

ミューオンとタウレプトンで超える 標準模型の壁

ミューオン編

KEK素粒子原子核研究所/J-PARCセンター
三部 勉



Muons making headlines

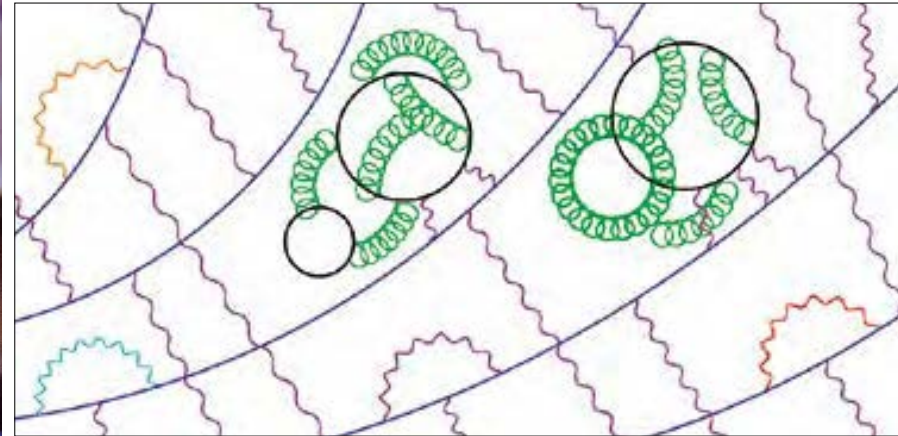
CERN COURIER

May/June 2021 cerncourier.com

Reporting on international high-energy physics

MUON $g-2$ MEASUREMENT OF THE MOMENT

Laser-cooled antihydrogen
Flavour anomalies back in the spotlight
Odderon finally discovered



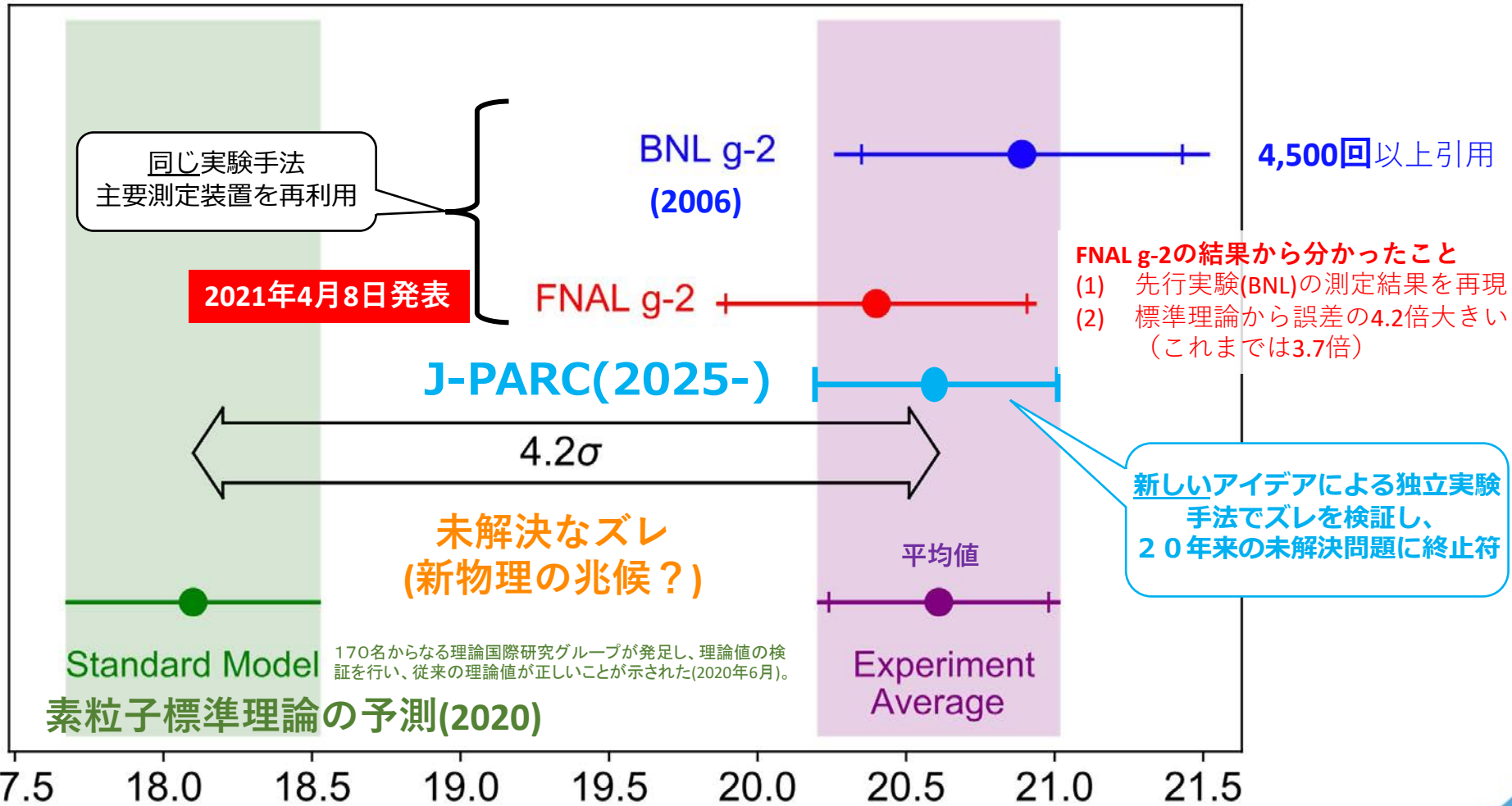
M Rayner/CERN

Freewheelin' Artistic sketch of muons (blue) interacting with a magnetic field (purple), including “ $g-2$ ” contributions, which are the subject of intense theoretical efforts (p25).

Fermilab is at the very beginning of a campaign that will ultimately reduce the muon $g-2$ uncertainty by a factor of at least three, while a completely independent measurement is expected from J-PARC in Japan. If something is indeed going on with the muon’s g -factor, it will only be natural that interest in a wider muon experimental programme is heightened. This includes Mu2e at Fermilab, Mu3e and muEDM at PSI, and COMET at J-PARC. A proposed experiment at CERN – where the first $g-2$ measurements were made 60 years ago (p49) – called MUonE aims to precisely determine the leading hadronic contribution to the $g-2$ measurement, while theoretical calculations relevant to muon $g-2$ are an exciting work in progress (p25).

2021年4月8日のフェルミ国立研究所の発表

- 2021年4月8日午前0時(日本時間)、米国フェルミ国立研究所 (FNAL, フェルミラボ) からミューオン異常磁気能率 ($g-2$) の測定結果が全世界に発表された



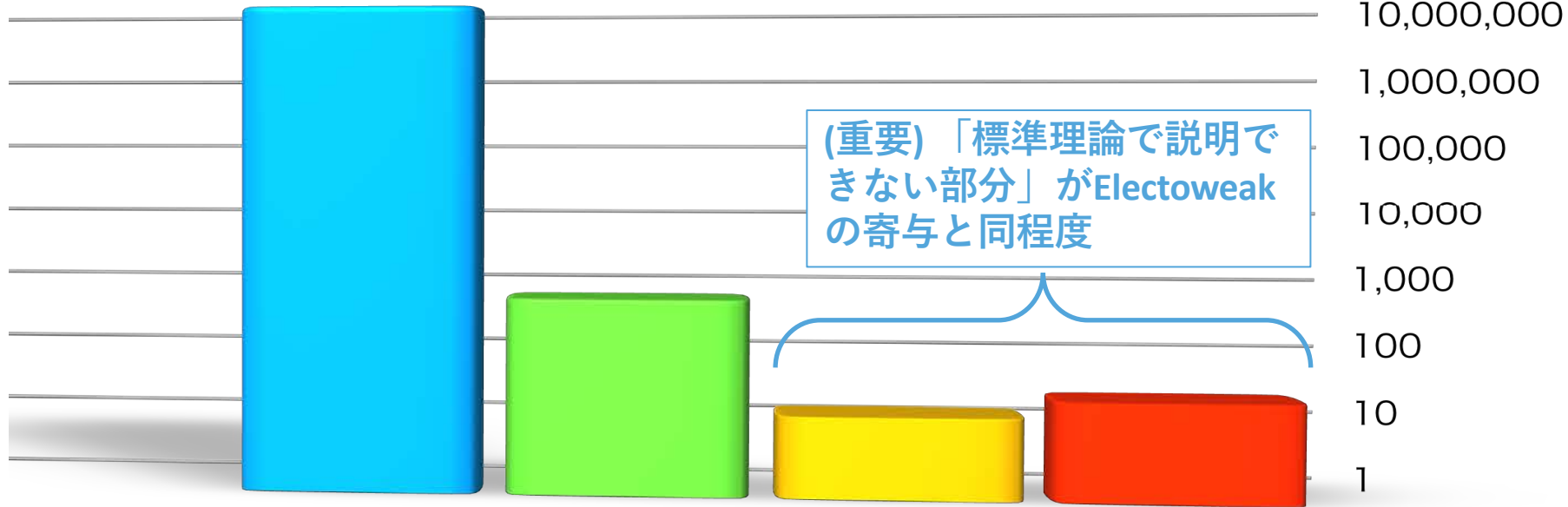
$$a_{\mu} \times 10^9 - 1165900$$
$$\text{ミューオン異常磁気能率 } a_{\mu} = (g-2)/2$$

ミュオンg-2の内訳

数値はPhys. Rep. 887 (2020) 1-166による

[$\times 10^{-10}$]

g-2への寄与



(重要) 「標準理論で説明できない部分」がElectroweakの寄与と同程度

今回再確認された
標準理論で説明できない部分

$$a_{\mu} = a_{\mu}(QED) + a_{\mu}(had) + a_{\mu}(weak) + a_{\mu}(BSM)$$



実験・理論の研究者達が徹底解説！新物理発見を目指すミュオンg-2研究の最新情報

APRIL 30, 2021

所要時間：約22分

<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2021/04/20210430/> (KEKトップページからもたどれます。)



図1. 左から順に三部勉 准教授、石川明正 准教授、遠藤基 准教授。 / © KEK IPNS

4月7日午前10時（米国中部標準時）、アメリカのフェルミ国立加速器研究所（FNAL）から、素粒子物理学の分野で非常に重要となる実験結果が発表されました。ミュオン^(注1)が持つ磁石の強さ（磁力）のうち、量子効果に起因するものをg-2（異常磁気能率）と呼びますが、ミュオンのg-2が、高精度で予想された標準理論の理論値よりも誤差の4.2倍大きい値を持つ、すなわち理論予想からずれていることがほぼ確定的という発表です。この結果が何を意味し、どのような発見に繋がるのか、そしてKEKのミュオンg-2研究について、実験と理論の研究者に熱く語っていただきました。

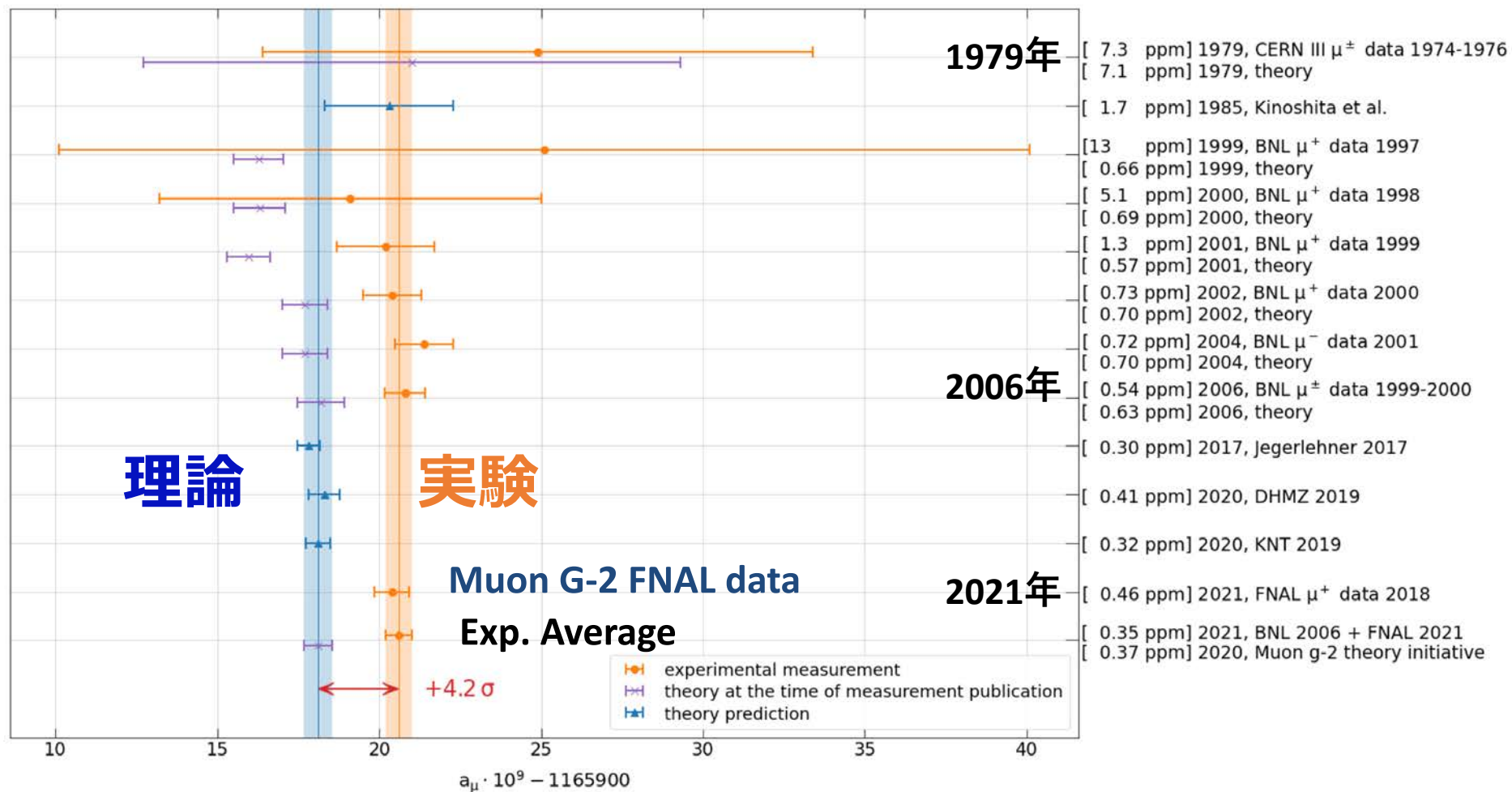
今後の道筋

- 道筋 1 g-2測定 of 検証
- 道筋 2 標準理論計算の検証・高精度化
- 道筋 3 新物理の探索



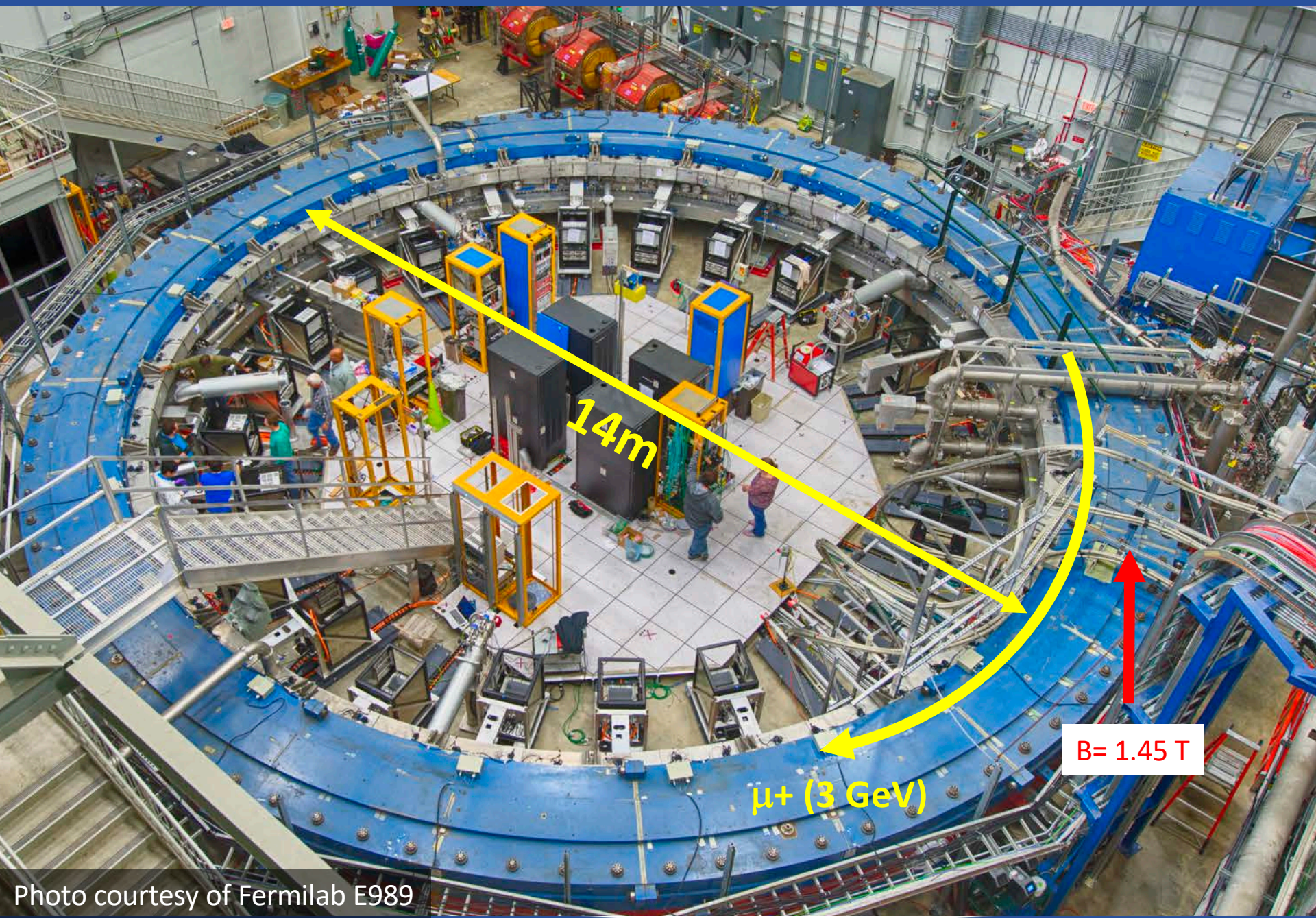
ミュオンg-2測定の歴史

History of muon anomaly measurements and predictions



$$a_\mu(\text{AVG}) = 116\,592\,061(41) \times 10^{-11} \quad (0.35 \text{ ppm}).$$

フェルミ国立研究所 ミュオンg-2実験(2018-)



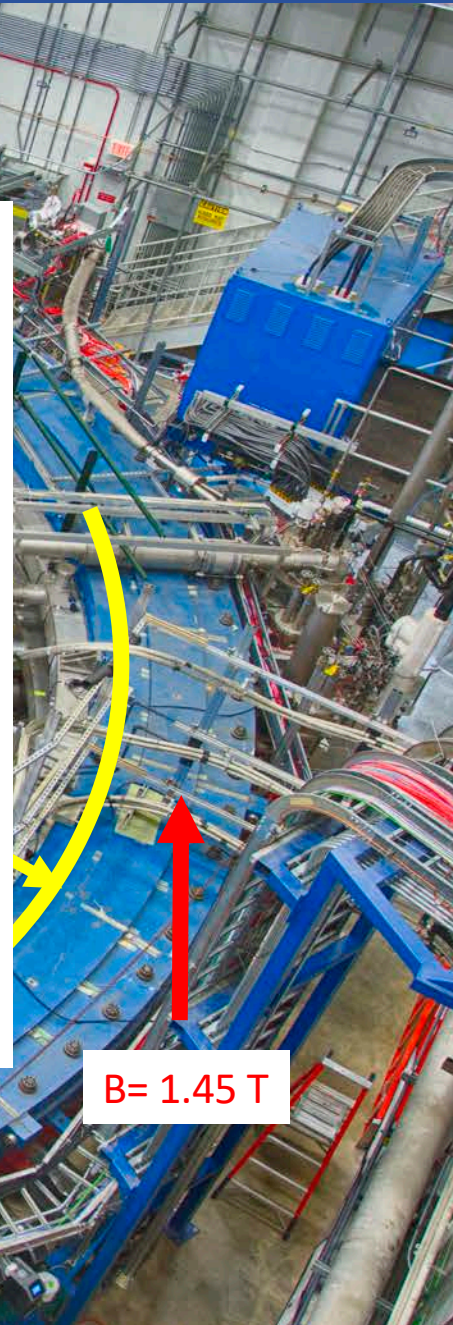
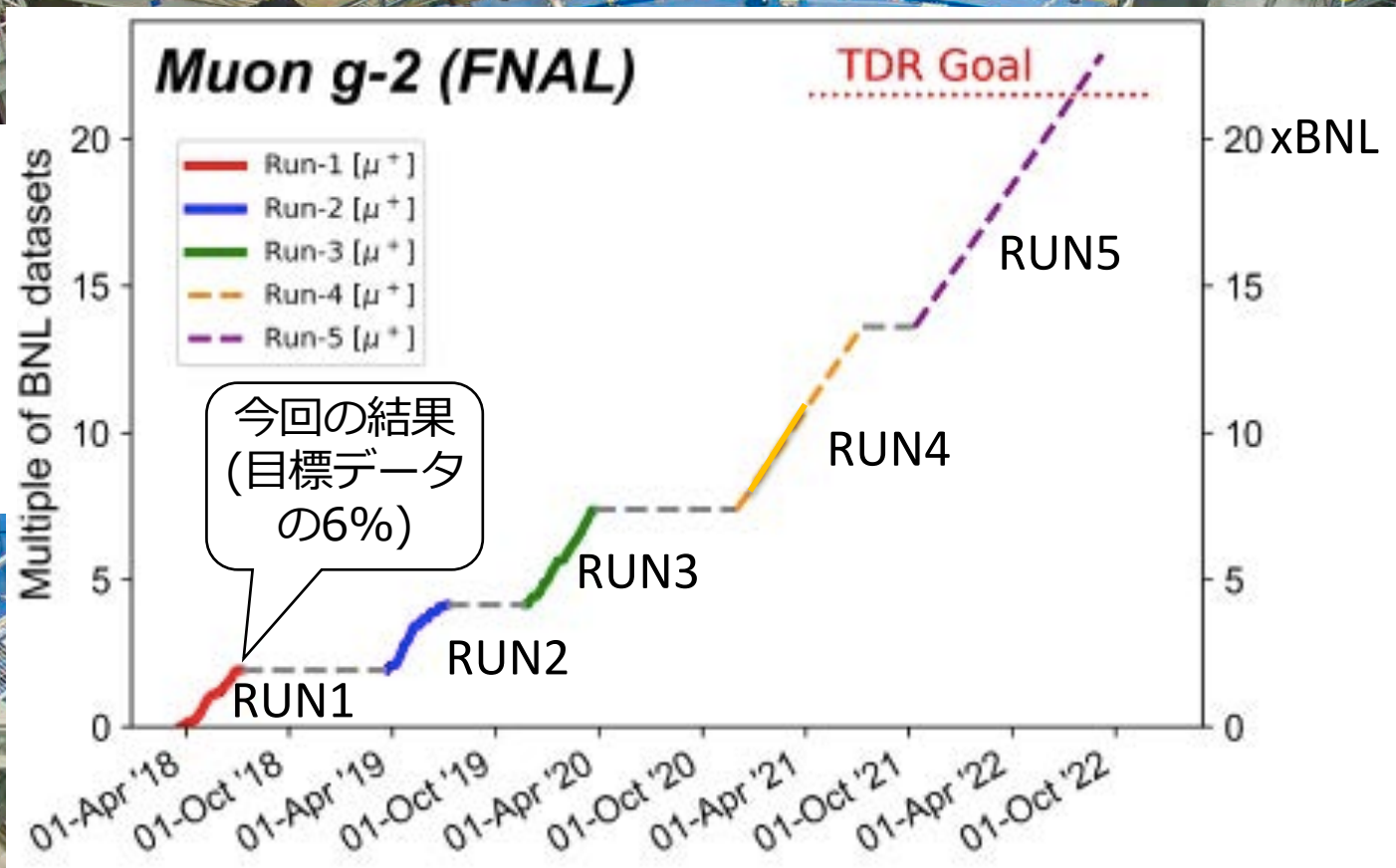
14m

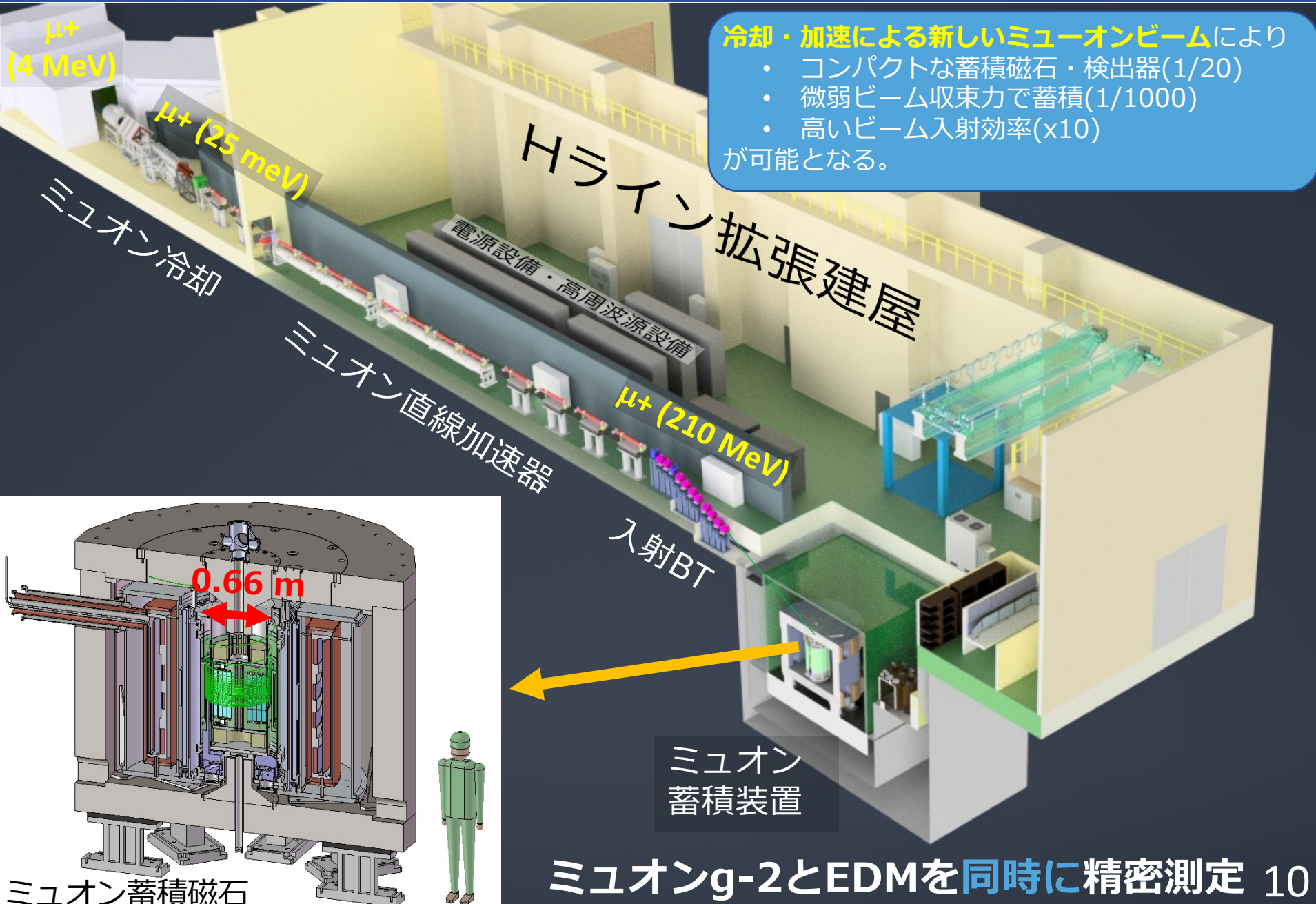
μ^+ (3 GeV)

B= 1.45 T

フェルミ国立研究所 ミュオンg-2実験(2018-)

取得データ量

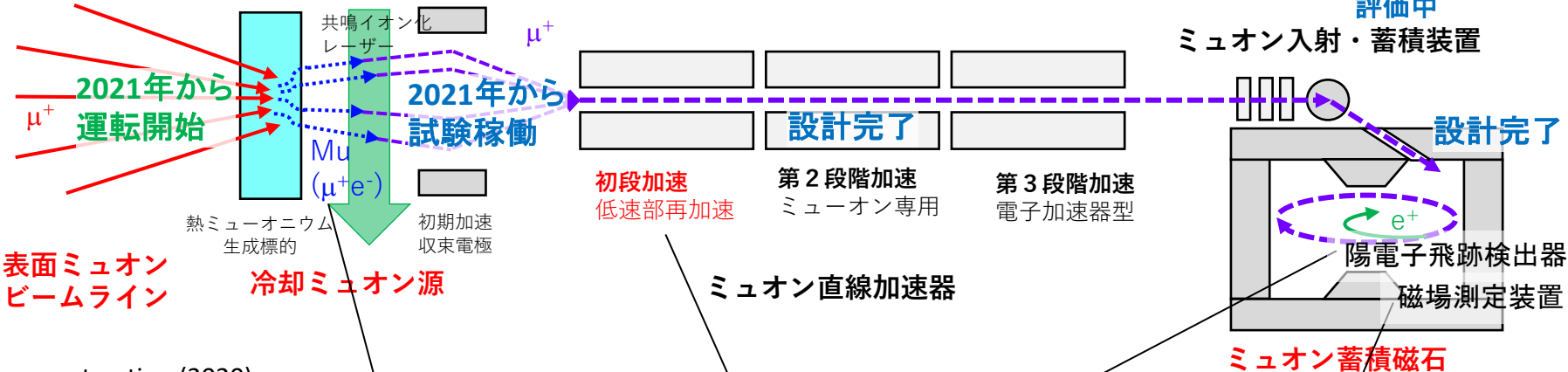




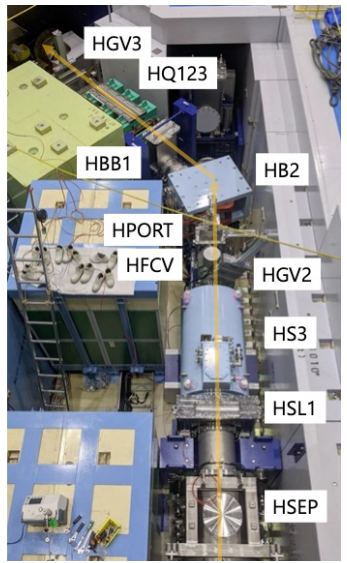
これまでの成果

エミッタンス

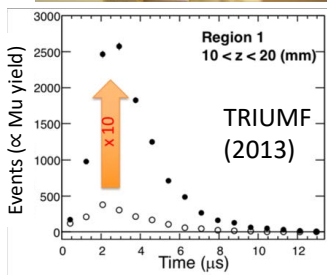
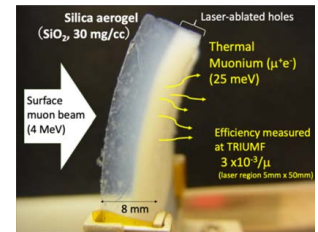
エネルギー



Beamline construction (2020)

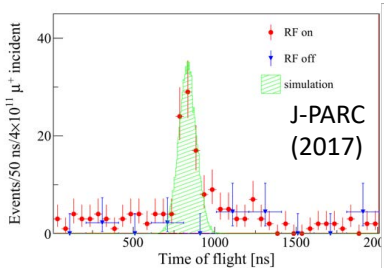
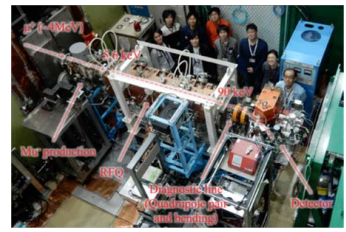


(a) Muonium production target



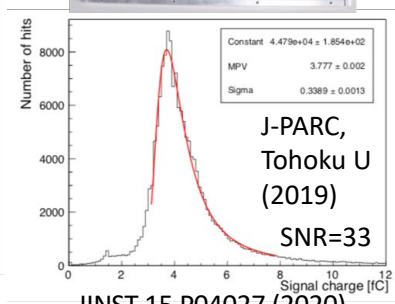
[PTEP 2013,103C01](#)
[PTEP 2014,091C01](#)
[PTEP 2020,123C01](#)

(b) Muon acceleration to 80 keV



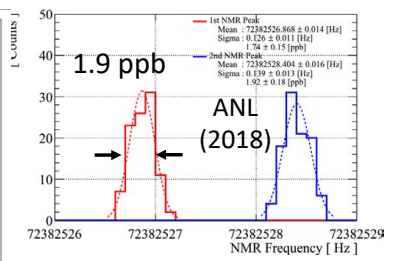
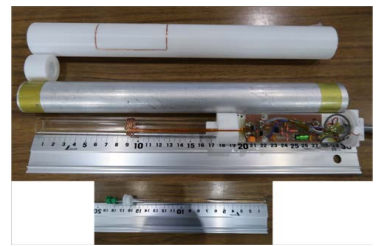
PRAB 19, 040101 (2016)
 PRAB 21, 050101 (2018)
 PRAB 23, 022804 (2020)
 PRAB 24, 033403 (2021)

(c) Unit module of positronium detector



JINST 15 P04027 (2020)
[IEEE TNS 67, 2089, 2020](#)

(d) Magnetic field probe (NMR)



NIMA 890, 51 (2018)
 IEEE TAS, 29, 9000904 (2019)

今、BNL+FNALの結果を独立に検証できる段階にあるのはJ-PARCだけ！

標準理論計算の検証・高精度化

The muon g-2 theory initiative formed since 2017

The “white paper”, Phys. Rep. 887, 1 (2020)

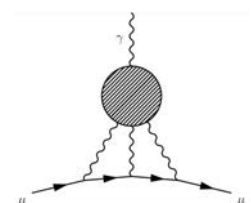
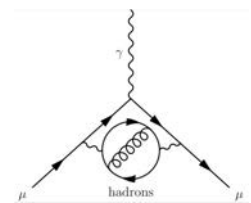


Contribution	Value $\times 10^{11}$
QED	116 584 718.931(104)
Electroweak	153.6(1.0)
HVP ($e^+ e^-$, LO + NLO + NNLO)	6845(40)
HLbL (phenomenology + lattice + NLO)	92(18)
Total SM Value	116 591 810(43)

現在の
ボトルネック
将来の
ボトルネック?

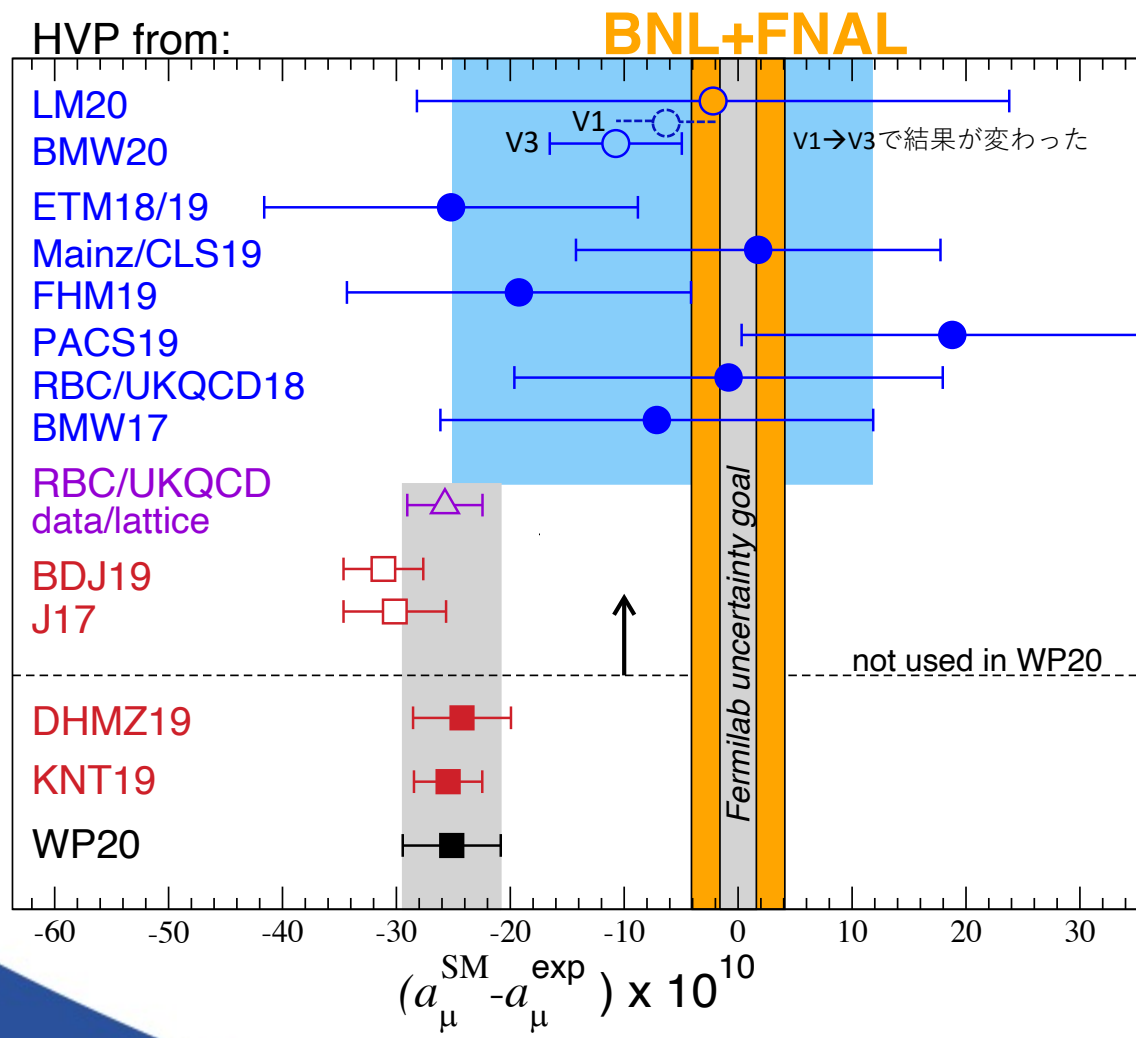
Contribution	Value $\times 10^{11}$
HVP LO ($e^+ e^-$)	6931(40)
HVP NLO ($e^+ e^-$)	-98.3(7)
HVP NNLO ($e^+ e^-$)	12.4(1)
HVP LO (lattice, $udsc$)	7116(184)

HLbL (phenomenology)	92(19)
HLbL NLO (phenomenology)	2(1)
HLbL (lattice, uds)	79(35)
HLbL (phenomenology + lattice)	90(17)



**Belle IIの
データが
重要**

ハドロン真空偏極(HVP)計算の現状




Lattice QCD

橋本さんによる現状の解説

<https://feelinquarks.blogspot.com/2021/05/g-2.html?spref=tw>

上記と直接関係ないが
心に刺さったツイート

 **Shoji Hashimoto (橋本省二)**
@ShojiHashimoto3

「君はこの誤差に命をかけるか」 戸塚洋二・元KEK機構長(故人)に問われたことがある。「実験家は誤差に命をかけている。君はどうだ。」眼鏡の奥の目は笑っていなかった。スパコンの説明をしたときのこと。しどろもどろで答えたが、「よしわかった」。予算を認めてくれた。今でもときどき夢に出てくる。

午後8:20 · 2021年4月14日 · Twitter Web App

281件のリツイート 10件の引用ツイート 1,091件のいいね

- 6月28日～7月2日にKEK主催でバーチャル研究会
<https://www-conf.kek.jp/muong-2theory>

Muon g-2 theory initiative workshop

June 28-July 2, 2021
Virtual meeting

Virtual



Home
g-2 theory initiative
Links

毎晩 夜9-12時
(一部参加も大歓迎です)

Announcement

We now open the [registration](#). Please register before June 14.

- g-2実験(Fermilab, J-PARC)の最新状況
- Lattice計算グループ間のクロスチェック状況
- WPのアップデート方針



ミュオンg-2を起点とした新物理の探索

4月8日の発表から数日で約70本の理論論文が投稿された。大きく6種類のカテゴリに分類可能（名古屋大・北原氏による解説を参照のこと）

The collage includes several preprint covers from arXiv:

- Supersymmetric Interpretation of the Muon $g-2$ Anomaly
- Wino-Higgsino dark matter in MSSM from the $g-2$ anomaly
- Challenges for an axion explanation of the muon $g-2$ measurement
- Implications of the Muon $g-2$ result on the flavor structure of the lepton mass matrix
- Consequences of chiralty enhanced explanations of $(g-2)_\mu$ for $A \rightarrow \mu\mu$ and $Z \rightarrow \mu\mu$
- Muon $g-2$ and B -anomalies from Dark Matter
- Implications of the Muon $g-2$ result on the flavor structure of the lepton mass matrix

New physics interpretations

[Refs: Athron et al, 2104.03691; Buen-Abad et al, 2104.03267; Krnjaic et al, 1902.07715; Dermisek et al, 2103.05645]

NP type	diagrams	mass range	probe
Supersymmetry		200~500 GeV	$\tilde{\chi}_0^0 \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow (h \tilde{\chi}_1^0) (W^{\pm} \tilde{\chi}_1^0)$ $pp \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell}^*$
Scalar extensions		20~100 GeV, 150~250 GeV	$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ $h \rightarrow AA$
Axion-like particle		40 MeV~6 GeV	$e^+ e^- \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma\gamma$
Leptoquark		1.5~2 TeV	$pp \rightarrow LQ \bar{L} \bar{Q}$
U(1) $\mu\tau$		10~200 MeV	$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- Z'$ $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} Z'$
Vector-like lepton		< 7 TeV	$h, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

³precision measurement で探る新物理
北原鉄平 (名古屋大学 高等研究院/KMI); 高エネルギー将来計画委員会第9回勉強会, 2021.4.22, オンライン

9

O(10 TeV)以下の領域に新粒子を示唆

ただし、g-2のズレだけからはどれが正しいモデルかわからない。
多角的なアプローチが必要

- 時間反転対称性の破れ (EDM)
- 荷電レプトンフレーバー数非保存 (cLFV)
- レプトン普遍性



ミューオン(g-2), $l \rightarrow l' \gamma$, レプトンEDMの次元5の有効演算子

$$\mathcal{L}_{eff} = -e \sum_{ll'} \frac{m_l + m_{l'}}{2} \bar{l}' (\sigma \cdot F) (C_{ll'} P_R + C_{ll'}^\dagger P_L) l \quad (C_{ll'} : 3 \times 3)$$

1. ミューオン(g-2): $a_\mu \propto \text{Re}[C_{\mu\mu}]$

2. $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) \propto |C_{\mu e}|^2 + |C_{e\mu}|^2$

3. ミューオン EDM: $d_\mu \propto \text{Im}[C_{\mu\mu}]$

$\sigma_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$

muon (g-2)の標準模型からのズレが標準模型を超える物理からくるのであれば、その理論は $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma)$ やミューオンEDMを预言する?

$$\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) \simeq 2 \times 10^{-4} \times \frac{|C_{\mu e}|^2 + |C_{e\mu}|^2}{(\text{Re}[C_{\mu\mu}])^2} \left(\frac{\delta a_\mu}{10^{-9}} \right)^2$$

$$d_\mu \simeq 10^{-22} \text{ ecm} \times \frac{\text{Im}[C_{\mu\mu}]}{\text{Re}[C_{\mu\mu}]} \left(\frac{\delta a_\mu}{10^{-9}} \right)$$



新物理のg-2への寄与

$$a_\mu(\text{new}) \sim g_{\text{new}}^2 \left(\frac{m_\mu}{m_{\text{new}}} \right)^2$$

結合強さ 未知粒子質量

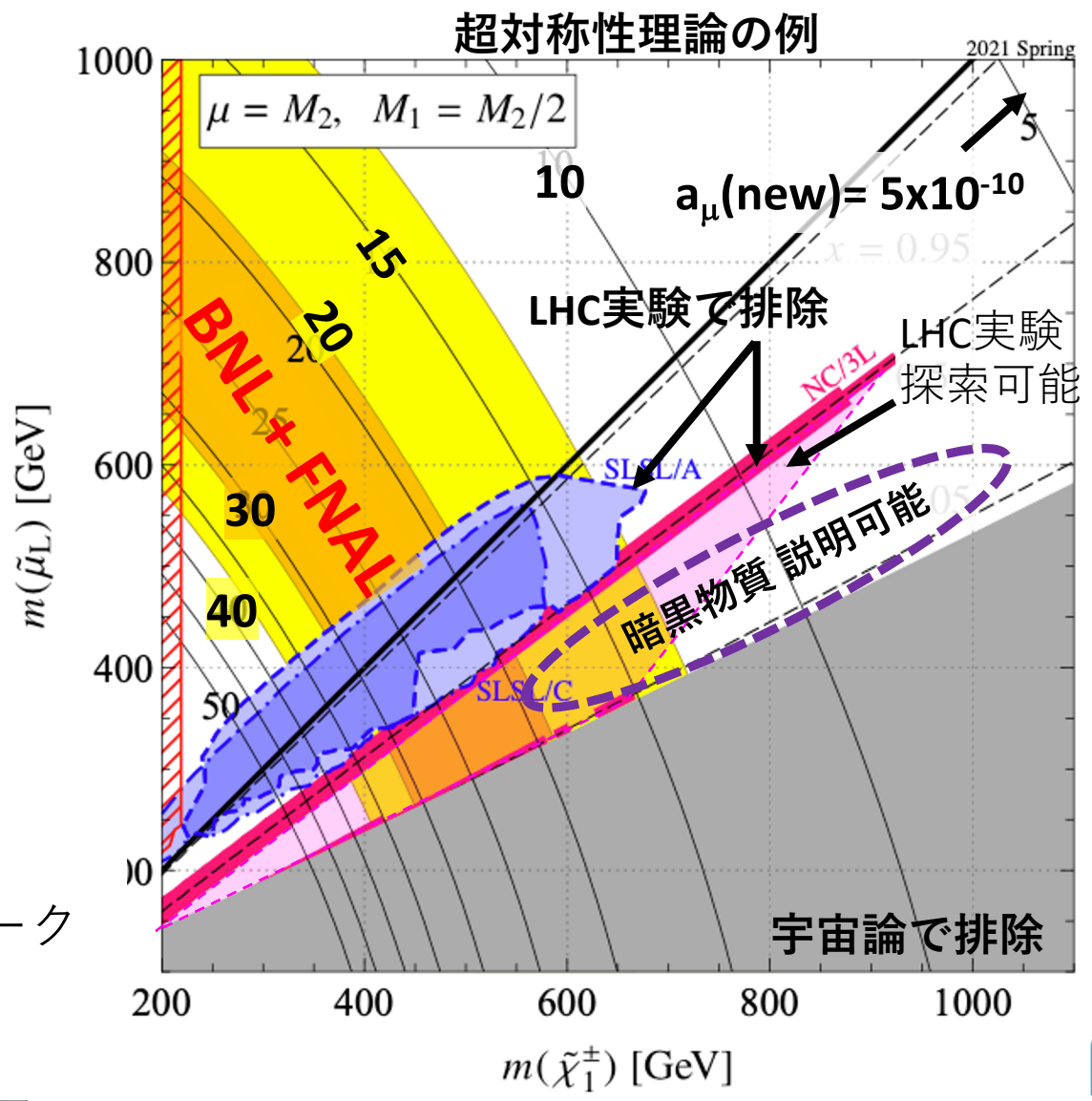
理論の選択性

強結合・重い新粒子

例：超対称性理論、
複合ヒッグス、
Z'、レプトクォーク

弱結合・軽い新粒子

例：アクシオン様粒子、
暗黒光子

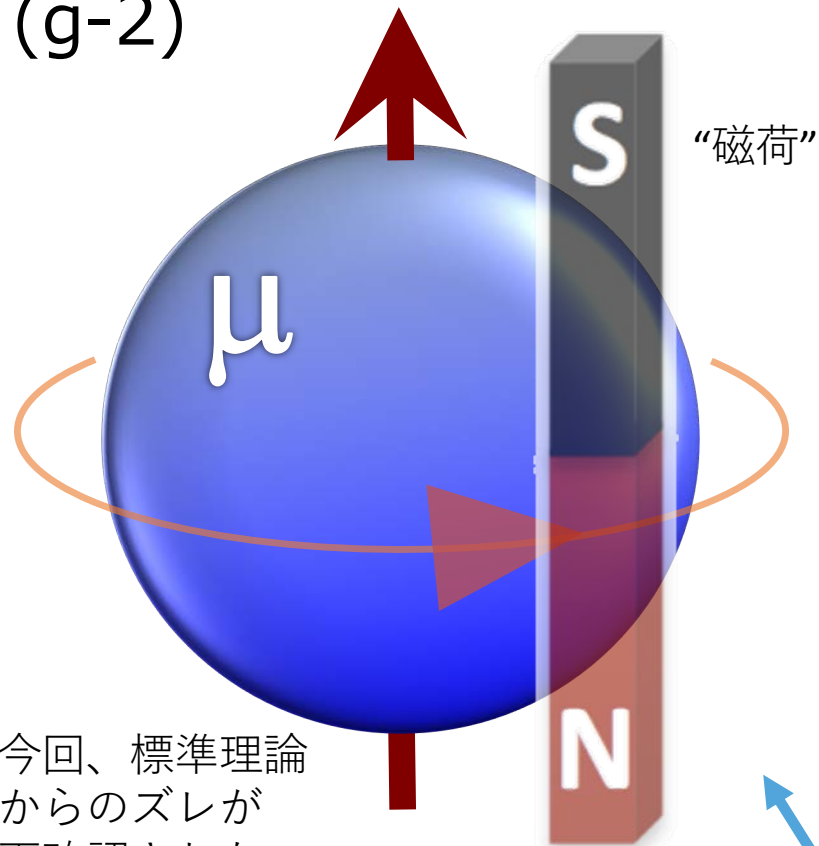


2HDMの場合

K. Tobe, cLFV 2016

Process	typical value	observability
muon g-2	$\delta a_\mu = (2.6 \pm 0.8) \times 10^{-9}$	(input)
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$\text{BR} \leq 10^{-9}$	○
$\tau \rightarrow e\gamma$	small	×
$\tau \rightarrow \mu l^+ l^-$ ($l = e, \mu$)	depends on $\rho_e^{\mu\mu}$ and ρ_e^{ee}	(○)
$\tau^- \rightarrow e^- l^+ l^-, e^- \mu^+ e^-, \mu^- e^+ \mu^-$	small	×
$\tau \rightarrow \mu\eta$	depends on ρ_d^{ss}	(○)
$\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}$	$\delta \leq 10^{-3}$, lepton non-universality	△
$\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}$	small, lepton non-universality	△
$\mu \rightarrow e\gamma$	depends on $\rho_e^{\tau e(e\tau)}$ and $\rho_e^{\mu e(e\mu)}$	(○)
$\mu - e$ conversion	depends on $\rho_e^{\mu e(e\mu)}$ and $\rho_{d,u}^{ij}$	(○)
$\mu \rightarrow 3e$	$\text{BR} \leq 10^{-13}$	(○)
muon EDM	$ \delta d_\mu \leq 10^{-22} e \cdot \text{cm}$	(○)
electron g-2	small	×

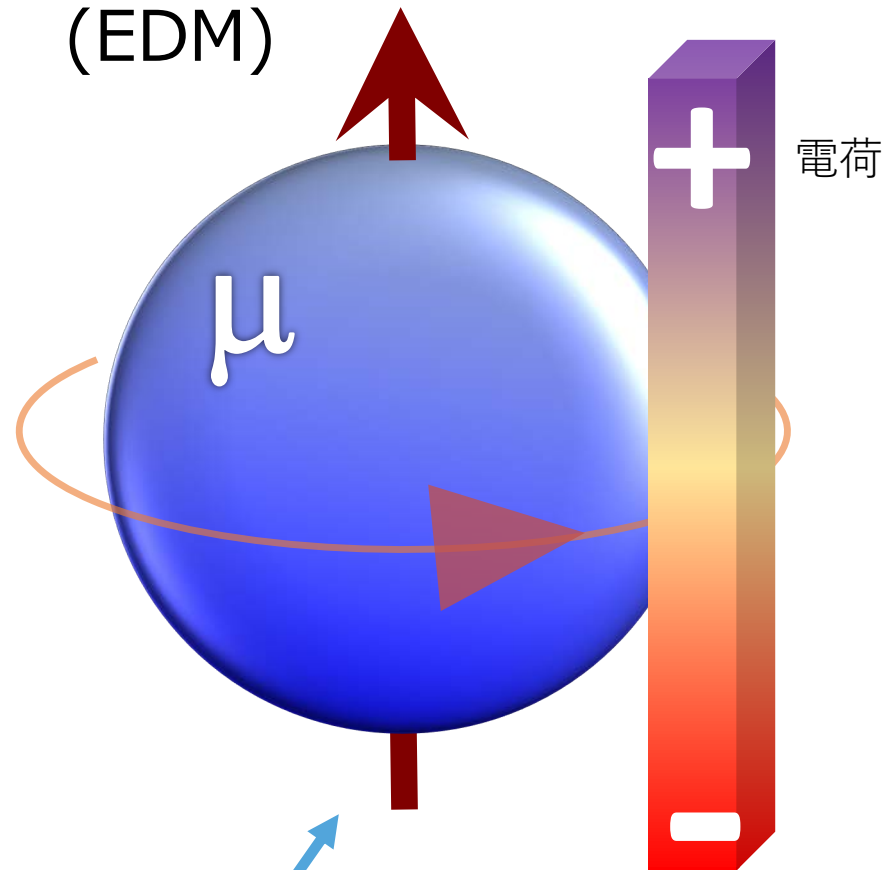
異常磁気双極子能率 (g-2)



今回、標準理論からのズレが再確認された

時間反転対称性を保つ

電気双極子能率 (EDM)



時間反転対称性を破る

双極子能率を複素数表示したときの実部と虚部の関係



Muon EDM

現在の上限値

$$\text{EDM}_\mu = d_\mu < 10^{-19} \text{ e/cm (BNL E821)}$$

20

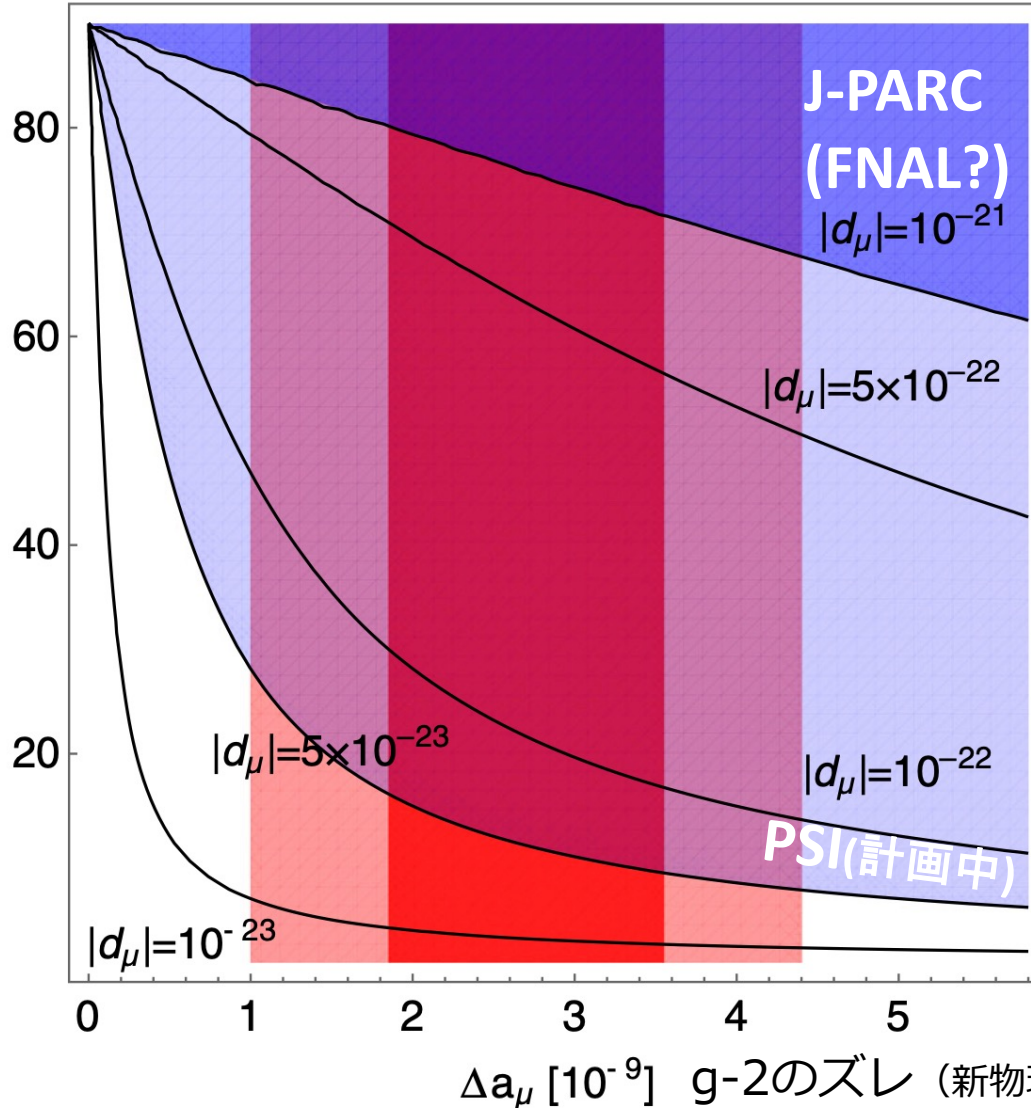
EDM_μ vs $g-2_\mu$ (model independent relation)

実部と虚部の偏角

虚部 (EDM)
が大きい

虚部 (EDM)
が実部と
同程度

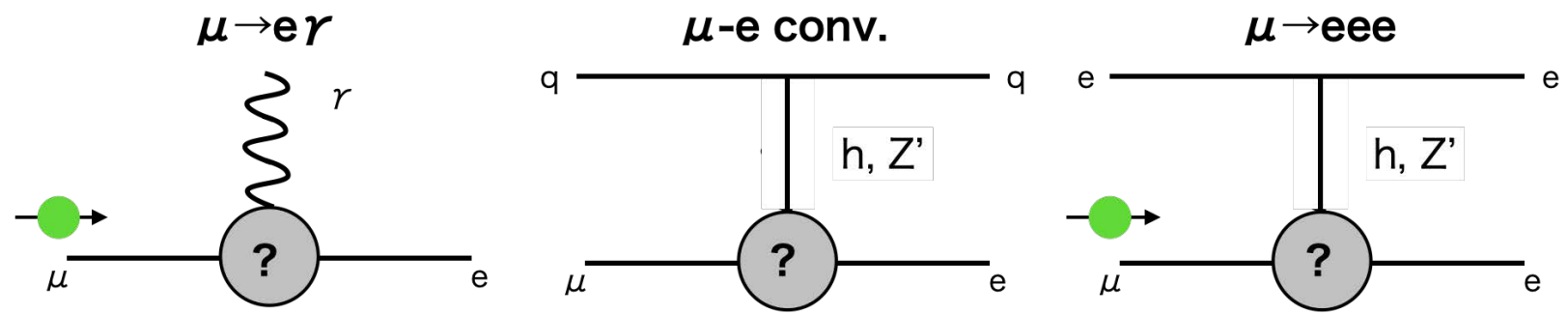
虚部 (EDM)
が小さい



A. Crivellin et al.
PRD 98, 113002 (2018)

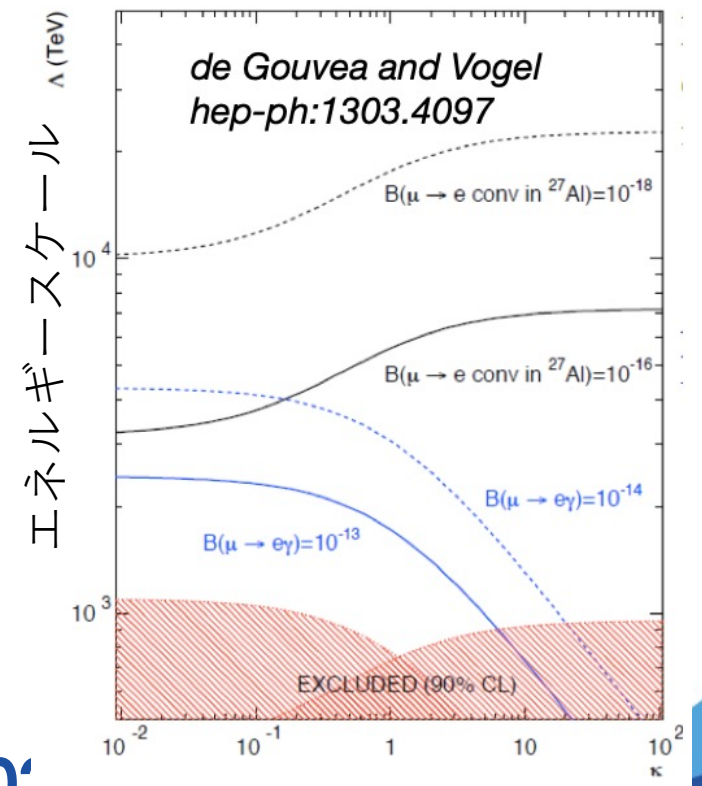
J-PARC
(将来)?

Muon cLFV : motivations



荷電レプトン数の非保存過程の探索

- $g-2$ に関連する新物理の掘り下げ
 - $O(10 \text{ TeV})$ 以下の領域
 - 新物理のフレーバー構造
- $g-2$ に新物理がない場合でも重要
 - 1,000 TeV 以上のエネルギースケールにアクセス可能 (右図)



Muon cLFV : SUSY-GUT, SUSY-Seesaw

スレプトン
質量行列

$$(m_{\tilde{l}}^2)_{ij} = m_0^2 \delta_{ij}$$

@ Planck mass scale

SUSY-GUT
Yukawa interaction

SUSY Seesaw Model
Neutrino Yukawa interaction

$$(\Delta m_{\tilde{l}}^2)_{ij} \neq 0$$

非対角成分

対角成分
実部 : g-2
虚部 : EDM

$$(m_{\tilde{L}}^2)_{21} \sim \frac{3m_0^2 + A_0^2}{8\pi^2} h_t^2 V_{td}^* V_{ts} \ln \frac{M_{GUT}}{M_{R_s}}$$

CKM matrix

cLFV

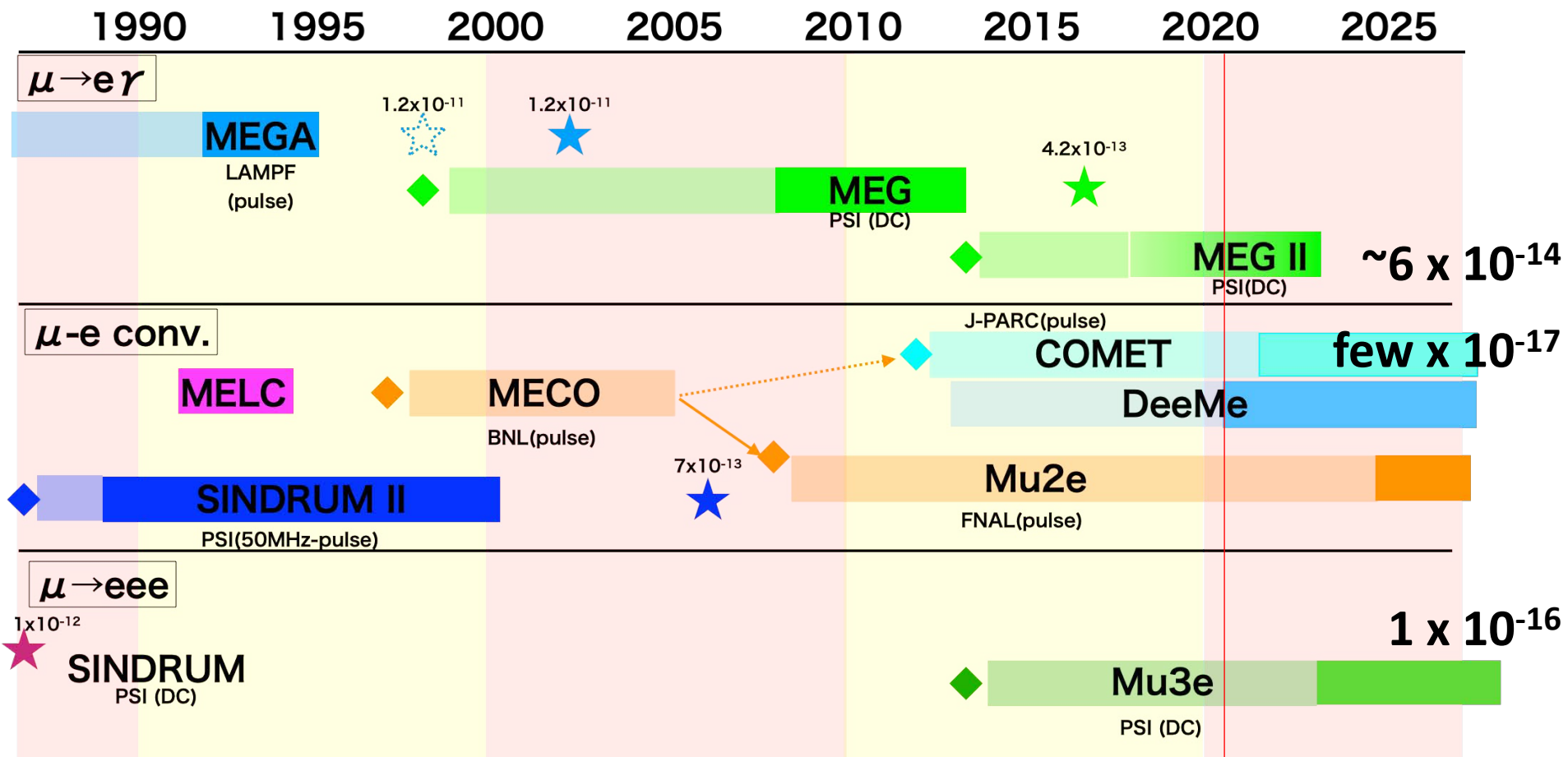
$$(m_{\tilde{L}}^2)_{21} \sim \frac{3m_0^2 + A_0^2}{8\pi^2} h_i^2 U_{i1}^* U_{i2} \ln \frac{M_{GUT}}{M_{R_s}}$$

PMNS matrix

L.J.Hall, V.Kostelecky, S.Raby, 1986; A.Masiero, F.Borzumati, 1986

三原 (2010) を改編

Muon cLFV : history



MEG II Experiment

Liquid Xenon γ Detector

900L LXe, 4092 MPPCs + 668 PMTs
Better uniformity w/ VUV-sensitive
12x12mm² SiPM

x2 resolution everywhere

COBRA SC Magnet

Upstream

Downstream

Gamma-ray (γ)

Muon (μ^+)

7x10⁷/s

x2 beam intensity

Radiative Decay Counter

Further reduction of radiative BG

Positron (e^+)

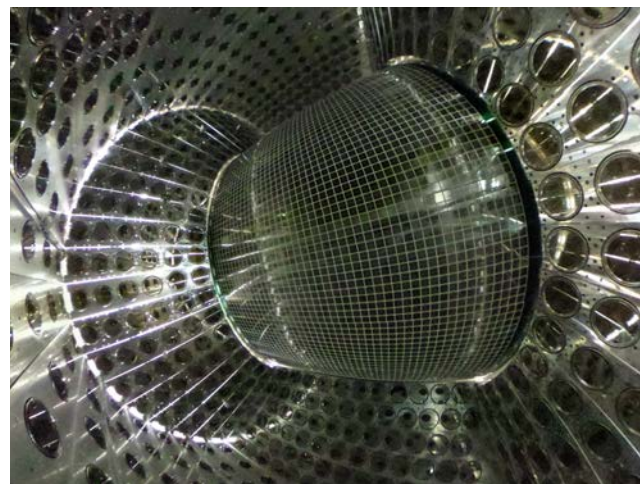
Cylindrical Drift Chamber
Single volume He:iC4H10
small stereo cells, more hits

Pixelated Timing Counter
30ps resolution w/ multiple hits

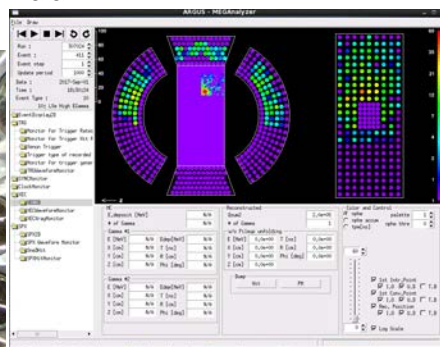
x2 efficiency

5

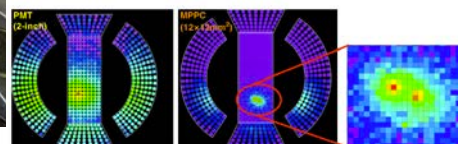
Detector commissioning:



Data

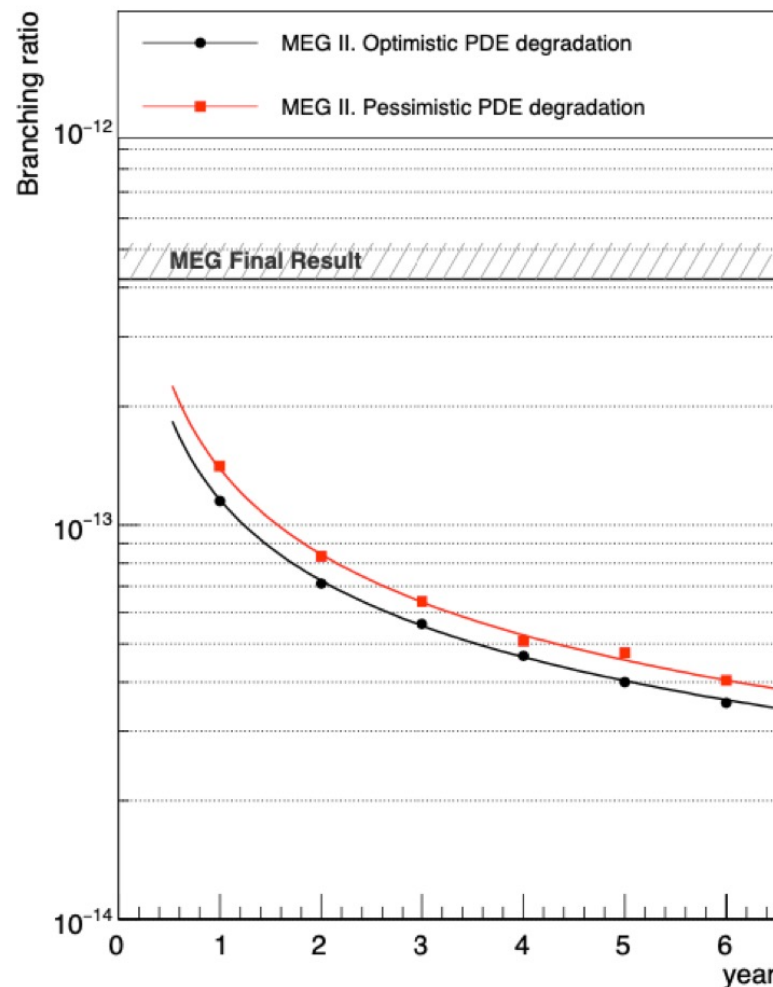


MC simulation



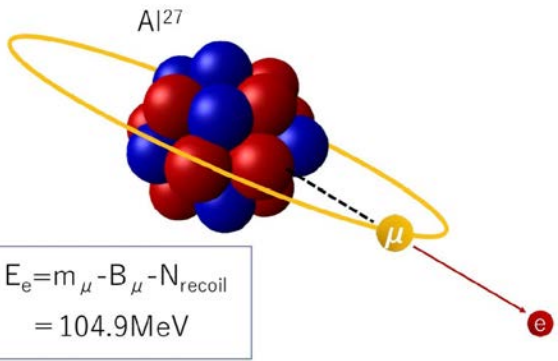
小川 (JPS 2020.9)

MEG II sensitivity vs. DAQ year with measured LXe detector performance & PDE degradation



Summary 岩本 (JPS 2021.3)

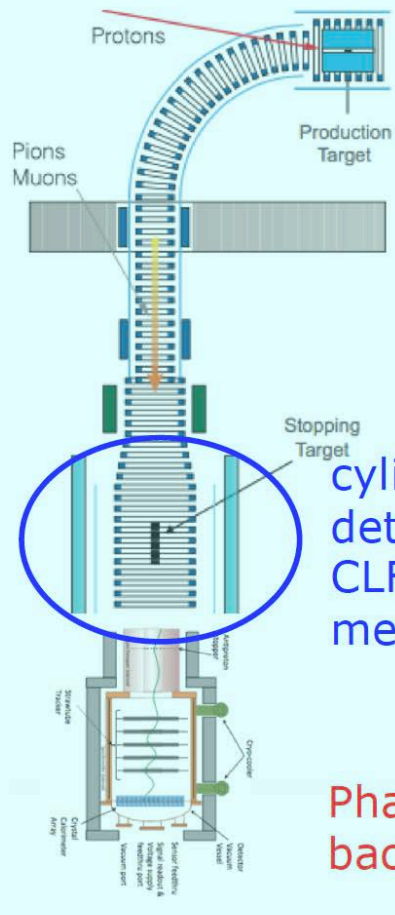
- All the MEG II detectors were tested under MEG II intensity
- The full electronics will be produced in March 2021
- PSI accelerator beam time in 2021 is decided, and we will concentrate on each sub-detector preparation for full electronics, and performing engineering run followed by physics run.
- There are several issues from each sub-detector for the physics run, but we will try to solve these problems to start the MEG II experiment this year



$$E_e = m_\mu - B_\mu - N_{recoil} = 104.9 \text{ MeV}$$

- Target S.E.S. 2.6×10^{-17}
- 8GeV Pulsed proton beam at J-PARC
- Staging approach
 - Phase-I 8GeV-3.2kW, $< 10^{-14}$
 - Phase-II 8GeV-56kW, $< 10^{-16}$

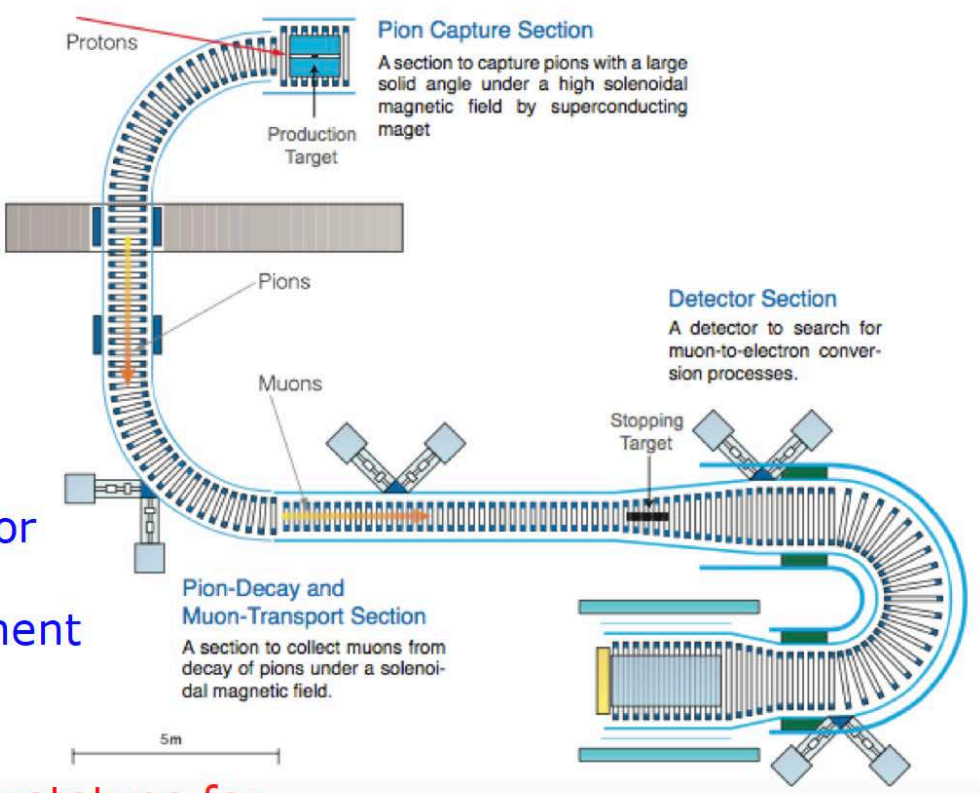
COMET phase I



cylindrical detector for CLFV measurement

Phase-II prototype for background characterisation

COMET phase II

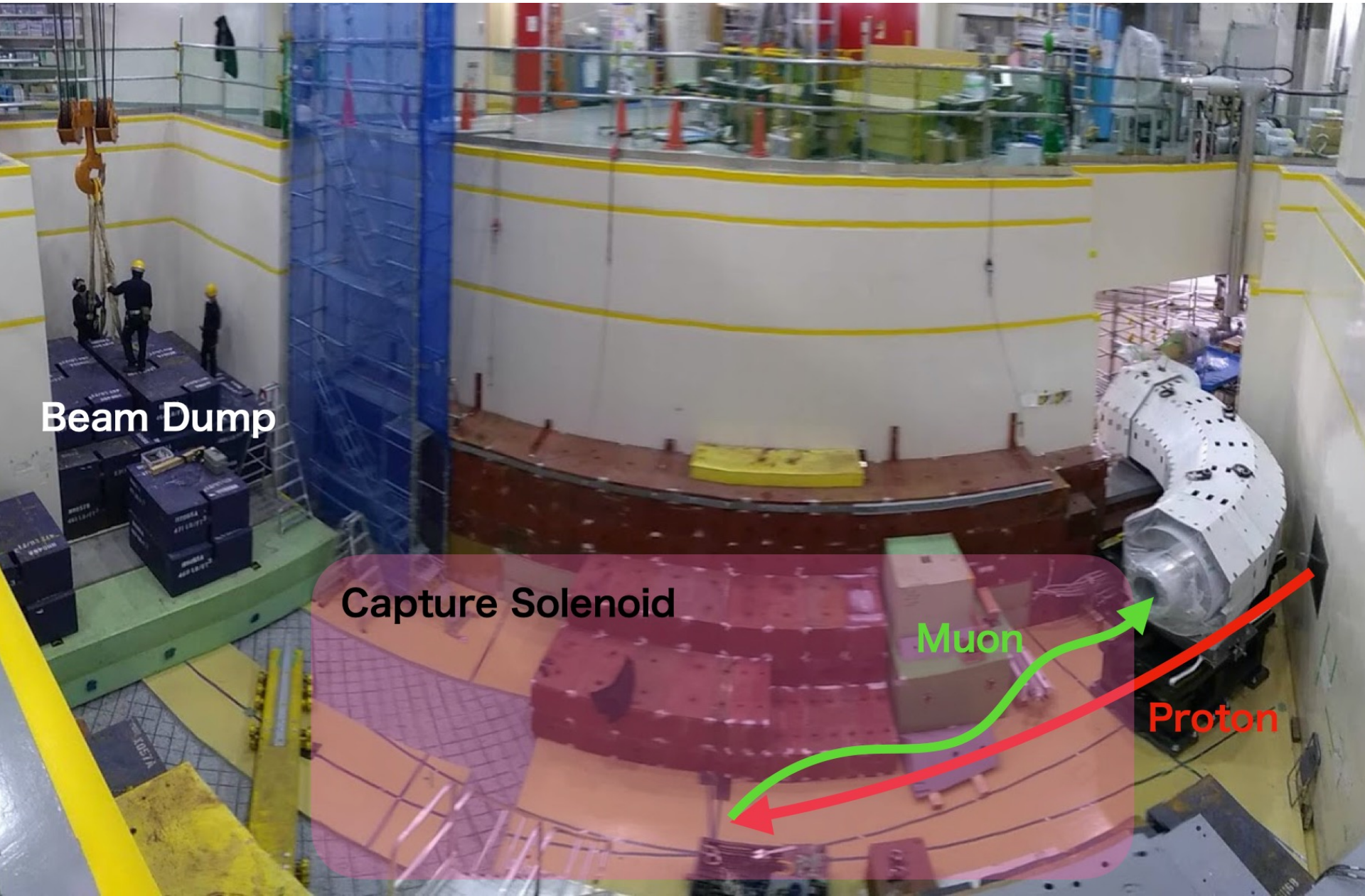


(コメント) g-2/EDM実験と別施設のため一緒に走れる

COMET

ハドロン実験施設 南実験棟 に建設されたCOMET実験エリア

As of Feb. 2021



Beam Dump

Capture Solenoid

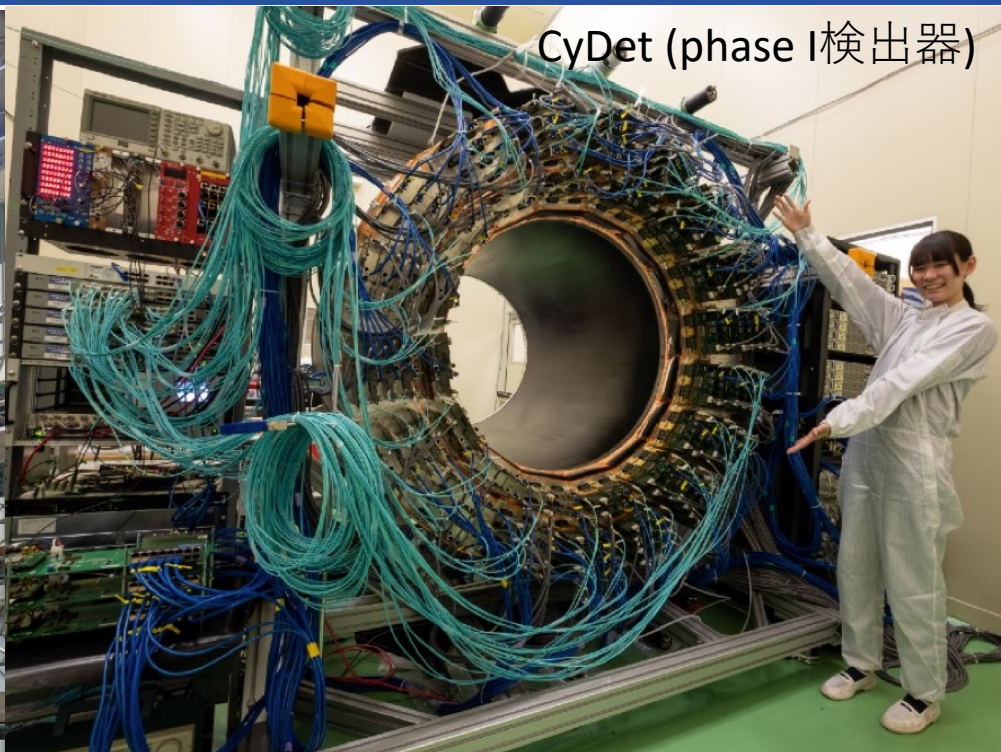
Muon

Proton

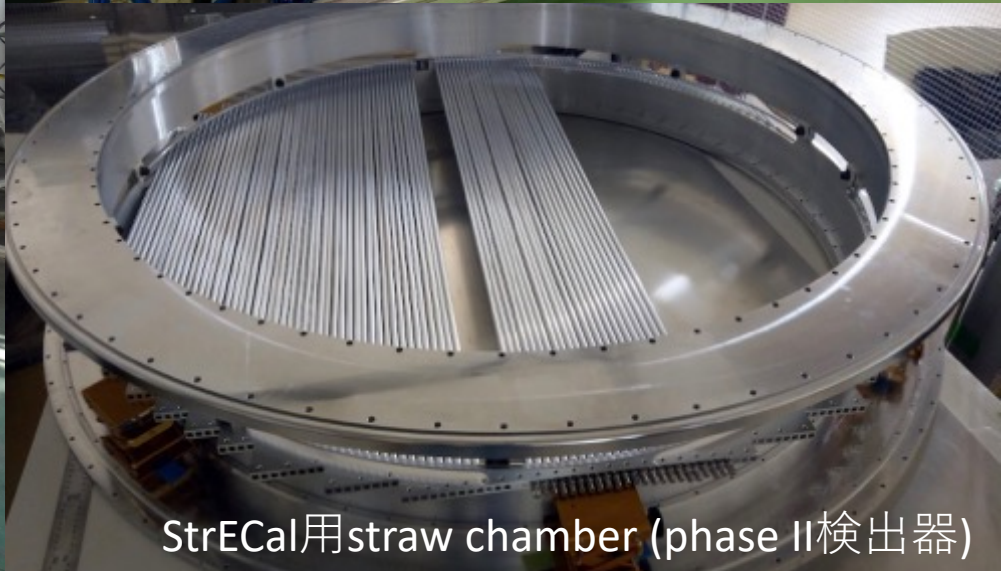
COMET



パイオン捕獲ソレノイド



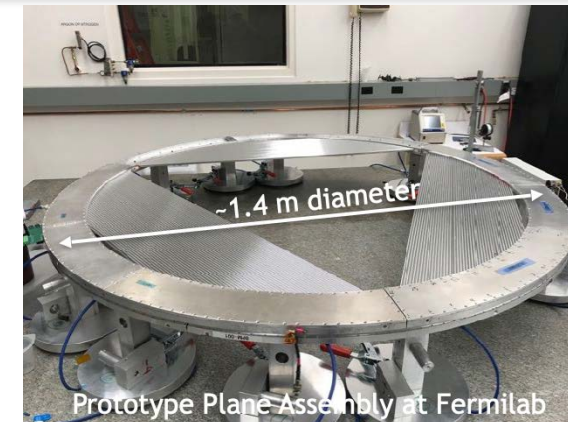
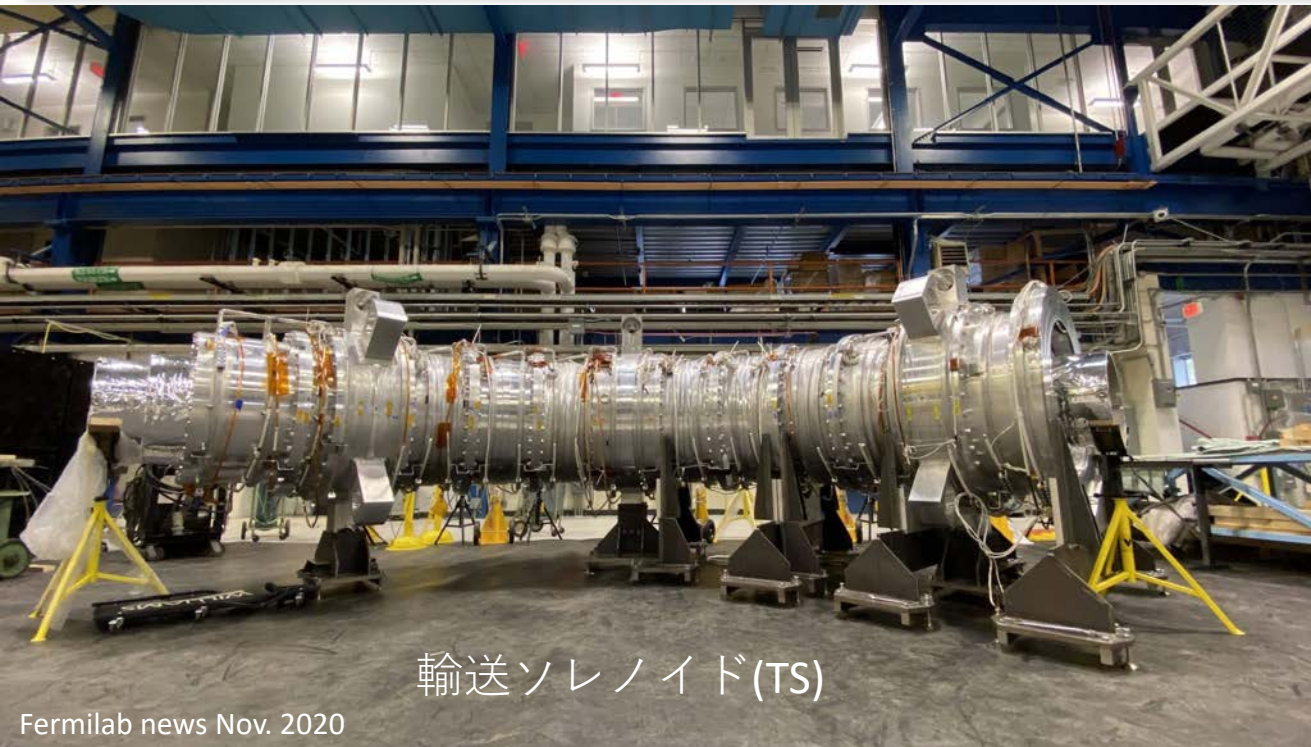
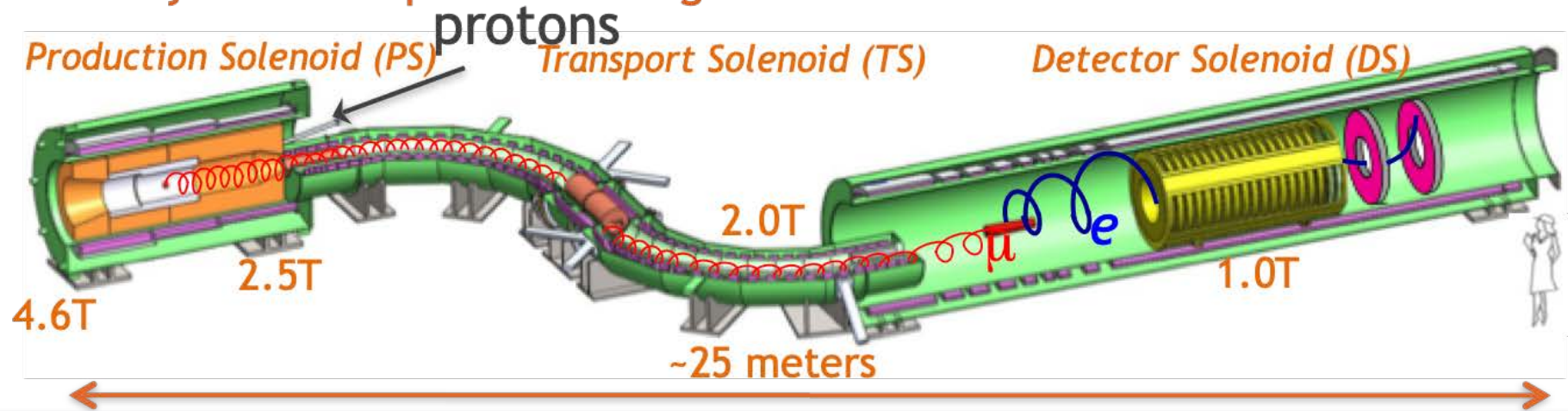
CyDet (phase I 検出器)



StrECal用straw chamber (phase II 検出器)

Mu2e at FNAL

A System of superconducting solenoids and an intense muon beam

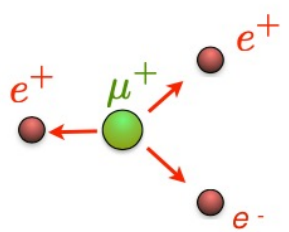


- 現在建設進行中
- 2025年からデータ収集予定
- g-2実験とexclusive

Mu3e at PSI

- The Mu3e experiment aims to search for $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ with a sensitivity of $\sim 10^{-15}$ (Phase I) up to down $\sim 10^{-16}$ (Phase II). Previous upper limit $BR(\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-) \leq 1 \times 10^{-12}$ @90 C.L. by SINDRUM experiment

A. Papa (TIPP 2021)

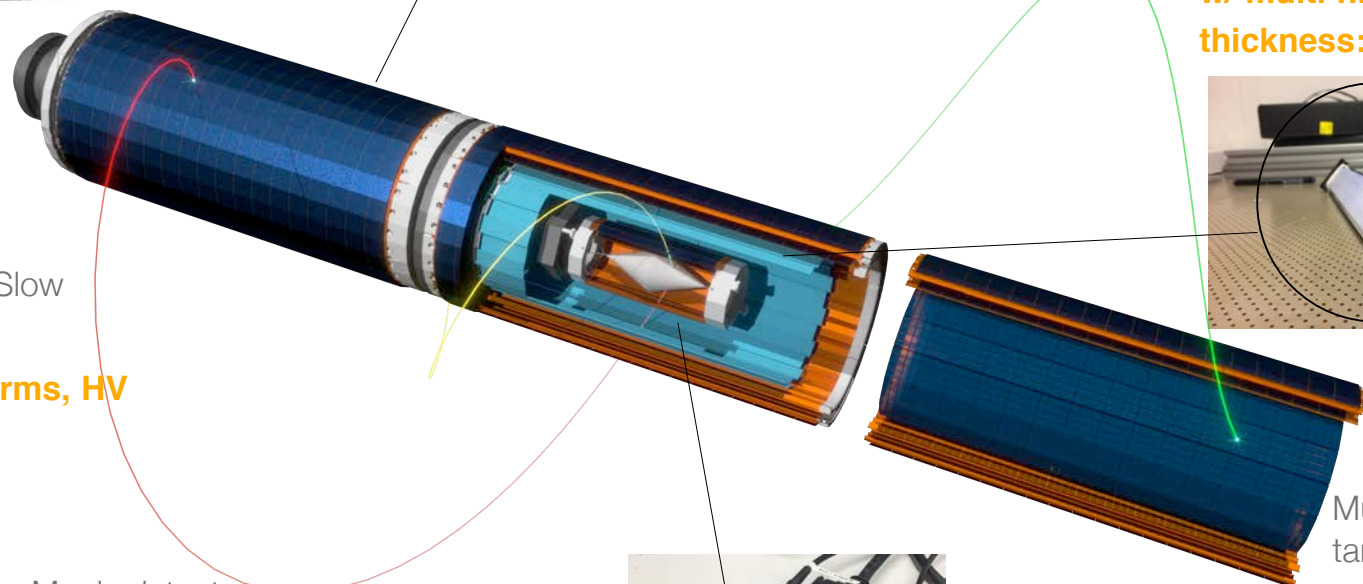
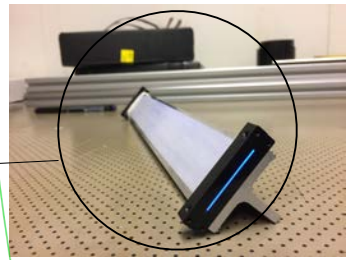


$\Delta t_{eee} = 0$
 $\Sigma \vec{p}_e = 0$
 $\Sigma E_e = m_\mu$



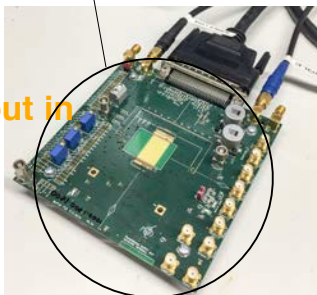
Tile detector
70 ps resolution w/ single hit

Fibre hodoscope
< 500 ps resolution w/ multi hits
thickness: < 0.3% X₀



MIDAS DAQ and Slow Control
Run, history, alarms, HV etc.

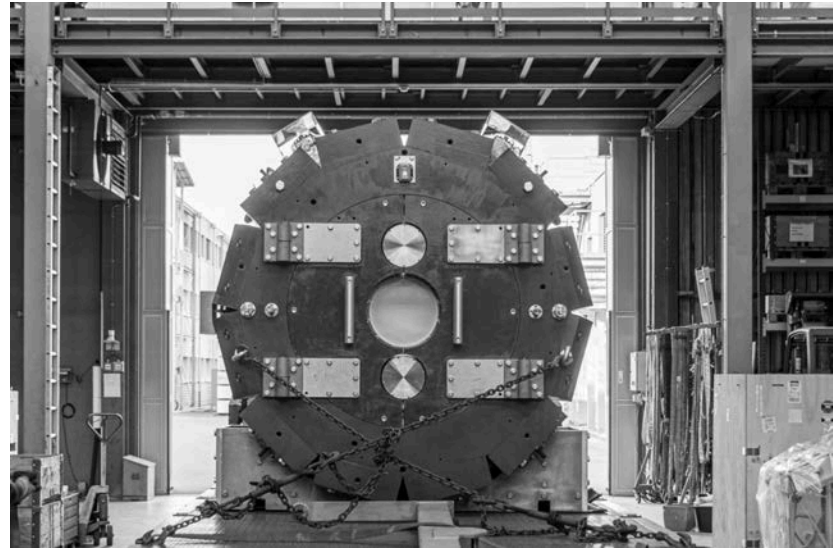
Mupix detector
Tracking, integrate sensor and readout in the same device: 50 um thick
1 layer: ~ 0.1% X₀

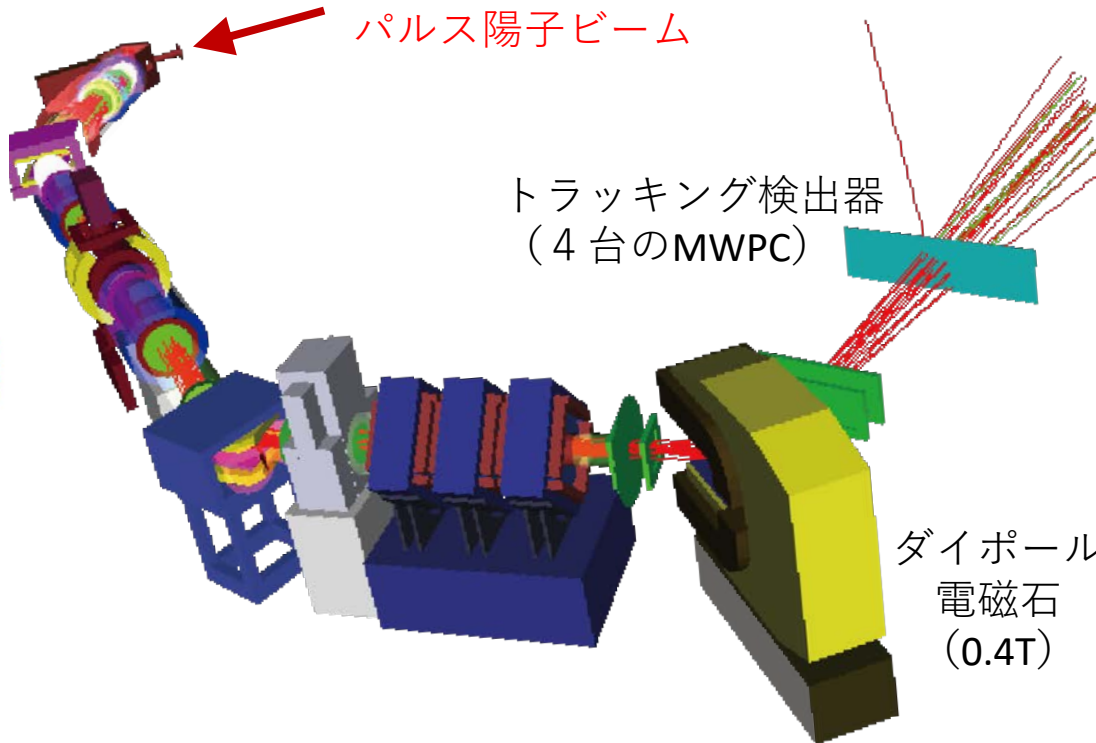
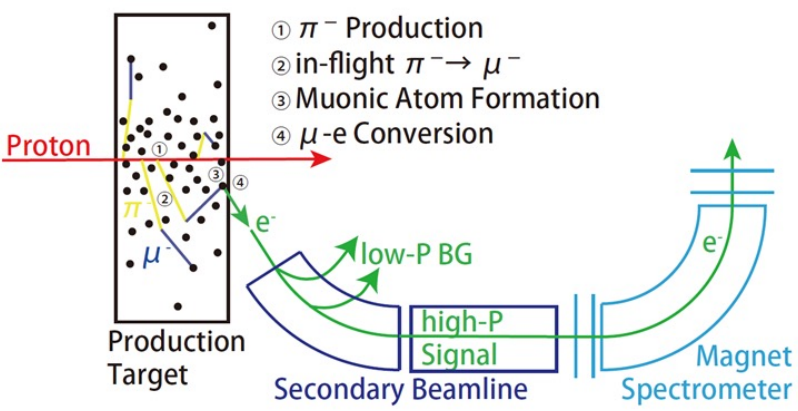


Muon Beam and target
Full available beam intensity O(10⁸)

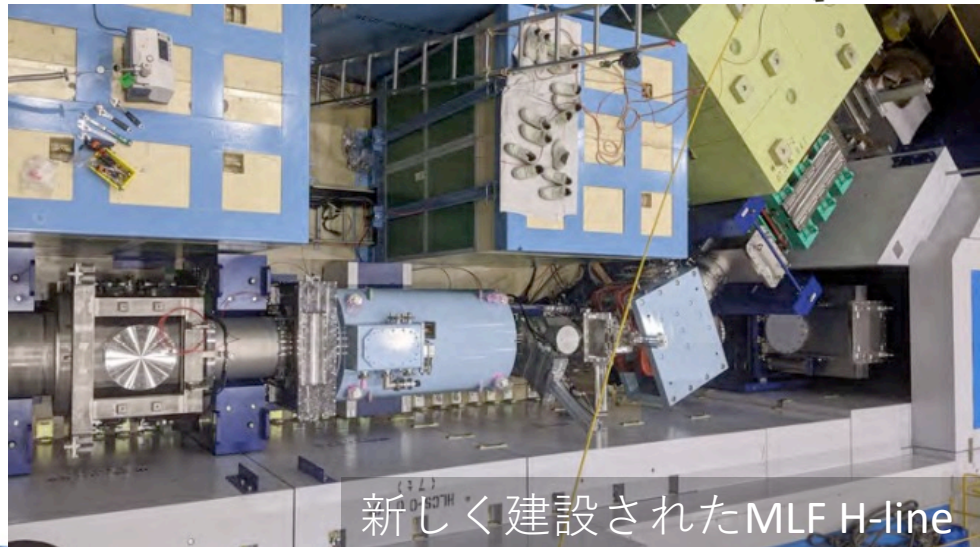
- Mu3e Magnet (Cryogenic) delivered at PSI in summer 2020
- CMBL installed in piE5 area
- Beam Line commissioning with all elements just started (few days ago)
- Slice detector commissioning will follow next weeks

A. Papa (TIPP 2021)



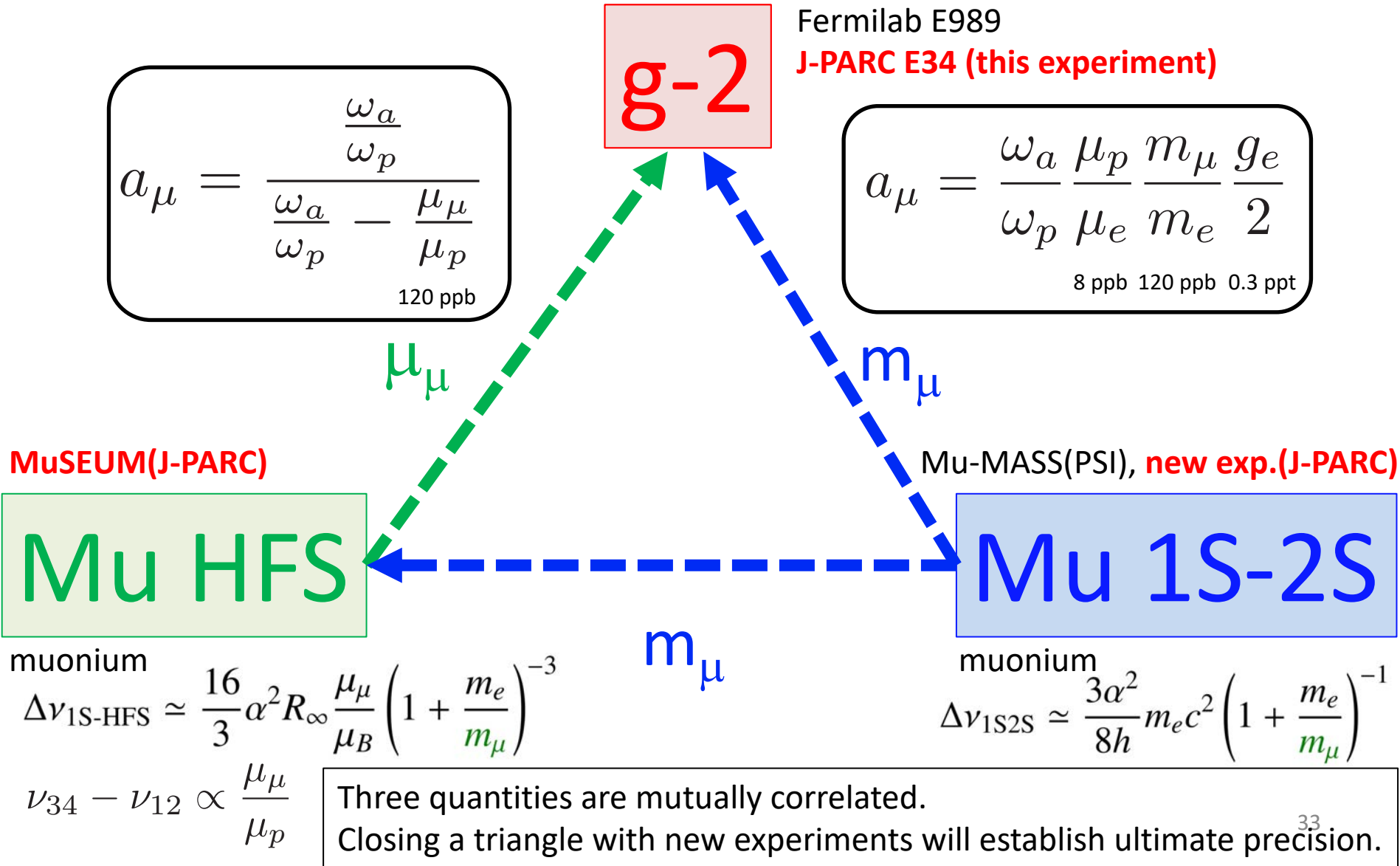


- 探索事象：単色エネルギー遅延電子 (105 MeV, $\sim 1 \mu\text{s}$ 遅延)
- 場所：J-PARC MLF H-Line
- 方法
 - π 中間子生成, $\pi \rightarrow \mu\nu$ 崩壊, ミュオニック原子生成を1つの同じ標的内で行う。
 - $\mu \rightarrow e$ 転換からの単色エネルギー電子をビームラインで輸送し, 磁気スペクトロメーターで検出。



目標感度(SES) : 1×10^{-13} (C)
 (データ取得 : 2×10^7 秒) **2×10^{-14} (SiC)**

g-2 and muonium experiments 33



g-2 and muonium experiments 34 at J-PARC

Lead by K. Shimomura (IMSS/KEK)

g-2

Fermilab E989
J-PARC g-2/EDM (2025~)



Mu-MASS(PSI), new exp.(J-PARC)



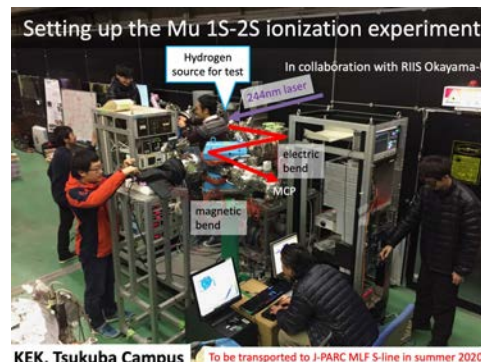
MuSEUM(J-PARC) Ongoing

Positron detector

Muonium production target

Mu HFS

Mu 1S-2S



In preparation
Lead by S. Uetake (Okayama)

Three independent experiments have launched at J-PARC for improved measurements.

まとめ

- フェルミ国立研究所のミュオンg-2測定の結果発表により20年前の結果が再確認された。素粒子標準模型の綻びが見えたかもしれない。
- 今、ミュオンを用いた新しい素粒子実験が次々と始まっている。

