

J-PARC E34実験のための 陽電子飛跡検出器の研究開発

東大理 D1 / 西村 昇一郎

2015/02/10 21st ICEPP symposium @ 岳美山荘

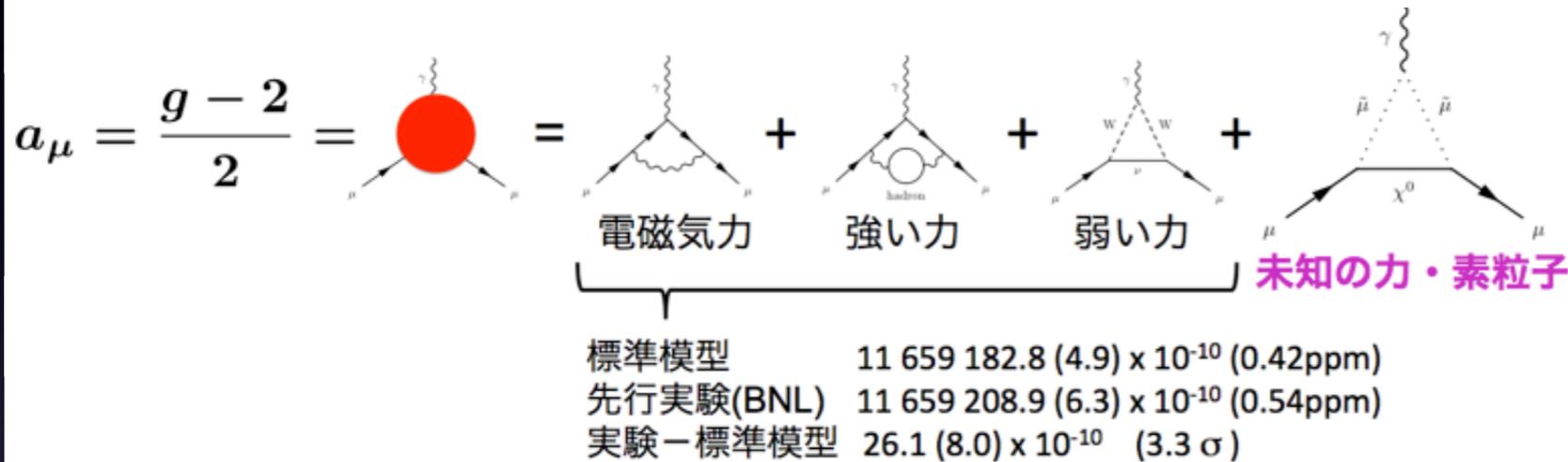
Outline

- J-PARC E34実験
 - ミューオン $g-2$ /EDM精密測定
- 陽電子飛跡検出器の研究開発
 - シリコンストリップセンサー
 - 読み出し回路の開発、評価
 - テストセンサーと読み出し回路の接続評価試験
- まとめ

電気・磁気双極子モーメント

異常磁気モーメント ($g-2$)

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



標準理論の予測値と
実験値に3.3 σ の乖離

→より精度を上げて
測定する必要あり

電気双極子モーメント (EDM)

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



時間反転対称性を破る

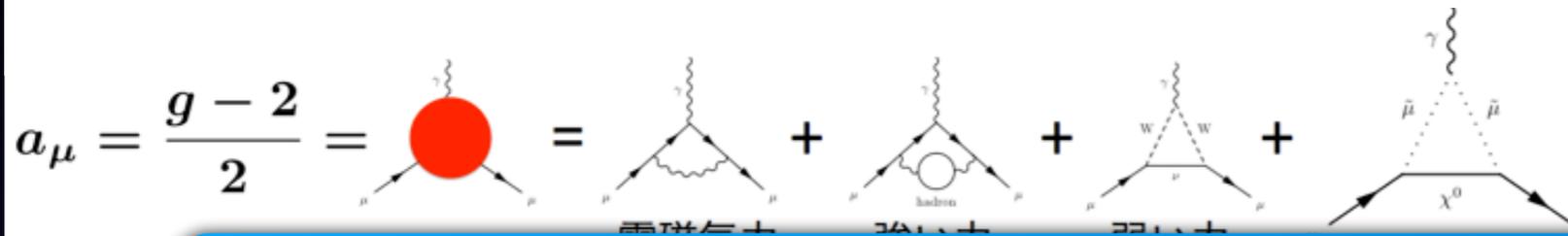
→CPT定理よりCP対称性を破る

これまで有限のEDMは発見されていない

電気・磁気双極子モーメント

異常磁気モーメント ($g-2$)

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



標準理論の予測値と
実験値に3.3σの乖離

$g-2$: 0.54 ppm \rightarrow 0.1 ppm

EDM : 1.8×10^{-19} e·cm \rightarrow 10^{-21} e·cm



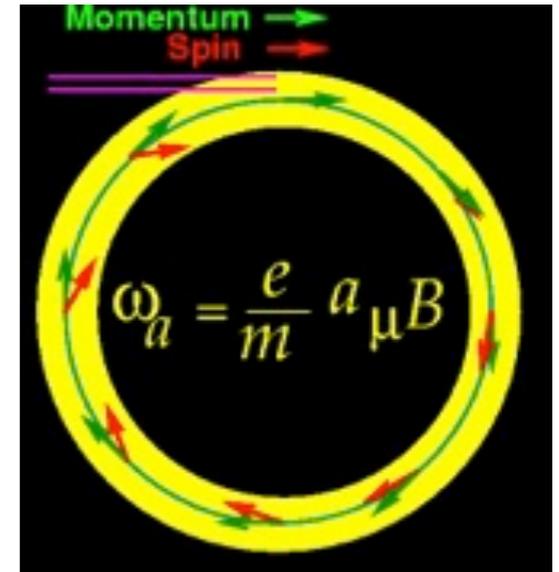
時間反転対称性を破る

\rightarrow CPT定理よりCP対称性を破る

これまで有限のEDMは発見されていない

ミューオン $g-2/EDM$ 精密測定実験

- スピンの方向に陽電子が多く放出される
→ 陽電子数を測定し、スピンの向きを測定
- 一様磁場中でのスピン歳差運動



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

BNL E821 approach
 $\gamma=29.3, (p=3.094 \text{ GeV}/c)$

J-PARC new approach
 $E=0$

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

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} \right) \right]$$

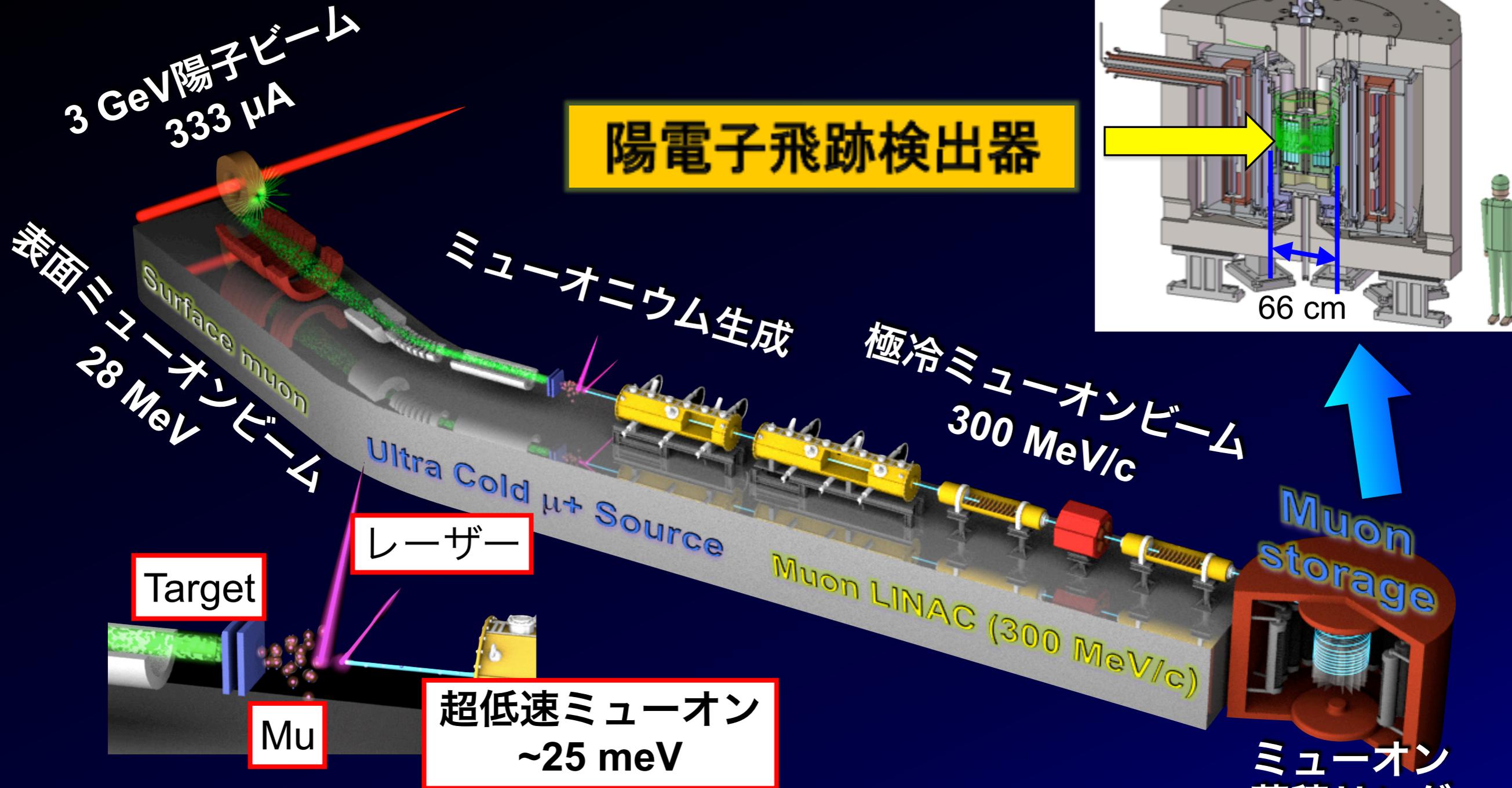
FNAL E989

J-PARC E34

J-PARC E34 実験

全く新しい手法で異なる系統誤差で測定

J-PARC E34実験



物質生命科学実験施設 (MLF)
 ミュオン基礎物理ビームライン (H-Line)
 極冷 μ^+ ビーム: 強度 $10^6/\text{sec}$
 運動量 300 MeV/c ($\gamma = 3$)
 $p_T/p_L \sim 10^{-5}$
 偏極度 > 50%

指向性の高い極冷ミュオンビームで
 集束電場 $E=0$ を実現

$g-2$ /EDMの測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

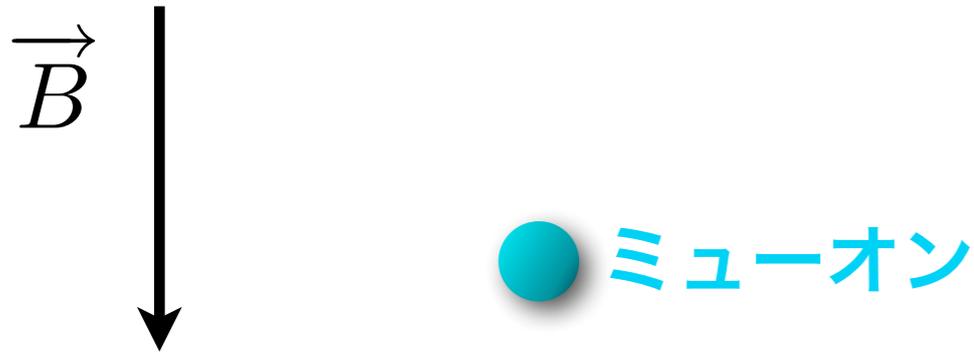
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[\underbrace{a_{\mu}}_{g-2} \vec{B} + \underbrace{\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B})}_{\text{EDM}} \right]$$

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

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

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

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta))$$

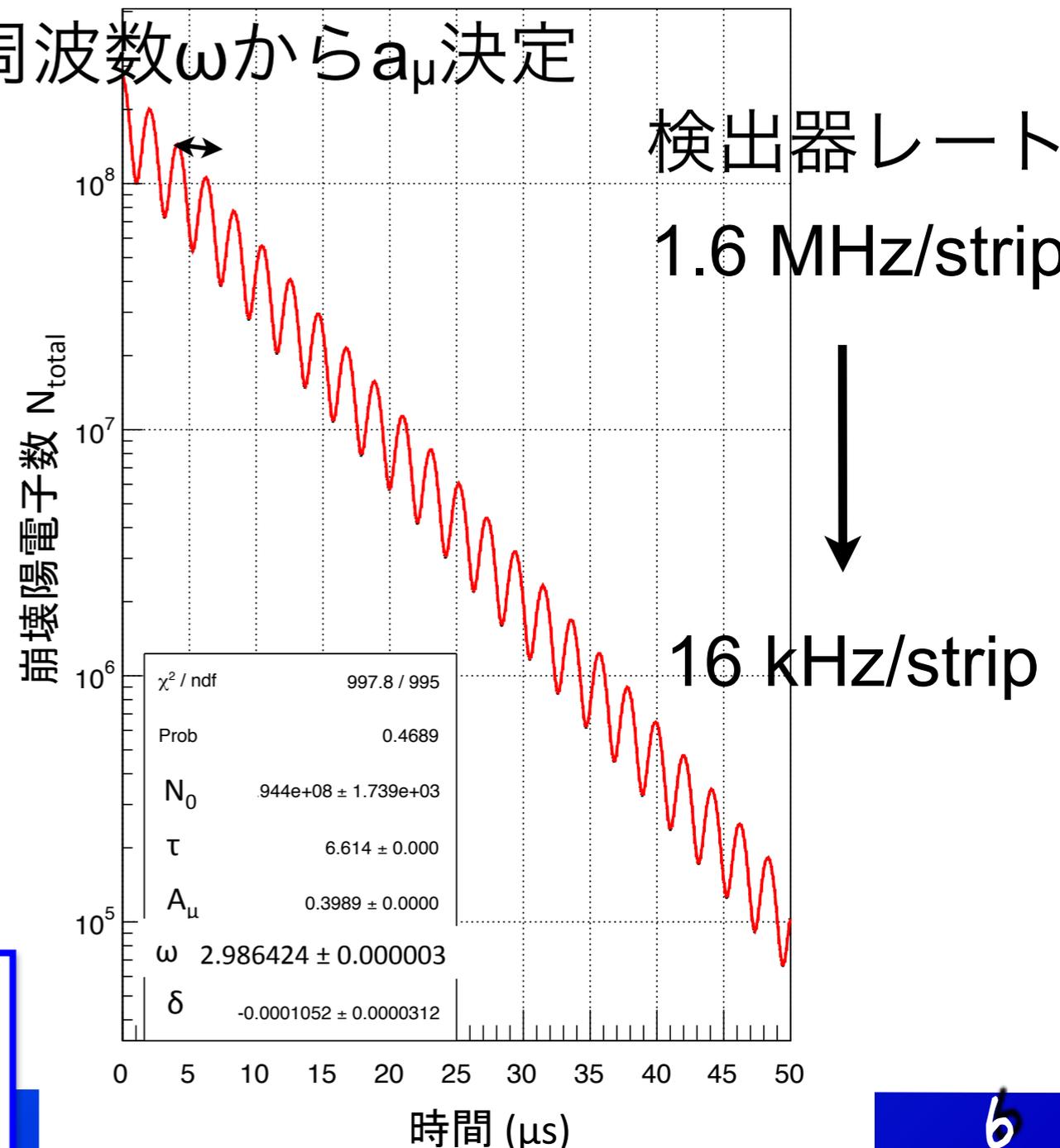


ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて
非常に小さい

周波数 ω と磁場 B を精密に
測定 \rightarrow a_{μ} を決定

目標精度
0.1 ppm

周波数 ω から a_{μ} 決定



$g-2/EDM$ の測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

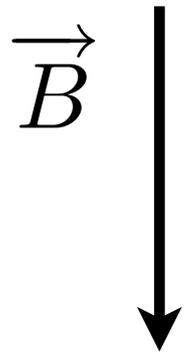
$g-2$ EDM

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

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

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

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta))$$



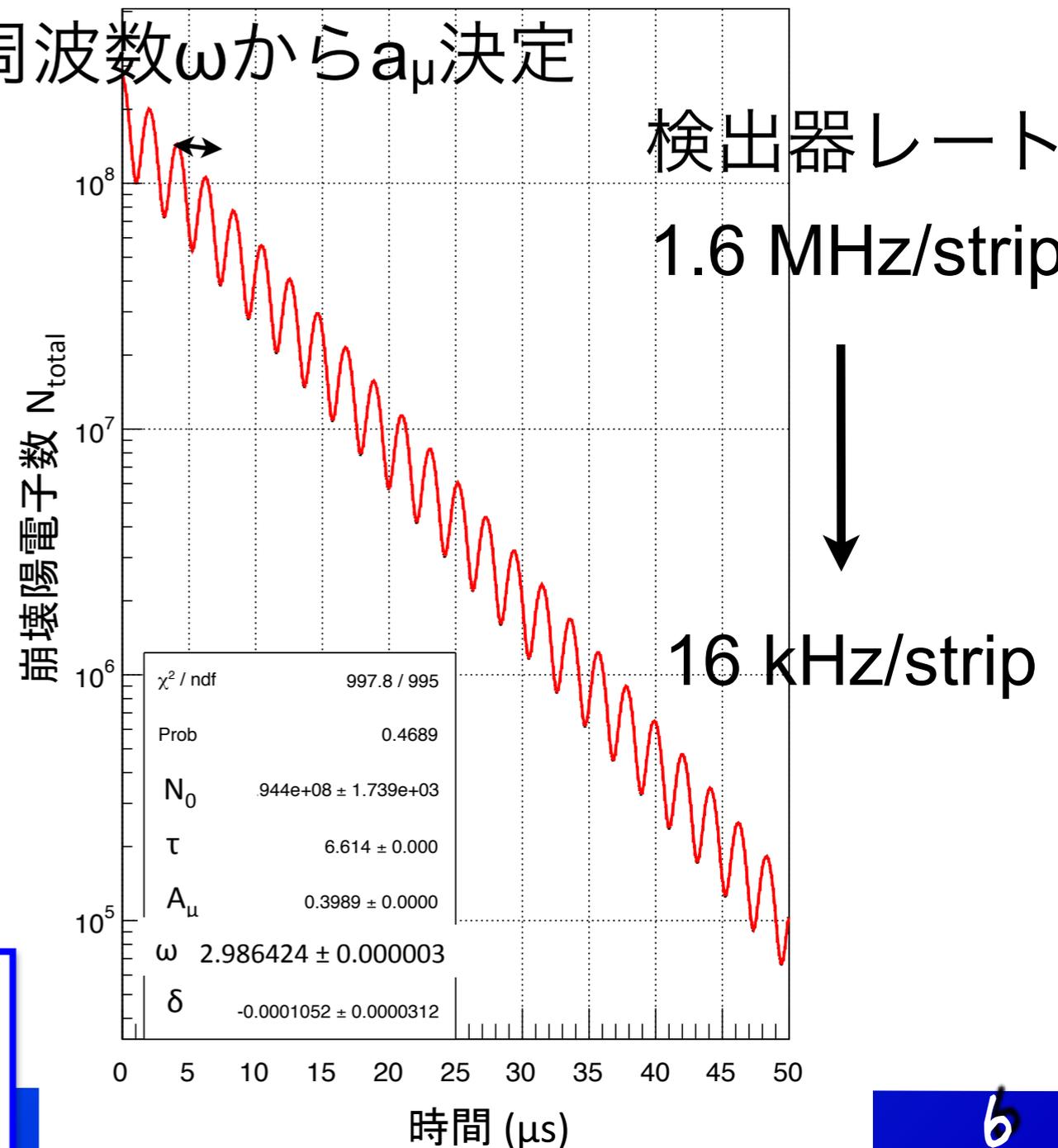
● ミューオン
◎ 運動の向き

ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて
非常に小さい

周波数 ω と磁場 B を精密に
測定 → a_{μ} を決定

目標精度
0.1 ppm

周波数 ω から a_{μ} 決定



$g-2/EDM$ の測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

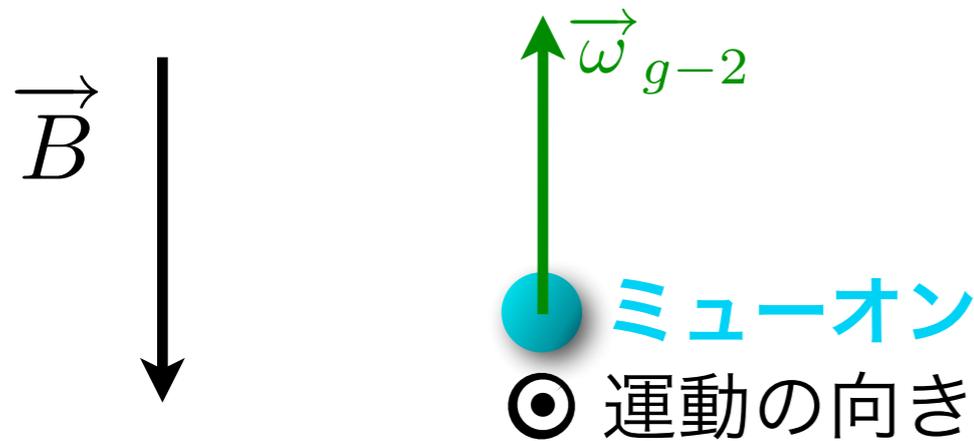
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[\underbrace{a_\mu \vec{B}}_{g-2} + \underbrace{\frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B})}_{EDM} \right]$$

$$a_\mu = \frac{g-2}{2}$$

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

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

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_\mu \cos(\omega t + \delta))$$

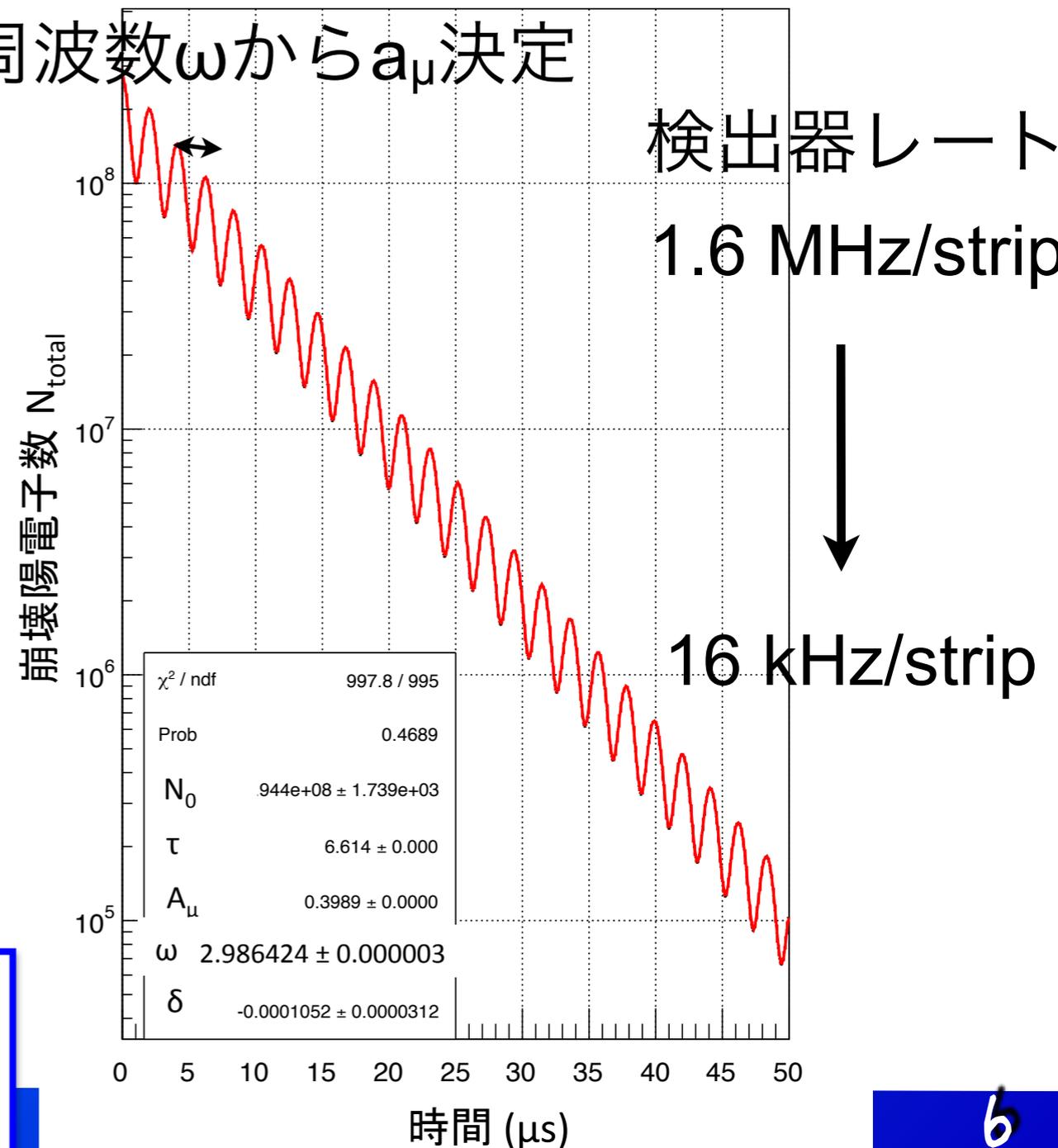


ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて非常に小さい

周波数 ω と磁場 B を精密に測定 → a_μ を決定

目標精度
0.1 ppm

周波数 ω から a_μ 決定



$g-2/EDM$ の測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

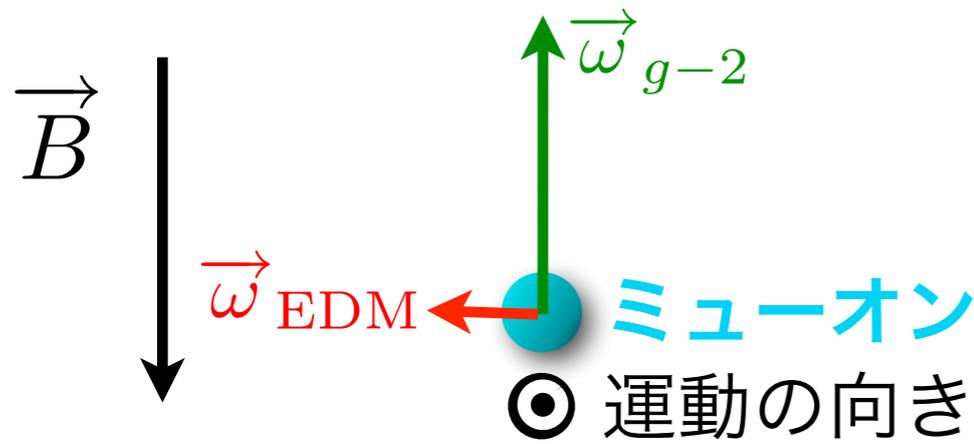
$g-2$
EDM

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

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

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

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta))$$

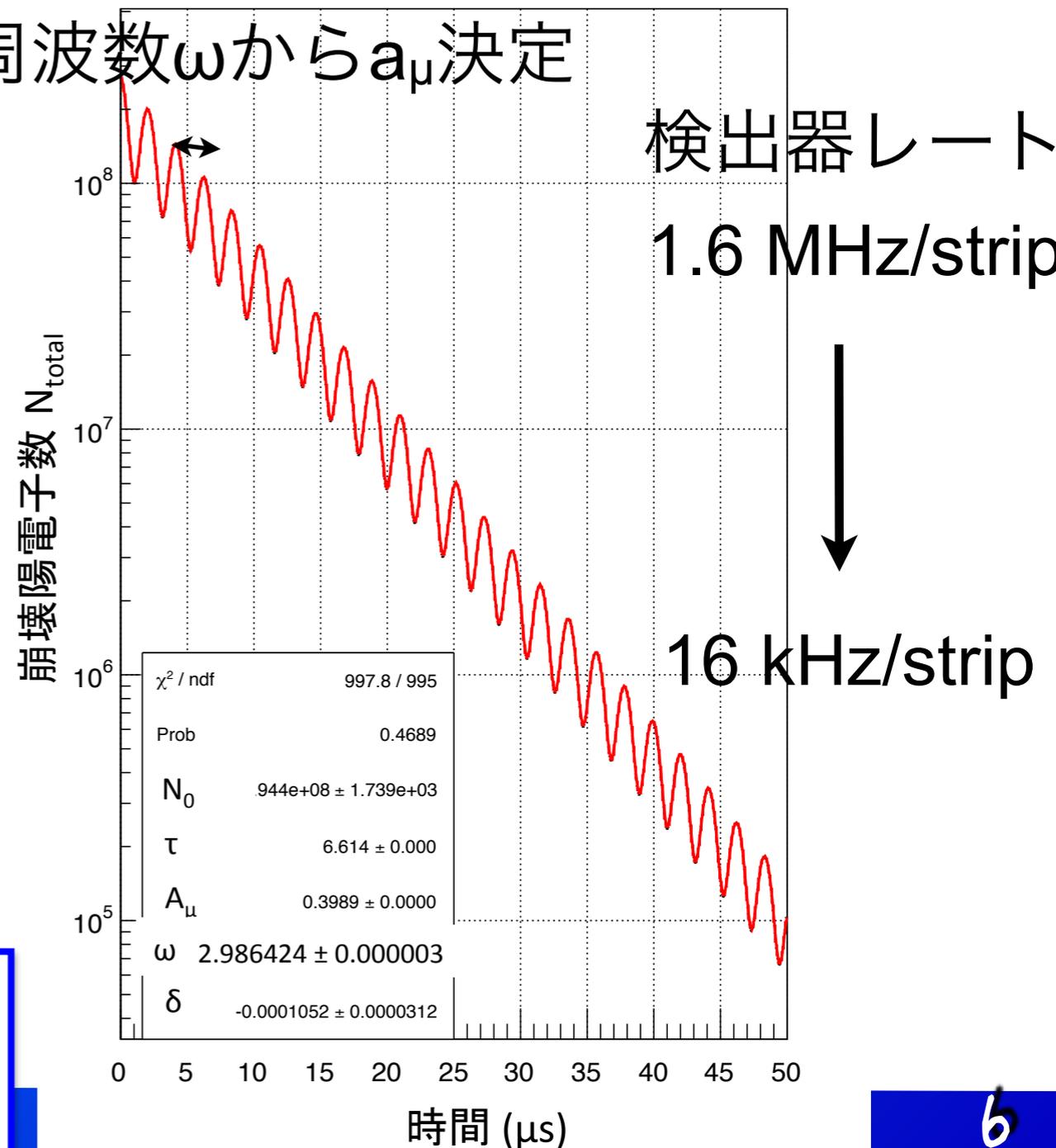


ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて
非常に小さい

周波数 ω と磁場 B を精密に
測定 → a_{μ} を決定

目標精度
0.1 ppm

周波数 ω から a_{μ} 決定



$g-2/EDM$ の測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

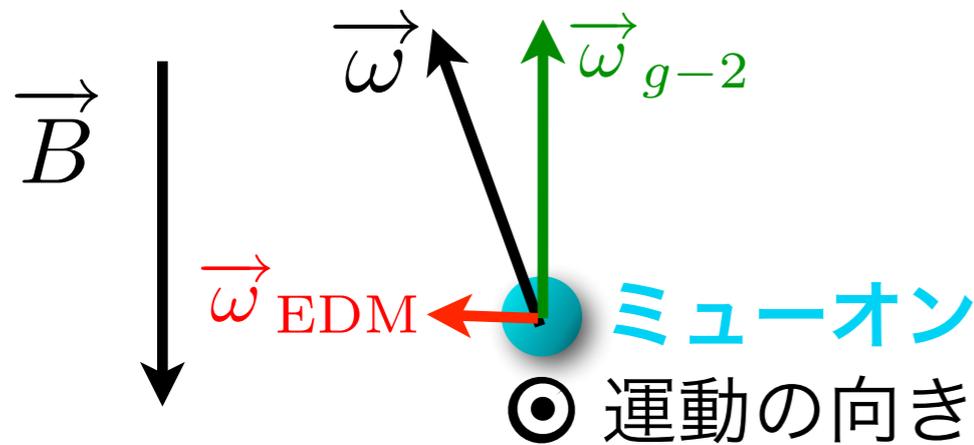
$g-2$
EDM

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

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

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

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta))$$

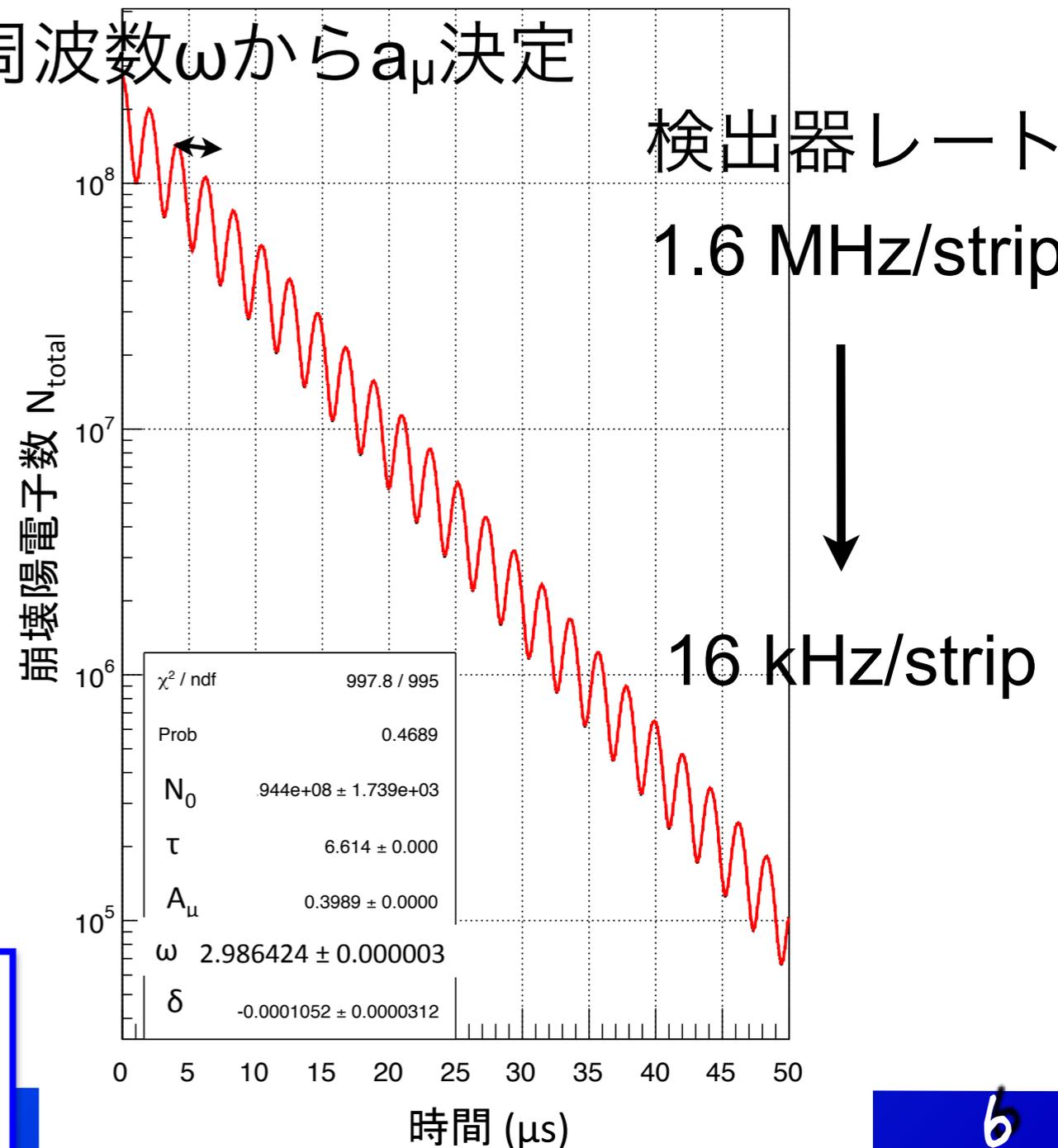


ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて
非常に小さい

周波数 ω と磁場 B を精密に
測定 $\rightarrow a_{\mu}$ を決定

目標精度
0.1 ppm

周波数 ω から a_{μ} 決定



$g-2/EDM$ の測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

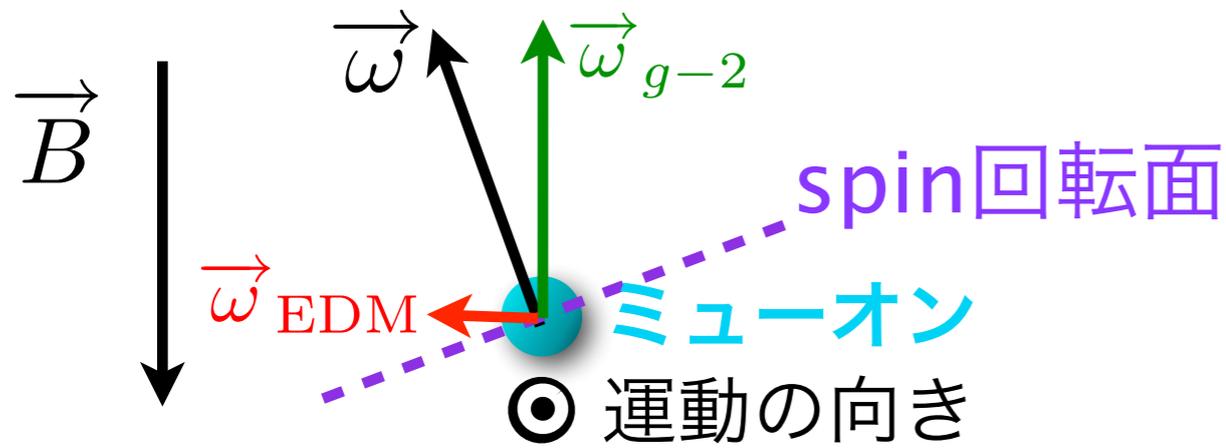
$g-2$
EDM

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

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

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

$$N_{total} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta))$$

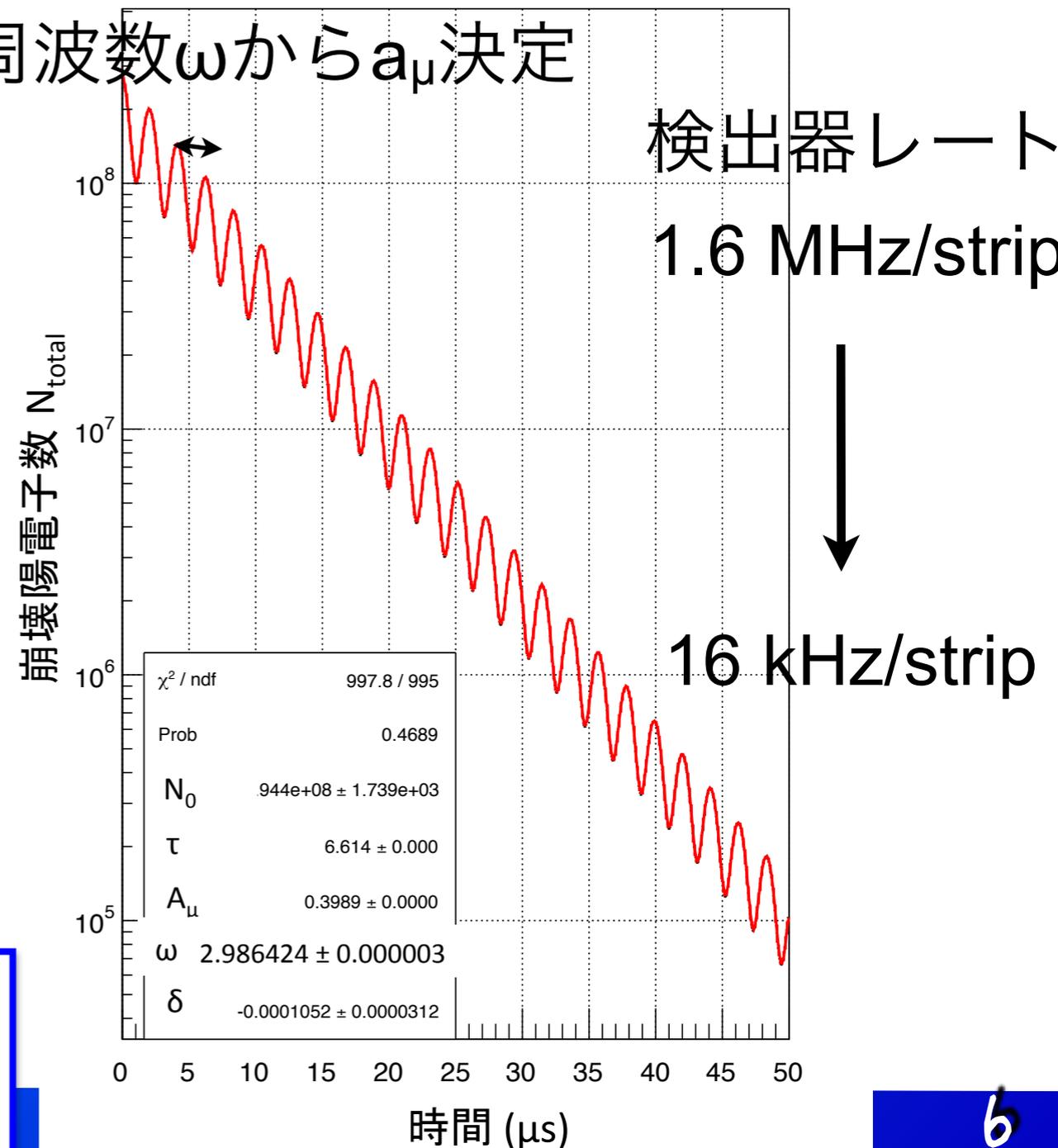


ω_{EDM} は ω_{g-2} に比べて非常に小さい

周波数 ω と磁場 B を精密に測定 $\rightarrow a_{\mu}$ を決定

目標精度
0.1 ppm

周波数 ω から a_{μ} 決定



$g-2/EDM$ の測定原理

- 一様磁場中、電場 $E=0$ でのスピン歳差運動

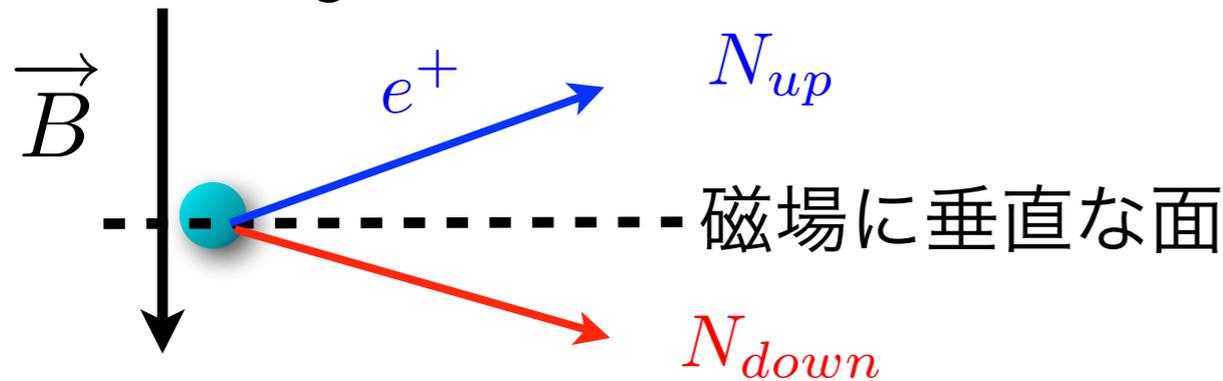
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

$g-2$ EDM

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

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

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



ω_{EDM} によってスピン回転軸が
磁場から傾く

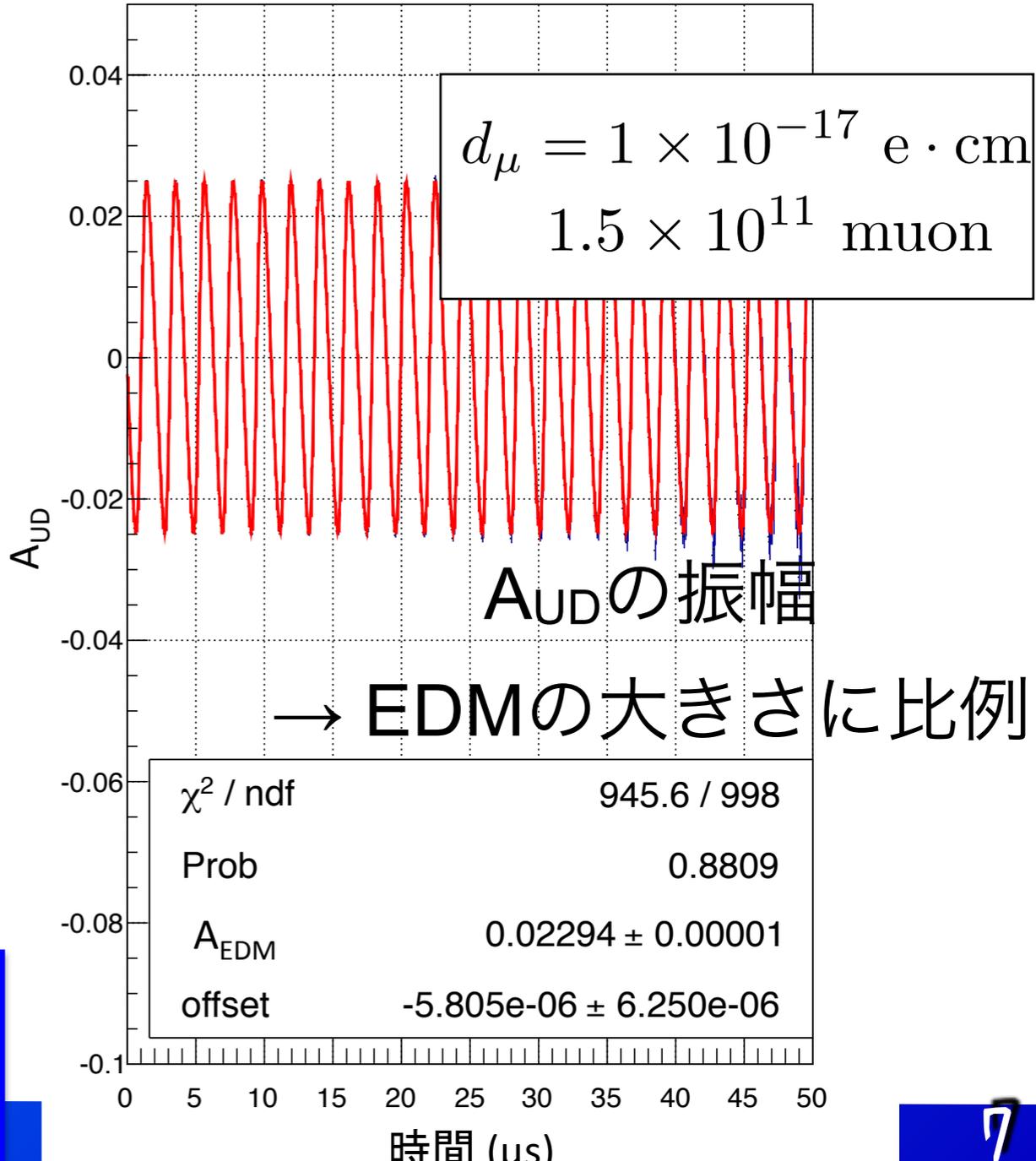
EDMが $10^{-21} e \cdot cm$ の時、
 $\vec{\omega}$ と磁場 \vec{B} のなす角： $10 \mu rad$

- 上下の非対称度 $A_{UD} = \frac{N_{up} - N_{down}}{N_{up} + N_{down}}$
の振動を測定

→ EDMの測定

目標EDM感度
 $d_{\mu} \sim 10^{-21} e \cdot cm$

$$A_{UD} = \frac{-A_{EDM} \sin(\omega t + \delta)}{1 + A_{\mu} \cos(\omega t + \delta)}$$



陽電子飛跡検出器

- 崩壊陽電子数と時間を正確に測定し、同時に運動量と角度を測定する必要がある

大強度パルスビームに対応

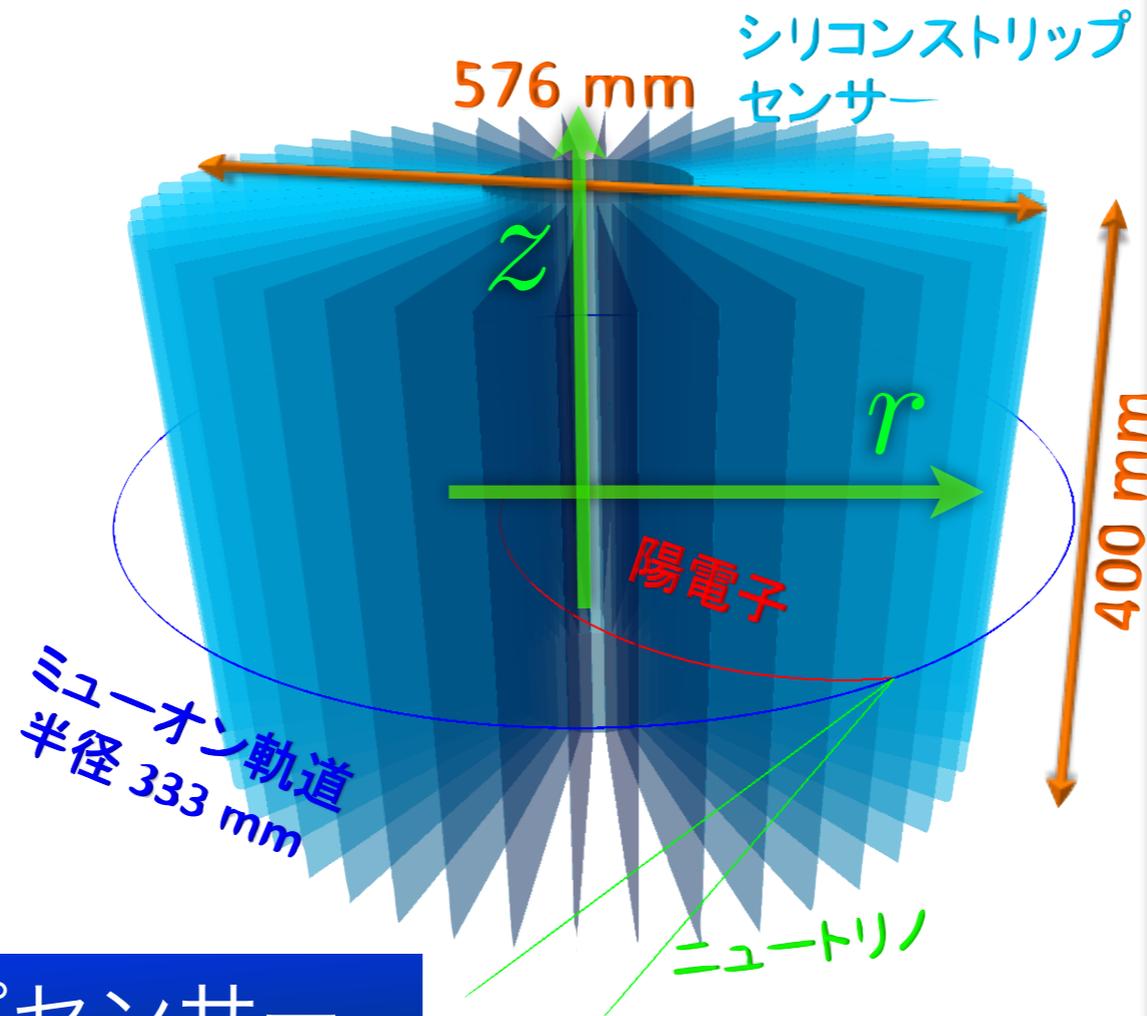
- 高granularity
- 高速応答
- 高安定性

EDMを高感度で測定

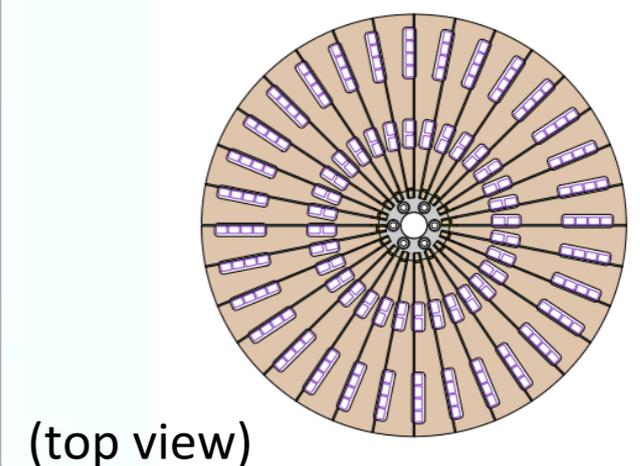
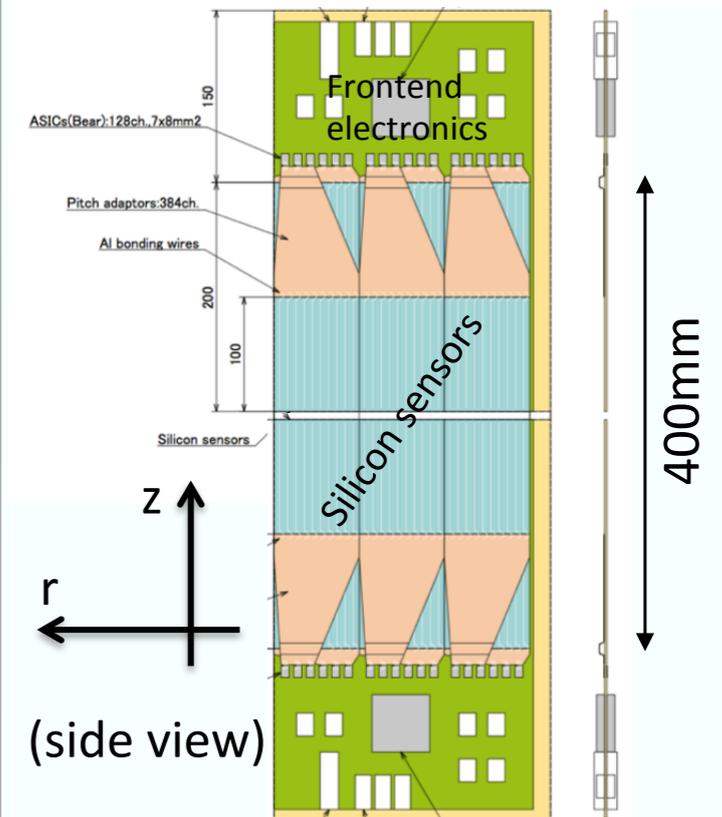
- 高設置精度

シリコンストリップセンサーで実現

陽電子飛跡検出器概念図



検出器モジュール (1 vane x 48枚)



陽電子飛跡検出器

- 崩壊陽電子数と時間を正確に測定し、同時に運動量と角度を測定する必要がある

大強度パルスビームに対応

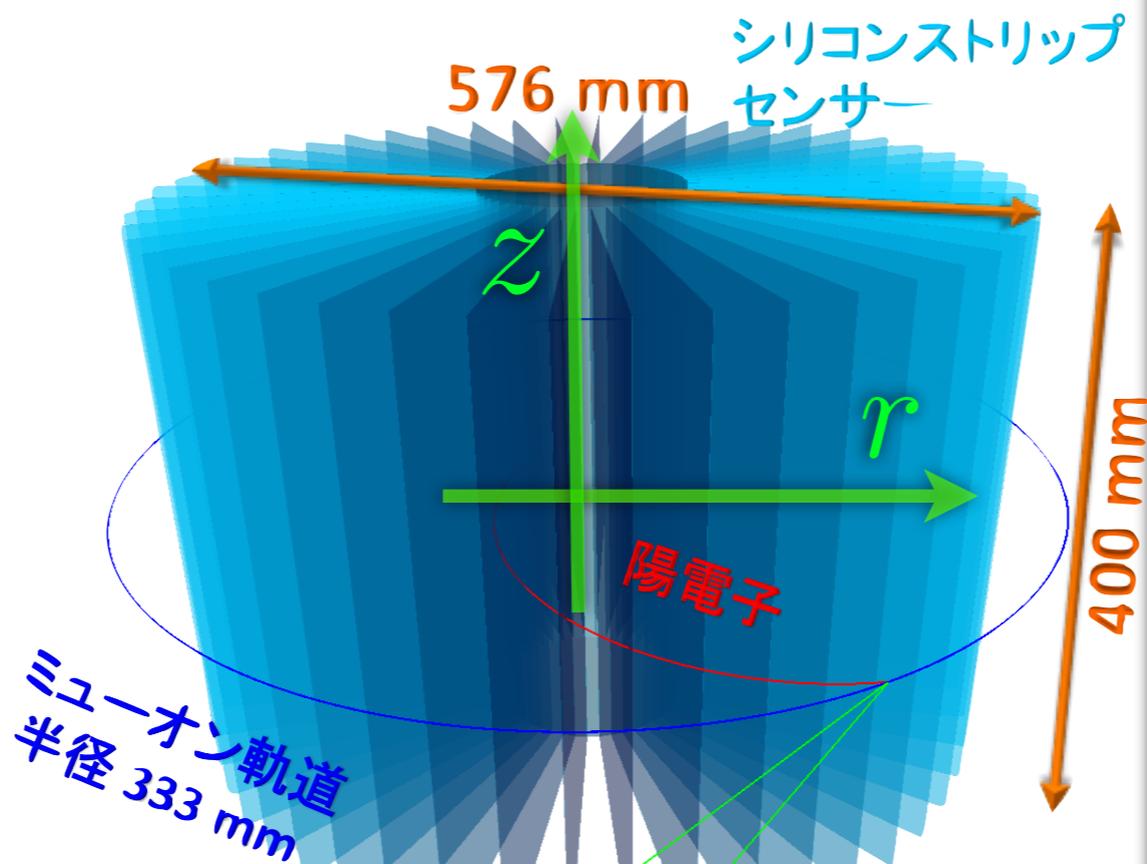
- 高granularity
- 高速応答
- 高安定性

EDMを高感度で測定

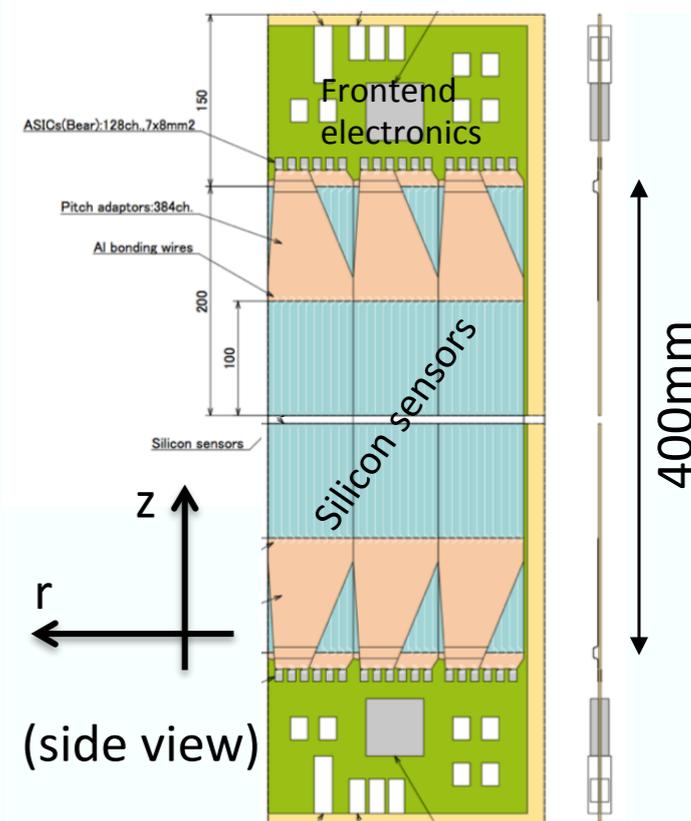
- 高設置精度

シリコンストリップセンサーで実現

陽電子飛跡検出器概念図



検出器モジュール (1 vane x 48枚)



センサー面積：4.2 m²

総ストリップ数：811k strips

飛跡検出器の開発状況

概念設計

- ・ センサー形状、配置の設計
- ・ シリコンストリップセンサー仕様の最適化
- ・ 読み出し回路(SlitA)の仕様決定

Done

Done

シリコンストリップセンサー

- ・ テストセンサーの製作
- ・ テストセンサーの基礎特性と性能評価
- ・ S/Nの見積り(目標S/N>15)

Done

読み出し回路

- ・ SlitAの試作 (SlitA 2013)
- ・ SlitA 2013の性能評価
(古浦新司, JPS 2014A 30pTF-6)
(調 翔平, JPS 2014A 30pTF-7)

Done

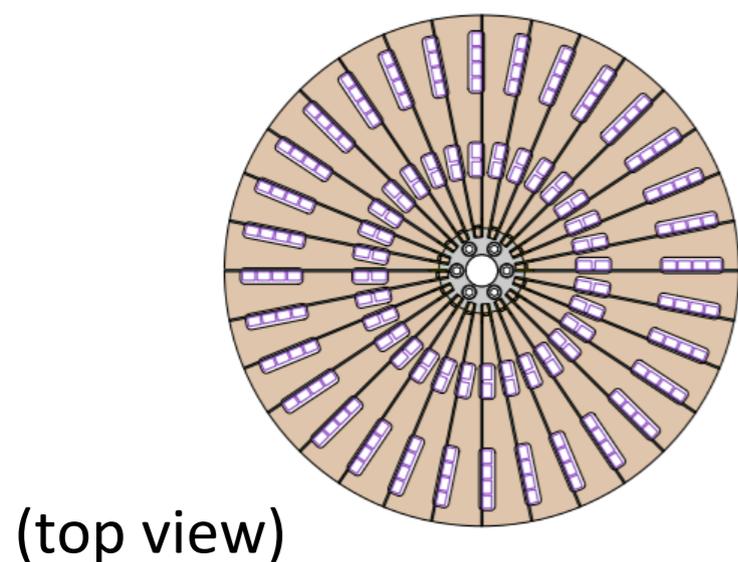
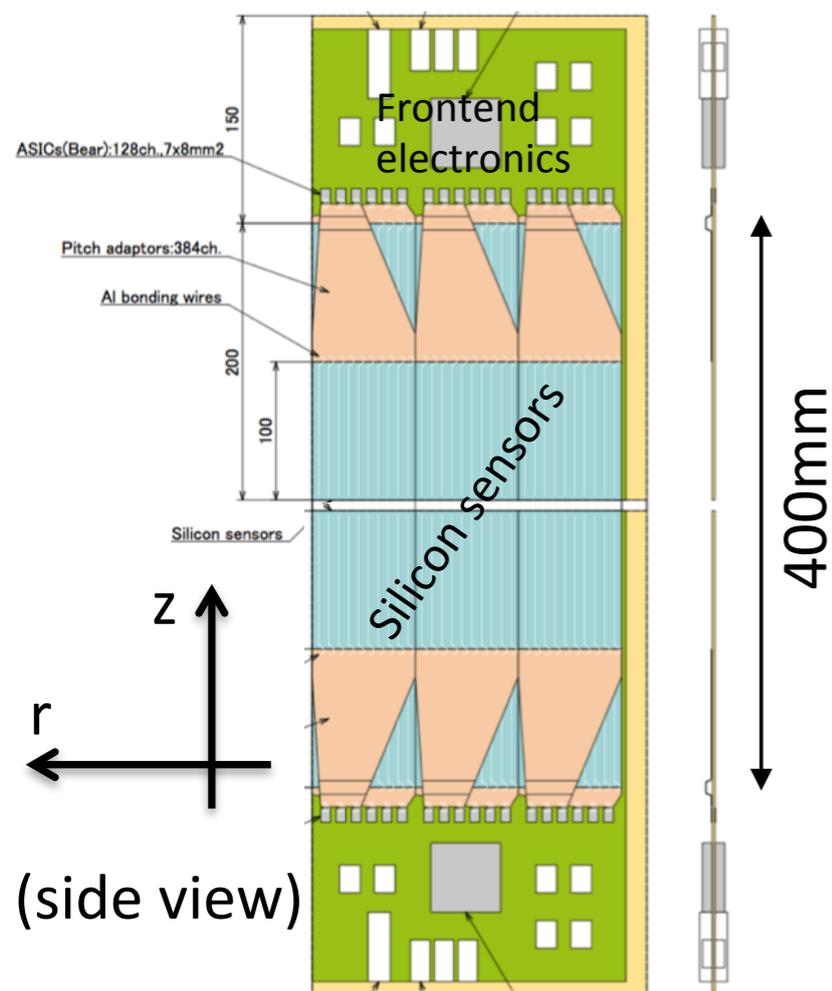
・ テストセンサーとSlitA 2013を接続した試験(Beam試験)

on going

・ フィードバックして実機を設計

センサー配置、形状設計

検出器モジュール(1 vane)

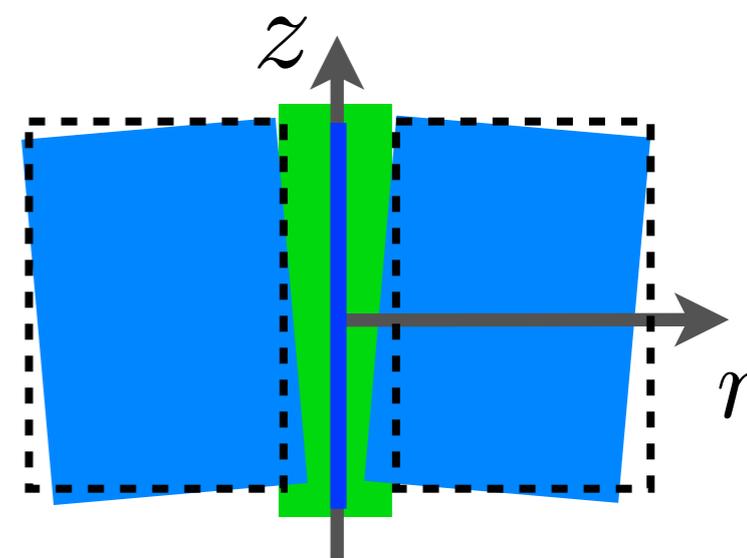


- 1 vaneに12枚のシリコンストリップセンサーを配置

- vane48枚を放射状に配置

- EDM: 磁場Bからのスピン軸の傾きを測定

図のような検出器傾きが偽のEDM信号を生じる

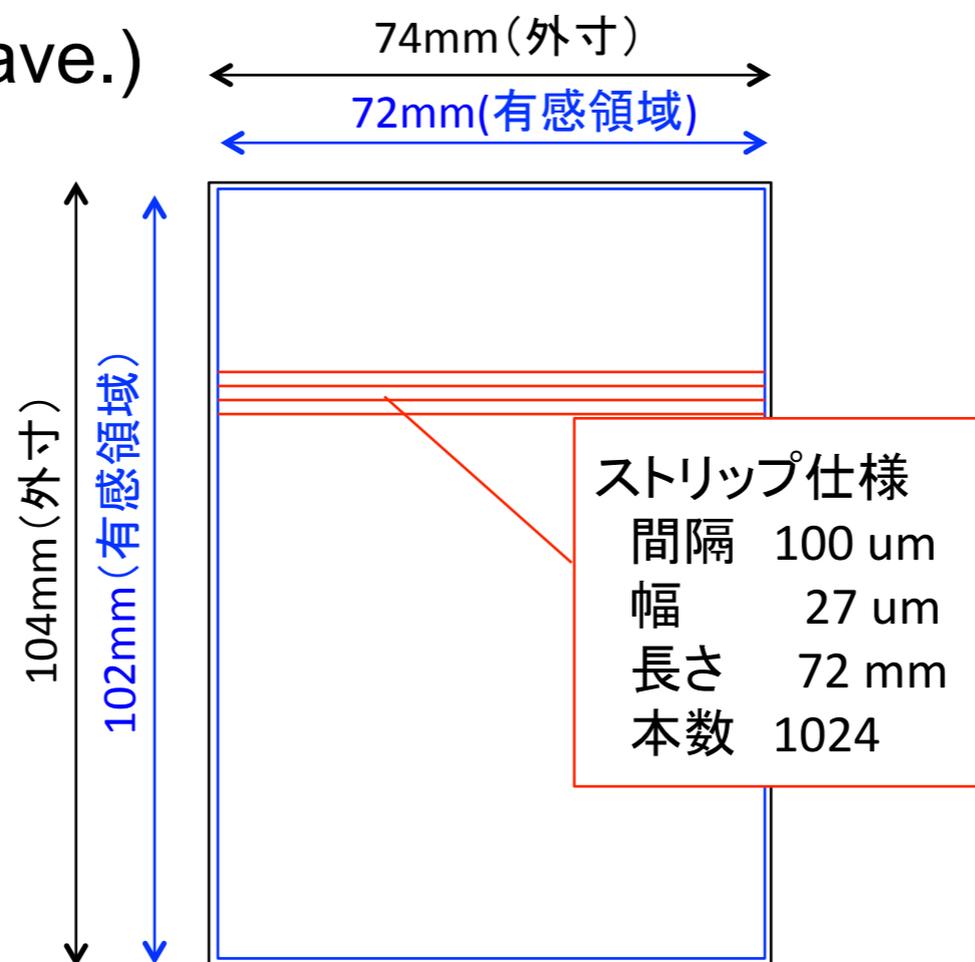


上図のミスアラインメントを10 μ radの精度で感知する必要がある

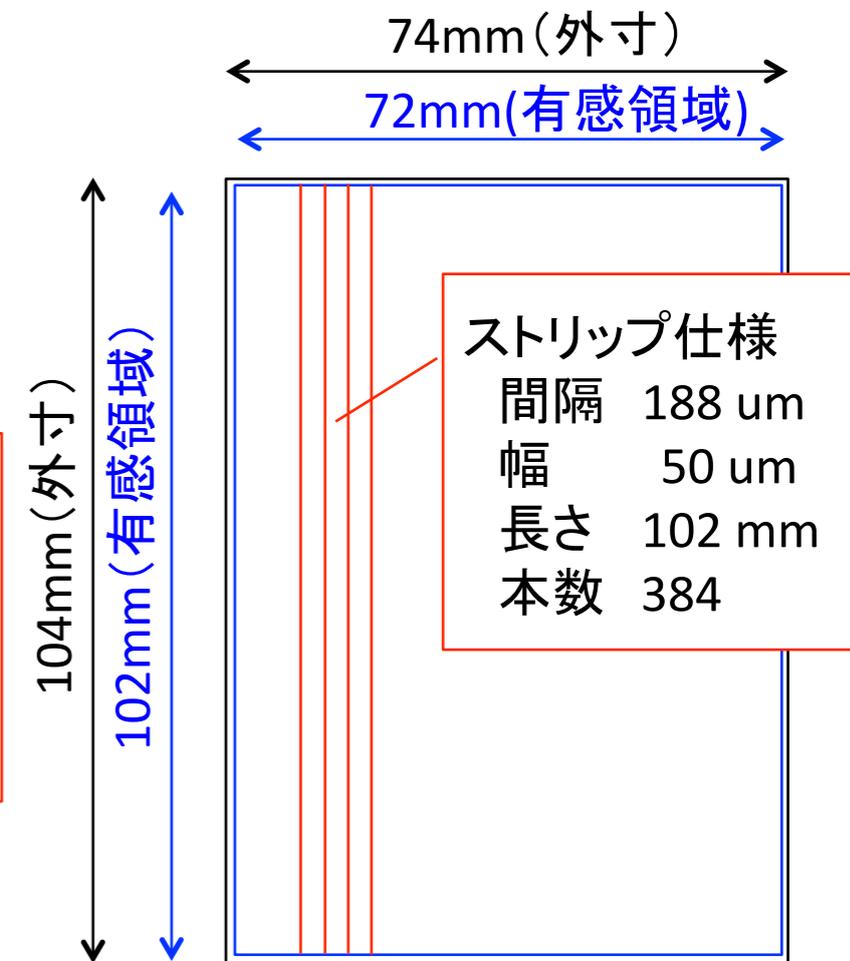
シリコンストリップセンサー仕様

- 厚さ 320 μm
- p^+ -on-n, Single-sided
- バイアス抵抗 10M Ω (ave.)
- AC結合 > 100pF

軸方向(A)センサー



動径方向(R)センサー

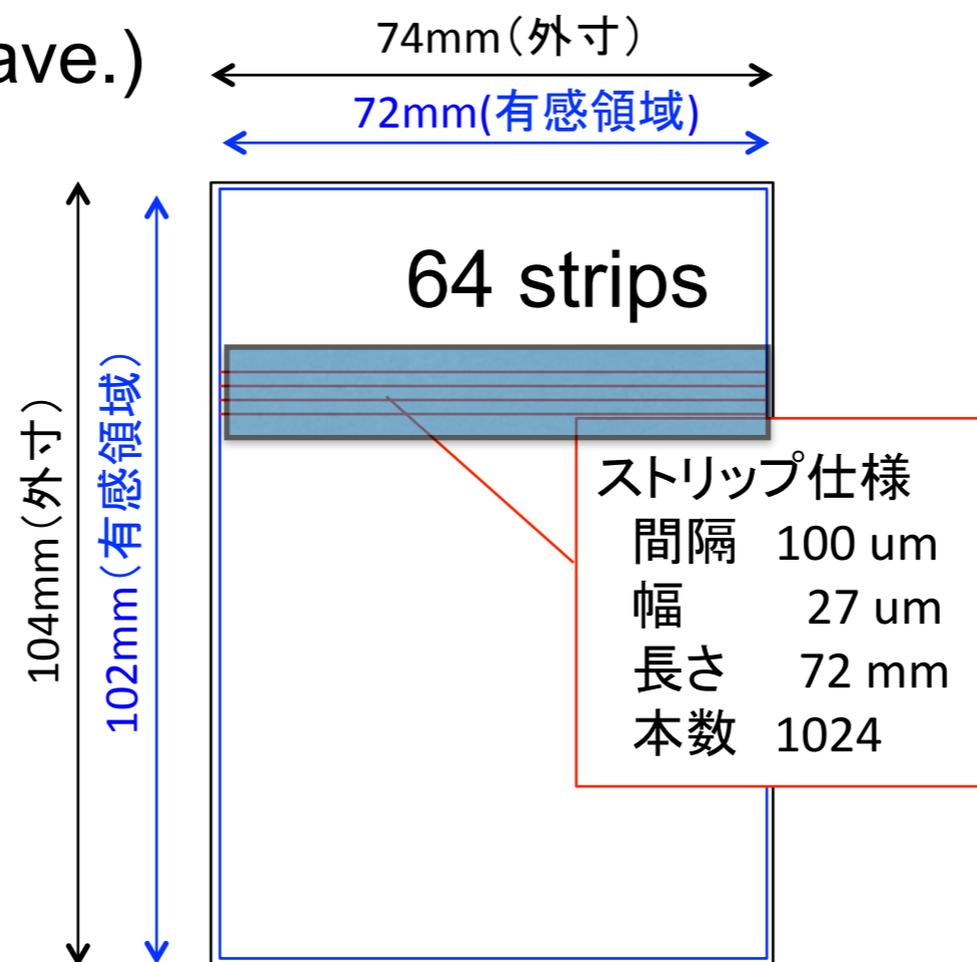


- シミュレーションによりストリップ幅、間隔を最適化 (2013)
- 64 strip分のテストセンサーを製作

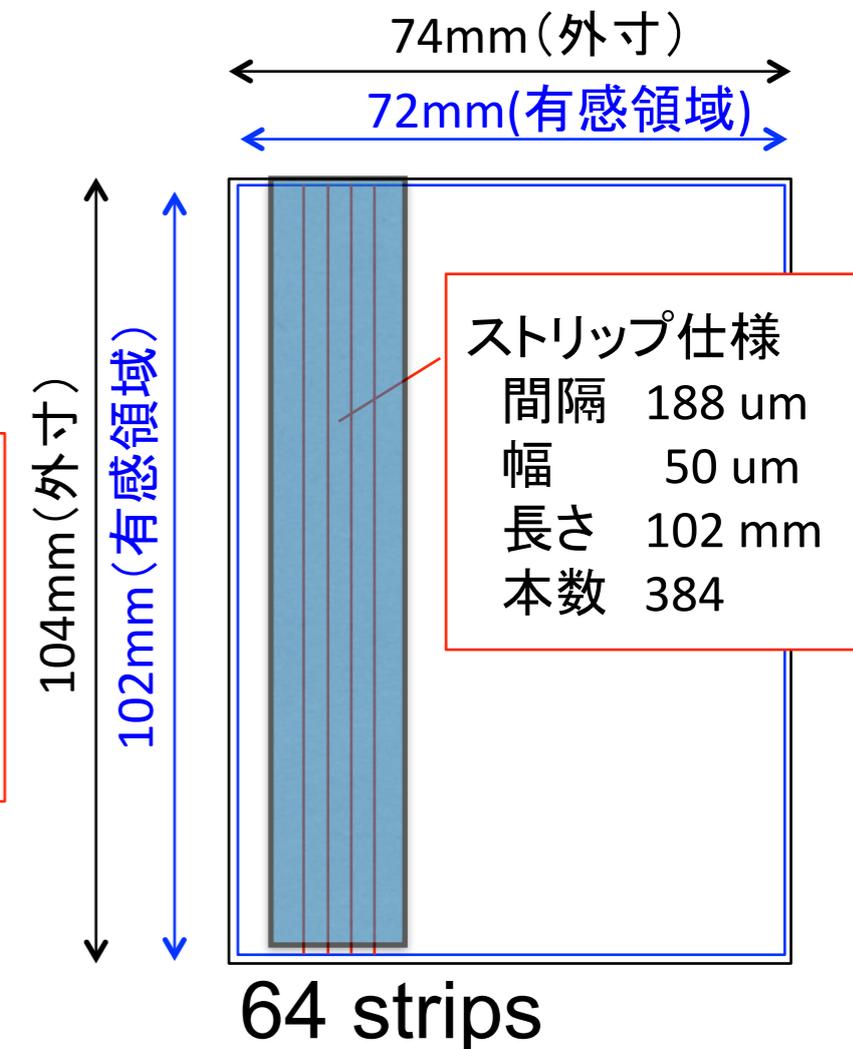
シリコンストリップセンサー仕様

- 厚さ 320 μm
- p⁺-on-n, Single-sided
- バイアス抵抗 10M Ω (ave.)
- AC結合 > 100pF

軸方向(A)センサー



動径方向(R)センサー



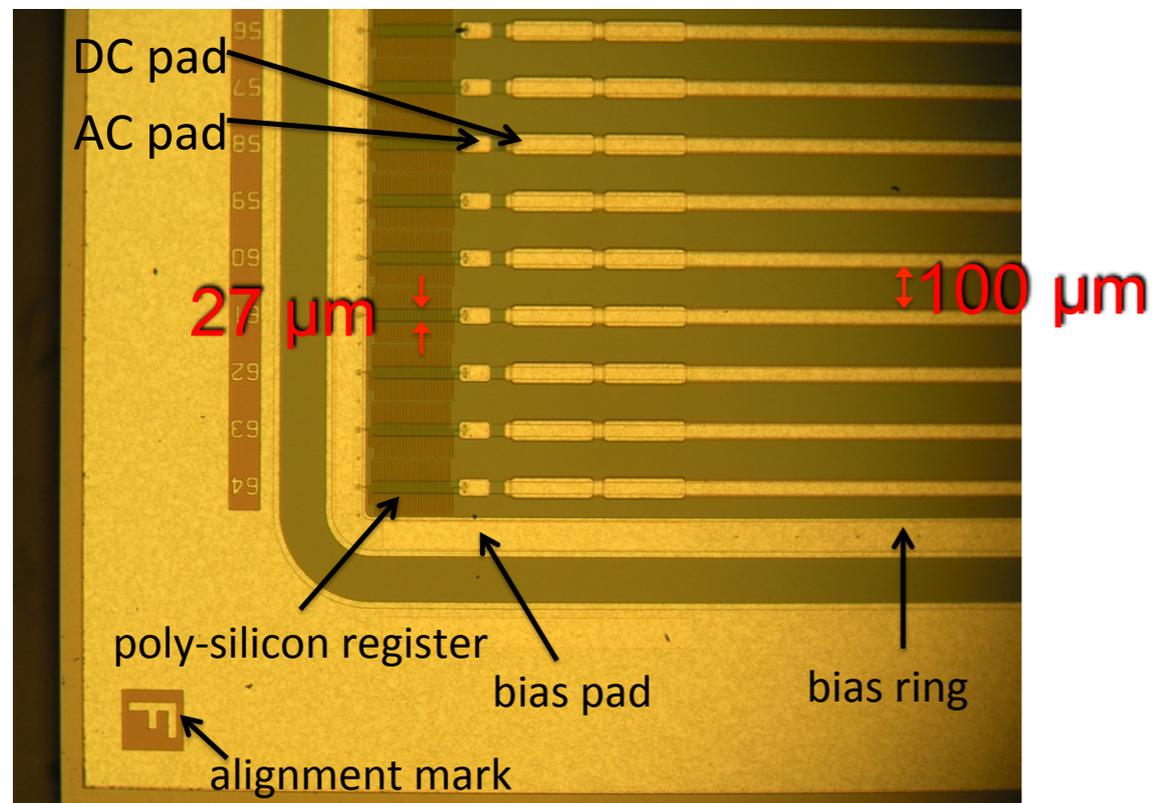
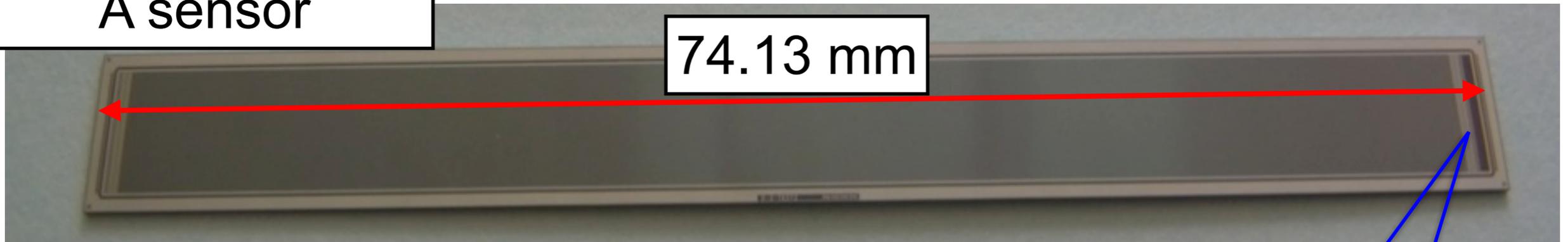
- シミュレーションによりストリップ幅、間隔を最適化 (2013)
- 64 strip分のテストセンサーを製作

テストセンサー製作

- 浜松ホトニクス製
- Belle-II DSSDと同じwaferで製作

A sensor

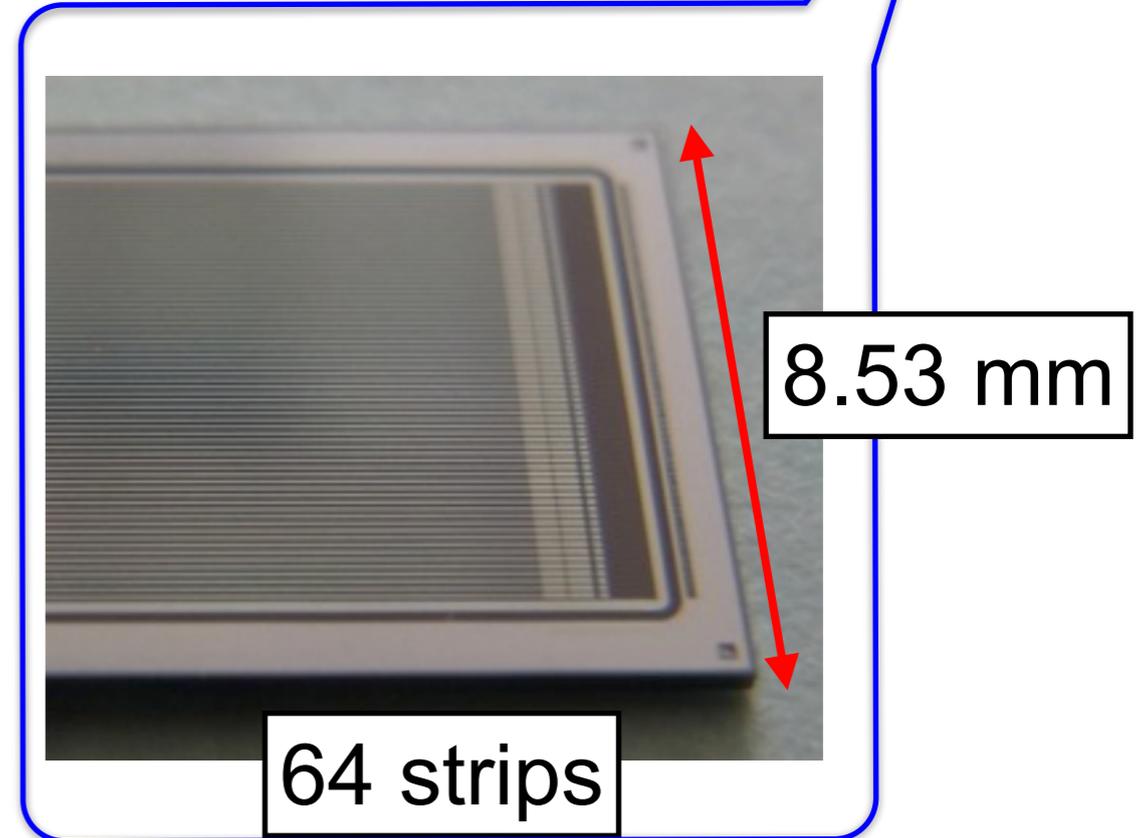
74.13 mm



顕微鏡で撮影

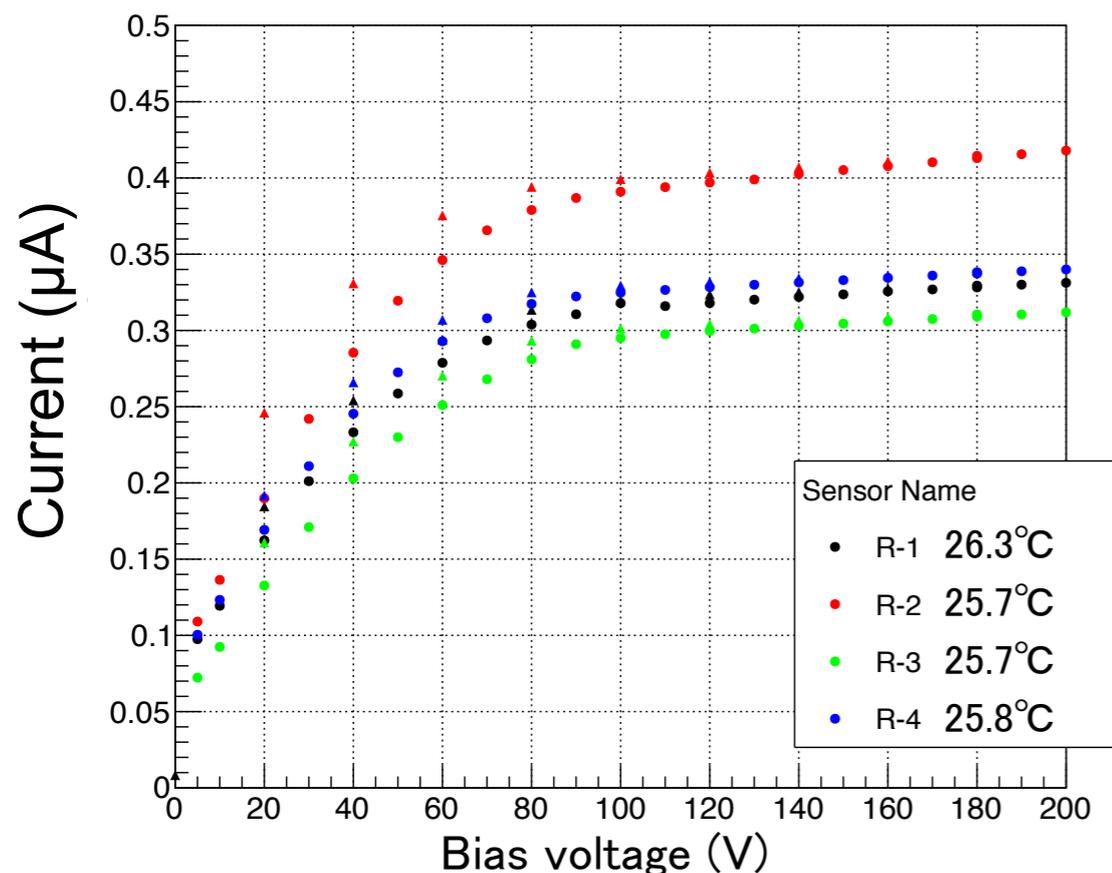
8.53 mm

64 strips

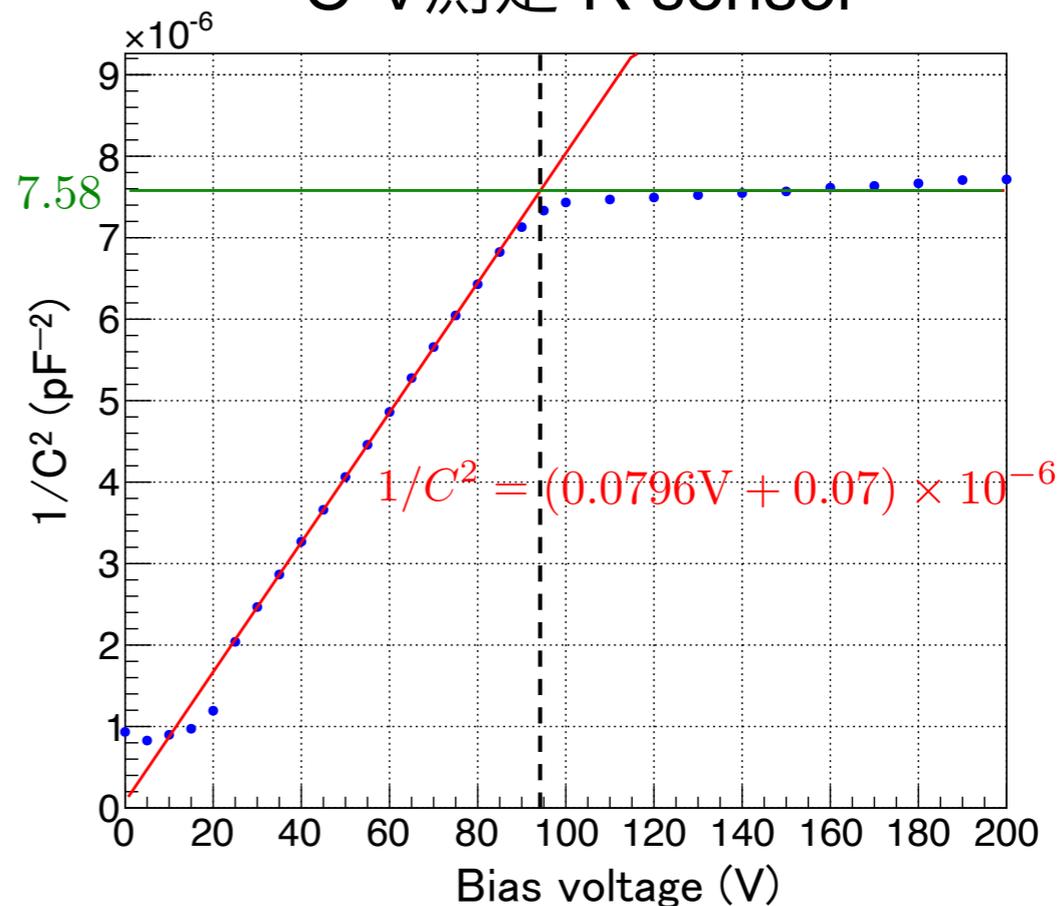


テストセンサー基礎特性評価

I-V測定 R sensor



C-V測定 R sensor



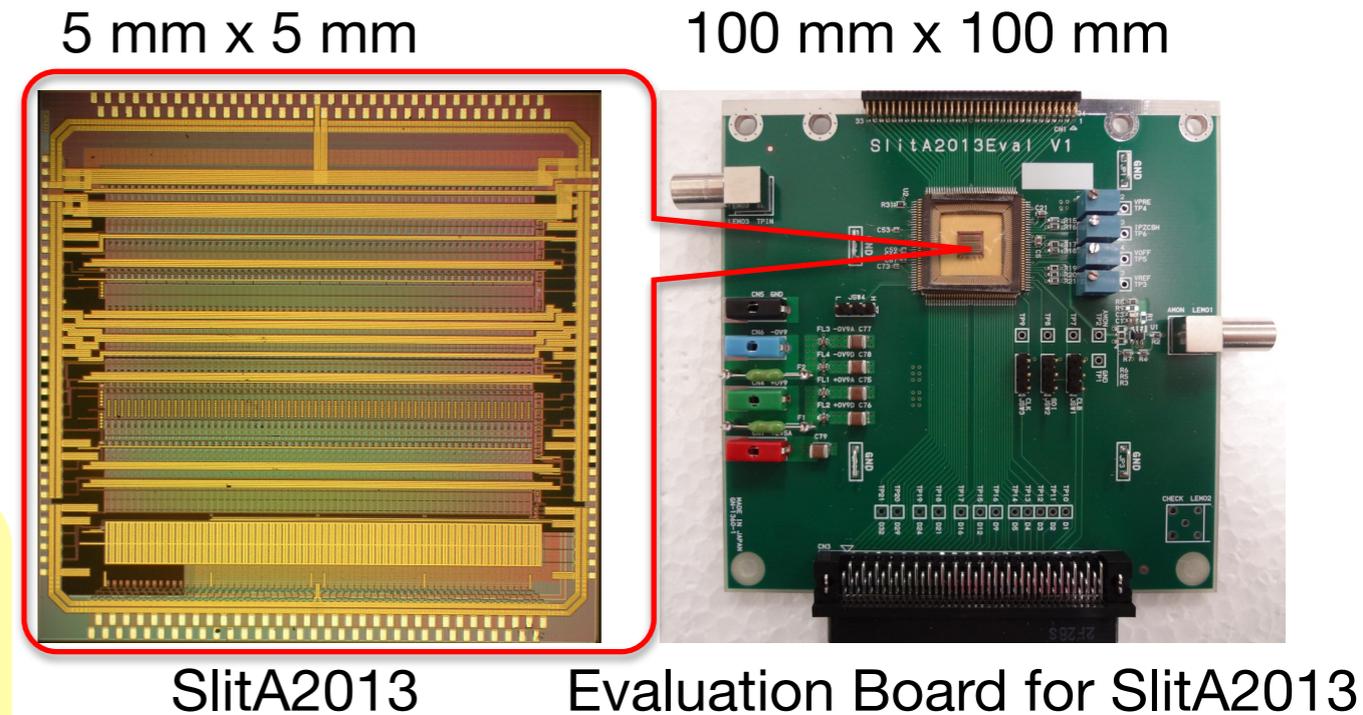
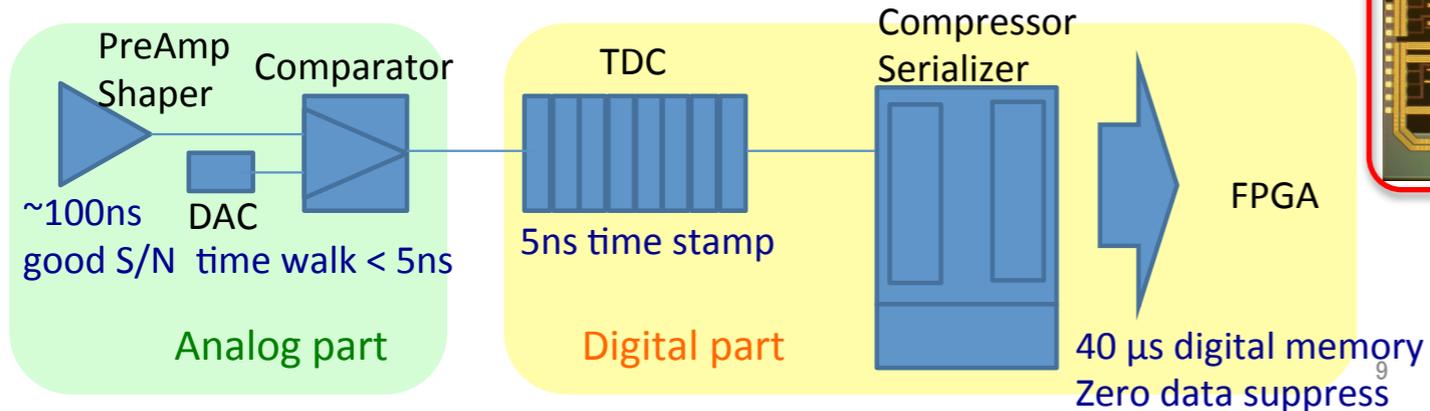
	動径方向(R)センサー		軸方向(A)センサー	
	予想値	測定値	予想値	測定値
目視確認	-	O.K.	-	O.K.
I-V特性	-	O.K.	-	O.K.
完全空乏化電圧		93 V		73 V
バルク容量	350 pF	360 pF	150 pF	170 pF
ストリップ間容量	6 pF	7.4 pF	4 pF	6.2 pF
検出器容量	22 pF	23 pF	14 pF	16 pF
MIP模擬レーザー信号電荷量	2.4x10	2.6x10	2.4x10	2.5x10

期待通りの性能が
得られた

読み出し回路開発(SlitA)

- 読み出しASICの試作機SlitA2013を製作、性能評価を行った
- Process: Silterra 0.18 μ m

S. Shirabe, S. Koura (2014)



Time Walkのみ改善の

必要あり



Gainを大きくして
Time Walkを小さくする
→ 次回試作(Slit128A)

に反映

Parameter	Requirement	Measurement
Gain	> 19 mV/fC	26 mV/fC
ENC	< 1600 e	< 1600 e
Dynamic Range	> 5MIP	> 5MIP
Pulse Width	< 100 ns	80 ns
Time Walk	< 5 ns	~ 10 ns
# of channels	128	64

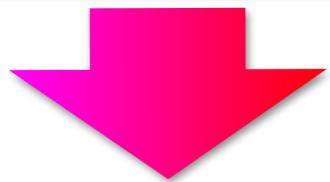
センサー、読み出し回路接続試験(Beam試験)

評価項目

一本の陽電子飛跡(~ 200 MeV/c)に対する応答
(電荷分布、時間分解能、Time over threshold、
Time walk)



- ・ 陽電子飛跡がパイルアップした際の応答
(電荷分布、時間応答)
- ・ J-PARC実験環境でのノイズ測定
(S/Nの要求値 >15)



最終実験環境での性能見積り

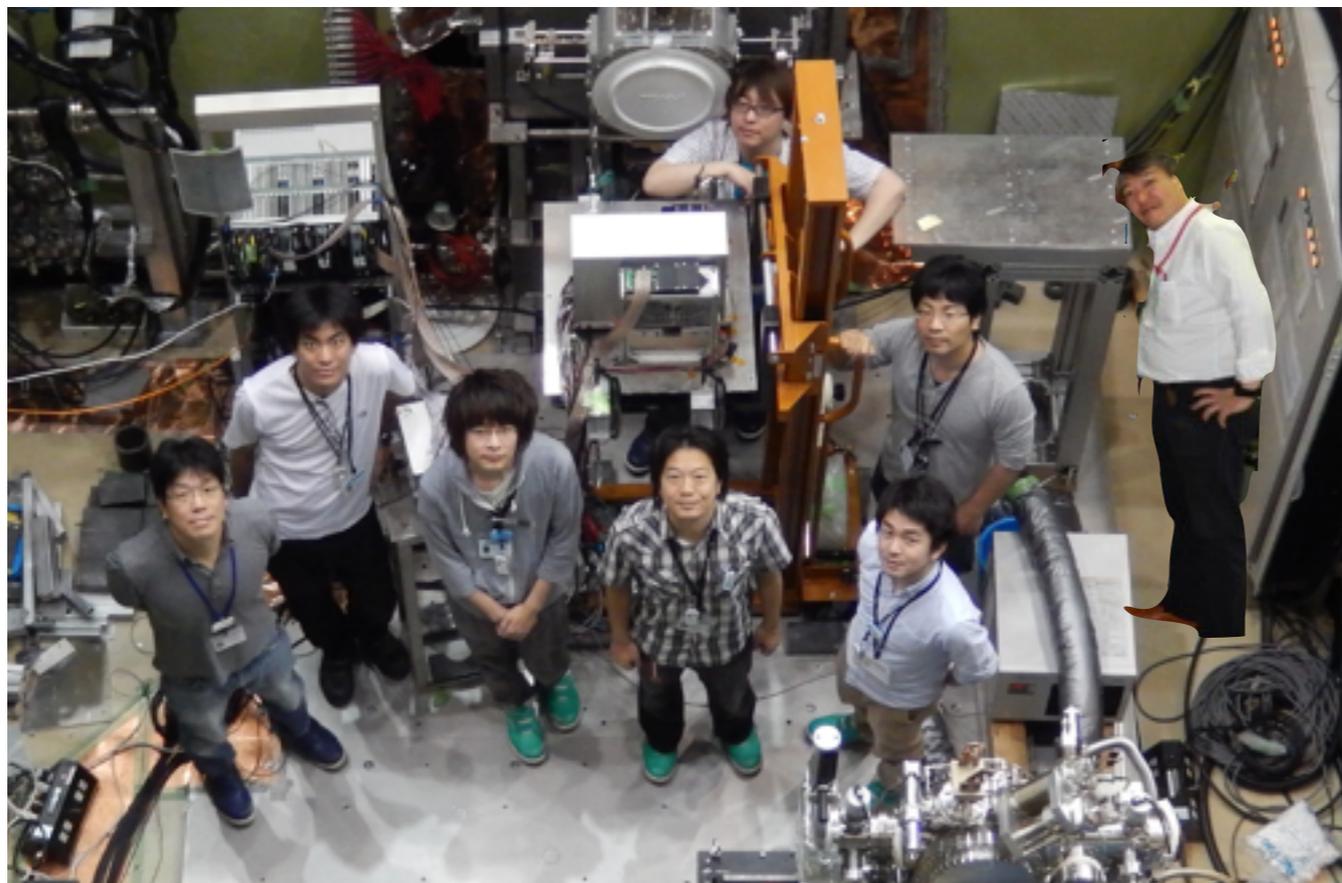
運動量の揃った連続陽電子ビーム

東北大 電子光理学研究センター
電子・陽電子ビームライン
(2014/09/26 ~ 30に実施)

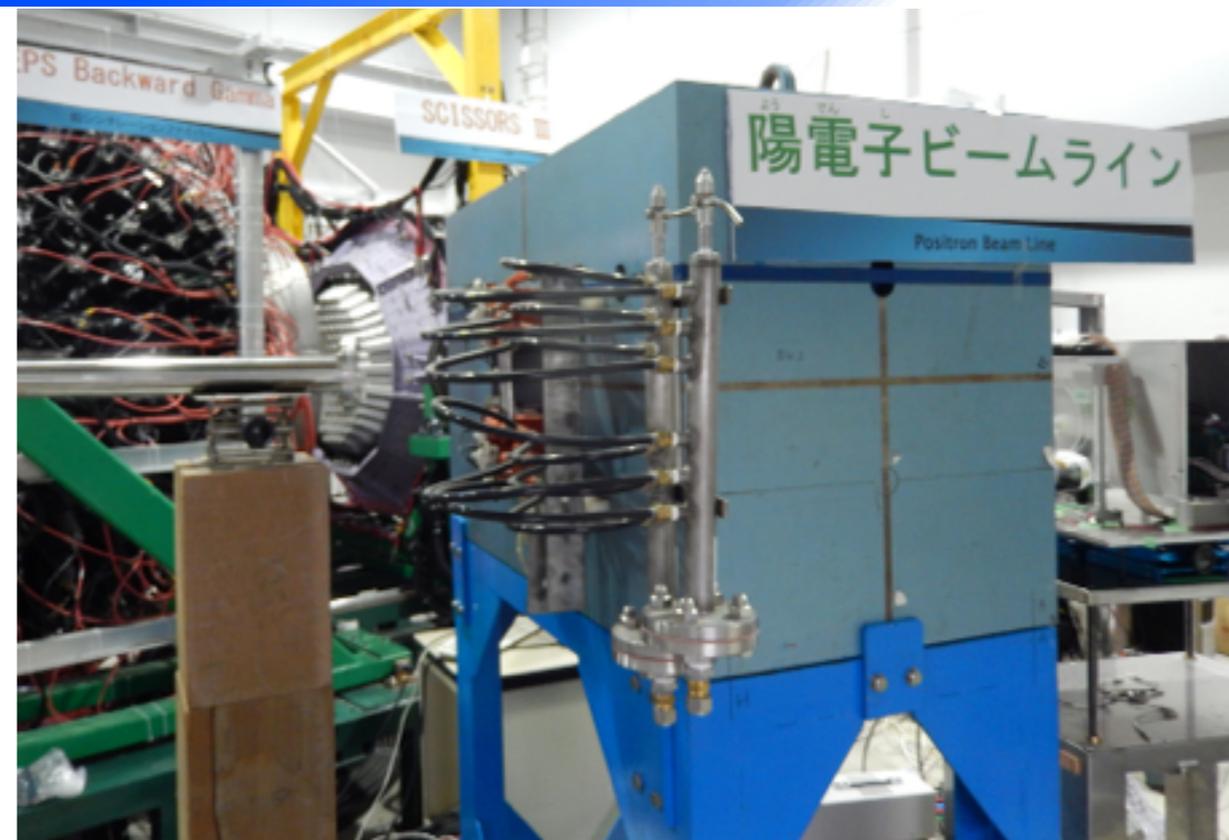
大強度パルスミュオンビーム

J-PARC MLF D-Line
(2014/06/14, 15に実施)

Beam試験の様子



2014/06/15 @ J-PARC MLF



2014/09/26 - 30
@ Tohoku Univ. e^+ beam line

東北大Beam試験セットアップ

ビーム条件

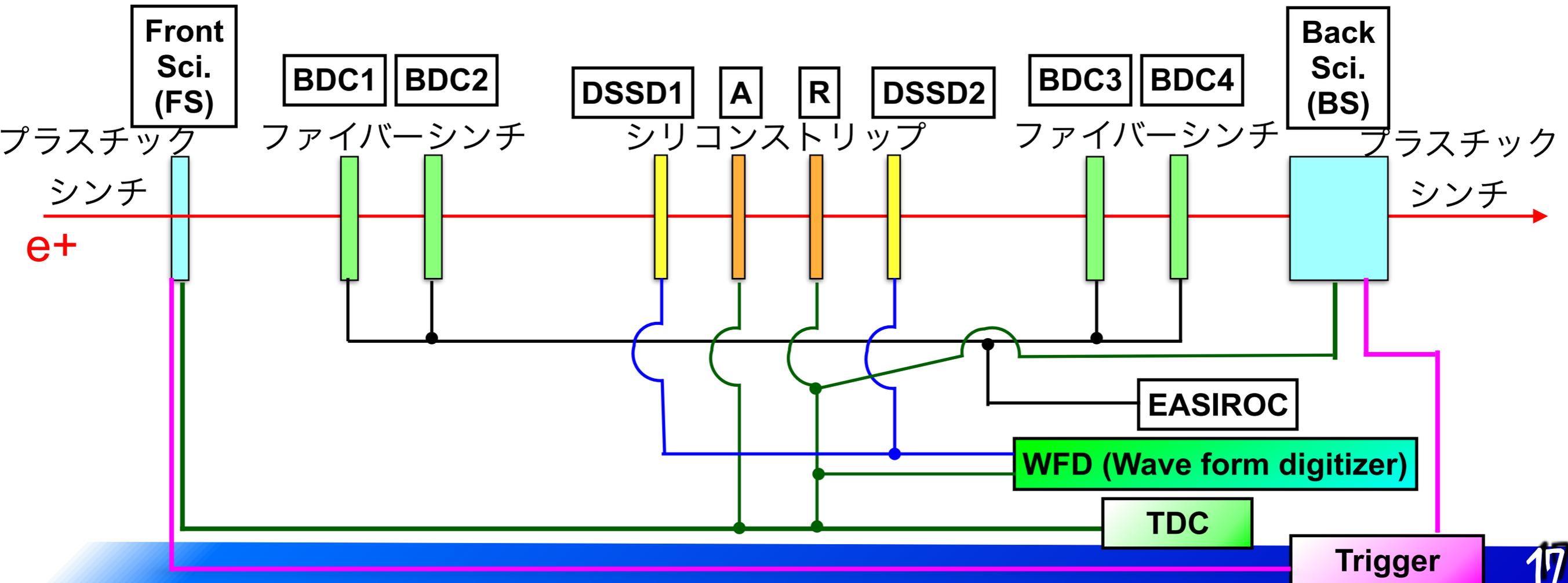
陽電子: $p=200 \text{ MeV}/c$

スピル長: 20 sec

平均レート: 400 e^+ /sec

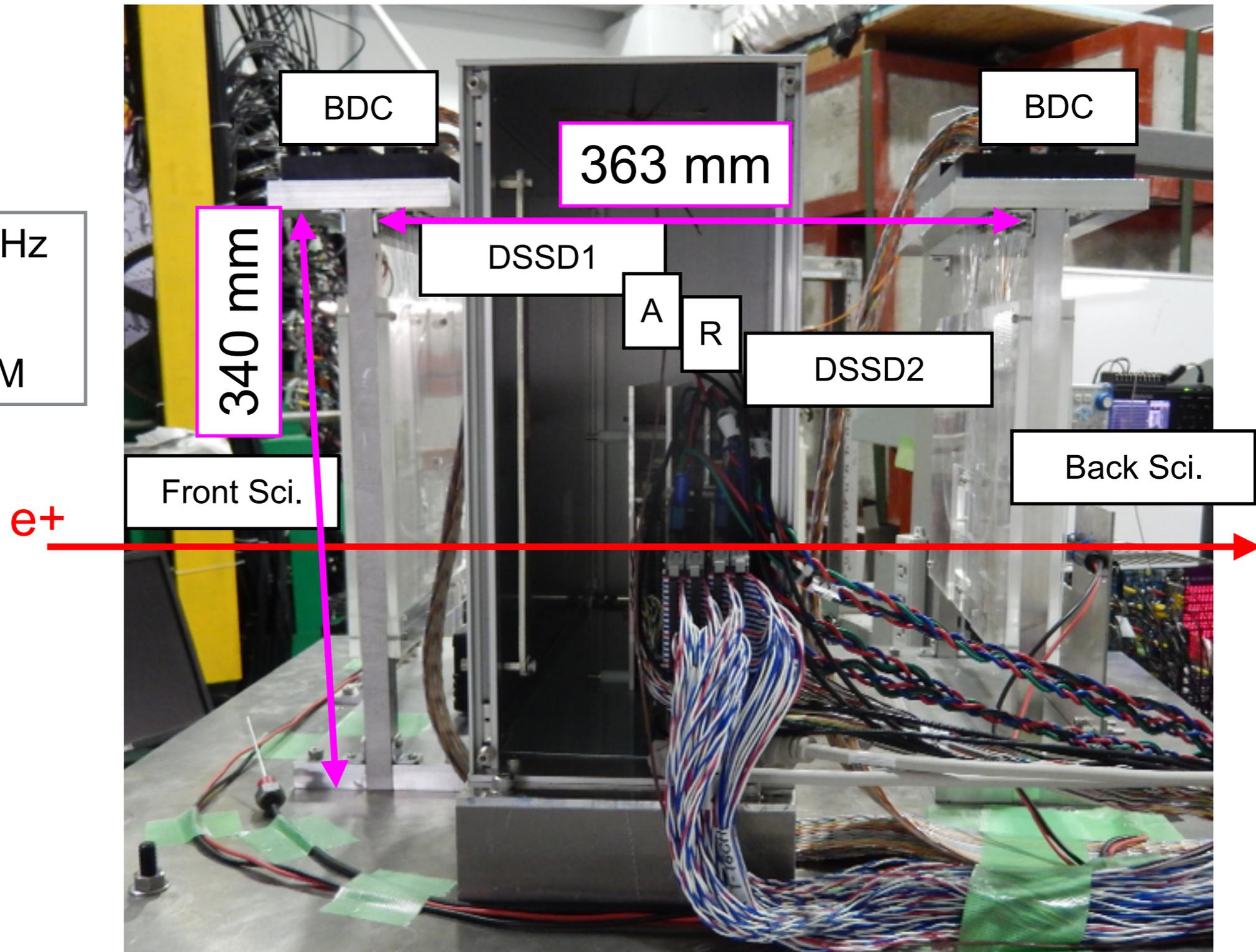
ビームサイズ: $\sigma_x: 10.3 \text{ mm}$ $\sigma_y: 7.0 \text{ mm}$

検出器セットアップ



東北大Beam試験セットアップ(写真)

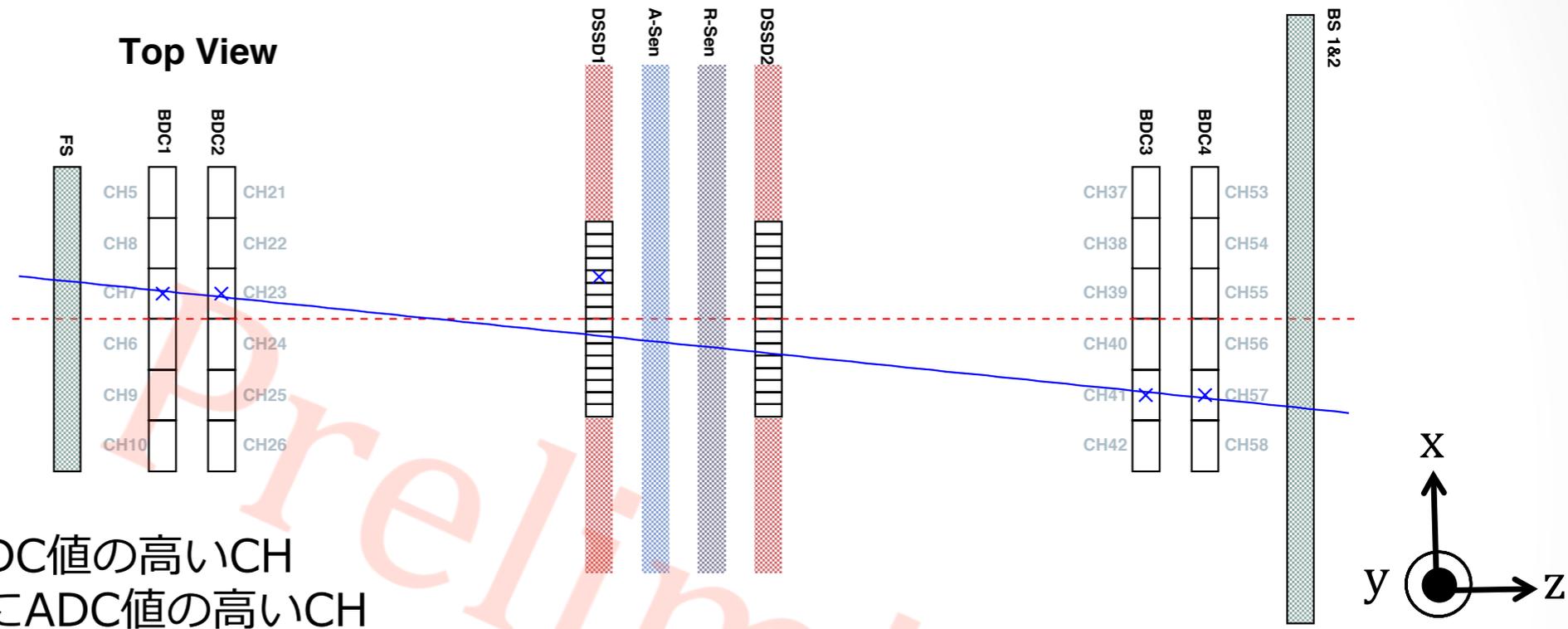
トリガーレート : 45 Hz
Live time : 59 %
総トリガー数 : 2.25 M



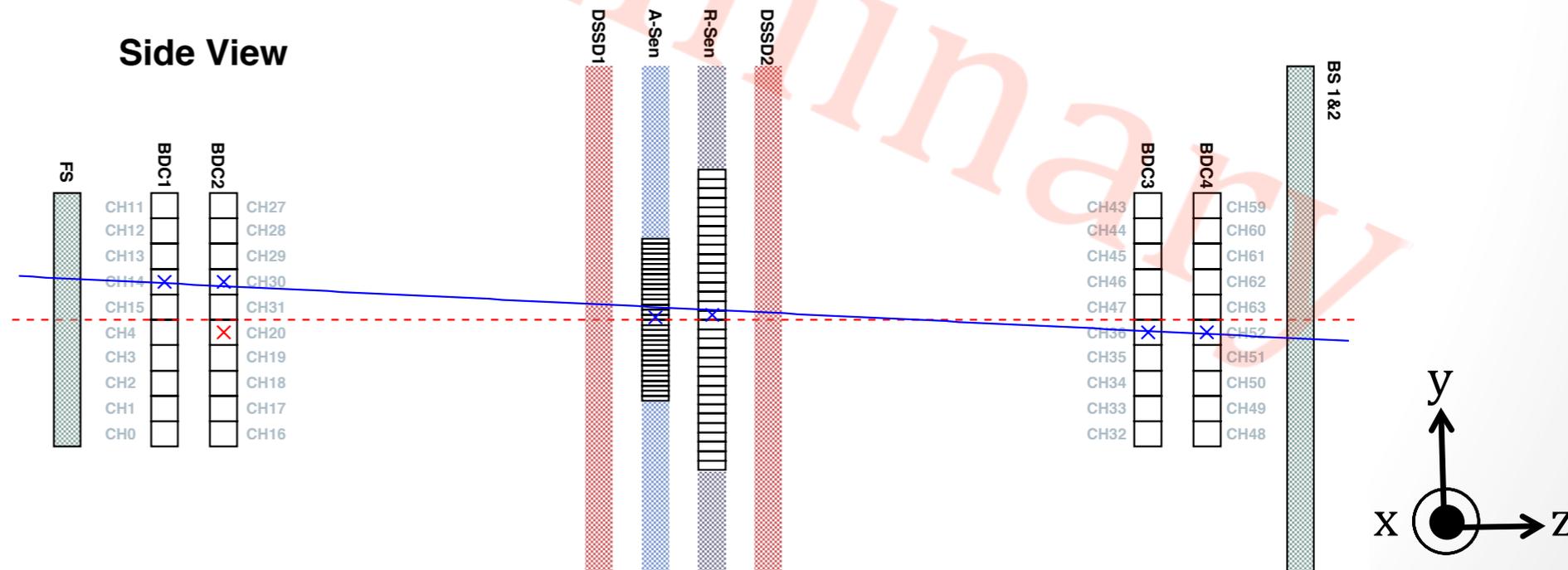
BDCを使ったトラッキング

T. Nagasawa (2014)

- BDC4台の内、3台ヒットがある場合、トラックを引く

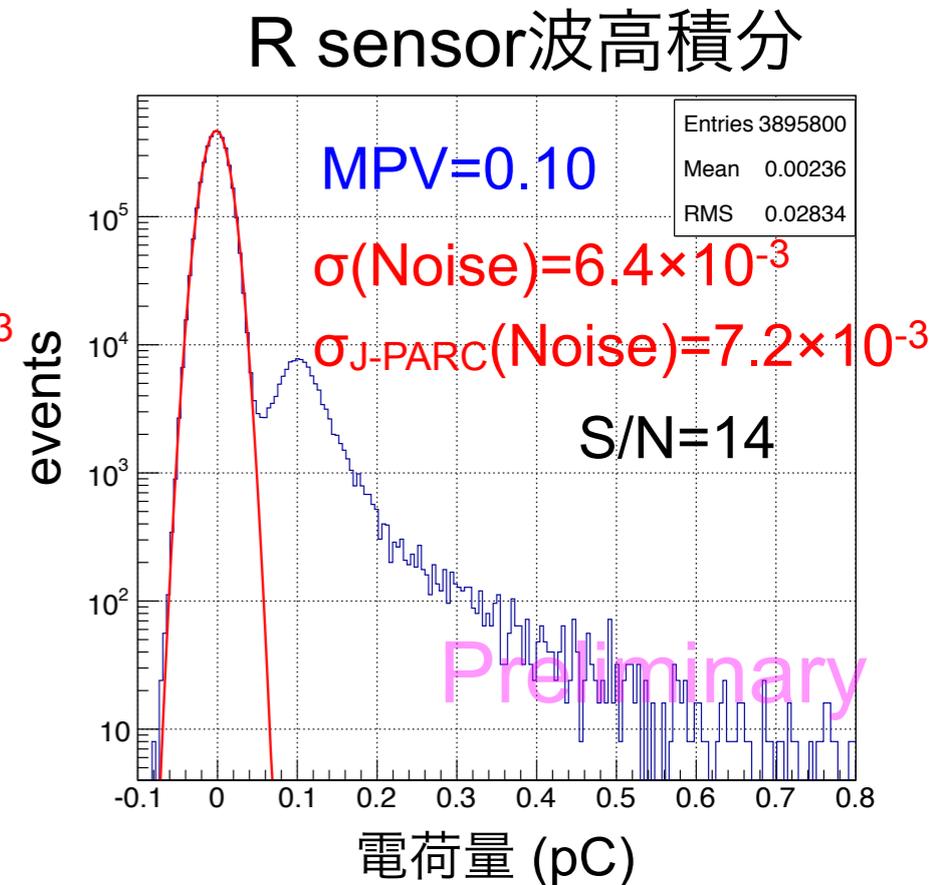
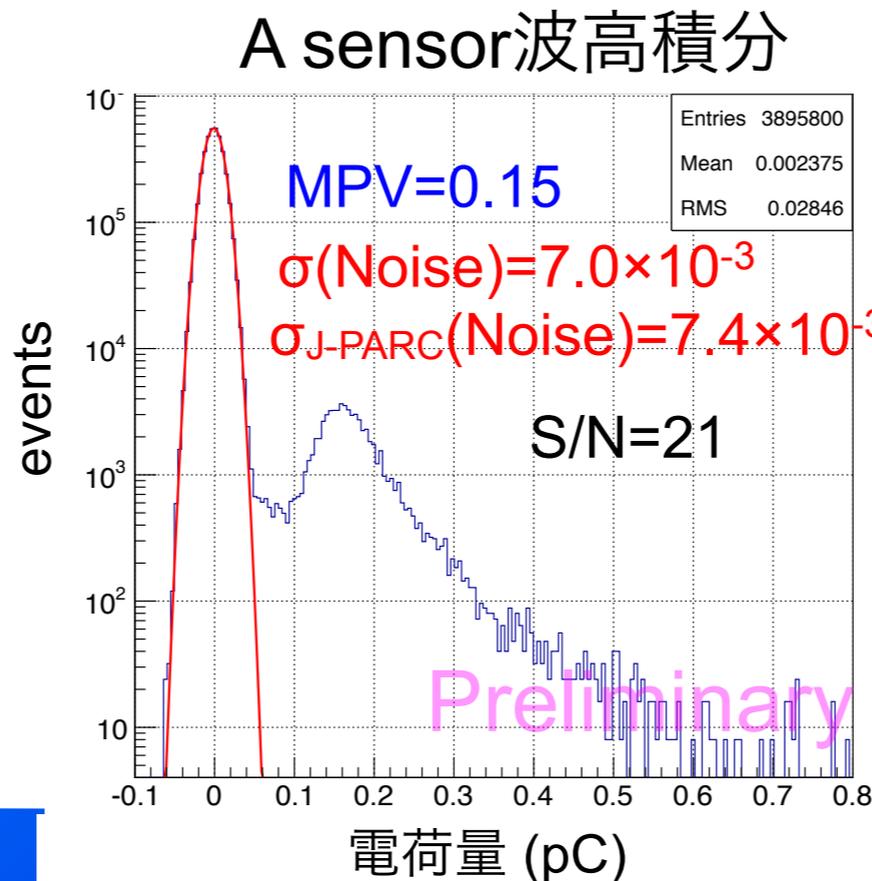
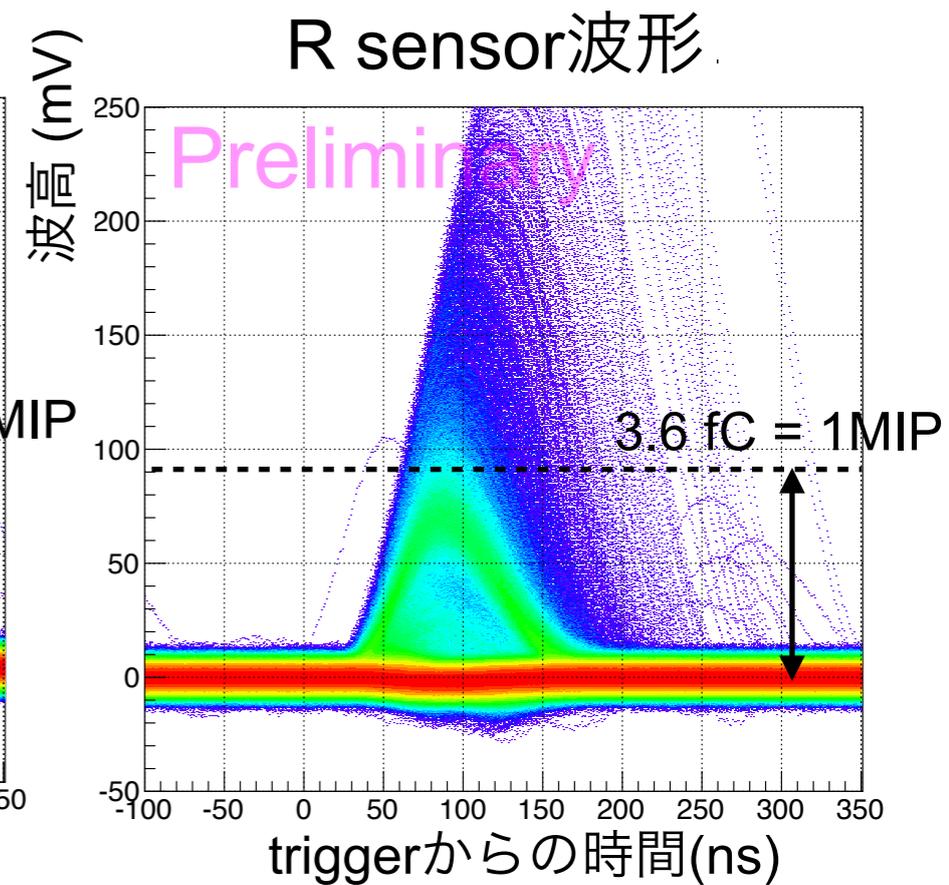
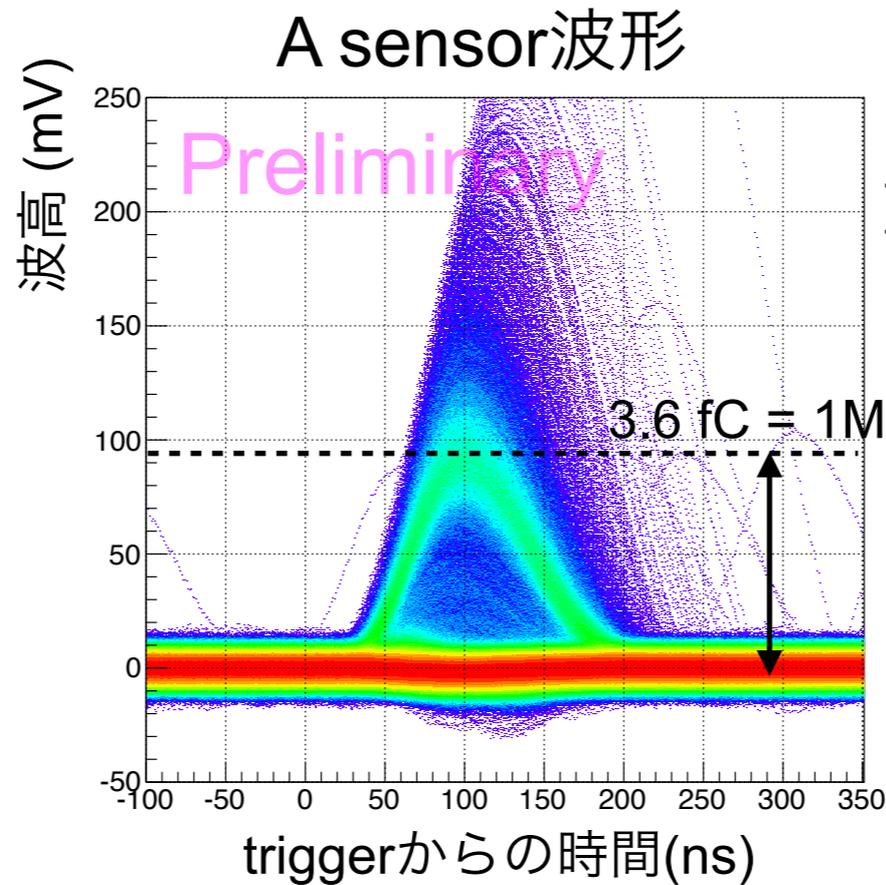


- トラックが引けた場合、A,R sensorを通過している可能性が高い



陽電子トラックに対する応答(S/N)

- BDCでトラックが引けたイベントのみの波形を重ね書き
- 陽電子飛跡の信号がノイズと明確に区別できている
- 電荷量からS/Nを評価
- **要求値** : $S/N > 15$
A sensorでは要求を満たす



Summary

- J-PARC E34実験：ミュオン $g-2$ /EDMを精密測定
 $g-2$: 0.1 ppm / EDM : $\sim 10^{-21}$ e cm
- 陽電子飛跡検出器の要素開発は終盤へ
 - シリコンストリップセンサー
仕様の最適化、テストセンサー製作、基礎特性評価を行い、要求を満たすものが得られた。
 - 読み出し回路 (SlitA2013)
仕様決定、試作、性能評価を行い、ほぼ要求を満たすものが得られた。
 - Beam試験
東北大とJ-PARCでデータ取得を行い、良好なS/Nが得られた。
- 今後、データ解析を終わらせ、次の試作及び実機の設計を行う。

Back up slides

共同研究者

KEK

田中真伸・池野正弘・内田智久＋Esysグループの皆様
高力孝・上野一樹・佐々木修・三部勉・齊藤直人
西村昇一郎（東大）

九州大学

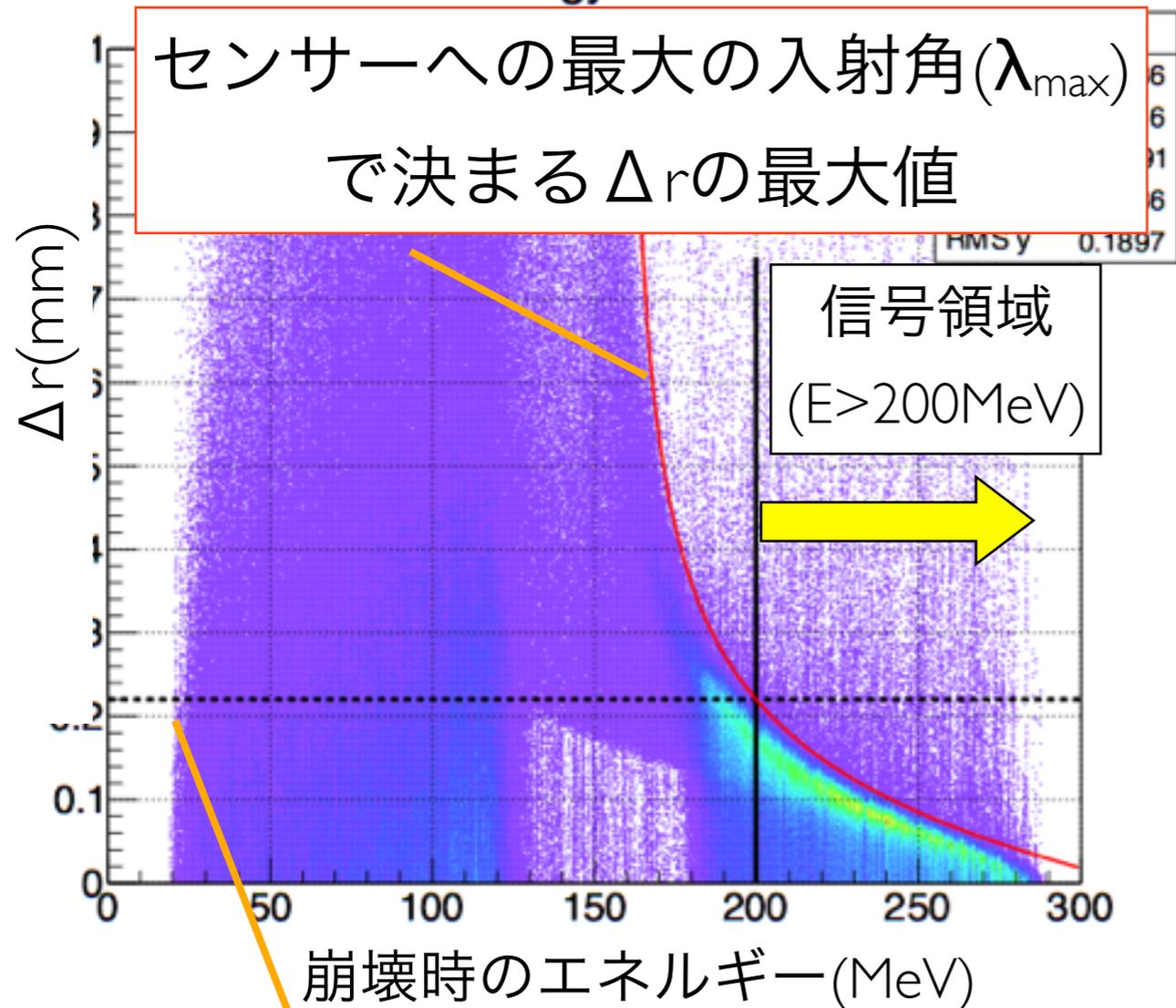
吉岡瑞樹・東城順治・川越清以
調翔平・古浦新司・長澤翼

JAXA

池田博一

シリコン内での陽電子移動距離

Energy vs Δr



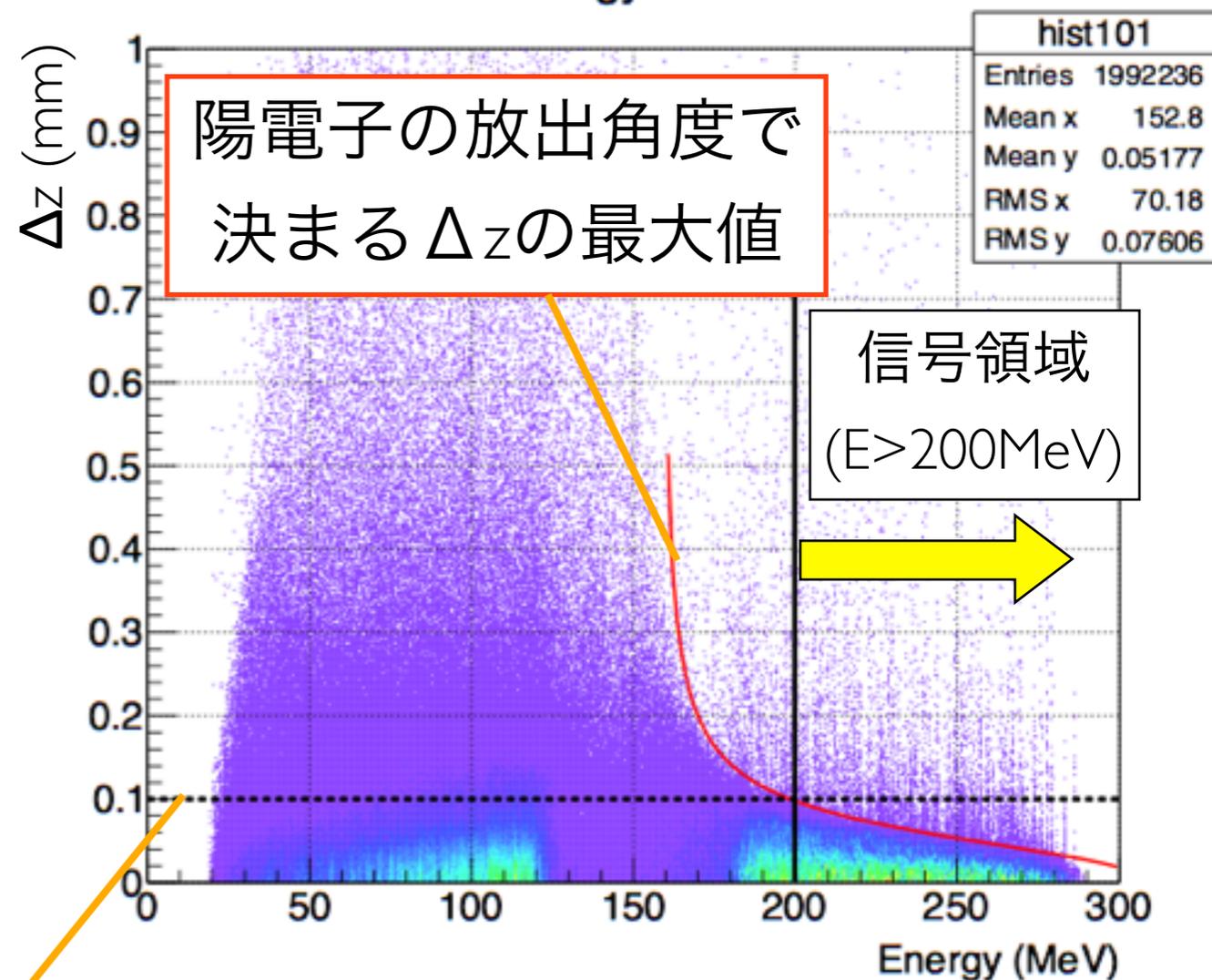
信号領域での $\Delta r, \Delta z$ の最大値

信号領域では

$$\Delta r < 0.22 \text{ mm} \quad \Delta z < 0.10 \text{ mm}$$

で制限される

Energy vs Δz



最適なストリップ間隔は

r方向 : 0.188 mm \rightarrow 0.22 mm

z方向 : 0.255 mm \rightarrow 0.10 mm

と決定される。

ヒットレートに対する要求

信号がパイルアップすると

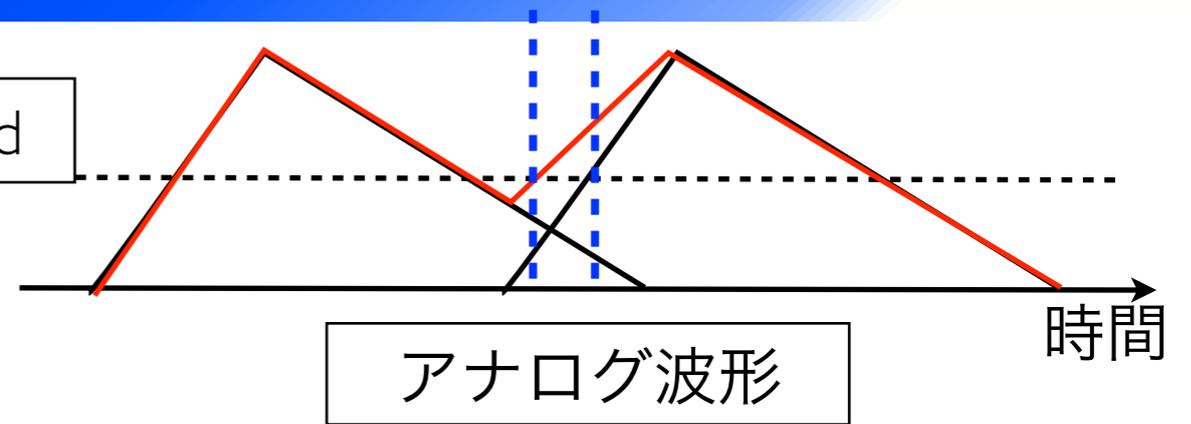
時間情報がずれる

→陽電子の時間スペクトルを歪める

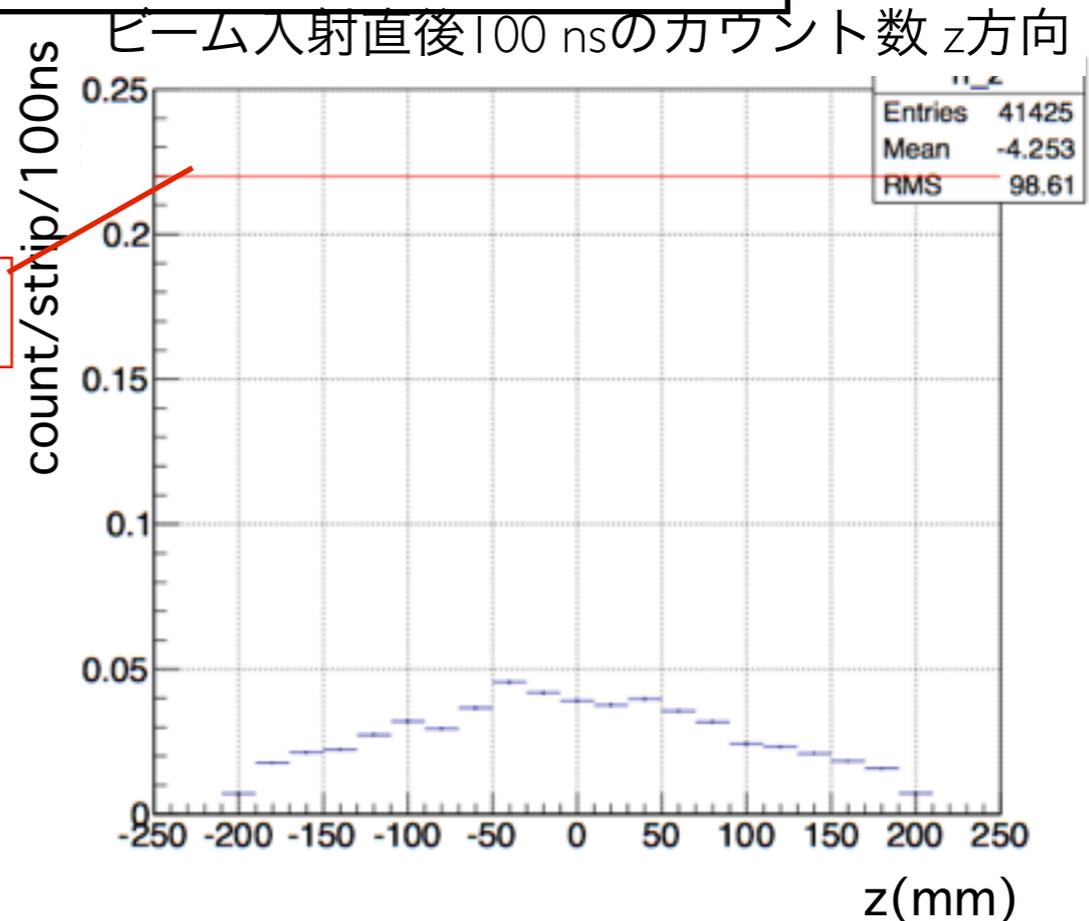
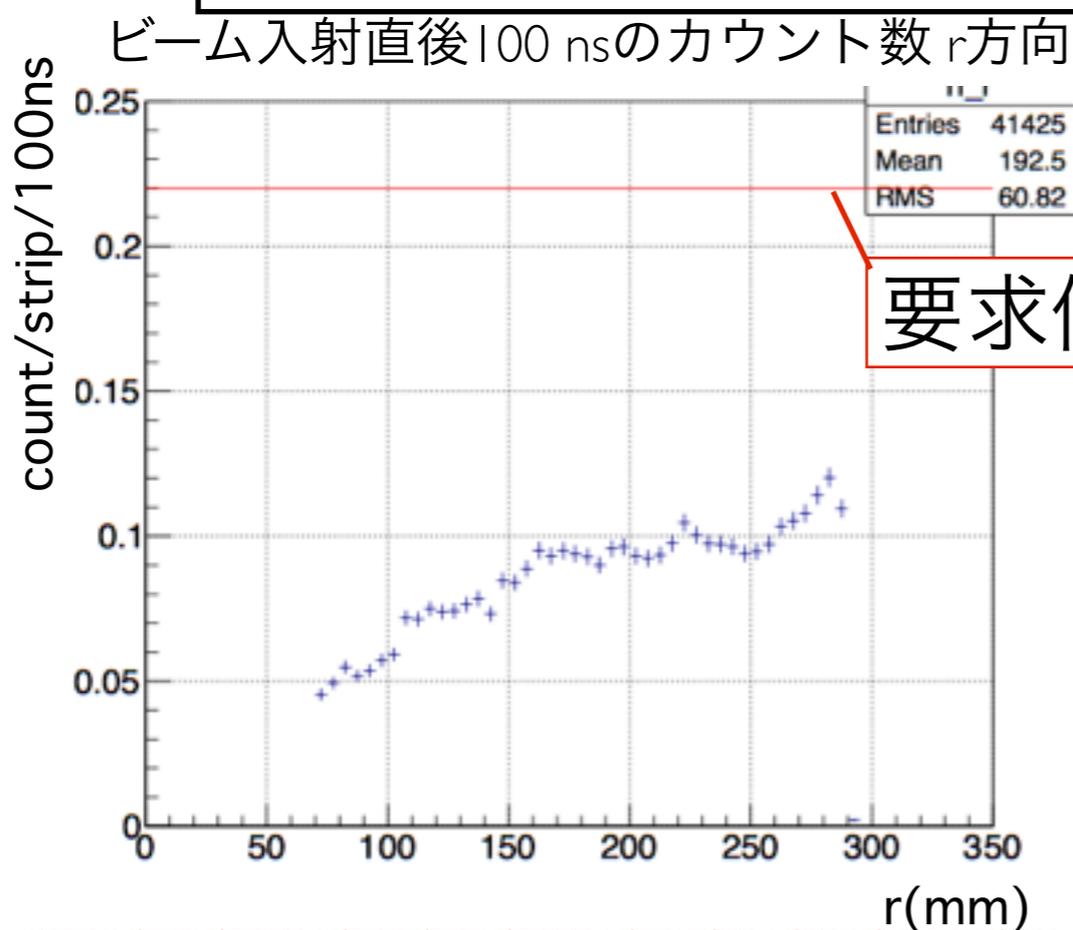
→ ω の値をずらす

許容されるヒットレート < 0.22 count/strip/100 ns

Threshold



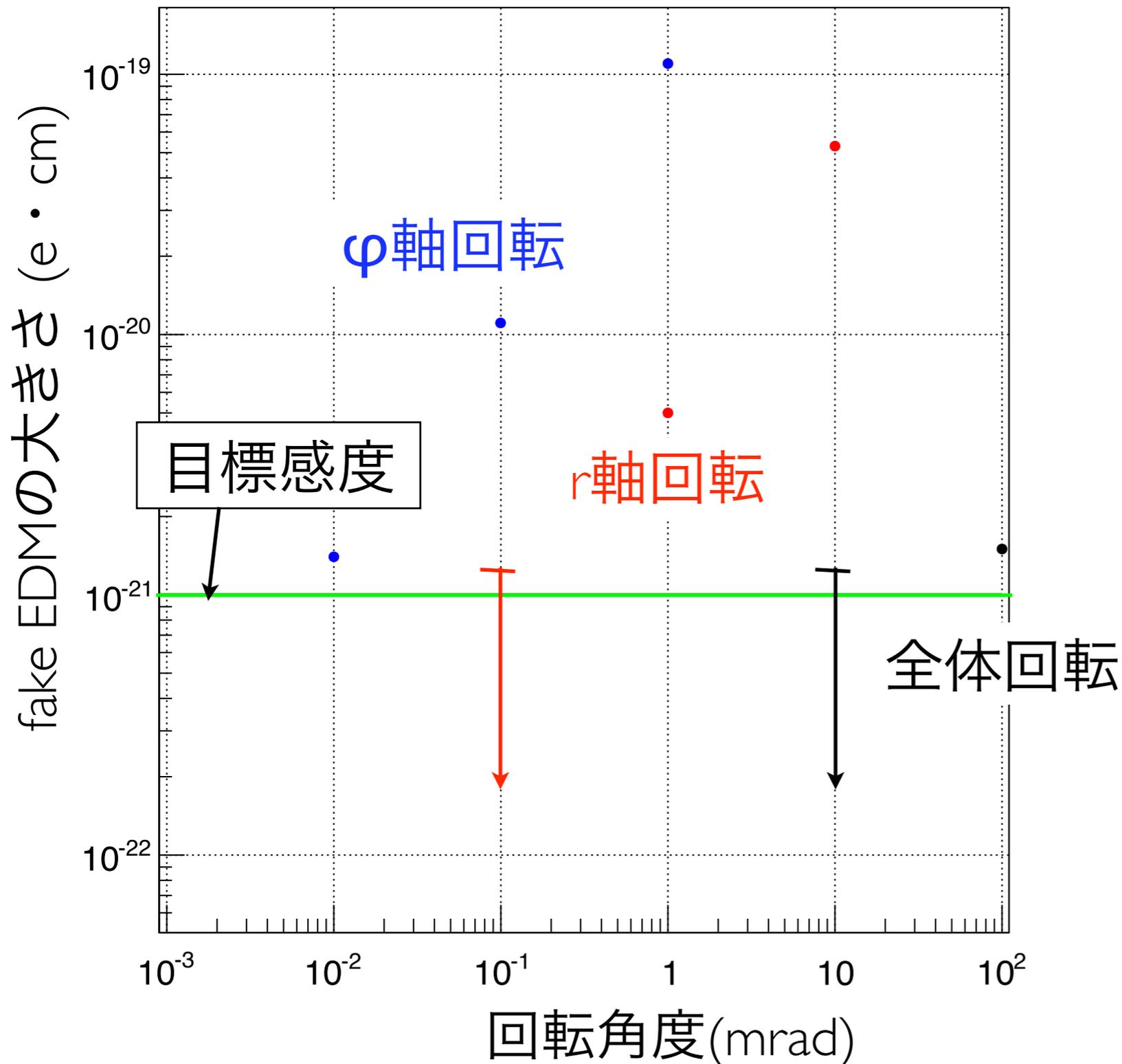
ストリップ間隔 r方向 : 0.22 mm
z方向 : 0.10 mm のときのレート



上記のストリップ間隔でレートの要求を満たす

検出器ミスアラインメントとEDM測定感度

設置精度とfake EDMの大きさ



- fake EDMを目標感度よりも小さくするためには

φ軸回転 : < 0.01 mrad

r軸回転 : < 0.2 mrad

z軸回転 : 100 mradでも変化なし

全体回転 : < 100 mrad

の精度でアラインメントする必要がある