

KALLIOPEを用いた ミュオンスピンイメージング 測定システムの開発

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 M2 石谷 壮史

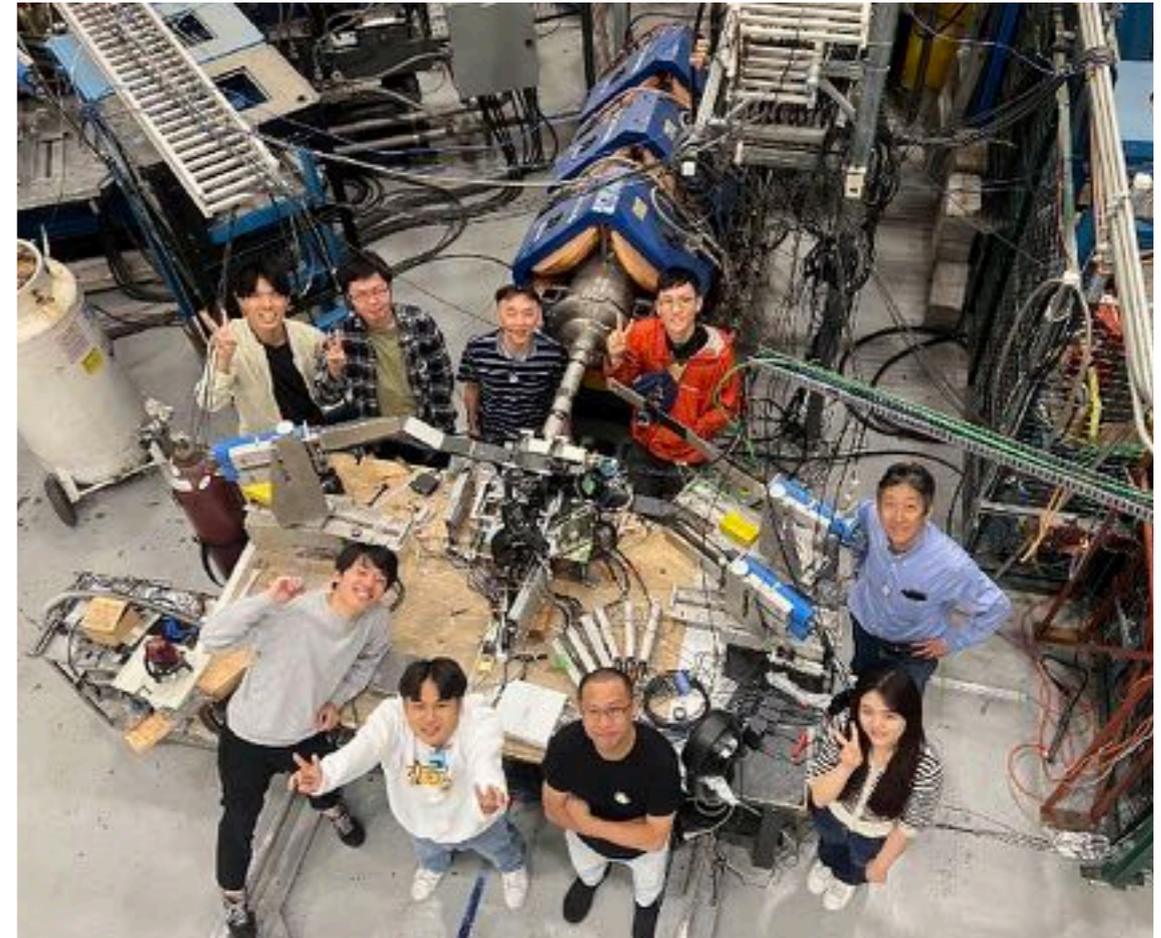
共同実験者

Collaborators :

S.Ishitani^{B,J}, K. Kojima^{A,I}, M. Mihara^{B,I},
A. Sato^B, G. Takayama^B, K. Yasuda^B,
T.Sugisaki^B, Y. Kimura^{B,I}, R.Taguchi^B,
M. Fukutome^B, S. Shimizu^B, R. Imai^B, S. Ide^B,
K.Shimizu^C, M. Kamon^C, M. Fukushima^C,
Y. Mizoi^D, K.Horie^B, A. Koda^E, S. Kanda^E,
W. Sato^E, D. Nishimura^G, M. Tanaka^{F,I},
G. Morris^A, B. Hitti^A, D. Arseneau^A,
R. Abasalti^A, D. Vyas^A, R. Yasuda^H, M. Fukuda^B

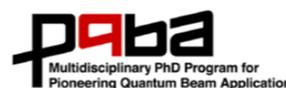
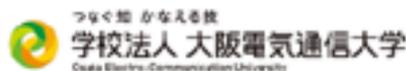
Affiliation :

^ACMMS, TRIUMF, ^BDept. Phys., Osaka U., ^CKYOKUGEN,
Osaka U., ^DOECU, ^EKEK, ^FKanazawa U., ^GKyushu U.,
^HTokyo City Univ., ^ITokyo Noko Univ., ^JOpen-it



Acknowledgement :

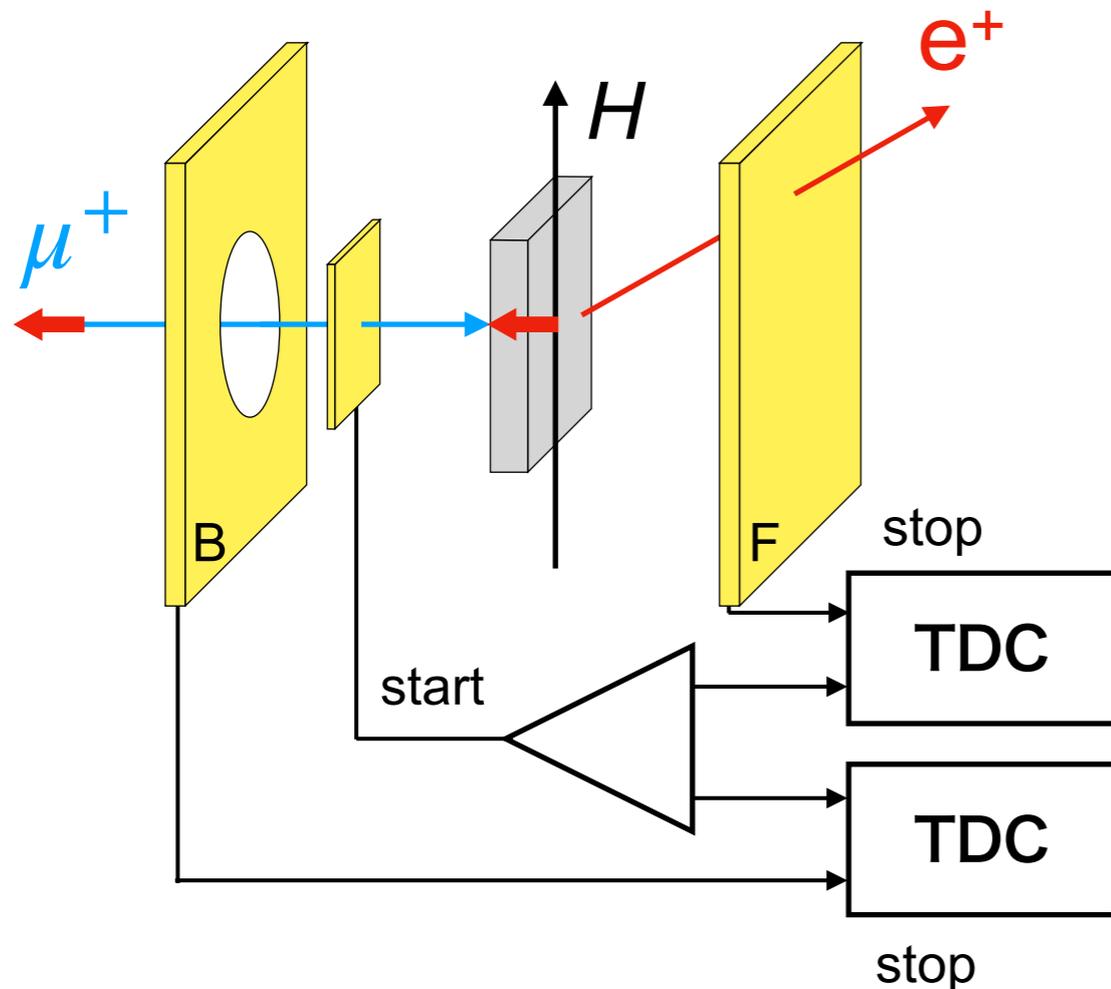
- Multidisciplinary PhD Program for Pioneering Quantum Beam Application (PQBA) at Osaka University.
- Scholarship of Graduate School of Science of Osaka University for Overseas Research Activities.
- Fundamental Electronics Research Institute (FERI), Osaka Electro-Communication University (OECU).
- JSPS Kakenhi Grant Number JP22H00110. • KEK-TRIUMF Exchange Program for Early Career Researchers (EPECR)



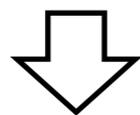
μSR法とは

Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance

= スピン偏極したミュオンビームを利用した分光法

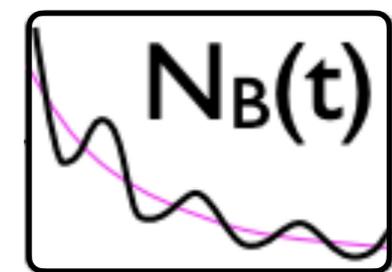
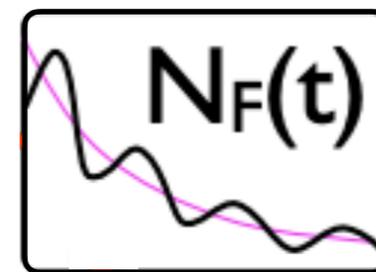


μ^+ , e^+ の時間を計測

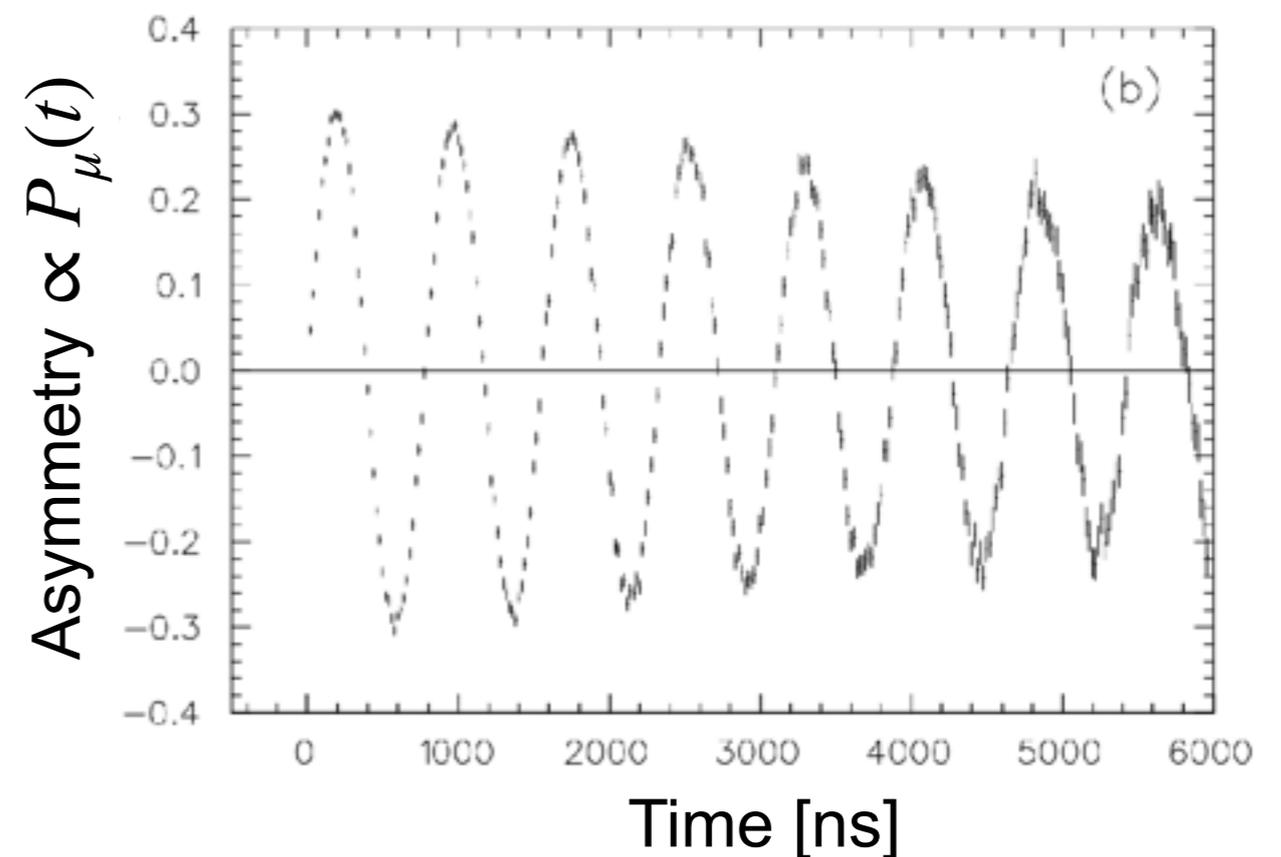


試料全体のμSRスペクトル

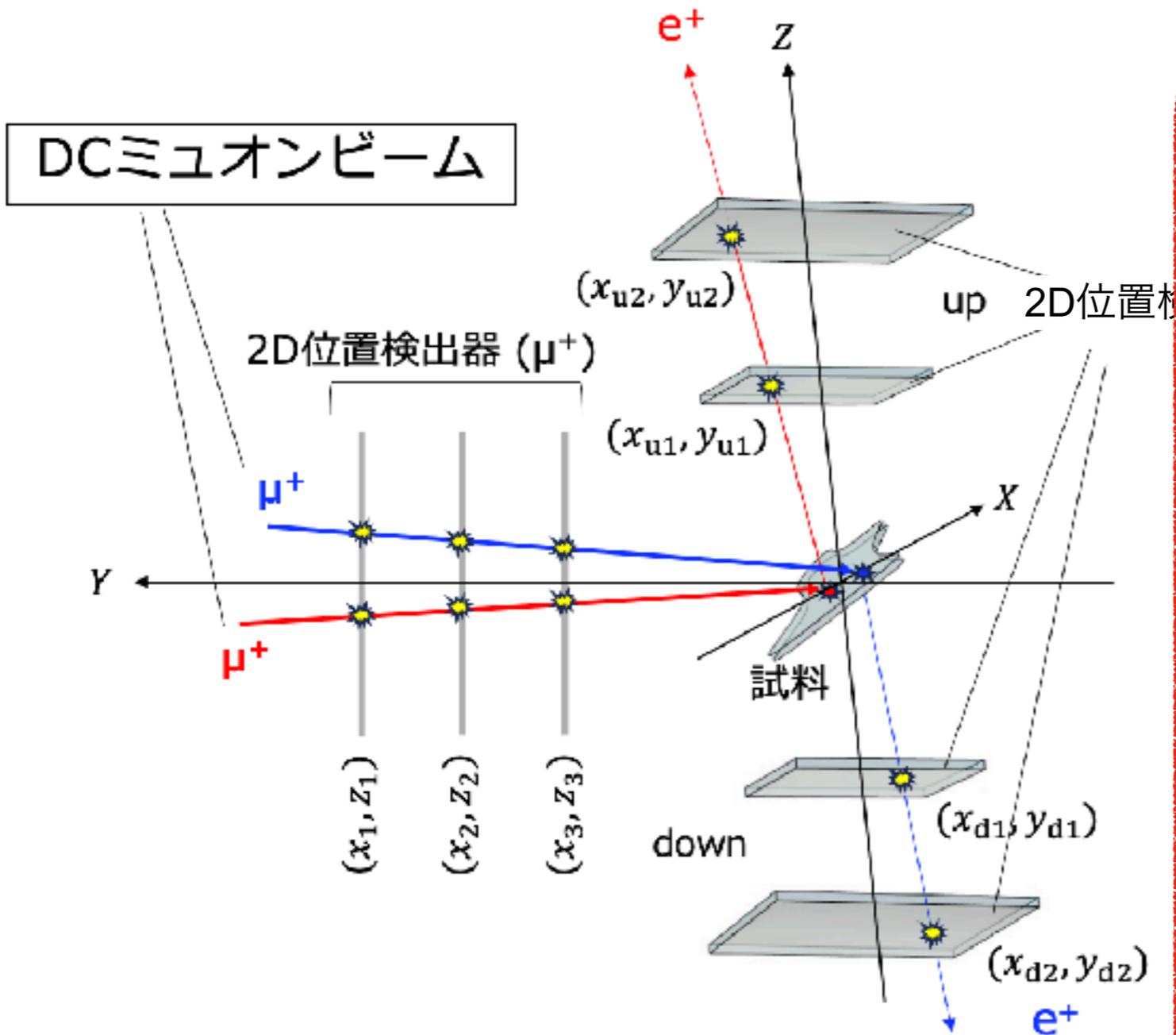
Forward/Backward : Time Spectra



$$A(t) = (\alpha N_B - N_F) / (\alpha N_B + N_F)$$



ミュオンスピンイメージング



μ^+ , e^+ の時間と位置を計測

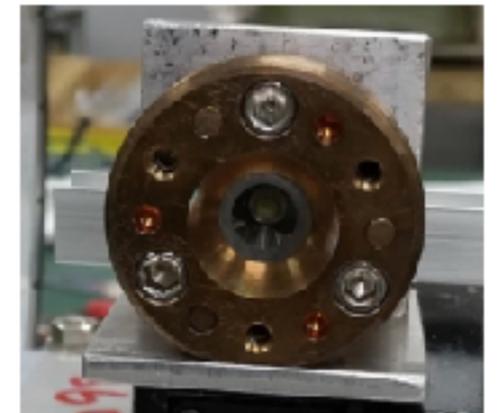
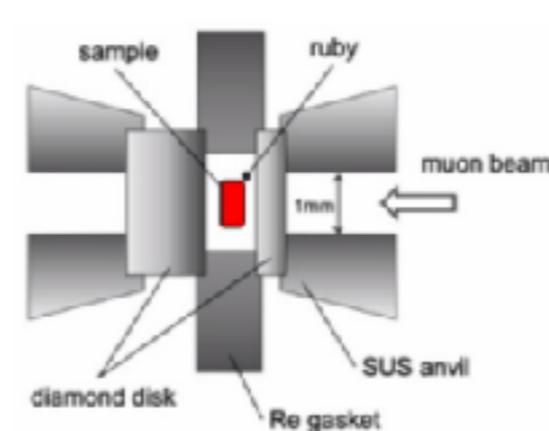


試料の微小領域の μ SRスペクトル

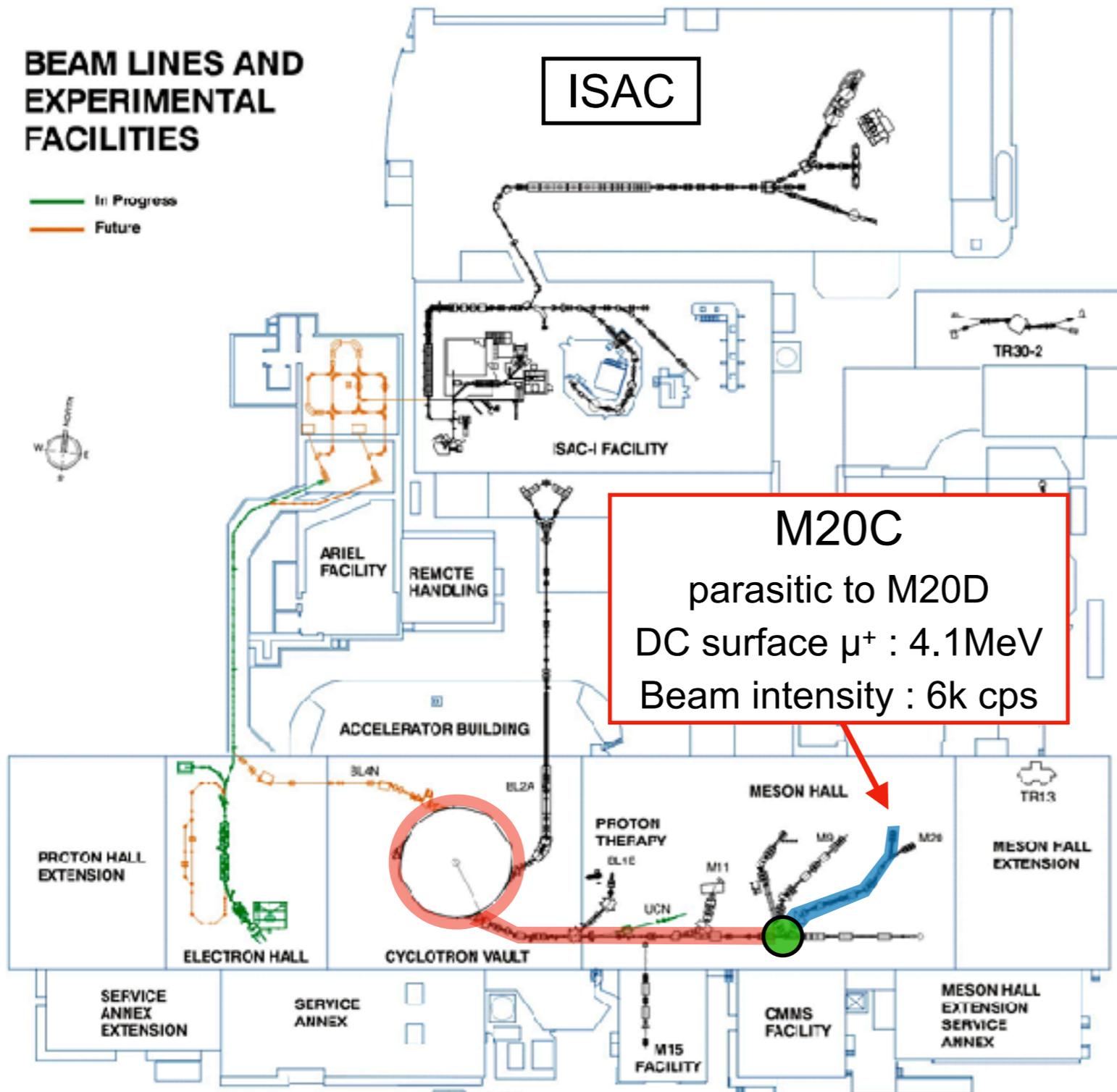
何ができるようになるか？

- ✓ バックグラウンドの除去
 - 微小試料の μ SR測定
 - 複数/混合試料の同時測定
 - 非破壊分析
 - 大強度 μ SR

e.g.) Diamond Anvil Cell → 超高压 μ SR
試料サイズ(<1mm) \ll ビームサイズ



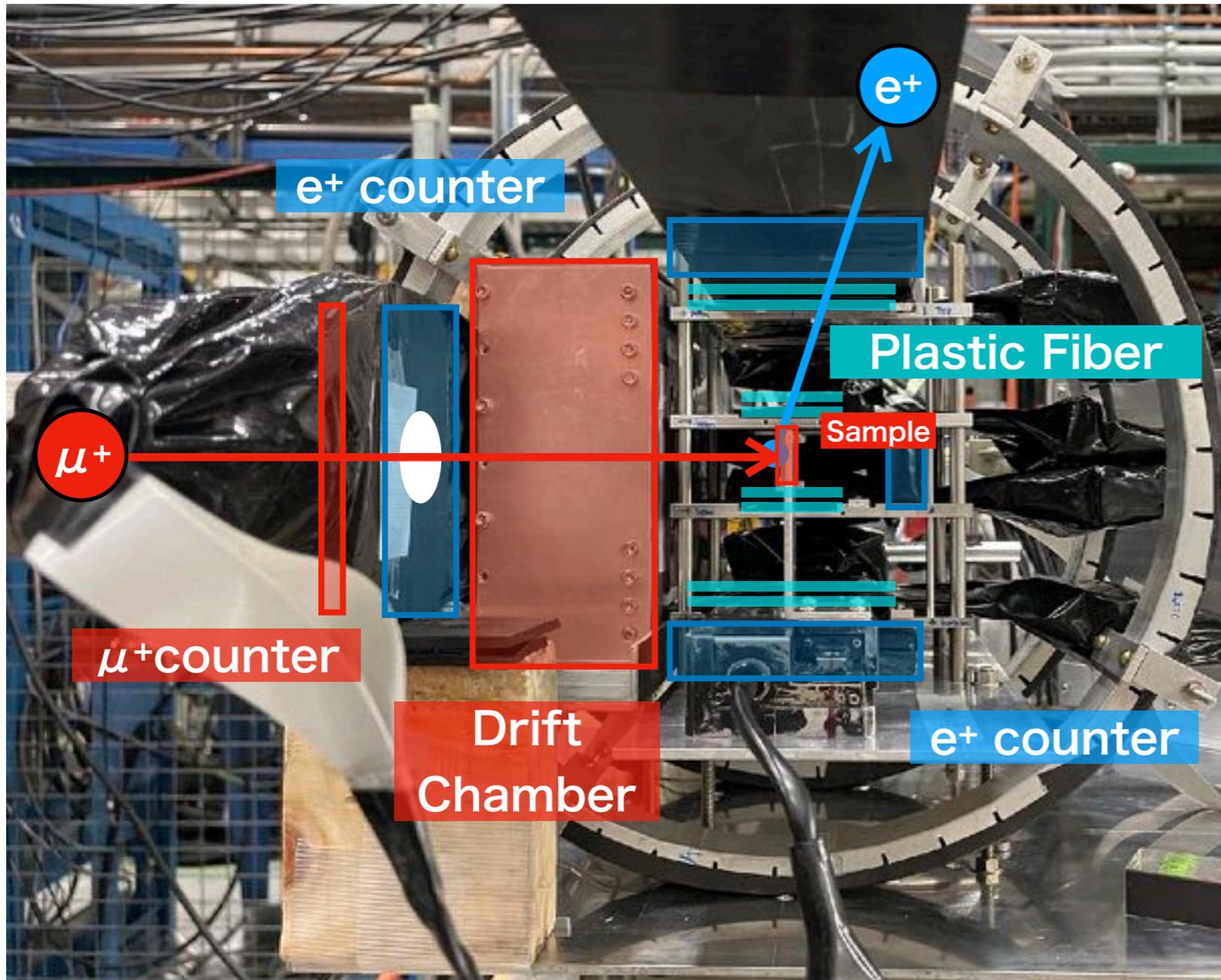
実験施設 - TRIUMF in Vancouver, Canada



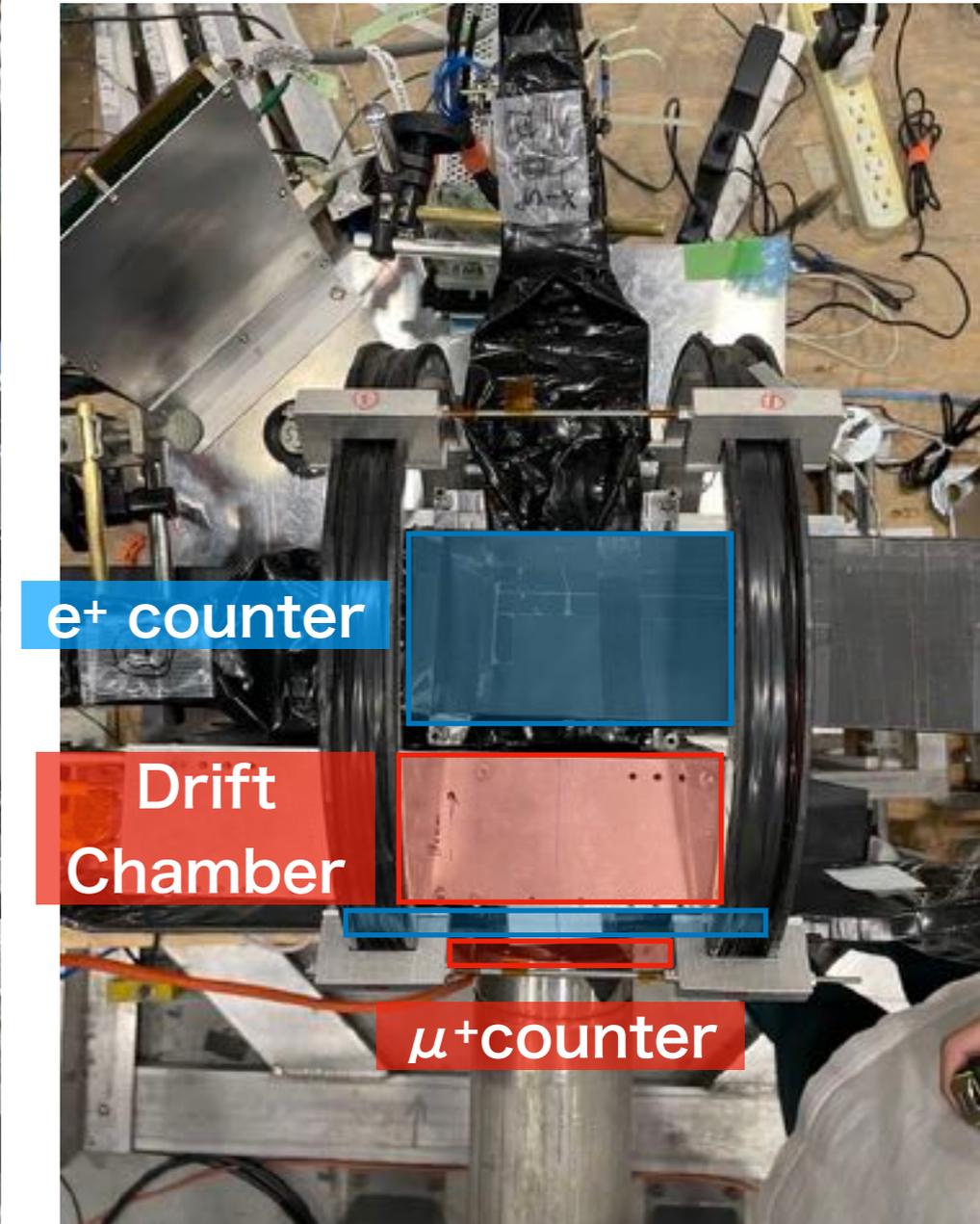
Proton (520 MeV) \longrightarrow π^+ (Be target) \longrightarrow μ^+ beam (4.1 MeV)

測定セットアップ

Side view



Top view



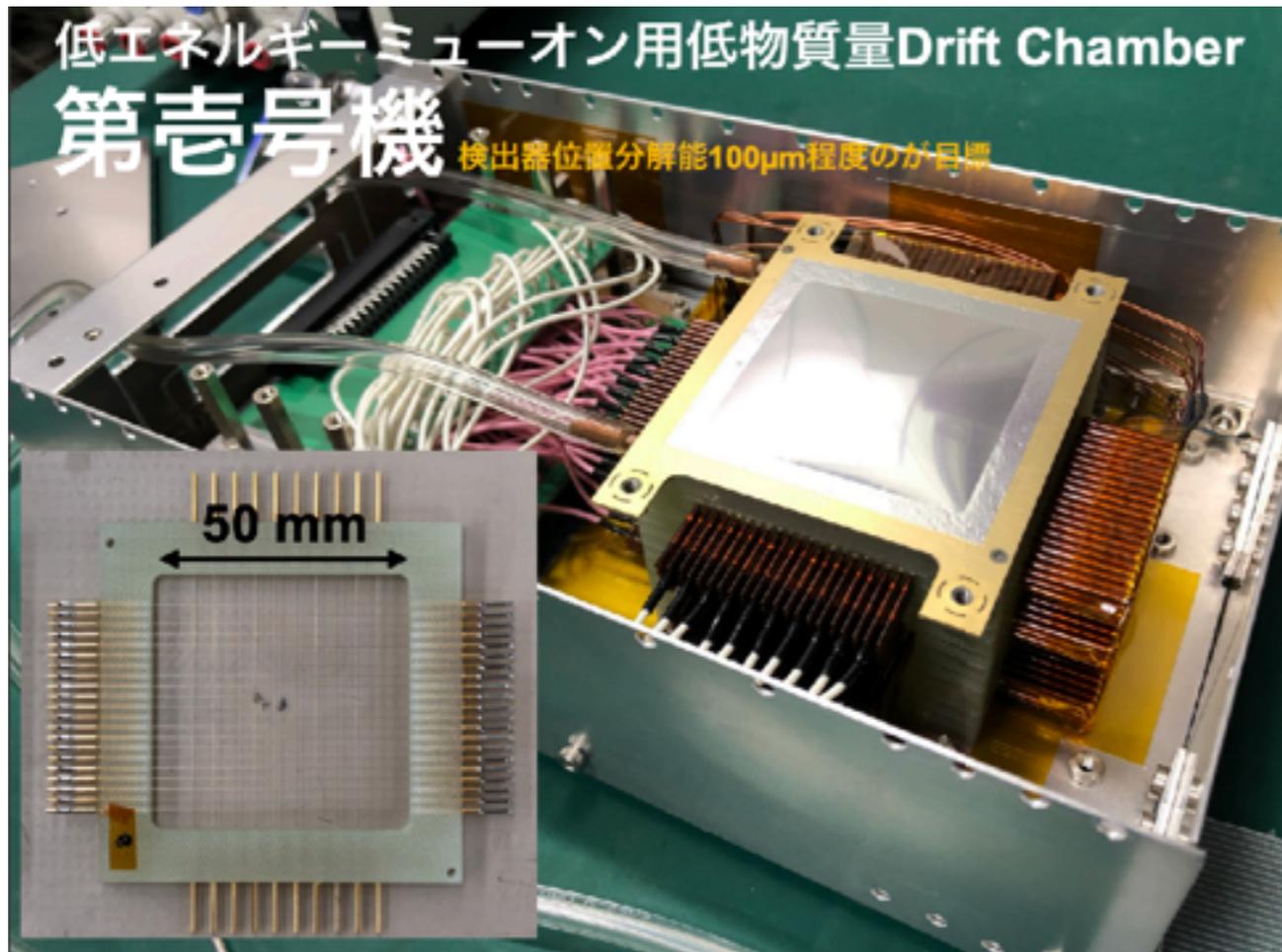
Trig.(T_{start}) : μ^+ counter

T_{stop} : e^+ counter (Forward/Backward, Up/Down)

μ^+ : Drift Chamber

e^+ : Plastic Fiber

ドリフトチェンバー： μ^+ のトラッキング

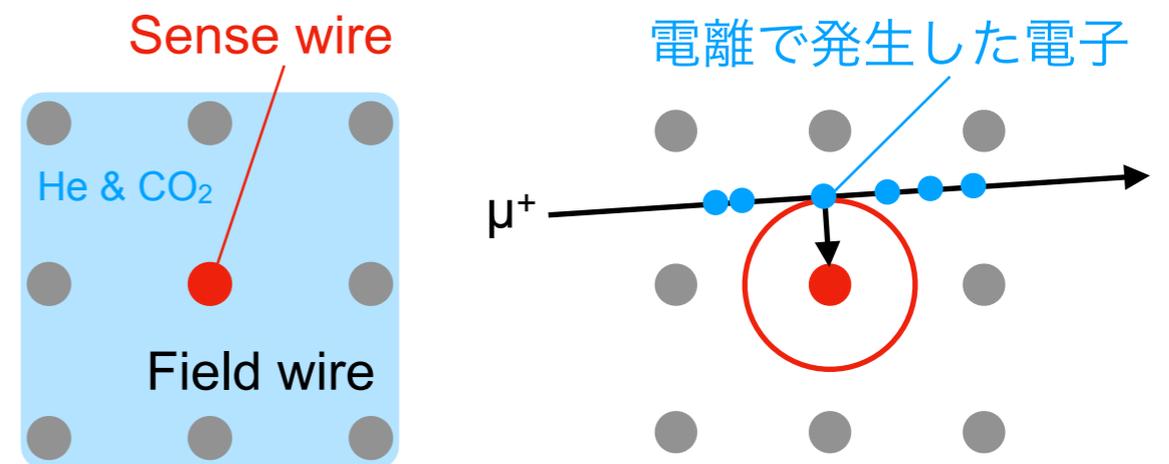


DC760 (ハヤシレピック)

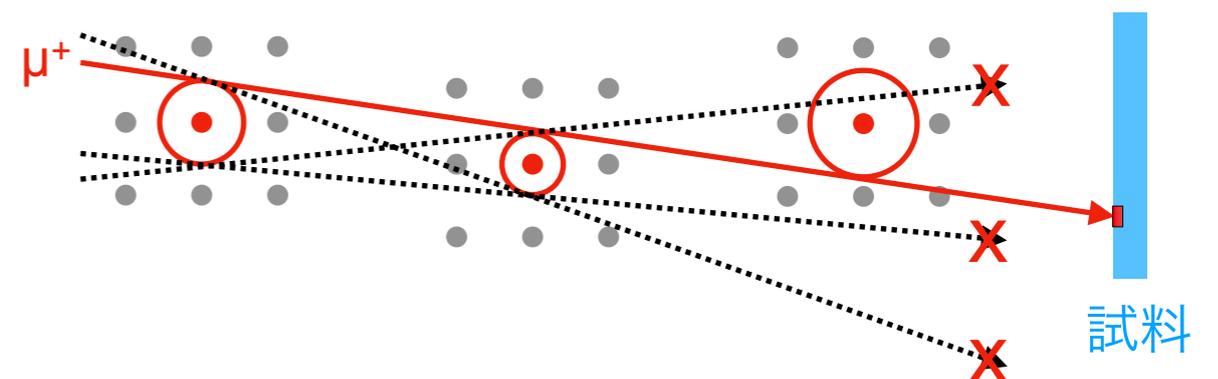
- ✓ CH /Layer : 10ch *X,Y each 3-layers
- ✓ ワイヤーピッチ : 2mm
- ✓ 有感領域 : 38 x 38 x 60mm
- ✓ ガス : He : CO₂ = 90 : 10
- ✓ 印加電圧 : -1450V

Drift Chamber

電子のドリフト時間 → 入射位置
高い位置分解能 ~ 数百 μm



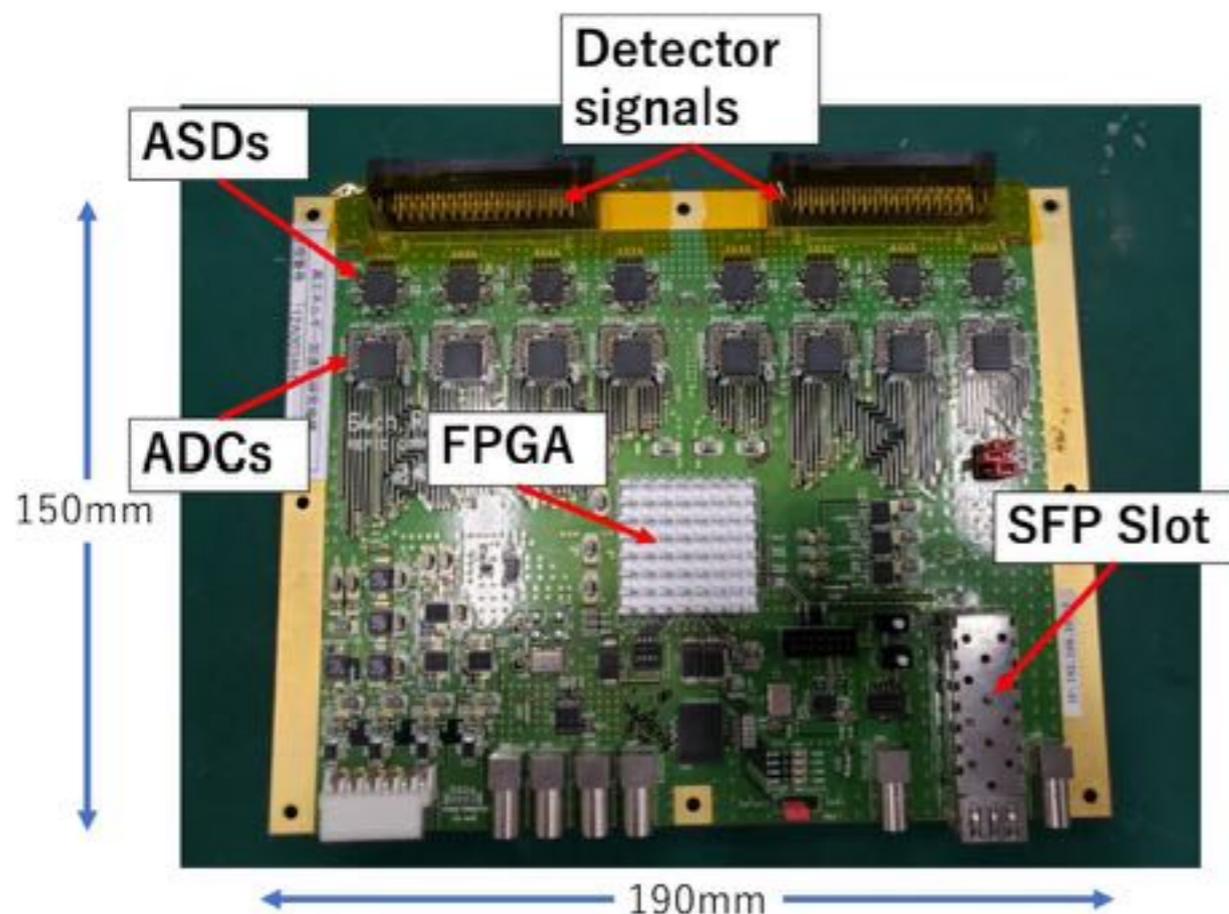
μ^+ のトラッキングから試料の位置を特定



3層なので、Left-Rightが解けないeventもある
 e^+ はPlastic counterで計測が必要

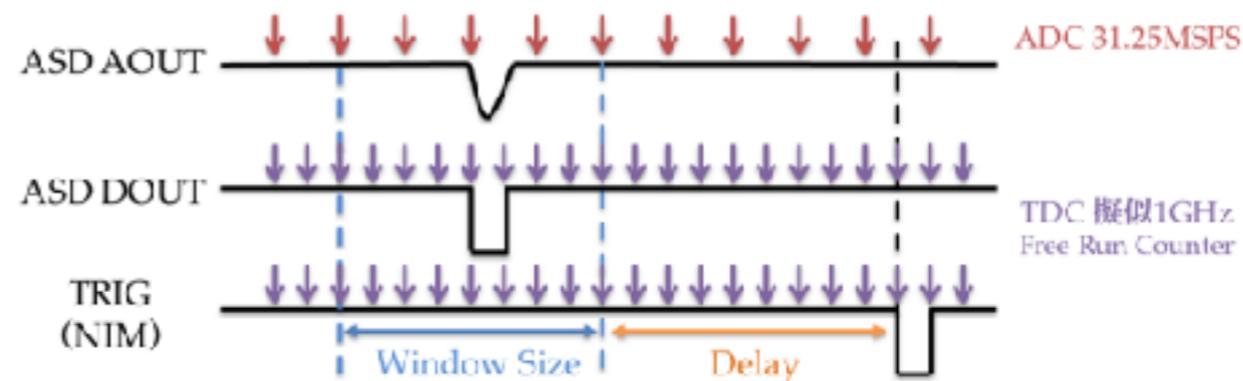
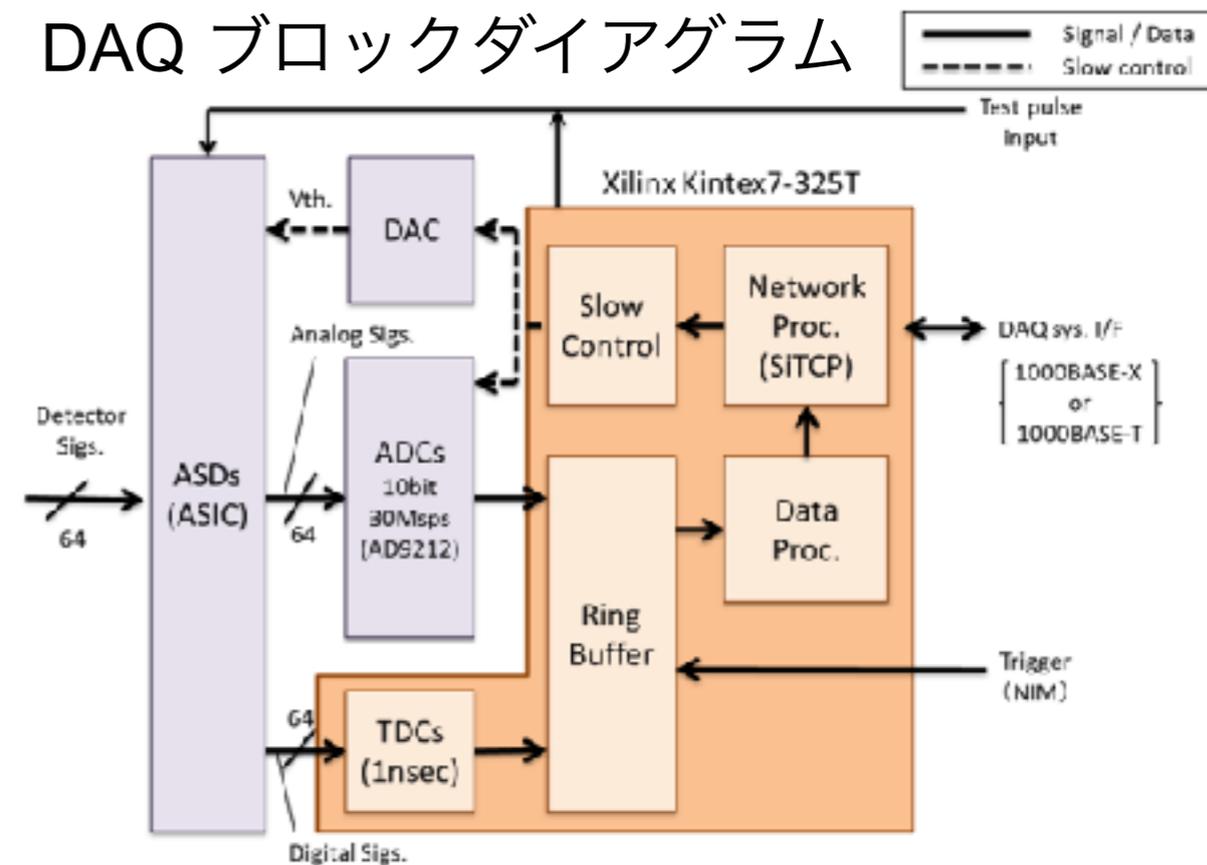
DAQ : ドリフトチェンバー

64ch Readout RP1212



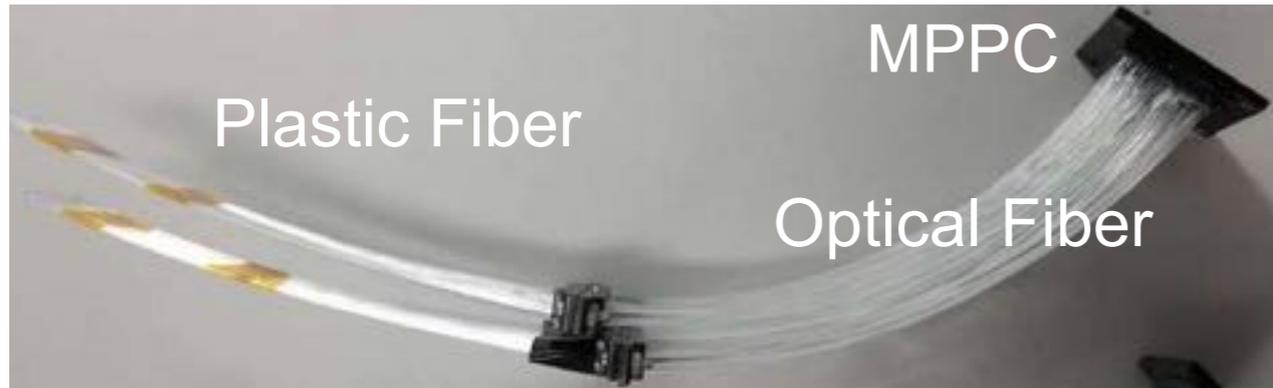
- ✓ 検出器入力信号64chを処理可能
- ✓ アナログ波形取り込み
 - : 解像度 10bit, サンプル周波数 31.25MHz
- ✓ TDC (FPGA内に実装) : 解像度 1ns
- ✓ リングバッファ : 8us
- ✓ データ転送モード
 - Raw : 波形, Suppress : ADCSum, TOT, TDC time

DAQ ブロックダイアグラム



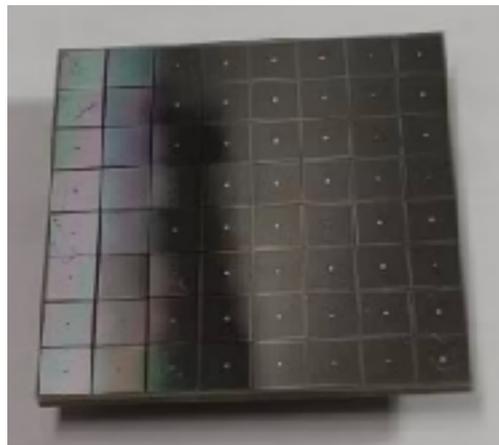
- Test pulse input で全てのCHに同じ波形を生成可能
- Clock : 40MHz on board or 外部入力
- マルチトリガ連続15トリガまで受付可能

プラスチックファイバー： e^+ のトラッキング



Plastic Scintillation Fibers (PSF) SCSF-78 (Kuraray)

- ✓ X, Y 各2層でトラッキング
 - ✓ Inner Fiber : 32 x2 ch, Outer Fiber : 64ch
 - ✓ Fiber size : 1mm 角
- (X,Y) (Up, Down) (In, Out) → Total : 384ch



MPPC

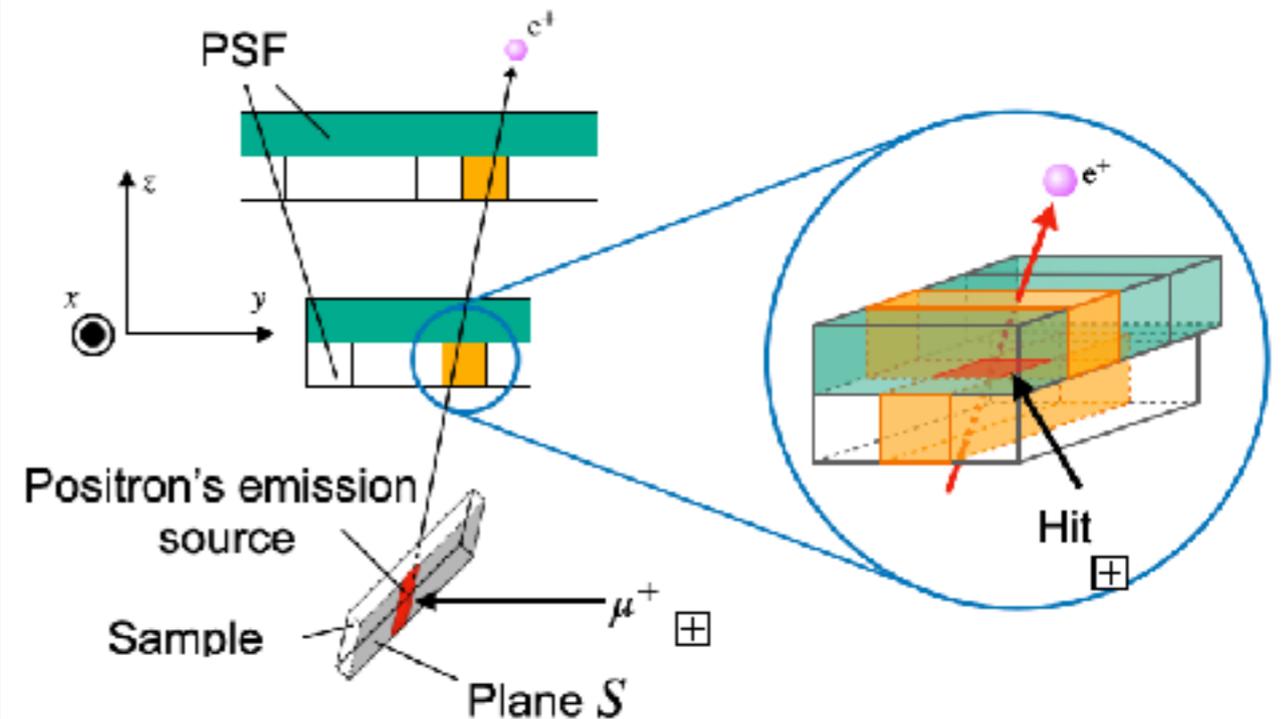
S13361-3050E-08(Hamamatsu)

- ✓ $8 \times 8 = 64$ ch
- ✓ $V_{\text{Actual}} : 56.5 \sim 58$ V
- * $V_{\text{BR}} : 52 \pm 5$ V

Plastic Fiber

e^+ のトラッキング & μ SR法 の両立
Plastic Scintillator → 磁場耐性

e^+ のトラッキングから試料の位置を特定

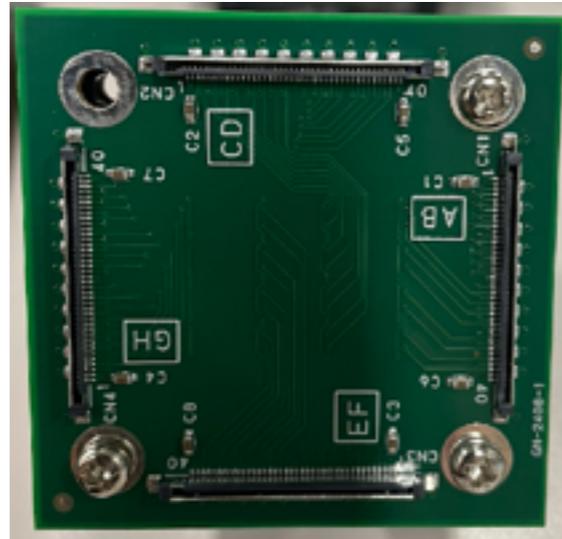


位置分解能 > Fiber のサイズ
Fiberを小さくするとS/N悪化してしまう

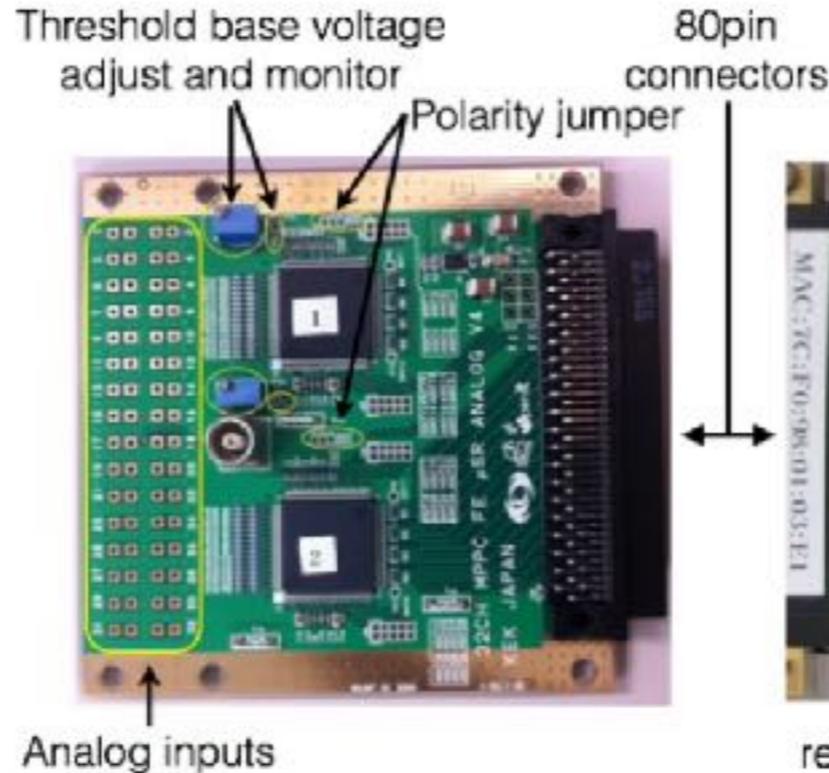
DAQ : プラスチックファイバー, e⁺ counter

KALLIOPE, NIM-TDC

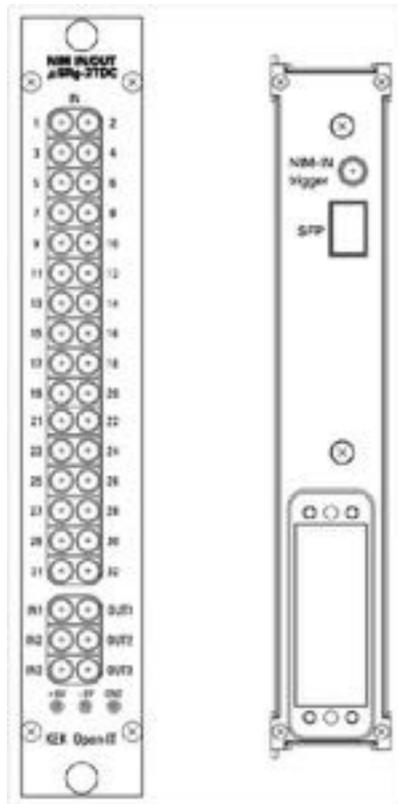
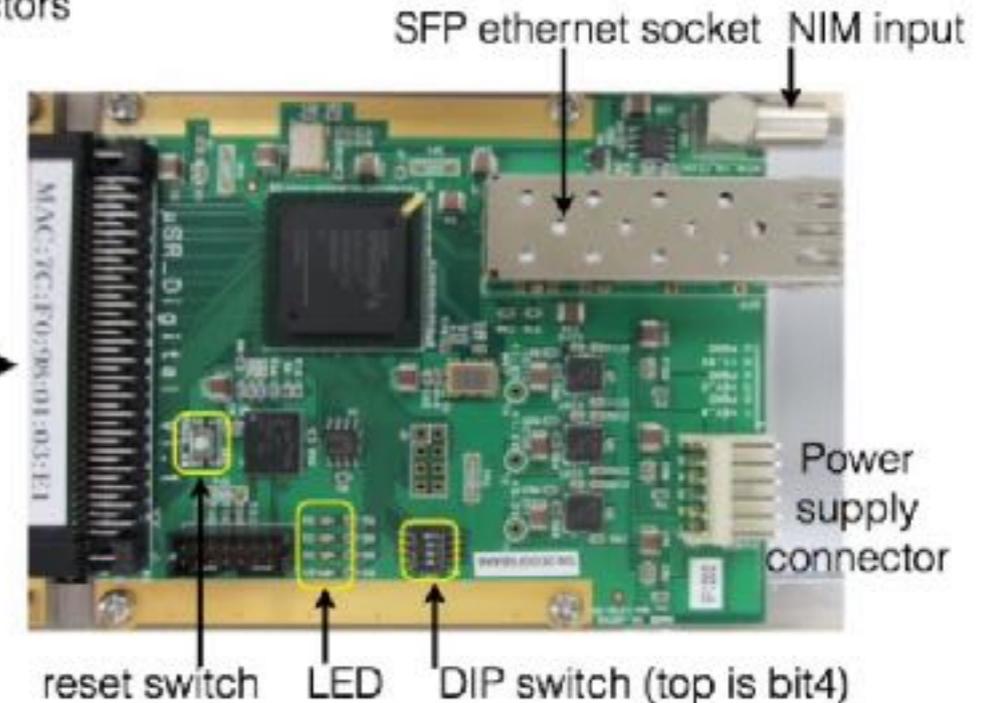
MPPC CN Board V1 基板(GN-2408-1)



Analog Board (GN1372-1)



Digital Board (GN1078-3)



NIM-TDC

KALLIOPE Analog Board

- ✓ Input/output ports : 32ch
in : NIF or KEL(SSL00-40S)
- ✓ Common Threshold (for 16ch)
- ✓ Threshold DAC (for each ch)
resolution : ± 1.6 or $16\text{mV/bit} \times 8\text{bit}$
- ✓ HV供給 & 信号取得

KALLIOPE Digital Board

- ✓ Input ports : 32ch
- ✓ NIM input for trigger
- ✓ TDC Leading/Trailing time
resolution : 1ns

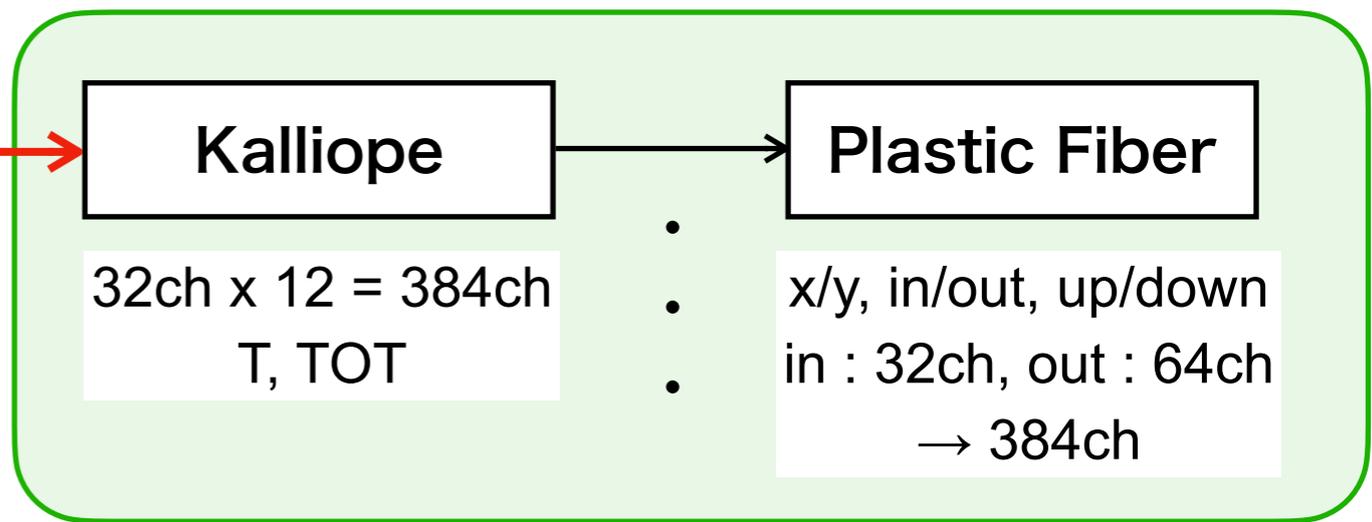
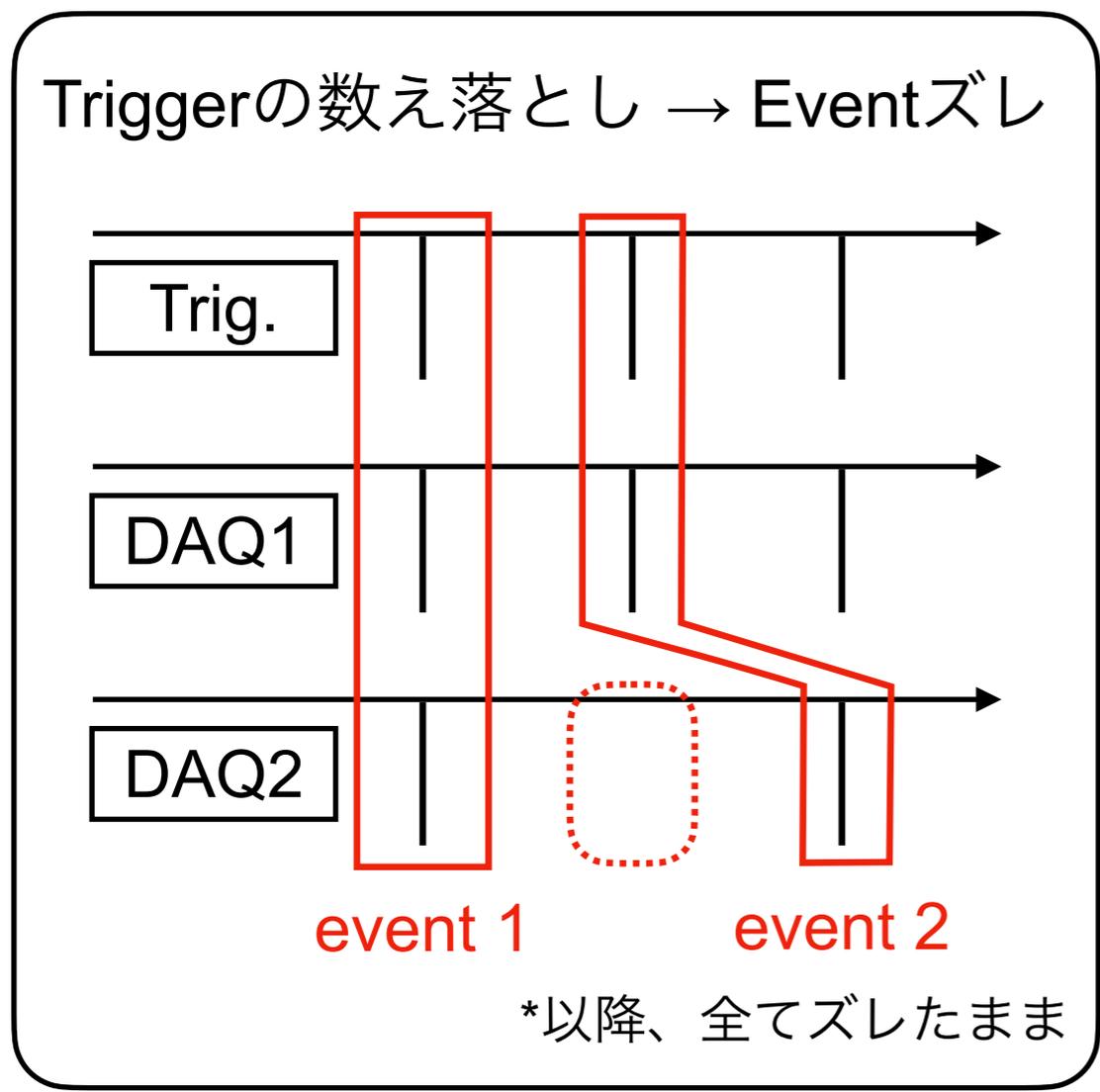
データ収集システム



64ch
波形 / T, Q

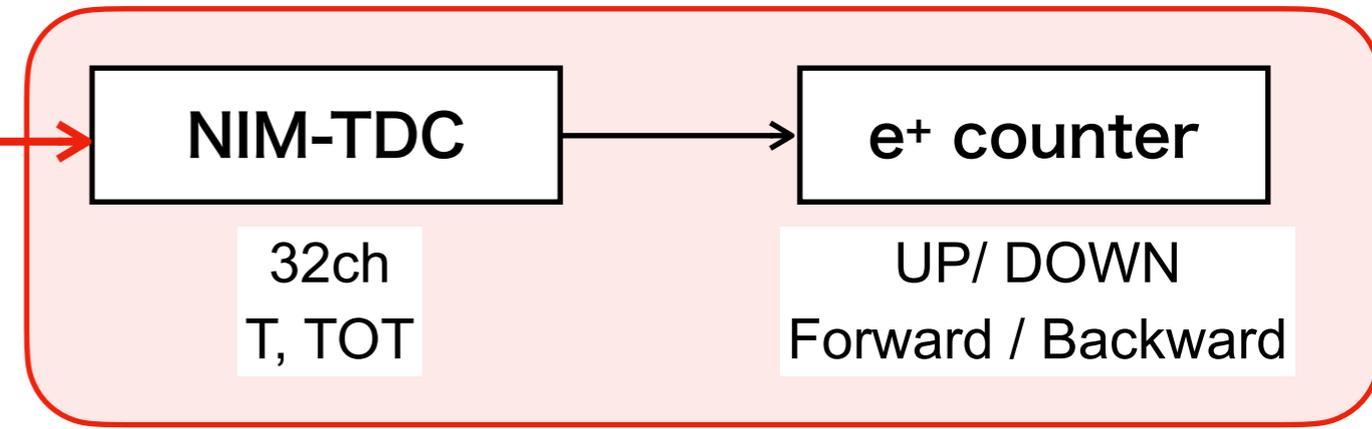
x/y 3-layer
10ch for each
→ 60ch

DAQが複数 (3種類, 14個)
Event by event でデータ取得



32ch x 12 = 384ch
T, TOT

x/y, in/out, up/down
in : 32ch, out : 64ch
→ 384ch

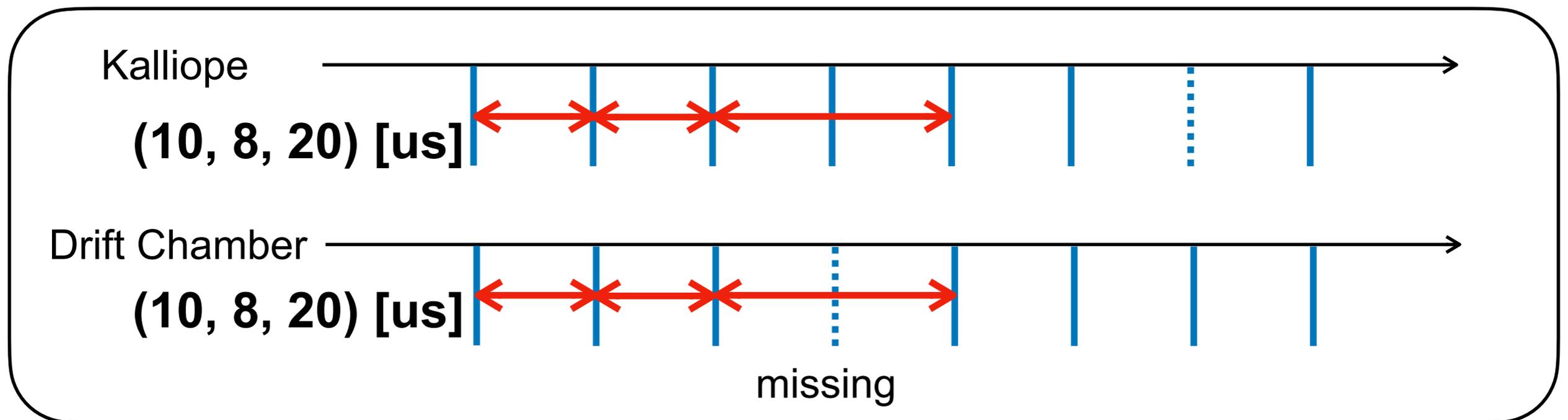
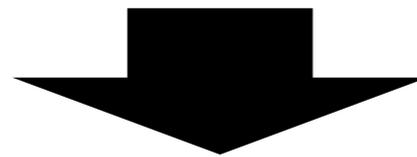
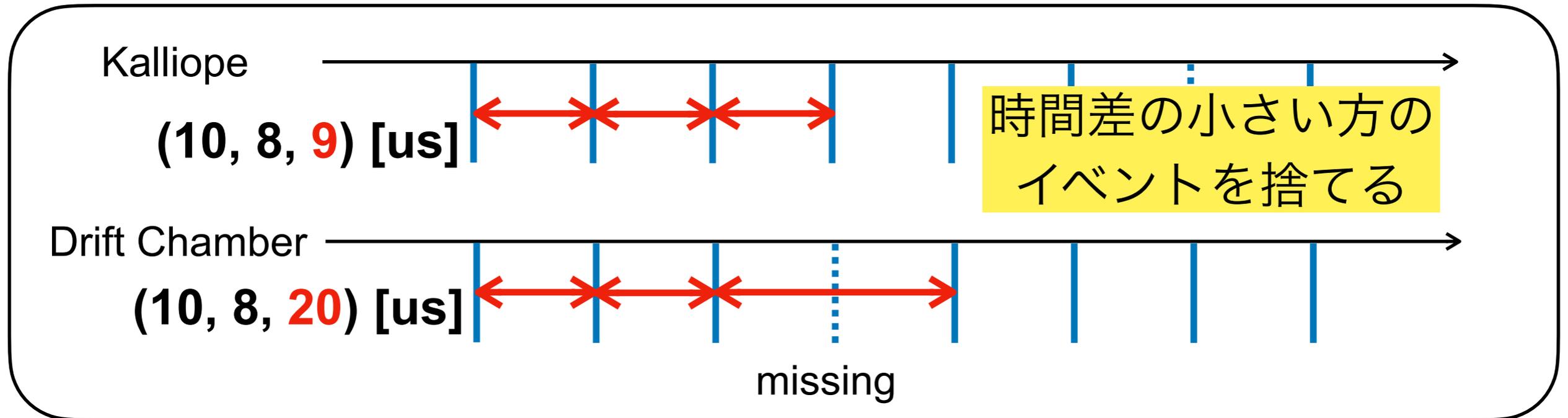


32ch
T, TOT

UP/ DOWN
Forward / Backward

DAQ Synchronization

Common Clock がない → Triggerの時間差のパターンでマッチング



課題

KALLIOPE :

- 擬似トリガの識別が不可能 = Common Clock がない
 - Synchronization をソフトで頑張る必要あり
- Analog out を見ることができず不便 → EASIROC を通して使う？
- S/Nが悪い → データ量が多い上にほとんどがノイズ
 - FWを書き換えて65us以降のデータを取らないようにする？

RP1212 :

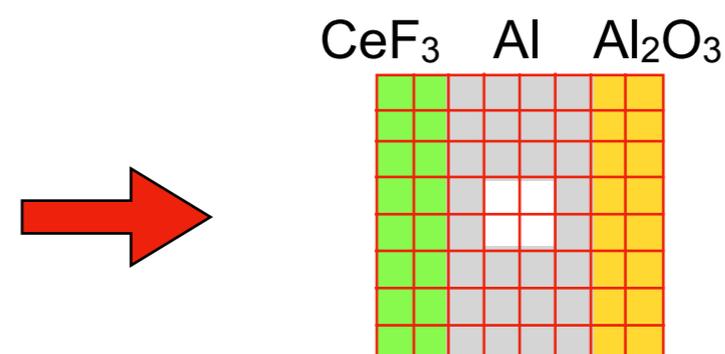
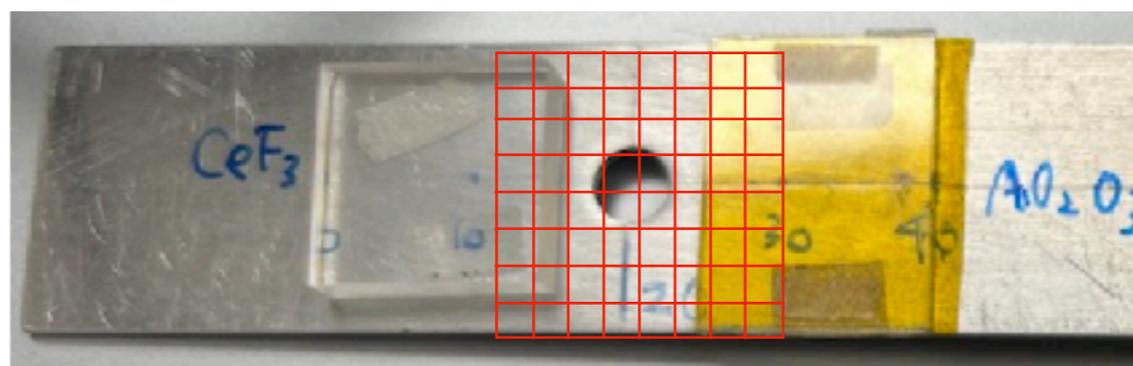
- Suppress mode(データ可変長) でパケットロスすることがあった
 - パケットロスを無視してデータ取得するようにする

何かアドバイスあれば是非お願いします 🙏

今後の展望

μ SRスペクトルが異なる3つの試料のイメージング

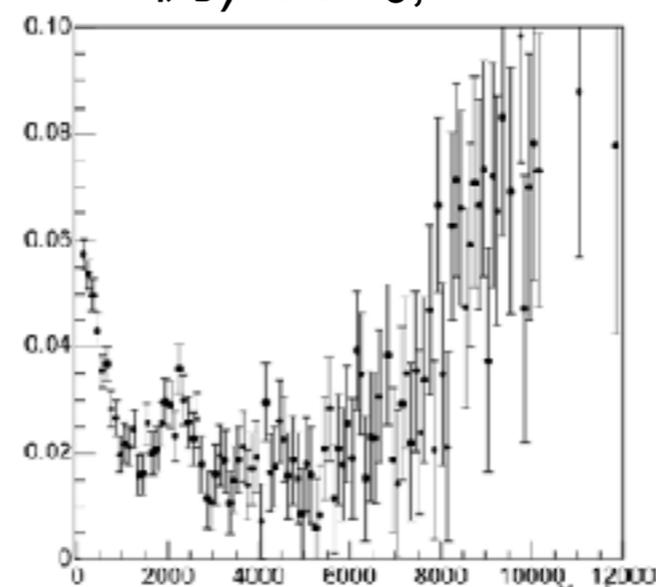
- CeF_3 : ZF, Room Temperature で F- μ -F 回転
- Al w/hole : μ^+ の回転、穴が空いた部分では何も見えないはず
- Al_2O_3 : Al Magnetic moment で μ^+ spin は緩和する



- μ^+ tracking & e^+ tracking
 - セルごとに μ SRスペクトルを作成
 - スペクトルの形や周波数成分の解析
 - 物質を識別 & イメージング
- Vertex Matching → 高い画像分解能

詳細な解析はこれから

例) CeF_3 , ZF



例) Al, TF

