

J-PARC muon g-2/EDM実験のための 検出器開発

計測システム研究会 2012.11.5

上野一樹 (KEK)

for the J-PARC muon g-2/EDM collaboration

もくじ

- インTRODクシヨN
 - ミューオンg-2/EDM
 - J-PARC muon g-2/EDM実験
- J-PARC muon g-2/EDMにおける検出器
- 検出器R&D
 - 各パート紹介
 - 読み出しASIC開発
- まとめ

イントロダクション

磁気・電気双極子モーメント

電磁場中のスピン1/2粒子

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

B:磁場、
E:電場

磁気モーメント

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

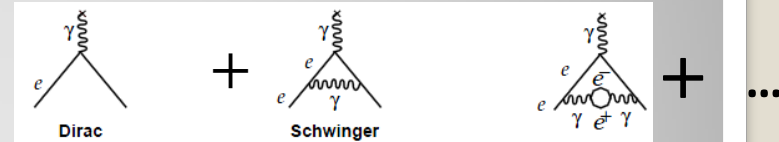
q:電荷、m:質量、s:スピン

ディラック方程式 $\Rightarrow g=2 \Rightarrow a=0$

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

標準模型 (SM) $\Rightarrow g \neq 2 \Rightarrow a \neq 0$

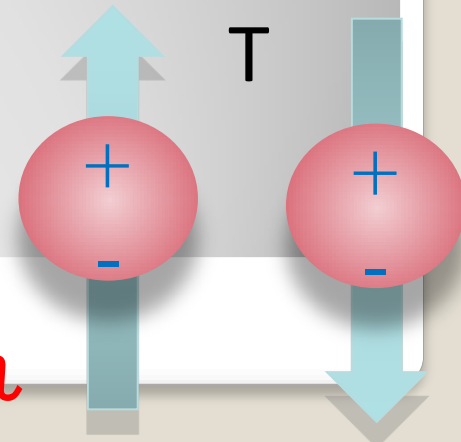
(例) 電子の場合



電気双極子モーメント (EDM)

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

もしあれば...



CPT定理: T対称性の破れ \Rightarrow CP対称性の破れ

ミューオン異常磁気モーメント

ミューオンg-2: 実験とSMにわずかなずれ

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

BNL E821実験

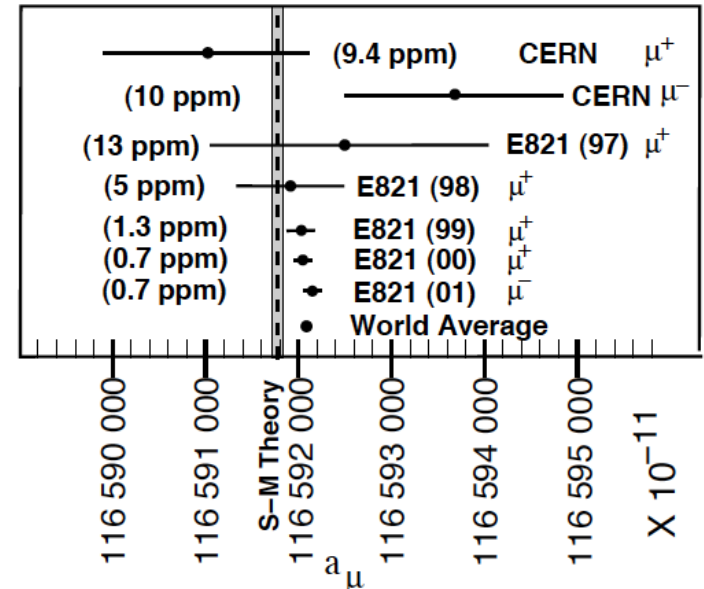
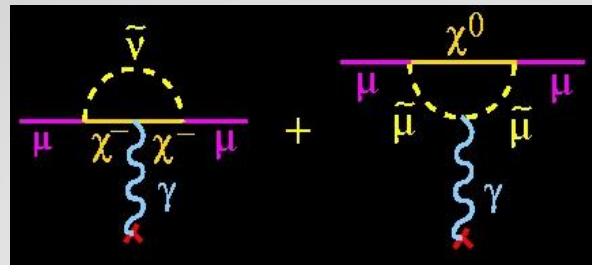
$$\Delta a_{\mu}^{\text{Exp-SM}} = 255(63)(49) \times 10^{-11} \Rightarrow 3.2\sigma$$

<http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-g-2-muon-anom-mag-moment.pdf>



新しい物理?

(例) 超対称性粒子 (SUSY) の寄与



最新の実験精度 G. W. Bennett et al. PRD (2006)

$$\frac{\Delta a_{\mu}^{\text{exp}}}{a_{\mu}} = 0.54\text{ppm}$$



更なる精度向上
⇒ ずれの検証

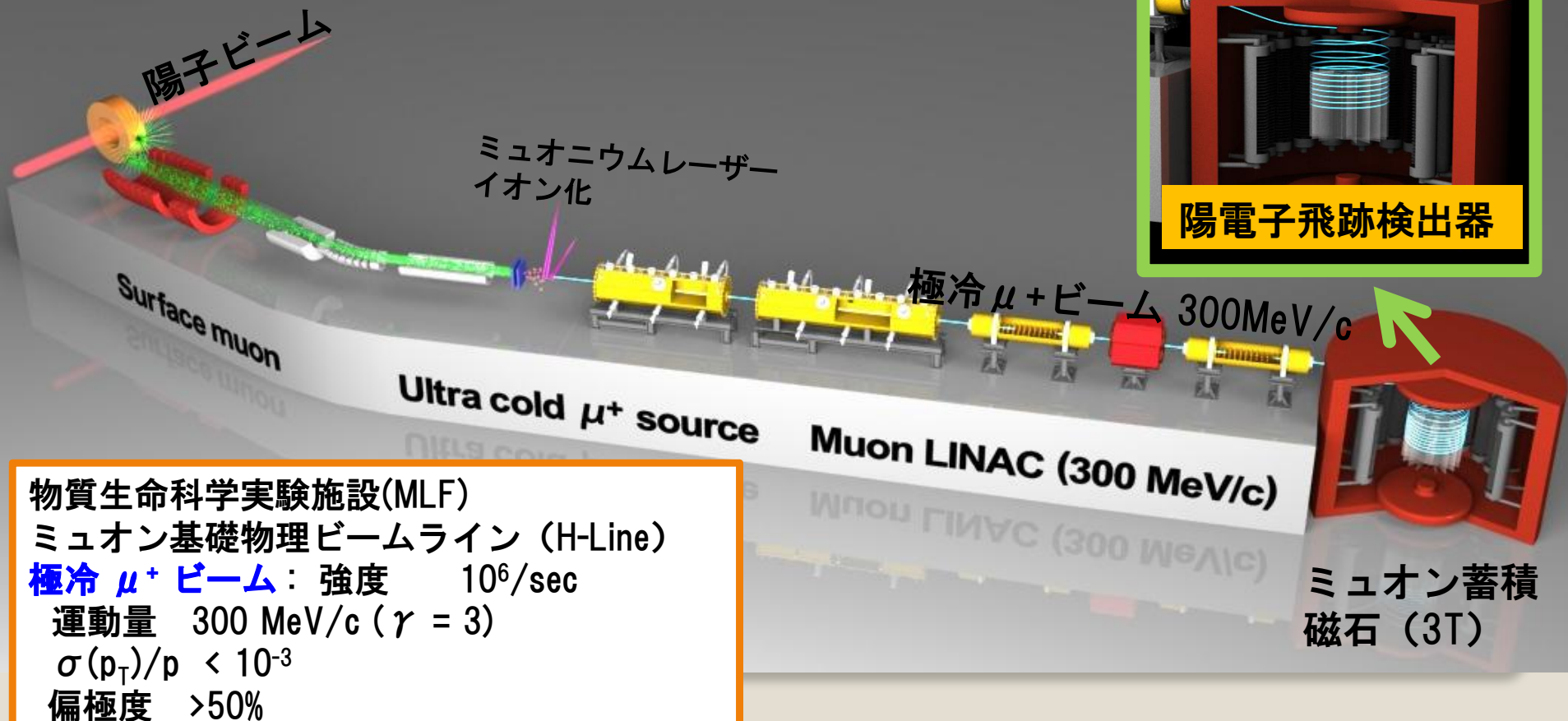
J-PARC muon g-2/EDM実験

新たな実験にて検証@J-PARC

g-2 : 0.1ppmの精度

EDM : $<1e-20$ e \cdot cm

が目標



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 $10^6/\text{sec}$

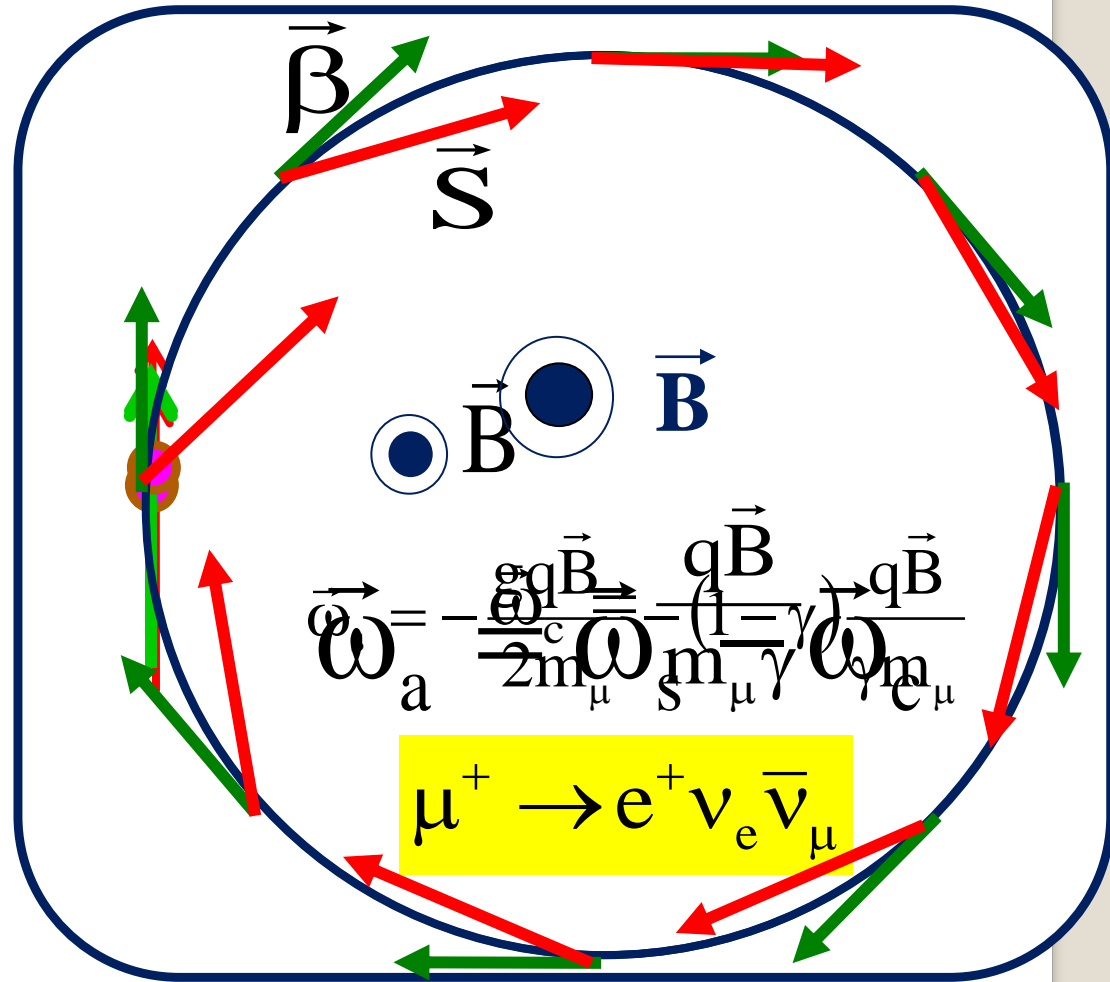
運動量 300 MeV/c ($\gamma = 3$)

$\sigma(p_T)/p < 10^{-3}$

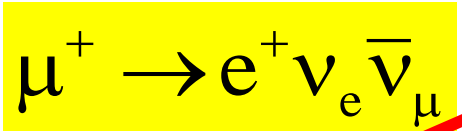
偏極度 $>50\%$

ミューオンg-2の測り方

1. スピンにより磁場中でのくるくる回転
2. 電荷により一様磁場中で周回運動
3. 一様磁場中で歳差運動
4. 寿命⇒陽電子とニュートリノに崩壊
5. 陽電子はミューオンのスピンの方向に出やすい
6. 陽電子数の時間変動⇒ミューオンのスピン歳差運動周波数



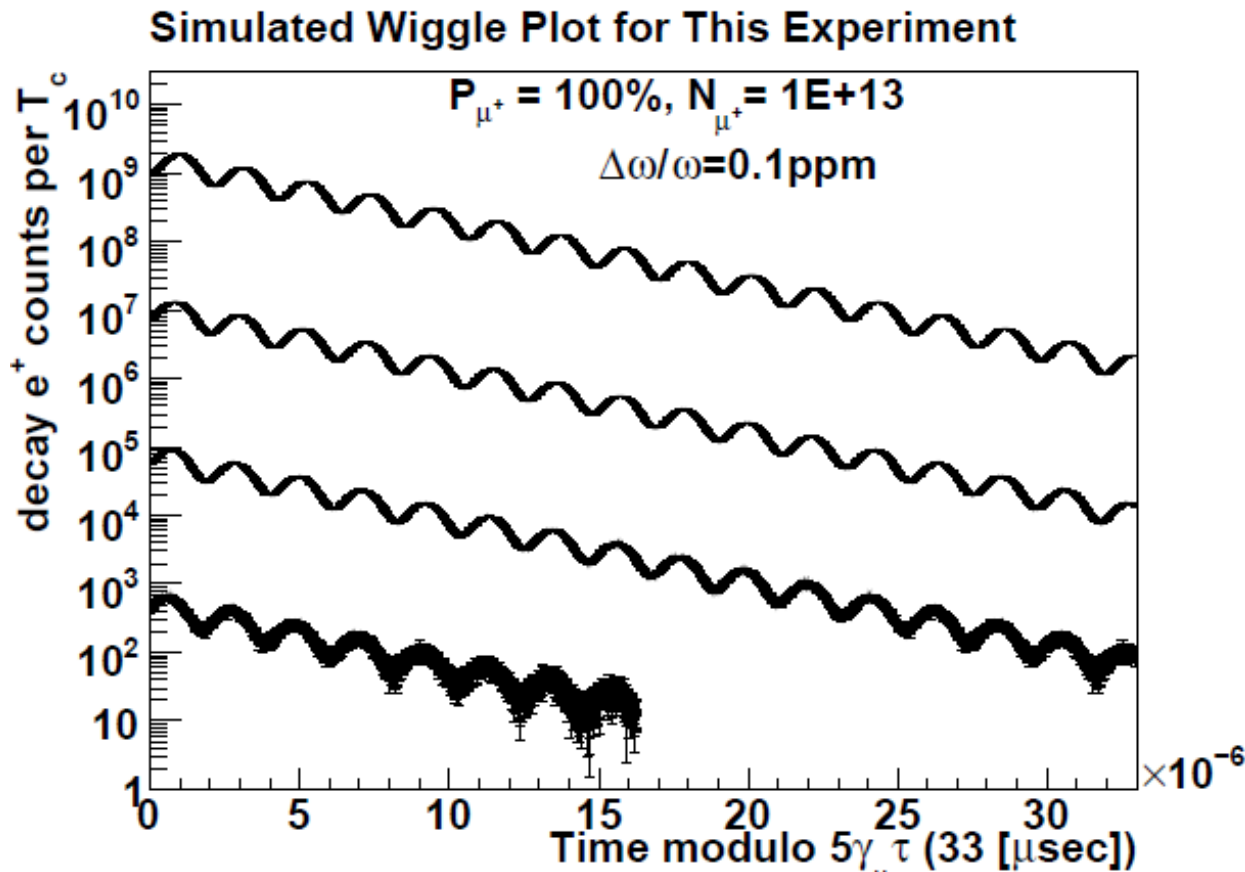
$$\vec{\omega}_a = -\frac{gq\vec{B}}{2m_\mu} - \frac{q\vec{B}}{m_\mu\gamma} = -\left(\frac{g-2}{2}\right)\frac{q\vec{B}}{m_\mu} - \frac{q\vec{B}}{m_\mu\gamma}$$



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

ミュオンg-2の測り方(続き)

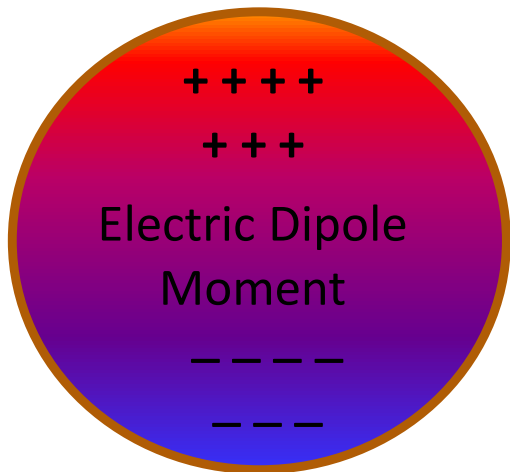
陽電子数の時間変動の例(シミュレーション)



このウネウネ (Wiggle plot) の周波数
と磁場がわかる
 $\Rightarrow a$ がわかる!

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

ミュオンEDMの測り方(見つけ方)



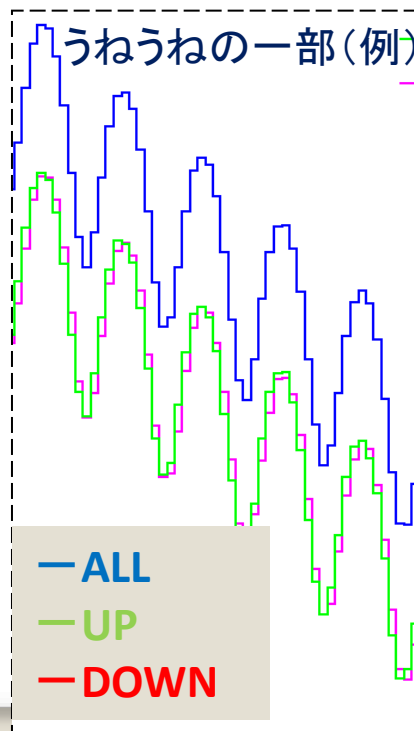
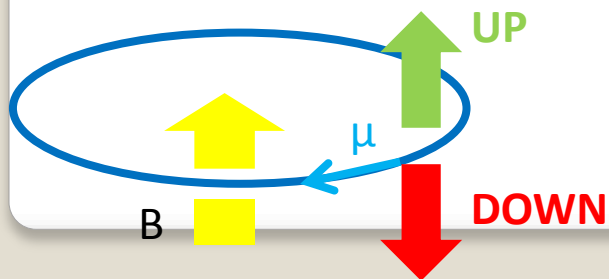
EDMがある
⇒歳差運動にEDMからの寄与

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_{\text{EDM}} = \frac{e}{m_\mu} a_\mu \vec{B} + \frac{2c}{\hbar} \text{EDM}(\vec{\beta} \times \vec{B})$$

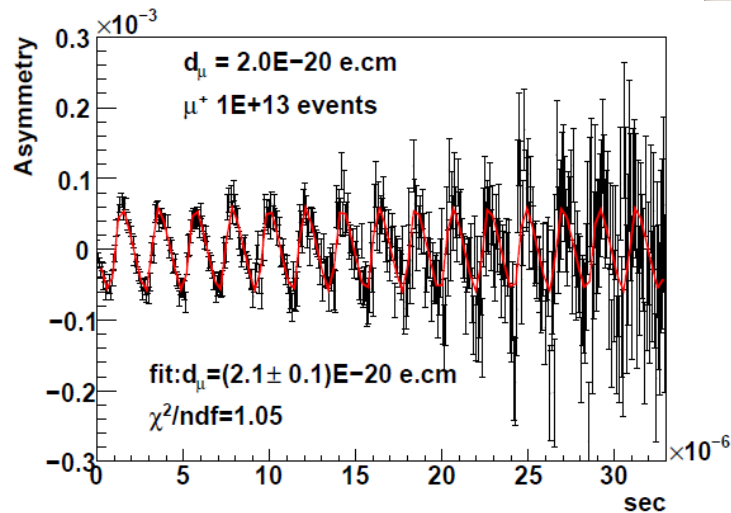
これらを分離したい

$$\vec{\omega}_{\text{EDM}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

陽電子の放出角度
の時間変動に違い



UP、DOWNのAsymmetry(例)



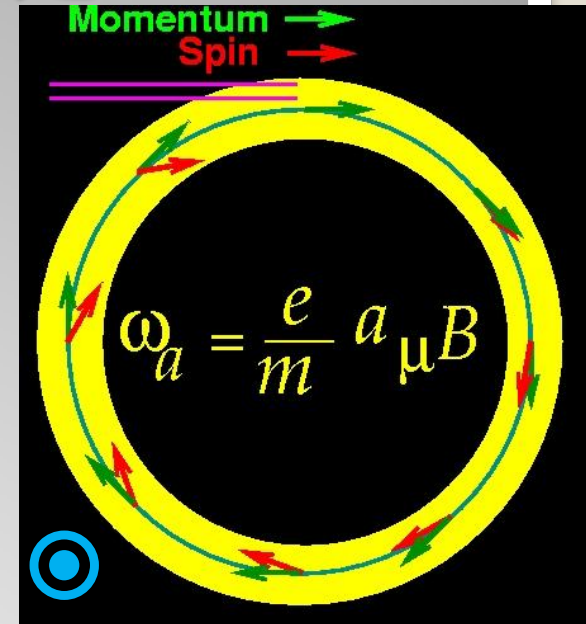
この周波数を測る

ミューオンスピン歳差運動測定

実際には・・・

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

ミューオンのfocusing ⇒ 電場



BNL E821実験では

⇒ magic momentum

$$\gamma = 29.3, p = 3.094 \text{ GeV}/c \rightarrow (a_\mu - 1/(\gamma^2 - 1)) = 0$$

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

EDMの項: アッパーリミットから無視
($d_{\text{lim}} \sim 1e-19e \cdot \text{cm}$)

米国フェルミ国立研究所(FNAL) で継続する計画あり。5倍の精度(0.1ppm)

新実験の挑戦

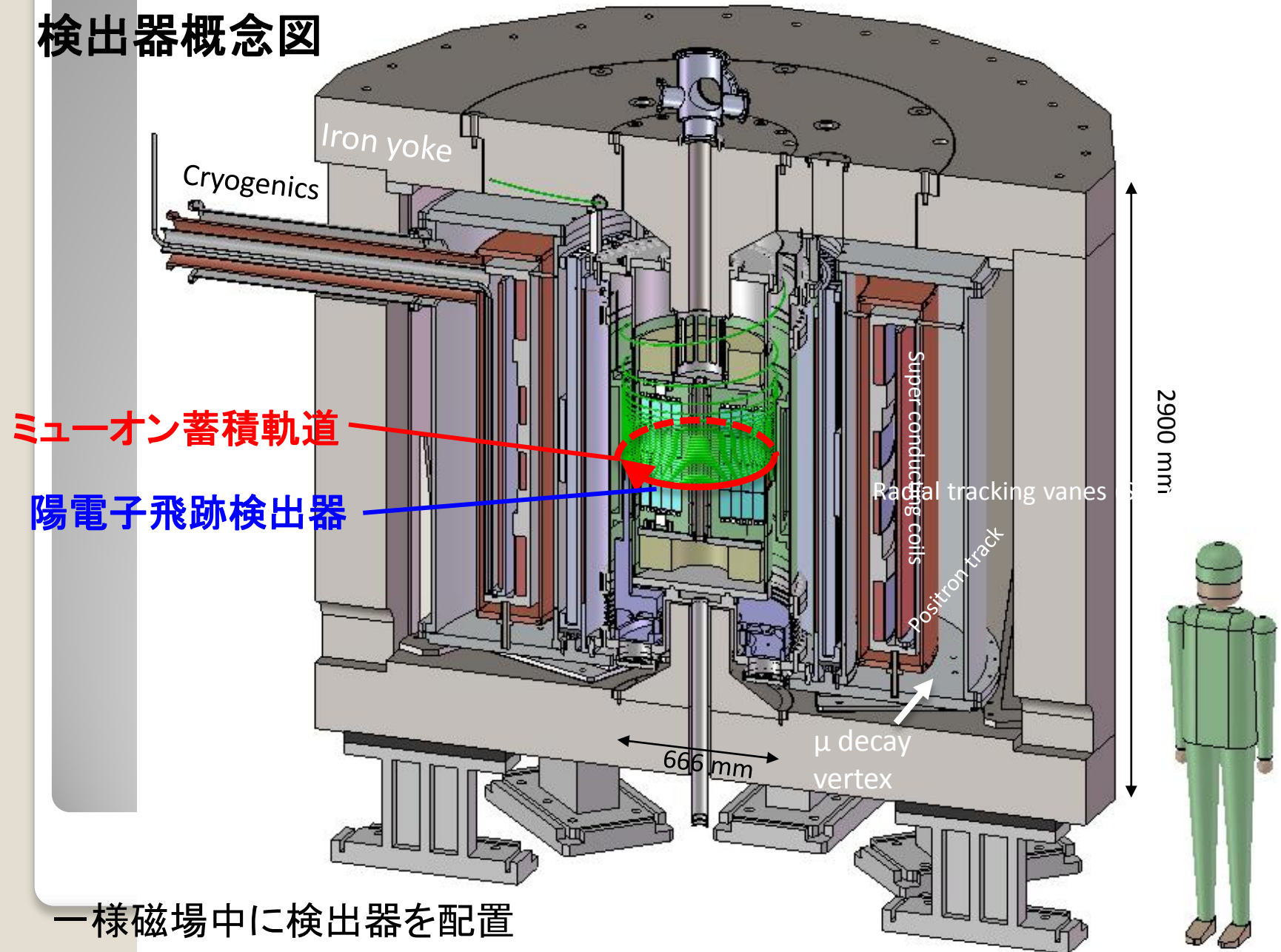
$$\vec{\omega}_a + \vec{\omega}_{\text{EDM}} = \vec{\omega}_S - \vec{\omega}_c = -\frac{q}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \left(\frac{1}{\gamma^2 - 1} - a_\mu \right) \left(\vec{\beta} \times \frac{\vec{E}}{c} \right) \right] - \frac{2c}{\hbar} \text{EDM} \left[(\vec{\beta} \times \vec{B}) - \frac{\vec{E}}{c} \right]$$

- 貯蔵リング収束電場 $E=0$
- $P_T/P_L \sim 10^{-5}$ 程度のペンシルビーム
 - 室温標的からのミュオニウムをレーザー乖離して 300MeV/c まで加速 $\gamma_\mu=3$ ($\beta_\mu=0.92$)
- 高強度・高均一度のコンパクト貯蔵リング磁場
 - 3 T ($R=33.3\text{cm}$), 1ppm local → MRI技術応用
 - 非常に弱い($<0.1\text{ppm}$)収束磁場オプションも検討
- コンパクト貯蔵リング内側に更にコンパクトな崩壊陽電子検出器

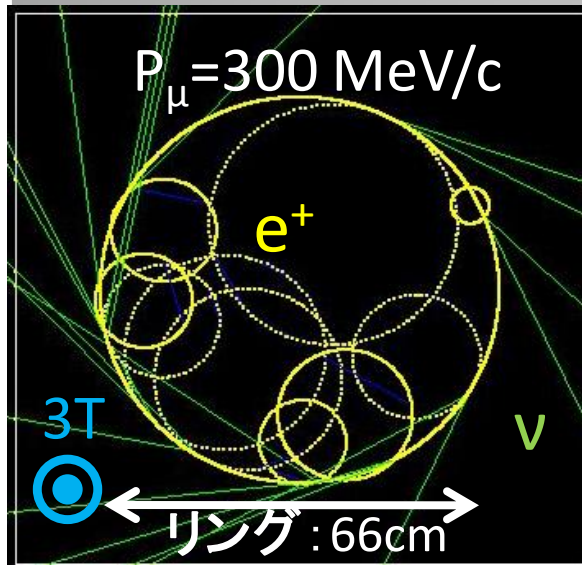
J-PARC muon g-2/EDM実験における検出器

J-PARC muon g-2/EDM実験における検出器

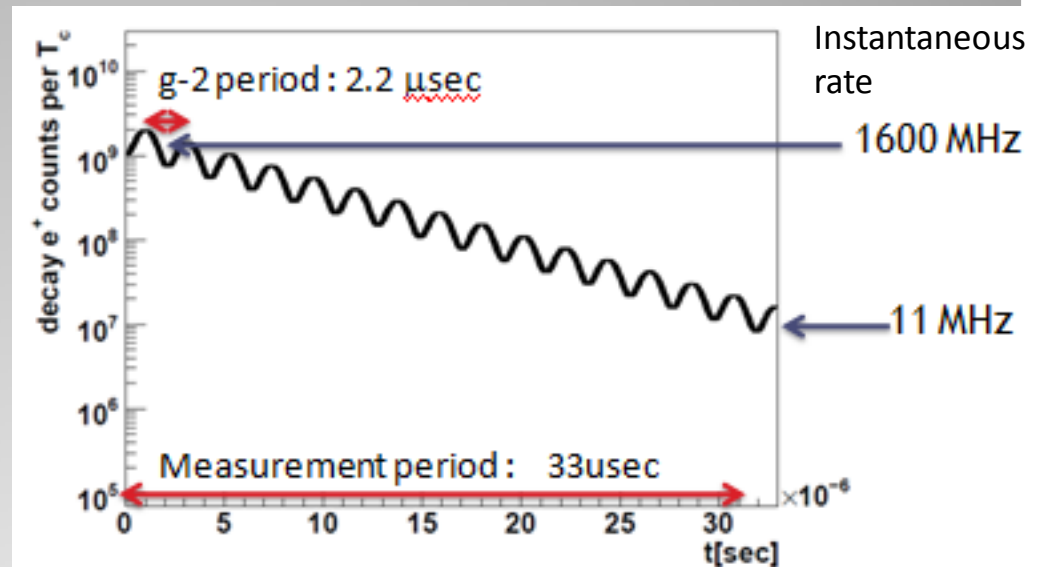
検出器概念図



陽電子飛跡検出器への要求



top view (崩壊陽電子) by Geant4



崩壊陽電子レート@リング内側

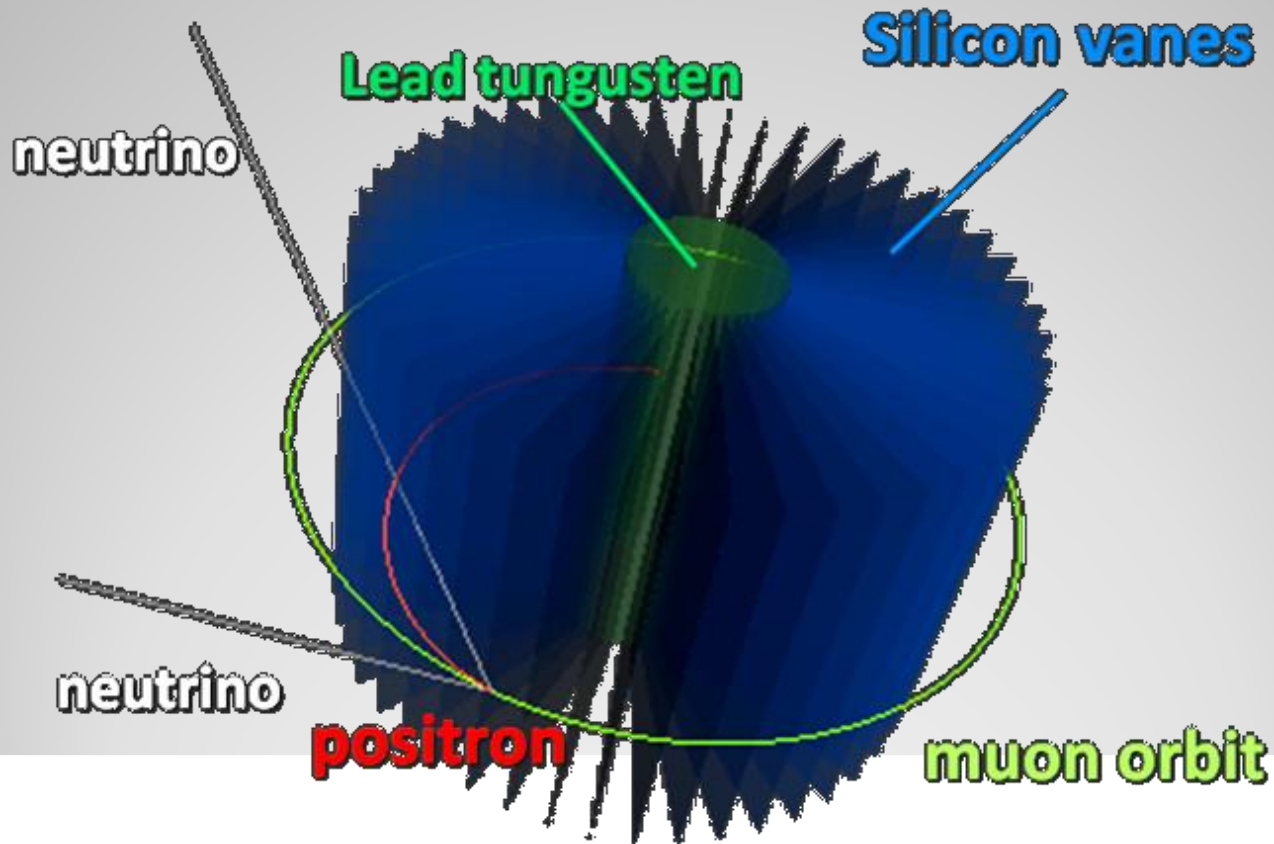
- 一様磁場中を周回するミュオンの崩壊陽電子の飛跡・時間測定
- 貯蔵リング内側に検出器
- 高磁場 3T
- ミューオン蓄積領域の磁場変動小 ($< 10\text{ppm}$)、ゼロ電場 ($\ll 10^{-2}\text{V/cm}$)
- 高イベントレート $> 10\text{ MHz}$
- 大きなレート変化 (測定の最初から最後で2桁減少、early-to-late)
- J-PARCのビームパルス構造 (25Hz) に同期したデータ読み出し
- 多数のヒット点から陽電子飛跡を検出する必要

陽電子飛跡検出器

シリコンベーンストリップ検出器

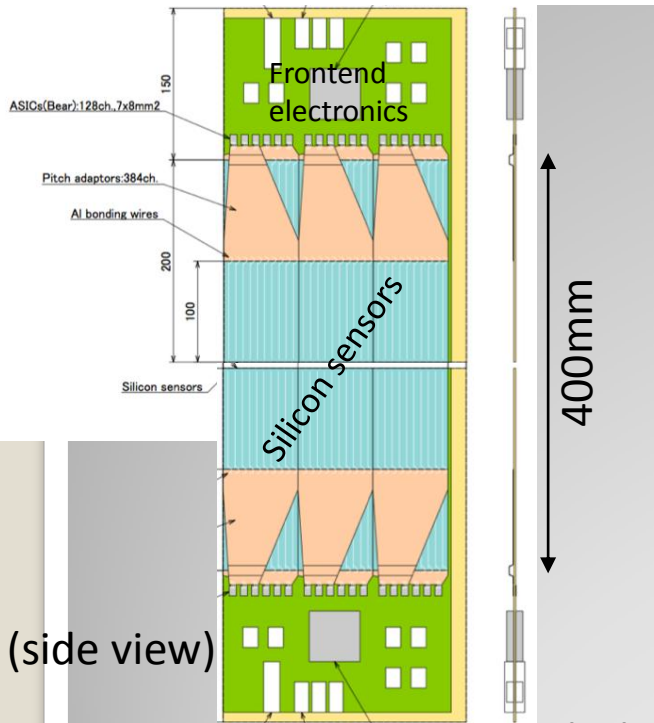
シリコンストリップ検出器を放射状に配置

高いgranularity
早い応答
高安定性



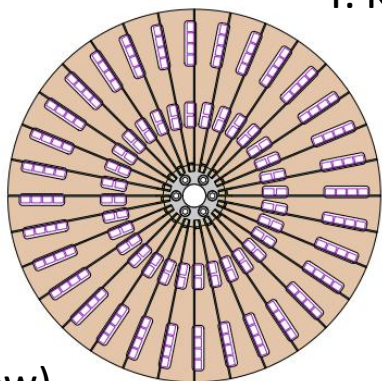
シリコンストリップ検出器

検出器モジュール(1 vane)



(side view)

T. Kohriki



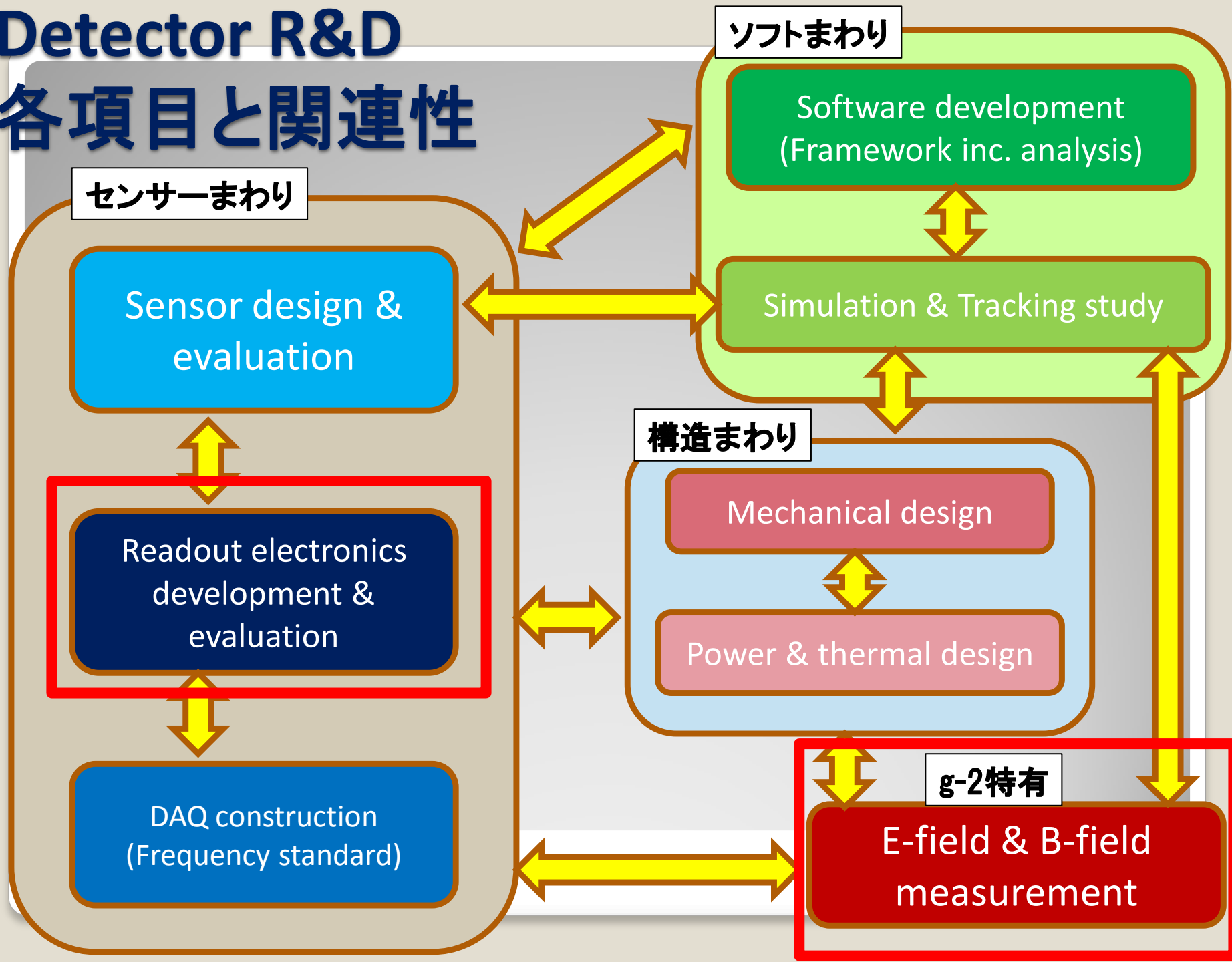
(top view)

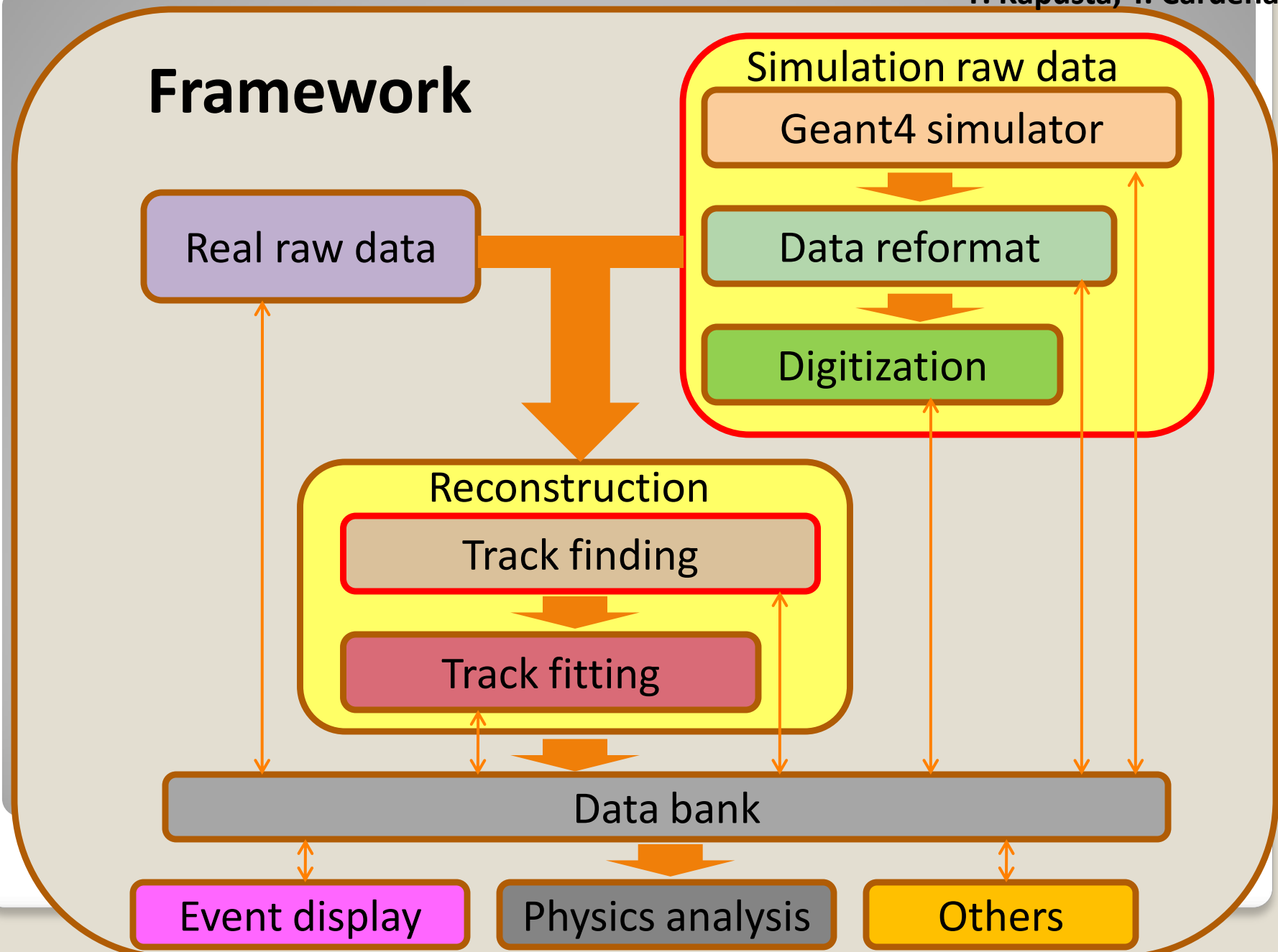
| Item | Specifications |
|---------|---|
| 有感領域 | 240mm (radial) x 400 mm (axial) |
| ベーン数 | 48 (subject for optimization) |
| センサー | Double- or single-sided Silicon strip sensor |
| ストリップ | axial-strip : 188 μ m pitch, 72mm long , 384 ch radial-strip: 255 μ m pitch, 98mm long, 384 ch |
| センサーサイズ | 74 mm x 98 mm x 0.32mm |
| センサー数 | 576 (12 sensors per vane) |
| チャンネル数 | 442,368 ch |
| 時間測定条件 | Period : 33 μ s, Sampling time : 5ns |

検出器R&D

Detector R&D

各項目と関連性





シミュレーション

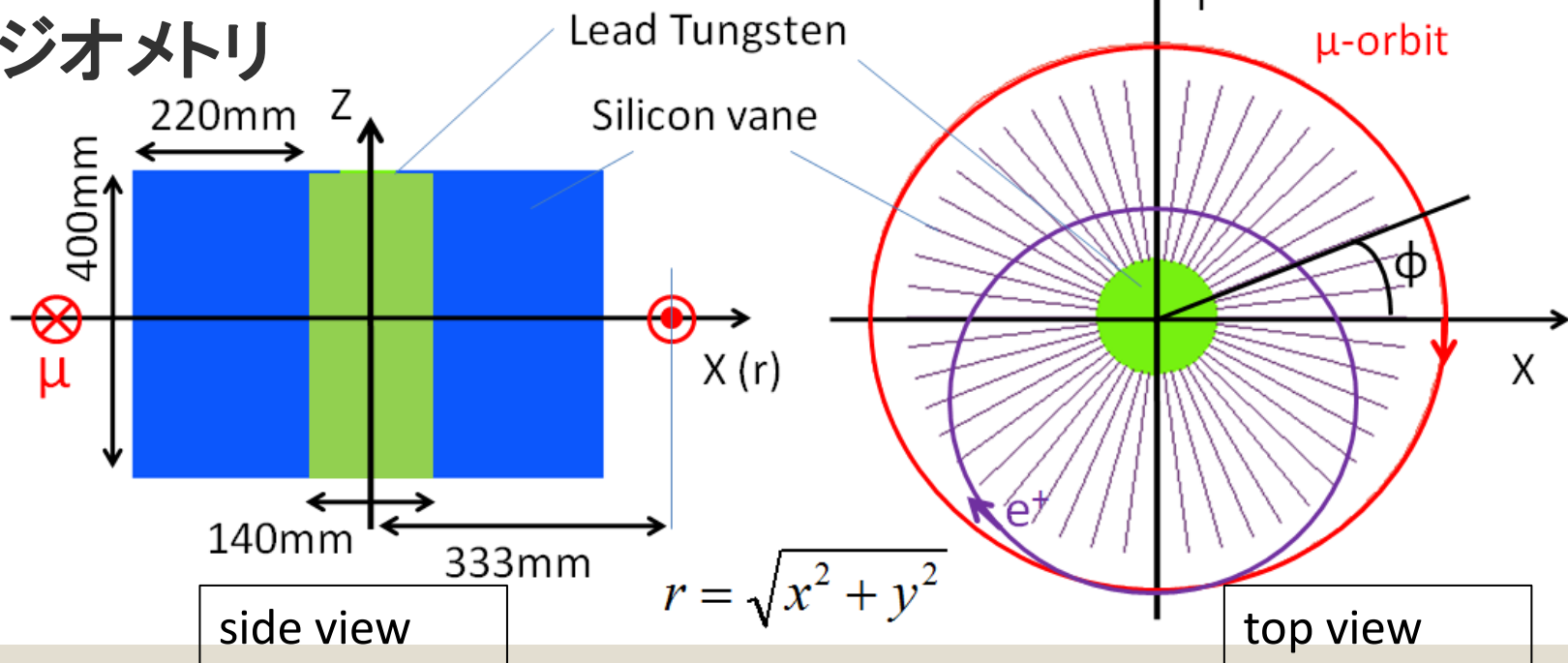
Condition (理想状況下)

- 磁場: 3 Tesla
- 電場: 0 V/m
- γ_μ : 3 (300 MeV/c)
- R_μ : 333mm
- 真空下
- シグナル: $E_p > 200$ MeV

検出器

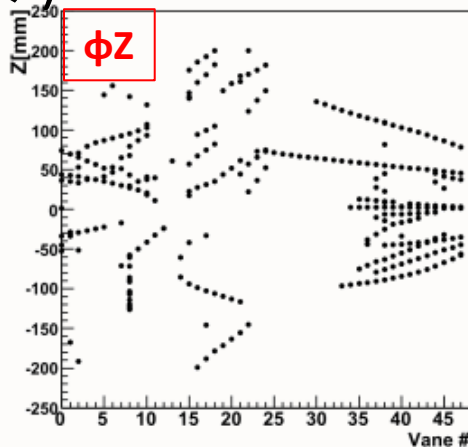
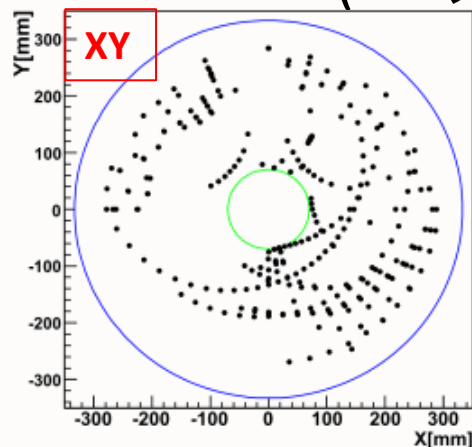
- Vane # : 48
- サンプルングrate : 5nsec
- ストリップピッチ : 200 μ m
- 厚さ : 300 μ m

ジオメトリ



ヒットイベントの時間変化

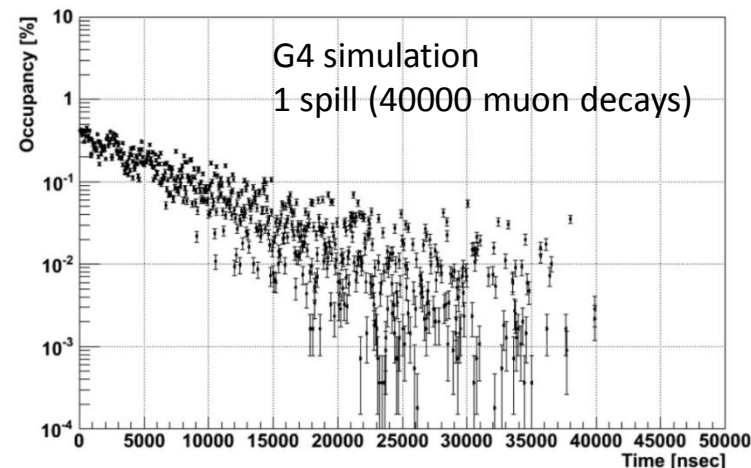
t=0-40us (1us刻み)



| Event# | Ene.[MeV] | Event# | Ene.[MeV] |
|--------|-----------|--------|-----------|
| 363 | 133.0 | 32482 | 206.2 |
| 507 | 184.0 | 32496 | 41.5 |
| 4183 | 235.6 | 36545 | 278.6 |
| 4323 | 208.1 | 37554 | 203.1 |
| 4353 | 153.5 | 37816 | 186.4 |
| 7515 | 47.3 | 38071 | 35.1 |
| 8274 | 116.4 | 39128 | 53.4 |
| 8506 | 60.0 | 39175 | 111.4 |
| 9223 | 110.4 | | |
| 10940 | 159.1 | | |
| 11824 | 64.3 | | |
| 14710 | 126.6 | | |
| 16289 | 41.3 | | |
| 18030 | 67.0 | | |
| 19429 | 44.5 | | |
| 21634 | 236.7 | | |
| 22985 | 233.8 | | |
| 24324 | 123.8 | | |
| 25395 | 31.2 | | |
| 30493 | 205.5 | | |

Event# Ene.[MeV] Event# Ene.[MeV]

All : 28
Signal : 8
 0 - 5 [ns]



Strip Occupancy (SO)

SO < 0.5% / 5ns time stamp
 (5 hits/strip/spill)

15 e+ signal, 30 BG signal
 at first 5ns

Signal: e+ >200MeV

BG: e+ <200MeV, δ -ray, shower

今後、より現実に近い
 ジオメトリに変更

トラッキング

Track finding

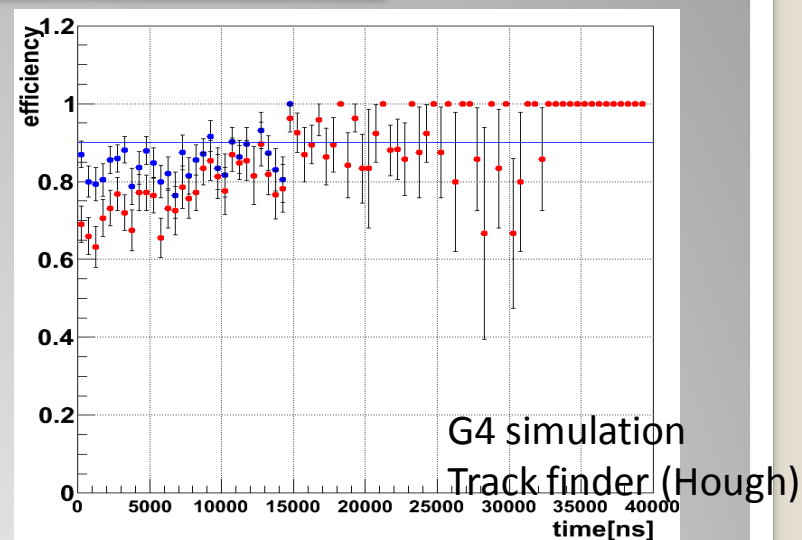
- Hough transform & clustering in ϕZ -plane
 - Track finding efficiency $\sim 80\%$ (for single track $> 90\%$)
- 全時間領域で90%以上が目標

Track fitting

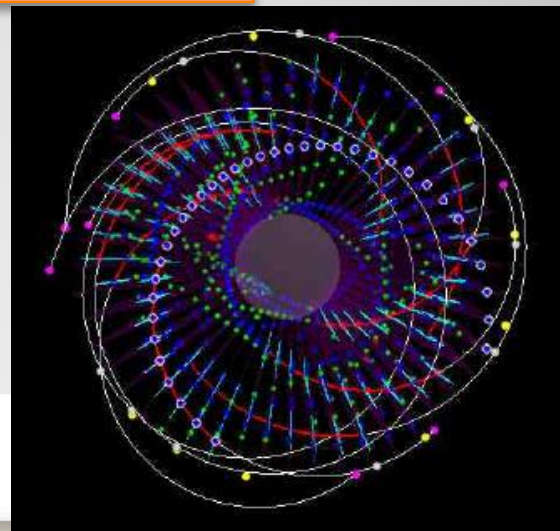
- GENFIT(Karman filter)

Multi track reconstructionツールを現在開発中

track finding efficiency



Single track fitting



センサー評価

DSSD(Belle-II)、赤外レーザーを用いた評価
Early-to-late効果の系統的なスタディ
その他センサーのレスポンススタディ
⇒今後シミュレーションへfeedback



現在進行中

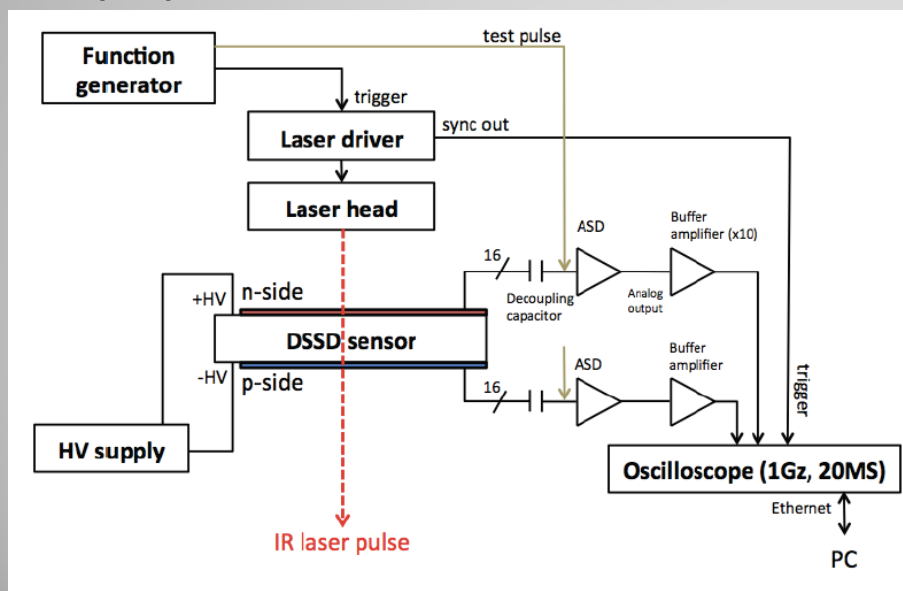


Figure 7.28: Diagram of the silicon sensor test set up

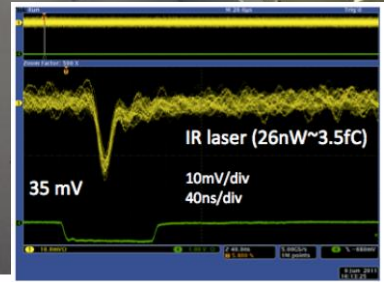
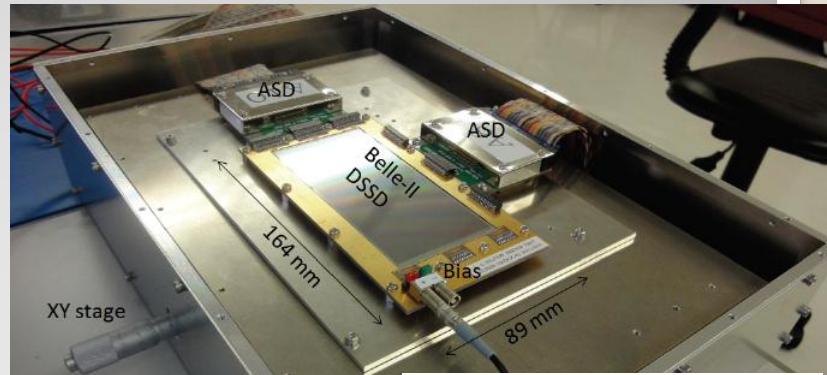
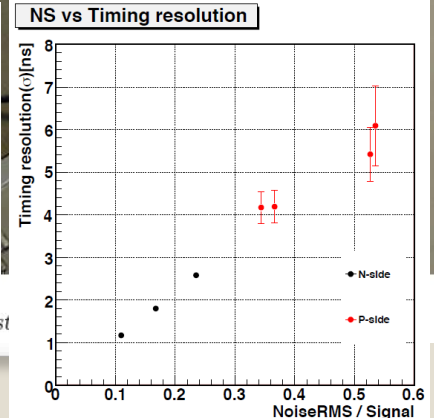
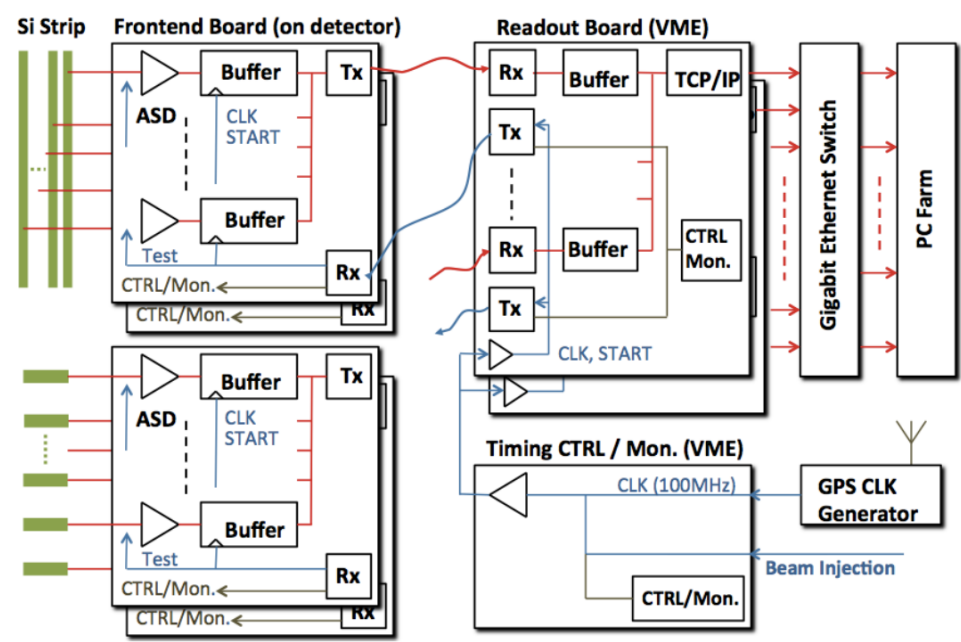
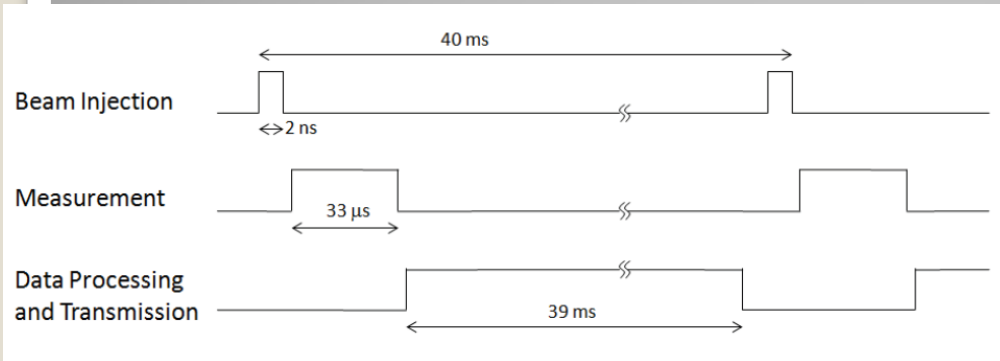


Figure 7.29: The DSSD test



DAQ



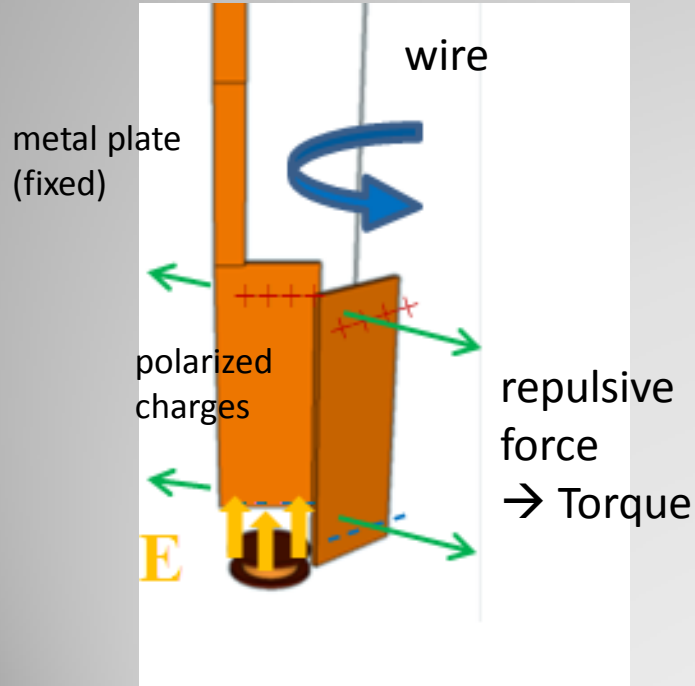
- J-PARCの25 Hzのパルスビーム構造に同期して読み出し。
- ビーム入射後33μsにわたって測定。次のパルスが来るまでにデータを転送。
- ASDのデジタル出力を5nsのタイムスタンプでバッファメモリに格納(1スピル分)。
- 後段読み出し回路でスピル毎にデータを吸い上げる。
- 目標精度に達するためにはタイムスタンプの安定度 ($\Delta T/T \ll 4 \times 10^{-9}$) が重要。ルビジウム原子時計とGPSおよび周波数国家標準(産総研NMIJ)に同期したクロックを用いる。

読み出し回路については後ほど

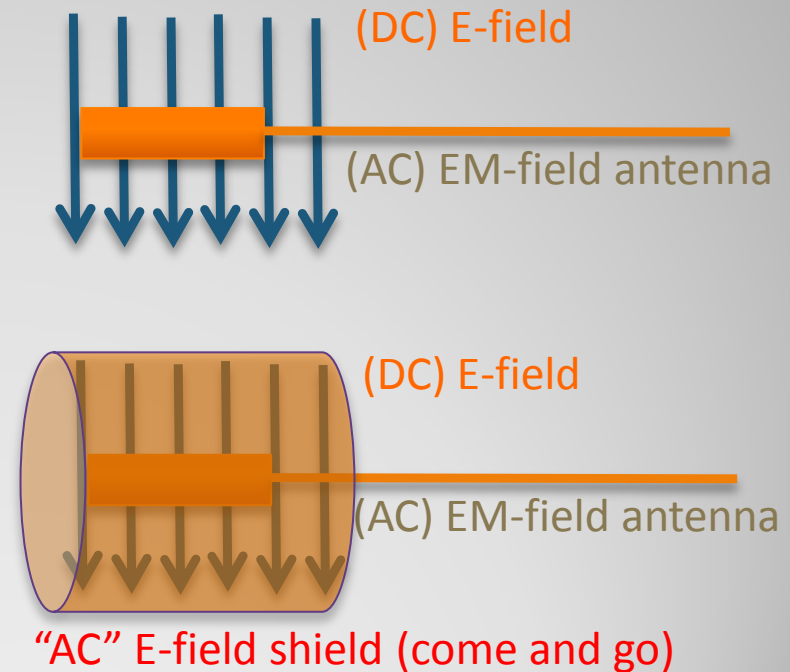
電場測定

ミュオン蓄積領域で $E \ll 10$ [mV/cm]を保障する必要あり
 ⇒直接電場測定をしたい ⇒現在静電場を測る方法はない！
 ⇒新しい測定方法を検討中

ねじれ秤を利用



AC-シールド法 (アイデア段階)



2011年に原理実証試験@立教大
 感度は現状～50mV/cm.

⇒さらなる感度向上 (～1mV/cmが目標)

AC-シールドの周波数における
 電場測定

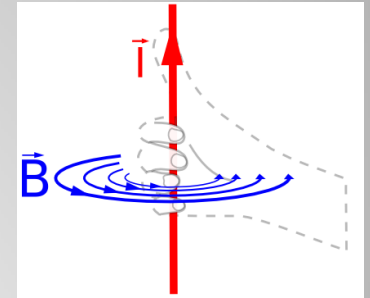
磁場測定(検出器による磁場の乱れ)

- The requirement
 - $\Delta B/B \ll 0.1$ ppm (ミュオン軌道平均)
 - アクティブシミング使用 \Rightarrow ~ 10 ppmレベルまで許容
 - 検出器による磁場の乱れ < 10 ppm

• 磁場を作るもの

- 電流
 - Biot-Savart law

$$\mathbf{B} = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2},$$

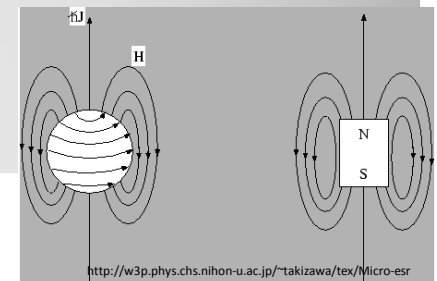


- 検出器部材の磁化

今回は時間の都合上こちらのみ紹介

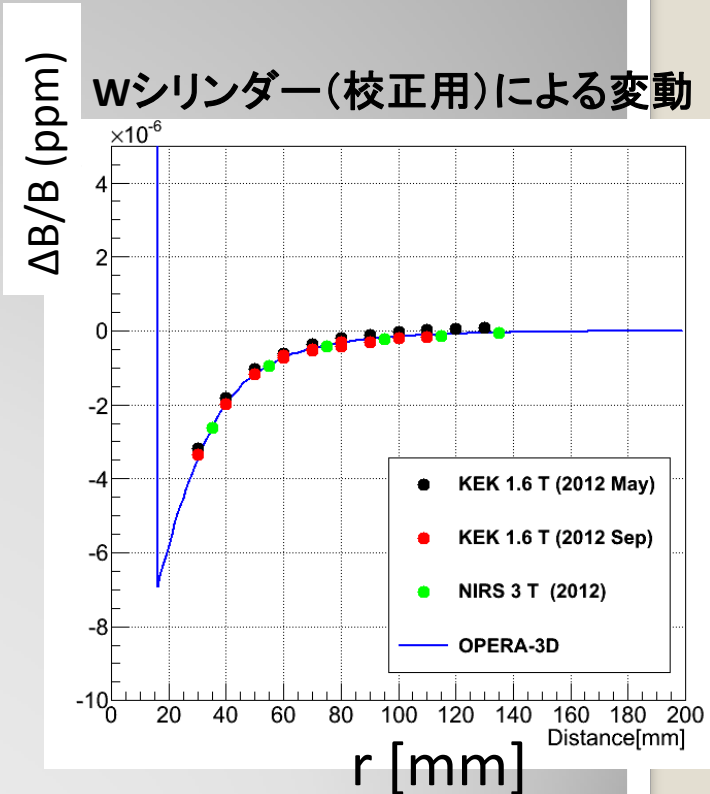
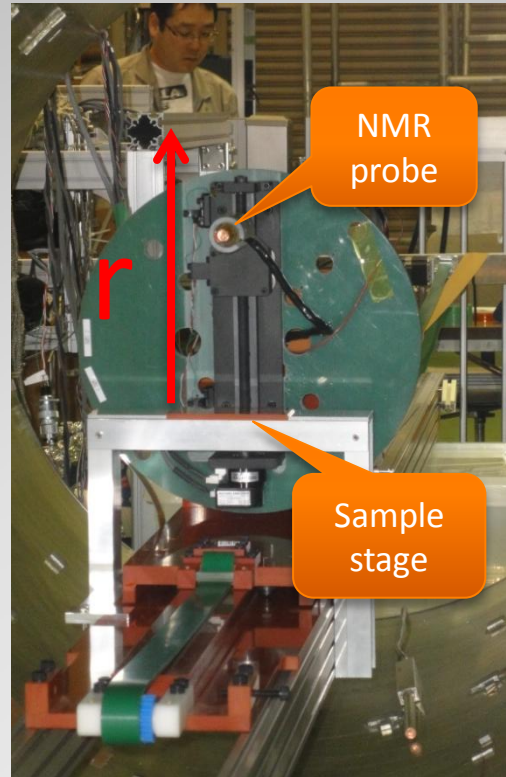
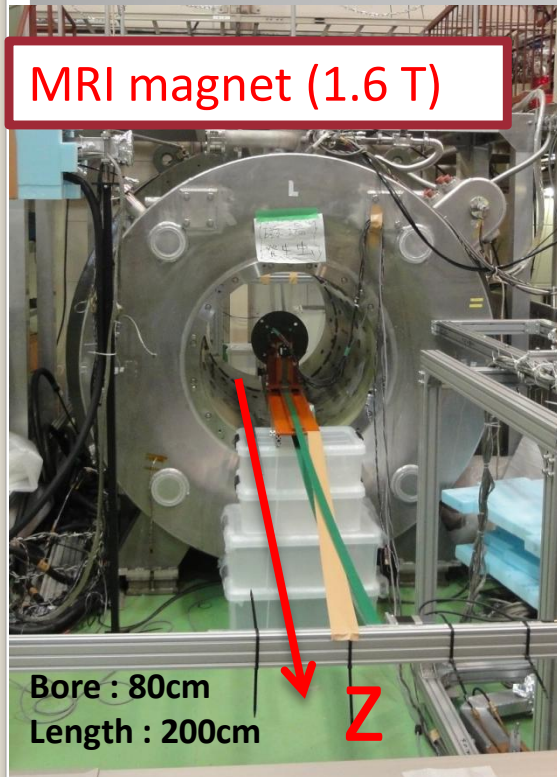
$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \frac{\chi_m dV}{4\pi r^3}$$



磁場測定

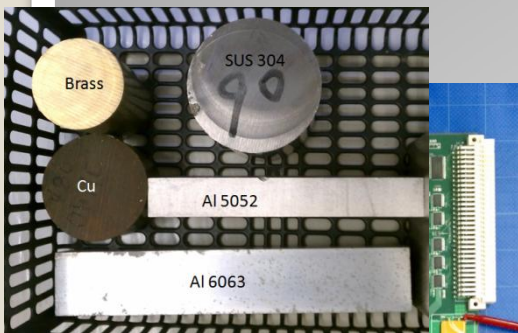
NMR probeを用いた検出器部材の磁場変動測定@低温センター、KEK



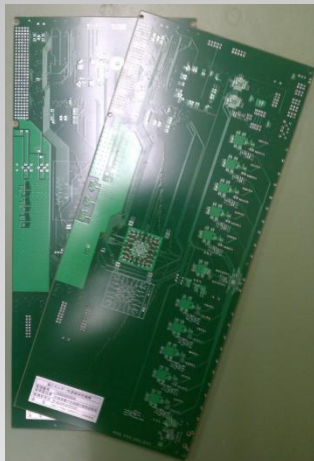
- DC-NMR with sweep coil
- NMR sample : $H_2O + MnCl$
- Super-sonic motors : axial(z) and radial (r) movement
- System developed by Ken'ichi Sasaki (KEK)

測定した検出器部材

metals



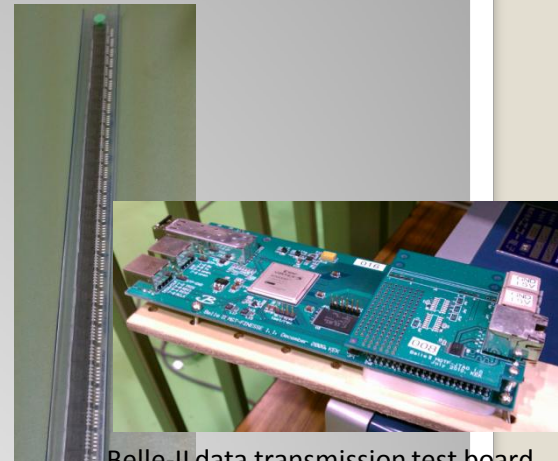
PCB board (G10+Cu, 10 layer)



Optical transceiver



Voltage regulator



10 x 1Gbps optical link



PHENIX trigger board

Belle-II data transmission test board



Registers, capacitors

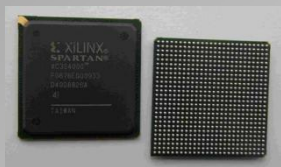


FPGA/PROM



Solder (with Pb, Pb-free)

測定例



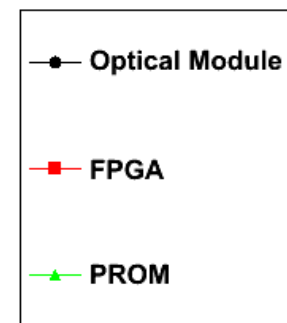
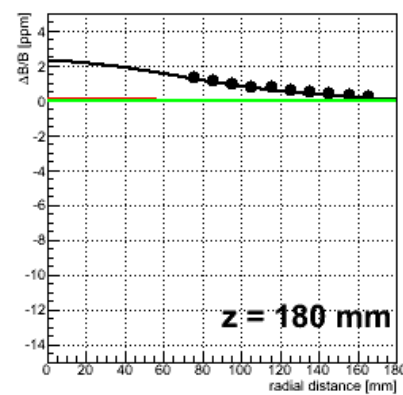
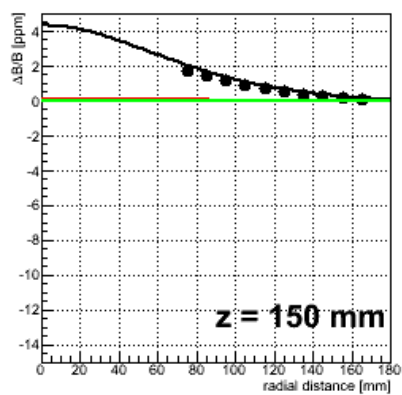
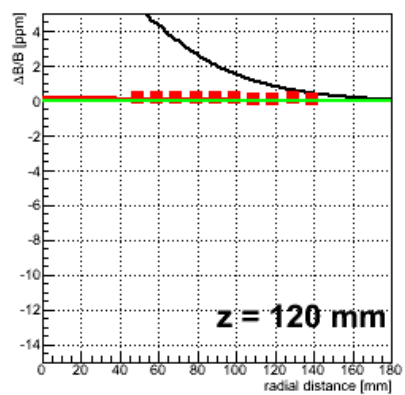
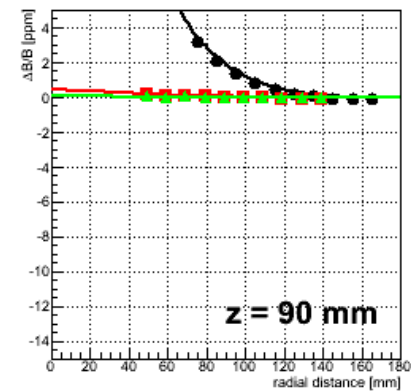
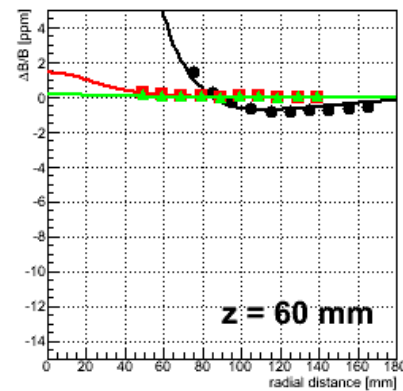
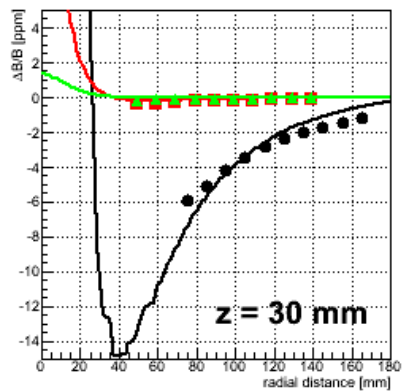
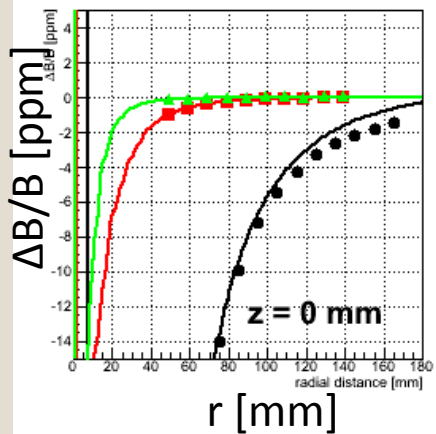
FPGA



PROM



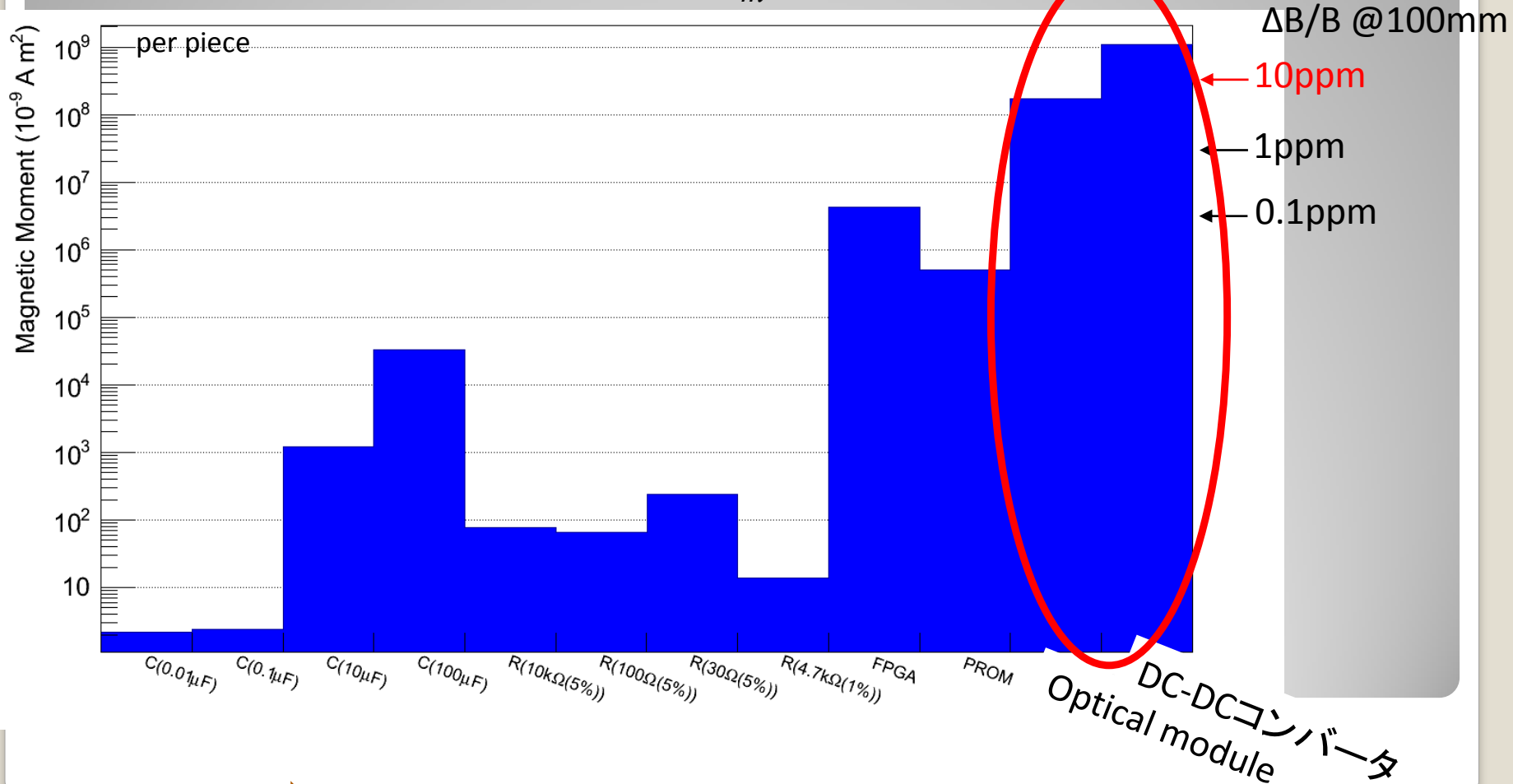
Optical module



測定した磁気能率まとめ

$$\vec{m} = C_m \vec{H} \times V$$

この二つはよろしくない



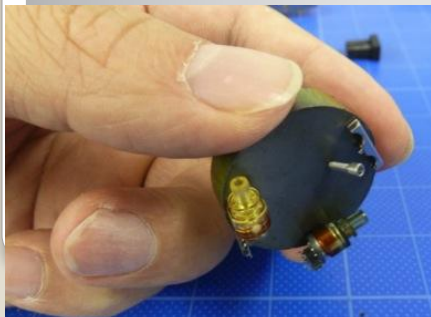
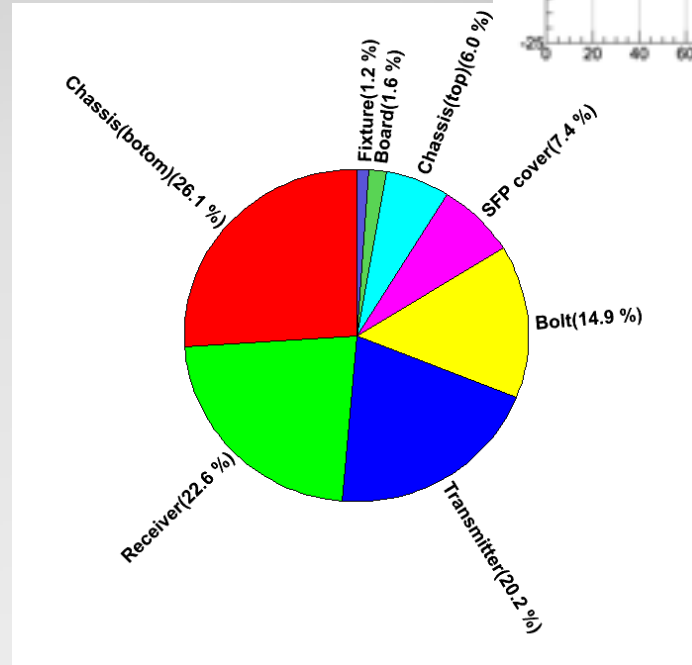
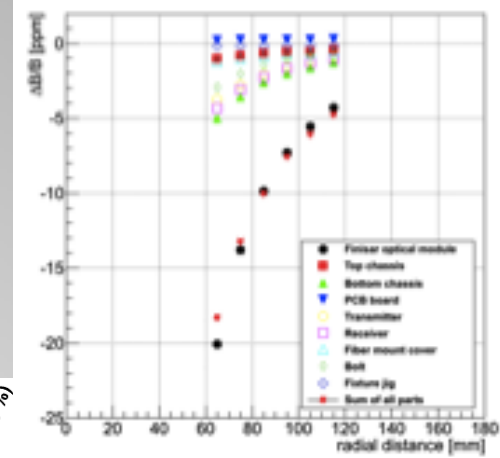
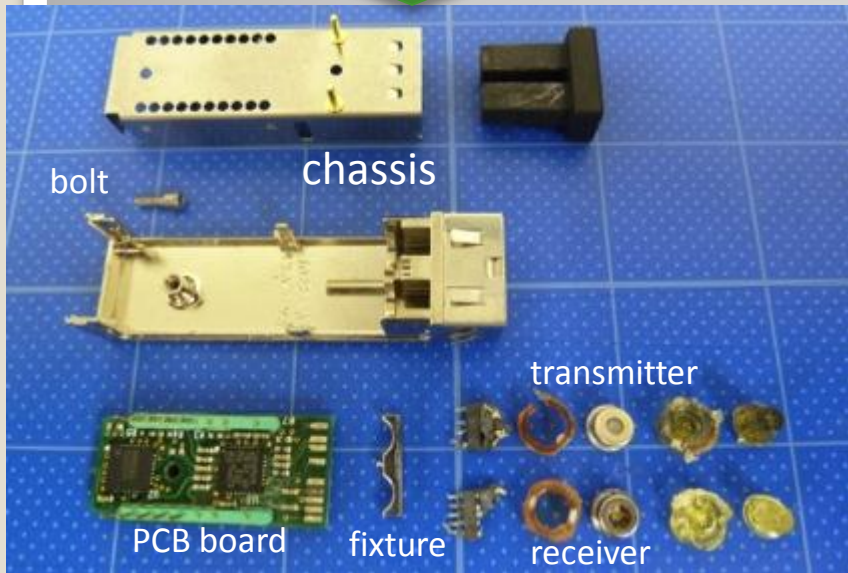
磁場を乱さないように作る必要あり

Optical moduleの詳細チェック

Finisar 3Gbps tranceiver (850nm)



Optical moduleを分解してそれぞれのパーツの寄与を調査



ネジなどはそもそも磁石にくっつく

シャーシ+ネジ交換で40%は減らせる
Receiver, transmitterは？
⇒現在検討中

DC-DCコンバータ

- 電流⇒磁場の乱れ、検出器部での電圧降下
 - 電流を減らすためにDC-DCコンバータが必須
 - 磁化による磁場の乱れを抑える必要

現在以下を検討中

- インダクタベースコンバータ (Buck converter)

OK:

MHz swiching、ハイパワー
高エネルギー実験でpopular
コマースシャルで多数存在

NG:

コイルに磁化物使用

空芯コイルでいけないか
検討中



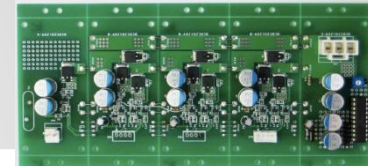
- キャパシタベースコンバータ (Flying capacitor)

OK:

磁化物フリー

NG(Δ):

~10kHz swiching、ややパワーに制限あり



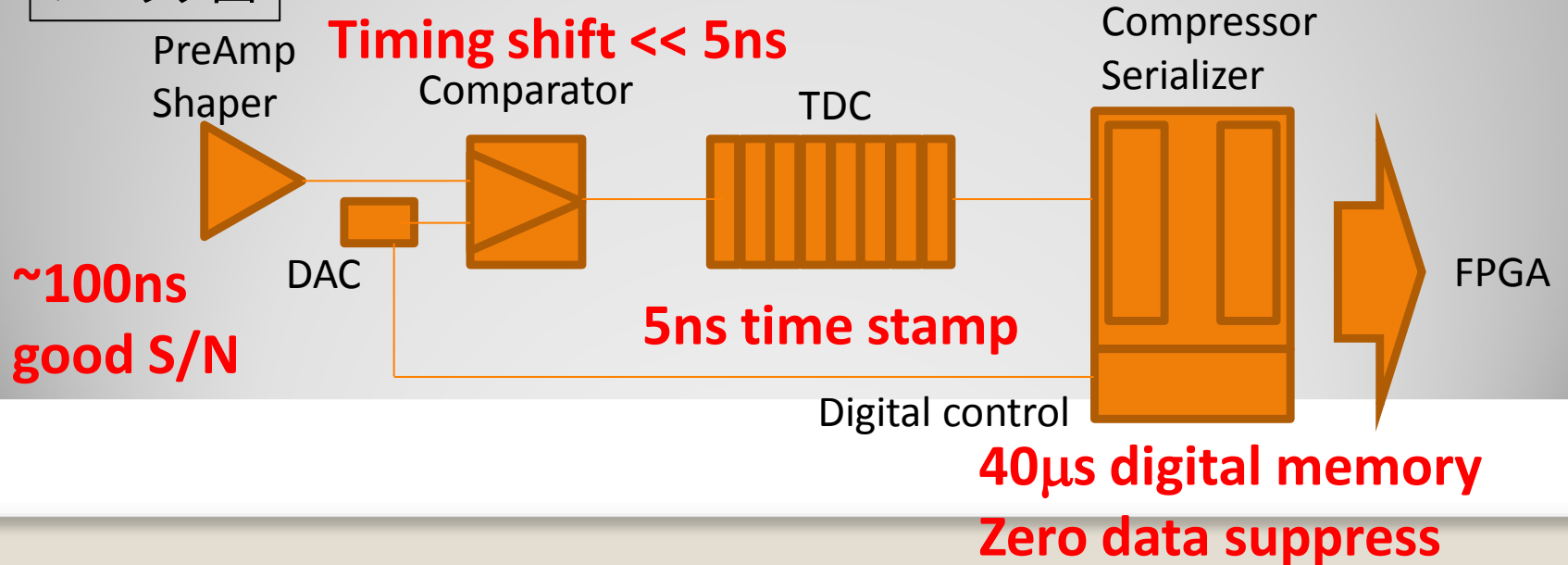
京大岩下さんによる原理実証試験実施中

Frontend ASIC

Requirements

- ・ **トラッキング効率**
 - ・ **Hit rate: 1.6 MHz /strip**
- ・ **時間測定**
 - ・ **> 5 life time -> 40μs**
- ・ **機械構造による制限**
 - ・ **768ch in small space -> 128ch/chip**

ブロック図



読み出し回路要求値まとめ

| parameter | Requirement |
|--------------------|----------------------|
| Timing measurement | 5nsec |
| Buffer depth | 41μsec |
| # of ch | 128 |
| pulse width | ~100nsec |
| Noise @ 30pF | <3000e |
| Timing shift | <<5nsec |
| PWD | as small as possible |

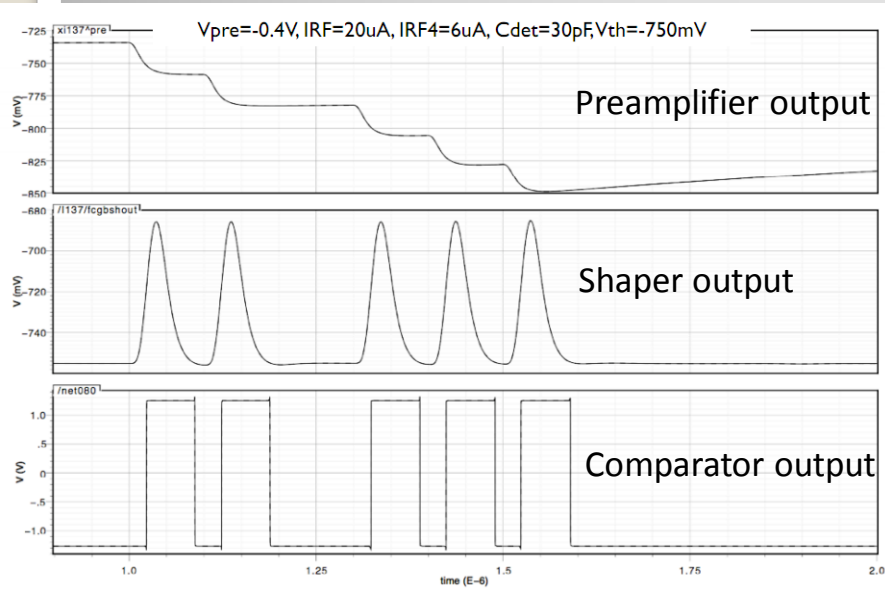
Digital
Block

Analog
Block

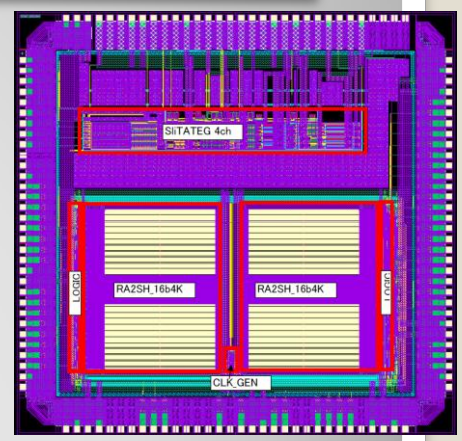
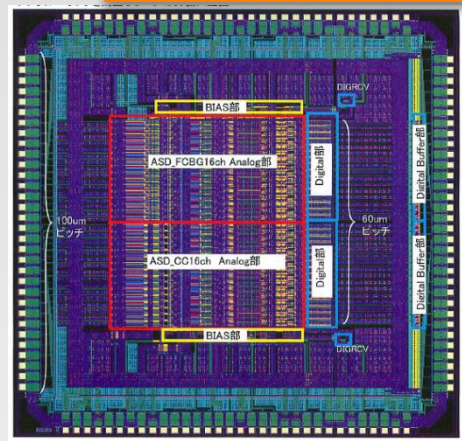
開発スケジュール&デザイン

- 2011 32ch プロトタイプ (Analog & digital) デザイン
- 2012 32ch プロトタイプ評価
128ch プロトタイプデザイン
- 2013 128ch プロトタイプ評価、修正
- 2014 量産

シミュレーション(田中さんの協力)



レイアウト (デザイン: 田中さん、内田さんの協力)



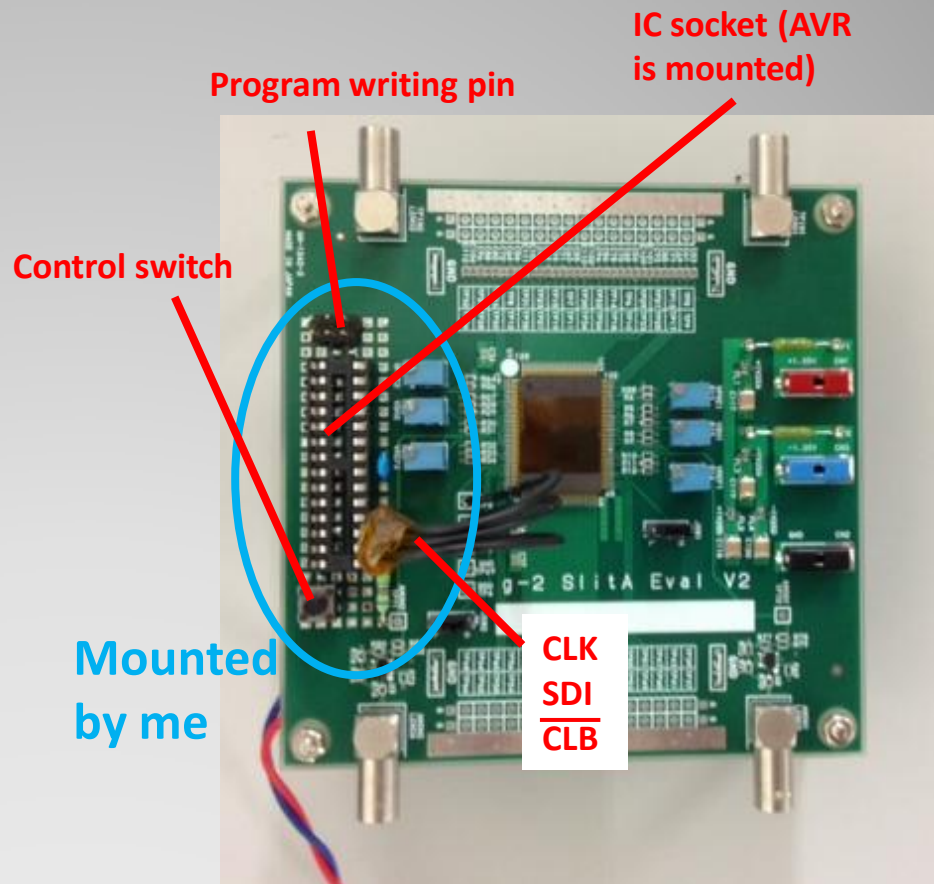
Analog part (SlitA) 16ch x 2 (F.C. & C.C.)
 Digital part (GM2DV0) 16ch

SlitA



Process : UMC 0.25 μ m

Process : UMC 0.25 μ m



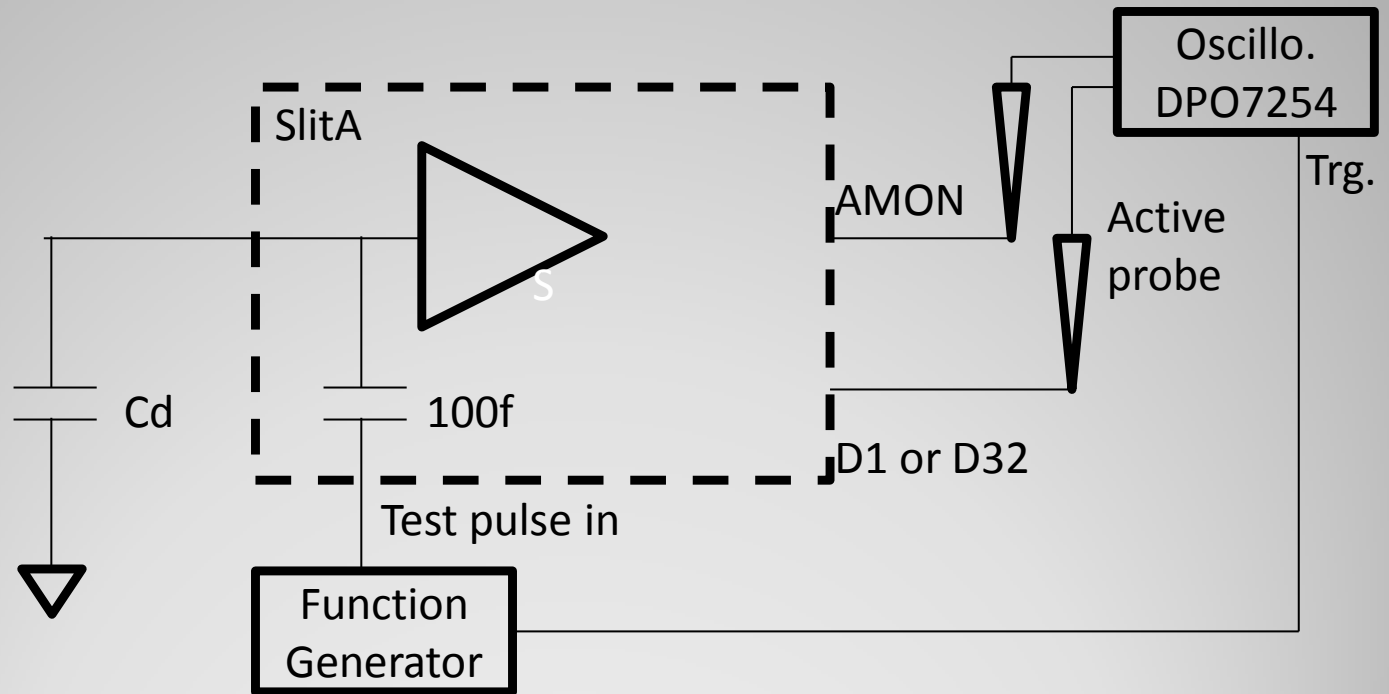
評価ボード with AVR

*AVRはデジタルコントロールテスト用

SlitA評価

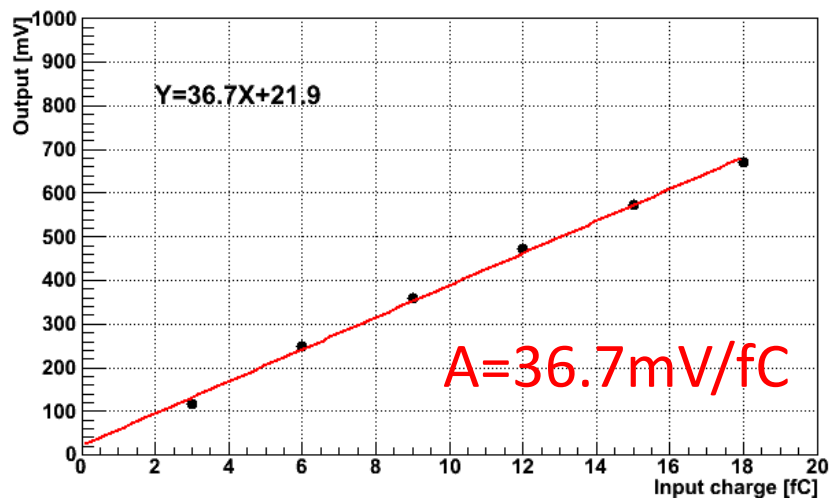
- Brief check
 - DC check
 - Digital control check
 - Signal check
- Rough check (Tendency & consistency with Sim. check)
 - Gain
 - Noise, jitter ← Now
 - Pileup
 - Threshold scan
 - Crosstalk
- Detail check
 - Adjustment of filter
 - Each parameter as well as described above
 - Response of negative charge
- Detector test

Setup

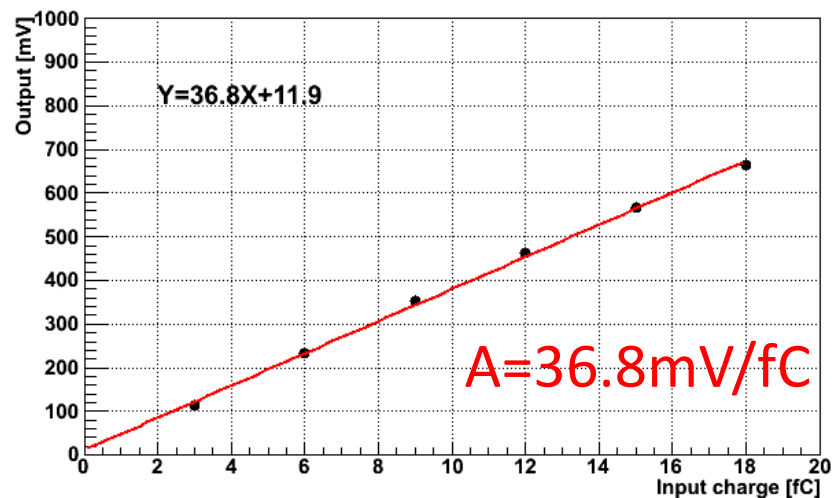


Block pulse (50kHz、width 50ns)
Ampl. 30-180mV (1MIP:30mV)

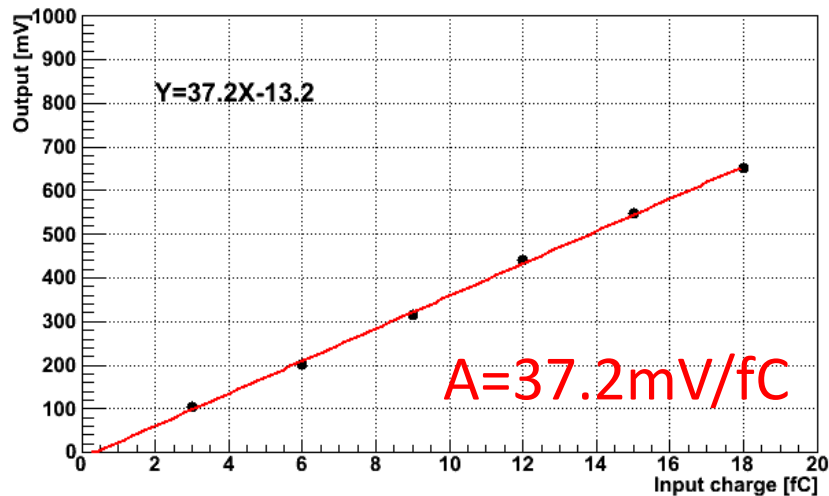
Cd=1pF



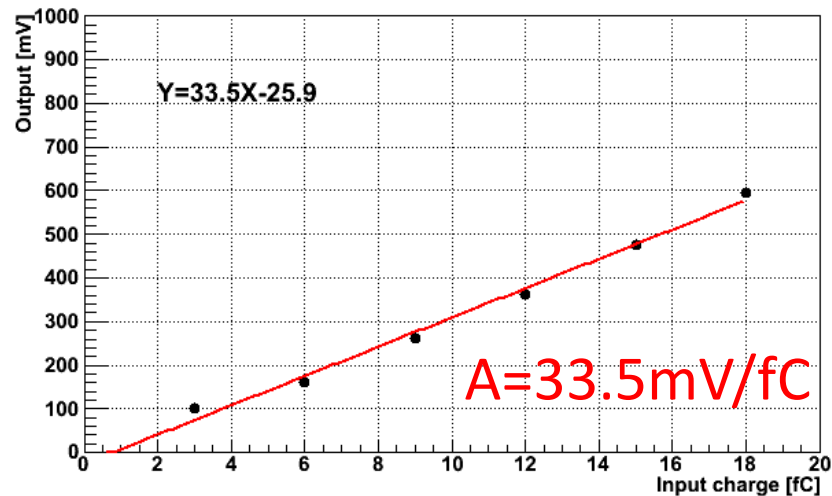
Cd=11pF



Cd=28pF



Cd=52pF



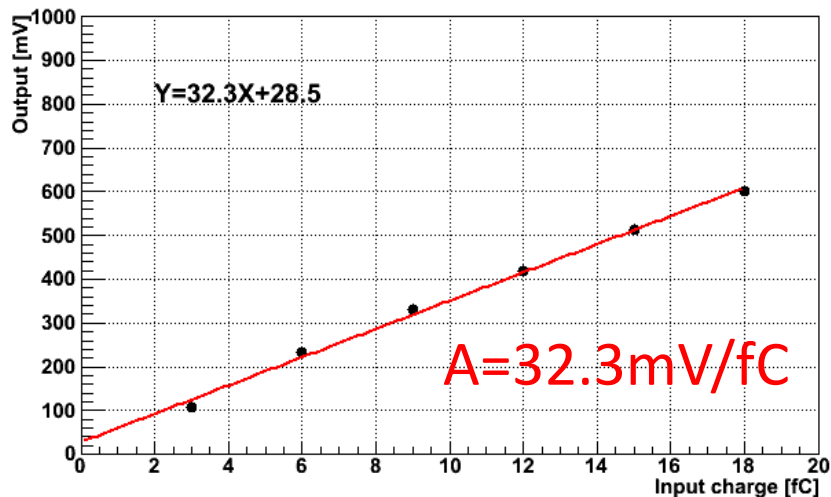
Sim.(Tanaka-san) : 80~100mV/3fC@Cd=30pF、shaping = 100ns



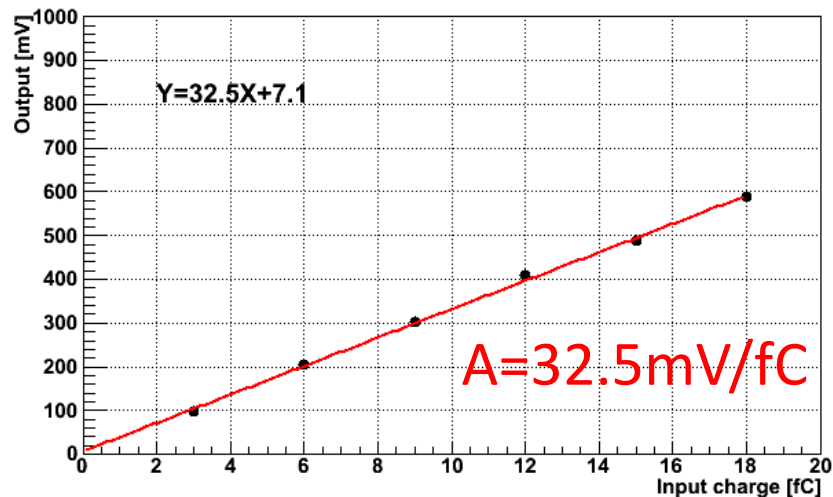
Consistent with Sim.

Dynamic range : > 5MIP

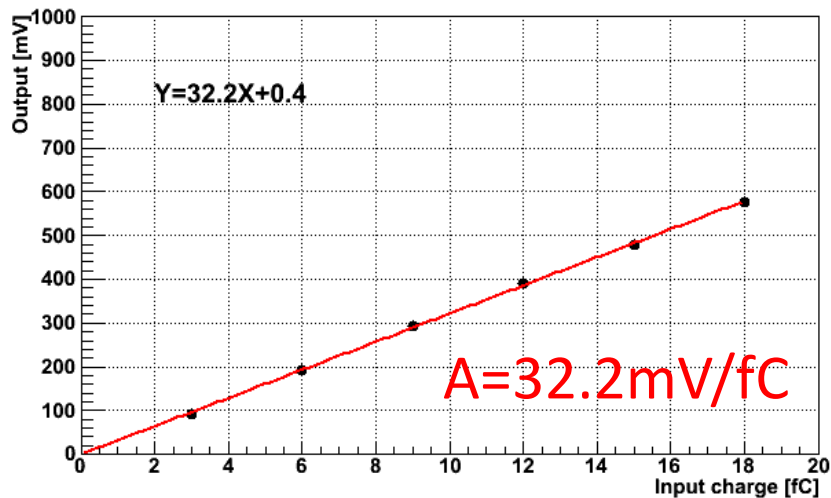
Cd=1pF



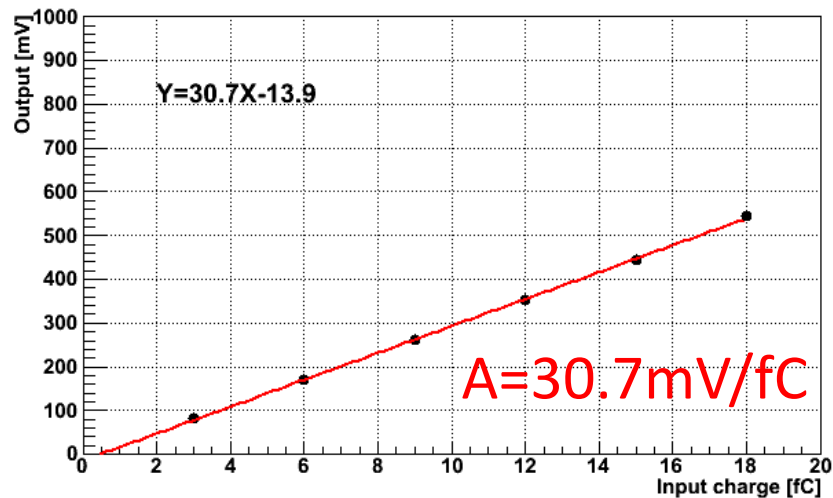
Cd=11pF



Cd=28pF



Cd=52pF



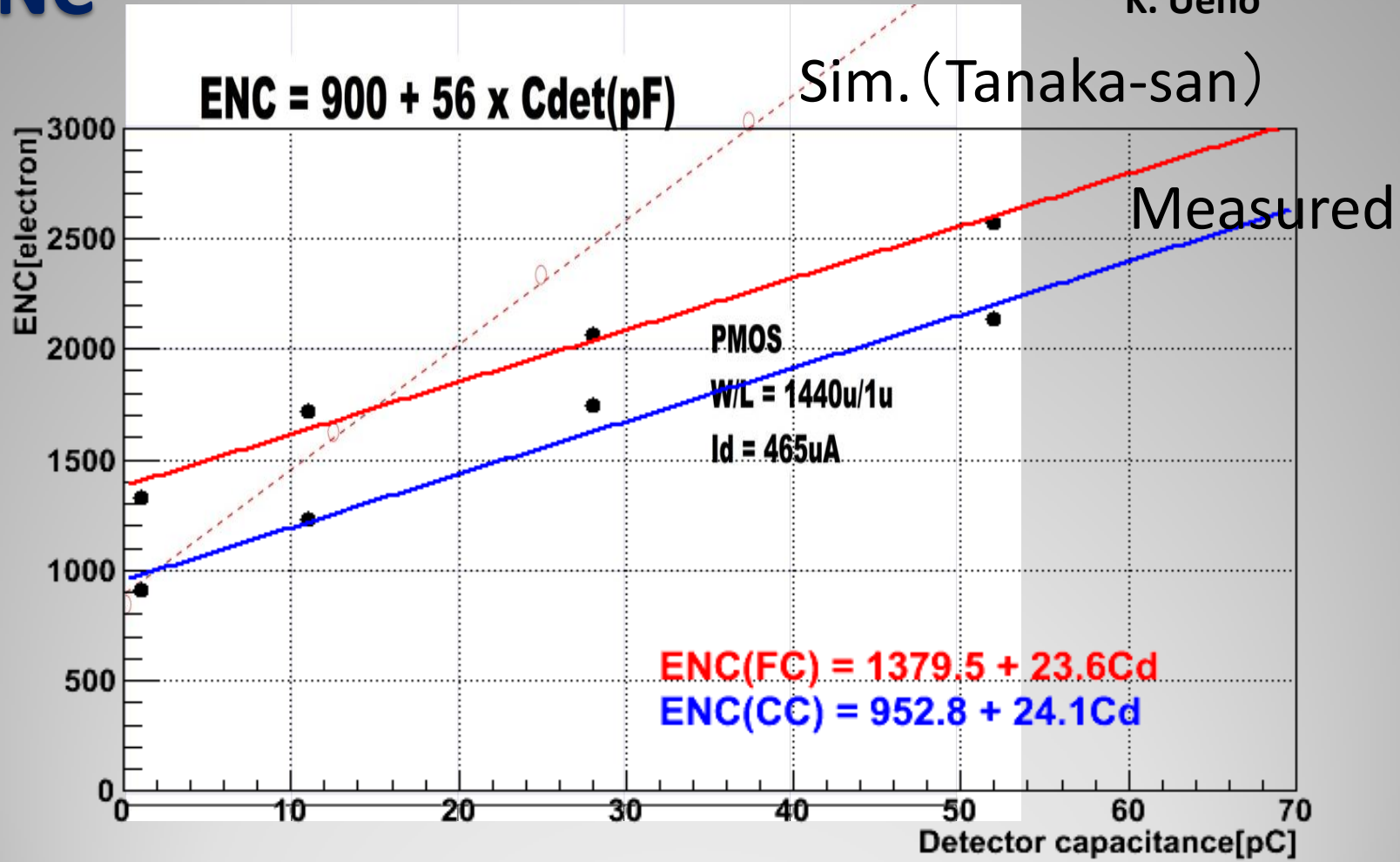
Sim.(Tanaka-san) : 80~100mV/3fC@Cd=30pF、shaping = 100ns



Consistent with Sim.

Dynamic range : > 5MIP

ENC



ENC(measured) < ENC(requirements: <3000e@Cd=30pF)

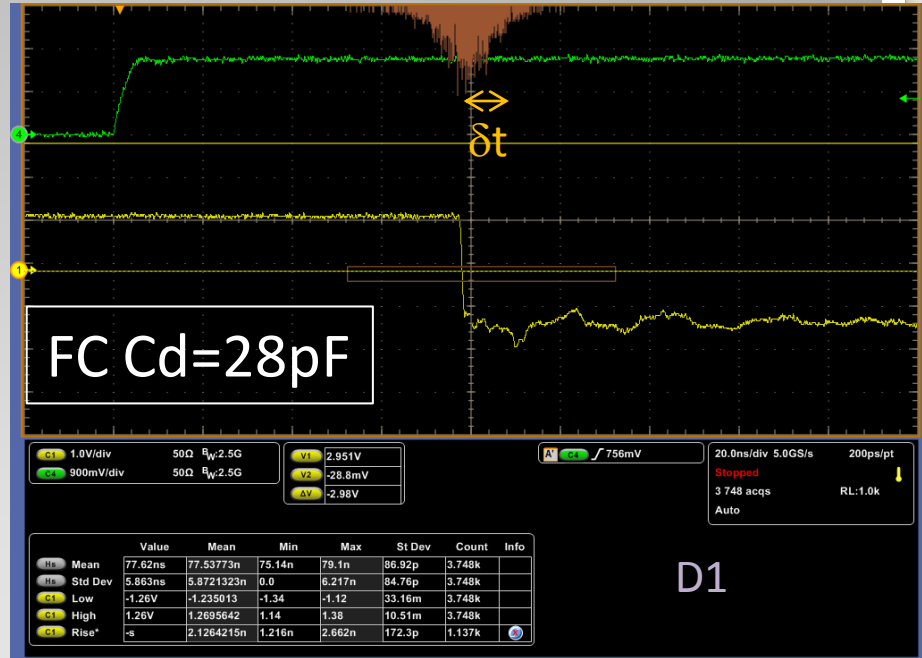
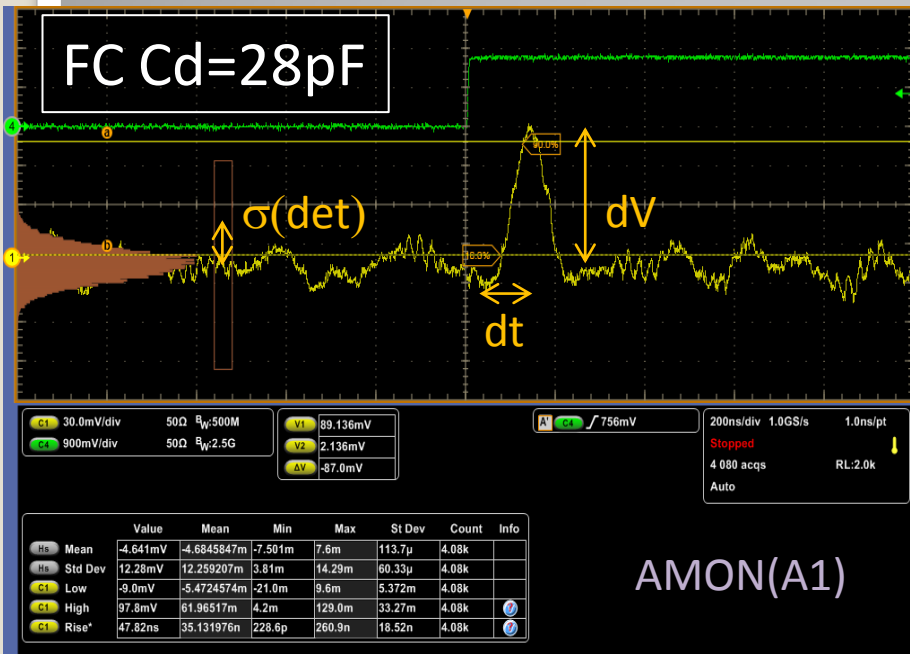
傾きがシミュレーションより小さい

ENC(FC) > ENC(CC)



現在調査中

Jitter (self consistency check)



$$\sigma(\text{cal}) = (dV/dt)\delta t$$

* It's rough check. -> error > 10%

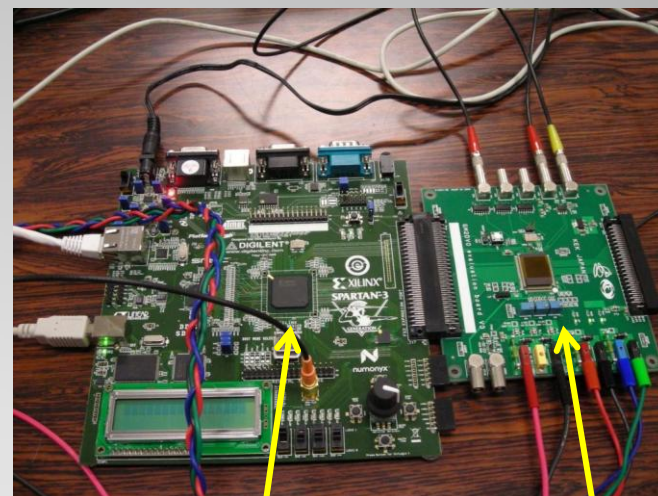
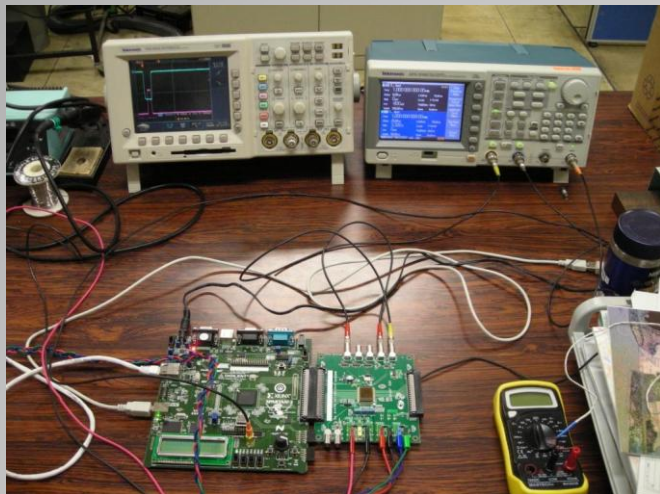
| FC Cd[pF] | $\delta t[\text{ns}]$ | $dV[\text{mV}]$ | $dt[\text{mV}]$ | $\sigma(\text{cal.})[\text{mV}]$ | $\sigma(\text{det.})[\text{mV}]$ |
|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 28 | 5.9 | 103 | 47.8 | 12.7 | 12.3 |
| CC Cd[pF] | $\delta t[\text{ns}]$ | $dV[\text{mV}]$ | $dt[\text{mV}]$ | $\sigma(\text{cal.})[\text{mV}]$ | $\sigma(\text{det.})[\text{mV}]$ |
| 28 | 5.2 | 90 | 45.1 | 10.4 | 9.0 |

$\sigma(\text{cal})$ と $\sigma(\text{det})$ はコンシステント

現状まとめ (SlitA)

| parameter | Requirement | Measurement |
|---------------|-----------------------------|--|
| Gain | $>70\text{mV/MIP}$ | $\sim 100\text{mV/MIP}$ |
| pulse width | $<100\text{nsec}$ | $\sim 100\text{ns}$ (アナログバッファ等の影響込) |
| Dynamic range | $\pm 5\text{MIP}$ | $>5\text{MIP}$ |
| Noise @30pF | $<3000\text{e}$ | $\sim 2000\text{e}$ (調査事項有) |
| # of ch | 128 | 32 |
| Timing shift | $\ll 5\text{nsec}$ | - |
| PWD | $\sim 2\text{mW/ch}$ (sim.) | $\sim 2\text{mW/ch}$ |

GM2DV0 評価 (内田さん)



FPGA board

Evaluation board

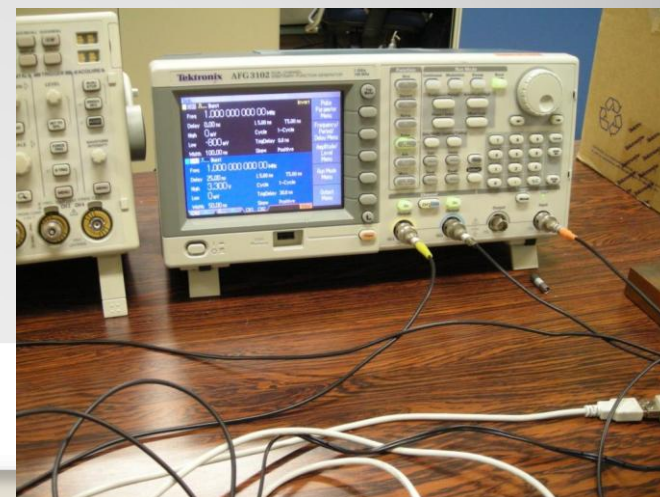
テストはFPGAを使用。ネットワークを介しデータ取得。

機能動作はOK

ただし、マイナーなバグあり

-> 現在調査中

詳細評価は現在進行中



detector development team

- KEK

- Osamu Sasaki
- Manobu Tanaka
- Masahiro Ikeno
- Tomohisa Uchida
- Takashi Kohriki
- Naohito Saito
- Tsutomu Mibe
- Kazuki Ueno

- Univ. of Tokyo

- Takuya Kakurai
- Shoichiro Nishimura

- Rikkyo Univ.

- Jiro Murata
- Haruna Murakami
- Tomomi Sakuda
- Sachi Ozaki

- JAXA

- Hirokazu Ikeda

- Kyoto-U

- Yoshihisa Iwashita

- LPHNE Paris

- Frédéric Kapusta
- Wilfrid da Silva
- Jean-François Genat
- Jaques David

- CC-IN2P3 Lyon

- Yonny Cardenas

まとめ

- J-PARC muon g-2/EDM実験
- シリコンベーンストリップ検出器
 - 要求
 - ・ 200-300MeV/cの陽電子飛跡を検出
 - ・ レートに対する高安定性
 - ・ 電場ゼロ (<10mV/cm)
 - ・ 磁場変動ゼロ (<10ppm)
 - ・ J-PARCビーム時間構造に同期した読み出し
- 各パートR&D進行中
 - 電場 & 磁場測定
 - 読み出し回路開発 (Open-Itの枠組)
 - ソフトウェア、センサー、DAQなどなど