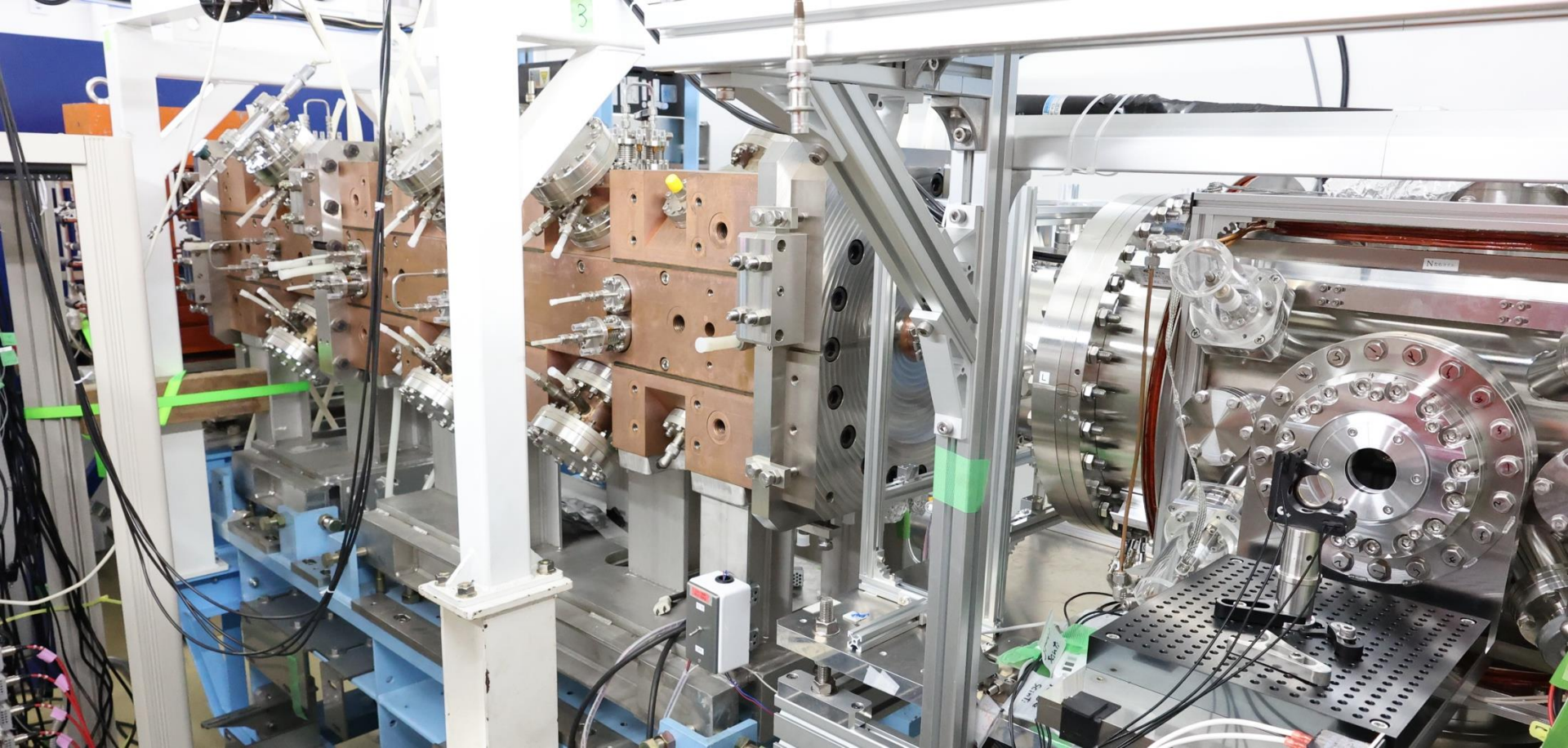




世界初のミュオン加速の成功と ミュオンg-2/EDM実験の状況

2025年4月11日

三部 勉 (KEK素粒子原子核研究所/東京大学理学専攻科)

「素粒子原子核物理学の軌跡—隠された宇宙の謎に迫る—」

(2025.1.14-2.13)



「素粒子原子核物理学の軌跡—隠された宇宙の謎に迫る—」

(2025.1.14-2.13)



加速器を用いて基礎科学を推進する国際研究所

東海キャンパス

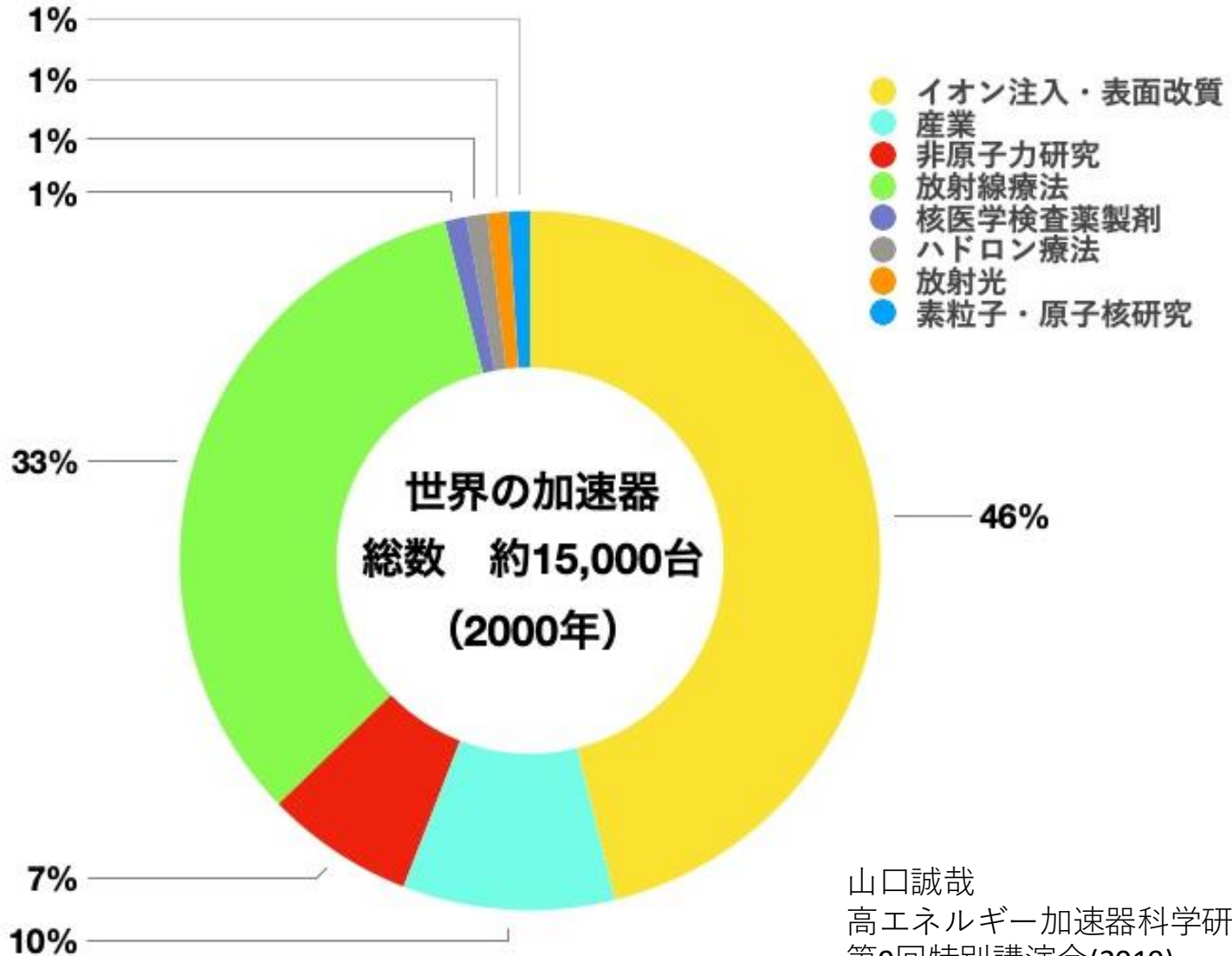


つくばキャンパス



世界の加速器

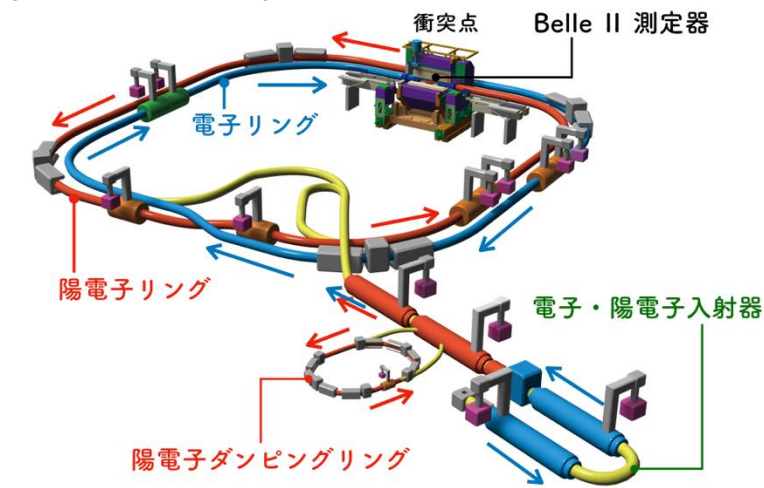
5



World wide inventory of accelerators, in total 15,000. The data have been collected by W. Scarf and W. Wieszczycka (See U. Amaldi Europhysics News, June 31, 2000)

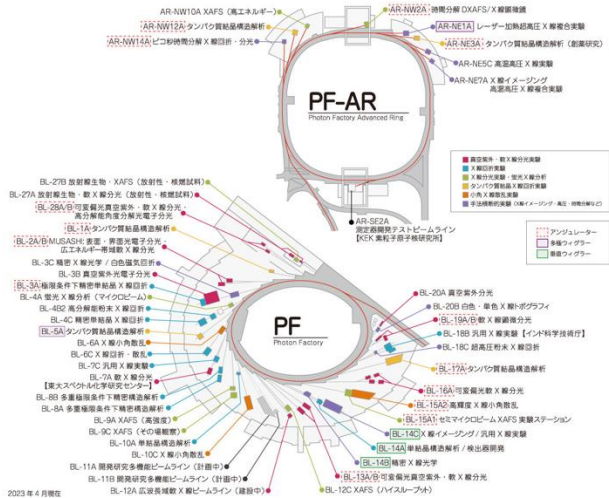
電子加速器

素粒子実験用 電子・陽電子加速器
(KEKB, ILC, ...)



- 「CP対称性の破れと3世代クォーク」
小林誠博士・益川敏英博士
2008年ノーベル物理学賞
- 「クォークの発見」 1990年ノーベル物理学賞
- 「J/Psi粒子の発見」 1976年ノーベル物理学賞

放射光施設
(KEK PF, SPring-8, Nano Terasu,...)



「リボソームの構造解明」
アダ・ヨナット博士
2009年ノーベル化学賞

写真クレジットは全てKEK
電子顕微鏡



「クライオ電子顕微鏡法の開発」
ジャック・デュボシェ博士
ヨアヒム・フランク博士
リチャード・ヘンダーソン博士
2017年ノーベル化学賞

「電子顕微鏡法の開発」
1986年ノーベル物理学賞

将来は、半導体リソグラフィ用加速器(EUV)、国際リニアコライダー(ILC)...

陽子加速器

大強度陽子加速器 (J-PARC, SNS, RAL, ...)

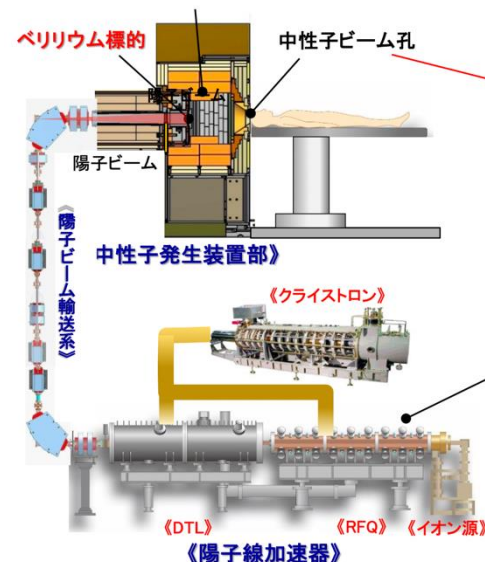


高エネルギー陽子加速器 (LHC, FCC, ...)



©CERN

医療用加速器 (陽子線施設、中性子線施設、...)



「ニュートリノ振動の発見」

梶田隆章博士
アーサー・B・マクドナルド博士
2015年ノーベル物理学賞

「タウ粒子の発見、ニュートリノ検出」

1995年ノーベル物理学賞

「中性子散乱技術の開発」

1994年ノーベル物理学賞

「中性K中間子のCP対称性の破れ」

1980年ノーベル物理学賞

「ヒッグス粒子の発見」

フランソワ・アングレール博士
ピーター・ヒッグス博士
2013年ノーベル物理学賞

「w/z粒子の発見」

1984年ノーベル物理学賞

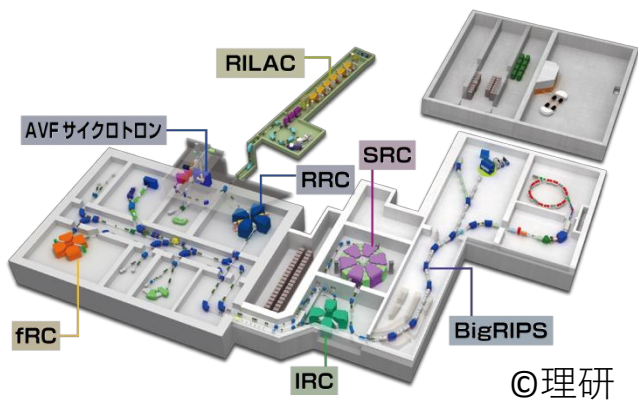
「陽子線治療センター」 国内に20箇所

「ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)」

「医療用RI製造」

重イオン加速器

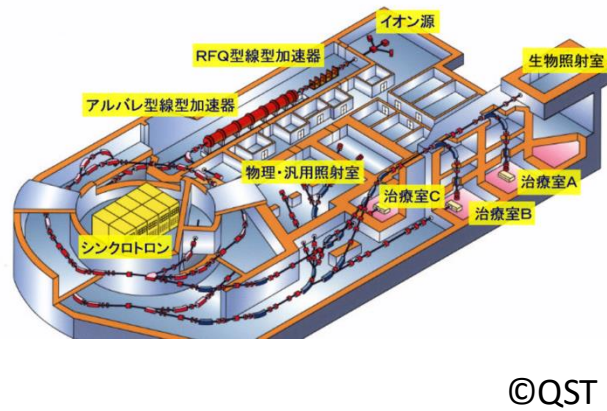
原子核物理用加速器
(RIBF, RCNP, FRIB, ...)



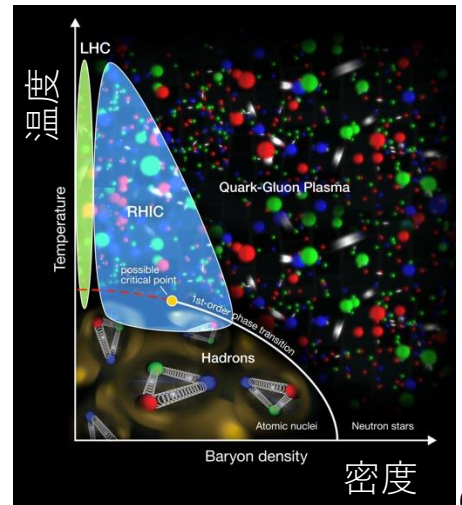
重イオンコライダー
(RHIC, LHC, EIC...)



重イオンがん治療施設
(HIMAC, ,...)

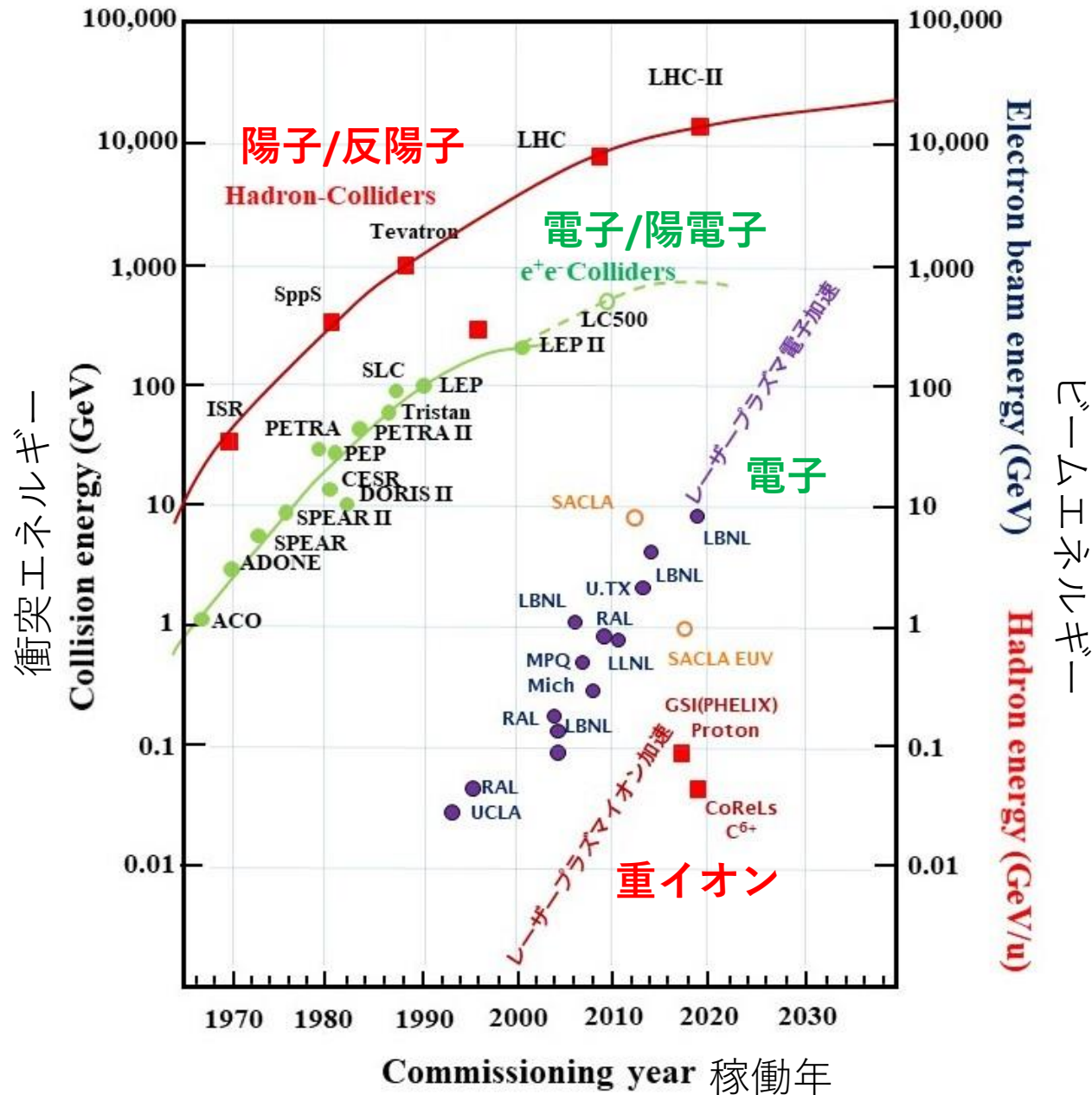


強い相互作用の相図



「重粒子線治療施設」
国内に 7 か所
「量子メス」

9



まだ、1つも存在していません

ミュオン顕微鏡

ミュオン超精密実験

ミュオンコライダー

Experimental particle physics with muon

THE IBARAKI SHIMBUN 2024年(令和6年)6月16日 日曜日 ©茨城新聞社2024 (日刊)

高エネ研・茨城大など

世界 ミュオン 加速器開発に成功

高エネルギー加速器研究機構(KEK)や茨城大などの研究グループが、物質を通り抜けるミュオン粒子(ミュオン)を停止、加速させる技術の実証に世界で初めて成功した。技術開発を進め、2026年にもミュオン加速器が実現する。素粒子理論の検証や人体の細部が観察できる顕微鏡、コンテナ貨物の検査など、さまざまな形で応用に期待がかかる。

ミュオンは、宇宙から地球に降り注ぐ「宇宙線」の一種。高い透過性を持つことから建物の内部を透視する際などに使われ、東京電力福島第一原発の炉内調査やヒラミッド探索などに用いられた。加速器を使って人工的に作ることはできるが、向きや速さのばらつきが大きく、実験の多くで

効率よく活用できた。ミュオンにマイナスの電荷、マイナスの電荷(正ミュオン)は、ほぼ止まるまで減速して向きや速さ(冷却する)を調整する。その上で加向きや速さがそ性の高いミュオン

祝「ミュオン加速元年」

2024 muons accelerated

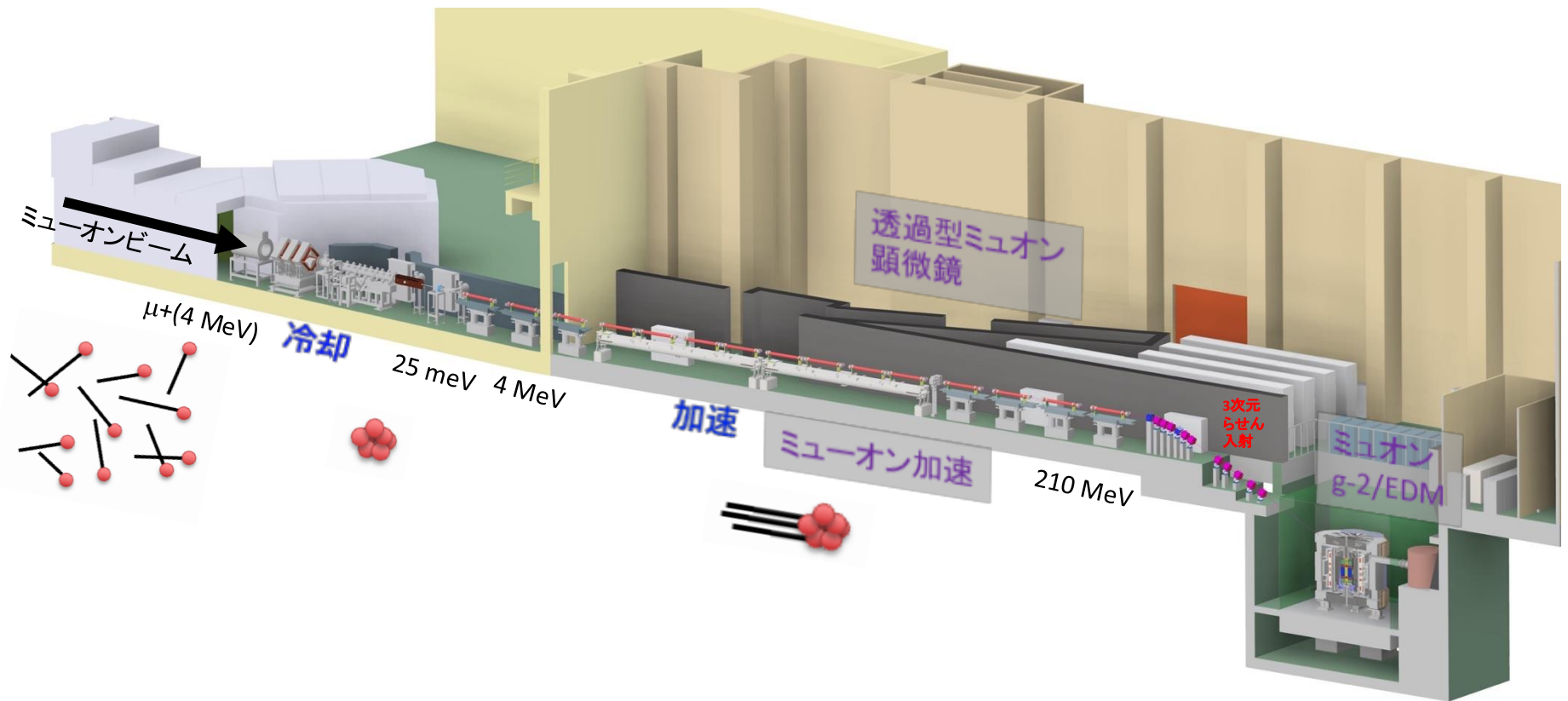
23年3月 PARC 実験施設 (東海村白方)で試験を実施。ミュオンをガラスとレーンに打ち込み、レーンに照射することによって、高周波電場を生成。高周波電場を加速させることに成功した。実証は世界初という。今後はミュオンを4段階で加速させる加速器(全長約50m)を同施設に設置。26年度に光速30%で運用を開始し、28年度に光速94%に到達する。

水面を色鮮やかに彩るスイレン=15日、常陸太田市大中町

茨城新聞社 〒310-8686 水戸市笠原町978-25 電話(029)239-3001代 http://ibarakinews.jp 編集局 電話(029)239-3020 FAX(029)301-0362 読者申し込み 0120-029-218 (平日午前9時~午後5時) 安心のハートピアグループ

世界初のミュオン加速器

12



電磁場とスピンの相互作用

13

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \vec{d} \cdot \vec{E}$$

P,C,T-even

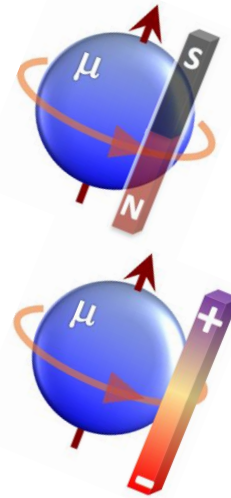
P,T-odd (CP-odd)

Magnetic Dipole Moment

$$\vec{\mu} = g \left(\frac{q}{2m} \right) \vec{s}$$

Electric Dipole Moment

$$\vec{d} = \eta \left(\frac{q}{2mc} \right) \vec{s}$$



	$\vec{E}$	$\vec{B}$	$\vec{\mu}$ or $\vec{d}$
P	-	+	+
C	-	-	-
T	+	-	-

Anomalous magnetic moment : g-2

14

The most precisely calculated physical quantity to date

Strength of the magnet ($g-2$) is determined by **ALL** particles and interactions

Theoretical prediction

$$\frac{g-2}{2} = 0.00116591810(43)$$

uncertainty 4 parts in 10^7

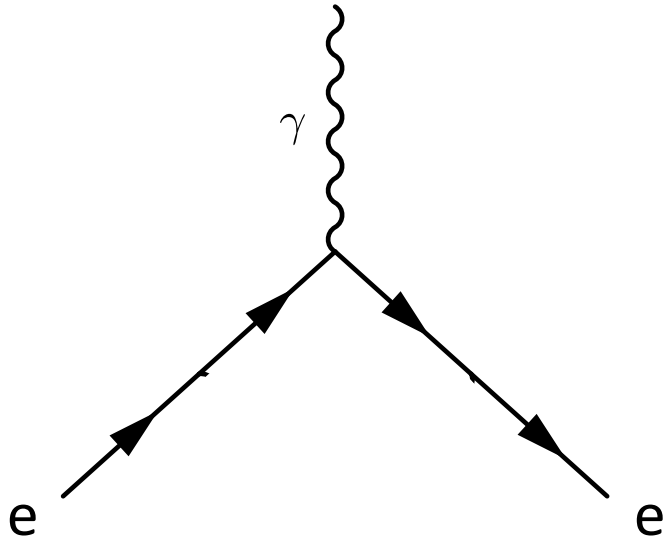
Diagram illustrating the forces contributing to the anomalous magnetic moment ($g-2$) of a muon (μ). The muon is shown with its magnetic moment vector μ and a spin vector. The forces contributing to the anomaly are:

- EM force (Electromagnetic)
- Strong force
- Weak force
- New force / New particles (indicated by a red question mark)

g 因子と量子ループ補正

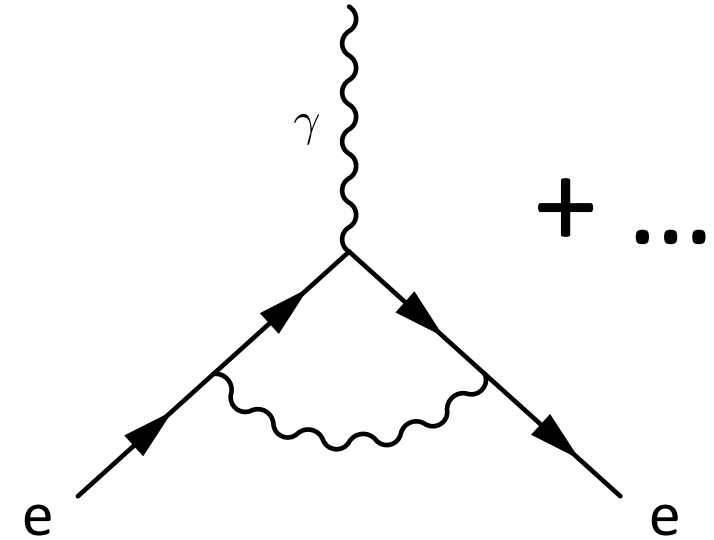
15

Dirac's theory



$$g = 2$$

QED



$$g = 2 \left(1 + \alpha/2\pi + \dots \right)$$

Schwinger

$$\frac{g - 2}{2} \equiv a = A^2 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + A^4 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 + A^6 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 + A^8 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^4 \dots$$

$$a_e(\text{QED}) = A_1 + A_2(m_e/m_\mu) + A_2(m_e/m_\tau) + A_3(m_e/m_\mu, m_e/m_\tau).$$

$$A_i = A_i^{(2)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + A_i^{(4)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + A_i^{(6)} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \dots, \quad i = 1, 2, 3,$$

- $A_1(n)$ is known up to $n = 10$

$A_1^{(2)} = 0.5$	1 diagram (analytic)	(1948) Schwinger
$A_1^{(4)} = -0.328\,478\,965\dots$	7 diagrams (analytic)	(1957) Sommerfield, Petermann
$A_1^{(6)} = 1.181\,241\,456\dots$	72 diagrams (analytic)	(1995) Laporta and Remiddi
$A_1^{(8)} = -1.912\,89\,(90)$	891 diagrams (numerical, July 2014)	} Kinoshita, Nio Hayakawa, Aoyama
$A_1^{(10)} = 7.651\,(353)$	12672 diagrams (numerical, July 2014)	

T. Kinoshita, Phys. Rev. Lett. 75, 4728 (1995)

T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, and M. Nio, Phys. Rev. Lett. 109, 111807 (2012)

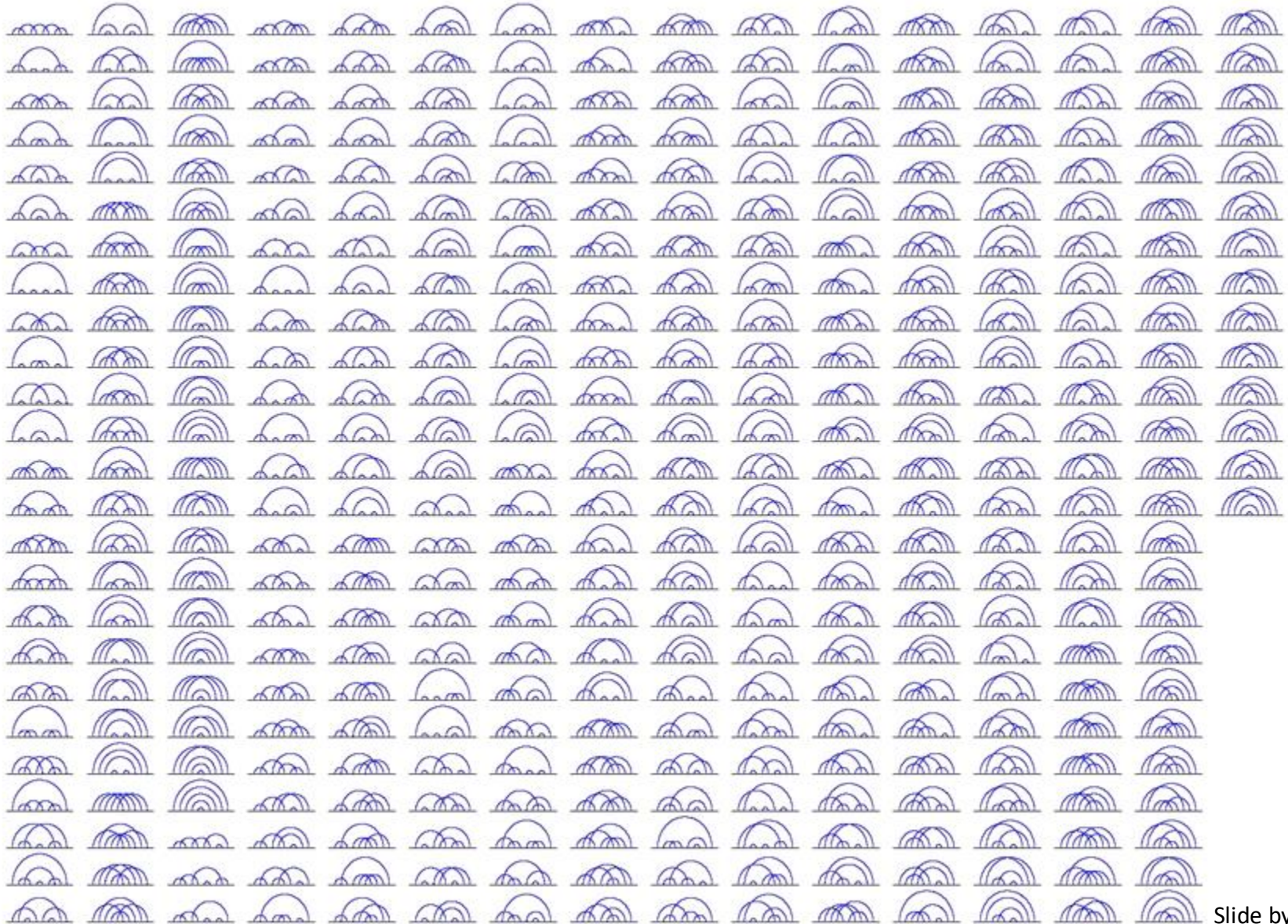
T. Aoyama, T. Kinoshita, and M. Nio, Phys. Rev. D 97, 036001 (2018)

T. Aoyama, T. Kinoshita, and M. Nio, Atoms 7, 28 (2019)

異常磁気能率 ($g-2$)

17

QED 389 self-energy like diagrams in 10th order calculations



1961

Physics world

Deep thinker Toichiro Kinoshita (left) and Richard Feynman, friends and collaborators on a boat ride during a high-energy physics conference at the Scripps Institute in La Jolla, California, in 1961. (Photo by Clarice Schwinger, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives)



木下 東一郎 先生

リチャード
ファインマン 先生

Proceedings of the talk in the celebration of the 70th birthday of Alberto Sirlin

Everyone makes mistakes—including Feynman

Toichiro Kinoshita

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

Received 5 September 2002

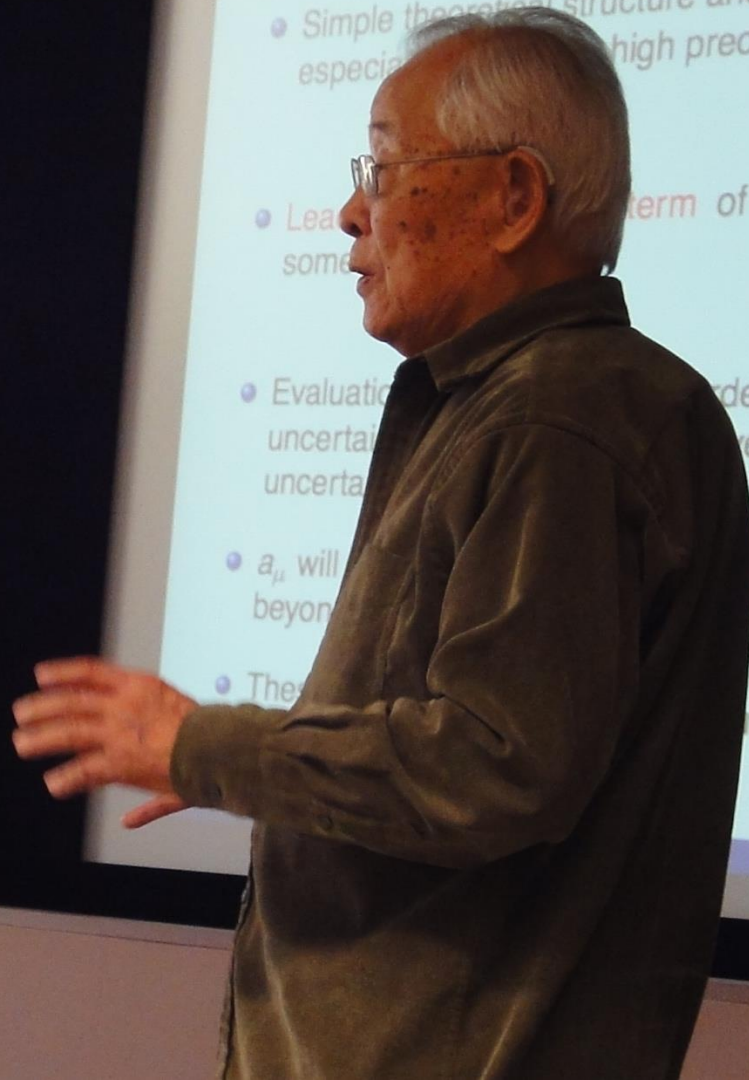
Published 17 December 2002

Online at stacks.iop.org/JPhysG/29/9

Abstract

Early stages of the theory of radiative corrections to weak interaction processes such as muon decay and $\pi - e$ decay are described based on my personal recollection. The discovery of an error in our initial paper on the muon decay played a crucial role in the realization of remarkable cancelation of mass singularities in integrated observable quantities. General formulation developed to deal with mass singularity turned out to be very handy for numerical evaluation of high-order radiative corrections to the lepton anomalous magnetic moment. This has led to the most stringent test of QED available at present. New developments of last two years are described briefly in ‘Note added in proof’.

10次のQED計算結果について講演してくださった木下東一郎先生 (KEK, 2012年)



- To match the precision of $a_e(HV)$ it is necessary to calculate the tenth-order QED term of a_e .
- Simple theoretical structure and small non-QED effects makes a_e especially a high precision test of QED.
- Leading term of a_μ has been known for years within some
- Evaluation of tenth order term will reduce theoretical uncertainty of QED as source of theoretical uncertainty
- a_μ will be a powerful tool for exploring possible physics beyond
- These calculations are required for calculating the tenth-order terms.

Kinoshita, Nio, PRD 73, 053007 (2006)

電子の異常磁気能率 a_e

21

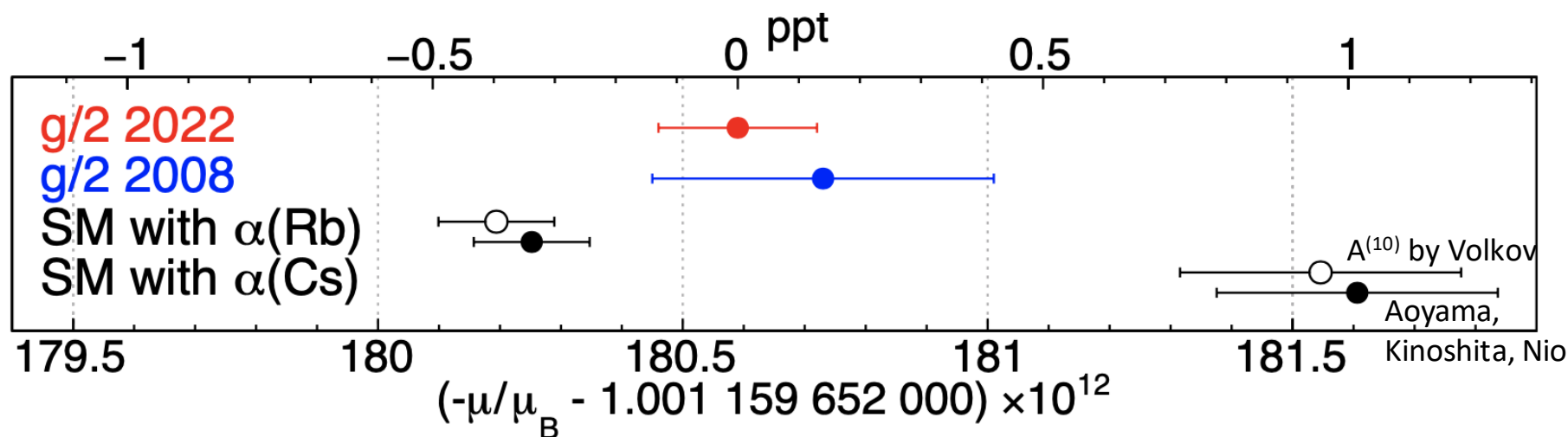
- ・ 極低温のペニングトラップを用いた超精密測定

D. Hanneke, S. Fogwell, G. Gabrielse, PRL 100, 120801 (2008)

D. Hanneke, S. Fogwell Hoogerheide, G. Gabrielse, PRA 83, 052122 (2011)

X. Fan, T. G. Myers, B. A. D. Sukra, G. Gabrielse, PRL 130, 071801 (2023)

$$a_e = 1\,159\,652\,180.59(13) \times 10^{-12}$$

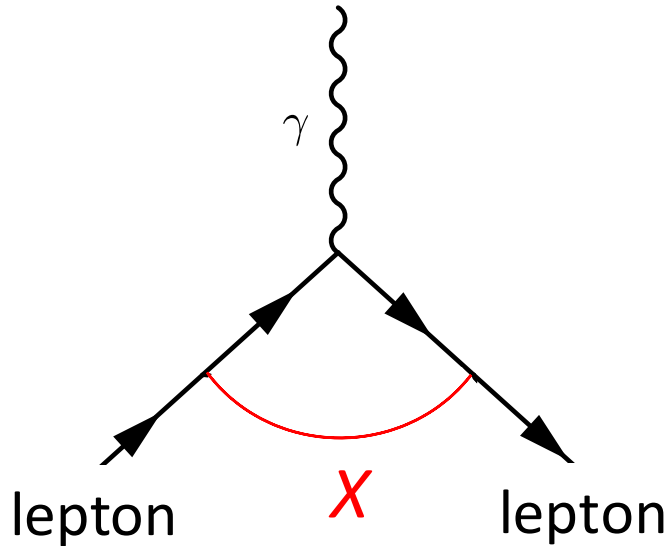


先行実験より **約 2 倍の精度向上 (0.1 ppt のレベルへ)**

実験と理論の比較精度向上のためには今後 **微細構造定数 α の精密測定が重要**
(a_e から決めた α (2017) が SI 単位系のプランク定数の定義に使用されている)

レプトン質量と $g-2$ の関係

22



$$a_l(X) \sim C_X \left(\frac{m_l}{\Lambda_X} \right)^2$$

C_X : Coupling strength

Λ : Mass Scale

$$\left(\frac{m_\mu}{m_e} \right)^2 \sim 43,000$$

Much larger contributions to muon than electron.

$$\left(\frac{m_\tau}{m_\mu} \right)^2 \sim 170$$

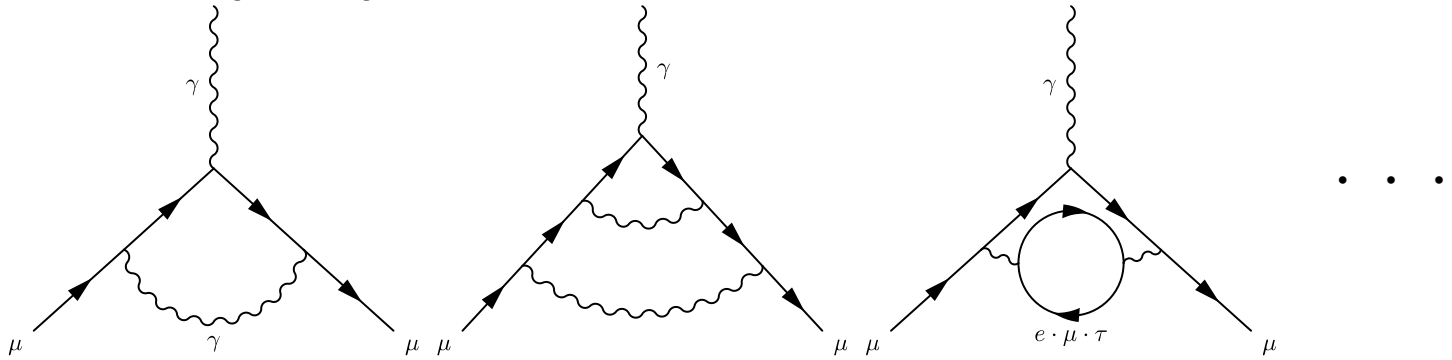
True for new physics sensitivity too

Even larger for tau, but difficult to measure.

異常磁気能率 ($g-2$)の内訳

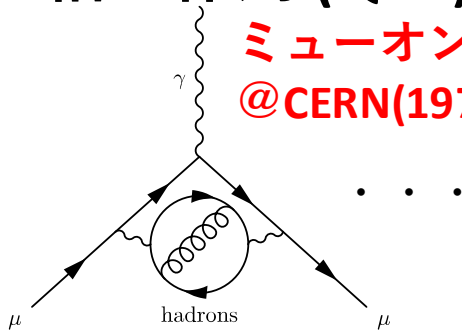
23

量子電気力学(QED) 電子 $g-2$ 実験、原子分光実験 (1960's~)



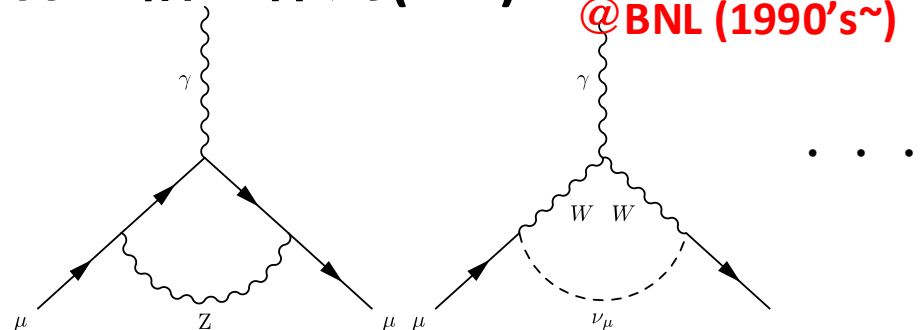
強い相互作用 (QCD)

ミューオン $g-2$ 実験
@CERN(1970's~)



弱い相互作用(EW)

ミューオン $g-2$ 実験
@BNL (1990's~)



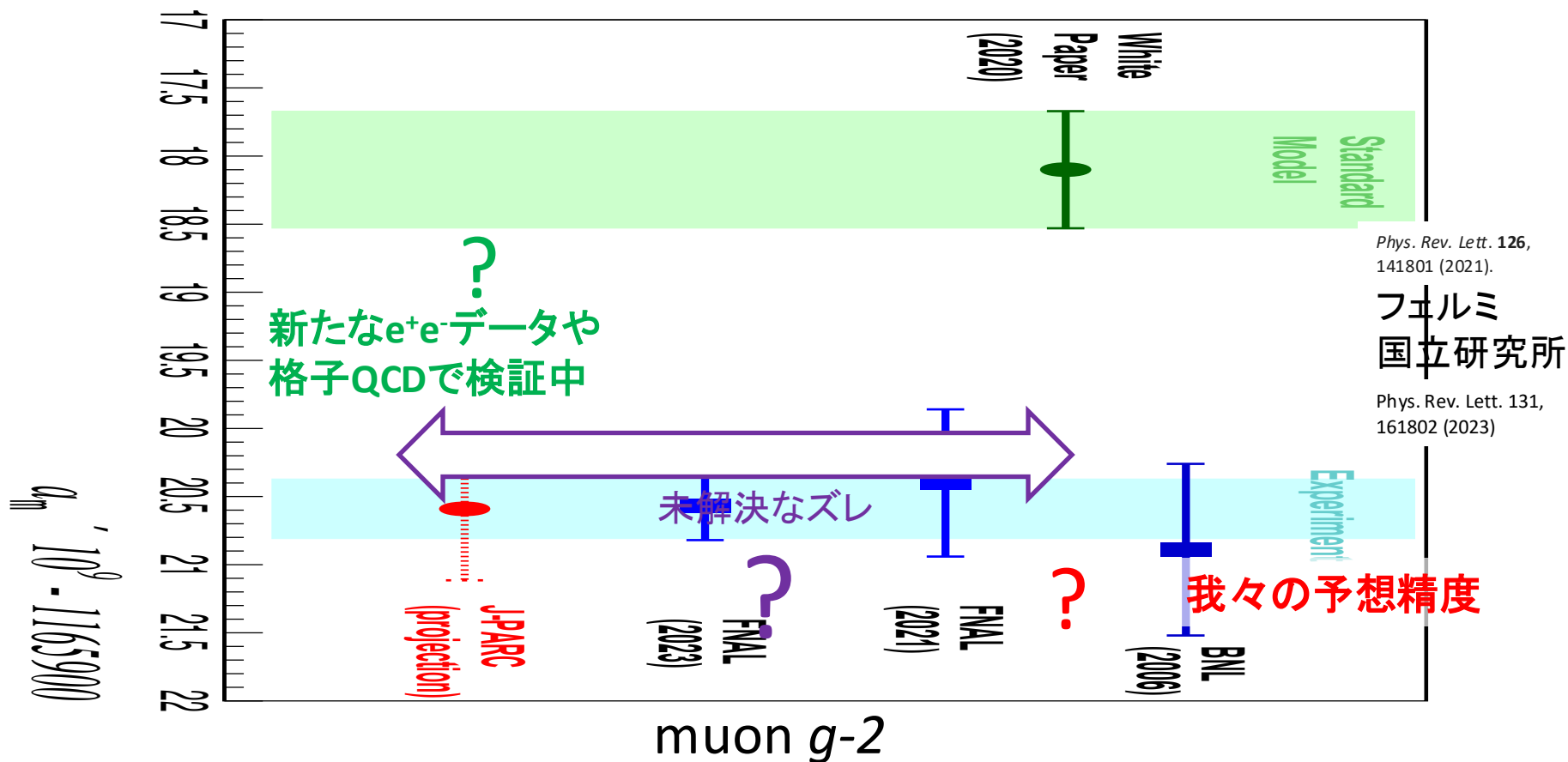
ミューオンは電子より質量が大きいためQEDに加えてQCDやEWの効果が必要

ミューオンg-2 の状況(2023頃まで)

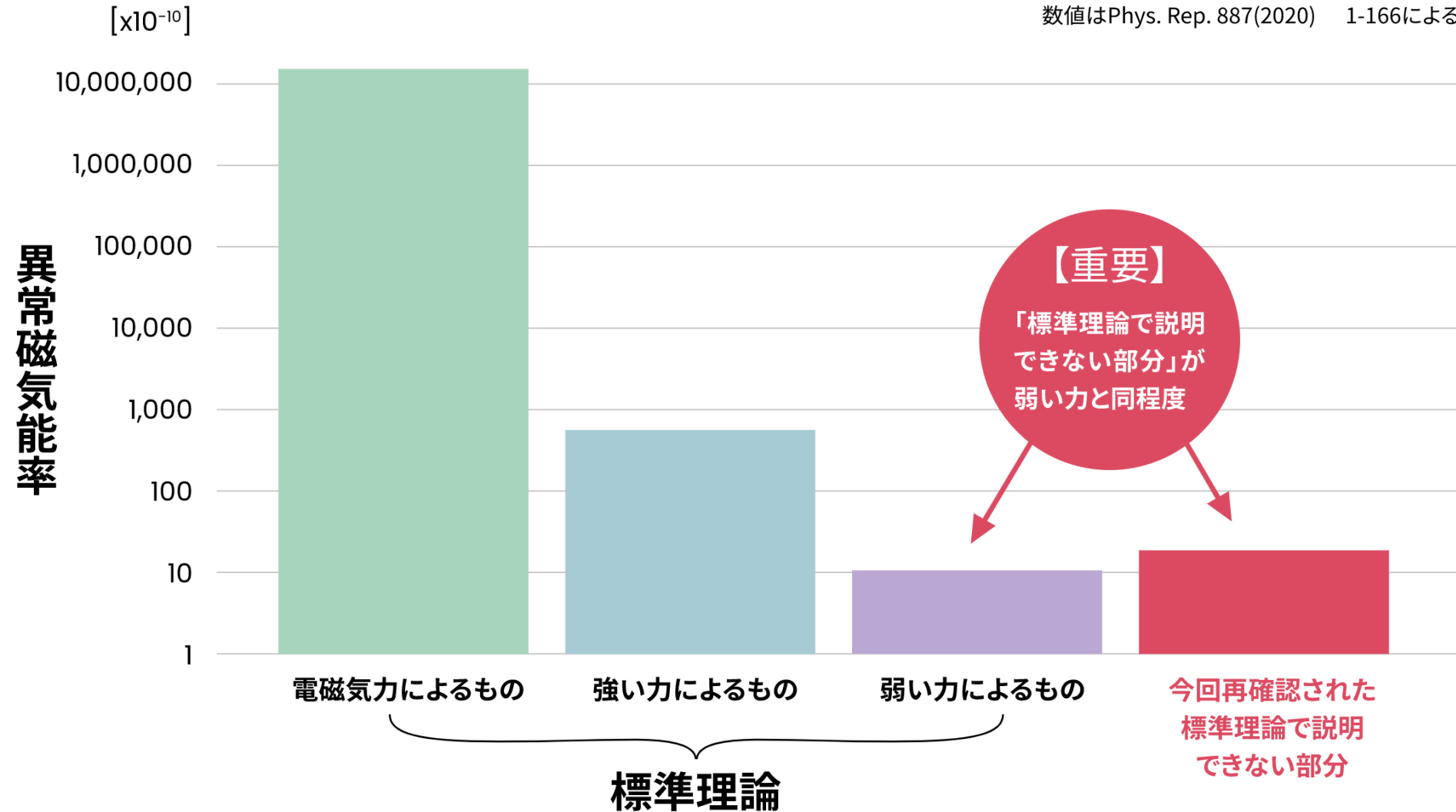
24

標準理論

実験値



数値はPhys. Rep. 887(2020) 1-166による



ミューオンg-2新時代(2024)

26

CERN courier (2025.3.26)

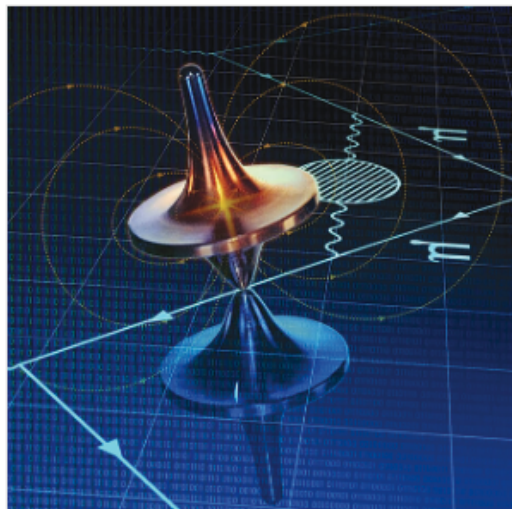
<https://cerncourier.com/a/do-muons-wobble-faster-than-expected/>

STRONG INTERACTIONS | FEATURE

Do muons wobble faster than expected?

26 March 2025

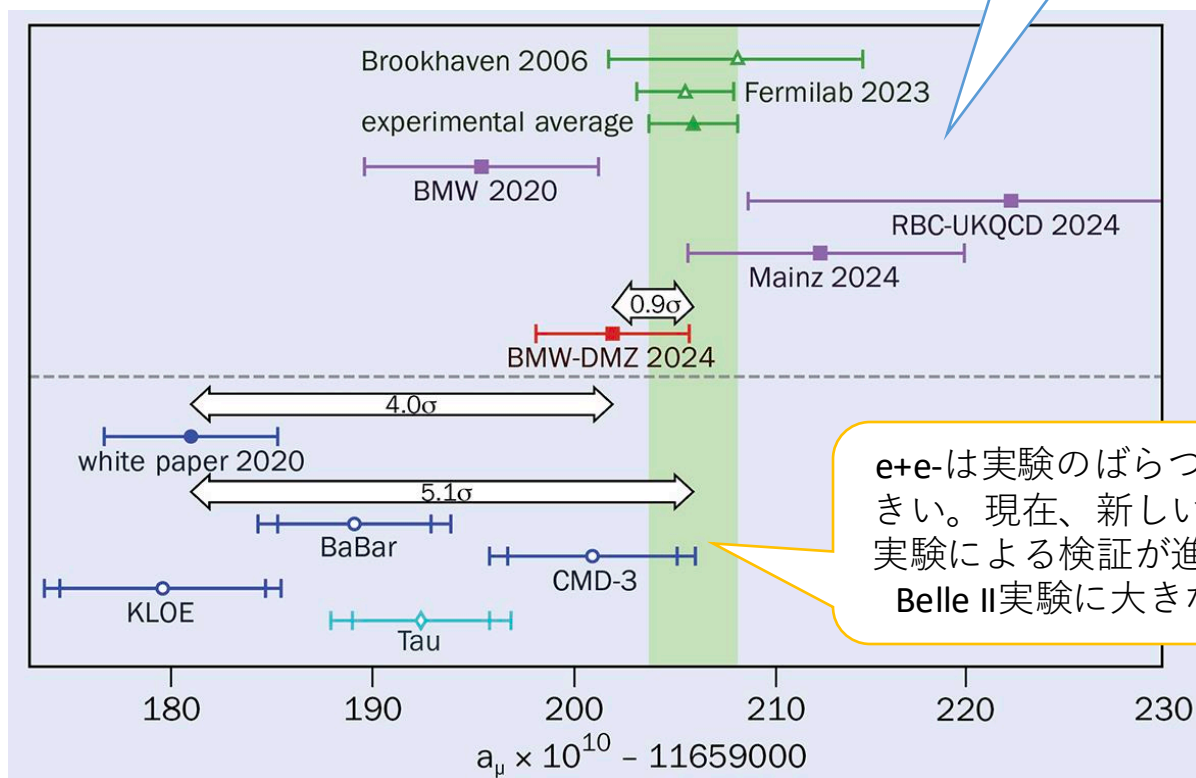
With a new measurement imminent, the *Courier* explores the experimental results and theoretical calculations used to predict ‘muon g-2’ – one of particle physics’ most precisely known quantities and the subject of a fast-evolving anomaly.



Vacuum fluctuation The fine details of “hadronic vacuum polarisation” could be the difference between reinforcing the SM and challenging it. Credit: D Zemba, Pennsylvania State University

5月中旬頃にFNAL実験の最終結果の発表（精度が2倍改善？）

Lattice QCDはe+e-と同程度の精度を達成か？
e+e-の精度を超える結果に期待



e+e-は実験のばらつきが大きい。現在、新しい解析・実験による検証が進行中。
Belle II実験に大きな期待

International workshop on muon $g-2$ theory at KEK

The seventh plenary workshop at KEK (Sep 9-13, 2024) <https://conference-indico.kek.jp/event/257/>

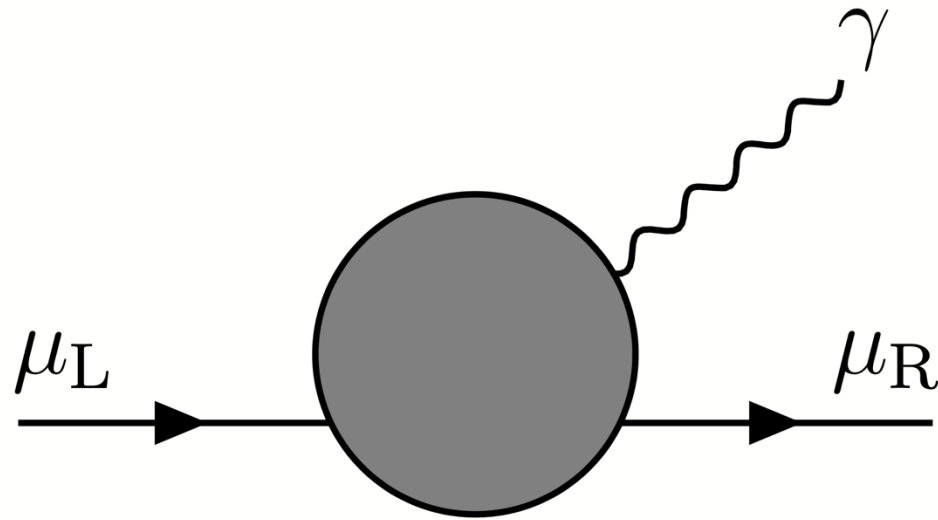


Proposal for Whitepaper-II

(adopted from slide by Aida El-Khadra)

- Important to convey the message that data-based evaluation is important besides LatticeQCD
- Communicate clearly that Whitepaper-I value should not be used in future
- Spread of experimental results makes an averaging procedure difficult
- Range of results also difficult to communicate

理論ホワイトペーパー 2 準備中
2025年4月末～5月初めにリリース予定



$$a_{\mu}^{\text{NP}} \sim \frac{m_{\mu}^2}{16\pi^2} \frac{g_{\text{NP}}^2}{M_{\text{NP}}^2}$$

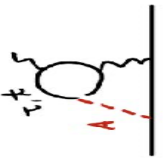
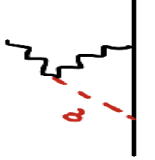
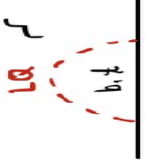
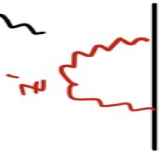
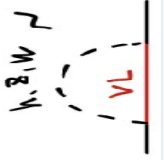
$$M_{\text{NP}} \sim g_{\text{NP}} \times 150 \text{ GeV}$$

- 大きな結合定数をもつ TeV スケールの新物理
- $\mathcal{O}(1)$ の結合定数をもつ電弱スケールの新物理
- 小さな結合定数をもつ GeV スケール以下の新物理

北原鉄平さんによるまとめ

[Refs: Athron et al, 2104.03691; Buen-Abad et al, 2110.04454; Krijaic et al, 1902.07715; Dermisek et al, 2103.05644]

physics interpretations

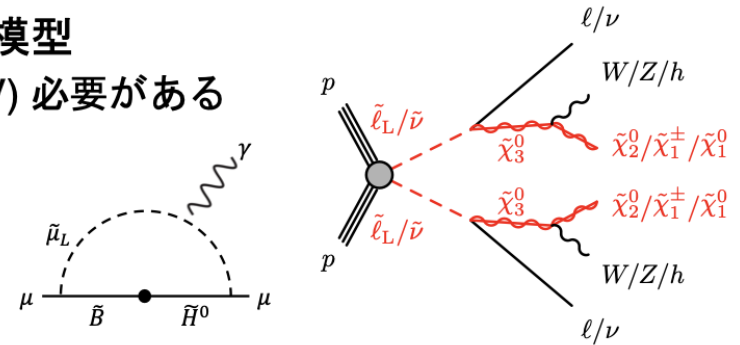
P type	diagrams	mass range	probe
dark matter		200~500 GeV	$\tilde{\chi}_2^{0,\pm} \rightarrow (h\tilde{\chi}_1^0)(W^{\pm}\tilde{\chi}_1^0)$ $pp \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \ell\ell^*$
extensions		20~100 GeV, 150~250 GeV	$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ $h \rightarrow AA$
photon-like particle		40 MeV~6 GeV	$e^+e^- \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma\gamma$
stop squark		1.5~2 TeV	$pp \rightarrow LQ\bar{L}Q$
(1) μ - τ		10~200 MeV	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-Z'$ $K^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}Z'$
photon-like lepton		< 7 TeV	$h, Z \rightarrow \mu^+\mu^-$

elementで探る新物理
KEK 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

Models predict new particle(s) in the mass range below O(10 TeV)

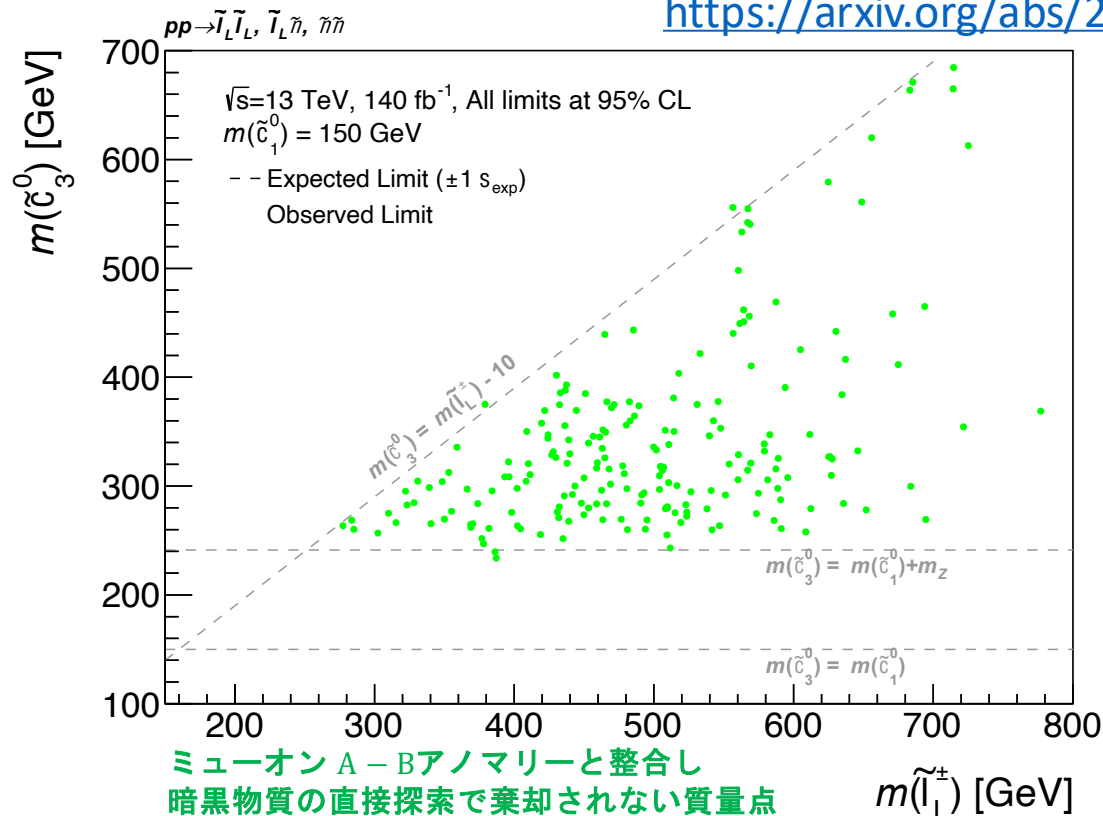
詳しい解説は [→http://www.jahep.org/hepnews/2021/40-2-2-g2.pdf](http://www.jahep.org/hepnews/2021/40-2-2-g2.pdf)

- ミューオン $g-2$ アノマリーを説明する超対称性模型
 - Loop 内の3種類の超対称性粒子が全て軽い ($\lesssim 1$ TeV) 必要がある
 - 既存の解析でカバーされていない質量階層に着目
 - 左巻きスレプトン $\rightarrow$ ビーノ $\rightarrow$ ヒグシーノ



- LHC-ATLAS実験における探索

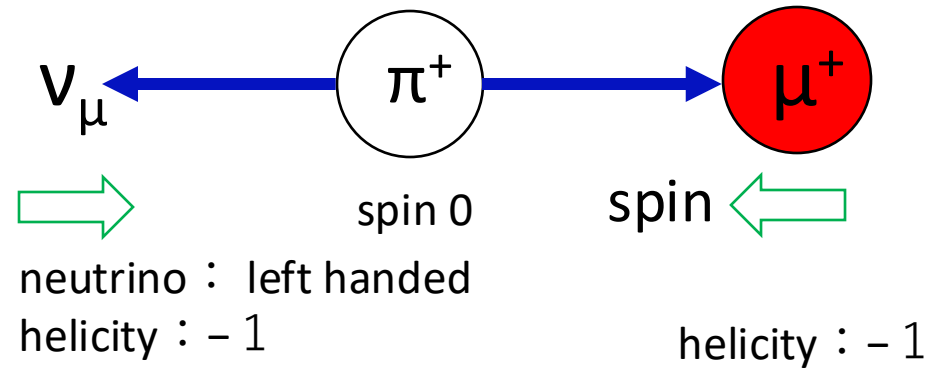
<https://arxiv.org/abs/2503.13135>



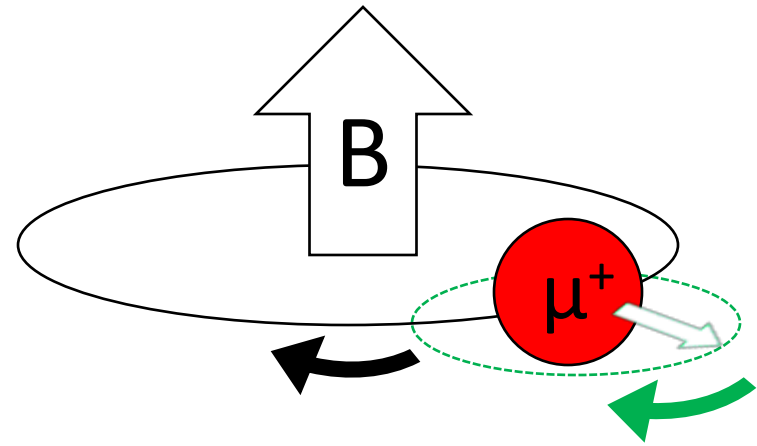
ミューオン $g-2$ の測定 3ステップ

31

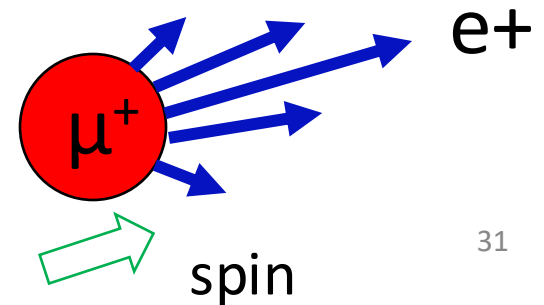
1. Prepare a polarized muon beam.



2. Store in a magnetic field (muon's spin precesses)



3. Measure decay positron



FNAL g-2 experiment



NHKコズミックフロント(2023年11月23日放映)

FNAL E989 experiment (2018- 2023)

2023年 データ収集完了
2025年 最終結果発表 (予定)

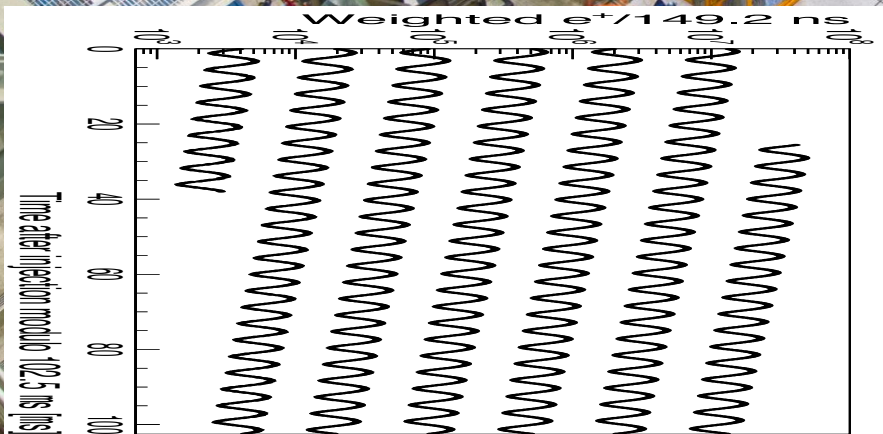
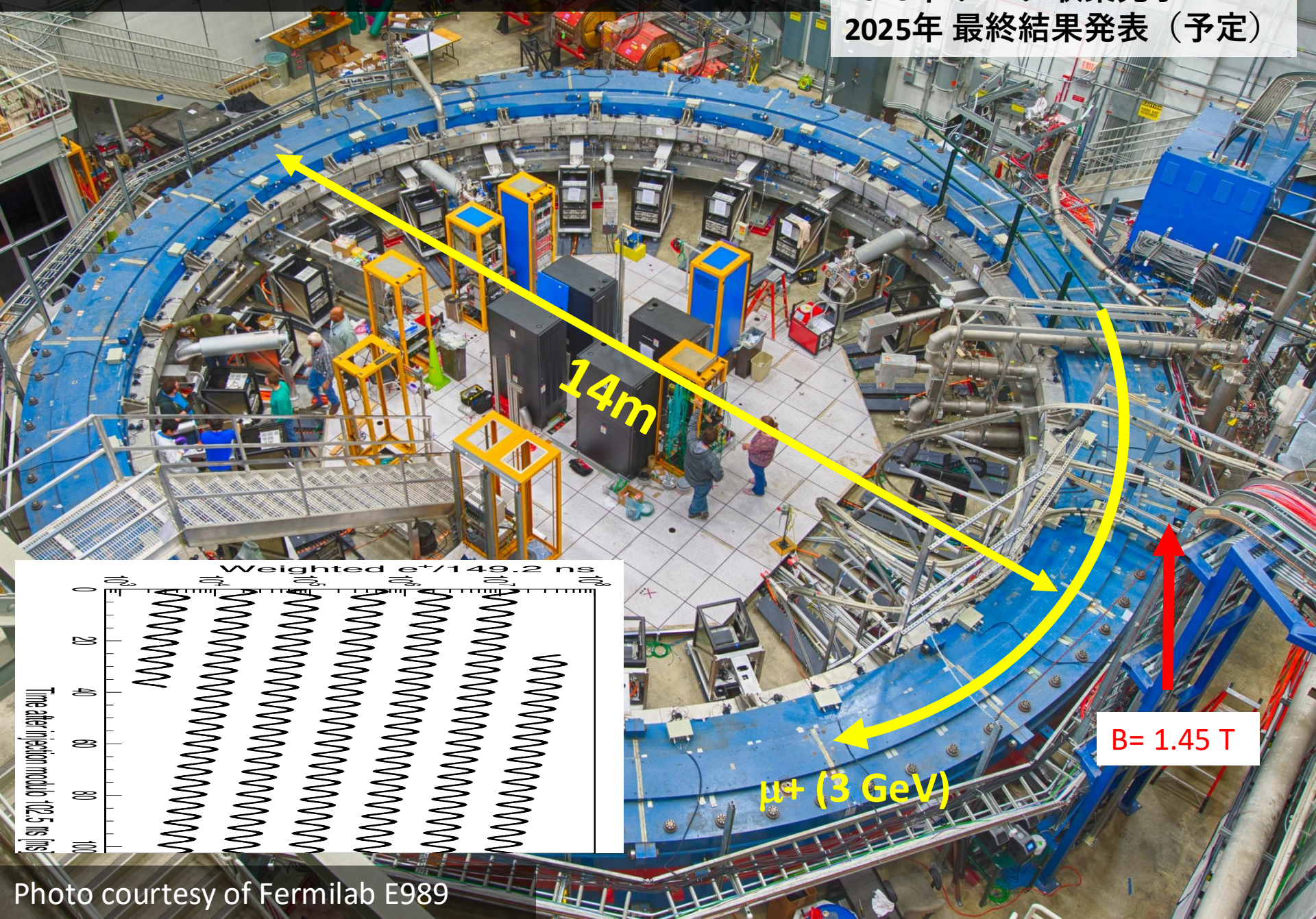


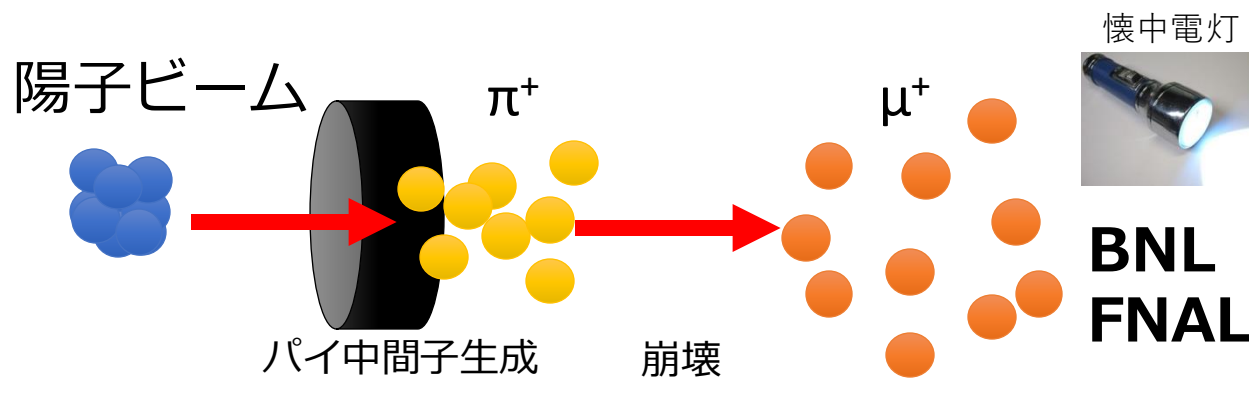
Photo courtesy of Fermilab E989

J-PARC g-2/EDM experiment

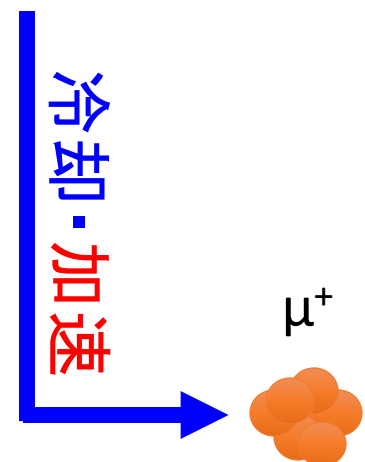
34

Science documentary “cosmic front”, NHK
November 23, 2023





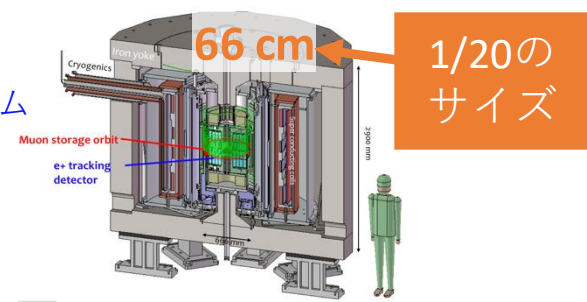
従来のミュオンビーム
~1kmで10m拡がる
系統誤差の主要因に。



新しいミュオンビーム
(独自技術)
~1kmで1cm拡がる

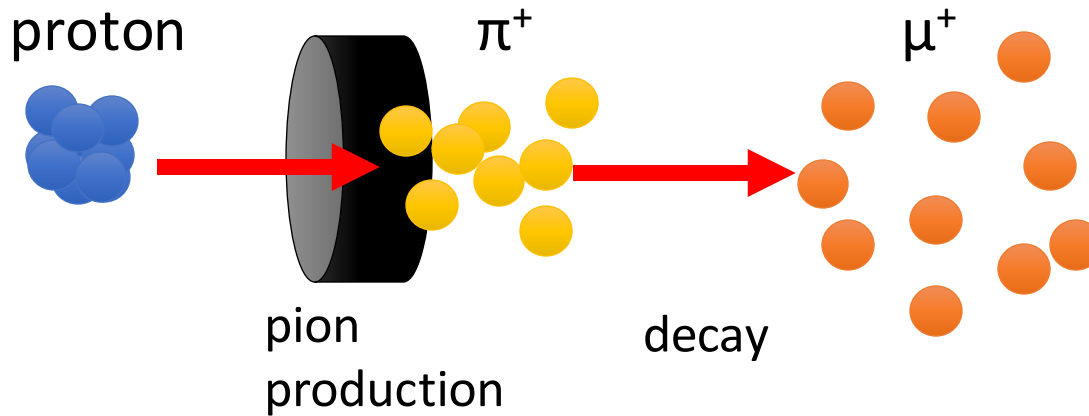
- 冷却・加速による新しいミュオンビームで
- コンパクトな蓄積磁石・検出器(1/20)
 - 微弱ビーム収束力で蓄積(1/1000)
 - 高いビーム入射効率(x10)
- が可能となる。

J-PARC
レーザーのようなビーム



Conventional muon beam

36



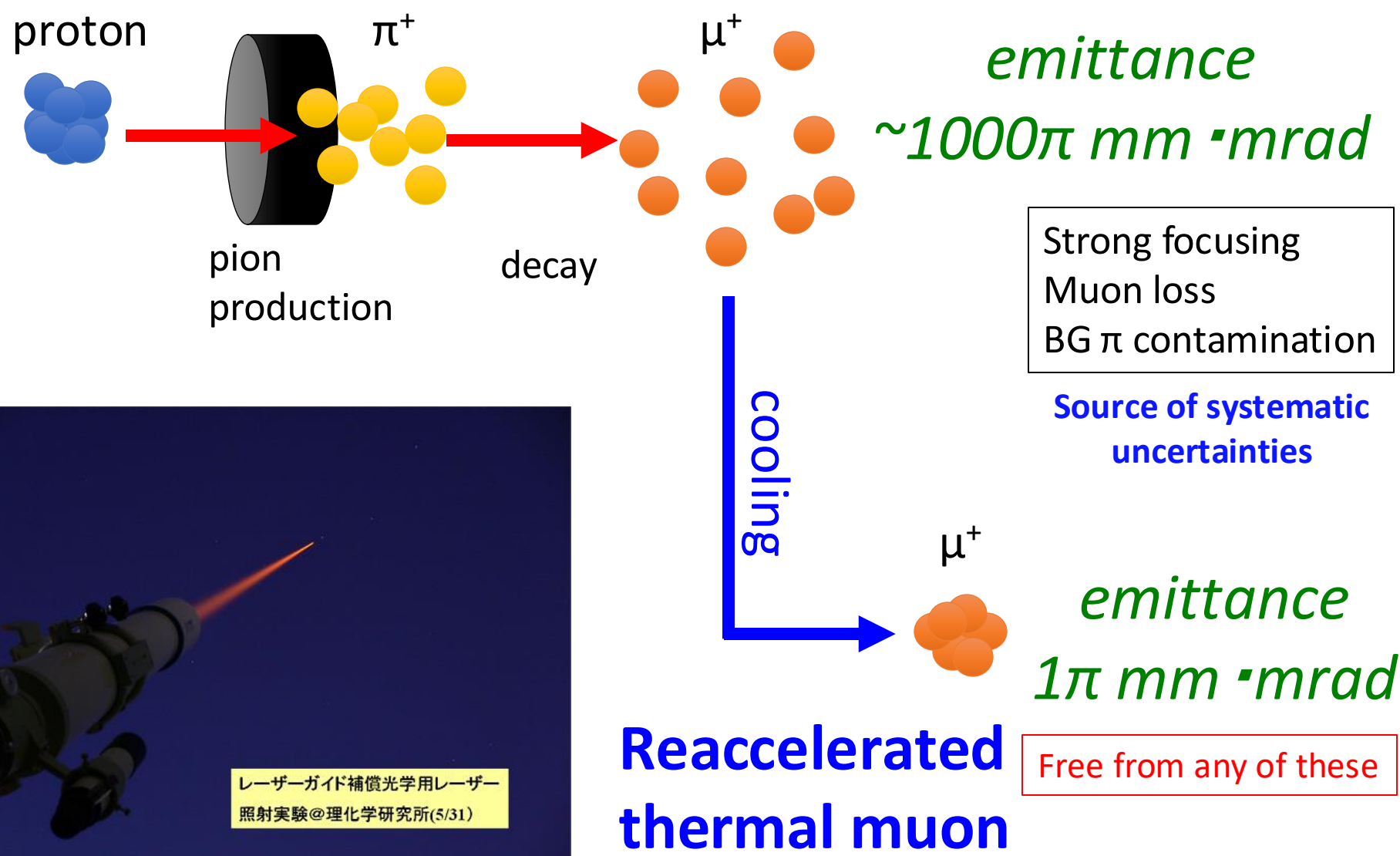
emittance
 $\sim 1000\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$

Strong focusing
Muon loss
BG π contamination

Source of systematic
uncertainties



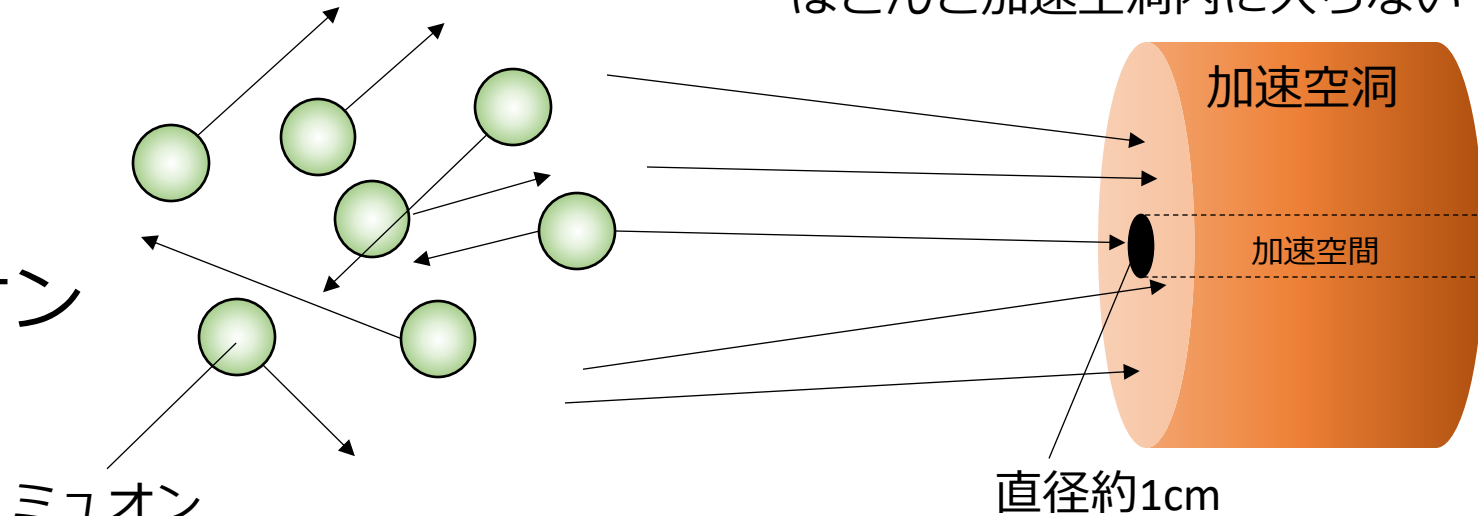
Muon beam at J-PARC



ミュオン冷却がなぜ必要？

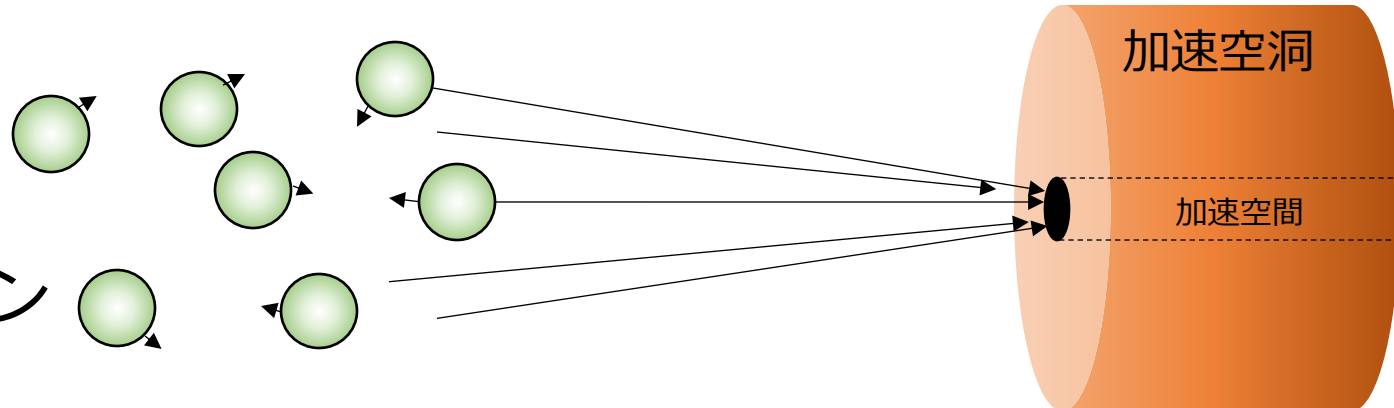
ビームサイズが小さくできない
ほとんど加速空洞内に入らない


熱いミュオン



スポットが小さく絞れる。
全て加速空洞へ入れられる


冷えたミュオン



「冷やす」 ことで「加速」可能なミュオンを実現

Re-accelerated thermal muon

39

surface muon

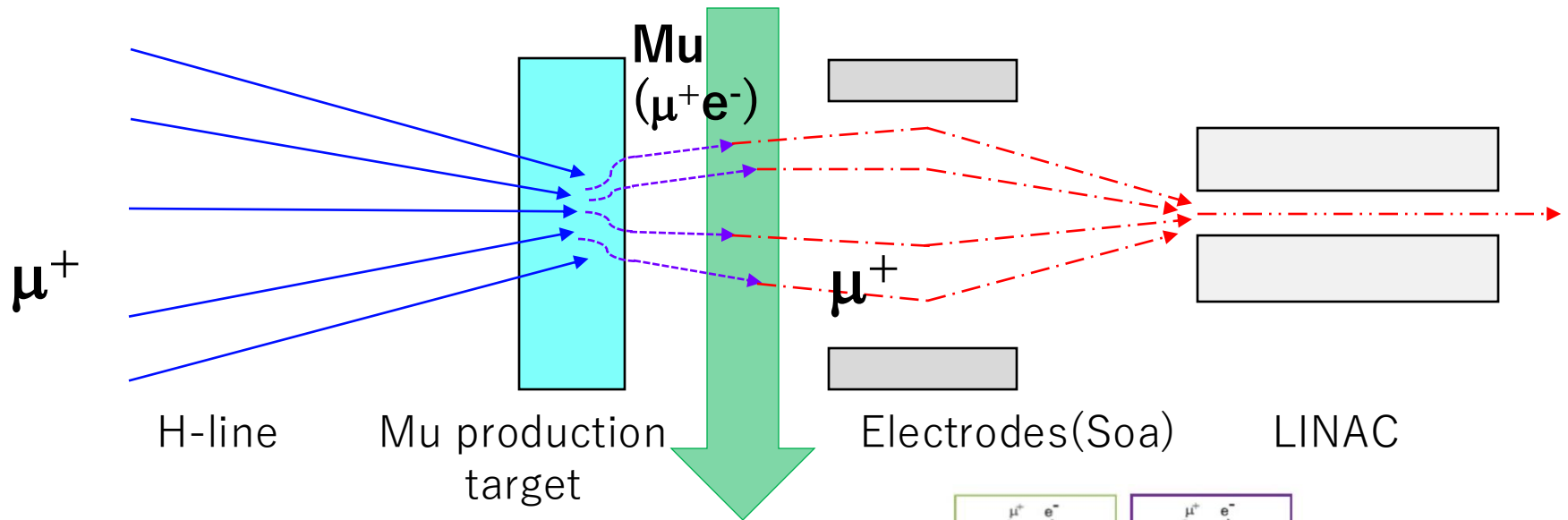
E	3.4 MeV
p	27 MeV/c
$\Delta p/p$	0.05

thermal muon

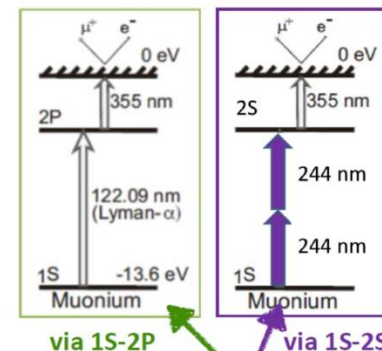
E	30 meV
p	2.3 keV/c
$\Delta p/p$	0.4

accelerated muon

E	212 MeV
p	300 MeV/c
$\Delta p/p$	4×10^{-4}



Muonium : a bound state of μ^+ and e^-



J-PARCの新しいミューオン $g-2$ /EDM実験

40

2009年 提案
 2015年 技術設計書完成
 2010-2018年 ミューオン冷却・加速実証
 2022年 **Hライン完成・初ビーム**
 2028年頃～ 実験開始（予定）

2021年度建設

ミューオンビーム

$\mu^+(4\text{ MeV})$

冷却

25 meV 4 MeV

分岐

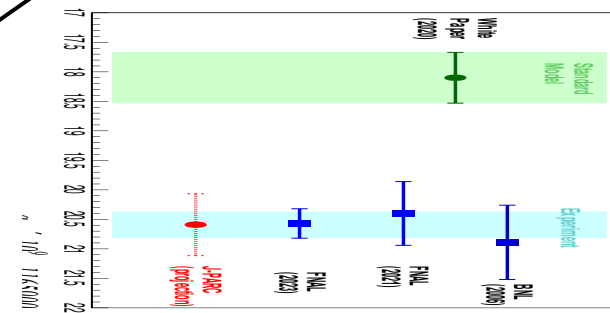
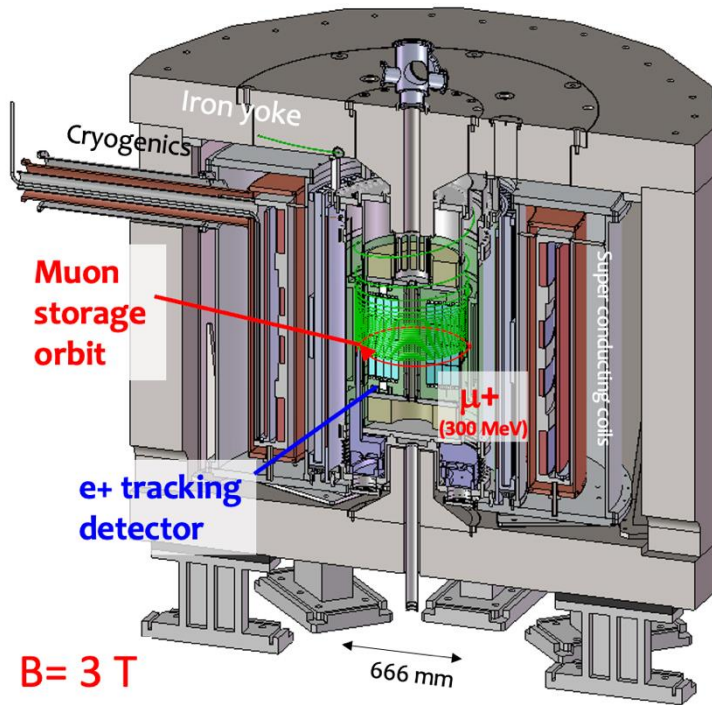
加速

ミューオン加速

210 MeV

3次元
らせん
入射

ミューオン
蓄積・測定



ミューオンを**冷却**・**加速**・**小さな磁石に蓄積**する新手法により $g-2$ とEDMを超精密測定

Comparison of g-2 experiments

Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 053C02 (2019)

	BNL-E821	Fermilab-E989	Our experiment
Muon momentum	3.09 GeV/c		300 MeV/c
Lorentz γ	29.3		3
Polarization	100%		50%
Storage field	$B = 1.45$ T		$B = 3.0$ T
Focusing field	Electric quadrupole		Very weak magnetic
Cyclotron period	149 ns		7.4 ns
Spin precession period	4.37 μ s		2.11 μ s
Number of detected e^+	5.0×10^9	1.6×10^{11}	5.7×10^{11}
Number of detected e^-	3.6×10^9	—	—
a_μ precision (stat.)	460 ppb	100 ppb	450 ppb
(syst.)	280 ppb	100 ppb	<70 ppb
EDM precision (stat.)	$0.2 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$	—	$1.5 \times 10^{-21} e \cdot \text{cm}$
(syst.)	$0.9 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm}$	—	$0.36 \times 10^{-21} e \cdot \text{cm}$
	Completed	Running	In preparation

The collaboration

42



Seonho Choi
(SNU)



NEW Collaboration chair

Tamaki Yoshioka (Kyushu)

Collaboration board (CB)

Chair: Seonho Choi

Executive board (EB)

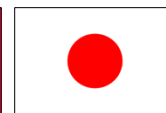
Spokesperson: T. Mibe

NEW

2024.3 上海交通大学が加入

2024.6 岩手大学が加入

114 members from Canada, China, Czech, France,
India, Japan, Korea, Netherlands, Russia, USA



Subgroups

Interface coordinators

Committees



Surface muon beam

leader: T. Yamazaki, N. Kawamura



Speakers committee

chair: K. Ishida, **Y. Sato**

Publication committee

chair: B. Shwartz



Ultra-slow muon

leader: K. Ishida

K. Ishida

M. Otani

LINAC

leader: M. Otani

Y. Kondo

Injection and storage

leader: H. Iinuma

H. Iinuma

Storage magnet, field measurements

leader: K. Sasaki

T. Kume

Detector

leader: T. Yoshioka

Y. Sato

DAQ and computing

leader: Y. Sato

T. Suehara

T. Yamanaka

Analysis

leader: T. Yamanaka

Working groups

physics analysis

T. Yamanaka, S. Ogawa

Domestic institutes :

Kyushu, Nagoya, Tohoku, Niigata,
Toyama C, Tokyo, Ibaraki, RIKEN, JAEA,
etc.

KEK: IPNS, IMSS, ACC, CRY, MEC, CRC



The 28th collaboration meeting at Niigata University, Dec. 13-15, 2023

大強度陽子加速器 施設 J-PARC



リニアック
(0.4 GeV)

RCS
(3 GeVシンクロトロン)

ニュートリノ
実験施設

スーパー
カミオカンデへ

g-2/EDM実験

物質・生命科学実験施設

MR
(30 GeV主リング)

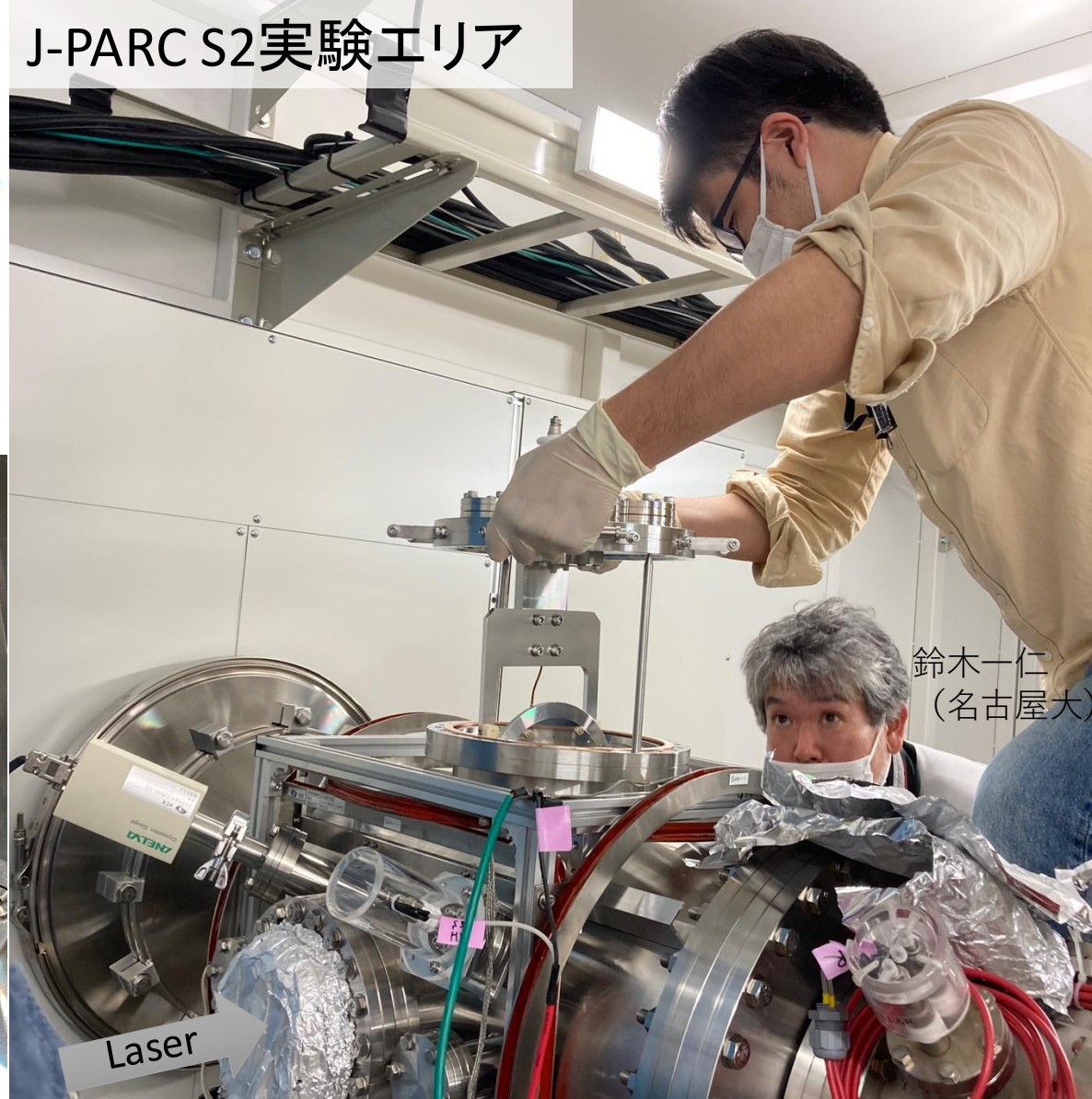
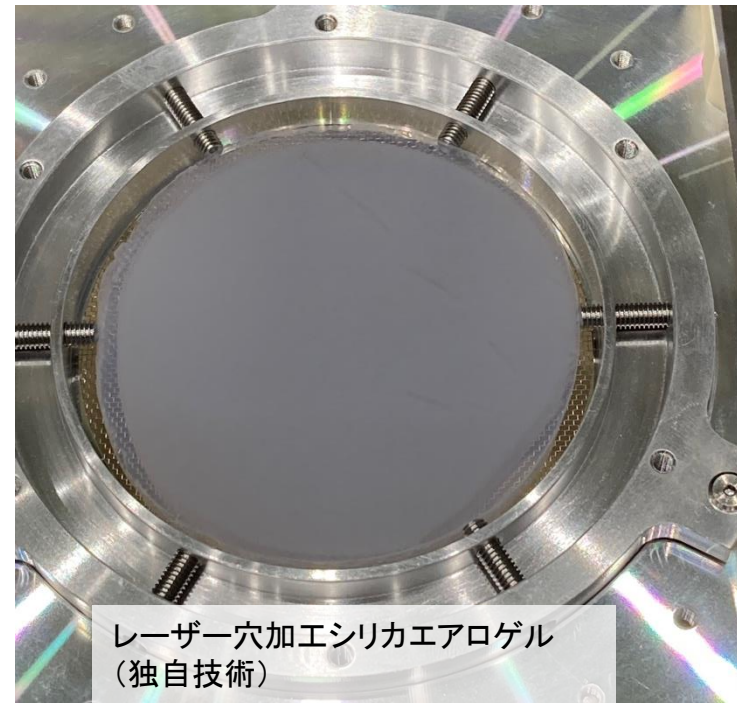
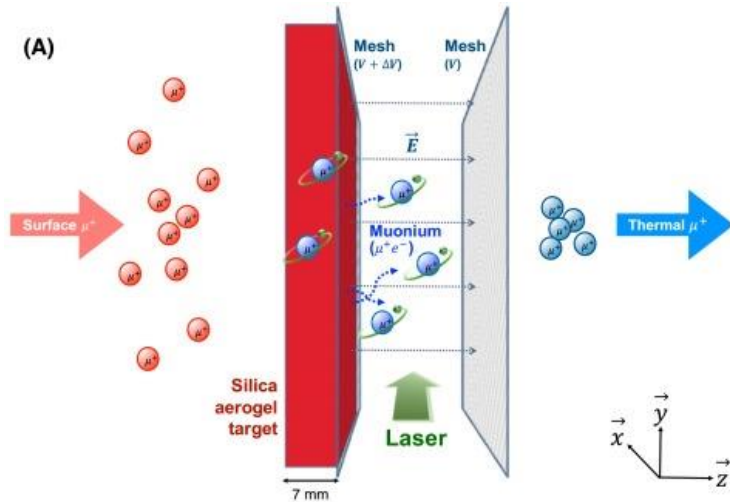
ハドロン
実験施設

ビームパワー	1MW
繰り返し	25 Hz

ミュオン冷却試験(2023年2月～開始!)

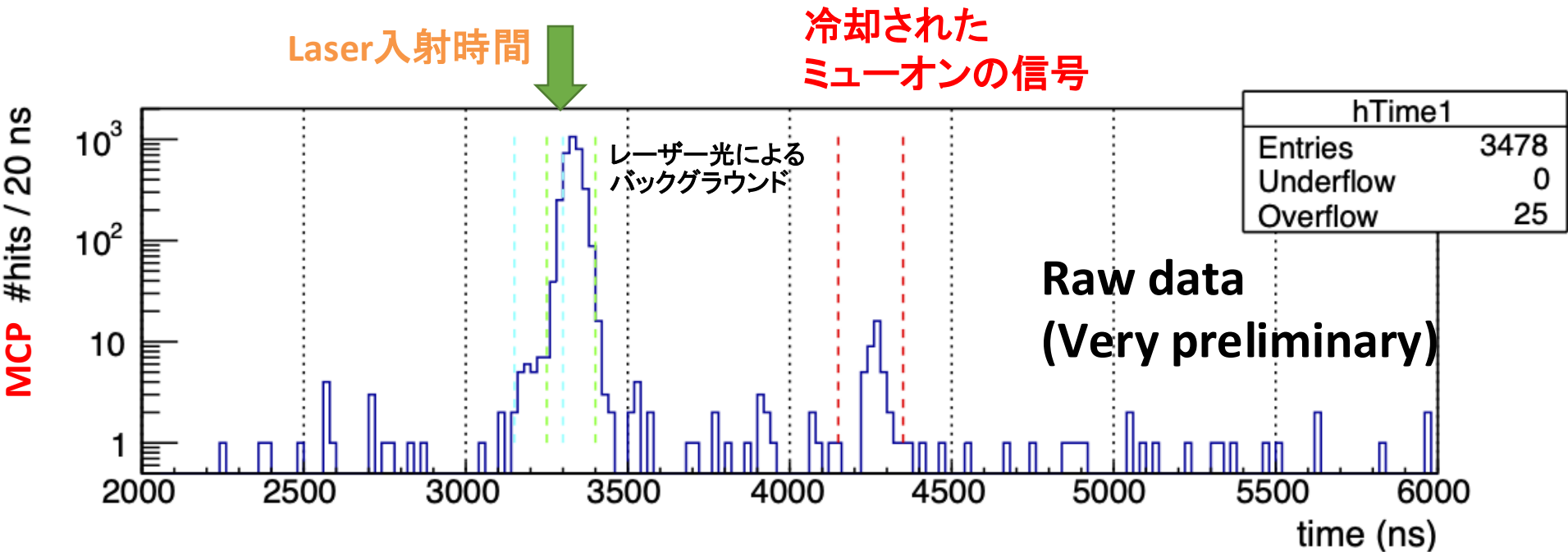
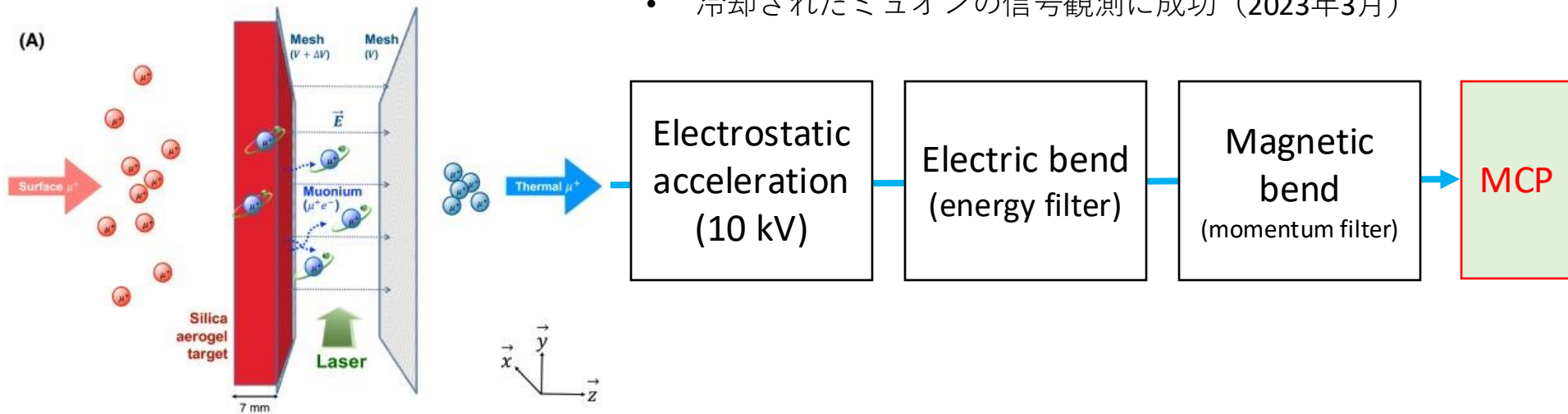
岡山大学・名古屋大学・九州大学・茨城大学・新潟大学と協力

J-PARC S2実験エリア

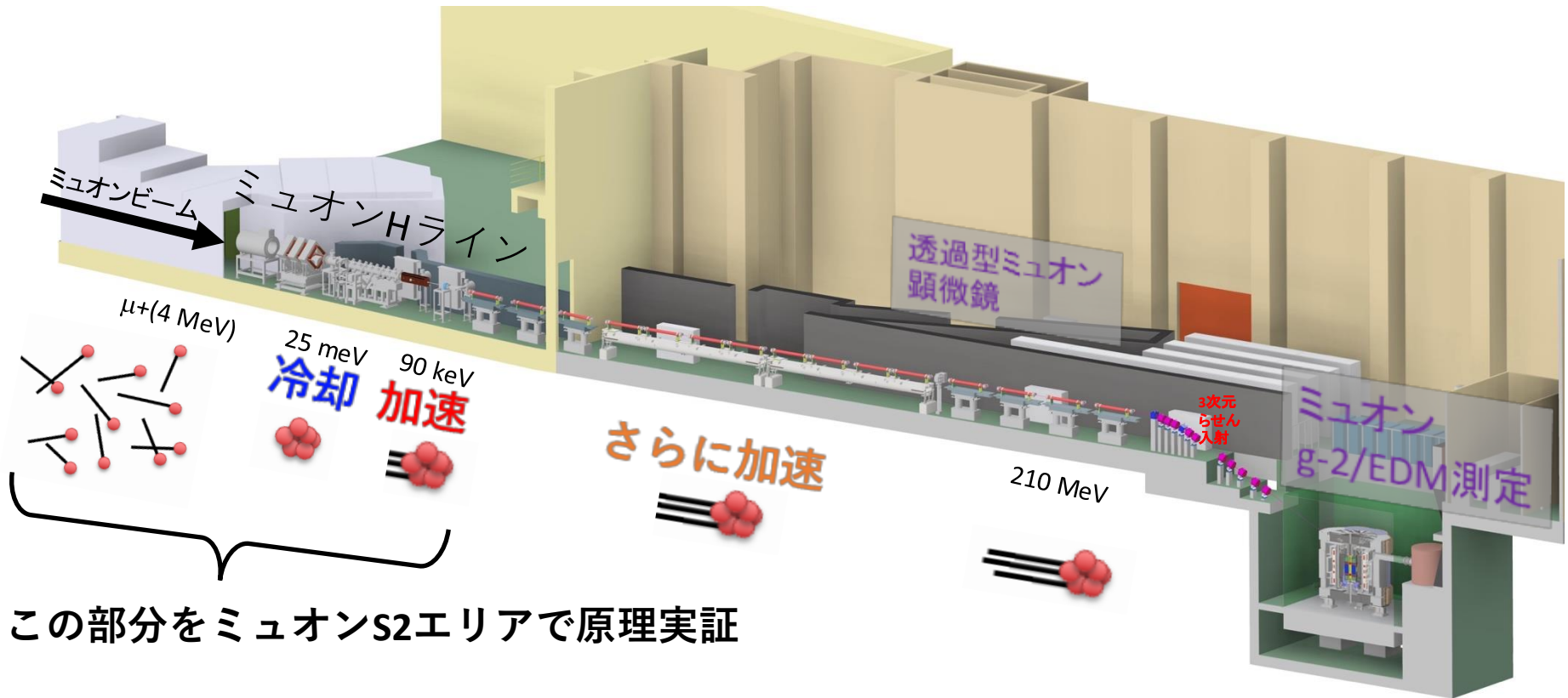


ミュオン冷却試験(2023年2月～開始)

- 冷却ミュオン源の実証試験の開始 (2023年2月～)
- 冷却されたミュオンの信号観測に成功 (2023年3月)

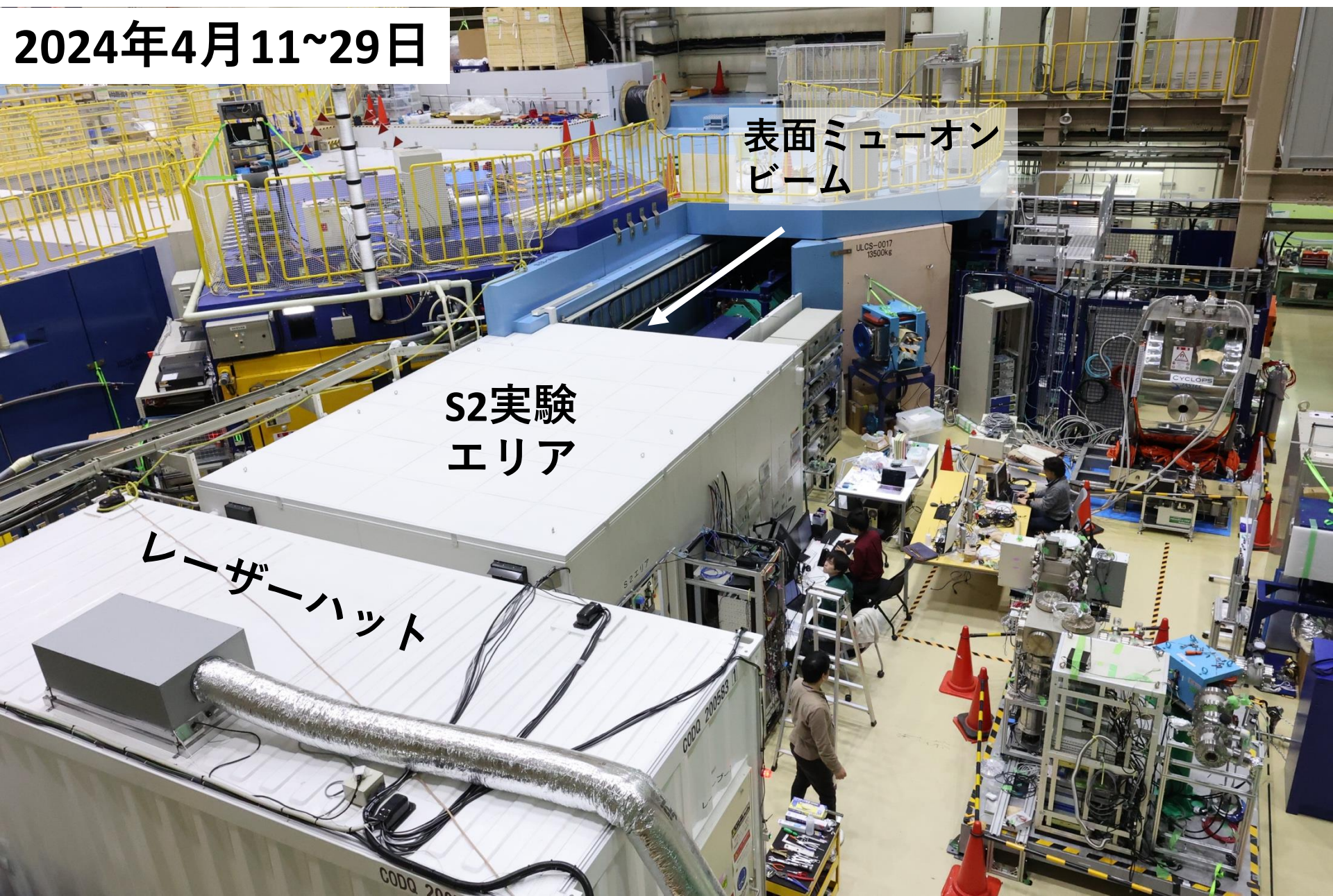


冷却ミュオンの加速試験



冷却ミュオンの加速試験

2024年4月11~29日



表面ミュオン
ビーム

S2実験
エリア

レーザーハット

冷却ミュオンの加速試験

診断系

(Q磁石x2、偏向磁石、MCP)

RFQ (90 keV $\leftarrow$ 5.7 keV)

デフレクター(x,y,x',y'調整)

取り出し電場(5.7 keV $\leftarrow$ 30 meV)

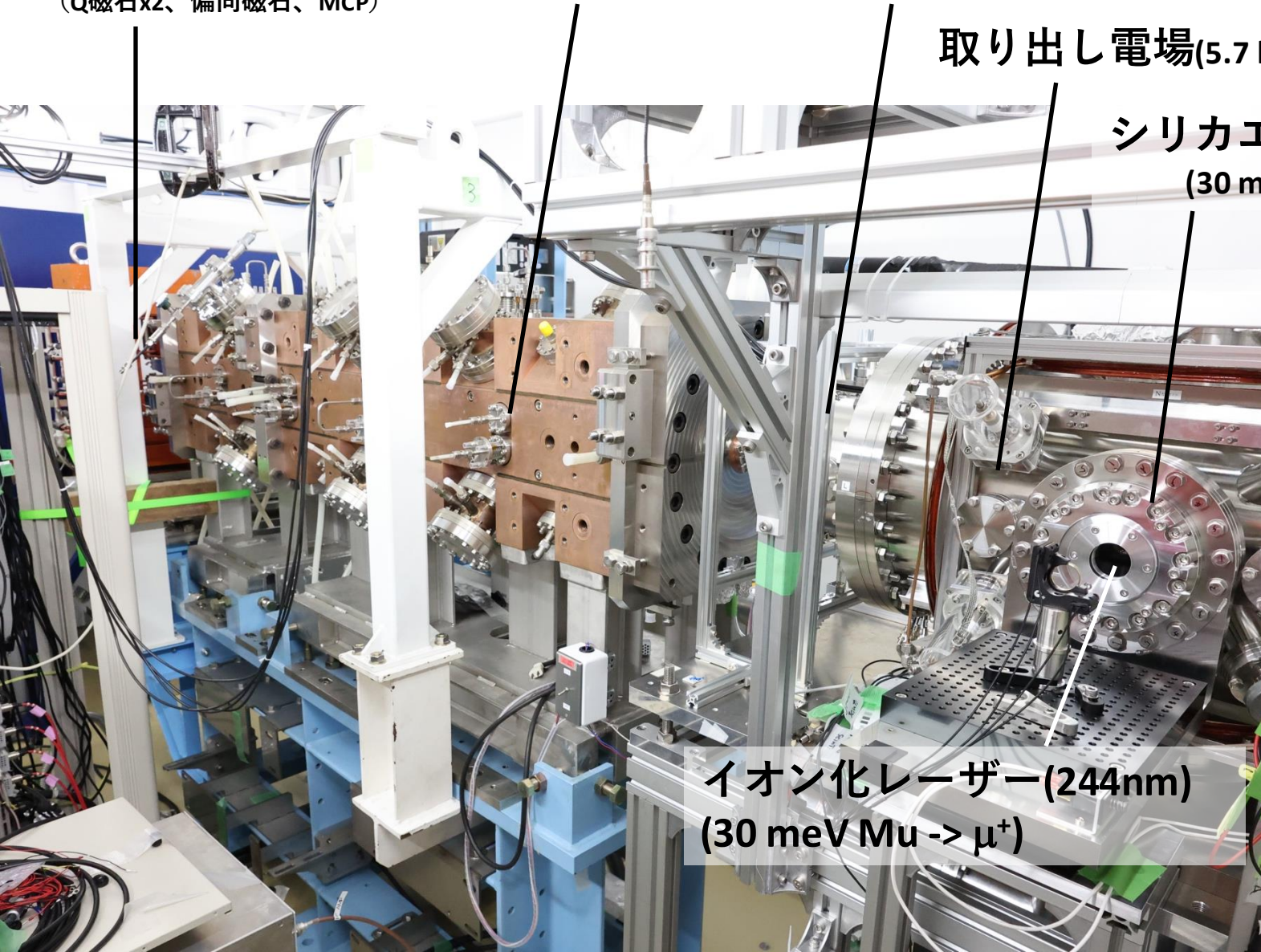
シリカエアロゲル

(30 meV Mu $\leftarrow$ 4 MeV)

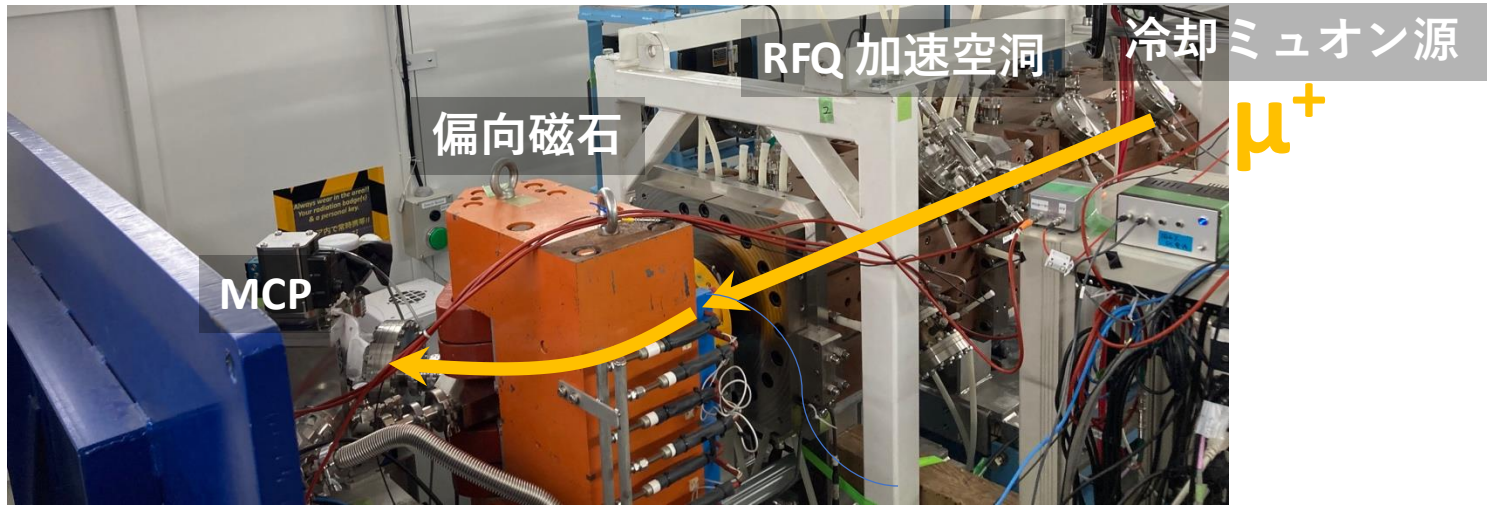
表面
ミュオン
ビーム

4 MeV

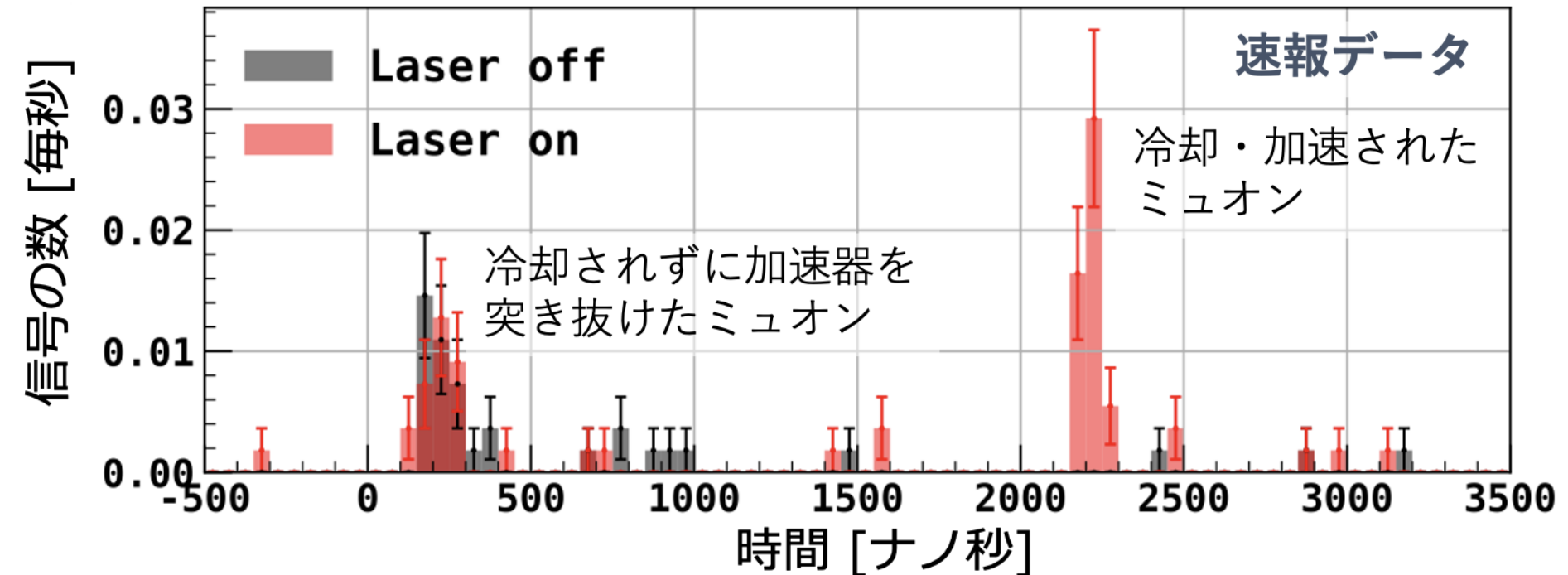
イオン化レーザー(244nm)
(30 meV Mu $\rightarrow$ μ^+)



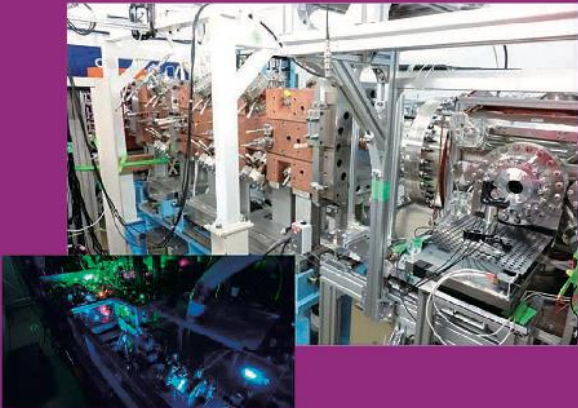
冷却ミュオンの加速試験



J-PARC MLF 2024A



高エネルギーニュース HIGH ENERGY NEWS



Volume 43 Number 3,4 October/November/December 2024
January/February/March 2025

■ 研究紹介

世界初の冷却ミュオンの高周波加速 J-PARC ミュオン $g-2$ /EDM 実験にむけて

KEK 素粒子原子核研究所 岡山大学 異分野基礎科学研究所 KEC 物質構造科学研究所
上岡 修星 今井 康貴 山崎 高幸
kamioka@post.kek.jp imai1117@s.okayama-u.ac.jp takayuki@post.kek.jp

2024 年 (令和 6 年) 11 月 1 日

1 はじめに

我々のグループは J-PARC において正ミュオンの異常磁気能率 ($g-2$) 測定と電気双極子能率 (EDM) 探索実験 [1] にむけた開発を進めている。本実験の重要な技術要素の一つに正ミュオンの冷却とその再加速による高品質ミュオンビーム生成がある。実証に向けた開発が長年にわたって行われてきたが、今年ついに世界初の冷却ミュオンの高周波加速に成功した [2]。
本稿では 2024 年 3 月から 4 月にかけて行ったミュオンの冷却と再加速実験の結果と J-PARC ミュオン $g-2$ /EDM 実験にむけた新実験エリア、拡張建屋の準備状況について報告する。

2 J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験と ミュオン加速

2.1 J-PARC $g-2$ /EDM 実験

$g-2$ は g 因子の量子補正による 2 からのずれである。そしてミュオン¹の $g-2$ は標準模型による計算結果 [3] とフェルミ国立加速器研究所のグループらの測定結果 [4, 5] の間に 5σ の乖離が報告されている。これは新物理の寄与の可能性として長年に渡って注目されている。その一方でミュオン $g-2$ へのハドロン真空偏極の寄与について、格子 QCD を用いた計算結果 [6] と分散関係を用いた従来の計算結果が一致しない。さらに、分散関係を用いた計算に必要な $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ の断面積測定も従来の結果と有意に異なる結果が報告されており [7] 複雑な状況を呈している。そのなかで我々はミュオン $g-2$ の測定結果を直接検証できる唯一のグループである。 $g-2$ の物理の詳細については過去の高エネルギーニュースの記事 [8] も参考にいただきたい。

ミュオン EDM は第 2 世代のレプトンセクターの CP 対称性の破れを探索する実験である。 $g-2$ と EDM は同じ演算子の実部と虚部であるためミュオン $g-2$ のアノマリーが正しいならば、 10^{-22} e-cm 程度の大きなミュオン EDM が自然に期待できる [9]。ミュオンの EDM については過去の高エネルギーニュースの記事 [10] も詳しい。

ミュオン $g-2$ 測定も EDM 探索も一様な磁場中に蓄積したミュオンビームのスピン歳差運動周期の測定である。従来のミュオンビームは、陽子ビームを炭素標的に照射、生成されたパイ中間子からの崩壊ミュオンを電磁石で捕獲、輸送することで得られる。ほぼ 100% スピン偏極したビームが得られるが、3 次粒子ビームであるためビーム品質が悪く、ビーム品質の指標の規格化エミッタンスは典型的に 1000π mm-mrad とされる²。そのため、既存のミュオンビームを磁場中に安定して蓄積するには電気四重極を用いた強収束をする必要がある。しかし、光速に近い速度で運動するミュオンであるため電場もスピン歳差運動に寄与することから、このままではミュオン $g-2$ の精密測定が困難になる。現行の実験ではスピン歳差運動への電場の寄与がキャンセルされる特別な運動量³のミュオンビームを用いて測定を行っているが、打ち消しきれなかった電場の寄与は最も主要な補正項目の一つになっている。

そこで、そもそも電場を用いずにミュオンを蓄積しよう、というのが我々のアイデアである [1]。一様磁場に加えて弱収束磁場を用いることで粒子を安定に蓄積する。既存の手法の最大の補正要因がなくなるとともに、ミュオンの運動量も自由に選べるため実験設計の自由度も増える。しかし、ビーム品質の悪さが出発地点であるため、ビーム品質の向上、つまりミュオンビームの冷却が必要になる。

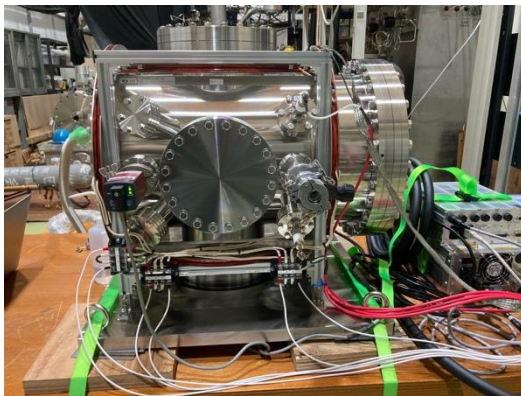
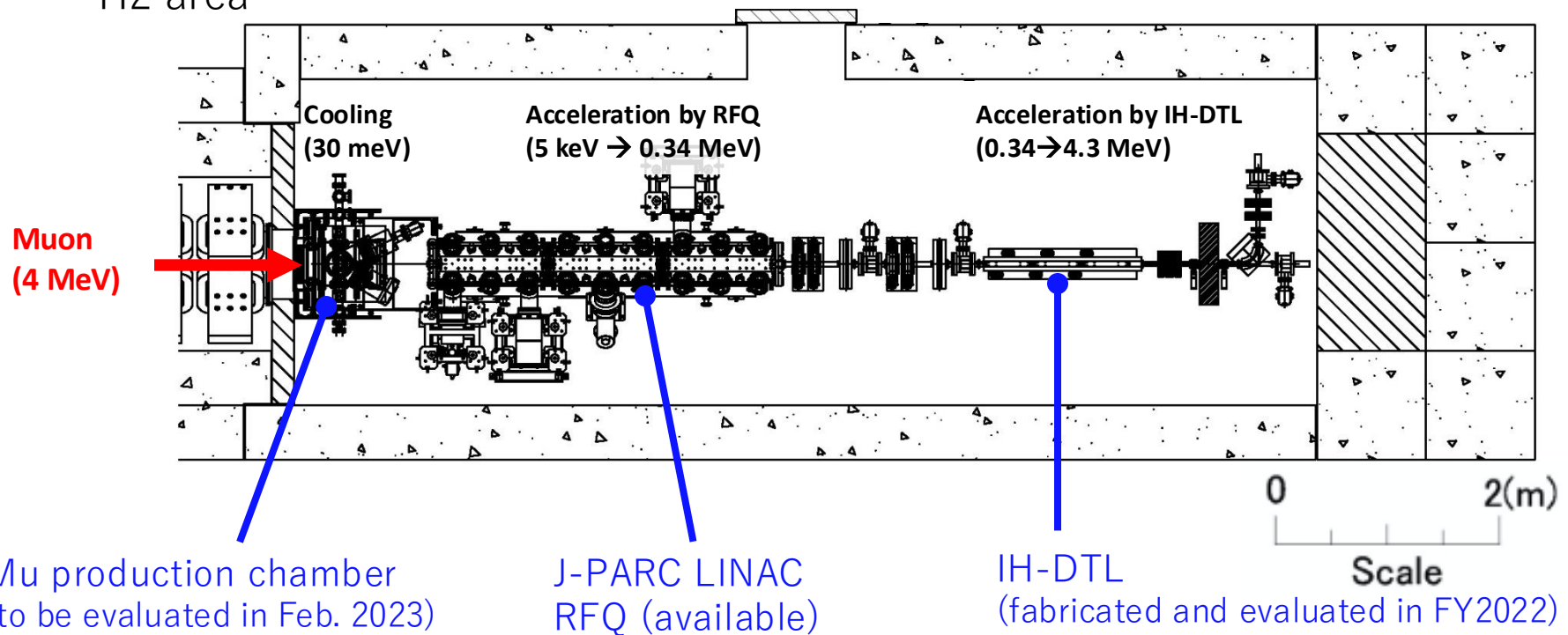
²以下、単にエミッタンスと言ったときは、規格化 rms エミッタンスのことを指す。
³具体的には $\gamma = 29.3$

¹以下、正ミュオンを単にミュオンと書く。

次のステップ：4 MeV までの加速@H2エリア

FY2025

H2 area



J-PARC MLF H2エリア

52

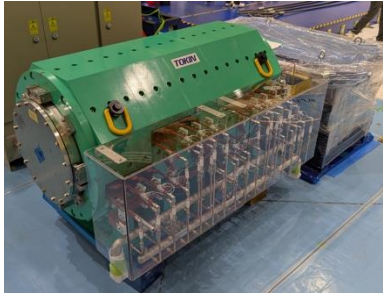
2025年4月7日 11:47頃

H2エリアにミュオンビームの取り出し成功

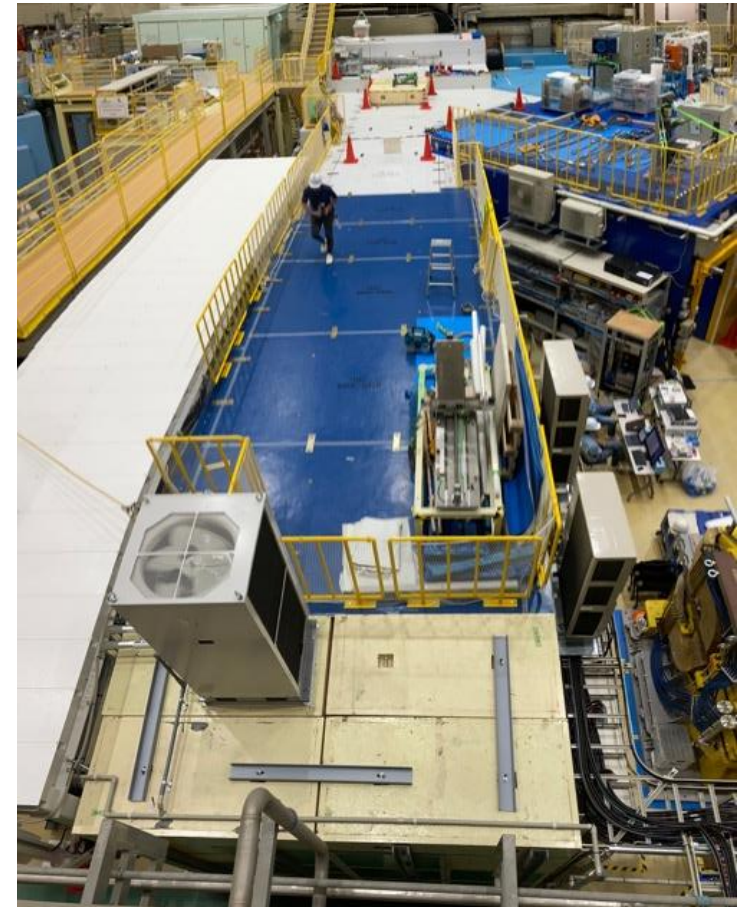
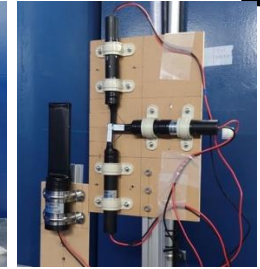
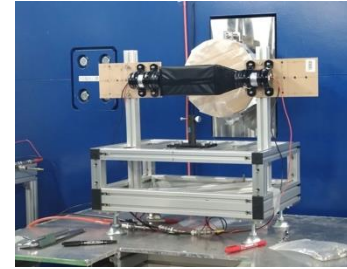
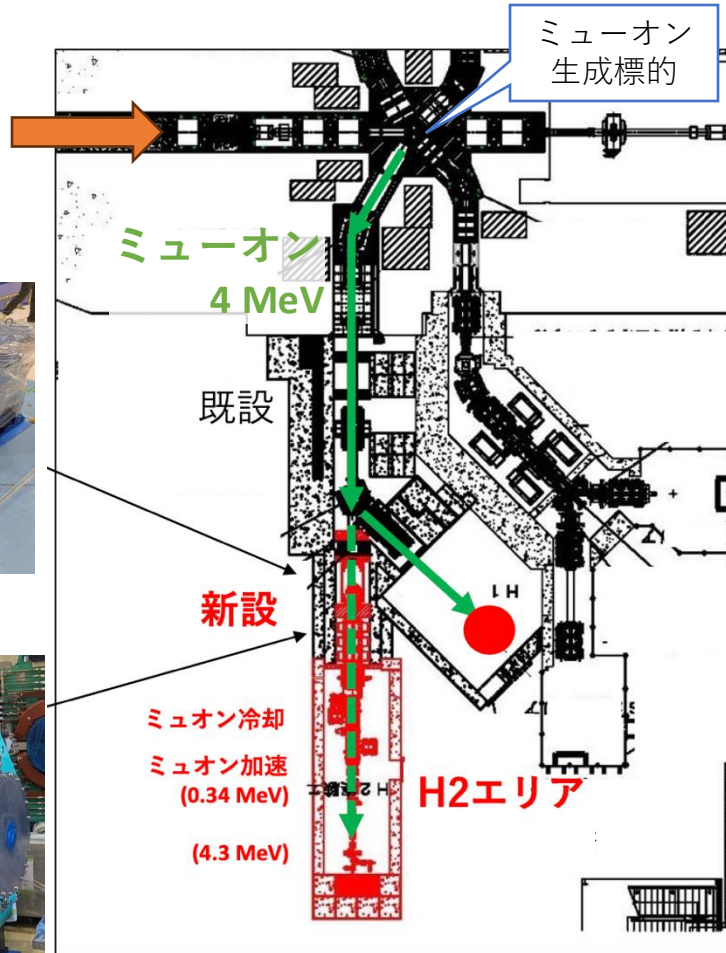
J-PARC 物質生命科学実験施設

3 GeV
陽子ビーム

ソレノイド磁石



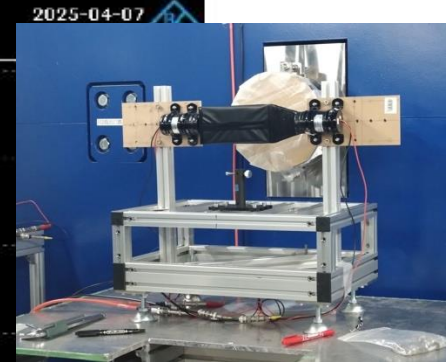
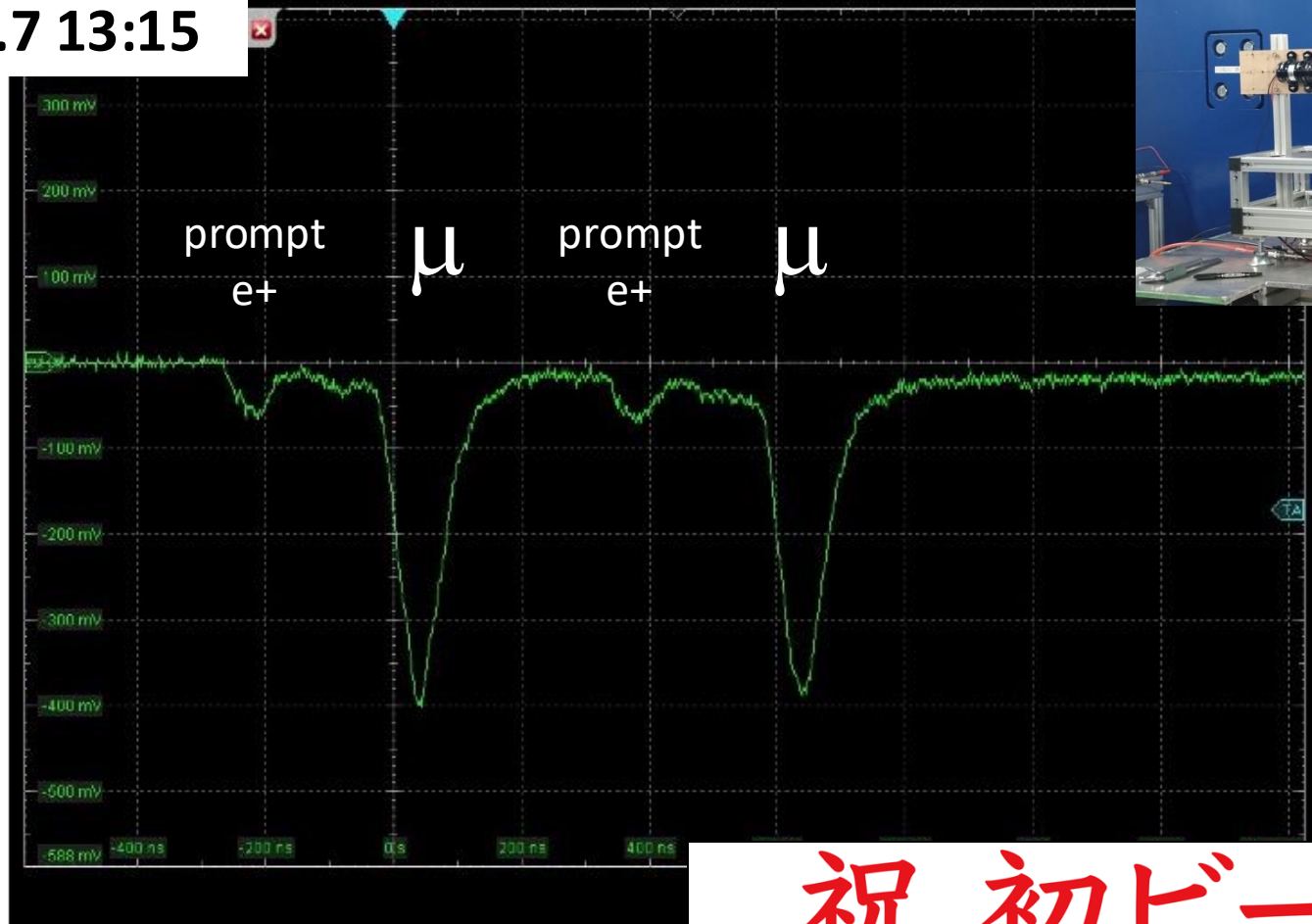
四極磁石



J-PARC MLF H2エリア

3

2025.4.7 13:15



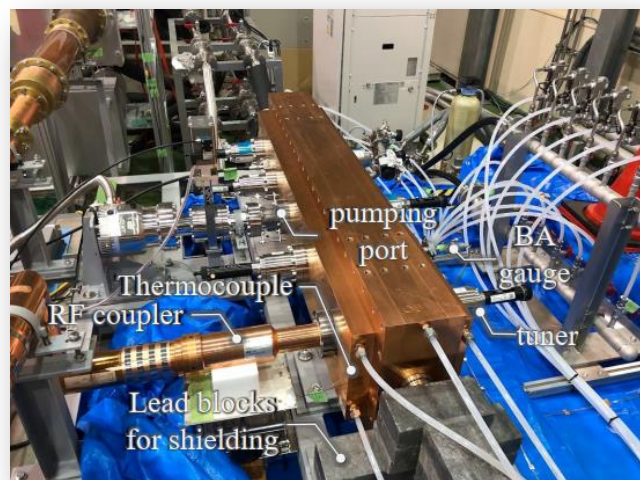
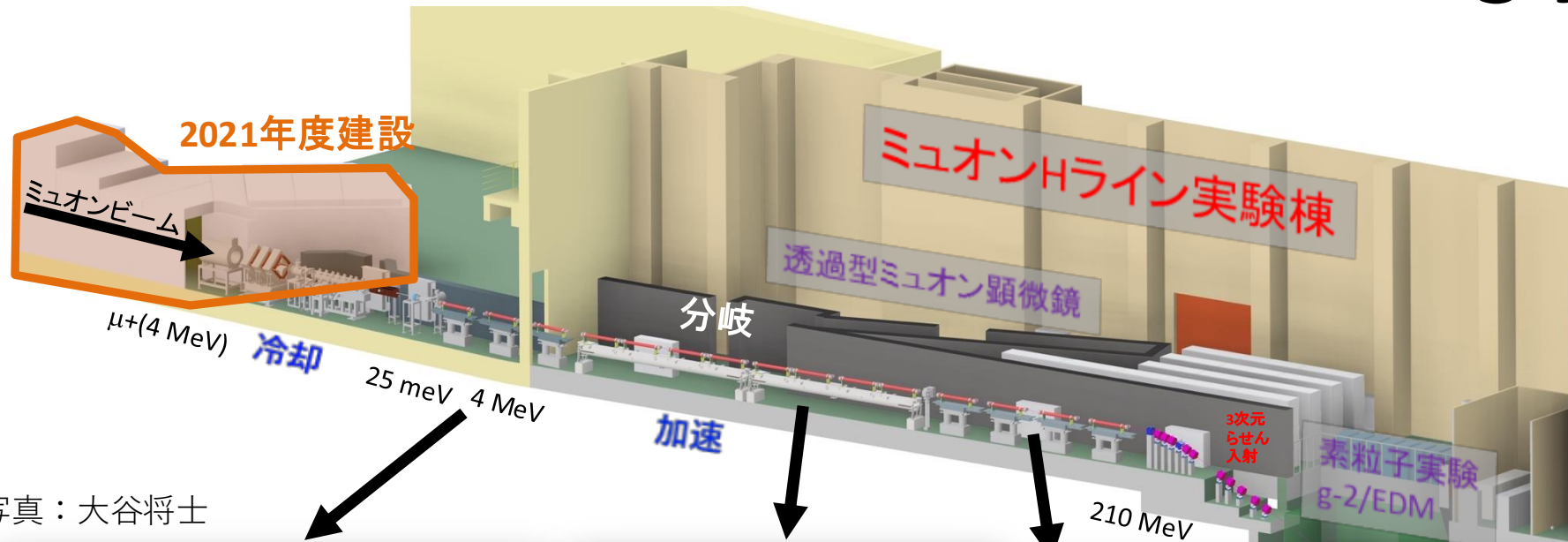
祝 初ビーム
ミュオンH2エリア



4月20日まで調整・データ取得予定

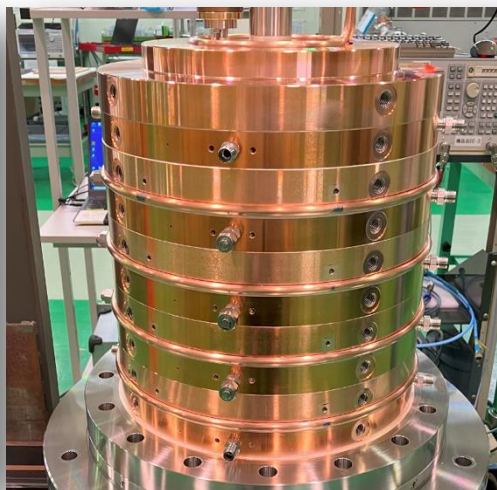
ミューオンLINACの開発状況

54



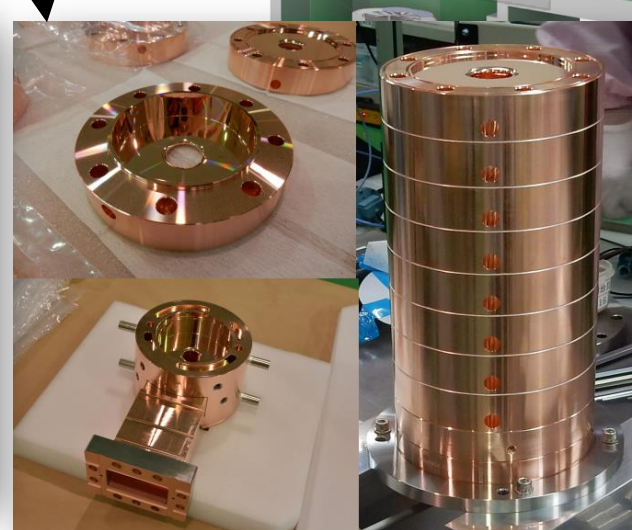
IH-DTL加速空洞
(4.3 MeVまでの加速)

準備完了



DAW加速空洞
(40 MeVまでの加速)

鋭意開発中

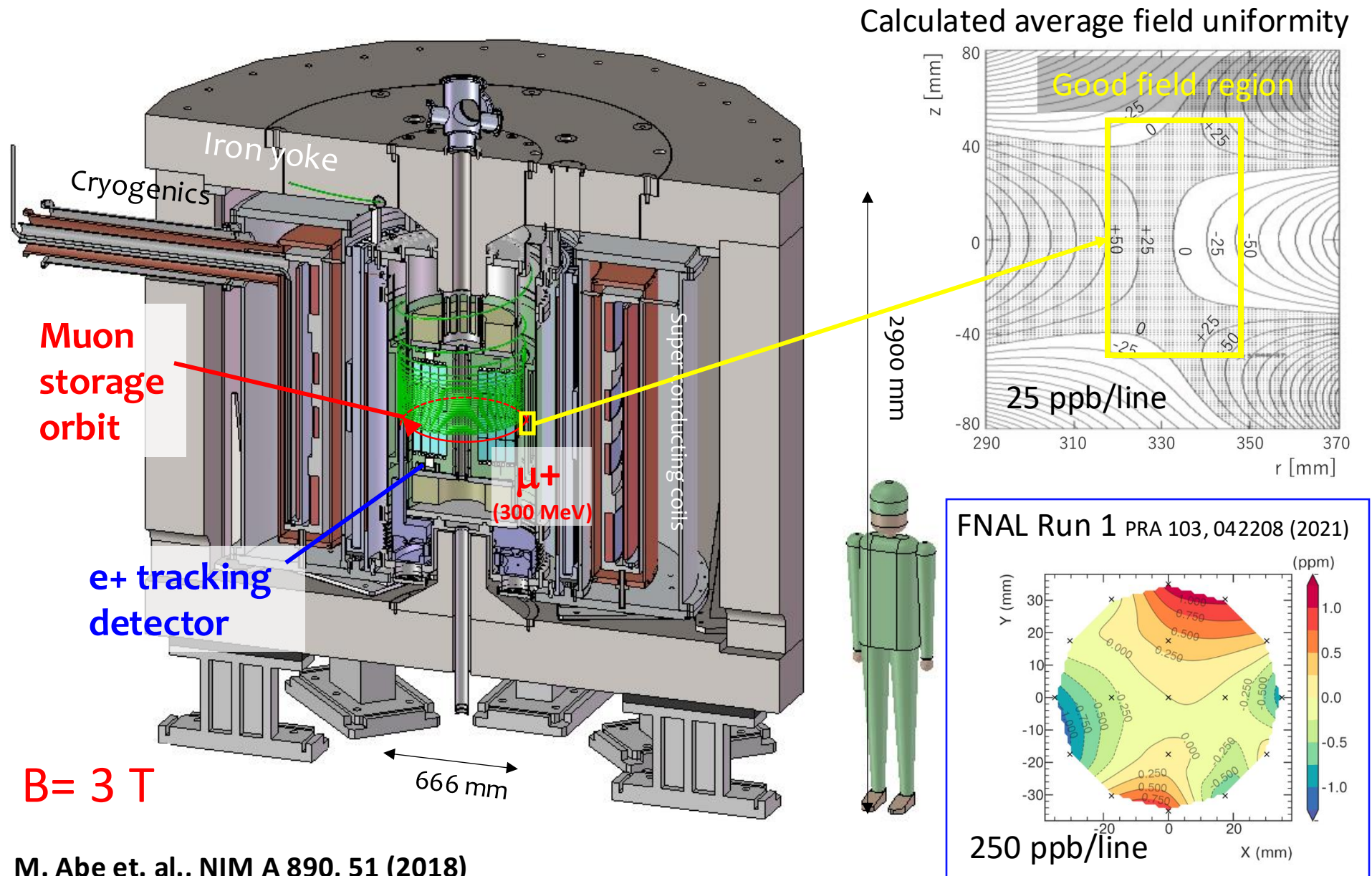


DLS加速空洞
(210 MeVまでの加速)

鋭意開発中

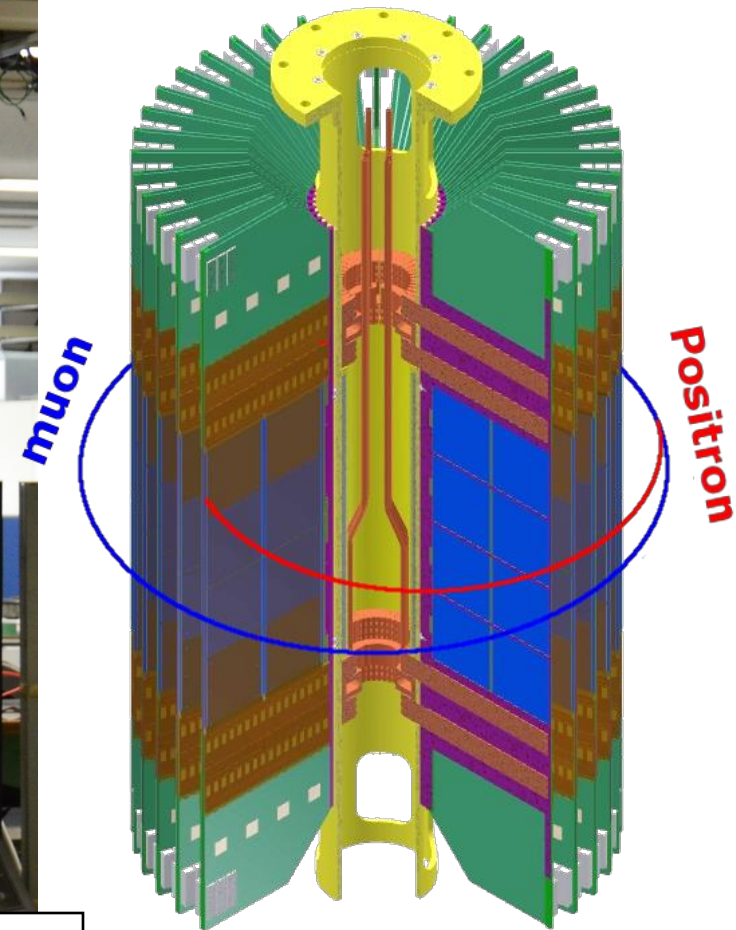
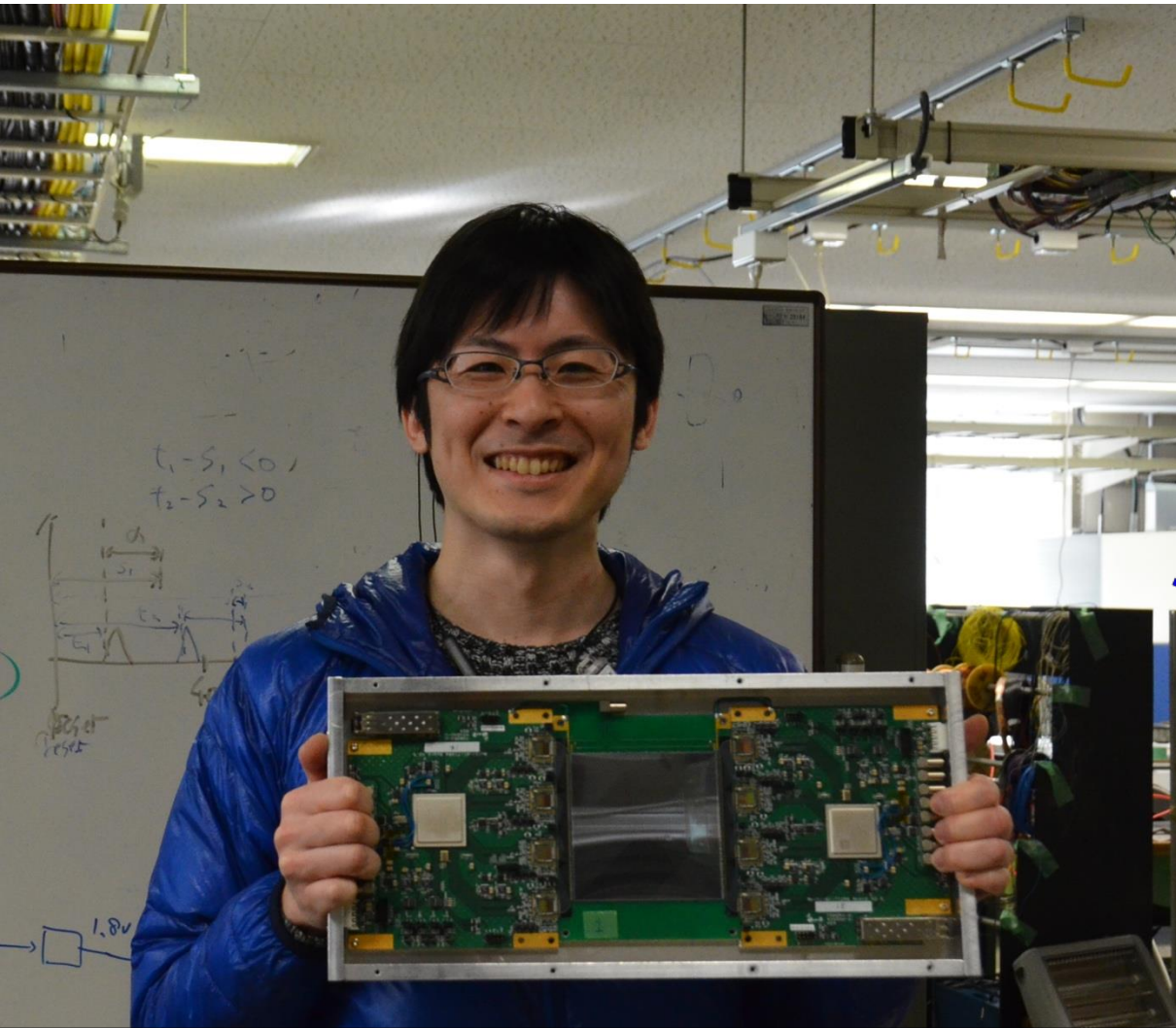
ミュオン蓄積磁石と磁場一様性

55



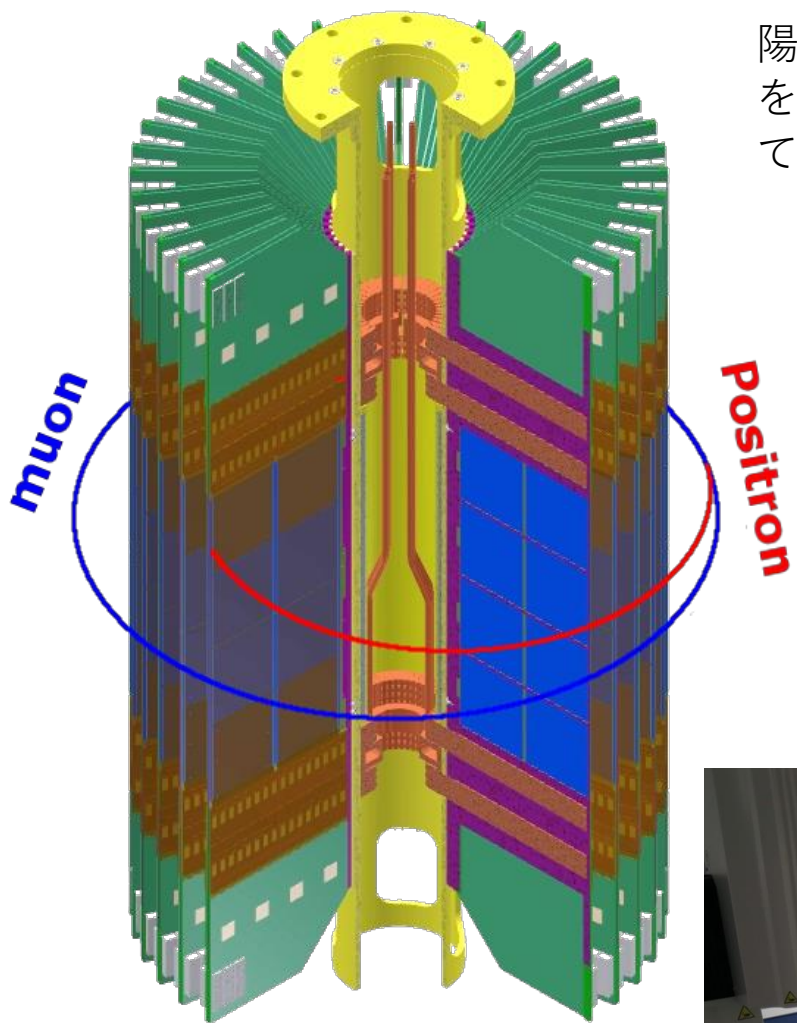
陽電子飛跡検出器

56

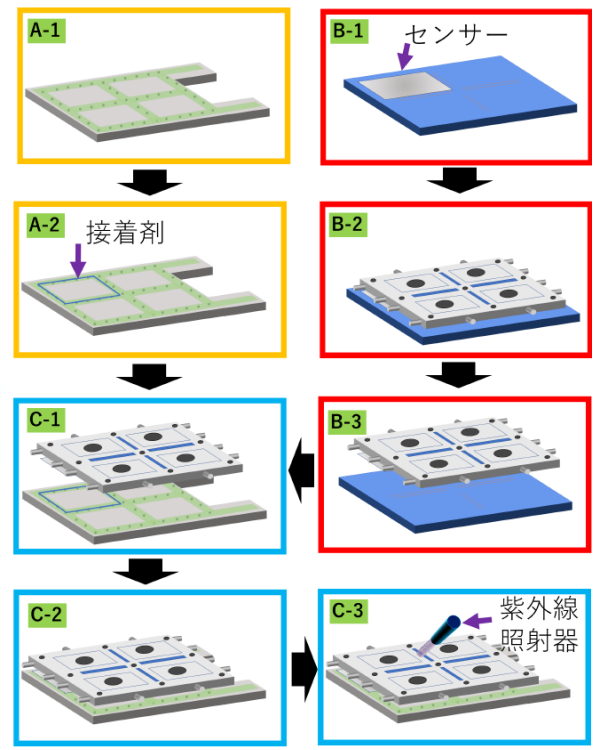
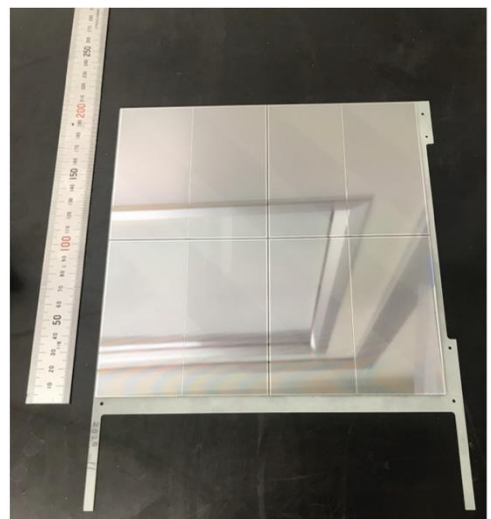


日本初 純国産シリコンストリップ検出器
KEK・新潟大・九州大で開発・組立が進行中

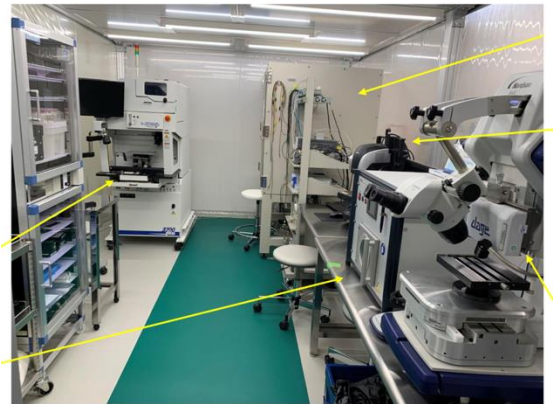
陽電子飛跡検出器の開発



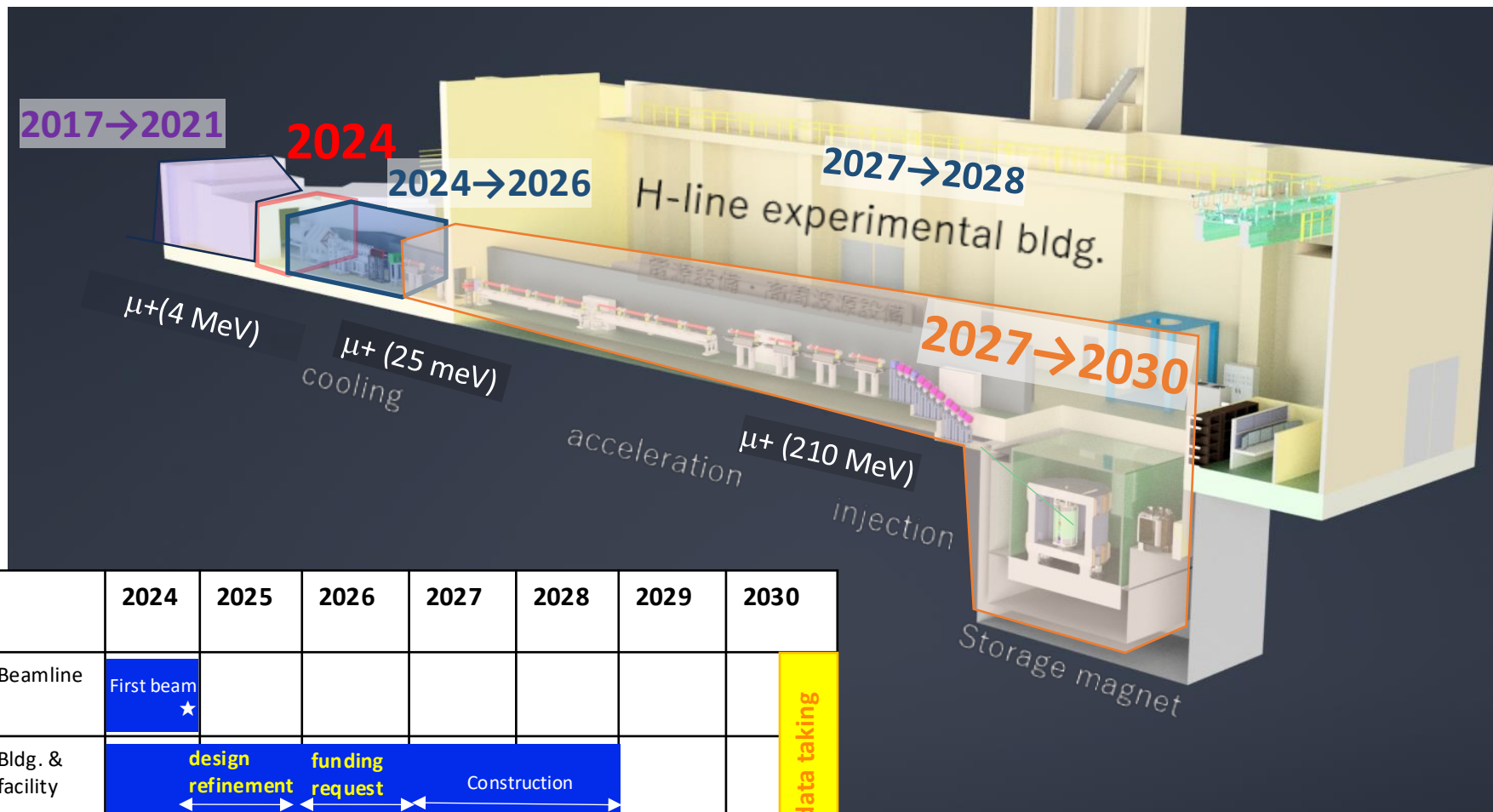
陽電子を測定するセンサー
をミクロン精度で組み立
て・設置が必要



KEK 精密組み立てラボ

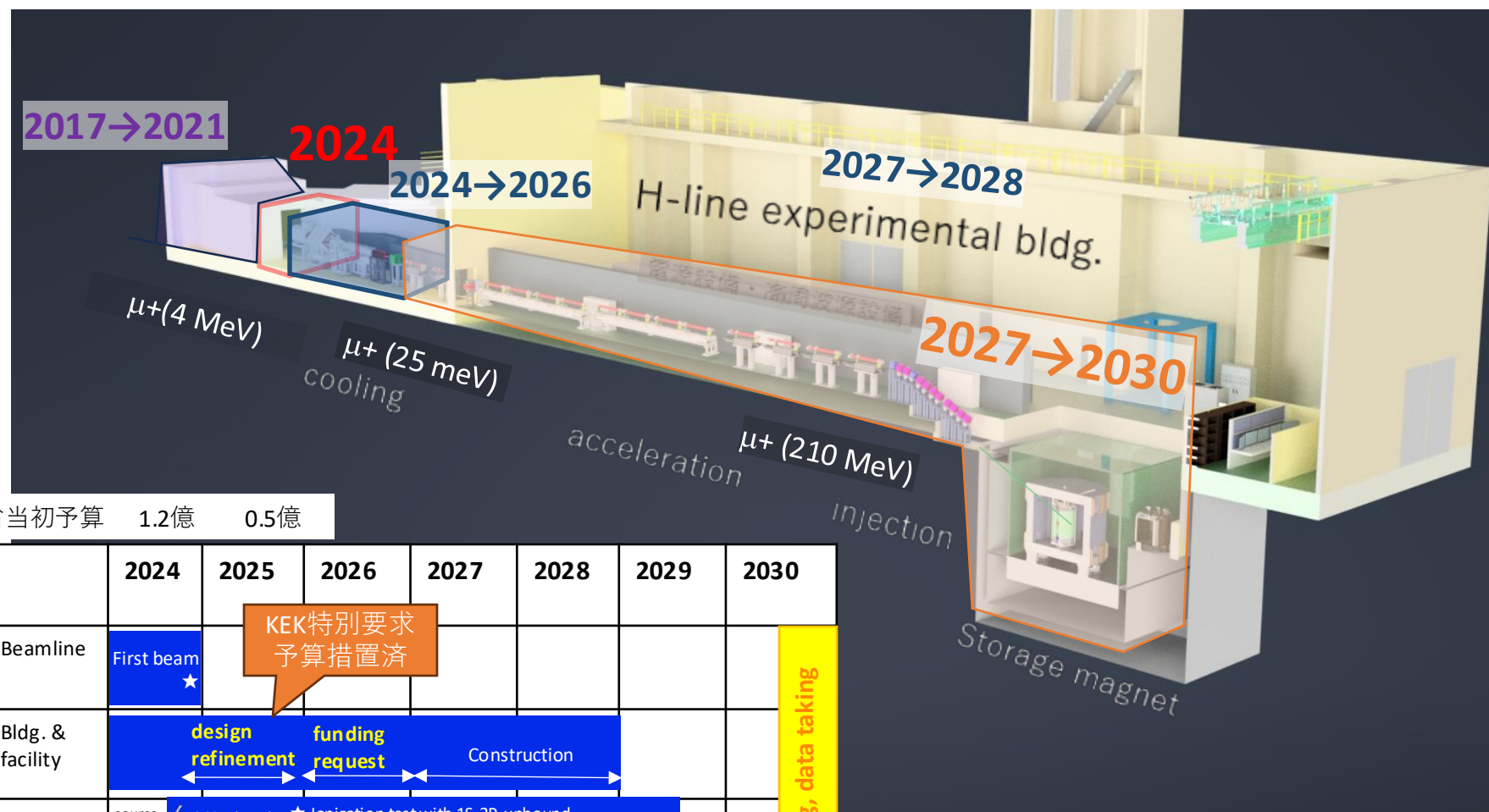


九大 精密組み立てラボ



	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Beamline	First beam ★						
Bldg. & facility	design refinement		funding request	Construction			
Source, LINAC, storage	source	✓ 1S-2S-unbound ★ Ionization test with 1S-2P-unbound					
	LINAC	✓ 100 keV@S2 ★ 4 MeV@H2				210 MeV ★	
	Injection & Storage					Installation ★	
Detector	positron tracker						
	magnetic field monitors					Installation ★	

Commissioning, data taking



文科省当初予算 1.2億 0.5億

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Beamline	First beam ★	KEK特別要求 予算措置済					
Bldg. & facility	design refinement funding request Construction						
Source, LINAC, storage	source	✓ 1S-2S-unbound ★ Ionization test with 1S-2P-unbound					
	LINAC	✓ 100 keV@S2			★4 MeV@H2		210 MeV ★
	Injection & Storage						Installation ★
Detector	positron tracker magnetic field monitors						Installation ★

Commissioning, data taking

Commissioning, data taking

The collaboration

60



Tamaki Yoshioka
(Kyushu)

Collaboration board (CB)

Chair: T. Yoshioka

Executive board (EB)

Spokesperson: T. Mibe

Subgroups

Surface muon beam

leader: T. Yamazaki, N. Kawamura

Ultra-slow muon

leader: K. Ishida

LINAC

leader: M. Otani

Injection and storage

leader: H. Iinuma

Storage magnet, field measurements

leader: K. Sasaki

Detector

leader: T. Yoshioka

DAQ and computing

leader: Y. Sato

Analysis

leader: T. Yamanaka

Interface coordinators

K. Ishida

M. Otani

Y. Kondo

H. Iinuma

T. Kume

Y. Sato

T. Suehara

T. Yamanaka

2024.3

Shanghai Jiao Tong University

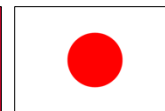
2024.6

Iwate University

2025.3

University of Liverpool

138 members from Canada,
China, Czech, France, India,
Japan, Korea, Netherlands,
Russia, USA, UK



Committees

Speakers committee

chair: K. Ishida, Y. Sato

Publication committee

chair: B. Shwartz

Working groups

physics analysis

T. Yamanaka, S. Ogawa

Domestic institutes :

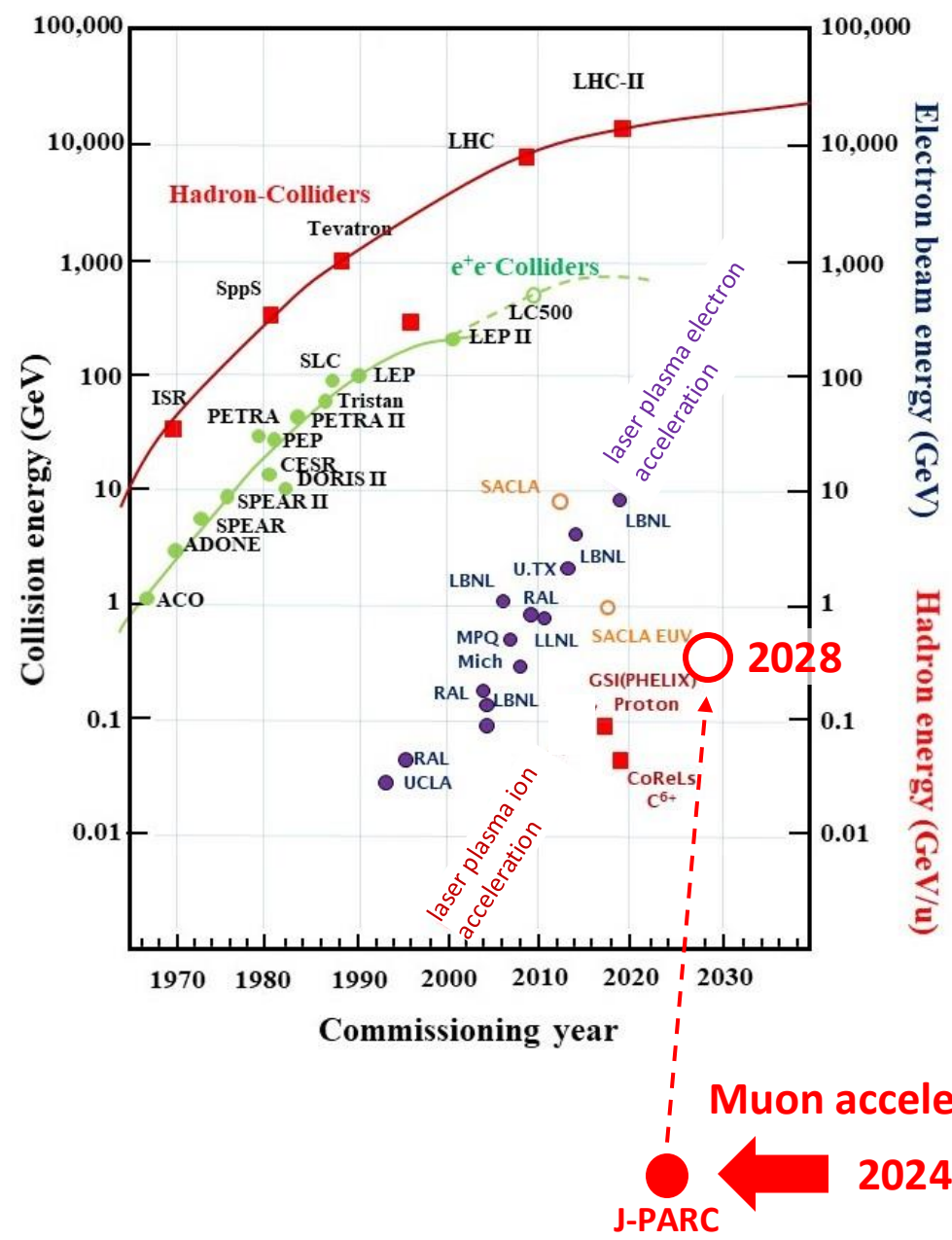
Kyushu, Nagoya, Tohoku, Niigata,
Toyama C, Tokyo, Ibaraki, RIKEN, JAEA,
Iwate, etc.

KEK: IPNS, IMSS, ACC, CRY, MEC, CRC



The 29th collaboration meeting at J-PARC, Dec. 11-13, 2024

History of accelerator technology



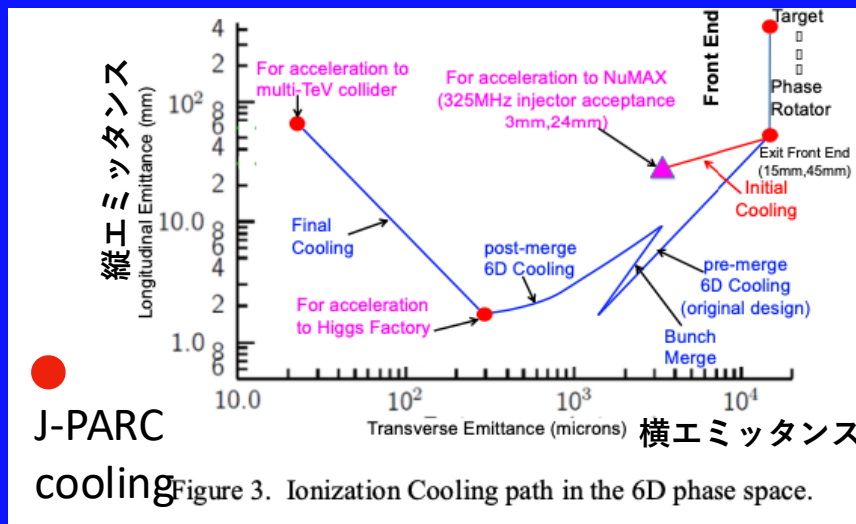
ミュオンビームエミッタンス (位相空間体積) の比較 62

冷却していないミュオンビーム 1

従来提案されている冷却方式
(イオン化冷却) 10^{-2}

J-PARCで用いる冷却方式
 10^{-4}

ただし、 μ^+ のみ
(μ^- には適用できない)



J-PARC
cooling

$\mu^+ + e^-$ コライダーの可能性

63

μしか勝たん
μTRISTAN
Dreaming is free.

2023年11月に開催した研究会より



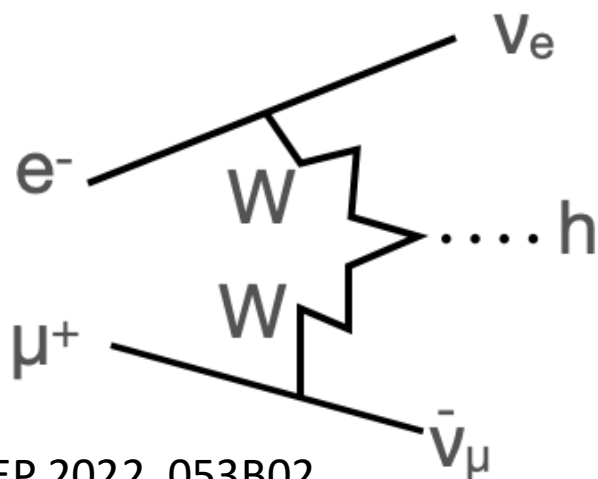
北野龍一郎さん

Yu Hamada¹, Ryuichiro Kitano^{1,3}, Ryutaro Matsudo¹, Hiromasa Takaura¹
and Mitsuhiro Yoshida^{2,3}

¹KEK Theory Center, Tsukuba 305-0801, Japan

²KEK Accelerator department, Tsukuba 305-0801, Japan

³Graduate University for Advanced Studies (Sokendai), Tsukuba 305-0801, Japan



PTEP 2022, 053B02

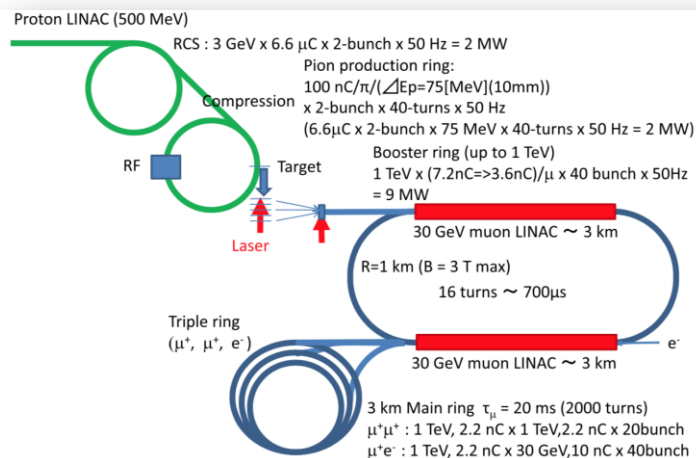
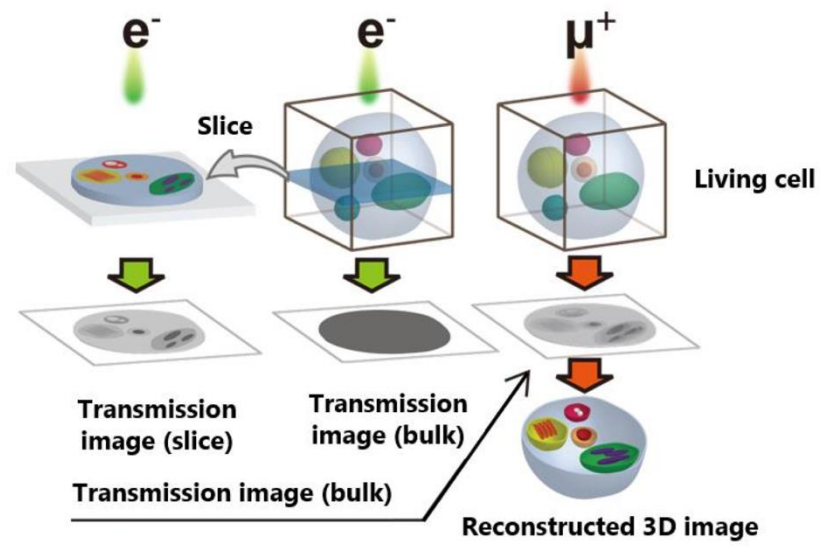


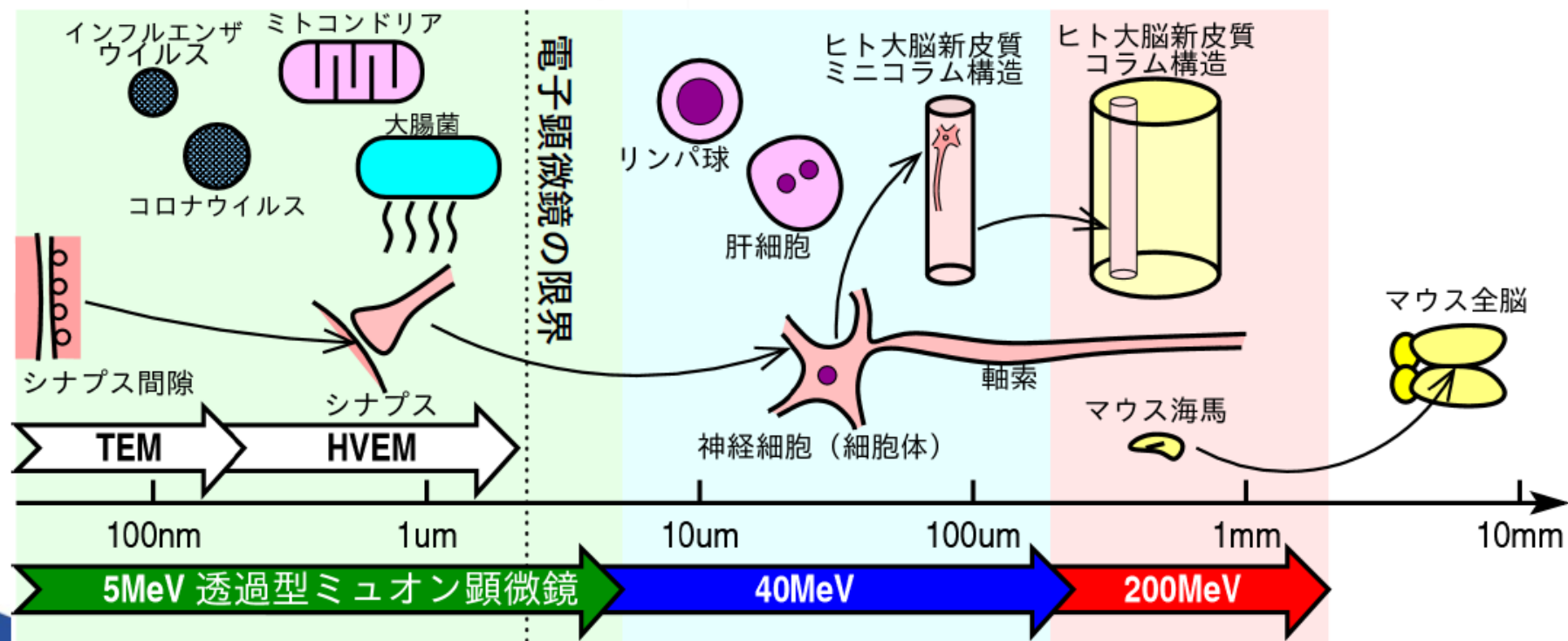
Fig. 1. Conceptual design of the $\mu^+e^-/\mu^+\mu^+$ collider.

透過型ミュオン顕微鏡

資料提供：永谷幸則



ミュオンの高い透過性と加速で得られる高い指向性を組み合わせて、透過型ミュオン顕微鏡が実現可能



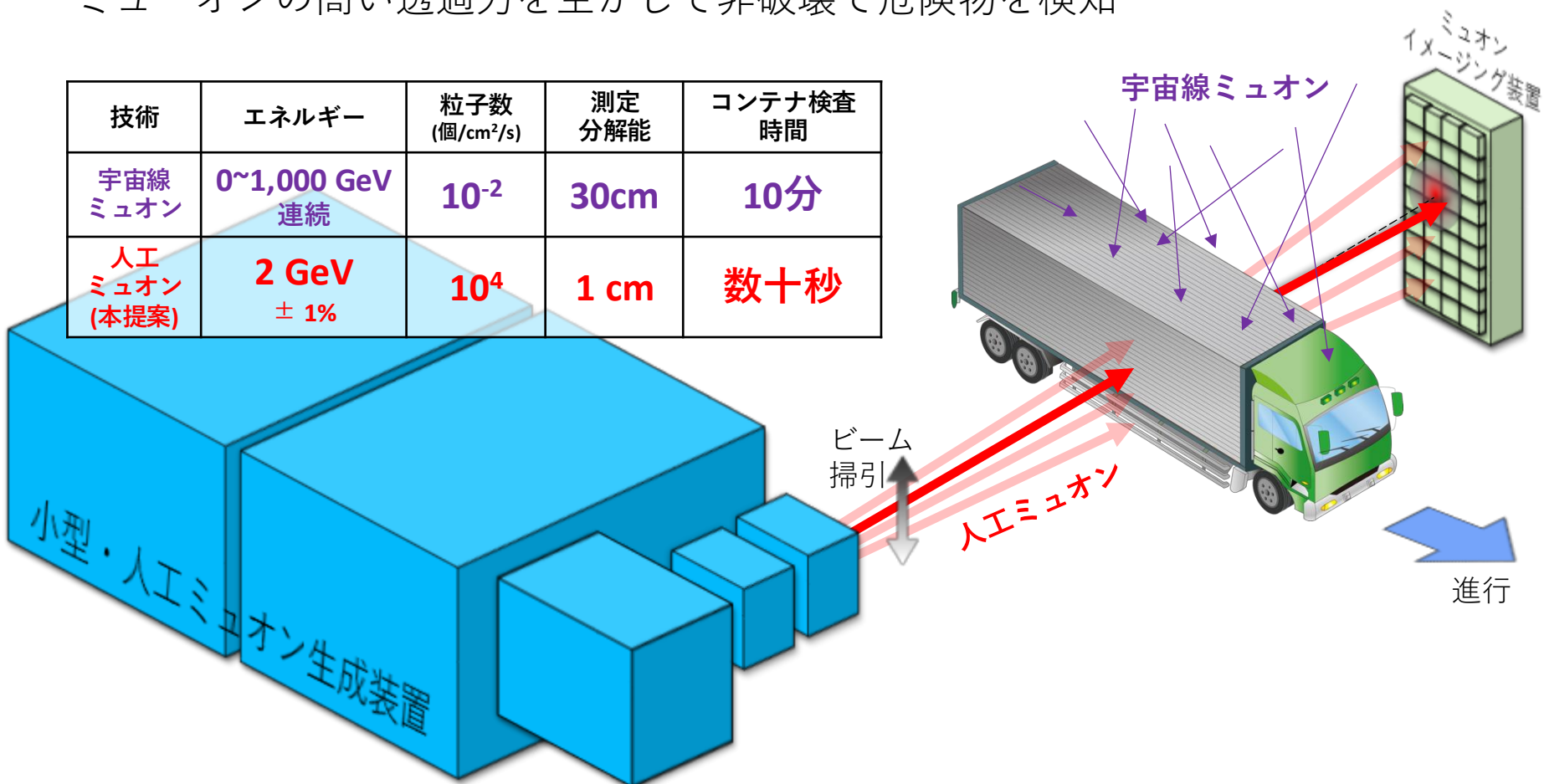
安心安全社会の実現に向けた応用

内閣府Kプログラム採択（2024-2029）

例：ミュオンイメージングによるドライブスルーコンテナ検査

ミュオンの高い透過力を生かして非破壊で危険物を検知

技術	エネルギー	粒子数 (個/cm ² /s)	測定 分解能	コンテナ検査 時間
宇宙線 ミュオン	0~1,000 GeV 連続	10 ⁻²	30cm	10分
人工 ミュオン (本提案)	2 GeV ± 1%	10 ⁴	1 cm	数十秒



例：ミュオンイメージングによるインフラ構造物の健全性確認

References

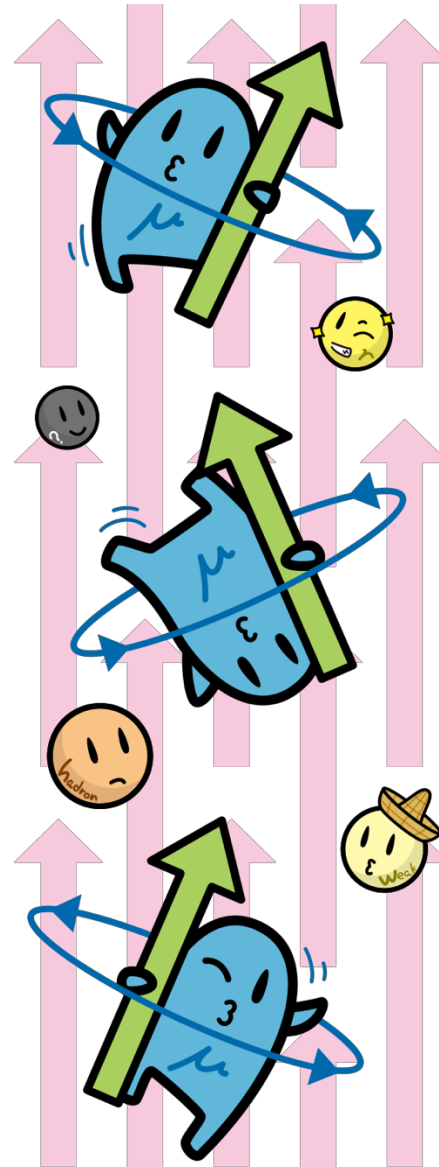
Simon Eidelman School on Muon Dipole Moments and Hadronic Effects

supported by Wilhelm and Else Heraeus Foundation

Sep 2nd-6th 2024
KMI, Nagoya University, Japan



<https://indico.kmi.nagoya-u.ac.jp/event/8/>



Topics & Lecturer

Muon magnetic moment: Experiment

Anna Driutti (Pisa)

Muon magnetic moment: Theory

Martin Hoferichter (Bern)

Data input to hadronic vacuum polarization

Zhiqing Zhang (IJCLab)

Lattice QCD: Hadronic vacuum polarization

Aida El-Khadra (UIUC)

Lattice QCD: Light-by-light

Harvey Meyer (Mainz)

Hadronic light-by-light: Phenomenology

Franziska Hagelstein (Mainz)

Hadronic light-by-light: Data input

Andrzej Kupsc (NCBJ/Uppsala)

New physics contributions

Kei Yamamoto (Hiroshima Tech)

Detector technology

Paula Collins (CERN)

Accelerator technology

Mika Masuzawa (KEK)

Precision measurements

Fan Xin (Northwestern)

Monte Carlo generators

Yannick Ulrich (Durham)

Scientific organizers

Achim Denig (Mainz), Boris Shwartz (BINP), Gilberto Colangelo (Bern),

Jim Libby (Indian Inst. Tech. Madras), Kenji Inami (Nagoya),

Toru Iijima (Nagoya, Chair), Tsutomu Mibe (KEK)

Local organizers

Kazuhiro Suzuki (Nagoya), Kazumichi Sumi (Nagoya), Kenji Inami (Nagoya),

Masato Kimura (KEK), Seiso Fukumura (Niigata), Toru Iijima (Nagoya),

Tsutomu Mibe (KEK), Yuki Sue (Nagoya)



Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of
Particles and the Universe



22K21347, 22K21347, 22K21350

WILHELM UND ELSE
HERAEUS-STIFTUNG



- J-PARC ミュオンg-2/EDM実験はミュオンを**冷却・加速**してコンパクトな蓄積磁石に蓄積する新しい手法によりg-2とEDMを超精密測定する。
- 2024年4月、世界で始めて、ミュオンの高周波加速に成功。
祝「ミュオン加速元年」
- 国際コラボレーションによって進めてきたR&Dは終盤を迎え、建設が始まっている。2024年度は文科省からの予算が措置され、いよいよ本格的には建設フェーズに入った。2028年度からデータ収集開始。

