次世代高輝度重イオン衝突実験のための シリコンストリップ検出器の開発と性能評価

広島大学大学院 先進理工系科学研究科 物理学プログラム クォーク物理学研究室 M232708 山田蓮斗

Intro:高バリオン数密度領域の探索



K. Fukushima and T. Hatsuda, Rept. Prog. Phys. 74 (2011) 014001

Intro: FAIR CBM 実験 (2029年~)

✓ 2029年開始予定の高輝度重イオン衝突実験(固定標的型)



2/13

Intro:STSの磁場中での動作試験

≻ <u>STSの動作試験</u>

- GSIのSIS18(既存シンクロトロン)のビームを用いて,検出器試験を実施中。
- しかし,実際の実験環境下での動作試験(磁場中や大強度ビームを用いた試験)
 は十分ではない。

大強度陽子ビームを用いる <mark>J-PARC E16実験</mark> に実装, 運用試験を行う

≻ <u>J-PARC E16実験</u>

- ✓ 2025年春~ 物理データ取得運転開始
- ✓ 相互作用レート: 10⁷ Hz
- ✓ 磁場環境下で検出器使用
- カイラル対称性の部分的回復現象を 電子対測定で実証する実験

30 GeV $p + A \rightarrow \rho, \omega, \phi \rightarrow e^+ e^-$

- ガス飛跡検出器の時間分解能は 300 nsecと大きく, fake track 多
 - → 正確な飛跡再構成には, 数nsecの時間分解能の良い飛跡検出器が必要



実際の実験に近い環境(磁場あり, 大強度ビーム)での, <mark>STSの動作確認&性能評価</mark>

▶ J-PARC E16実験へのSTS実装完了→ 動作試験, 性能評価



STS module



➤ 両面読み出しストリップ

✓ p側stripはn側stripに対して
 7.5度傾斜



Christian J. Schmidt. The CBM Silicon Tracking Station and CBM- related ASIC developments.

Parameter	Value			
センサ厚さ	320 μm (~0.37% X ₀)			
Strip pitch	58 µm			
Stripの数	1024			
設計位置分解能	(x)15 μm (y)110 μm*			
設計時間分解能	~6 ns*			

*Johann M.Heuser 「The CBM experiment at FAIR –Overview of detector and technologies」 https://sites.google.com/view/j-parc-hi-evening/

▶ フロントエンド読出回路: FEB-8

- 8つの集積回路搭載ボード
- ・ セルフトリガー(連続読み出し)
- アクセプタンス外に配置



STS動作確認,性能評価の流れ



電子ビームを用いたテスト実験 (@KEK PF-AR) 7/13

✓ 2023年11月にKEKのPF-ARテストビームラインにてテスト実験を実施







電子ビームを用いたテスト実験 (@KEK PF-AR) 9/13

③ <u>検出効率</u>

シンチcoin.に対応した

検出効率 = <u>制限領域内のセンサの反応数</u> + background考慮 シンチcoin.数



<u>テスト実験により改善, 実装したもの</u>

- ・ 閾値調整メソッドの確立, 実装
- 電源制御系の改良, 電源監視/制御GUIパネルの実装
- 長距離伝送のためのリピーターの改良

時間の都合上話せません。。これら苦労話のBackupスライドあります。

等々

STSのインストール



- ✓ 最内層飛跡検出器(1層)として実装
 - ・ センサ10台(8+2)で構成
 - 読み出し回路(FEB-8)水冷パイプ内蔵
 - チェンバーをマイラー等で遮光&静電遮蔽
- ✓ インストール完了した STS Chamberと
 読み出し回路の写真 (2024年4月)→







E16 検出器動作試験運転: 磁場なし環境下での性能評価

- ✓ E16実験の検出器動作試験運転を実施 (2024年5月), 200時間程度稼働 ^{11/13}
- <u>Residual, 検出効率の解析</u>
- ✓ 外側 GEM Tracker (GTR) 3層のみで再構成したtrackを用いて解析
- ✓ 1x10⁹ 陽子/2秒spill, 磁場なし環境 データセットを使用



外側GEM Trackerの位置分解能 (~120 µm) を考慮した簡単なシミュレー ションにより、妥当であると確認

✓ 再構成したトラックに対しての検出効率は, residual < 4 σ で約 94%



E16 検出器動作試験運転:磁場環境下での動作確認^{12/13}



- ✓ 運動量は, STS 1層+GTR 3層のtrackを用いて算出
- ✓ 縦軸の電荷量は, STS ADC値から換算
- ✓ 赤線はエネルギー損失の計算値 (MPV)
 - ✓ 粒子ごとに明瞭なバンドを確認
 - -・ STS hitの**クラスタリングの成功**
 - ・ ADC値→電荷量 のキャリブレーションの成功

<u>STSを磁場環境下で正常に動作させることに成功!</u>

STS (Silicon Tracking System)

- ✓ CBMの主力飛跡検出器, DSSD, ストリップピッチ: 58 µm, セルフトリガーASIC.
- ✓ J-PARC E16実験の最内層飛跡検出器として実装完了, 大強度陽子ビーム, 磁場環境下で運用を試験.

■ <u>電子ビームを用いたテスト実験 @KEK PF-ARビームライン (2023年11月)</u>

- ✓ timestampを用いたイベント選択が機能し、DAQシステムの成功を実証.
- ✓ 時間分解能 ~5 nsec, 検出効率 約98.5% (0度, 16度)を得られ, CBM, E16 実験の要請を満たすことを確認.

■ E16 検出器動作試験運転 (2024年5月)

- ✓ 磁場なし環境下での、外側trackerのみで再構成したトラックに対しての residualの妥当性を確認. 検出効率はresidual < 4 σ で約 94%.
- ✓ 磁場環境下でのエネルギー損失vs運動量プロット.

→ <mark>STSが磁場環境下で正常に動作</mark>

Backup

E16実験でのSTS読み出し回路



PF-AR

PF-AR テストビームライン

- ✓ PF-ARは周回周期1.257µsのシングルバンチ電子ビーム蓄積リング。
- ✓ 運動量6.5GeV/c, 5GeV/c で、50mA程度の強度で運転。
- ✓ 蓄積リングに、ビームハローを削るようにワイヤ標的を入れフォトンを生成させ、そのフォトンを銅製のコンバータに入射させることで電子陽電子対を生成。
 ✓ 双極電磁石と四重極電磁石からなるビーム取り出し電磁石群により、電子ビームを測定器試験エリアに取り出す。



Figure 5.2: Overall layout of the PF-AR detector test beamline and perspective views of the wire target and the copper converter [46].

PF-AR テストビームライン



Timestampについて





フロントエンドASIC SMXについて

SMX : STS/MUCH-XYTER

✓ CBM開発のセルフトリガーで動作する
 連続読み出し用のASIC

Parameter	Value			
チャンネル数	128+2(test channel)			
ADC bit	5 bit			
TDC bit	14 bit			





K.Kasinski, et al. SMX2.0, SMX2.1, SMX2.2, Manual v4.00. 2021.







ch毎のTDC記録閾値バラバラ問題



閾値調整アルゴリズムを見直し, 閾値のストリップ チャンネル依存を減らすことに成功。 <mark>閾値調整メソッドを確立, 実装</mark>

電源制御GUI作成



Figure 4.14: Created power operation GUI (Block for a Sensor). In the actual experiment, this block will be replicated 10 times, and additional blocks for GBT and repeater will be included on the same screen for centralized management. These displays are updated in real-time every second.

LVDSリピーターの改造



Run-0e

Residual 144 umの妥当性





STSの想定位置分解能 16.7 umで算出 1

FAIR CBM



Figure 1.2: The rapidity distribution of net proton production from head-on heavy-ion collisions. The three data sets represent collisions at different accelerators: Au+Au collisions at the AGS ($\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ GeV}$), Pb+Pb collisions at the SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 17 \text{ GeV}$), and Au+Au collisions at RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$). For each data set, events with 0-5% centrality were selected [10].



Figure 1.3: Differences in Collisions Depending on $\sqrt{s_{NN}}$ [11].



- ✓ 赤は衝突型実験、黒は固定標的型実験
- ✓ CBMの相互作用レートは 桁違いに高いことがわかる



Figure 1.6: The phase trajectories $(\rho(t), \varepsilon(t))$ at the center of a head-on Au+Au collision for various bombarding energies are shown as obtained using the indicated models, along with the schematic phase boundary. The yellow region represents the coexistence region, while areas below the black line $(\varepsilon(\rho, T = 0))$ are considered inaccessible. The symbols on the URQMD and QGSM curves are separated by the time intervals indicated in parentheses (fm/c) [20].

- ✓ 核子飽和密度0.17fm⁻³の8倍ほどに到達可能
- ✓ 黄色の領域は共存領域。相転移が起こりそうな範囲。



Figure 1.5: Layout of the Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) [17].

Synchrotron	Heavy-ion (Au) beam		Light nuclei beam		Proton beam	
	E _{beam}	$\sqrt{s_{NN}}$	$\mathrm{E}_{\mathrm{beam}}$	$\sqrt{s_{NN}}$	$\mathrm{E}_{\mathrm{beam}}$	$\sqrt{s_{NN}}$
SIS100	11 AGeV	$4.7{ m GeV}$	0.5 - $14\mathrm{AGeV}$	$1.6-5.4\mathrm{AGeV}$	$29{ m GeV}$	$7.5{ m GeV}$
SIS300	$35\mathrm{AGeV}$	$8.2{ m GeV}$	0.5 - $45\mathrm{AGeV}$	$1.6-9.7\mathrm{AGeV}$	$90{ m GeV}$	$13.1{ m GeV}$
J-PARC E16



1. Intro : E16 experiment (@J-PARC)



- 1. **5x** the acceptance of the E325
- 2. **2x** as many ϕ mesons as in the E325 with **30 GeV/***c* proton beam
- **10x** intensity beam (1 x 1010 proton/spill (2 sec))

Aim for 100x statistics!

1. Intro : E16 experiment (@J-PARC)

E16 Detector Requirements

High rate capability

- Large amount of φ generated by high intensity beam
- Large amount of background

Good mass resolution

- Predicted change : 20-40 MeV/ c^2
- Target mass resolution: **5** MeV/ c^2

Good PID capability



Simulation includes random hit BG. GR2

Case 2: GTR + SSD

• Full beam can be accepted.

• (1 x 10¹⁰ / spill.)

True hit

fake hit

GTR 1

True hit

True hit

True track

- Case 1: GTR only
 - 10¹⁰ /spill was turned out to be too high.
 - "1 / 3 beam"
 - (0.33 x 10¹⁰ / spill.)



Tails on both sides are due to BG hits very close to the true hit. case 1: Even with this configuration, we can do physics. case 2: Tails greatly reduced. Better resolution. (We favor this¹)

1. J-PARC E16 STS Overview



STS モジュール ID	109	108	$\begin{array}{c} 107\\207\end{array}$	$\begin{array}{c} 106\\ 206 \end{array}$	104	103	102	101	total (10 modules)
rate(M hits/sec/FEB-8)	27	27	64	86	64	43	21	21	503
rate(M hits/sec/2FEB-8)	54	54	128	172	128	86	42	42	1,006
1 台の GBTxEMU で 処理する uplink 数	16	16	16	32	16	16	16	16	192

STS



D-SSD

Figure 2.3: Structure of DSSD (left) and explanation of stereo angle (right).

概要



役割

- ビームとターゲットの相互作用から**荷電粒子の軌** 道再構成と運動量決定を行う。
- ▶ 仰角 2.5°< θ < 25°をカバーする8層のセンサー (station)で構成
- > ターゲットの下流 30cm-1mの範囲に設置





Figure 2.12: Conceptional layout of the tracking stations and their building blocks [18].





(a) Concept of STS tracking stations covering the polar angles 2.5 deg. < Θ < 25 deg.

(b) Eight tracking stations for the STS detector

2. STS Overview : ASIC SMXについて

SMX : STS/MUCH-XYTER

✓ CBM開発のセルフトリガーで動作する
 連続読み出し用のASIC

Parameter	Value
チャンネル数	128+2(test channel)
ADC bit	5 bit
TDC bit	14 bit





K.Kasinski, et al. SMX2.0, SMX2.1, SMX2.2, Manual v4.00. 2021.





Figure C.2: Block diagram of the SMXv2 flash ADC [19].

$$V_i = V_{\text{ref P}} + \left(\frac{V_{\text{ref P}} - V_{\text{ref N}}}{31}\right) \times d_i$$



$$V_{\text{fast}} = V_{\text{Thr2_glb}} + \underbrace{\Delta v}_{\text{trim correction}}$$



Figure 4.12: Illustration of time axes and event timing in the STS readout system.



Intro:高バリオン数密度領域の探索



*K. Fukushima and T. Hatsuda, Rept. Prog. Phys. 74 (2011) 014001

PF-AR

4. Current status : My Study Plan

Data taking in two years

- 2023.6 E16 commissioning Run (Run 0d) Done
- 2023.11 Beam test at PF-AR test beam line Done
- 2024.3- E16 commissioning Run (Run 0e)
- 2024.? Participation in miniCBM

What I have done

- 1. STS installation at Run Od
 - STS Chamber Installation
 - LV/HV power supply cable Installation
 - Signal lines and device(Repeaters, GBTs etc.) installation
- 2. Development of power management system
 - Power supply manager GUI
 - monitoring system using Prometheus/Grafana
- 3. Found difference with manual for data frames from FEB
 - Bit misalignment of timestamp of hit frame
- 4. Beam test at PF-AR test beam line

Sensor	Name	Power	LV outV [V]	SW mode	Vmeas [V]	Imeas [A]	
	P 2.5V	OFF	0.00 Fix	none	0.00	0.00	
	P 2.3V	OFF	0.00 Fix	none	0.00	0.00	
	N 2.5V	OFF	2.50 Fix	ON	0.00	0.00	
prot	N 2.3V	OFF	2.30 Fix	ON	0.00	0.00	
	HV outV [V]	Ramp	RampStop	N/P	Vmeas [V]	Imeas [uA]	
	0.00 Eiv	Up	Stop	N(+)	-1.07	0.0	
	0.00 FIX	Down	(Reset)	P(-)	-1.08	0.0	



3. Beam test (@PF-AR test beam line)

✓ Test experiment at KEK's PF-AR test beamline on 2023.Nov.17-21

PF-AR test beamline

- ✓ Test beamline for instrumentation testing constructed at PF-AR (At Photon Factory -Advanced Ring) at KEK's Tsukuba Campus
- ✓ A wire target is placed in this storage ring to produce photons, which are injected into a copper converter to produce electron-positron pairs, and electron beams up to 4 *GeV/c* are extracted to the test beam area.



2. Beam test in November 2023 (@KEK PF-AR)

- ✓ Test experiment at KEK's PF-AR test beamline on 2023.Nov.17-21
- Purpose
 - ✓ Streaming DAQ test with beam & sensor performance evaluation





- STS chamber + 4scintillators
- Beam Momentum : 3.0 *GeV/c*
- Coincidence rate: average 30 Hz
- Active area of 1 cm square limited by scintillators (S1 & S2)

4. 実験結果: Hit profileと時間分解能

Hit profile

- <u>Green</u> : w/o selections.
- <u>Red</u>: シンチ信号の*geriTimestamp*の 前後20tick (±0.5µs)のセンサhit.

■ 時間分解能

- *SMX TDC* を用いて解析
- ・時間分解能: 4.8 nsec (0deg108N)
 → E16実験の要請を満たす



2. Beam test in November 2023 (@KEK PF-AR)

■<u>Hit profile</u>

 Coincidence hit of scinti. signal and hit of sensors

Sensor hit 20 ticks ($\pm\,0.5\,\mu s)$ before and after the geriTimestamp of the scinti. signal





4. 実験結果: 検出効率



8/11



ch毎にTDC記録閾値バラバラ問題

■ <u>閾値調整アルゴリズムの改善</u>



4. 実験結果:検出効率 simulationによる考察 10/11

■ <u>ラフな検出効率シミュレーション</u>

- Heed (Garfield)
 - ✓ センサを右図のように設定
 - 入射電子のエネルギーは通過した ストリップに落とす
 - 拡散なし





- ✓ シミュレーションによれば、16degに おいて、検出効率は実験値より若干低い
- ✓ ADC/TDCの閾値は1.2fC未満が高検出 効率のため、望ましい (E16での入射角最大値は30deg程度)

→ ノイズレベルは~800e⁻=0.13fCであり、 このような低閾値設定は達成可能

Run-0e

3. Run-Oe (E16 Commissioning run in 2024.5) 5/10

■ <u>Residualと検出効率の解析</u>

- ✓ GTR3層のみを使って再構成したtrackを用いて解析
- ✓ 1x10⁹ pps, 磁場なしデータセットを使用
- Residual
- ✓ 最前方の106 N(X) onlyでの解析
- ▶ Sensor上の座標(Local x)依存





3. Run-Oe (E16 Commissioning run in 2024.5) 6/10

Residual

▶ Sensor上の座標(Local x)依存

cf. GTR1層の位置分解能 ~150 μm

- ✓ Ix依存のresidual分布を, local_x 5 mmごとにスライスしガウス分布でフィット
- ✓ STS local_x -20 mm~+20 mmで表示



- ✓ Local_x > -5 mm で 200 µmのresidual
 → GTRの位置分解能を考慮するとfineな結果
- ✓ <u>低Local x (端から20 mm程)でresidualの幅が広がる</u>

→ STSの -30 mm ~ -7 mmは, GTRの隣のmoduleの枠との重なりがあり、 多重散乱の影響を受ける

3. Run-Oe (E16 Commissioning run in 2024.5) 7/10

"検出効率"



※ サンプル数: 47977

3. Run-Oe (E16 Commissioning run in 2024.5) 8/10



3. Run Oe in May 2024

Increase of Leak Current



Increase of Leakage current.

- DESY-THESIS measurements are after annealing. The annealing could reduce the current to half.
- Sensor volume V=6.2*6.2*320e-4 = 1.23cm3.
- 10uA which corresponds to 8e-6 A/cm3
- Fluence = 5.7e8/cm2 for Run0e.
- Fluence cannot explain the leakage current increase.



Figure 5.1: Fluence dependence of leakage current for silicon detectors produced by various process technologies from different silicon materials. The current was measured after a heat treatment for 80 min at 60°C { $\alpha(80 \min, 60°C) = (3.99 \pm 0.03) \times 10^{-17}$ A/cm; for details see Fig. 5.6}.



High-p area dosimeter locations irradiated May24 night-25 morning



- Where should we look?
 - Maybe sensor dose is between 9 and 11.
- Batch 9:
 - Upstream of sensors.
 - 1.5m below beam axis.

• Batch 11:

- Downstream of sensors.
- 0.3m below beam axis. (closer to the beam pipe)
- Close to the beam dump. Suffer from back scattering by the beam dump, overestimate the dose when used as an estimator of sensor irradiation.

	Results		T				
バッチ番号	場所	Beam Intensity ビーム強度	時間	Accumulated # of beam protons 陽子数 (IonChmaber積算)	γ線	Thermal neutron 熱中性子	fast neutron 高速中性子
			h	Protons	mSv	mSv	mSv
9	q2F下流(ビーム軸、床から1m上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	1.5	0.3	2.8
10	下流通路の壁面(ビームから1.5m南、 ビーム高さ)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	4.7	0.4	7.2
11	ビームダンプ下(ビーム軸、ビームから 0.3m下)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	32.1	1.2	17.8
12	ビームダンプ下(ビーム軸、床から1m 上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	2.7	0.2	2.9
13	チラーの後ろ(ビームから4.3m南、床か ら1m上、Zはv2C中心付近)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	0.9	0.2	2.1
14	SKSの後ろ(ビームから6.9m南、床から 1m上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	0.1	下限未満	0.5
15	脱出口の柱(ビームから4.9m南、床から 1.4m上、Zはq2e中心から0.8m下流付近)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	0.5	0.1	2.2
16	v2C下流下(ビーム軸、床から1m上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	3.8	0.5	12.0
17	v2C上流下(ビーム軸、床から1m上) * 2回目(8と同じ)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	1.5	0.2	5.3
18	q2e上流下(ビーム軸、床から1m上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	0.3	0.2	2.9
19	h2B上流下(ビーム軸、床から1m上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	0.2	0.1	1.1
20	RGIPM中心下(ビーム軸、床から1m上)	1E+10,5E+9	11.1	8.03 E +13	0.2	下限未満	1.0

- The number of accumulated beam protons is equivalent to 9.3 hours of operation at maximum intensity.
- Thermal neutron: • 0.025eV - 0.5eV
- Fast neutron:
 - 24 keV 15 MeV.

25

Radioisotope Pocket data book

Conversion factor from fluence to dose??

- Need conversion
 - E16 dose measurements in Sv.
 - CBM estimation expressed in 1 MeV-eq neutron fluence.
- Conversion-1 (Energy averaged with some weights(?))
 - Radiation Measurements 178, 107280 (2024)
 - https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448724002282
 - <u>/cm2/s ~ uSv/h</u>
 - /cm2 = 277 pSv
 - I am not sure this conversion is valid in the situation of interest.
- Conversion-2 (energy dependent)
 - Radioisotope packet data book 11th ed by JRIA
 - $/cm2 \sim 5pSv 500 pSv$. (Neutron energy 10⁻⁹ MeV to 100 MeV.)
- These two conversions are quite similar.
 - I use /cm2/s ~ uSv/h because this is convenient.

