

# ミュオンで探求する基礎物理

KEK素粒子原子核研究所/J-PARCセンター

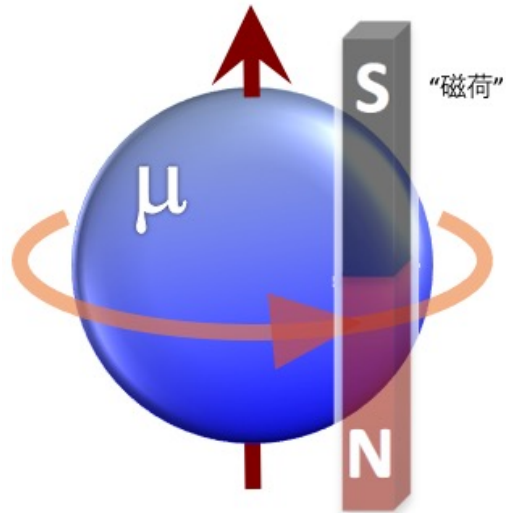
三部 勉

mibe@post.kek.jp

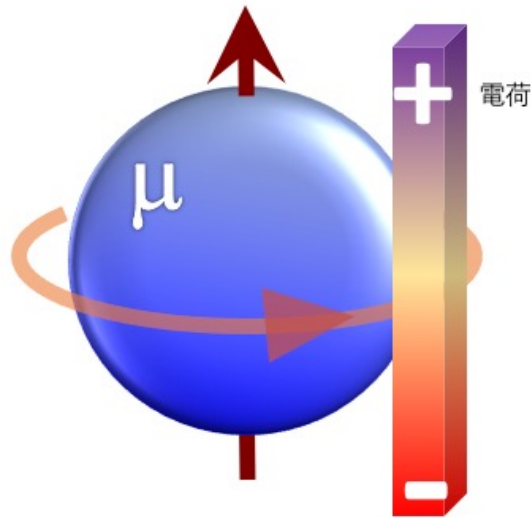


J-PARCに新設されたビームラインでミュオン自身もつ性質を研究

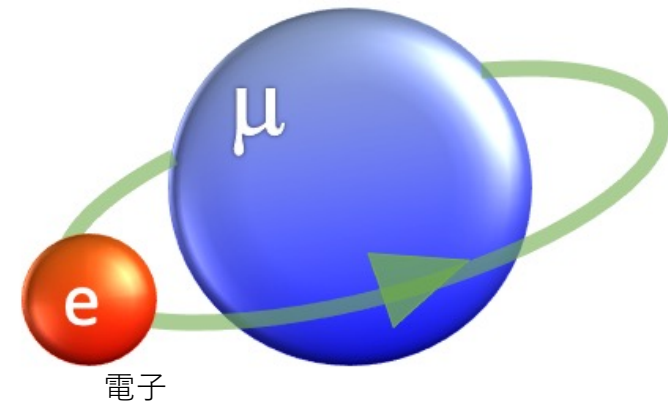
異常磁気双極子能率  
( $g-2$ )



電気双極子能率  
(EDM)



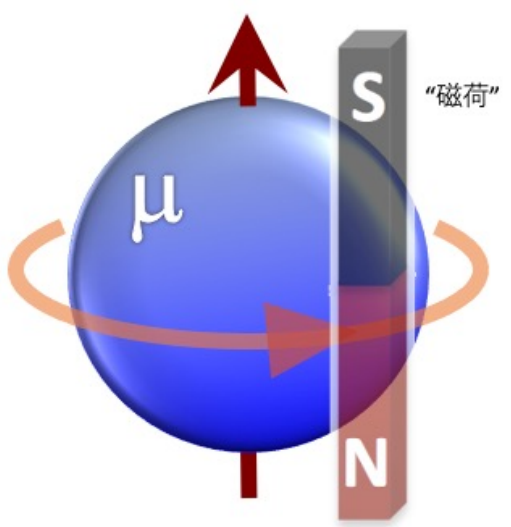
ミュオニウム  
(Mu)



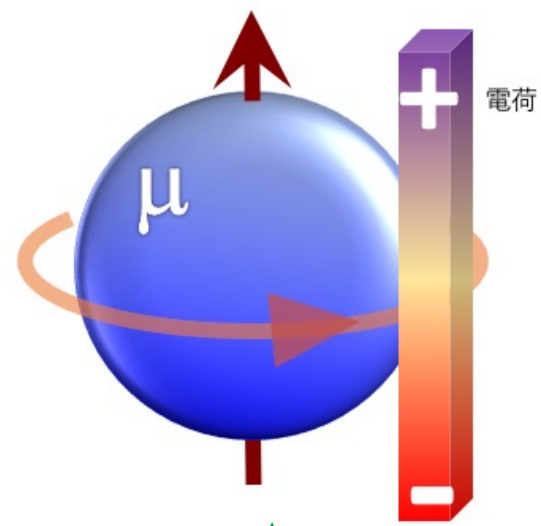
素粒子標準理論を超える物理法則を多角的に研究

J-PARCに新設されたビームラインでミュオン自身もつ性質を研究

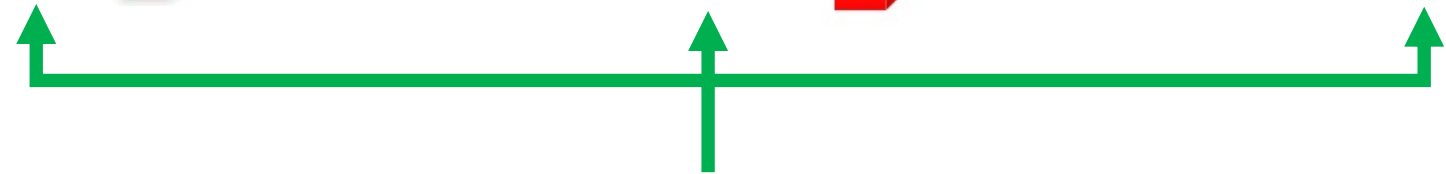
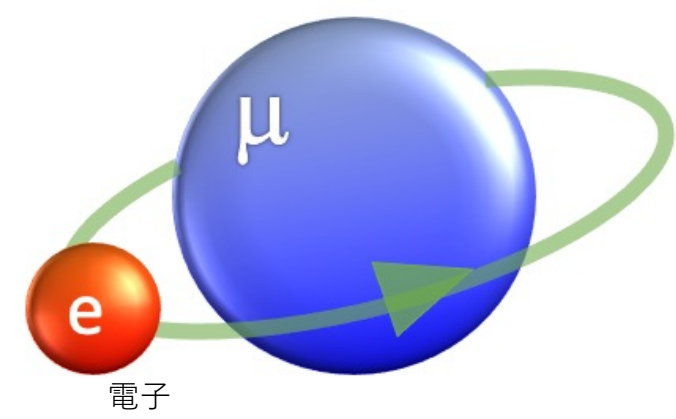
異常磁気双極子能率  
( $g-2$ )



電気双極子能率  
(EDM)

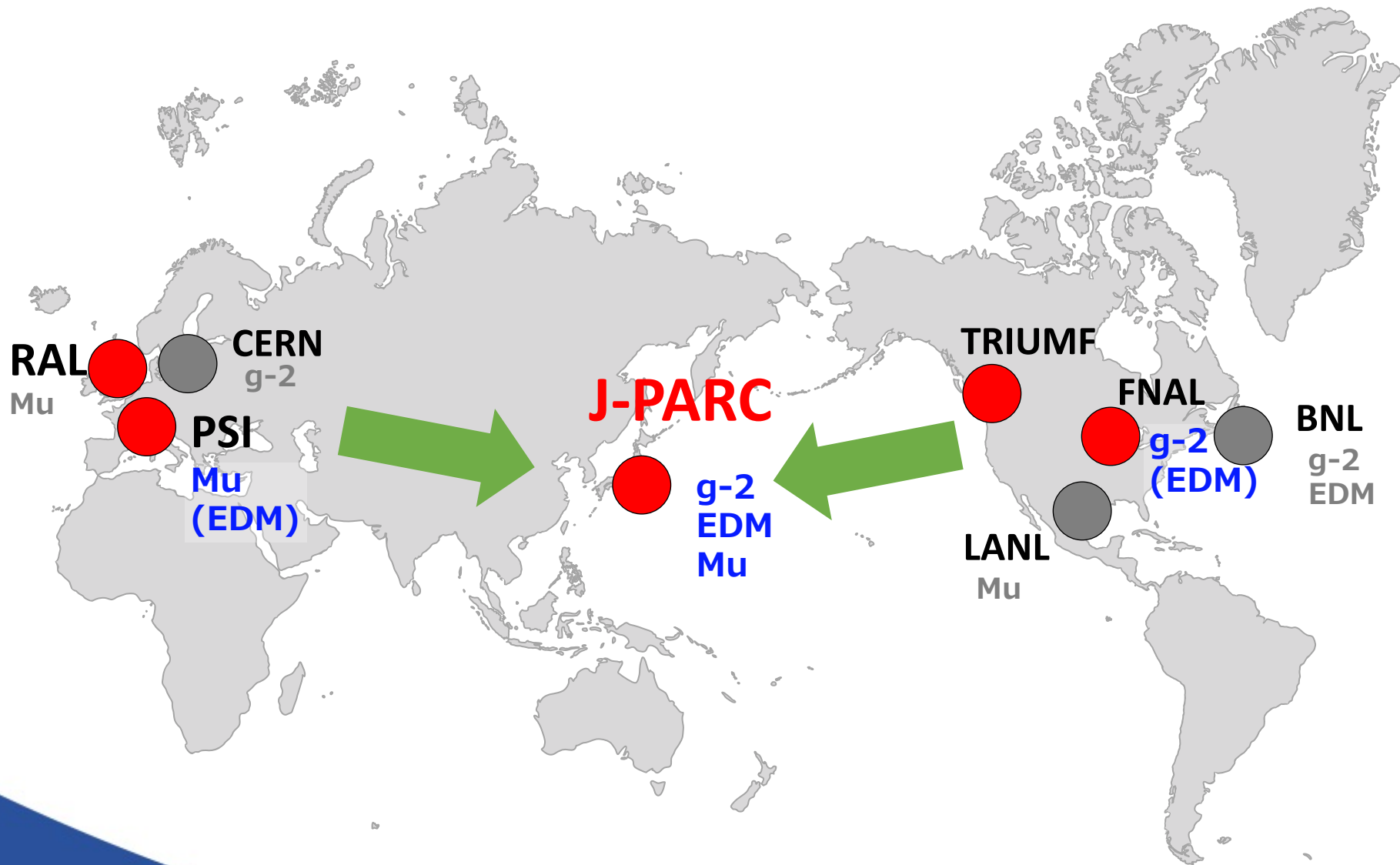


ミュオニウム  
(Mu)



超低速ミュオンで高精度測定

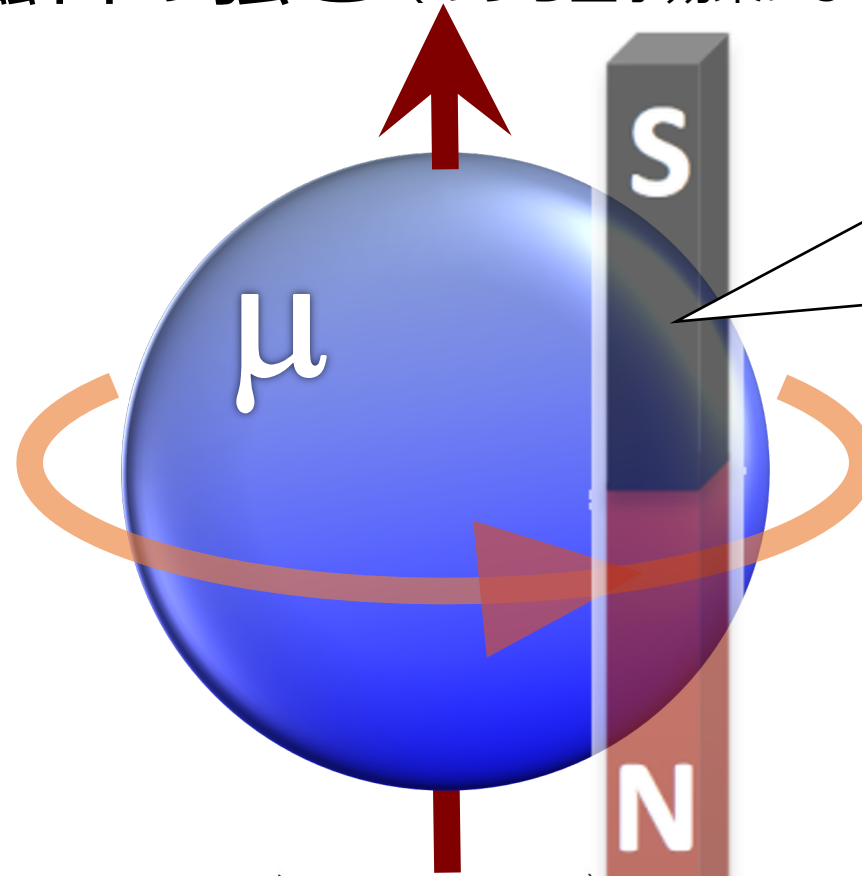
# 世界のミュオン施設と基礎物理研究



新ビームラインによりJ-PARCですべての研究が実施可能に(世界で唯一)  
超低速ミュオンで技術革新!



## 素粒子が持つ磁石の強さ (のうち量子効果によるもの)



磁石の強さを決めているのは、全ての素粒子およびそれらの相互作用 (のうちミュオンのスピンと結合するもの)

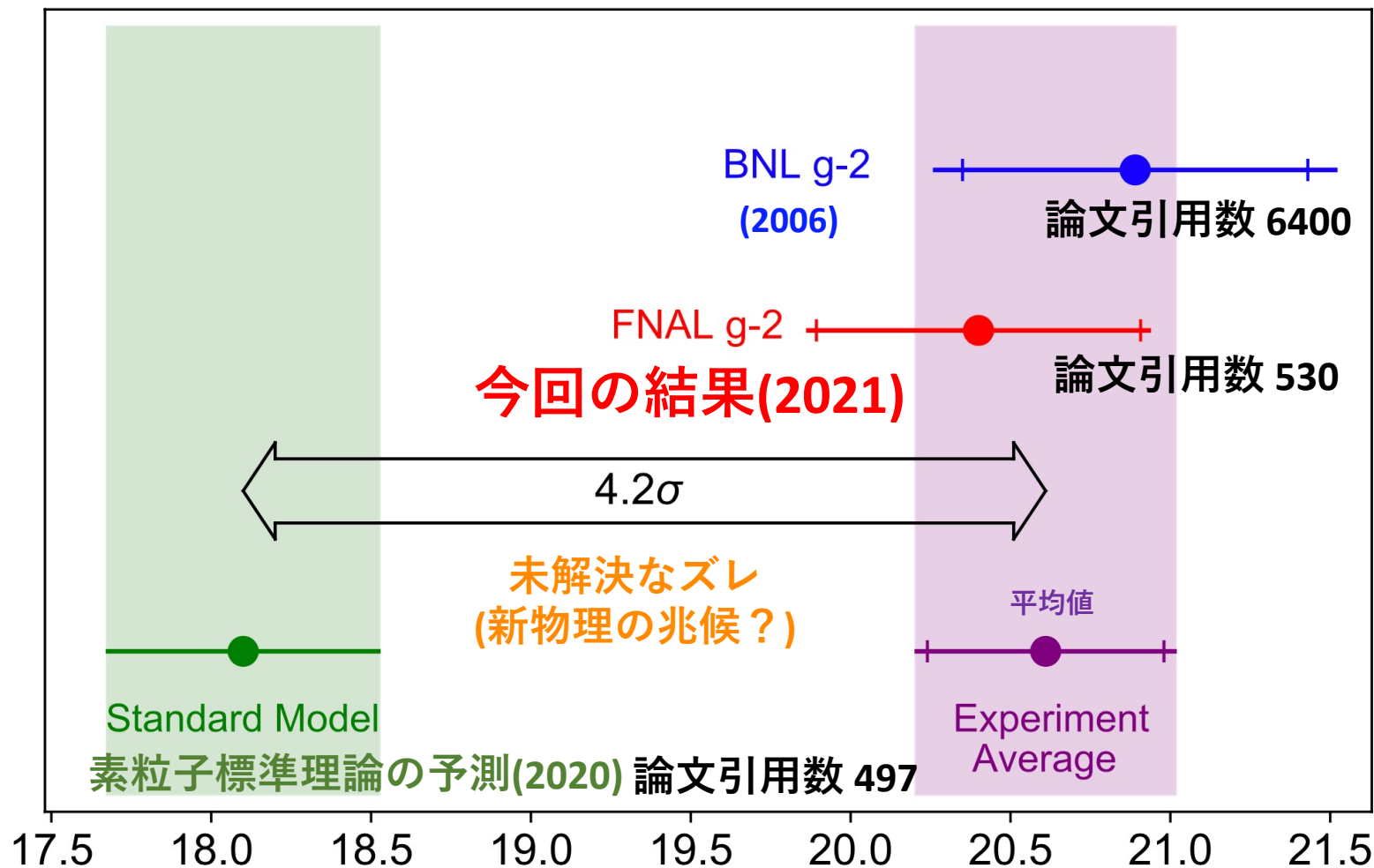
磁石の強さ

$$a_{\mu} = \frac{g - 2}{2} = \text{[diagram of a red circle with a wavy line and two muon lines]} = \text{[diagram of a muon loop with a photon and a muon line]} + \text{[diagram of a muon loop with a hadron]} + \text{[diagram of a muon loop with W bosons]} + \text{[diagram of a muon loop with a neutrino and a scalar particle]}$$

電磁気力      強い力      弱い力      未知の力・素粒子

- 2021年4月8日午前0時(日本時間) 発表

Abi, B. et al. *Phys. Rev. Lett.* **126**, 141801 (2021).



# 素粒子標準理論の予測

- 2020年に出版された論文で最も多く引用された (1月31日現在 497回)

<https://twitter.com/inspirehep/status/1484544547967406089?cxt=HHwWksC4rdTZIJopAAAA>

- 2021年6月28日-7月2日 KEKで国際研究会をホスト

- 日本・ドイツ・米国・フランス・イタリアなどから27カ国、280名の参加



<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2021/08/20210804/>

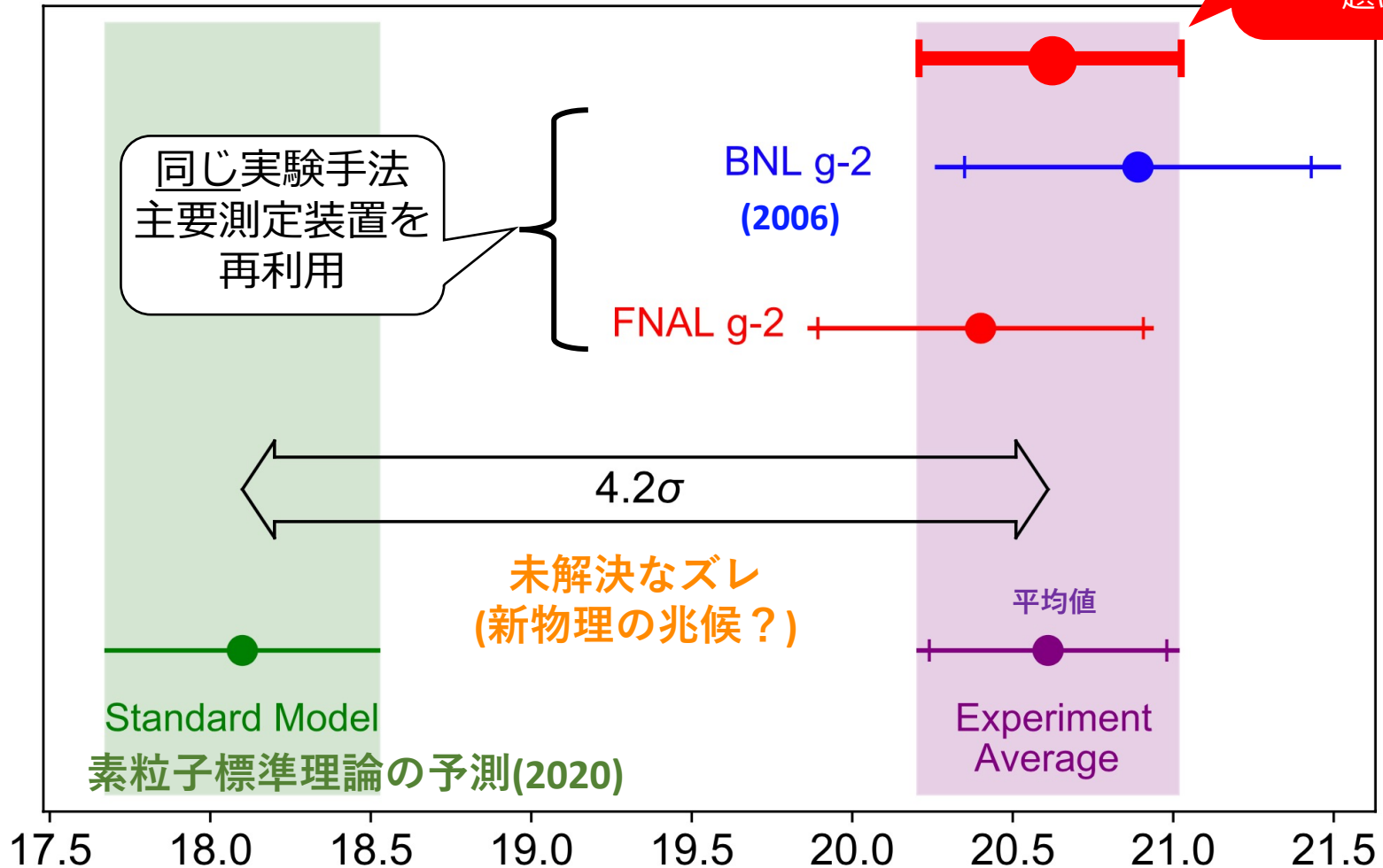


# 米フェルミ国立研究所の発表

第1回メディアサロン「標準理論を超える新物理発見なるか!? ミュオン $g-2$  実験の最新情報を徹底解説」より

- 2021年4月8日午前0時(日本時間) 発表

Abi, B. et al. *Phys. Rev. Lett.* **126**, 141801 (2021).





# 理論値と実験値のズレは何を示唆するのか？

- もし新しい物理法則が存在する場合、それ付随する未知の素粒子を示唆

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・北原氏による整理)

## 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	$\tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow (h \tilde{\chi}_1^0) (W^\pm \tilde{\chi}_1^0)$ $pp \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell}^*$
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) μ-τ		10~200 MeV	$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- Z'$ $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} Z'$
Vector-like lepton		< 7 TeV	$h, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

おおよそ10 TeV以下の領域に新粒子を示唆

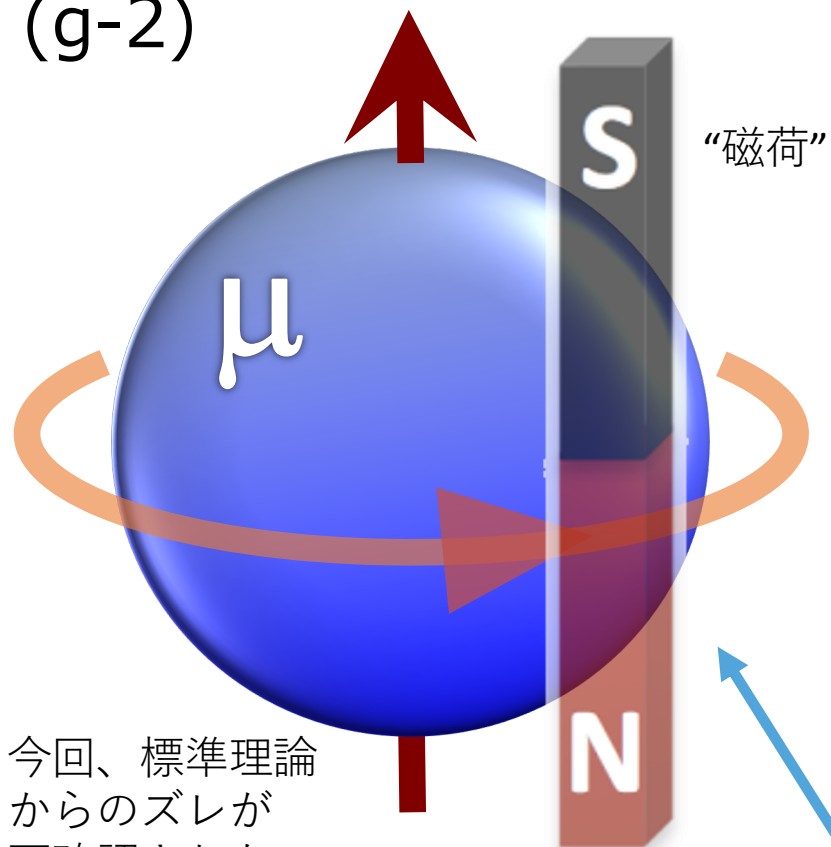
Precision measurement で探る新物理  
北原鉄平 (名古屋大学 高等研究院/KMI); 高エネルギー将来計画委員会第9回勉強会, 2021.4.22, オンライン

ただし、g-2のズレだけからはどれが正しい物理法則かわからない。  
**多角的なアプローチが重要。**

例) **時間反転対称性の破れ (EDM)**、**ミュオニウム**・・・、**フレーバー対称性 (ミュオン-電子転換)**

# ミュオンg-2 と EDM

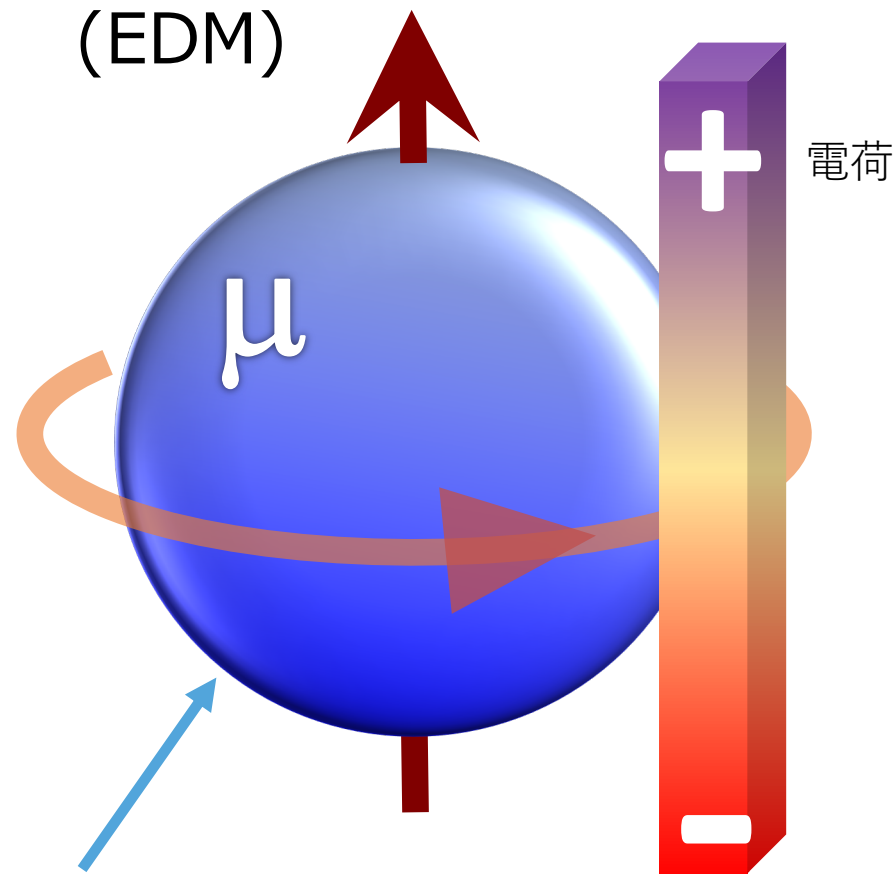
異常磁気双極子能率  
(g-2)



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

- 電気双極子能率(EDM)とは粒子が持つ電氣的性質の一つで、**時間反転対称性(T)、空間反転対称性(P)を同時に破る**。ミュオンg-2に新物理が見えている場合、EDMを同時に測定すれば、**新物理がT対称性・P対称性を破るのかどうか**調べることができる。物質優勢宇宙で必要とされる未発見のCP対称性の破れの理解にも重要

# ミュオンg-2/EDM実験

2009年 提案  
2015年 技術設計書完成  
2010-2018年 ミュオン冷却・加速実証  
**2022年 Hライン完成・初ビーム**  
2027年頃～ 実験開始（予定）

Hライン（新）

**今回完成**



$\mu^+$  (4 MeV) 冷却  $\mu^+$  (25 meV)

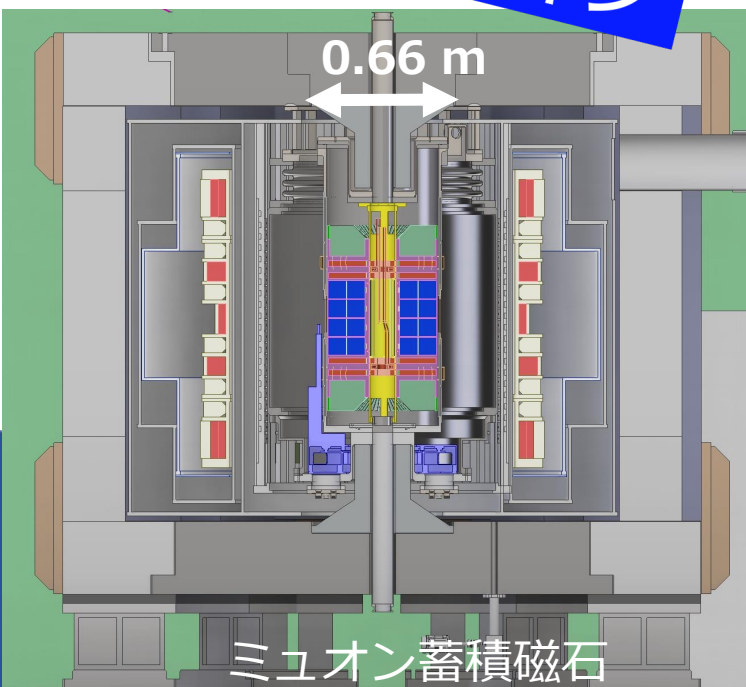
**超低速ミュオン**

**加速**

$\mu^+$  (210 MeV) 入射

蓄積

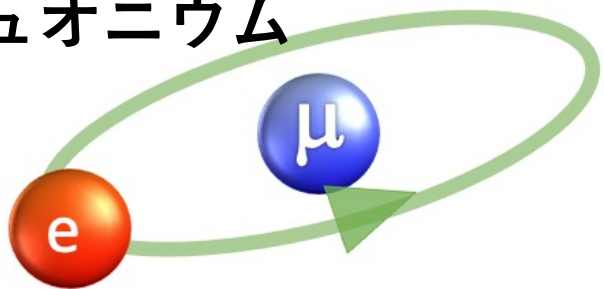
ミュオンを**冷却**・**加速**・**小さな磁石に蓄積**する  
新しい方法によりg-2とEDMを超精密測定



**KEK 2021**

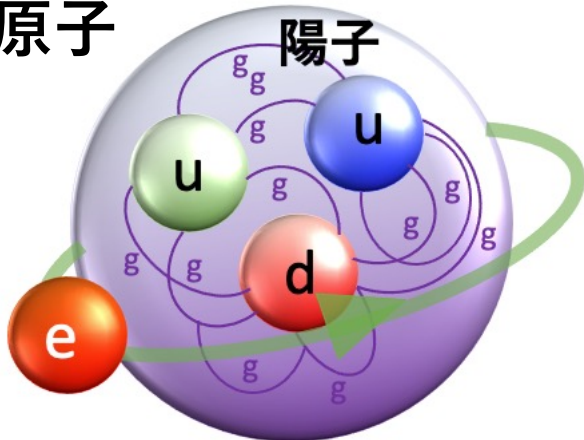


## ミュオニウム

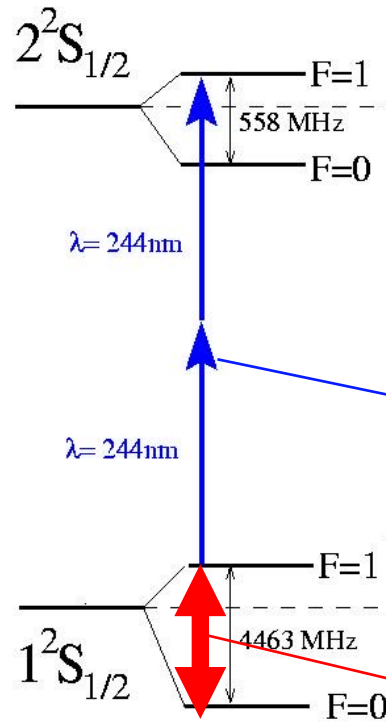


- レプトン( $\mu^+, e^-$ )だけで構成される水素のような原子。
- 通常の原子に比べて理論的な不定性が極めて小さい。

## 水素原子



## ミュオニウムのエネルギー準位

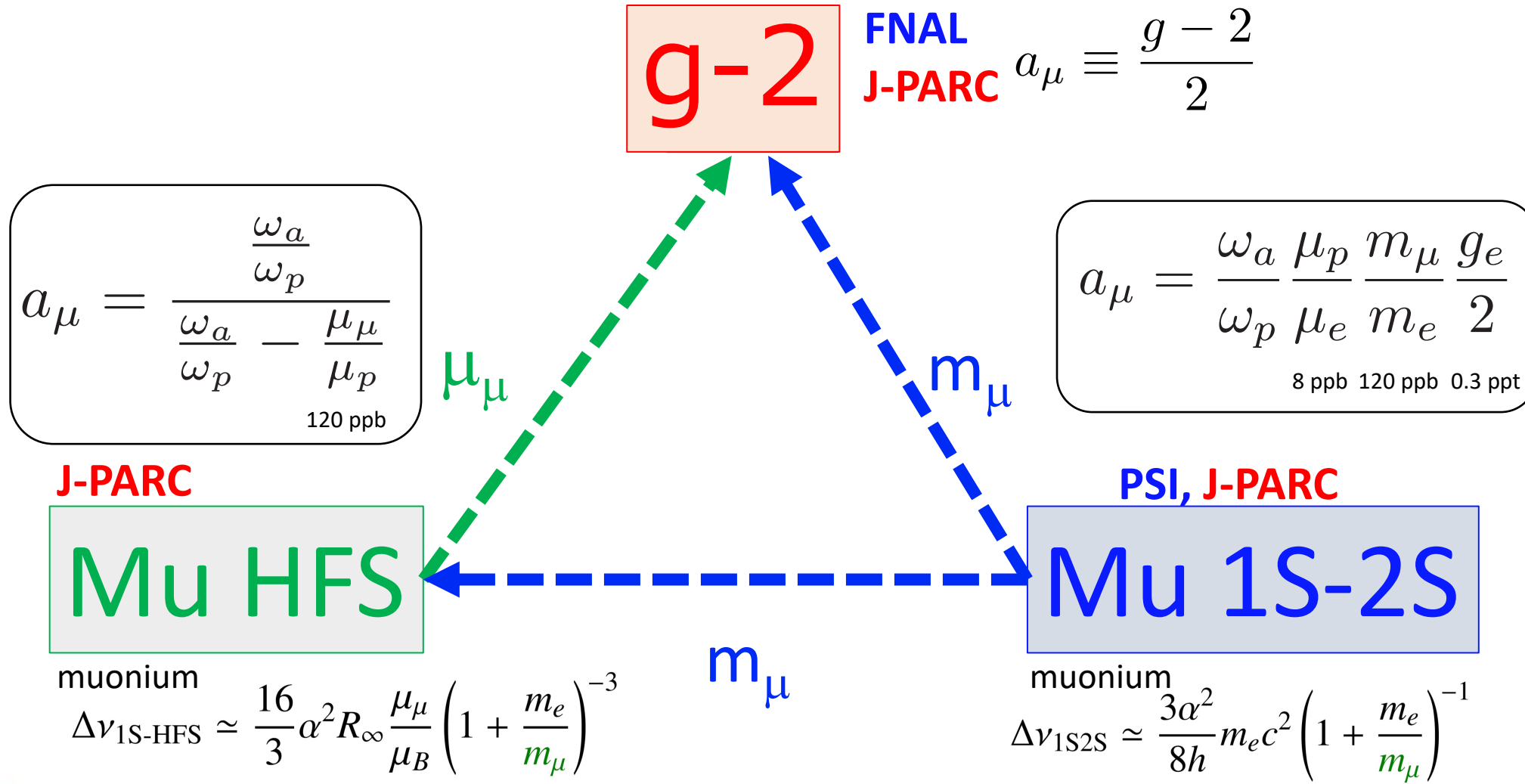


**1S-2S  
(ミュオン質量)**

**超微細構造分裂  
HFS (磁気能率)**

(not to scale)

# g-2とミュオニウムの三角関係について

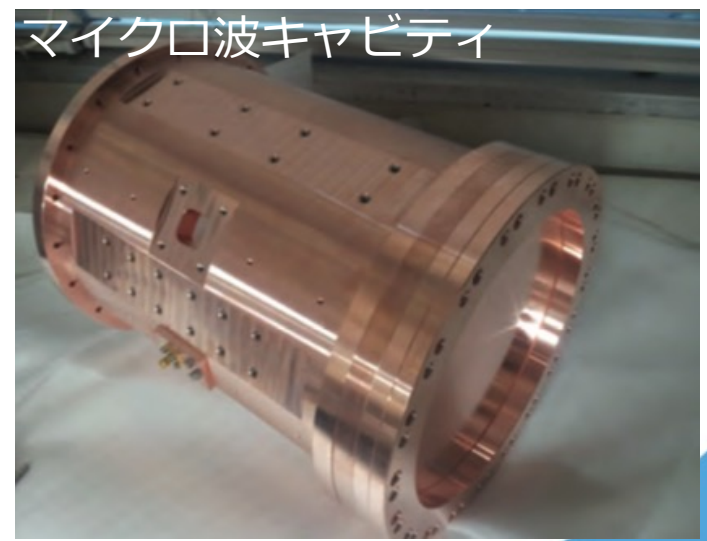
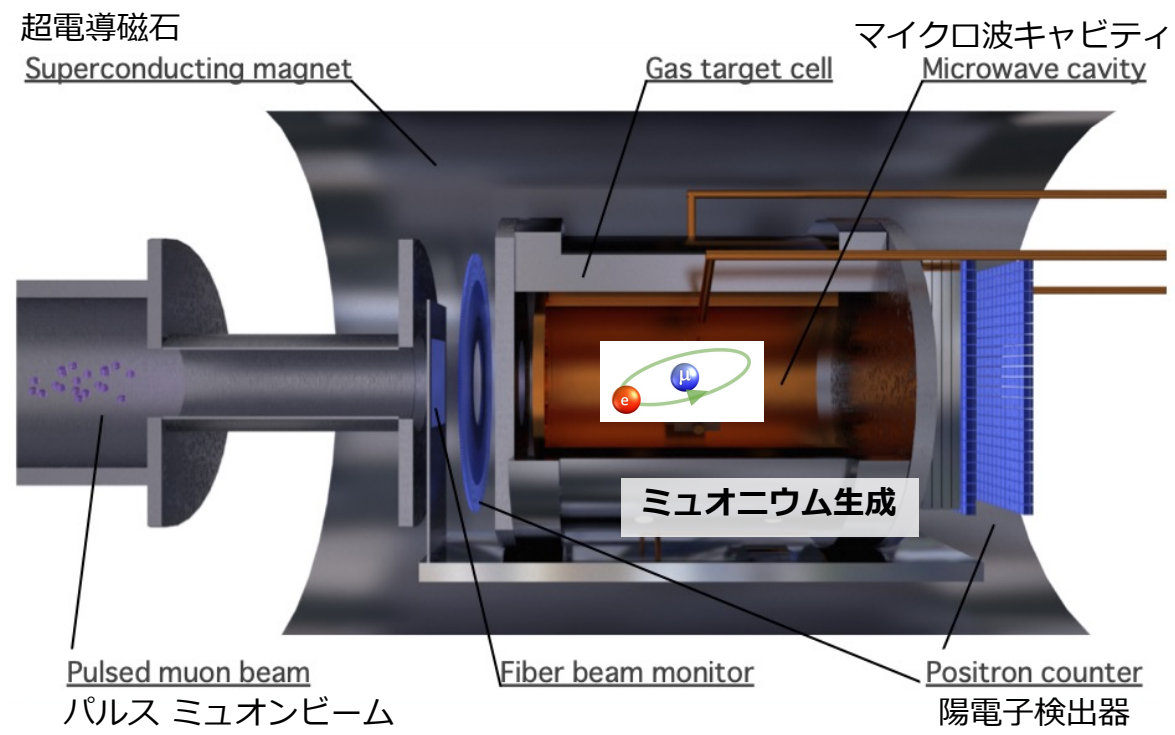


お互いの測定が相互に関連（三角関係）。  
 すべて測定して三角形を閉じられるのはJ-PARCだけ

# ミュオニウムの超微細構造分裂(HFS)

## H1実験エリア (新)

大強度・パルスビームと超精密磁場・先端測定技術を融合し、世界成功精度でHFS測定



・ 2021.08.10  
[プレスリリース「逆転の発想『ラビ振動分光』でミュオニウム原子を精密に測定」](#)

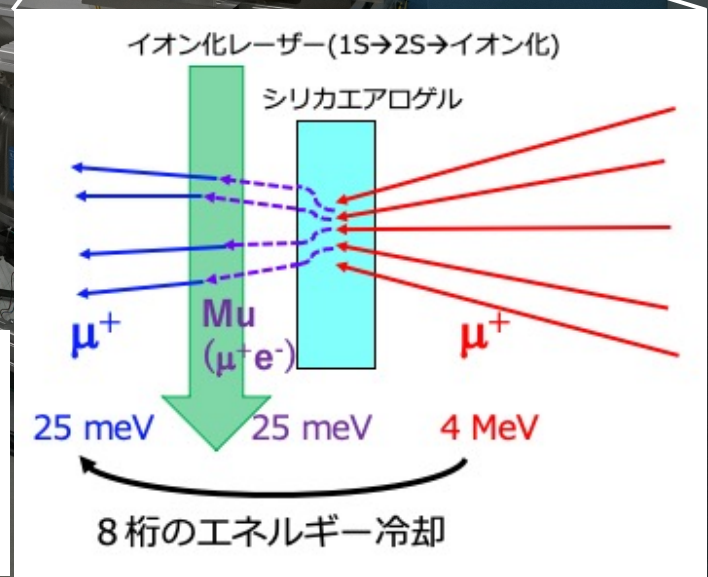
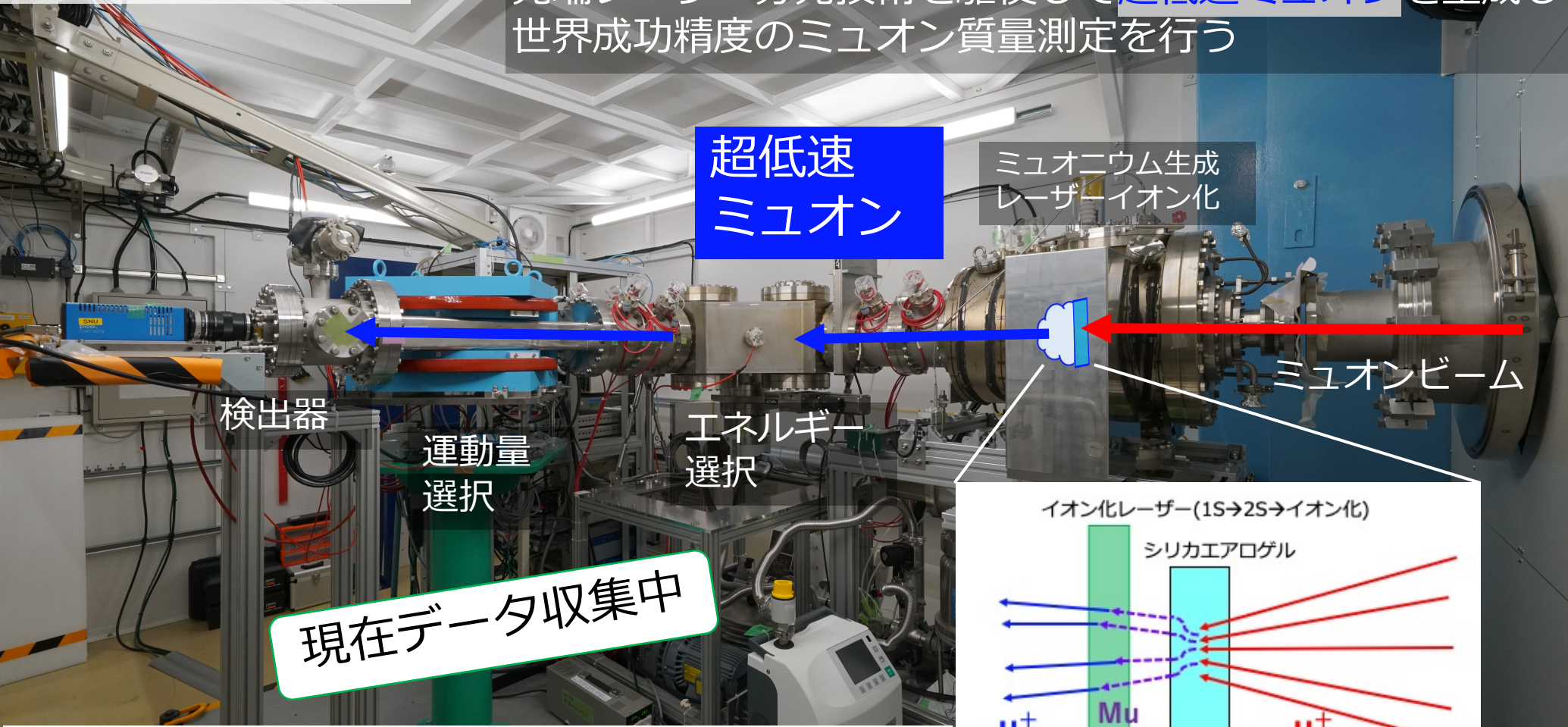
・ 2021.04.16  
[プレスリリース「理想の水素原子」で未知の物理現象を探索するミュオニウムのマイクロ波分光実験がスタート](#)



# ミュオニウムのレーザー分光(1S-2S)

S2実験エリア (新)

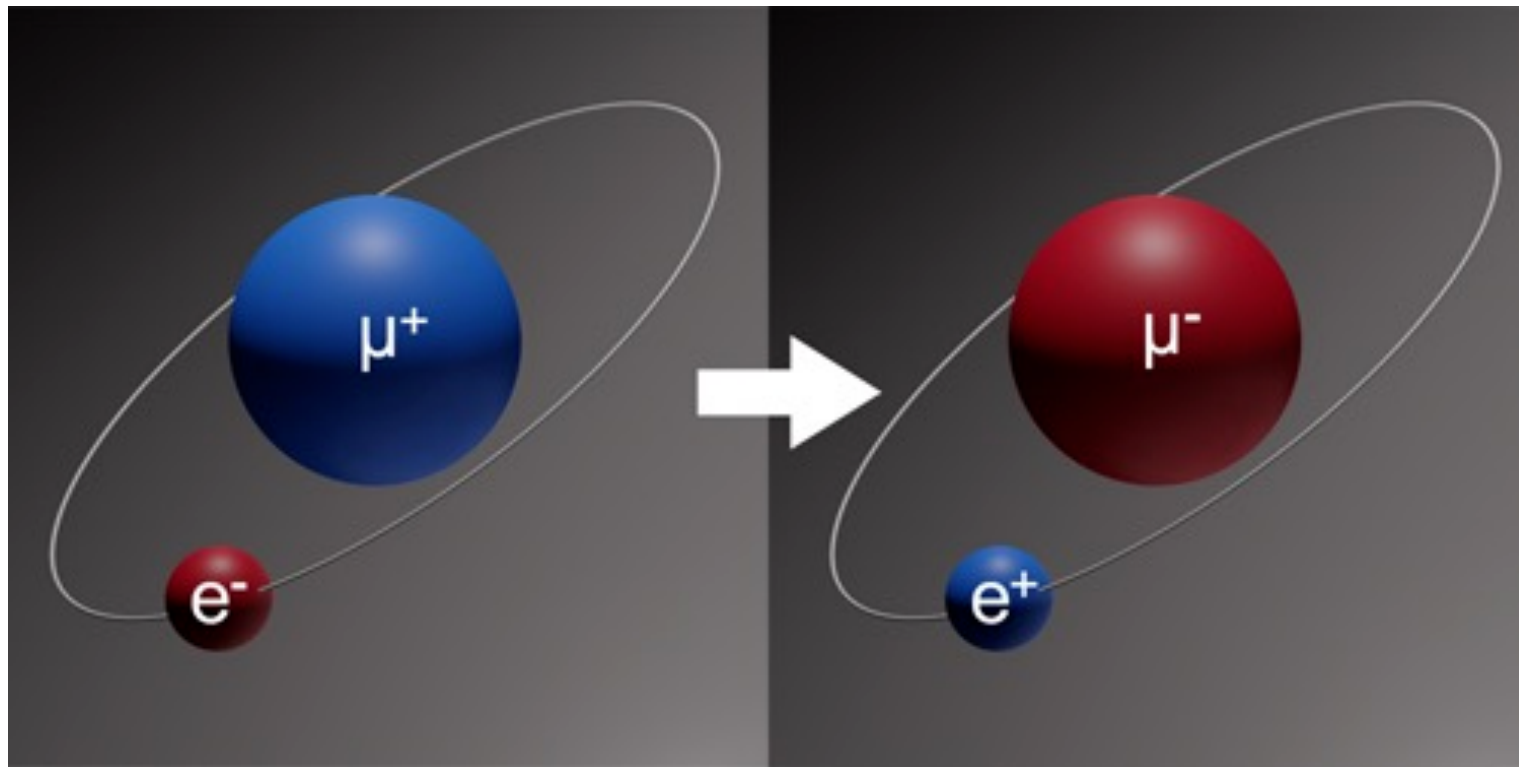
先端レーザー分光技術を駆使して**超低速ミュオン**を生成し世界成功精度のミュオン質量測定を行う



- ・ 2021.12  
物構研News [ミュオニウム実験に向けたビームラインの建設](#)
- ・ 2021.09.24  
物構研トピックス [MLFミュオンS2実験エリアの調整運転を開始しました](#)

- 標準理論では禁止 → 未知の相互作用の探索

近年、日本・米国を中心に理論的研究が進展



APS SYNOPSIS Jan. 2022 • *Physics* 15, s9

<https://physics.aps.org/articles/v15/s9>

超低速ミュオンを用いた新手法で計画中



- J-PARCに新ビームラインが完成し、世界で唯一**ミュオンそのものの性質を包括的に調べる研究**が本格始動。
  - フェルミ国立研究所のミュオンg-2測定により、**素粒子標準模型の綻びが見え始めている可能性が高まった。**
  - **超低速ミュオン**を活用する、以下の研究が始動（一部はすでに実施中）
    - ① **g-2のズレ**の精密検証。
    - ② **EDM**で新物理法則の時間反転対称性を調べる。
    - ③ **ミュオニウムの超微細構造分裂**で電弱理論の精密検証。
    - ④ **ミュオニウムのレーザー分光**で、ミュオン質量の世界最高精度決定。
- 三角関係
- 今後
    - ミュオニウム-反ミュオニウム振動の探索等の**新しい萌芽的研究も計画**中