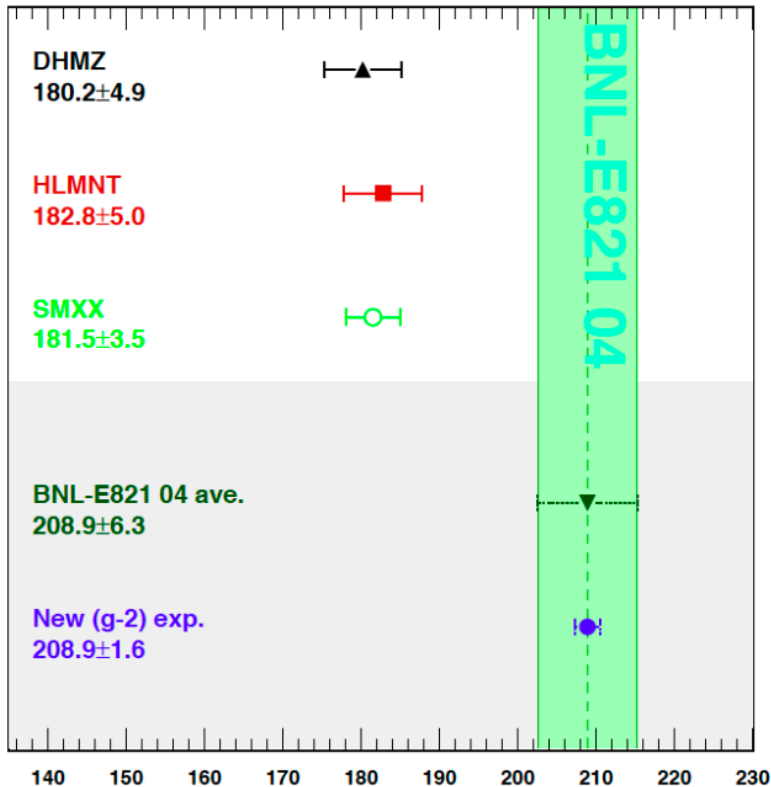
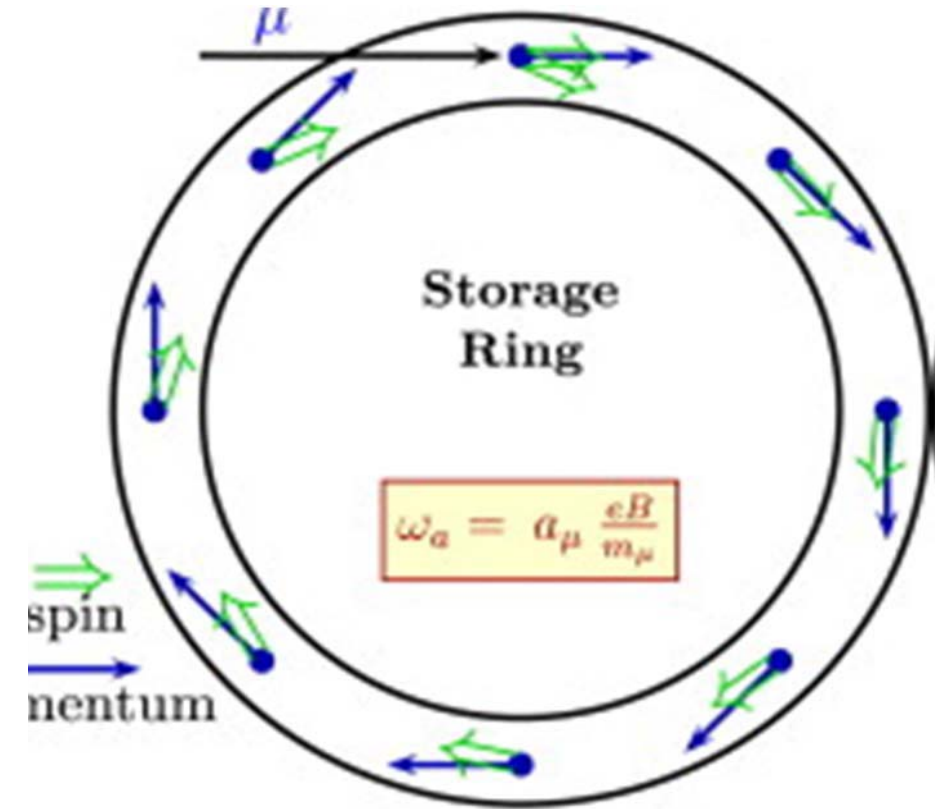
arXiv: 1301.6113, Research Proposal for an Experiment to Search for the Decay $\mu \rightarrow eee$

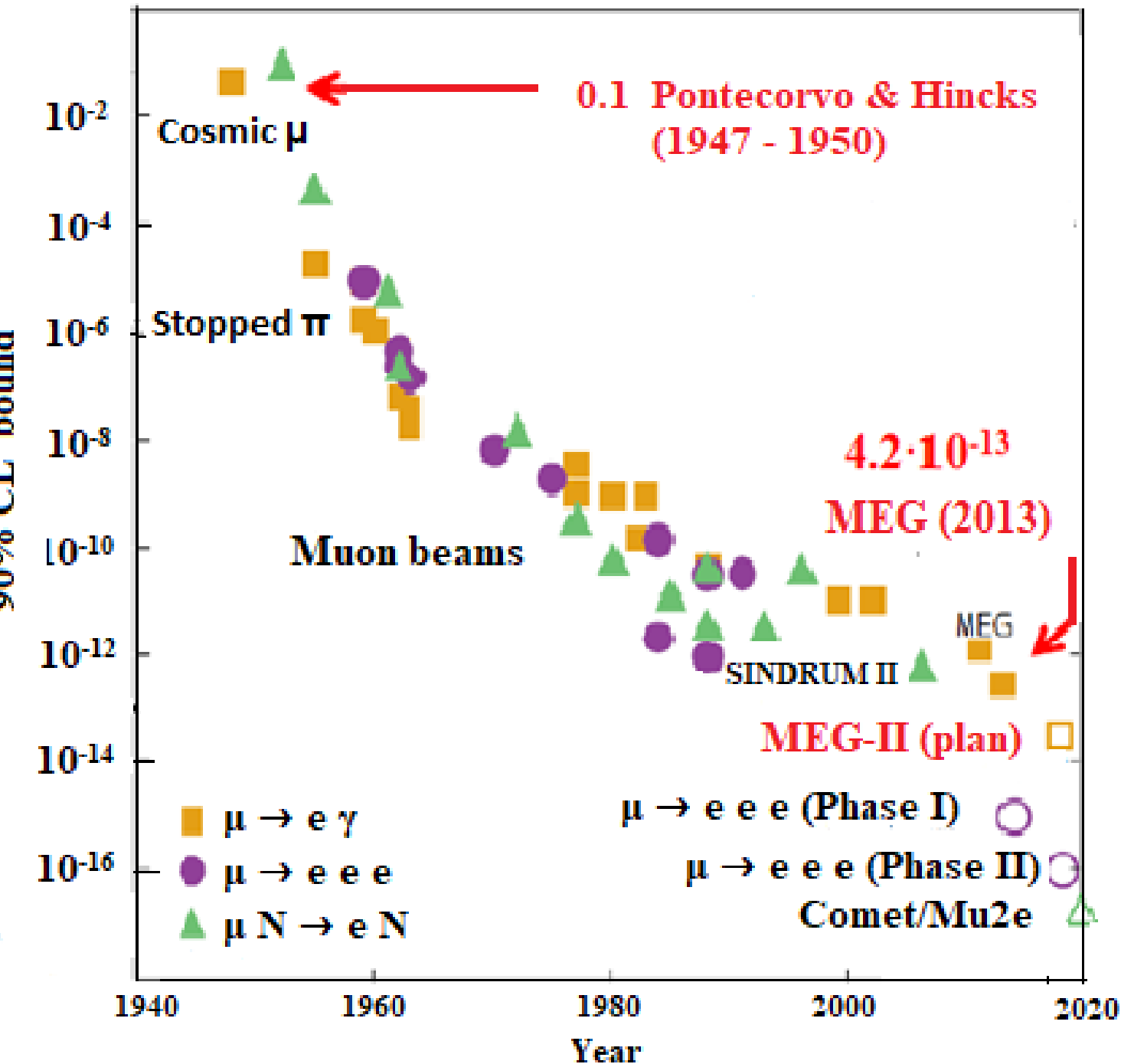
g-2 (Измерение аномального магнитного момента мюона)

$$a_\mu = \frac{g - 2}{2},$$

E821(BNL) → E989(FNAL), FEMILAB-FN-0992-E

Цель эксперимента достичь точности 16×10^{-11} и таким образом поставить точку в интригующем сюжете.

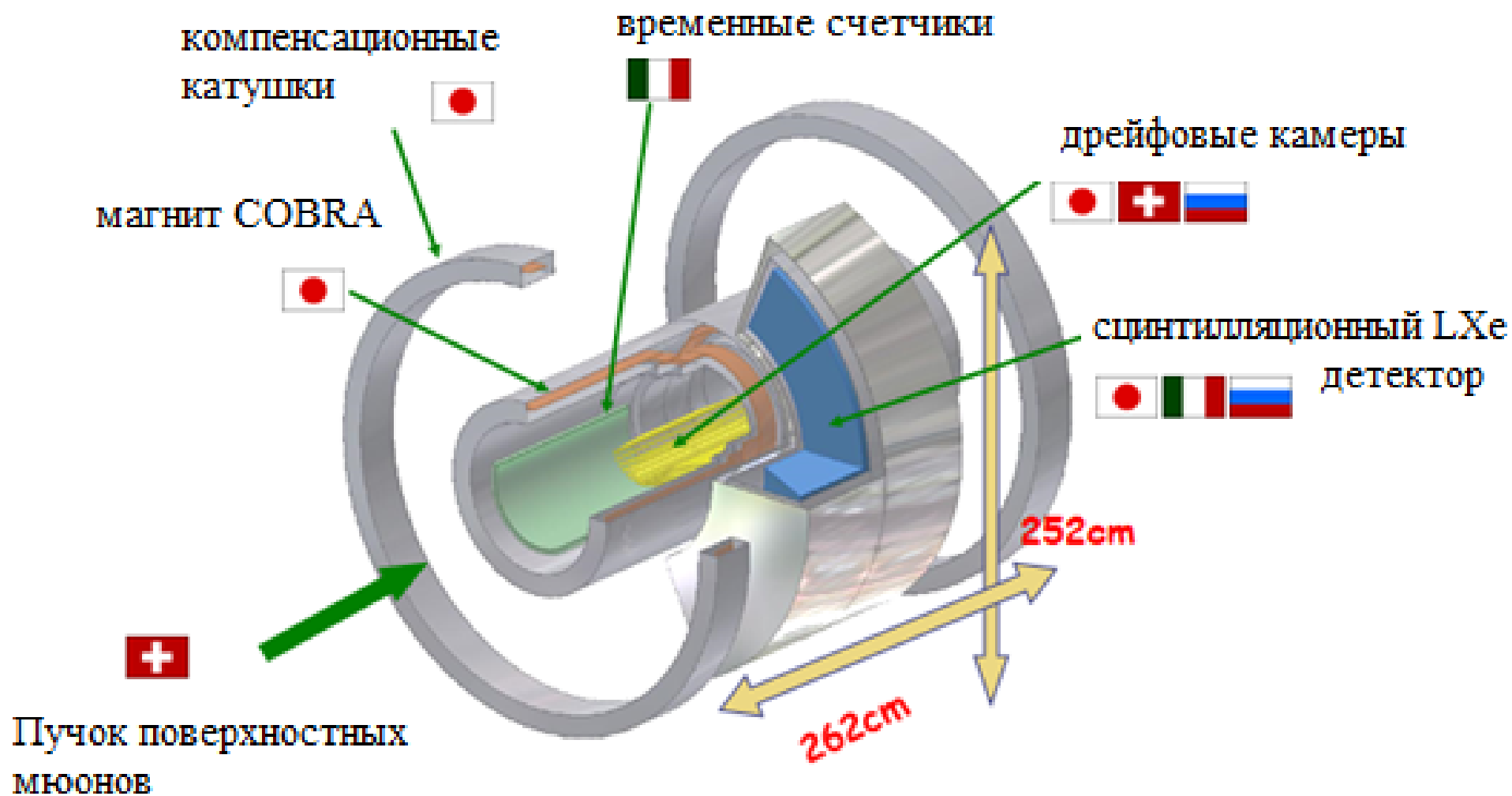




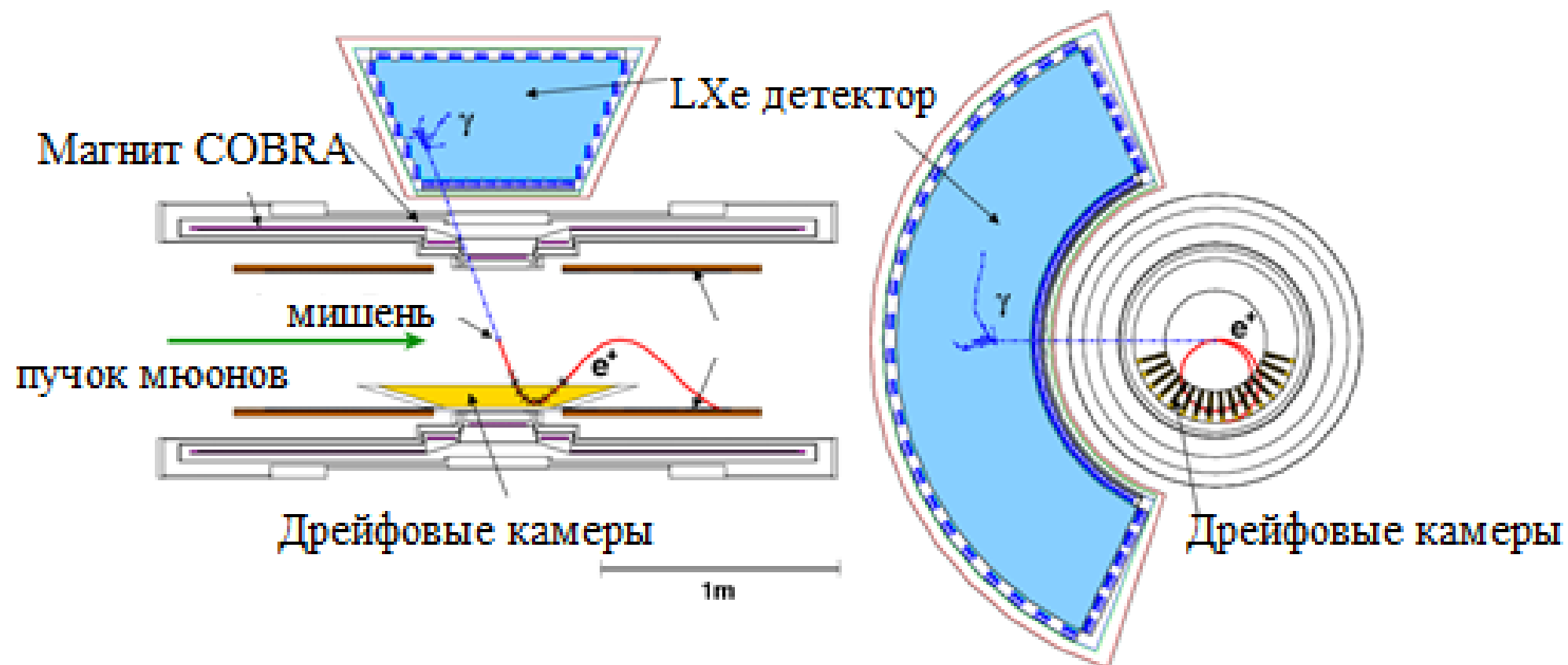
Бруно Понтекорво

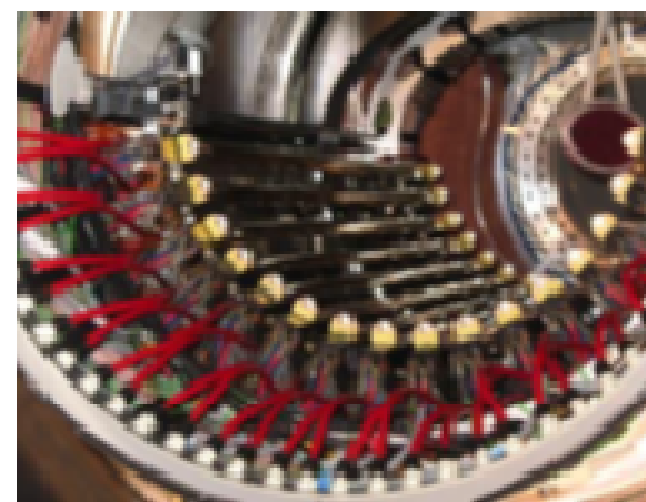
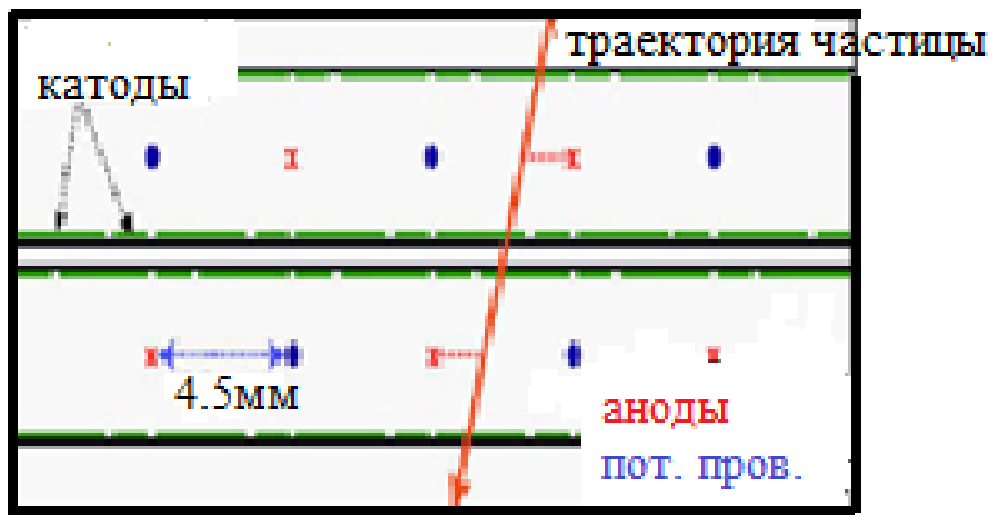
За годы исследования редких процессов точность улучшилась на 12 порядков. Это достигнуто как за счет улучшения методики измерений, так и прогресса в создании новых высокоточных ускорителей.

Детектор MEG

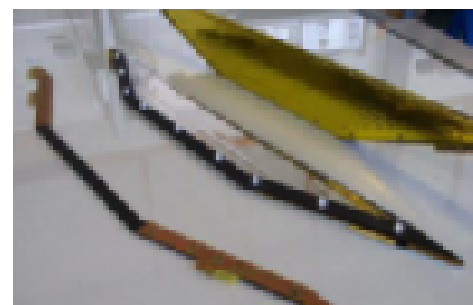


MEG Детектор





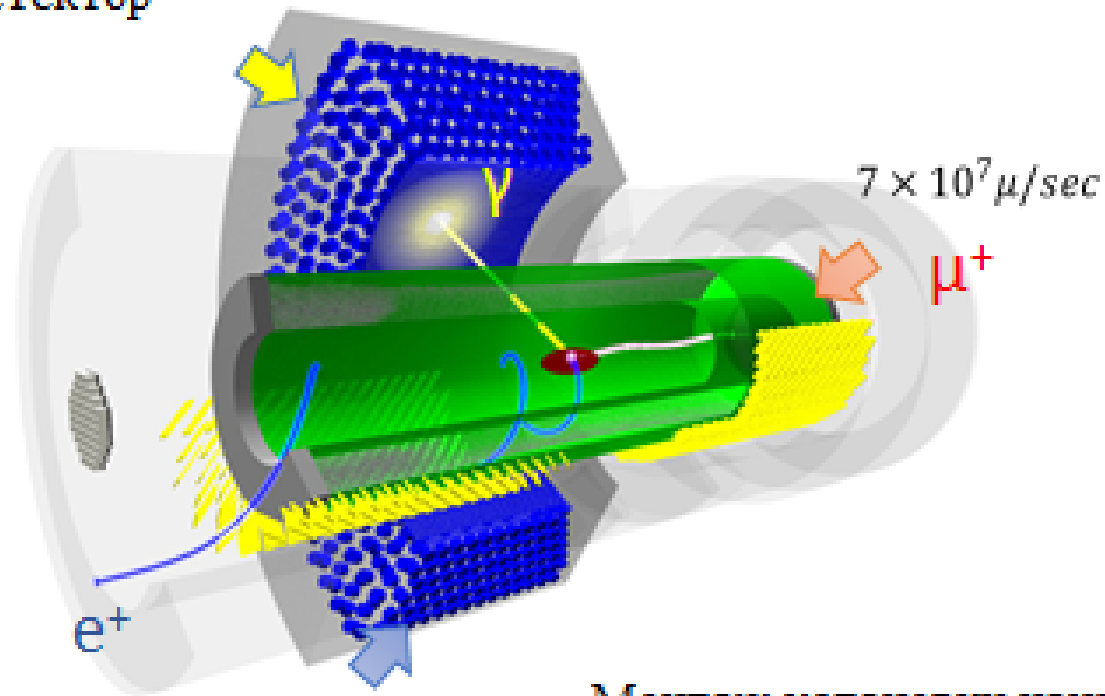
$\sigma_{xy} \sim 210 \mu\text{m}$ (t drift);
 $\sigma_z \sim 800 \mu\text{m}$ (Vernier)



MEG-I Drift Chambers, Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2365

$\mu \rightarrow e\gamma$: MEG II цель Br 4×10^{-14}

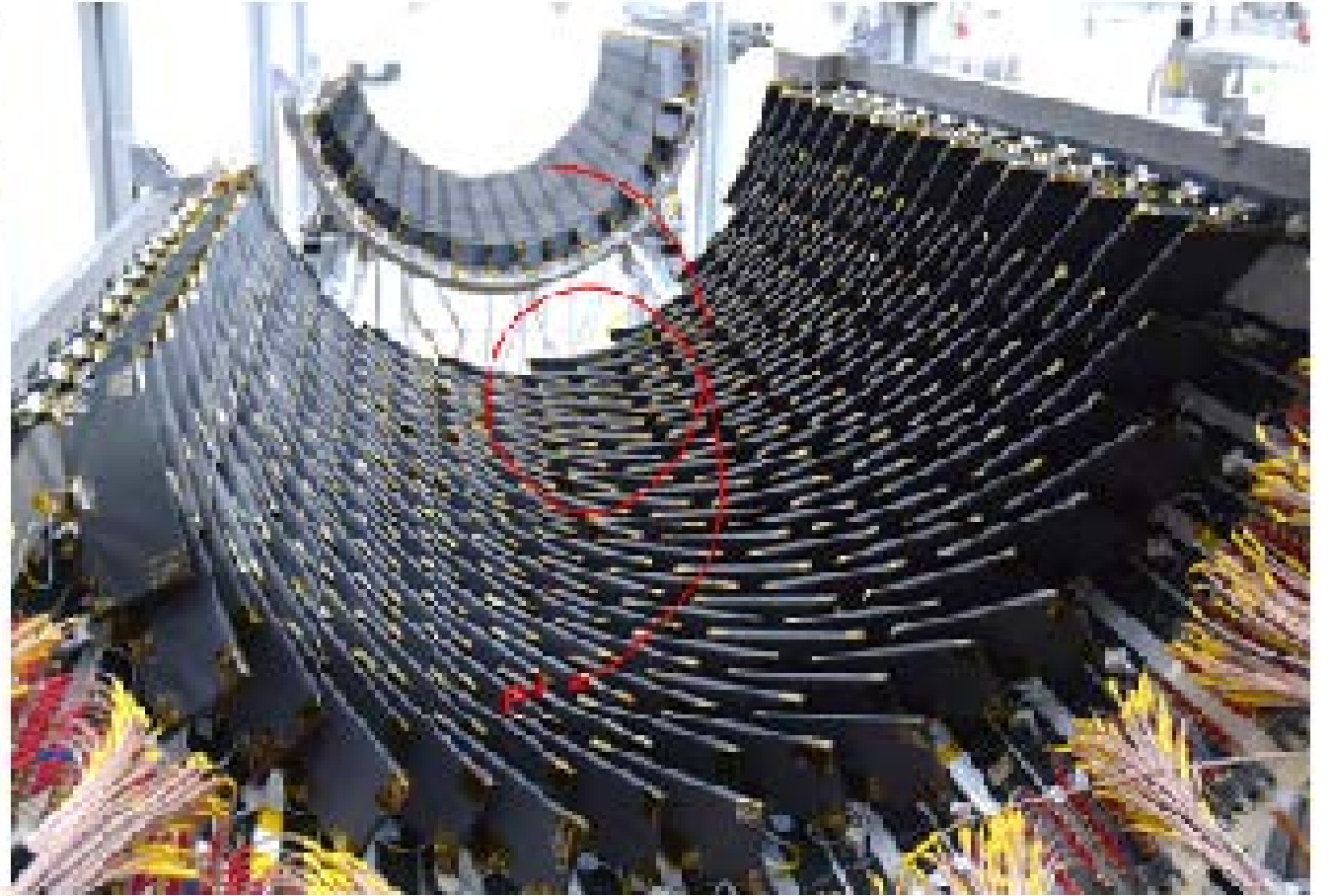
900 LXe детектор



Цилиндрическая дрейфовая камера + временные счетчики

Монтаж установки начнется в августе 2018

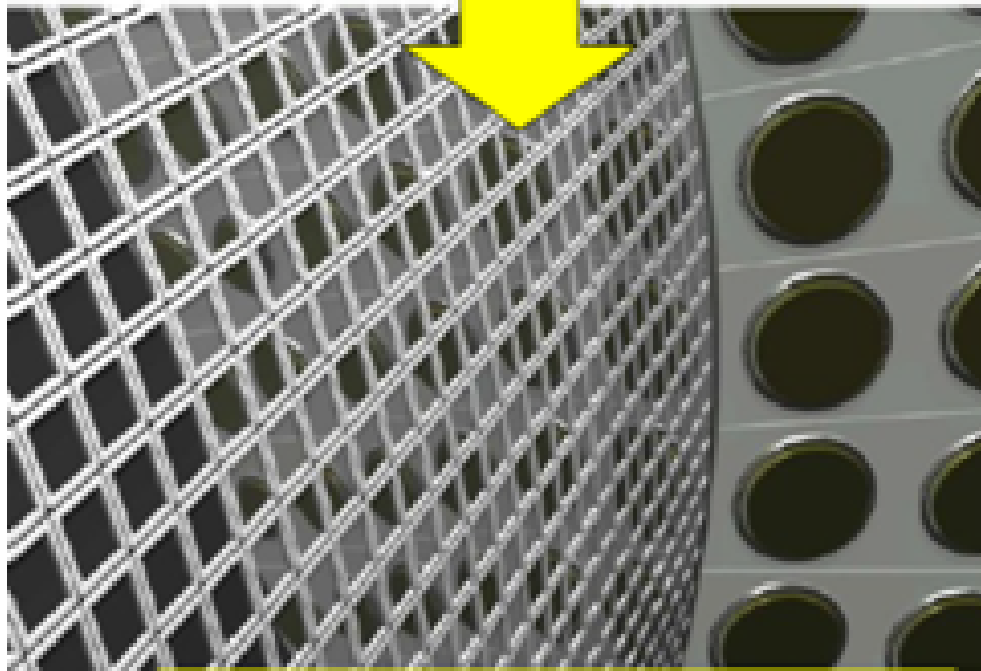
Разрешение детекторов и эффективность будут улучшены вдвое



MEG 216 PMTs на переднем окне

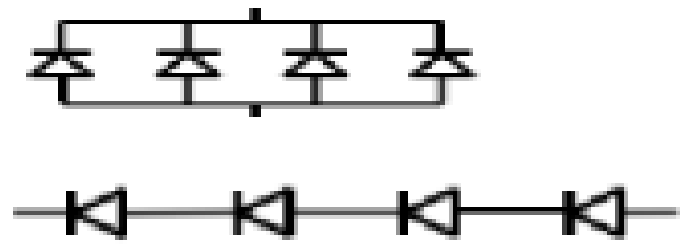
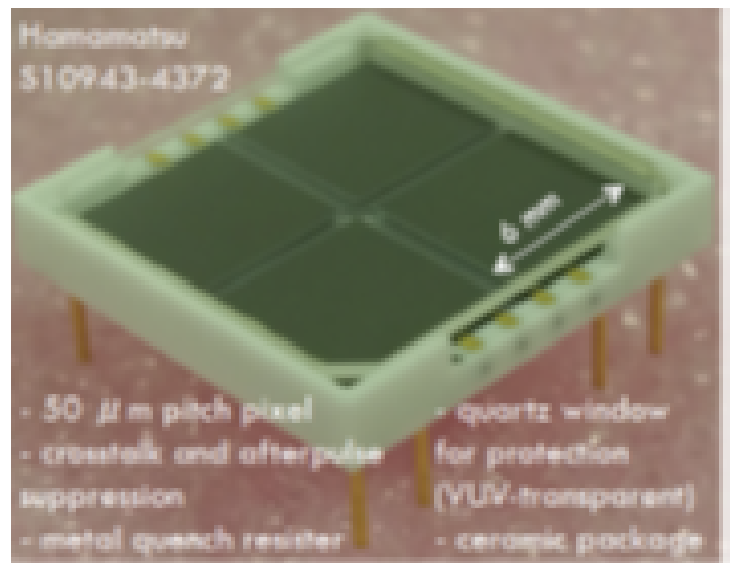
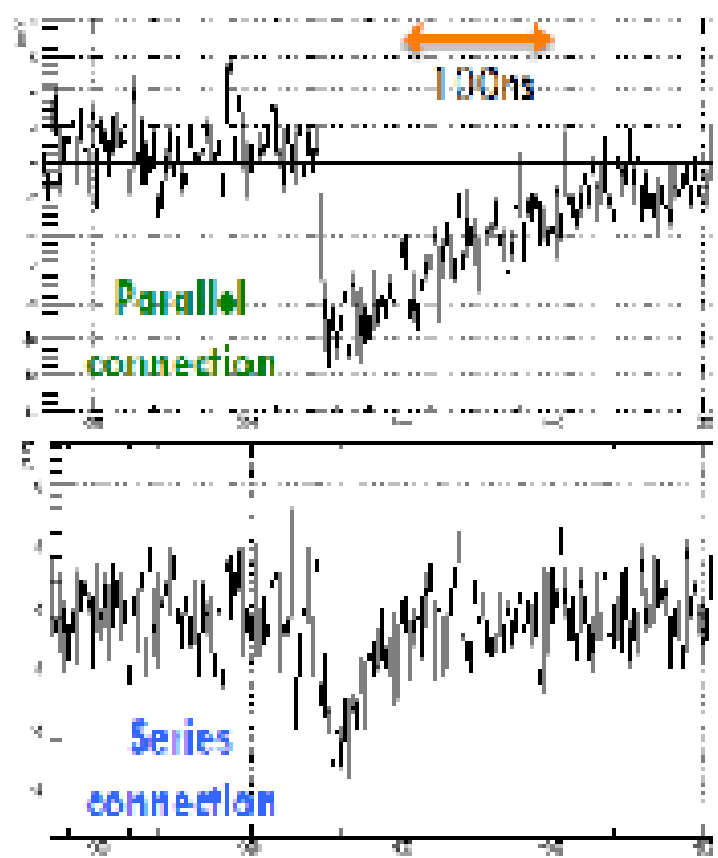
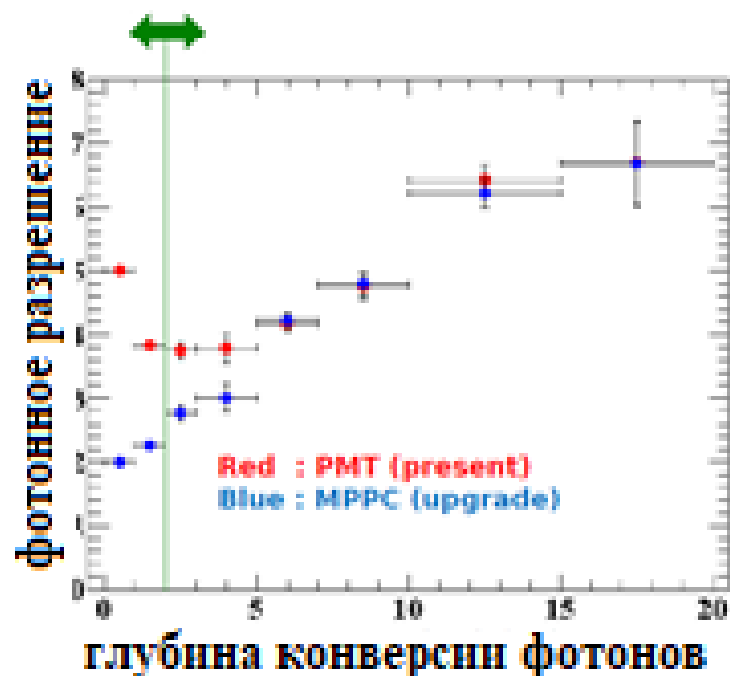


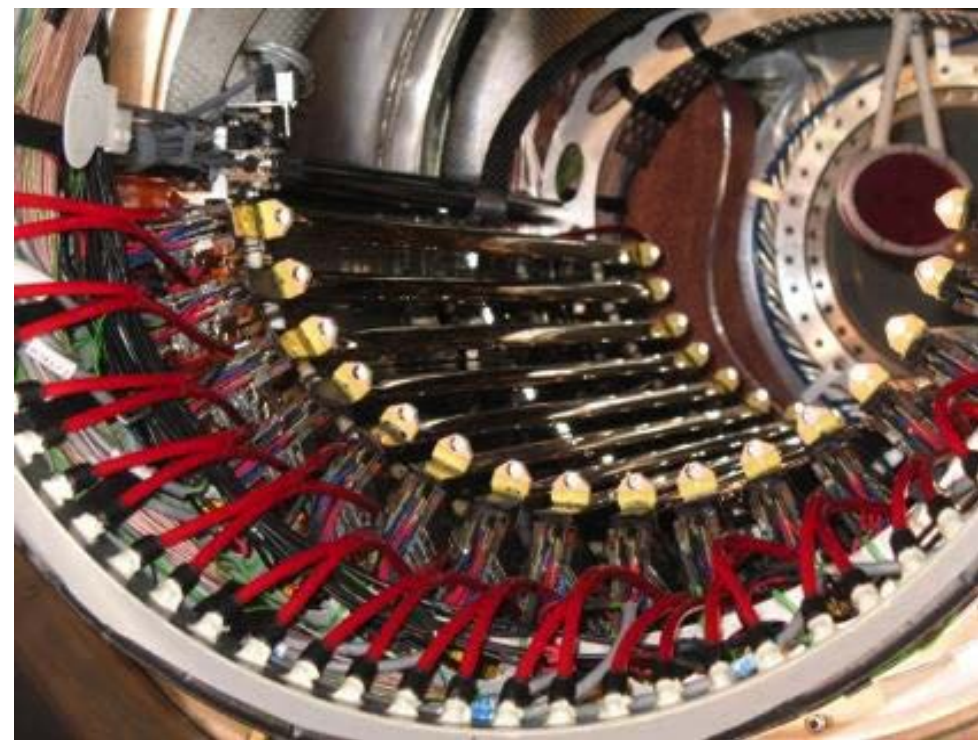
SIPM вкл. последовательно



MEG II 4000 MPPC на переднем окне

40% 60% СОБЫТИЙ





single hit contribution to
m.s.

transverse position
resolution

e^+ momentum resolution

e^+ angle

e^+ y vertex

e^+ z vertex

DC-TC matching efficiency

MEG

MEG2

$2.6 \times 10^{-4} X_0$

$4.6 \times 10^{-5} X_0$

210 μm

110 μm

330 KeV/c

94 KeV/c

9.4 mrad

6.2 mrad

1.6 mm

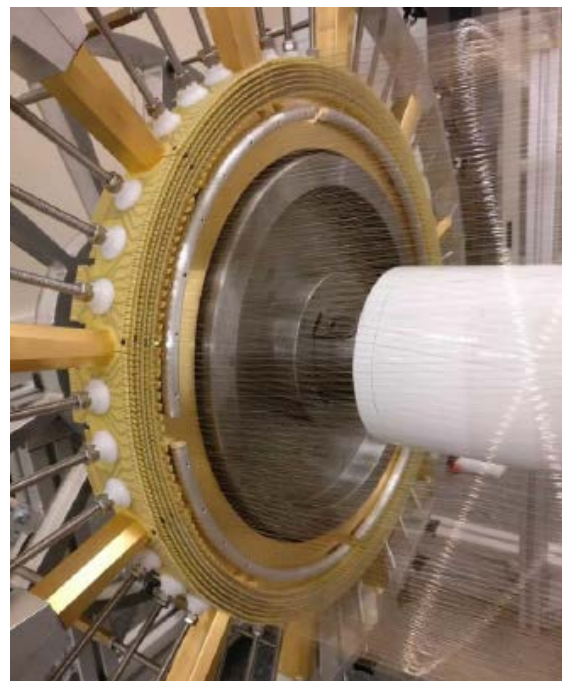
0.9 mm

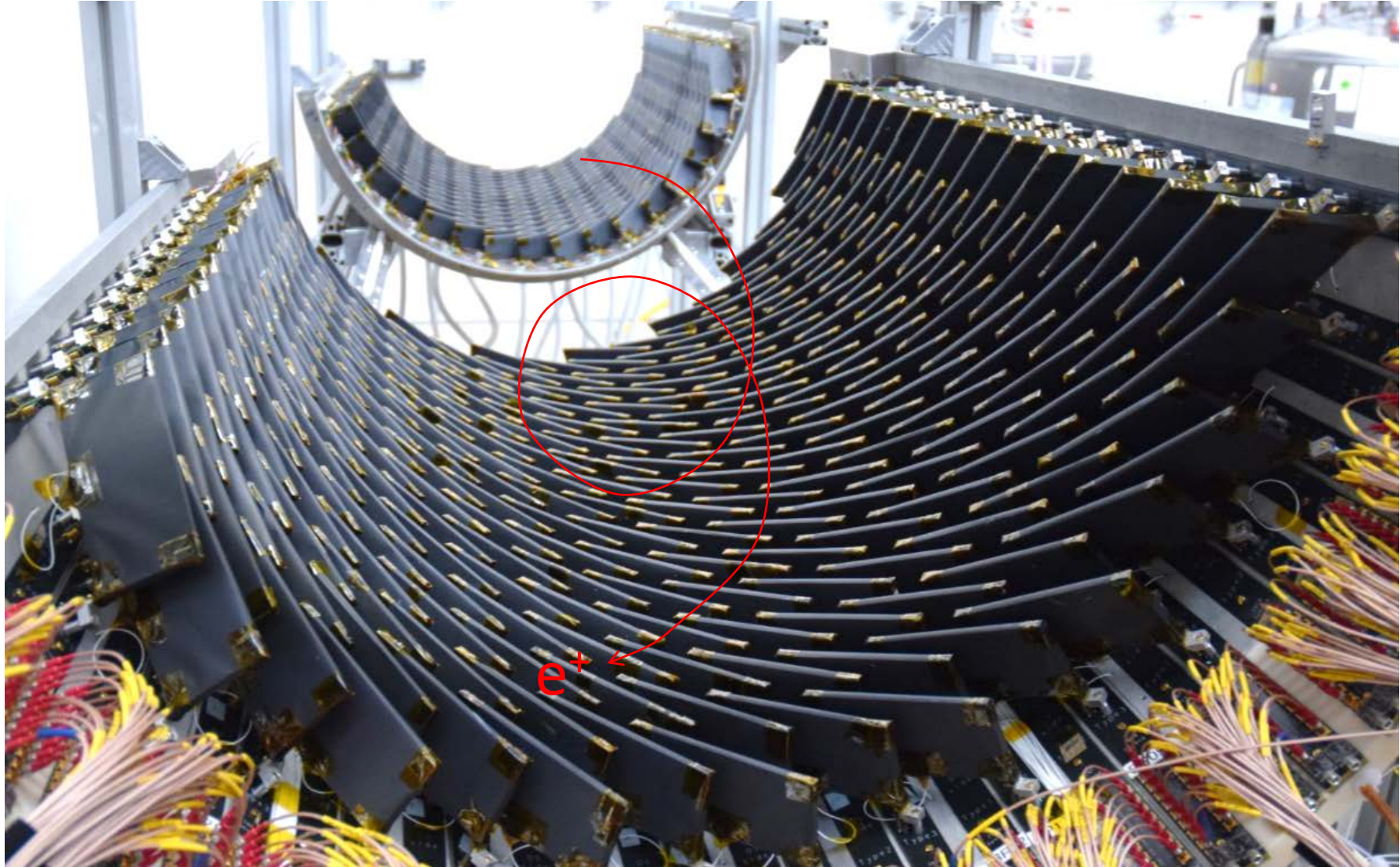
2.5 mm

1.1 mm

41%

89%





MEG II DC

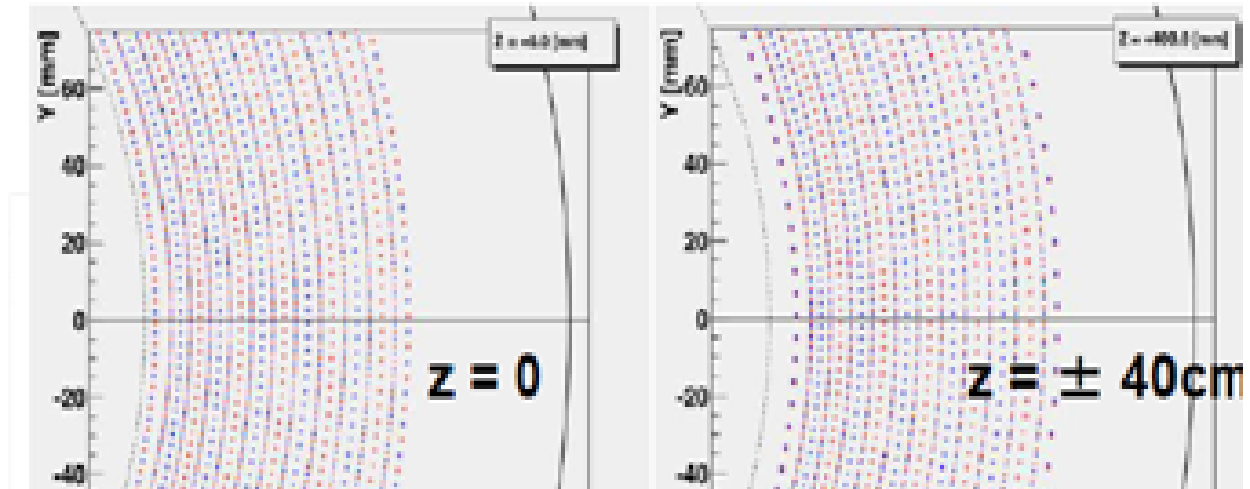
ХАРАКТЕРИСТИКИ DC

- $r_{in} \sim 16\text{cm}$ $r_{out} \sim 30\text{cm}$
- $l \sim 2\text{m}$



1920 sense wires: $W(\text{Au})$ $20\ \mu\text{m}$
7680 field wires: $\text{Al}(\text{Ag})$ $40\ \mu\text{m}$
2688 guard wires: $\text{Al}(\text{Ag})$ $50\ \mu\text{m}$
12288 wires in total

(~ 12 wires/cm²)



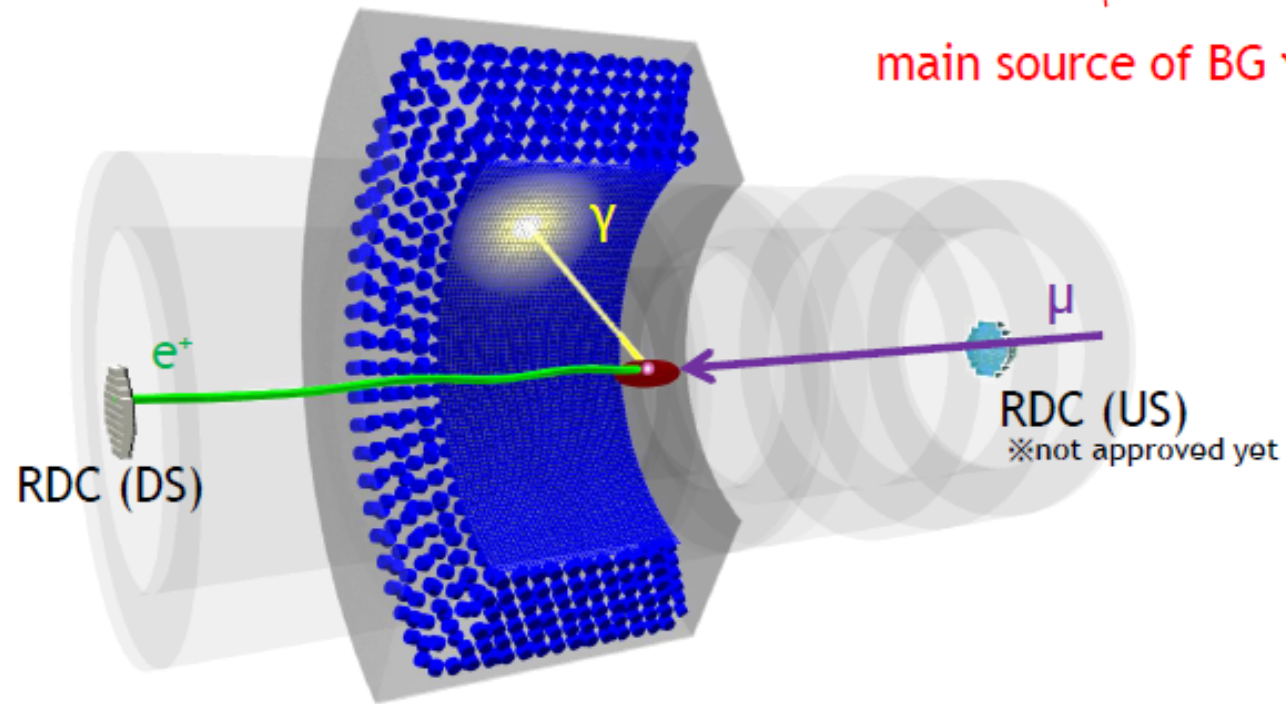


RDC (Radiative Decay Counter)

RDC is a new detector added in MEG II which identifies
RMD backgrounds (Radiative Muon Decay, $\mu \rightarrow e\nu\gamma$)



main source of BG γ



RDC detects time coincident hit of low energy e^+
associated with RMD γ .

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^- / \mu^+ \nu$	$< 4.8 \cdot 10^{-9}$	1976	JETP, 44, 35	МИС
$\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu / \text{tot}$	$< 7.7 \cdot 10^{-6}$	1987	SJNP, 46, 192	АРЕС
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ / \text{tot}$	$< 36 \cdot 10^{-12}$	1991	SJNP, 53, 802	АРЕС
$\pi^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+ \nu / \text{tot}$	$< 1.6 \cdot 10^{-6}$	1991	SJNP, 54, 790	АРЕС
$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^- / \mu^+ \nu$	$(0.46 \pm 0.16 \pm 0.07) \cdot 10^{-9}$	1992	SJNP, 55, 1644	АРЕС
MMbar	< 0.14	1997	PAN, 60, 1164	ЛЯП
MMbar	< 0.0030	1999	PRL, 83, 49	PSI
$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \pi^0 / \text{tot}$	$(1.036 \pm 0.006) \cdot 10^{-8}$	2004	PRL, 93, 181803	PIBETA
FA (π^+)	0.0119 ± 0.0001	2009	PRL, 103, 051802	PIBETA
Fv (π^+)	0.0258 ± 0.0017	2009	PRL, 103, 051802	PIBETA
Fv slope parameter a Fv(q2)=Fv(0)(1+aq ²)	0.10 ± 0.06	2009	PRL, 103, 051802	PIBETA
π^0 mean life	$(8.5 \pm 1.1) \cdot 10^{-17} \text{c}$	2009	PRL, 103, 051802	PIBETA
$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma / \text{tot}$	$(73.86 \pm 054) \cdot 10^{-8}$	2009	PRL, 103, 051802	PIBETA
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma / \text{tot}$	$< 5.7 \cdot 10^{-13}$	2013	PRL, 110, 201801	MEG-I
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma / \text{tot}$	$< 4.2 \cdot 10^{-13}$	2016	E. Phys. J. C76, 434	MEG-I
$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e / \text{tot}$	R / Rtot $< 5 \cdot 10^{-4}$	2018	Preliminary	PEN
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu \gamma / \text{tot}$	$4.365 (9)_{\text{stat}} (42)_{\text{syst}} \cdot 10^{-3}$ E γ >40MeV, $\theta_{e\gamma} > 30^\circ$?	Preliminary	PIBETA
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu \gamma$	$(6.03 \pm 0.14 \pm 0.53) \cdot 10^{-8}$ Ee>45 MeV, E γ >40MeV	2016	E. Phys. J. C76, 108	MEG-I
η (RDM)	$0.006 (17)_{\text{stat}} (18)_{\text{syst}}$?	Preliminary	PIBETA

В низшем порядке киральной теории значение поляризации пиона связано со слабыми форм факторами отношением

$$\alpha_\pi = -\beta_\pi = \frac{\alpha}{8\pi^2 F_\pi^2 M_\pi} \frac{F_A}{F_V}$$

Экспериментальный и теоретический статус ионной поляризации не определен.

Последние теоретические предсказания киральной теории и экспериментальные результаты коллаборации COMPASS указывают на малое значение величины поляризации $\alpha_\pi \sim (2 \div 3) \times 10^{-4} \text{fm}^3$

Дисперсионный анализ взаимодействия $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ и экспериментальные результаты коллаборации MAMI.

дают более высокие значения $\alpha_\pi \sim 6 \times 10^{-4} \text{fm}^3$.

Прецизионные измерения форм факторов пиона выполненные коллаборацией PIBETA дают значение

величины поляризации $\alpha_\pi = 2.7 + 0.6 - 0.5 \times 10^{-4} \text{fm}^3$.

Дополнительная обработка $28 \cdot 10^3$ событий $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ (**грант БрФФИ-ОИЯИ**),

даст возможность получить новые более точные значения слабых форм-факторов пиона и поляризуемости пиона.

Experiments	$(\alpha - \beta)_{\pi^\pm}$
$\gamma p \rightarrow \gamma \pi^+ n$ Mainz (2005)	$11.6 \pm 1.5_{\text{stat}} \pm 3.0_{\text{syst}} \pm 0.5_{\text{mod}}$
L. Fil'kov, V. Kashevarov (2005) $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$ available data	$13.0^{+2.6}_{-1.9}$
A. Kaloshin, V. Serebryakov (1994) $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$ MARK II	5.25 ± 0.95
J.F. Donoghue, B. Holstein (1993) $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$ MARK II	5.4
D. Babusci et al. (1992) $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$ PLUTO	$38.2 \pm 9.6 \pm 11.4$
DM 1	34.4 ± 9.2
DM 2	52.6 ± 14.8
MARK II	4.4 ± 3.2
$\gamma p \rightarrow \gamma \pi^+ n$ Lebedev Inst. (1986)	40 ± 24
$\pi^- Z \rightarrow \gamma \pi^- Z$ Serpukhov (1983)	$15.6 \pm 6.4_{\text{stat}} \pm 4.4_{\text{syst}}$
COMPASS (2015) *	$4.0 \pm 1.2_{\text{stat}} \pm 1.4_{\text{syst}}$

* C. Adolph et al. Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 062002

PIBETA Collab., arXiv:0804.1815.

$2.7^{+0.6}_{-0.5}$

PDG-2018, Form factors for Radiative Pion And Kaon Decays,

10-4 fm³

В этом году завершается новое измерение распада $\pi^+ \rightarrow e^+ \pi_2^0$ с относительной ошибкой $\sim 5 \times 10^{-4}$. Исследование распада проводилось на мезонной “фабрике” PSI (ток ускорителя 2 мА), используя модернизированный спектрометр PIBETA и пучок пионов с интенсивностью 20,000 сек⁻¹ и моментом 65-80 MeV/c.

Физическая мотивация

Отношение ширин распадов $R_{e/\mu}^{SM} = \Gamma(\pi \rightarrow e \nu(\gamma)) / \Gamma(\pi \rightarrow \mu \nu(\gamma))$ дает одно из основных подтверждений V-A природы электрослабого взаимодействия и обеспечивают наилучшую проверку $\mu - e$ универсальности.

Вклады высоких порядков в процесс хорошо изучены и отношение определяется с высокой точностью ($\leq 4 \times 10^{-4}$). С другой стороны точность экспериментальных измерений отстает от SM вычислений на порядок. Это является сильной мотивацией для новых прецизионных измерений распада.

Кроме того прецизионное измерение вероятности распада накладывает ограничения на модели за пределами SM.

