Muon g-2/EDM 実験

佐藤 優太郎 新潟大学 2022年11月7-10日 FPWS2022@伊豆の国市

自己紹介

- 2016年くらいまでBelle (II) をやっていました。
- 本研究会への参加歴
 - <u>Υ(5S)</u> モードにおけるCP 対称性の破れの角 φ₁ の測定@B workshop2010, 熱海
 - $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ 遷移におけるレプトン前後非対称性の測定@B workshop2011, 福島
 - 東海地方のお酒の買い出し[発表無し]@FPWS2013,伊勢志摩
 - セミレプトニックタグを用いたB→D*τv 崩壊の測定@FPWS2015, 沼津
 - J-PARC muon g-2/EDM 実験におけるシリコンストリップ検出器の実機製作に向けた開発状況

@FPWS2018, Kavli IPMU

- Muon g-2実験@FPWS2022, 伊豆長岡
- 本講義の目的
 - 修士の学生に超精密測定の難しさ(面白さ)を理解してもらう。
 - 特徴が多すぎるJ-PARC muon g-2/EDM 実験の面白さを理解してもらう。



- 1. ミューオンg-2, EDM とは
- 2. ミューオンg-2の測定状況
- 3. FNALの実験の系統誤差
- 4. J-PARC muon g-2/EDM 実験の概要と状況
- 5. まとめ

磁気能率とは(1/3)

<u>モノポール(磁気単極子) のペアが作る磁場</u>

- 磁気能率 $\vec{\mu} = q_m \vec{\ell}$
- 磁石の強さと方向を表す。



磁気能率とは(2/3)

<u>微小円電流が作る磁場</u>







● 電流は電荷の回転運動とみなせる。



● 素粒子の磁気能率はボーア磁子を基本単位として考えるとわかりやすい

磁気能率とは(3/3)



g 因子の値

- ・ 古典力学ではg = 1。
- ミューオン(フェルミオン) の場合、 Dirac 理論により、g = 2。
- 量子効果まで含めると
 g 因子は2 からずれる。
 g = 2(1 + α/2π + ···)



異常磁気能率a

● g 因子の2 からのずれを表す。

 $-a\equiv \frac{g-2}{2}$

● 粒子を区別するために添え字が付いたりする。

- $(a_e, a_\mu, a_\tau), (g_e, g_\mu, g_\tau)$

• スライドには a_{ℓ} と書いてあるのに、 g_{ℓ} – 2 と呼ん だりする。

磁場中のスピンの運動

7

Magnetic field B

- 磁気能率を磁場中に置くと、トルク($\vec{\Gamma} = \vec{\mu} \times \vec{B}$)を受ける。
- 磁気能率は磁場方向を軸として、
 その周りを歳差運動(ラーモア歳差運動)する。
- 動いている粒子を考える場合は、相対論的な 効果として、トーマス歳差運動も考慮する必要がある。



異常歳差運動



● 一様磁場中に偏極した粒子(ミューオン)を入射すると、

– 円運動(サイクロトロン運動) する $\vec{\omega}_{cyclotron} = -\frac{e}{\gamma_m}\vec{B}$

- スピンも同様に回転する

$$\vec{\omega}_{spin} = -\frac{geB}{2m} - (1-\gamma)\frac{eB}{\gamma m}$$

● 異常歳差運動:スピン歳差運動とサイクロトロン運動の差

$$\vec{\omega}_{a} = \vec{\omega}_{spin} - \vec{\omega}_{cyclotron} = -\left(\frac{g-2}{2}\right)\frac{e}{m}\vec{B} = -a_{\mu}\frac{e}{m}\vec{B}$$

- g = 2 であれば、サイクロトロン運動とスピン歳差運動の周期は一致する。
- 実際はg > 2なので、スピンがわずかに早く回転する。
- > 異常歳差運動の周期(ω_a) とミューオンが感じる磁場(B) を測定すれば、a_µ が求められる。

ミューオン崩壊と"wiggle plot"

- ミューオン崩壊は弱い相互作用で生じる。
 →左巻きの粒子(右巻きの反粒子)のみが関与する。
 - **ミューオン静止系**:高運動量の陽電子はミューオンの スピンの向きに出やすい。
 - 実験室系 : ミューオンのスピンと運動方向が 揃っていると、高い陽電子が出やすい。
- ▶ 高運動量の陽電子を検出することで、ミューオンの スピンと運動方向の差の情報が得られる。







電気双極子能率 (EDM: Electric dipole moment)

 $\vec{d} = \boldsymbol{\eta} \; \frac{q}{2mc} \; \vec{s}$

- η がEDM の大きさを表す。
 (g 因子に相当)
- EDM は時間反転対称性を破る。
 CPT定理を仮定すると、CP 対称性の破れ。
- 標準理論の予言値は2×10⁻³⁸ e・cm
- 現在の上限値は、 |d|<1.8×10⁻¹⁹ e・cm (90%C.L. by BNL)





EDM の測定

- EDM が存在すると、スピンの回転ベクトルが磁場の向きからずれる。 $\vec{\omega}_{total} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta = -\frac{e}{m} \Big[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \Big]$ スピンの回転平面
 - ミューオンのスピンが蓄積平面に対して、
 上を向いたり、下を向いたりする。

 $\tan \delta = \omega_{\eta} / \omega_a \sim 10^{-5} \ (d_{\mu} = 10^{-21} e \cdot cm)$

● 磁場の向きに対して、上下非対称度を生じさせる。

$$A_{\rm UD}(t) = \frac{N_{\rm up}(t) - N_{\rm down}(t)}{N_{\rm up}(t) + N_{\rm down}(t)}$$

- 周期はg-2と同じ。
- 位相は90度ずれる。



ミューオンg-2 測定@BNL, FNAL

● 電磁場中を相対論的に運動するミューオンの場合は、Thomas-BMT 方程式にしたがう。



* ppm : parts per million, 100万分の1

ミューオン g – 2 の測定状況

- BNLの測定は標準理論を超える物理の兆候ではないかと長年注目されてきた。
 (muon g 2 アノマリー)
- 2021年4月, FNAL の最初の結果が発表された。
 - BNLの結果とは無矛盾な結果。
 - FNAL の最終的な目標精度は0.1 ppm

- 系統誤差の見落としはないか?
 - FNAL はBNL から移設した蓄積リングを 使用している。
- FNAL, BNL とは全く異なる独立な方法で 検証したい。

ミューオンg-2 の統計誤差

•
$$\vec{\omega}_a = -a_\mu \frac{e}{m} \overline{B}$$

<u>異常歳差運動周期(ω_a)の測定精度</u>

● ただし、系統誤差も重要。

- トータルの誤差 = √(統計誤差)²+(系統誤差)²

系統誤差@FNAL g-2

FNALでの系統誤差の要因

PRL 126, 141801 (2021)

	Quantity	Correction terms (ppb)	Uncertainty (ppb)
異常歳差運動の周期測定	ω_a^m (statistical) ω_a^m (systematic)		434 56
ビームの運動	C_e C_p C_{ml} C	489 180 -11 -158	53 13 5 75
磁場測定、一様性	$ \begin{cases} c_{pa} \\ f_{calib} \langle \omega_p(x, y, \phi) \times M(x, y, \phi) \rangle \\ B_k \\ B_q \end{cases} $	-27 -17	56 37 92
外部パラメータ	$\mu'_{p}(34.7^{\circ})/\mu_{e}$ m_{μ}/m_{e} $g_{e}/2$	•••• •••	10 22 0
	Total systematic Total fundamental factors Totals	 544	157 25 462

● 突出した系統誤差の要因があるわけでなく、様々な要因を抑える必要がある。

異常歳差運動の周期測定由来の系統誤差@FNAL

- **カロリーメータ**(PbF₂, 24 stations) を用いて、崩壊陽電子を測定。
- 最もシンプルな場合のフィッテイング関数(5 parameters)

 $N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\gamma\tau}} (1 + A\cos(\omega_a t + \phi_0))$

<u>系統誤差の要因</u>

- ゲインの変動(時間依存性)
- パイルアップ
 - 複数の粒子が連続して検出器に入ることで、
 波形が重なり、検出効率や測定時刻が変わる。
- ビームの運動と関連(後述)

ビームの運動由来の系統誤差@FNAL

- 飛跡検出器(straw tracker) を用いて、ミューオンの 崩壊位置を推測して、ミューオンのビーム分布を求める。
- ビームは理想の軌道から少しずれて、鉛直・水平方向に 振動する(ベータトロン振動)。
 - 振動の周期は四重極磁石によって決まる。
- 検出器の離散的な設置位置により、コヒーレントベータトロン 振動(CBO) も生じる。
 g-2 の周波数 -
 - CBO がg-2 の周波数近くにならないように 磁石の強さを設定している。

Frequency [MHz]

ビームの運動由来の系統誤差@FNAL

<u>系統誤差の要因(1/2)</u>

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

~0

- 1. Pitch effect(C_p)
 - 鉛直方向のベータトロン振動により $\vec{\beta} \cdot \vec{B}$ の項の影響が生じる。
- 2. 電場の影響(C_e)
 - 魔法運動量からずれると、電場の影響を受ける。
 - デバンチする様子、もしくは動径方向のビーム分布からビームの運動量分布を求めている。

ビームの運動由来の系統誤差@FNAL

<u> 系統誤差の要因(2/2)</u>

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\gamma\tau}} (1 + A\cos(\omega_a t + \phi_0))$$

3. 蓄積中のミューオン損失(C_{ml})

 N_0, ϕ_0 が時間依存性を持つ。

- 寿命以外の要因で、ビーム蓄積中にミューオンが失われる。
- 大きなベータトロン振幅を持つミューオンはコリメータなどの物体で散乱。
- 運動量と相関して特定のパラメータ領域でミューオン損失が生じると、系統誤差になる。

4. ミューオン崩壊位置と振動位相の相関(C_{na})

- 検出器のアクセプタンスにより、ミューオン崩壊位置と 振動位相が相関を持つ。
- Run1 では、静電四極磁石の抵抗器の故障により、 ビーム分布が時間依存性を持ってしまっている。

磁場測定・一様性由来の系統誤差@FNAL

- **シミング作業**により磁場の一様性を高める。
- 磁場は核磁気共鳴(NMR) プローブで測定。
 - ミューオン蓄積領域の磁場はTrolley プローブで測定。
 - Peak-to-peak で50 ppm 程度の一様性。RMS で14 ppm。
 - 実験中は蓄積領域の上下の固定プローブで変動をモニタ。
- プローブの較正精度、過渡的な磁場の影響が系統誤差となる。

新 muon g-2/EDM 実験@J-PARC

 $\overline{\omega}_{a} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \overline{B} - \left(a_{\mu} \frac{\gamma}{\gamma+1} \right) \left(\vec{\beta} \cdot \vec{B} \right) \vec{\beta} - \left(a - \frac{1}{\gamma^{2}-1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{F}}{c} \right) \right]$

電場を0 にすることで、 電場の影響を避ける。

● *g* – 2 とEDM の成分が完全に 直交しているので、同時に 測定可能。

● 電場を使わずにどうやって ビームを蓄積するのか? 新 muon g-2/EDM 実験@J-PARC

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

- 電場を0 にすることで、
 電場の影響を避ける。
- *g* 2 とEDM の成分が完全に 直交しているので、同時に 測定可能。

● 電場を使わずにどうやって ビームを蓄積するのか?

> 冷却&加速

J-PARC muon g-2/EDM 実験のパラメータ

- ミューオンビームのエネルギー、磁場の強さ、軌道半径は?
- 磁場の一様性を高めるため、MRI 型磁石を使用する。
 - 有効体積(φ0.66m)
 - 磁場3 T(MRI の一般的な磁石の強さ)
- → 運動量を300 MeV/*c* とする。

FNAL

磁場の一様性(peak-to-peak):50 ppm

1ppm

- 大変なことも…
 - コンパクトなリングにどうやって、ミューオンビームを入射するのか。
 - ミューオン崩壊で生じる陽電子が密に飛んでくるので検出が大変。

J-PARC muon g-2/EDM 実験全体像

- ① 表面ミューオンビーム
- ② 冷却
- ③ 加速
- ④ 入射
- ⑤ 蓄積
- ⑥ 検出

J-PARC (大強度陽子加速器施設)

① 新設ミューオンビームライン・実験エリア

- 高強度・長時間の実験のためのミューオンビームライ"H-line"を建設中。
- 今年1月から、**H1 エリア**のコミッショニングを開始。

① 新設ミューオンビームライン・実験エリア

● H2 エリアの拡張建屋の建設に向けた準備も着々と進んでいる。

2冷却 + 3加速

<u>低エミッタンスミューオンビームの生成</u>

- 1. 表面ミューオンビームを一度、標的に止めて、ミューオニウム(μ⁺e⁻)を生成する。
- 2. 熱拡散で標的から出てくるミューオニウムをレーザーでイオン化する。
- 3. 取り出したミューオンを<mark>加速</mark>する。

②冷却(ミューオニウムの生成)

- ミューニウム生成標的として、エアロゲルを使用。
- レーザーアブレーションでエアロゲルの表面に穴を 開けることで、生成効率を向上(×10)。
- 千葉大で開発されたBelle II ARICH 用エアロゲル生成 技術を応用。

Opening fraction on the emission face

② 冷却(ミューオニウムのイオン化)

● ミューオニウムの1S 状態の電子をレーザーで電離する。

- 特定の準位に遷移させ、2段階で電離する。

● J-PARC MLF S2 エリアでミューオニウム分光実験と協力して、 レーザーイオン化の実験が進行中(プランB)。

J-PARC MLF S2 エリアのビームライン

Lyman-a レーザーの高強度化がchallenging。

③ ミューオン加速

- 速度βの領域に応じて、4 種類の加速キャビティを使用して、 冷却したミューオンビームを300 MeV/c の運動量まで加速する。
 - 寿命を考慮して、素早く加速する。
 - エミッタンスを増加させない。
- ▶ 初段のRFQ による加速試験に成功。
- > 後段の加速器の設計・試作機製造も進行中。
 - 詳細は大谷さん、鷲見さんの講義/発表

世界初のミューオン加速

④ 入射 (3 次元らせん入射)

- 2次元な入射の場合、ビームが入射して1 周するまでに、 水平方向に軌道をずらす必要がある。
 - 回転半径が小さすぎて、現実的な強度のキッカーでは不可能。
- 3 次元的に入射して、らせん運動中に数十ターンかけて、 垂直方向にキックする(3次元らせん入射)。
 - 1. ソレノイド磁石のフリンジ磁場で入射角度を減少させる。
 - 2. パルスキッカー磁場でビーム方向を鉛直方向にキックして、蓄積軌道平面に導く。
 - 3. 弱収束磁場でビームを蓄積する(n-index ~ 10⁻⁴)。
- 入射効率 > 80%

④ 入射 (3 次元らせん入射)

- 低エネルギーの電子ビームを用いた実証実験が進行中(@つくば)。
 - CCD カメラを用いて、電子軌道の可視化に成功。
 - キッカー磁石を蓄積磁石内にインストールして、キッカー磁場を加えて、試験中。

⑤ 蓄積磁石

- 3TのMRI 型ソレノイド磁石を蓄積磁石として使用する。
- 同型の磁石を用いて、0.2 ppm(peak-to-peak)の磁場一様性を達成。
- 磁場の測定には核磁気共鳴(NMR) プローブを使用する。
 - FNAL g-2 グループと磁場測定の相互較正を実施。
 - 15 ppb の精度を達成。

FNAL g-2 グループとの相互較正

M. Abe et. Al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A890, 51 (2018)

⑥ 検出 (シリコンストリップ検出器)

- ミューオン崩壊から生じる陽電子の飛跡をシリコンストリップ 検出器で再構成する。
 - 陽電子の運動量範囲: 100-300 MeV/c
 - 1 ns あたり最大6 個のミューオンが崩壊
 - 高ヒットレート耐性とヒットレートの変動に対する高い安定性 (1.4 MHz/strip → 10 kHz/strip)

浜ホト製のセンサー(SSSD)

- Strip pitch : 190 um
- 1024 strips per sensor
- 320 µm thickness
- p on n type

8192 depth x 128 ch /chip
5 ns 間隔サンプリングレートの バイナリ出力

⑥ 検出 (シリコンストリップ検出器)

- KEK 北カウンターホールに検出器モジュール量産のためのクリーンルームを整備。
 - Belle II SVD グループのワイヤーボンダーを活用させていただいています。

期待される測定精度

Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053C02

- 全体のefficiency は1.3×10⁻⁵
- 2.2×10⁷ 秒(~255 日) のデータ取得期間で 再構成される陽電子飛跡は5.7×10¹¹ 個。

期待される統計/系統 誤差

	Stat.	Syst.
δ a _μ [ppb]	450	<70
δ EDM [10 ⁻²¹ e • cm]	1.5	0.36

Anomalous spin precession (ω_a)		Magnetic field (ω_p)		
Source	Estimation (ppb)	Source	Estimation (ppb)	
Timing shift	< 36	Absolute calibration	25	
Pitch effect	13	Calibration of mapping probe	20	
Electric field	10	Position of mapping probe	45	
Delayed positrons	0.8	Field decay	< 10	
Diffential decay	1.5	Eddy current from kicker	0.1	
Quadratic sum	< 40	Quadratic sum	56	

▶ 2年間のデータ取得期間で現在のBNL, FNAL と同等の測定精度を達成できる見込み。
 ▶ 系統誤差は統計誤差よりも十分に小さい。

実験のスケジュール

J-PARC muon g-2/EDM コラボレーション

	110 mei	mbers from Canada, China, Cze	ch, France, India, Ja	ipan, Korea, Nethe	erlands, Russia, USA
	Collaboration board (CB) Chair: Seonho Choi				
	Executive board (EB) Spokesperson: T. Mibe				
	Subgroups	Interface coordinators	Committees		
	Surface muon beam leader: T. Yamazaki,	N. Kawamura	Speakers committee chair: K.Ishida		
	Ultra-slow muon leader: K. Ishida, G. I	K. Ishida	chair: B. Shwartz 国内参加機	関	
	LINAC leader: Y. Kondo, M.	Otani	九州大学、 東京大学、	名古屋大学、東 茨城大学、理研、	化大学、新潟大学、 原科研、高工ネ研
Ç	Injection and storage leader: H. linuma	e			
	Storage magnet, fiel measurements	d			
C	Detector leader: T. Yoshioka				
	DAQ and computing leader: Y. Sato, (K. H	Y. Sato			
	Analysis Ieader: T. Yamanaka	T. Suehara T. Yamanaka	The 24 th L-PARC muon	p2/EDM collaboration	on meeting June 8-10, 2022

まとめ

- ミューオン異常磁気能率(g-2, a_µ) はアノマリーが見えており、 標準理論を越えた物理の兆候として注目されている。
- ミューオンg-2 の精密測定のためには

①異常歳差運動の周期の測定,②ビームの運動の理解,③磁場の測定・一様性が重要。

- J-PARC で全く新しい方法でミューオン異常磁気能率と電気双極子能率を 測定する実験を準備中。
 - 2027年に開始予定。
 - 2 年間のデータ取得でBNL, FNAL のg-2 測定精度と同程度になる見込み。
 - 測定感度向上のR&D は継続して行っている。
- 多数の新規実験技術が含まれている。
 - 低エミッタンスミューオンビーム, ミューオン加速, 3 次元らせん入射, ...
- 本格的な建設期に入り、面白いフェーズ。新規コラボレータも随時募集中です。

Backup

Experimental sequence

Subsystem	Efficiency	Subsystem	Efficiency
H-line acceptance and transmission	0.16	DAW decay	0.96
Mu emission	0.0034	DLS transmission	1.00
Laser ionization	0.73	DLS decay	0.99
Metal mesh	0.78	Injection transmission	0.85
Initial acceleration transmission and decay	0.72	Injection decay	0.99
RFQ transmission	0.95	Kicker decay	0.93
RFQ decay	0.81	e^+ energy window	0.12
IH transmission	0.99	Detector acceptance of e^+	1.00
IH decay	0.99	Reconstruction efficiency	0.90
DAW transmission	1.00		

 Table 4. Breakdown of estimated efficiency.

Comparison of experiments

	Completed	Running	In preparation
(syst.)	$0.9 \times 10^{-19} e \cdot \mathrm{cm}$	_	$0.36 \times 10^{-21} \ e \cdot \mathrm{cm}$
EDM precision (stat.)	$0.2 \times 10^{-19} e \cdot \mathrm{cm}$	_	$1.5 \times 10^{-21} e \cdot \mathrm{cm}$
(syst.)	280 ppb	100 ppb	<70 ppb
a_{μ} precision (stat.)	460 ppb	100 ppb	450 ppb *
Number of detected e ⁻	3.6×10^{9}	_	_
Number of detected e^+	5.0×10^{9}	1.6×10^{11}	5.7×10^{11}
Spin precession period	$4.37 \ \mu s$		$2.11 \ \mu s$
Cyclotron period	149 ns		7.4 ns
Focusing field	Electric quadrupole		Very weak magnetic
Storage field	B = 1.45 T		B = 3.0 T
Polarization	100%		50%
Lorentz γ	29.3		3
Muon momentum	3.09 GeV/c		300 MeV/c
	BNL-E821	Fermilab-E989	Our experiment
		Prog. Theor. Exp	. Phys. 2019 , 053C02 (2019)