KYUSHU UNIVERSITY

Muon g-2

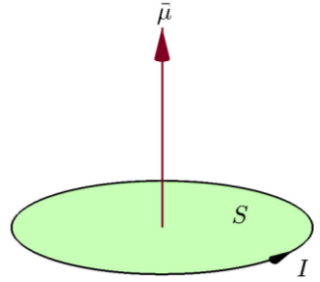
九州大学　基幹教育院
山中隆志

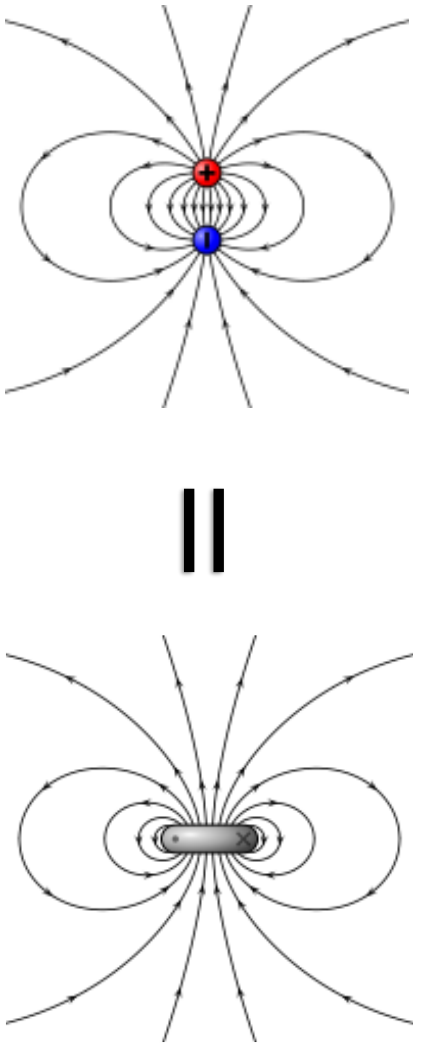
目次

- 磁気モーメント、g-2
- ミューオンg-2の測定方法
- J-PARC muon g-2/EDM実験
- ミューオンg-2の理論計算

磁気(双極子)モーメント

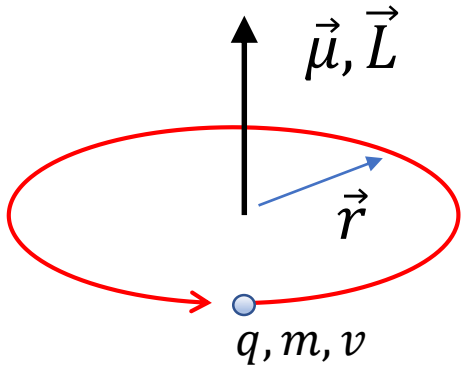
- もし磁気単極子が存在するなら、磁気双極子モーメントは $\vec{\mu} = q_m \vec{l}$ で定義
  - q_m: 各単極子の磁荷
  - $\vec{l}$: 単極子間の距離ベクトル
- 磁気単極子は発見されていないが、電流ループが磁気双極子のようにふるまう $\mu = IS$
  - I: 電流
  - S: 閉ループの面積
  - 向きは電流に垂直

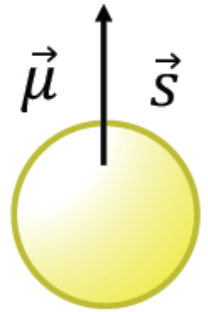




磁気モーメントと角運動量ベクトル

- 電荷q (>0)の粒子が半径 r の円を描いて速度 v で運動する系の電流が $I=-\frac{qv}{2\pi r}$, 面積が $S=\pi r^2$
- この系の磁気双極子モーメントは $\vec{\mu}=\frac{q}{2}\vec{r}\times\vec{v}$.
- この系の角運動量は $\vec{L}=\vec{r}\times\vec{p}=m\vec{r}\times\vec{v}$ と書けることを用いると、磁気モーメントは $\vec{\mu}=\frac{q}{2m}\vec{L}$
- 同様にしてスピン由来の磁気双極子モーメントは $\vec{\mu}=g\frac{q}{2m}\vec{s}$ と書ける
  - g はg (gyromagnetic)因子と呼ばれ、古典電磁気学では1
  - 量子電磁気学(QED)ではスピン1/2の点粒子に対しては $g=2$
  - 実際の粒子では真空偏極により2からずれる

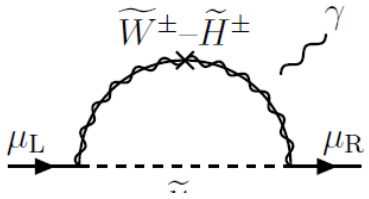


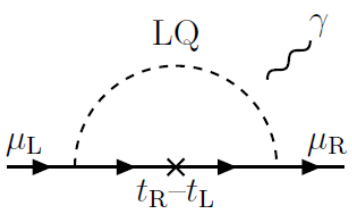


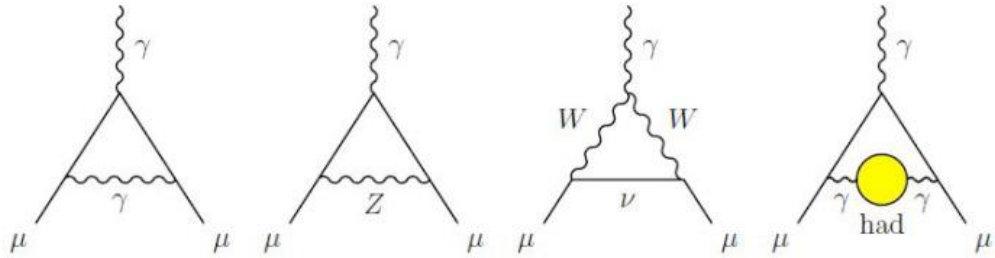
m: mass
q: charge

異常磁気モーメント

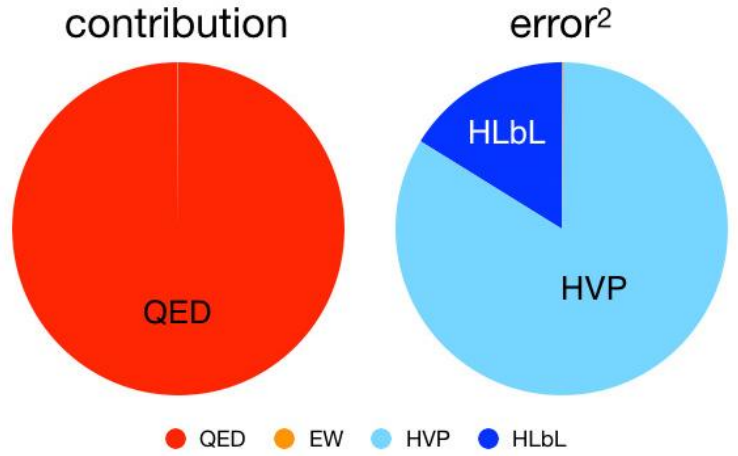
- g因子の2からのずれを異常磁気モーメントと呼び、$a = \frac{g-2}{2}$ とも表す
  - ミューオンと光子の相互作用に現れるループダイアグラム（真空偏極）がこのずれを生む
  - 寄与の大半はQED
  - ミューオンの場合、誤差はハドロン真空偏極（HVP）が由来
- 未知の新粒子もループ補正を生じる → 標準模型粒子のみを用いた計算からのずれ
  - 新粒子の寄与は質量の２乗に比例







QED　　ハドロン



ミューオンg-2への寄与と誤差

(Muon) g-2の歴史





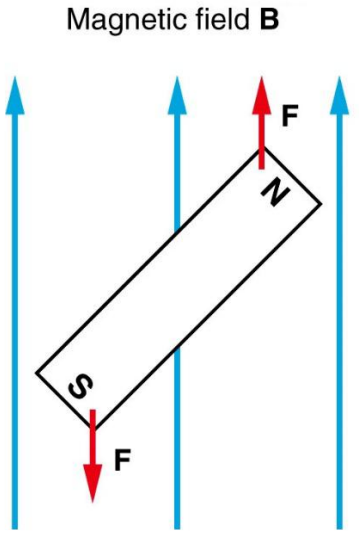


- 1928年 P. Diracが電子の$g = 2$を予言
- 1947年 電子のg因子が2からわずかにずれる実験結果
- 1948年 J. Schwingerが$a = \frac{g-2}{2}$に$\frac{\alpha}{2\pi}$~0.00116 のループ補正がかかることを計算
  - αは微細構造定数
- 1960~70年代 CERNでミューオンの異常磁気モーメントを測定
  - 7.3 ppmの精度まで到達
  - 電子g-2はQEDループ計算の精度向上により、1 ppbの精度で理論と実験が一致
- 1990年代~2001年 Brookhaven National Laboratory (BNL) E821実験でのミューオンg-2の測定値が標準模型の予測から2~3σのずれ
  - 測定精度は0.54 ppmの相対誤差
- 2010年代 電子g-2の精度は相対誤差で10^{-13}に到達
- 2018~2025年 Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) E989実験でのミューオンg-2測定精度改善（127 ppbの相対誤差まで低減）

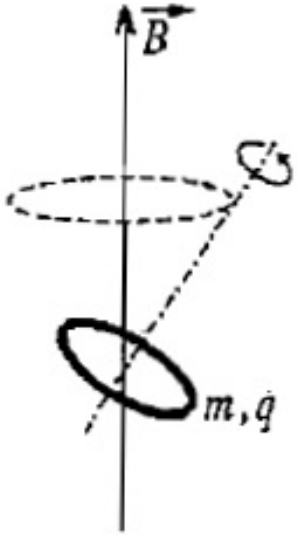


CERNのmuon g-2実験

ラーモア歳差運動

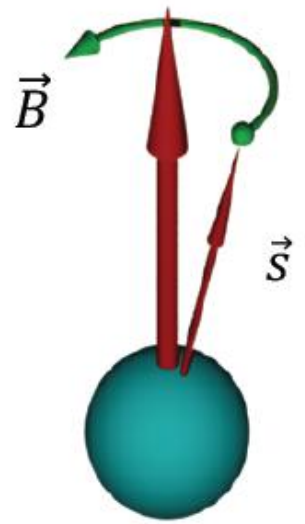


- 磁石を磁場中に置くとトルクを受けるのと同様に、磁気モーメントも $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ のトルクを受ける
- 回転運動する粒子の角運動量ベクトルのトルクによる時間変化は $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau} = \frac{q}{2m}\vec{L} \times \vec{B}$
- $\vec{\omega} = -\frac{q}{2m}\vec{B}$の角周波数ベクトルで歳差運動（ラーモア歳差運動）



スピン歳差運動

- 同じ方程式が静止した粒子のスピンについても成り立ち、
  $\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} = \frac{q}{2m}\vec{s} \times \vec{B}.$
- 角速度ベクトルは、 $\vec{\omega} = -g\frac{q}{2m}\vec{B}$
  - この関係式からg因子が測定できるが、g-2ではなくgの測定
- 運動する粒子の場合、相対論的な補正が加わって、角速度ベクトルは $\vec{\omega}_s = -g\frac{q}{2m}\vec{B} - (1-\gamma)\frac{q}{m\gamma}\vec{B}$
  - γはローレンツ因子
  - γ=1で、ラーモア歳差運動に一致
  - トーマス歳差運動と呼ばれる

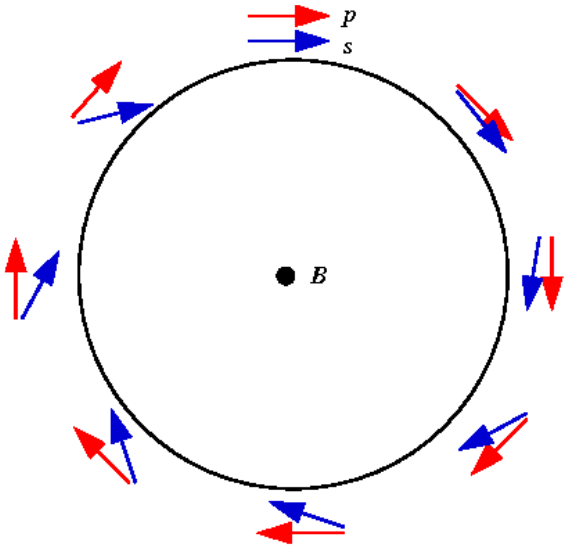


g-2歳差運動

- 磁場中の粒子のサイクロトロン運動の角速度ベクトル
  $\vec{\omega}_c = -\frac{q}{m\gamma}\vec{B}.$
- 運動方向に対するスピンの角速度

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = -\left(\frac{g-2}{2}\right)\frac{q}{m}\vec{B} = -a\frac{q}{m}\vec{B}$$

- $a = \frac{m\omega_a}{qB}$となることから ω_aとBを測定することで、
  aを決定可能
  - ω_aを測ることで、 g因子を測定するω_sよりも~10^3高い精度で測定が可能



g>2の場合、スピンがサイクロトロン運動よりも速く回転

g-2の導出

- 実際の測定では磁場Bを直接測るよりも、核磁気共鳴法(NMR)により、磁場を陽子のラーモア歳差運動角周波数 $\omega_p = \frac{g_p e}{2m_p} B$ で表すことで、g-2の精度が高くなる
- ω_p を使って書き直すと、

$$a_\mu = \frac{m_\mu \omega_a}{e} \frac{g_p e}{2 m_p \omega_p} = \left(\frac{\omega_a}{\omega_p}\right) \frac{1}{\frac{m_p}{m_\mu}\left(\frac{g_\mu}{g_p} - \frac{g_\mu - 2}{g_p}\right)} = \frac{R}{\lambda - R}$$

相対誤差 125ppb

$$R = \frac{\omega_a}{\omega_p} = \frac{2 a_\mu m_p}{g_p m_\mu} = 0.00370730088\ (36)(29)$$

PRL135(2025)101802

ミューオンg-2実験で測定する物理量

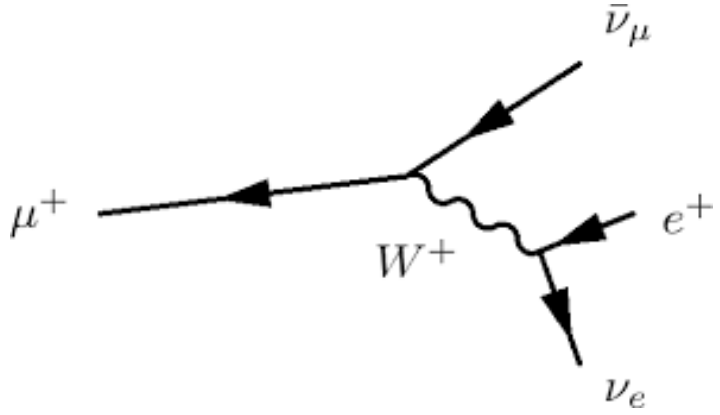
相対誤差 22 ppb

$$\lambda = \frac{\mu_\mu}{\mu_p} = \frac{g_\mu m_p}{g_p m_\mu} = 3.183345146(71)$$

CODATA2022

他の実験/理論計算から得られる物理量

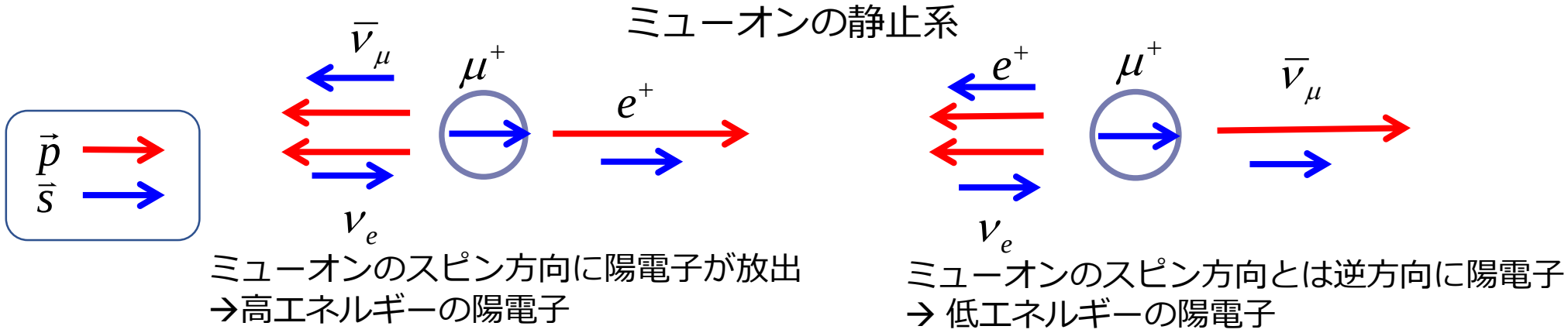
ミューオンスピンの測定法



- ω_aを測定するにはミューオンスピン方向の時間変化を知る必要がある

→ミューオンの崩壊が弱い相互作用を介して起こることを利用

  - 高エネルギーの陽電子はミューオンのスピン方向に放出されやすい



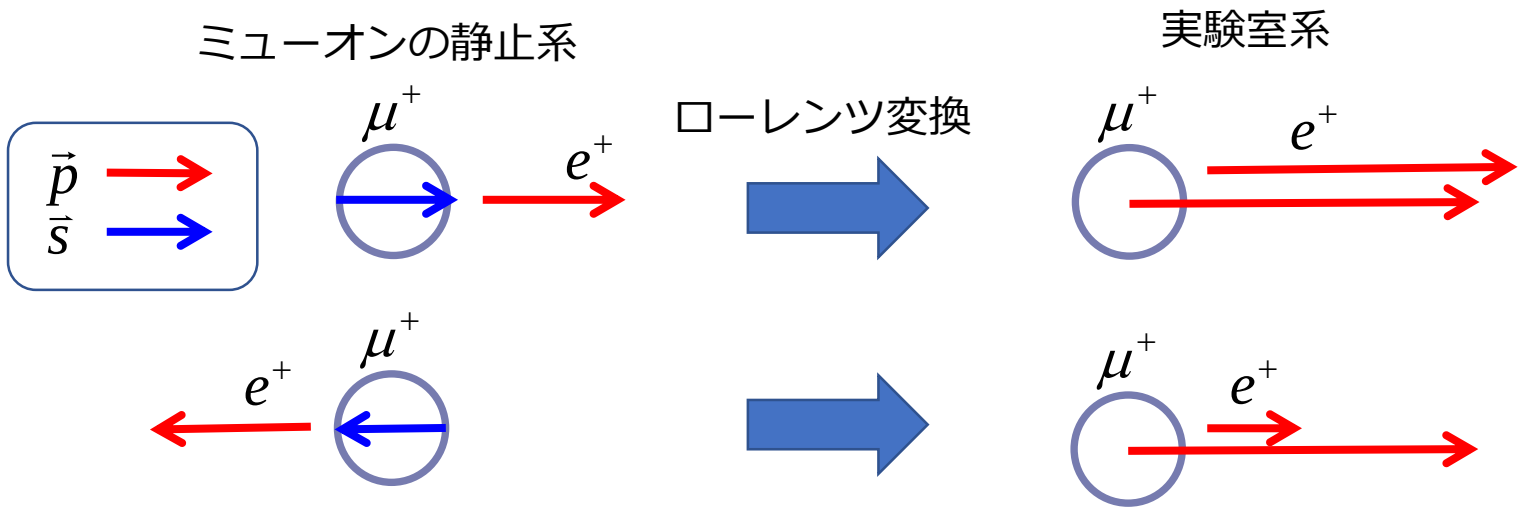
ミューオンのスピン方向に陽電子が放出
→高エネルギーの陽電子

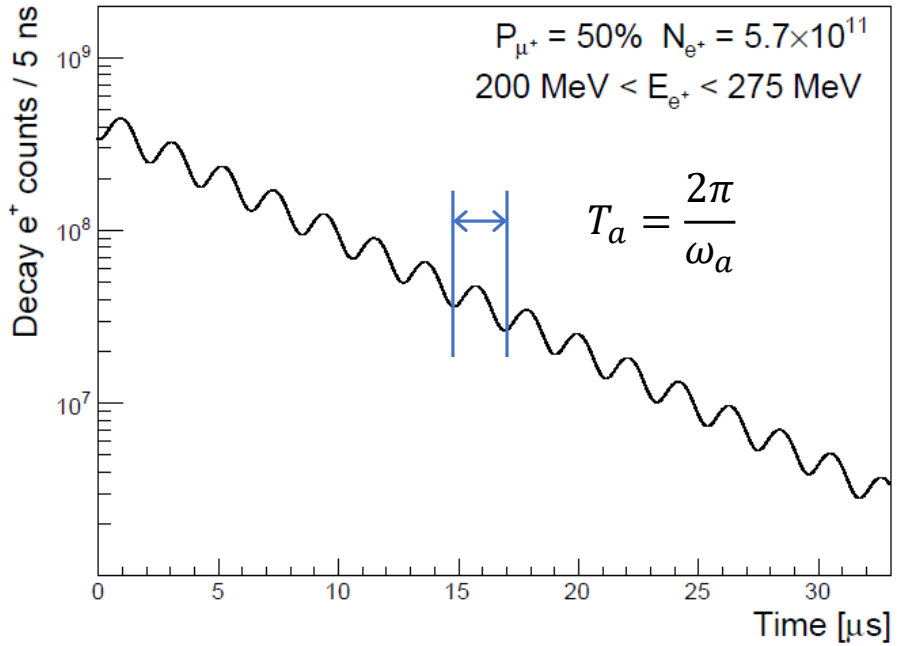
ミューオンのスピン方向とは逆方向に陽電子
→ 低エネルギーの陽電子

崩壊陽電子の時間スペクトル

- ミューオンのスピン方向と運動方向が揃った時、実験室系で見ると崩壊陽電子が高エネルギー
- 高いエネルギーの崩壊陽電子の数がスピン歳差運動の周期で変化

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right)[1 - A\cos(\omega_a t + \varphi)]$$





Thomas-BMT方程式

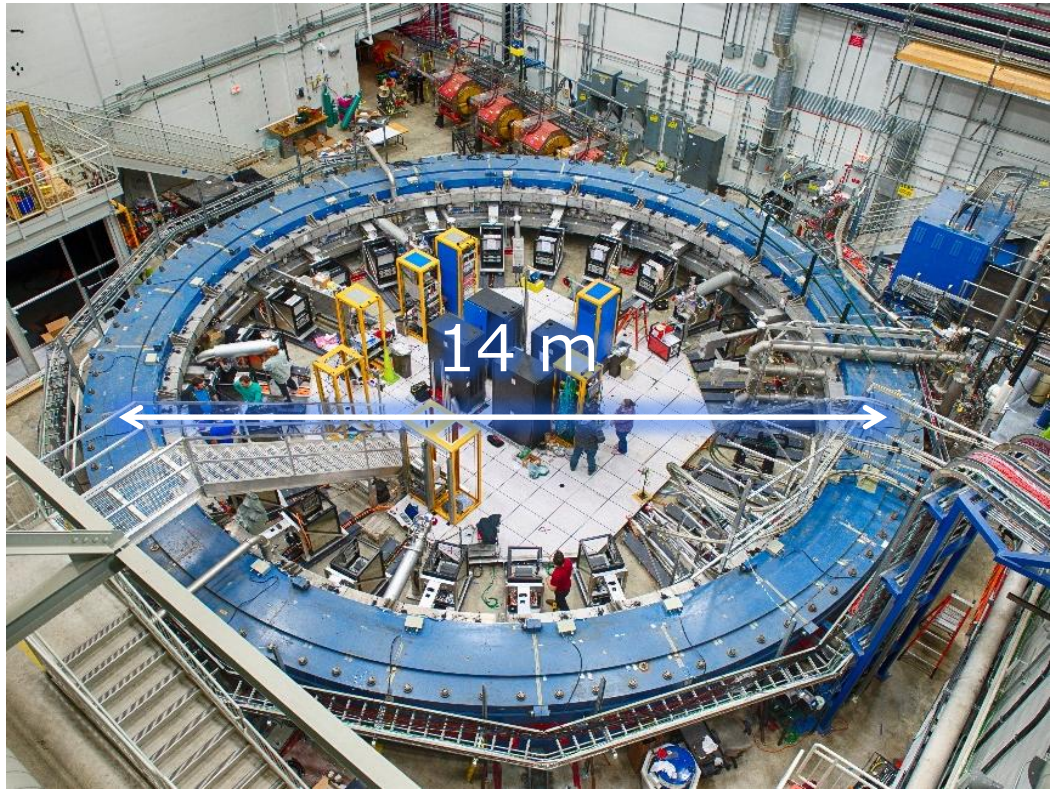
- 非一様磁場や、電場も考慮したスピン歳差運動

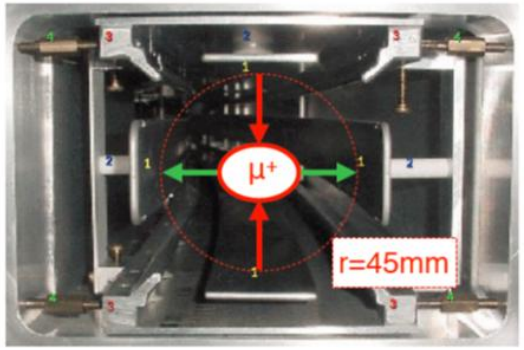
$$\vec{\omega}_a = -\frac{q}{m}\left(a_\mu \vec{B} - a_\mu \left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)(\vec{\beta}\cdot\vec{B})\vec{\beta} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2-1}\right)\frac{\vec{\beta}\times\vec{E}}{c}\right)$$

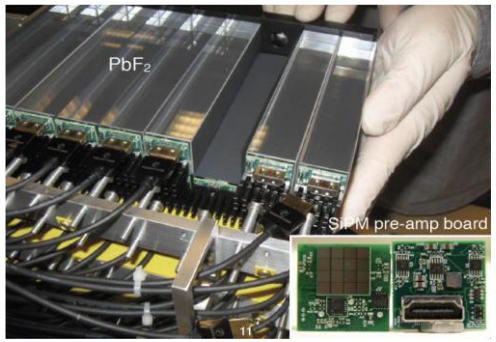
  - Thomas-BMT方程式からの導出
- ２項目は $\vec{\beta}\cdot\vec{B} \approx 0$となるので近似的には0
- BNLやFNALなどこれまでの実験ではパイオン崩壊から生じるミューオンビームを使用
  - エミッタンスが大きく、電場による強い収束を行わないと一定の蓄積磁場中に蓄積できない
- 電場の影響を減らすため、 $a_\mu - \frac{1}{\gamma^2-1} = 0$となる運動量(~3.094 GeV/c)のミューオンビームを使用（魔法運動量）

FNAL Muon g-2実験

- 魔法運動量のミューオンを蓄積するため、直径14 mの磁石を用いて蓄積
  - BNL実験で使われた磁石をFNALに移送して使用
- 四重極電場を用いてビーム収束
- 崩壊陽電子を主にカロリメターで検出

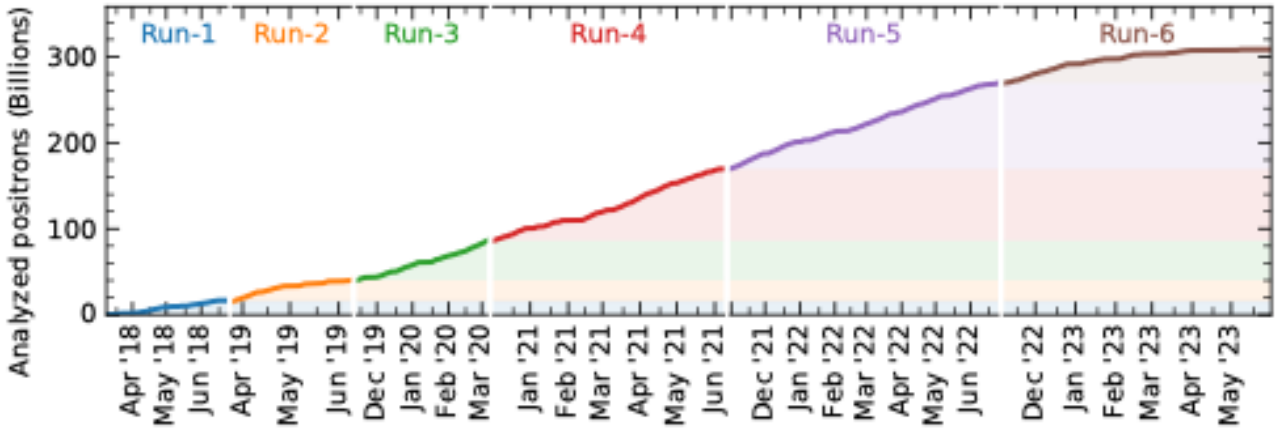






FNAL Muon g-2実験

- 6年間で～3×10^{11}の崩壊陽電子のデータを蓄積
- 統計誤差は~100 ppbまで減少
- 系統誤差が~76 ppb
  - 収束電場由来の系統誤差は他の主要な系統誤差と同程度の大きさ、補正量としては最大

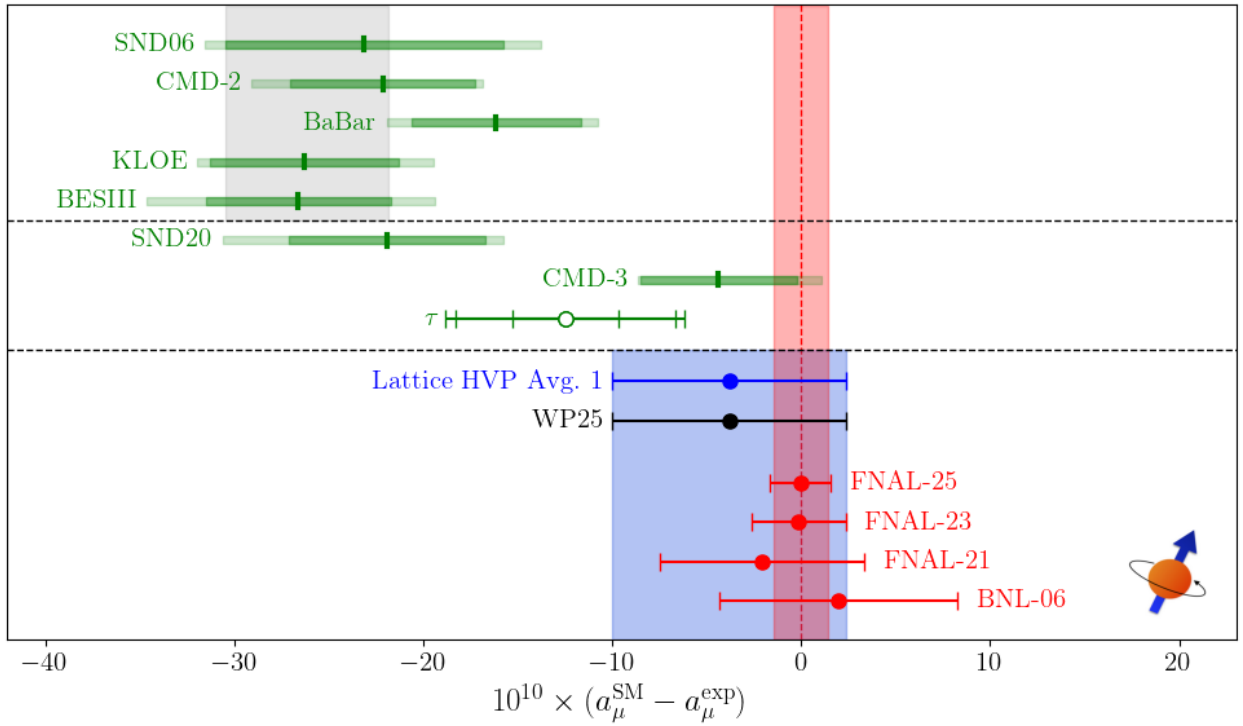


Run 4/5/6データの誤差の内訳

Quantity	Correction (ppb)	Uncertainty (ppb)
ω_a^m (statistical)	···	114
ω_a^m (systematic)	···	30
C_e	347	27
C_p	175	9
C_{pa}	-33	15
C_{dd}	26	27
C_{ml}	0	2
$\langle \omega_p' \times M \rangle$ (mapping, tracking)	···	34
$\langle \omega_p' \times M \rangle$ (calibration)	···	34
B_k	-37	22
B_q	-21	20
μ_p'/μ_B	···	4
m_μ/m_e	···	22
Total systematic for $\mathcal{R}_\mu'$	···	76
Total for a_μ	572	139

ミューオンg-2測定の現状

- BNLの実験にて、ミューオンg-2の測定値が標準模型からのずれを示唆する結果が出たことで注目
- FNALでBNL実験の精度を改善した実験が2018年より行われ、一時は5 σを超えるずれ
- これまで標準模型のハドロン偏極の寄与の計算にはe^+e^-→hadronsのデータを用いる手法が用いられてきたが、別の方法（格子QCD）による精度が改善



J-PARC Muon g-2/EDM実験

- BNL/FNALとは異なる手法を用いて独立に実験値を検証・改善することを目指した実験をJ-PARCで計画
- 魔法運動量の代わりに電場そのものを0にすることで、電場の項を消す

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

BNL/FNAL approach

$$a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0$$

魔法運動量
(3.094 GeV/c)

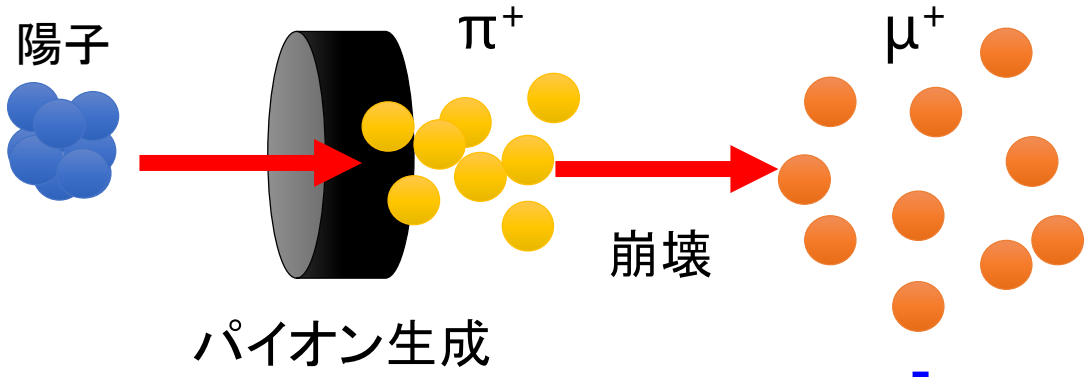
$$\vec{\omega}_a = -\frac{q}{m} a_\mu \vec{B}$$

J-PARC approach

$$\vec{E} = 0$$

低エミッタンス
ミューオンビーム

低エミッタンスミューオンビーム



従来のミューオンビーム
エミッタンス~1000 π mm・mrad

電場による強収束が必要
ミューオンの散逸
パイオンバックグラウンド

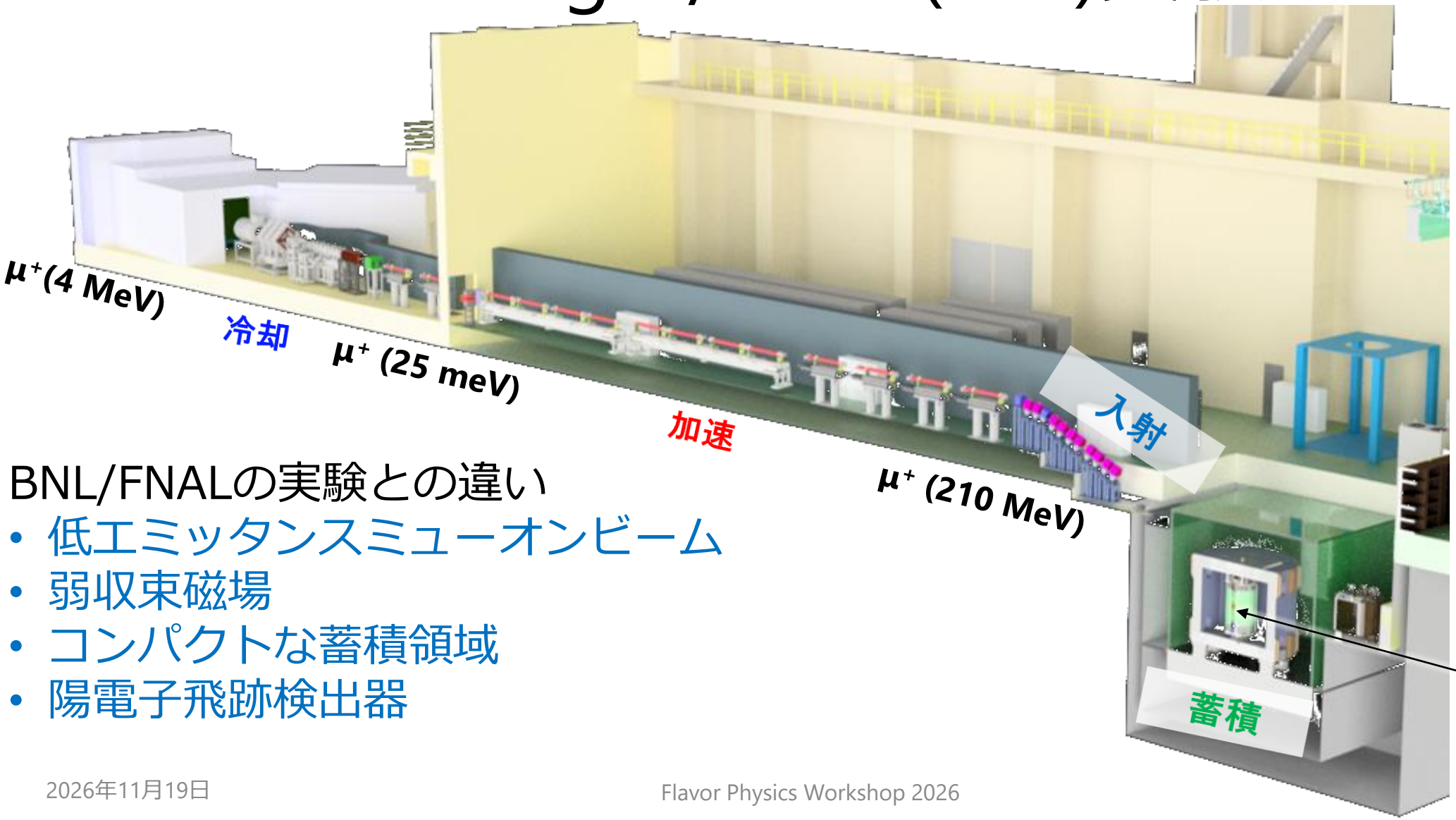
冷却・加速

低エミッタンスミューオンビーム
エミッタンス~1π mm・mrad

μ+

- 弱収束磁場でビーム収束可能
- 魔法運動量(3.094 GeV/c)を使う必要なし
  → 低運動量(300 MeV/c)を選択
  - コンパクトな高一様磁場
  - 飛跡検出器による崩壊陽電子の検出

J-PARC Muon g-2/EDM (E34)実験



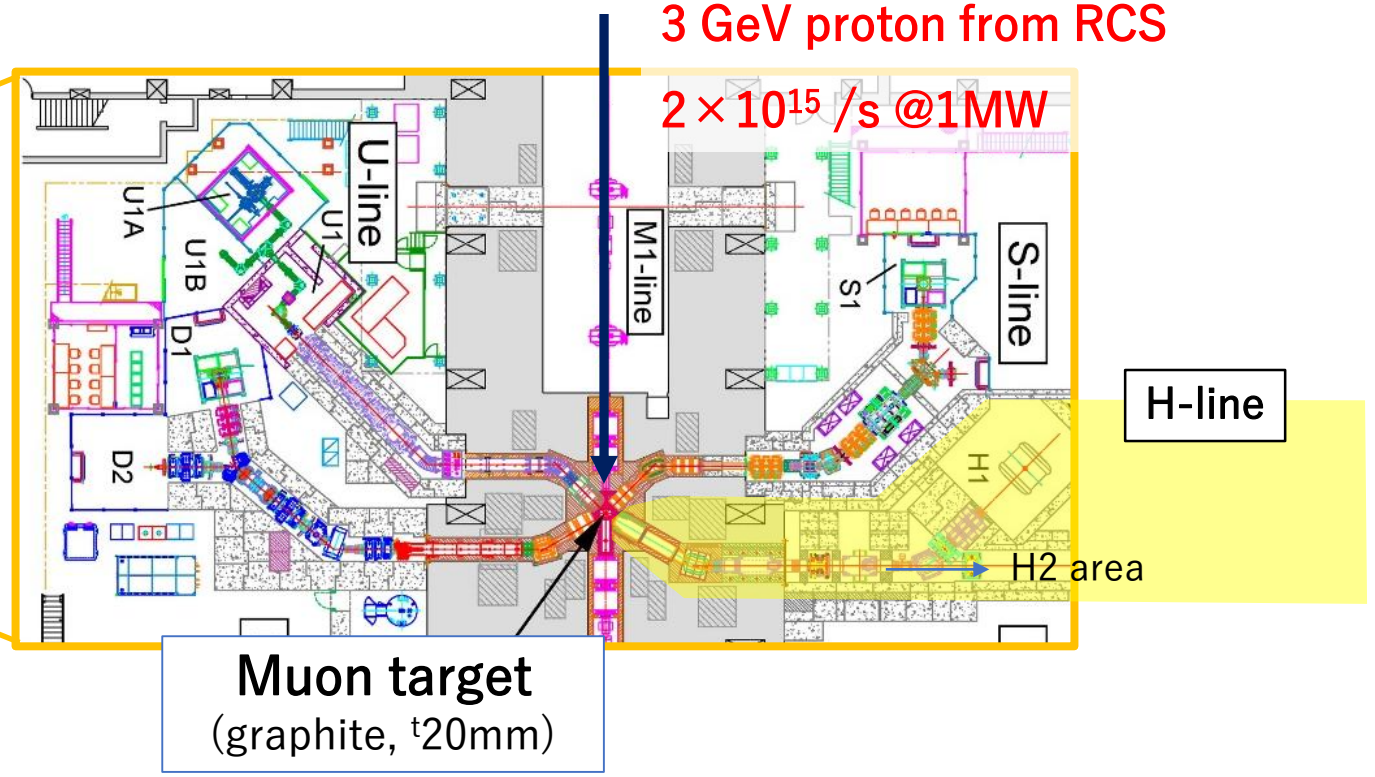
BNL/FNALの実験との違い

- 低エミッタンスミューオンビーム
- 弱収束磁場
- コンパクトな蓄積領域
- 陽電子飛跡検出器

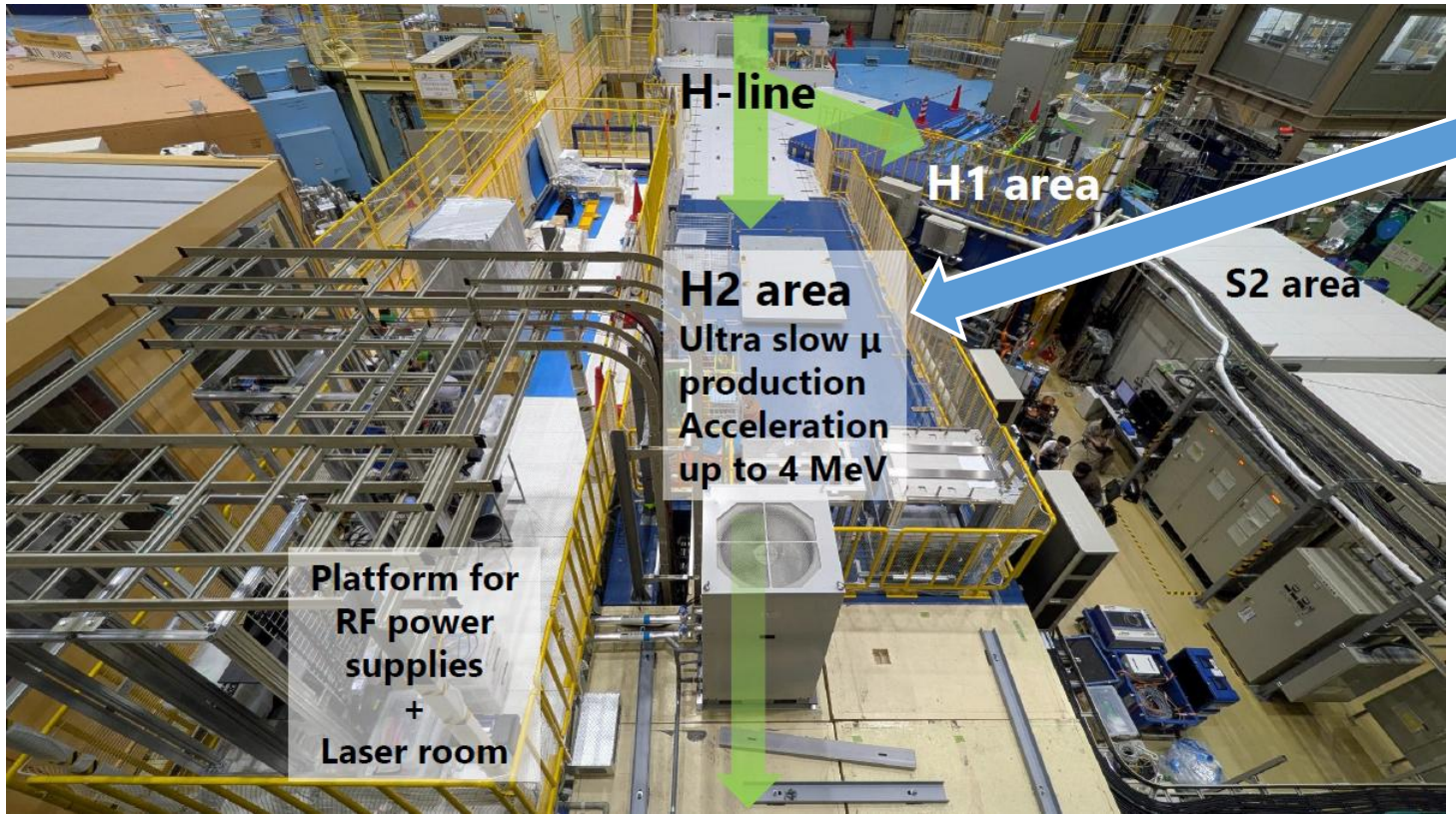
J-PARC MLF Hライン

- J-PARC MLFに新たに構築されたHラインで実験予定





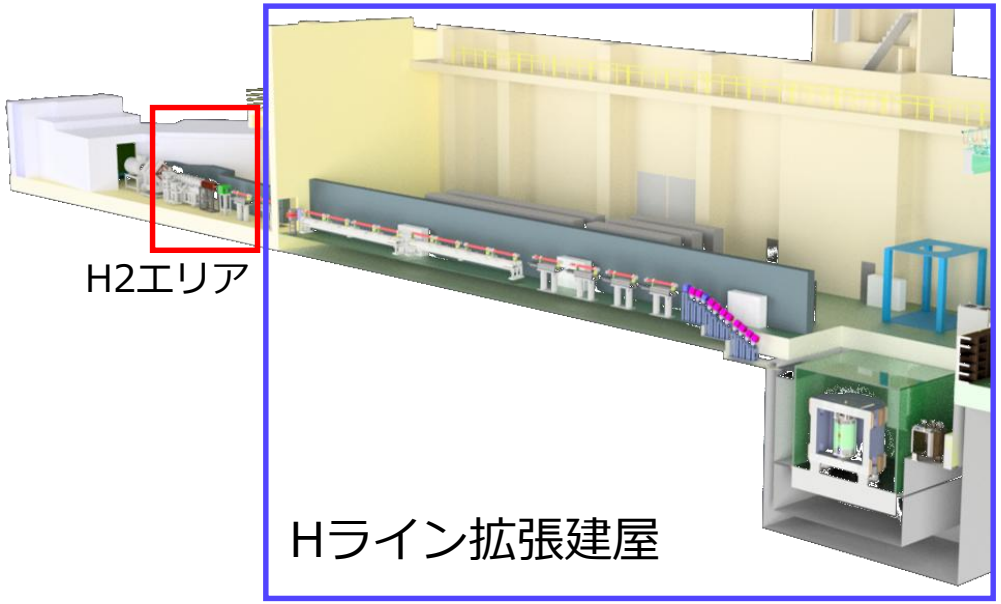
Hラインの建設状況



ミューオンビーム冷却・加速の実証試験のためH2エリアを建設中



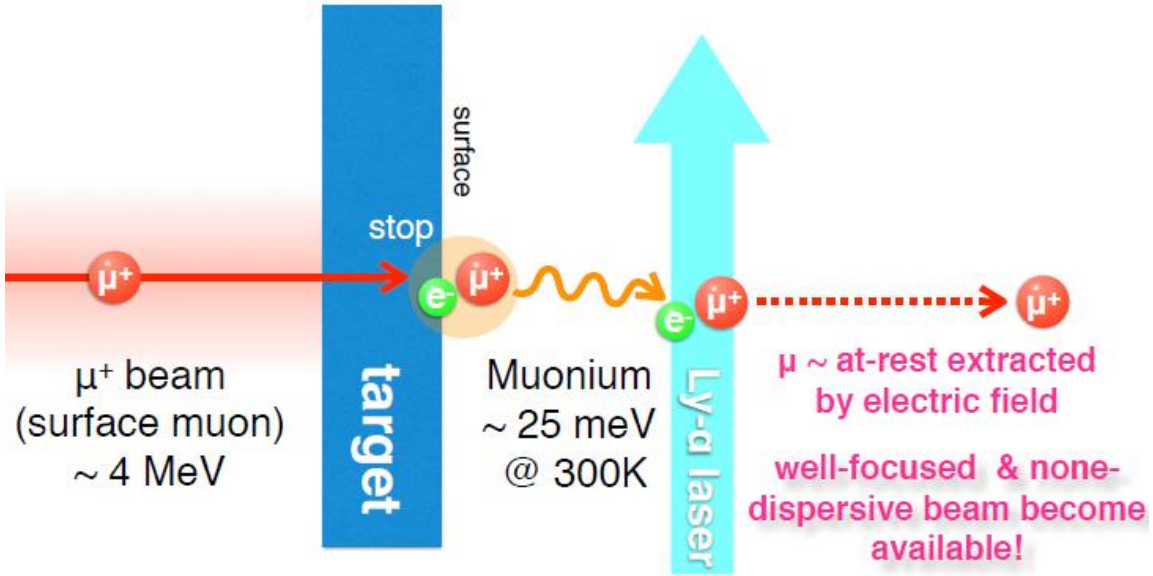
現在のH2エリアの様子

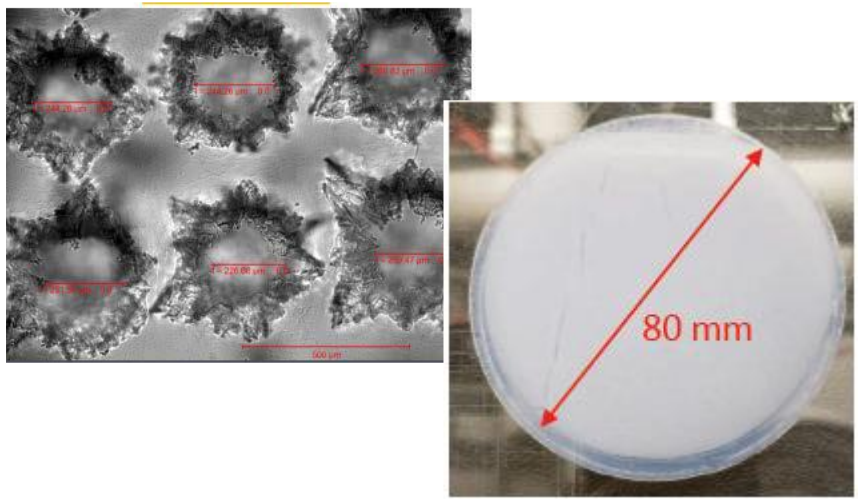


本実験を行うにはさらに拡張建屋の建設が必要

低エミッタンスミューオンビームの生成

- 表面ミューオンビーム(標的表面で生成された偏極度~100%のビーム)を使用
- このミューオンビームをエアロゲル標的で止め、ミューオニウム(e^-とμ^+の束縛状態)を生成
  - レーザー光で表面に穴を掘ったエアロゲルを使うことで生成効率が向上
- ミューオニウムから電子をはぎ取ることで低エミッタンスのミューオンビームが生成

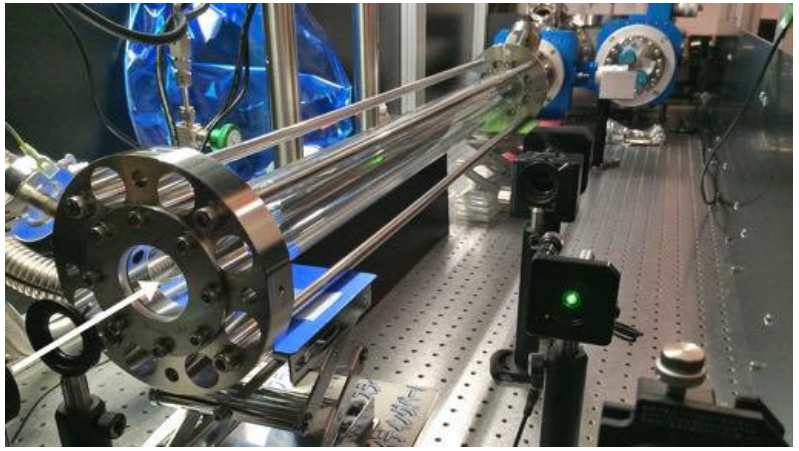




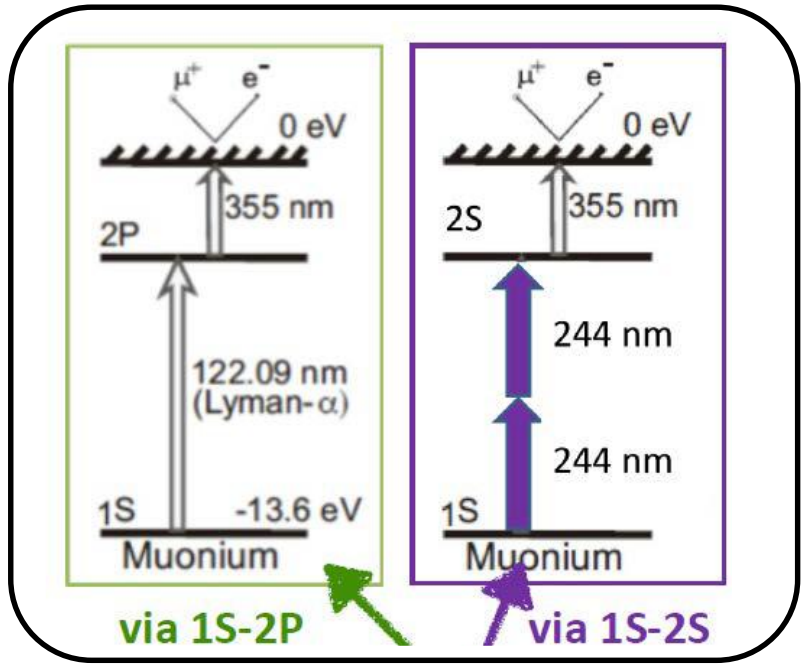
J-PARC MLFで使用されているエアロゲル標的

ミューオニウムの電離

- ミューオニウムの電離には強力なLyman-αレーザー(波長122 nm)と355 nmレーザーが必要
  - 1S-2P遷移を用いる
  - 目標感度を達成するには100 μJ/パルスの Lyman-α レーザーが必要
- 代替案として、244 nmレーザーによる2光子吸収を用いる方法も開発中
  - 1S-2S遷移を使用
  - ミューオニウム1S-2S分光実験と共同研究

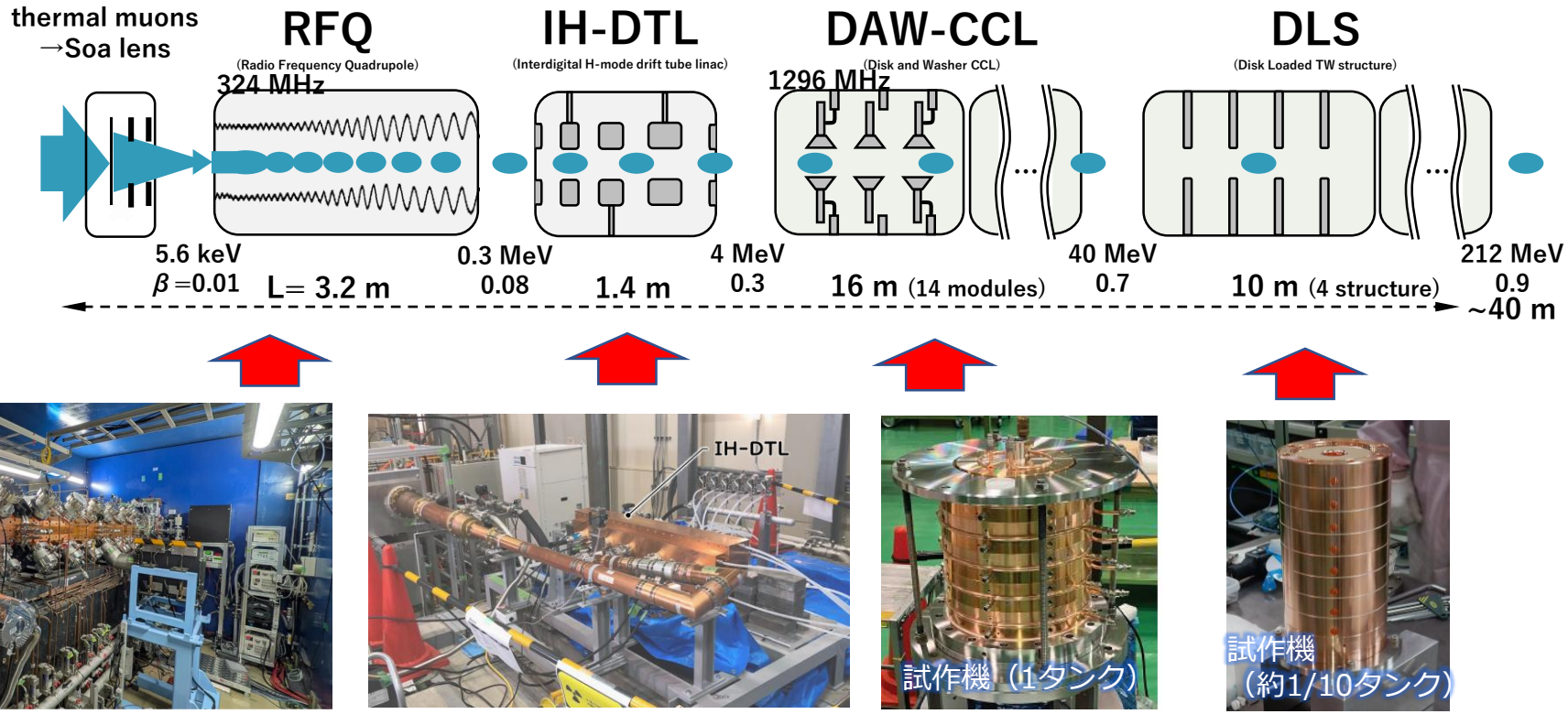


Lyman-α laser system



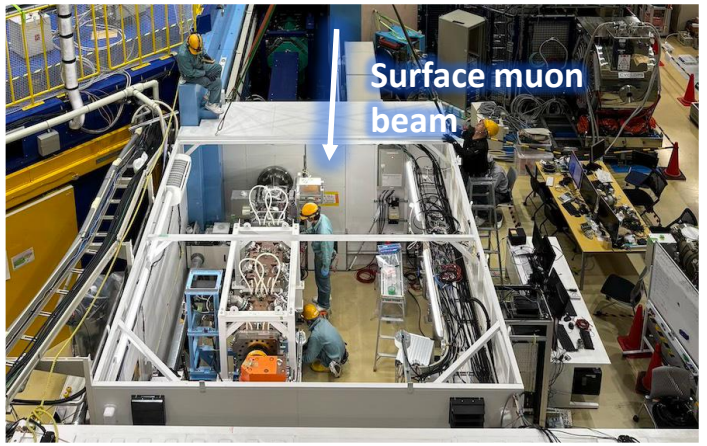
ミューオン加速

- 室温程度の運動エネルギーのミューオンビームを300 MeV/cまで線形加速
- βの変化に合わせて異なる方式の加速器を使用

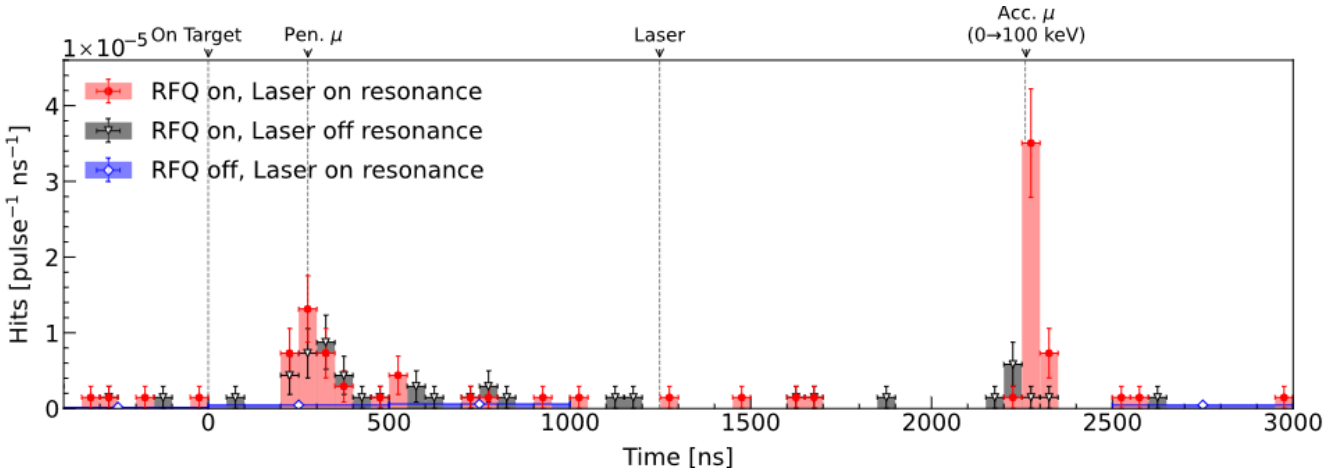


ミューオン加速の実証

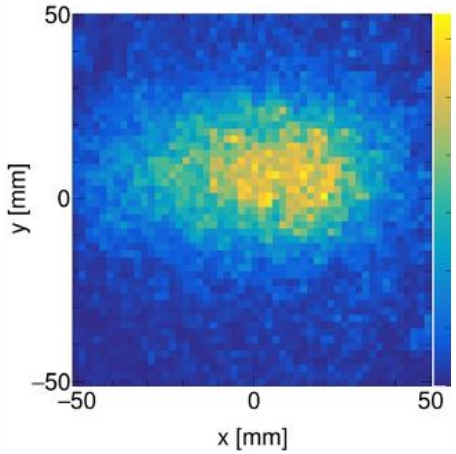
- **2025年には世界初となるミューオンビームの冷却・加速に成功！**
  - Phys. Rev. Lett. **134**, 245001 (PRL collection of the year 2025にも選出)
  - この時点ではS2エリアでの100 keVまでの加速だったが、H2エリアでの340 keVまでの加速にも成功（2026年6月）！
  - 今年度から来年度にかけて詳細測定・調整を進め、4 MeVまでの加速実証を目指す



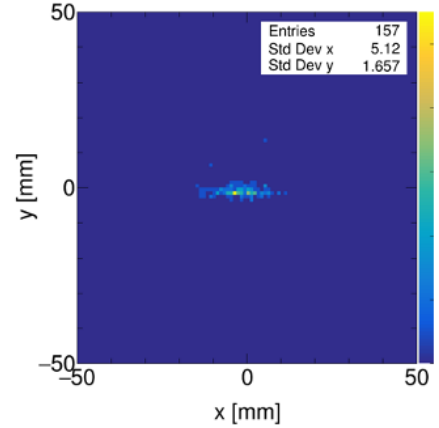
最初の加速試験を行ったJ-PARC MLF S2エリア（現在はH2エリアに場所を移して試験を継続）



標的からの飛行時間分布



冷却前のビーム分布

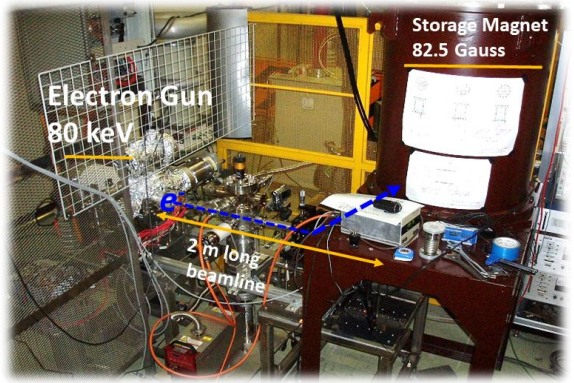


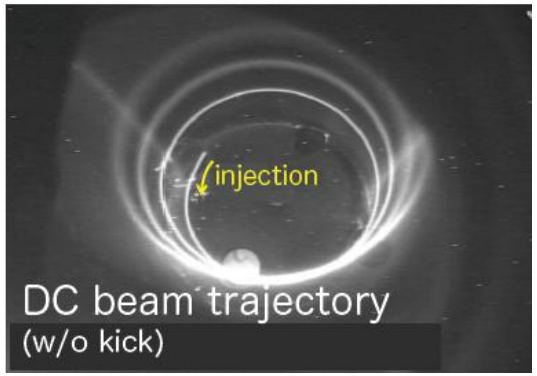
冷却・加速後のビーム分布

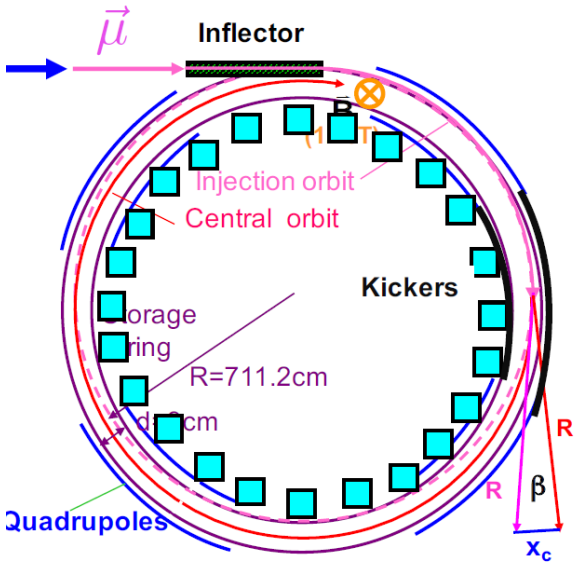
水平方向に~1/200、鉛直方向に~1/410のエミッタンスの低減に成功

3次元ビーム入射

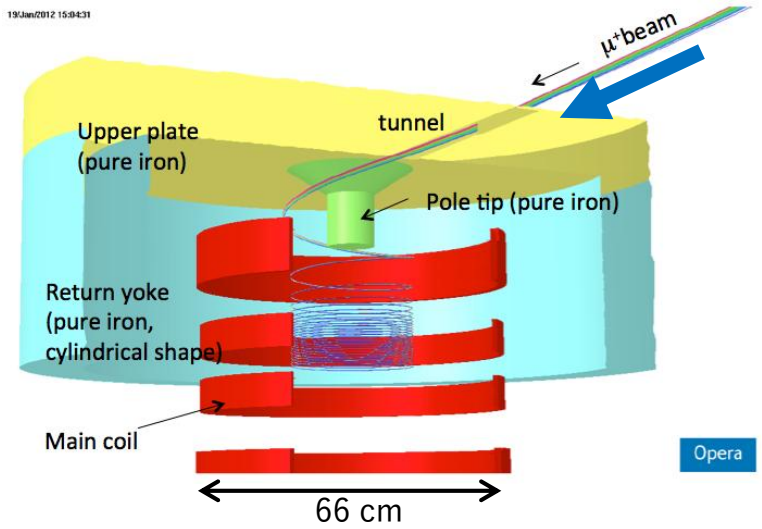
- 300 MeV/cのミューオンビームを66 cm径の蓄積領域に入射するため、３次元らせん入射法を新たに開発



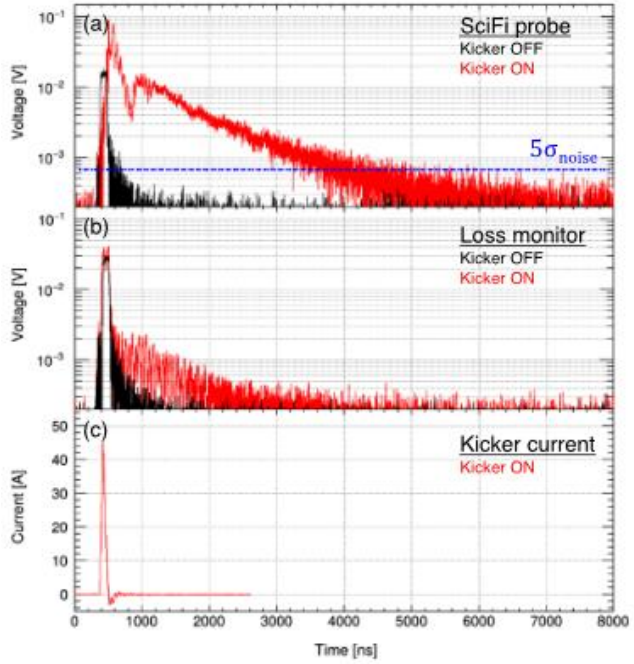




通常行われるような同一平面内での入射方法は蓄積軌道径が小さすぎて使えない



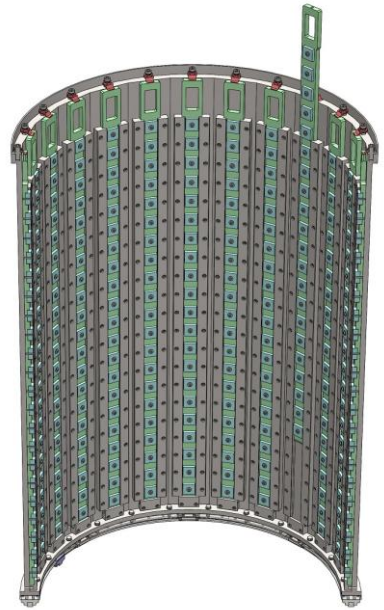
３次元入射のビーム軌道



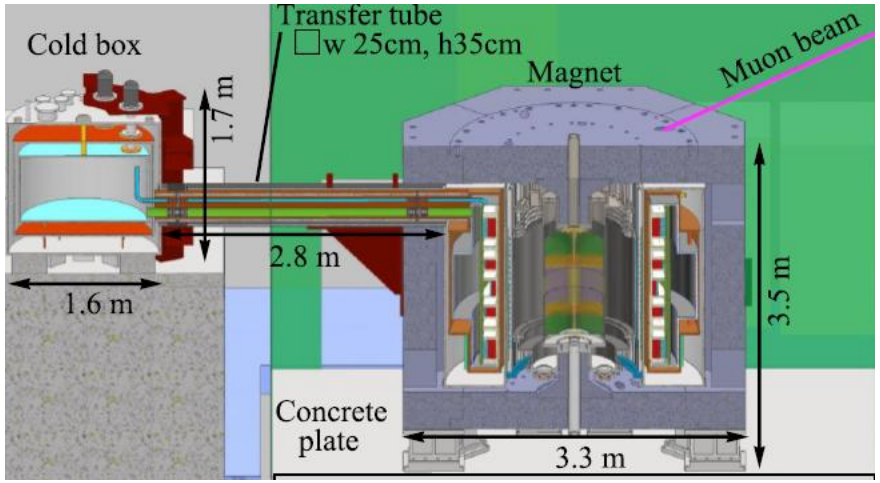
DC電子ビームを用いて３次元入射を実証
(Phys. Rev. Lett. 137 (2026), 025002)

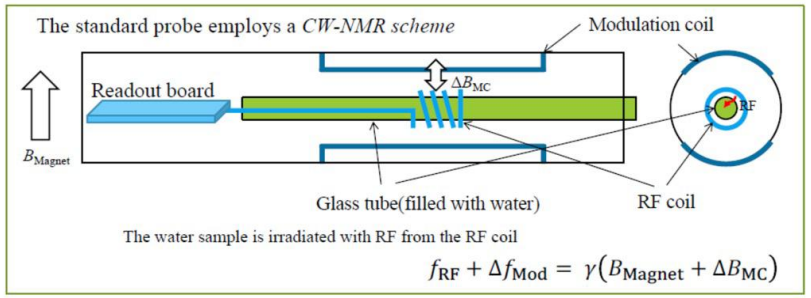
蓄積磁石

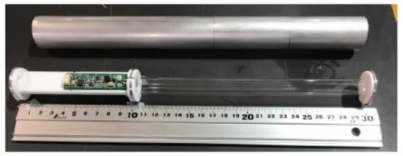
- ビームの蓄積には3 TのMRI型超電導ソレノイド磁石を使用
- NMRを用いて～数10 ppbの精度で磁場測定
- シミング（磁場調整）により、磁場の局所一様性を1 ppm以内、周回軌道平均の一様性100 ppb以内にする



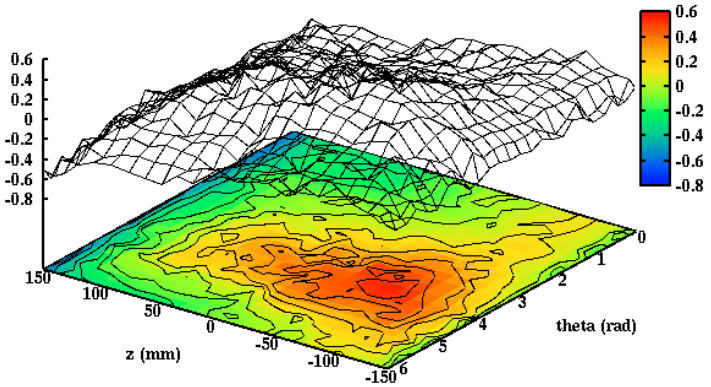
シミングのための鉄片を挿入するポケット







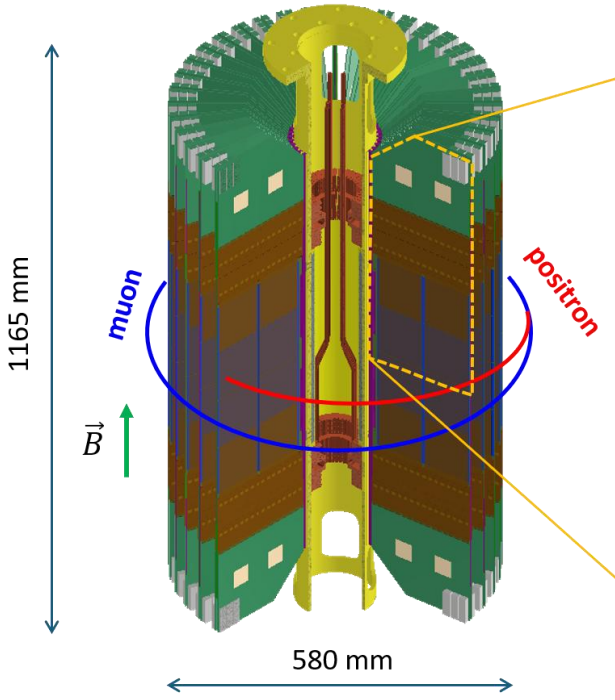
NMRプローブ



MuSEUM実験用の磁石で達成した磁場一様性

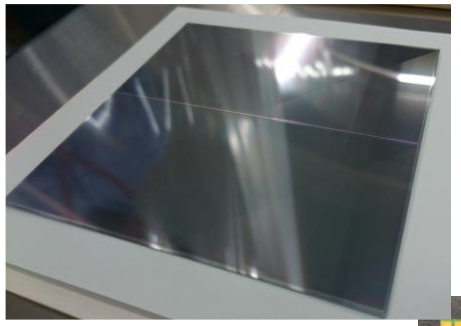
陽電子飛跡検出器

- シリコンストリップセンサーで構成された飛跡検出器で崩壊陽電子を検出
  - 40枚の検出器モジュールを放射状に配置
- 検出器への要求
  - 3 T磁場、~0.1気圧程度の真空中で稼働
  - 最大6ミューオン崩壊/nsでの測定
  - 10 μradの精度(r-z面) (EDM測定のため)
- 190 μmピッチのシリコンストリップセンサーを独自開発したASIC (SliT128D)で200 MHzのレートで読み出す



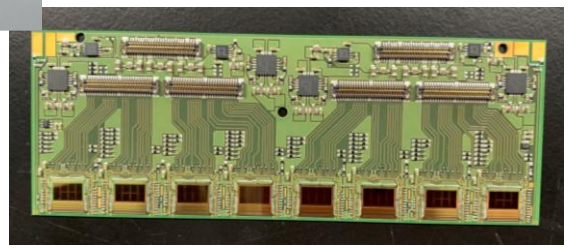


1/4ベーンモジュール



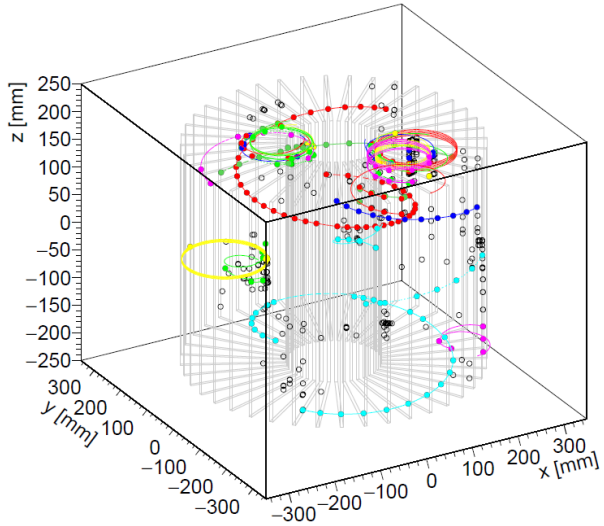
シリコンストリップセンサー

読み出しASIC基板

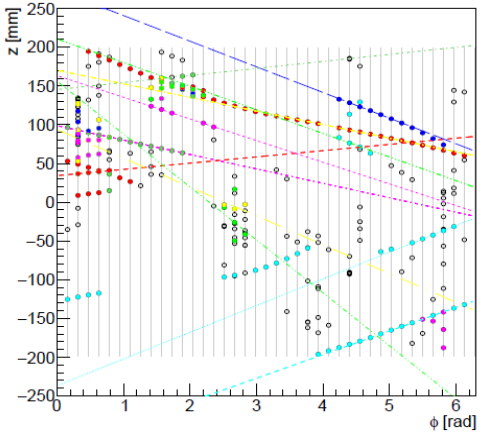


飛跡再構成

- 検出器のヒット情報から元の陽電子飛跡を再構成
- 高密度・高頻度の飛跡の到来に対応できるようハフ変換を用いた高速飛跡探索アルゴリズムを開発
  - Z-φ平面上でヒットが直線状に並ぶことを用いてパターン検出
- 近年はGPUや機械学習（Graph Neural Network）を用いた飛跡再構成にも着手

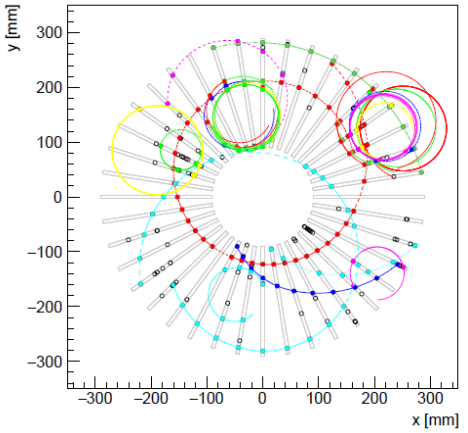


検出器シミュレーション（1個のタイムウィンドウ分）



Z-Φ面への射影

- 高運動量飛跡は直線状のヒット



X-Y面への射影

実験パラメータの比較

	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 μs		2.11 μs
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	~76 ppb	<70 ppb
EDM precision (stat.)	0.2×10^{-19} $e \cdot$ cm	–	1.5×10^{-21} $e \cdot$ cm
(syst.)	0.9×10^{-19} $e \cdot$ cm	–	0.36×10^{-21} $e \cdot$ cm

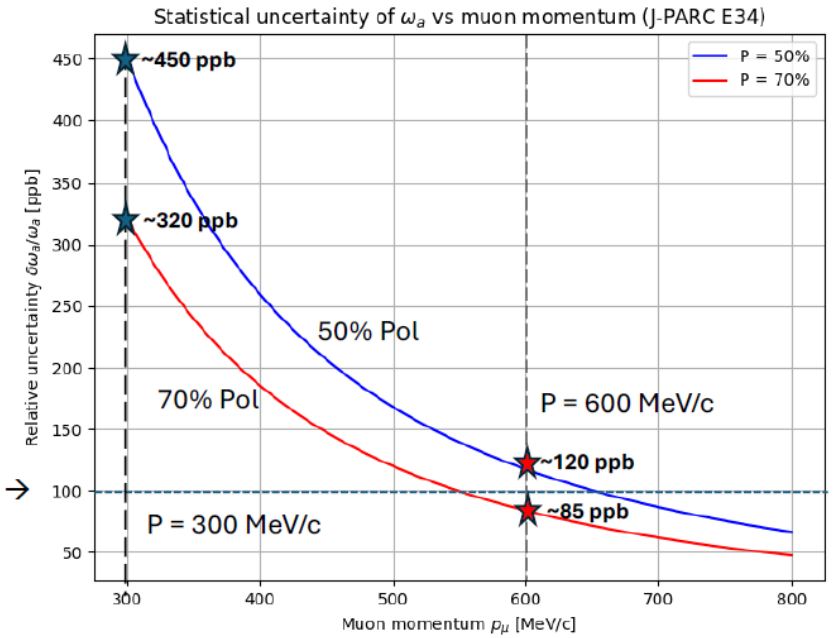
高感度化に向けて

$$\frac{\delta\omega_a}{\omega_a} = \frac{1}{\omega_a \gamma \tau_\mu P}\sqrt{\frac{2}{NA^2}}$$

$$\omega_a = a_\mu \frac{eB}{m}$$

- 当初の計画では2.5年程度の期間で0.45 ppmの統計誤差を目標
- FNALの実験精度を超えるため、新たな実験計画を策定中
  - 偏極度の向上 (50%→70~80%)
  - ミューオンビームの高運動量化 (300 MeV/c→600 MeV/c)
  - 蓄積磁場の増強 (3 T → 6 T)

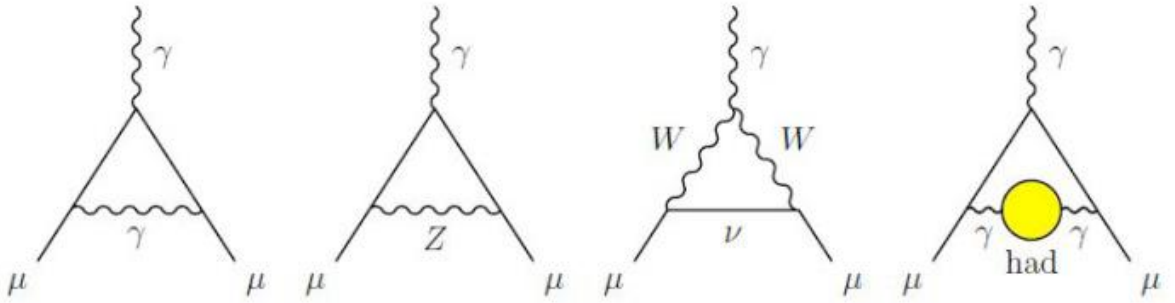
FNAL E989 統計誤差 →



PoS EPS-HEP2025, 427 (2026)

ミューオンg-2の理論計算

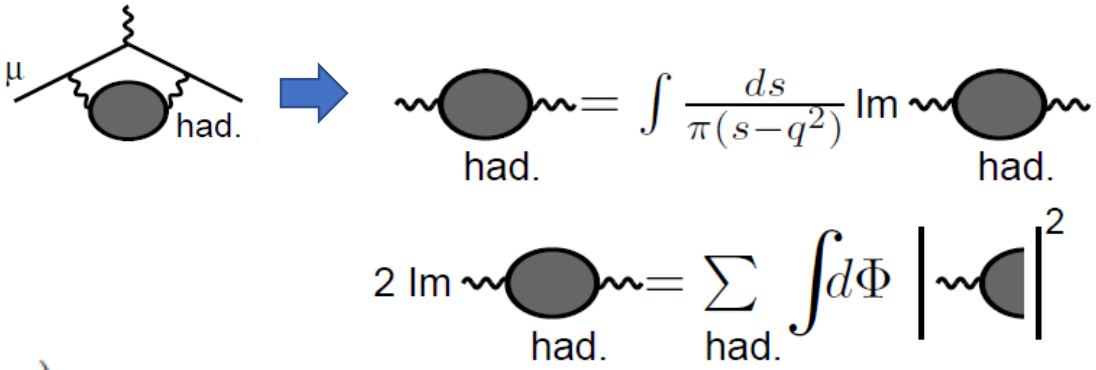
- QED
  - (α/π)の摂動展開により、高次のループまで含めることで計算が収束
  - 5ループまでの計算が行われ、$\Delta a_\mu(\mathrm{QED}) \sim 10^{-13}$
- 電弱相互作用
  - $(m_\mu/m_Z)^2$, $(m_\mu/m_W)^2$で結合が抑制されるため、低次のループでも高い精度で計算が可能
  - 2ループまでの計算で、$\Delta a_\mu(\mathrm{EW}) \sim 10^{-11}$
- ハドロン
  - α_s~1なので摂動計算が使えない
  - クォークの閉じ込めのため、軽いハドロン（π, ρ, ωなど）の共鳴が主に寄与する



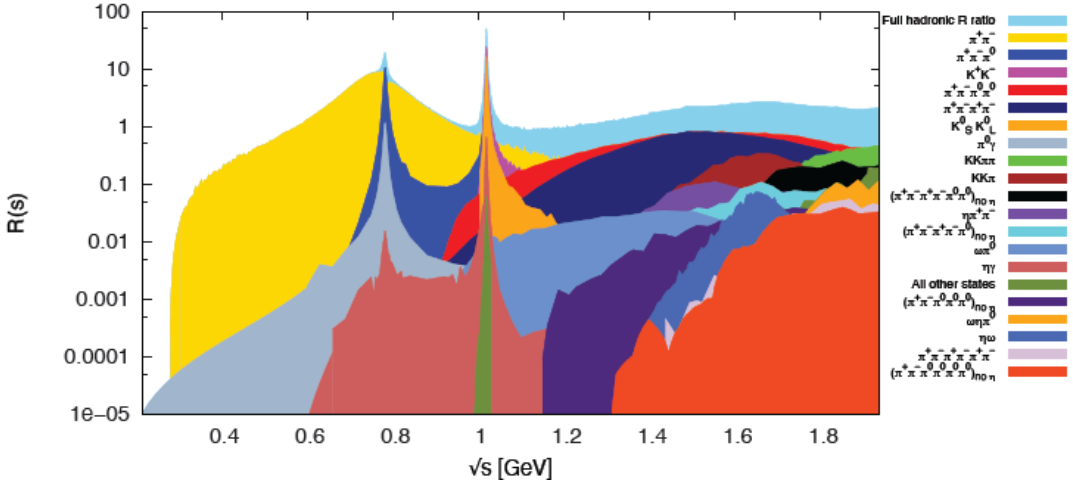
QED　　電弱相互作用　　ハドロン

ハドロン真空偏極(HVP)の計算手法(1)

- 主流の計算手法の一つが
  e^+e^-→hadronsデータを用いるもの
  - 分散関係・光学定理を用いると、



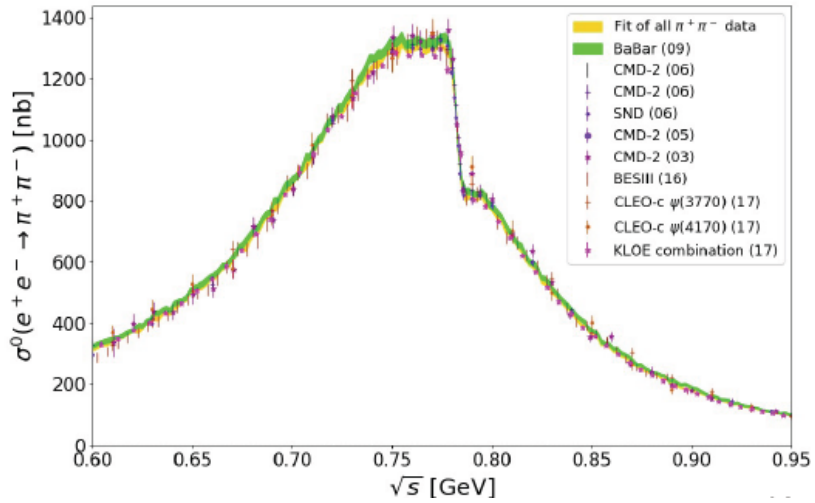
$$a_\mu^{\mathrm{HVP,LO}} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int ds \, \frac{R(s)\hat{K}(s)}{s^2} \qquad R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \to \mathrm{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)}$$



[KNT18, PRD97, 114025]

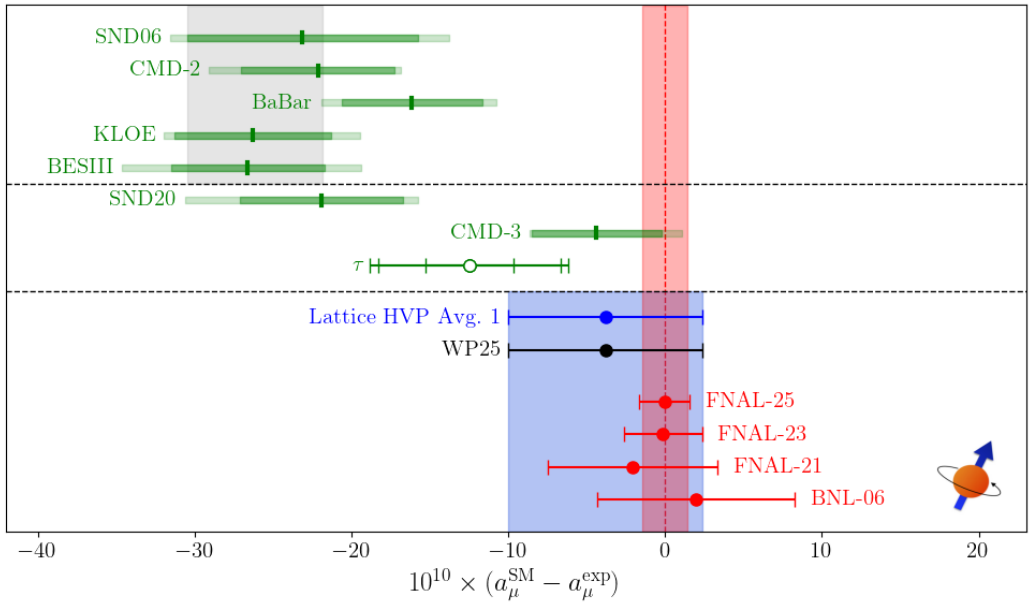
- hadronic channels for energies below 2 GeV
- dominance of 2π

[KNT19, PRD101, 014029]



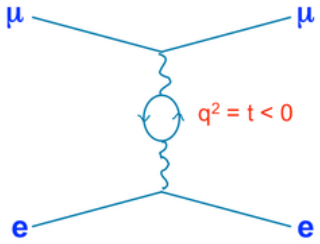
ハドロン真空偏極(HVP)の計算手法(2)

- e^+e^-→hadronsのデータからの計算
  - BNL/FNALの結果と大きな乖離
  - 一方で、使用するデータ間（特にe^+e^-→$\pi^+\pi^-$）に乖離が見られ始める
- 格子QCD
  - QCDの第1原理からクォーク、グルーオンの相互作用を時空を細かい格子に区切り、非摂動的に計算
  - 近年の計算能力の向上により、細かい格子での計算が可能になり精度が改善
  - 2020年のBMWグループの発表を皮切りに格子QCD計算による精度向上が進む
  - BNL/FNALの結果には近づく



Muon g-2 Theory Initiative

- 複数の研究グループによって理論計算や元となるデータの測定
  → 体系的にまとめ、共通の理論予測を定める必要性
- **ミューオンg-2の理論・実験の研究者らによって"Muon g-2 theory initiative"が2017年に設立**
- 2020年に最初のWhite Paperを発表
  - この時点ではHVPの計算には従来通り、e^+e^-データを用いた理論値を採用
- 2025年に発表されたWhite paperの改訂版では格子QCDの計算結果をHVPに採用
- 理論値はまだ決着しておらず、今後のe^+e^-データの更新や格子QCD計算の進展に期待
  - 新たな手法として、μe→ μe散乱データからHVP計算を行うMUonE実験も開始





9th Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative
@Univ. Connecticut, Aug. 3-7, 2026

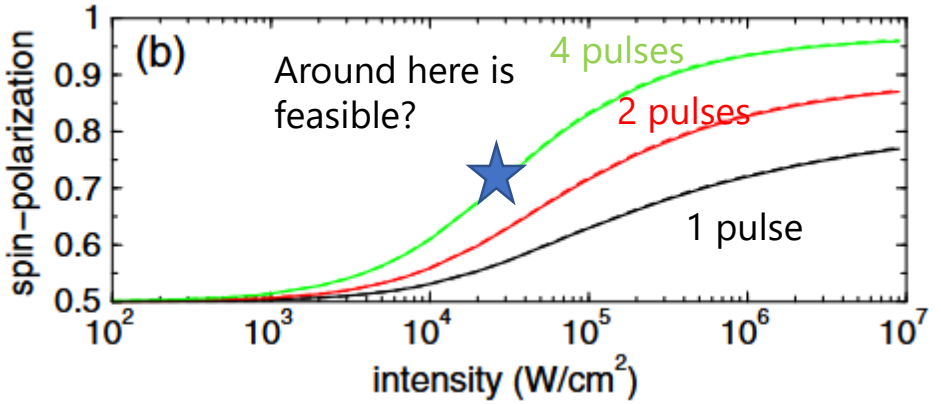
まとめ

- ミューオンg-2は新物理探索への重要なプローブ
- FNALの実験が完了し、過去の実験値と無矛盾
  - 精度は127 ppbに到達
- J-PARCではBNL/FNALとは異なる手法を用い、さらなる精度向上を目指した実験計画が進行中
  - 実験の鍵となるミューオンビームの冷却・加速にも成功
- 理論計算はHVPにe^+e^-データを用いる手法では使用するデータ間に不一致、その一方で格子QCDを用いる手法の精度が近年大幅に改善
  - 理論計算の収束が今後の課題

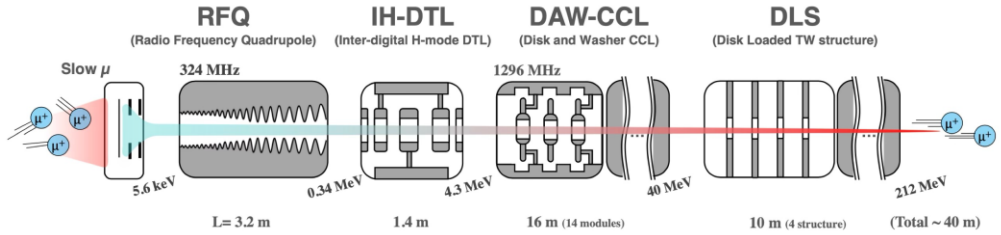
補足資料

高感度化に向けて

- 偏極度の向上
  - 低エミッタンスミューオンビーム生成の過程で50%に偏極度が減少している
  - 光ポンピングという手法で偏極度を回復できる可能性
- 高運動量化
  - 現在の設計では最後の加速はSバンド空洞(20 MV/m)を想定
  - 高い加速勾配の加速空洞（e.g. Cバンド~35 MV/m)を使うことでビームラインを延長せずに600 MeV/cまで加速可能な見込み



Spin polarization by an optical pumping (J. Opt. Soc. Am. B 29 (2012) 2420-2424)



Current LINAC design

New S-band or C-band cavities

ミューオニウム偏極

- ミューオニウムを生成する際に、偏極度は50%に低下
- 異なるエネルギー準位にはあるが、4 GHzの微細構造に対して、室温でのドップラー広がりが80 GHz程度あるため、状態を選んでの励起は無理
- 円偏光したVUV光をミューオニウムに照射することで、偏極度の向上が可能
  - 核スピンで使われる"光ポンピング"の手法と同じ
  - 円偏光した光子の角運動量を原子核（ミューオン）が吸収

