

25pV2-1

SuperKEKBビームロスモニター開発 のためのテストビームラインを用いた EMTの検出効率の評価

前田 朱音, 吉原圭亮^A, 古賀太一郎^B, 石川明正^B, 楠戸愛美^C,
Michele Aversano, Alexander Gale^D, Yuxin Liu^E, 津村周作^F

名大理, 名大 KMIA^A, KEK素核研^B, 奈良女^C,
Cincinnati University^D, 総研大^E, 九大理^F

研究の背景

KEK (つくば市) で行われている Belle II 実験

非対称電子陽電子型衝突加速器

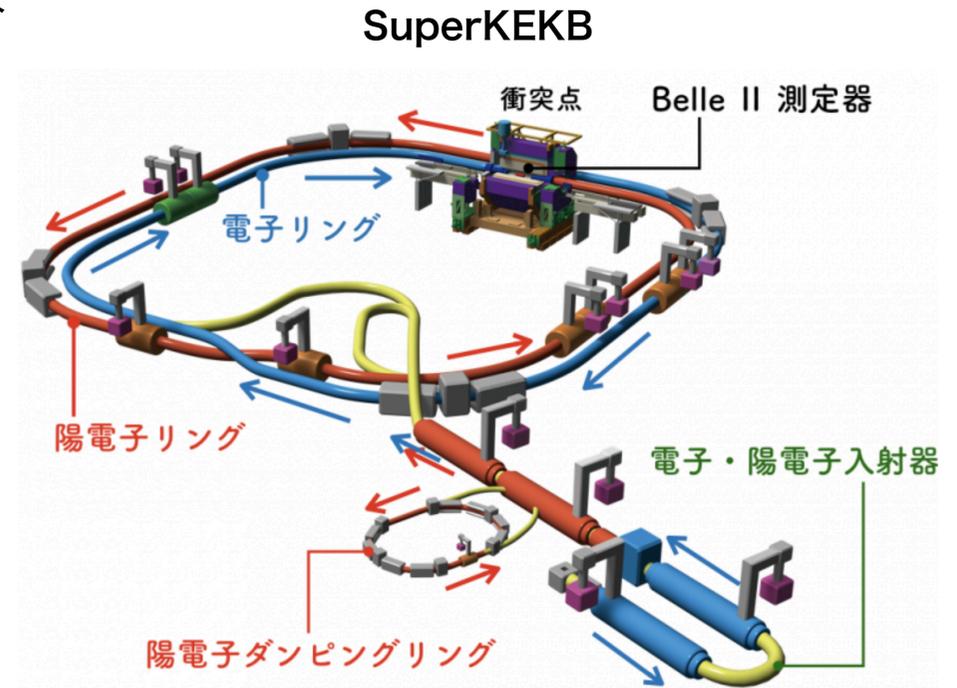
- 電子リング (HER, 7 GeV)
- 陽電子リング (LER, 4 GeV)

ルミノシティ $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目標に
ビーム電流を増強しながら運転

原因不明のビーム不安定性が生じ、
大きなビームロスが観測

▶ ビームアポートやバックグラウンドの増加、加速器の損傷を引き起こし、
実験データの取得効率の低下を招く

既存のシステムに加えロスモニターを含めた総合解析を行うことで
ビームロスの原因の究明を解明し、今後のルミノシティの向上に寄与する



ビームロスモニター

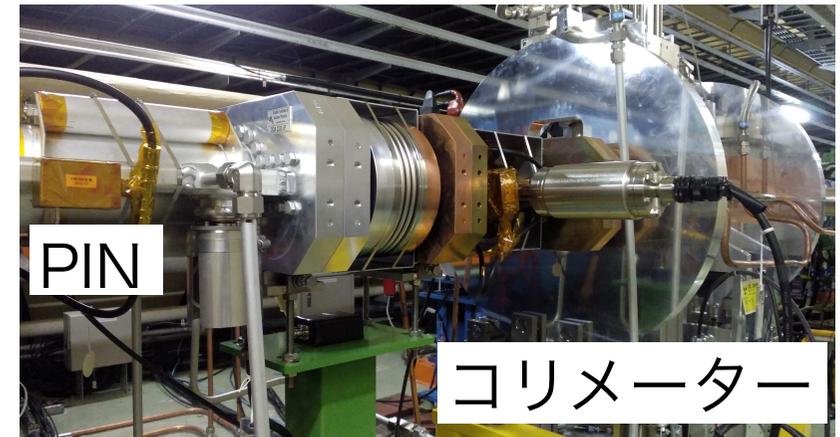
主なビームロスの観測手法

-PINフォトダイオード(PIN)

ほとんどのコリメーター付近設置され、
ビームロスの発生場所を検知する

PINで見えている信号とロス量の
関係性は不明

コリメーター付近の様子



-Bunch current monitor (BCM)

各バンチごとの電流を1周回ごとに測定する

バンチ：ビームは加速器内をいくつかの塊が数珠繋ぎに周回している。この塊をバンチと呼ぶ。

加速器のどこでどれだけのロスが起きているかの詳細は不明



時間測定精度が1周回以内で放射線耐性の高い新しい
検出システムが必要

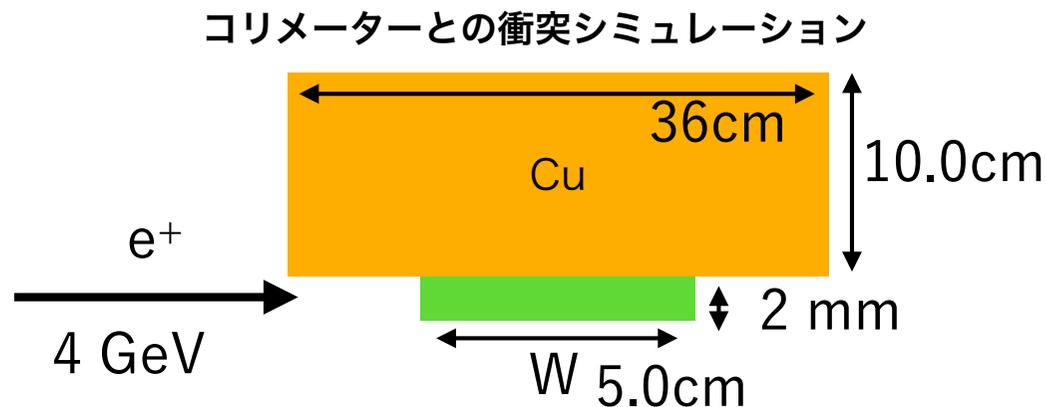
検出器への要求

放射線耐性

EMTを設置するコリメータ付近の放射線量は
年間 約520Gy の見込み(インライトバッジによる測定から)

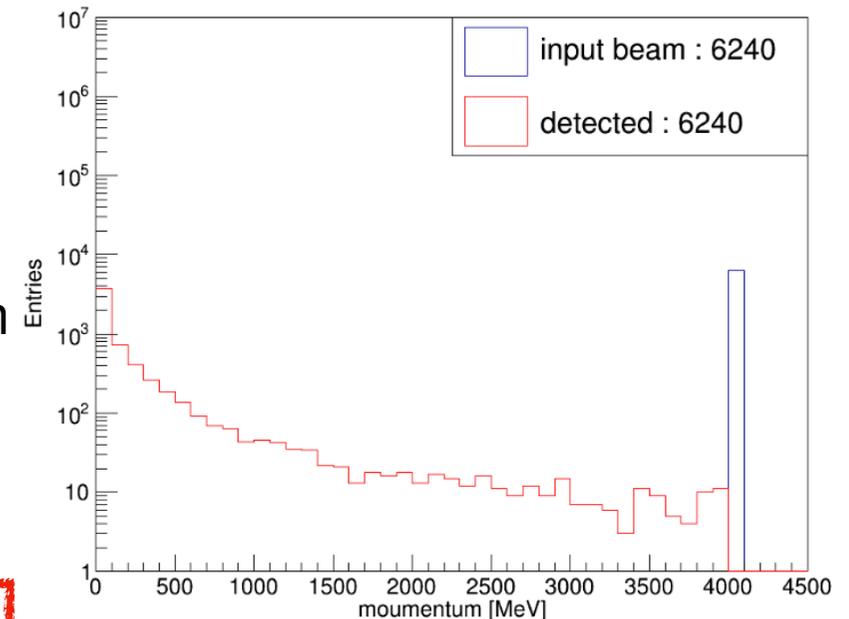
エネルギー帯

コリメーターとの衝突を考える



数百MeVから数GeVの電子を測定できる
検出器が必要

生成された二次電子のエネルギー分布



* ビーム中心から2 mm四方は除く

Electron Multiplier Tube

Electron Multiplier Tube (EMT)

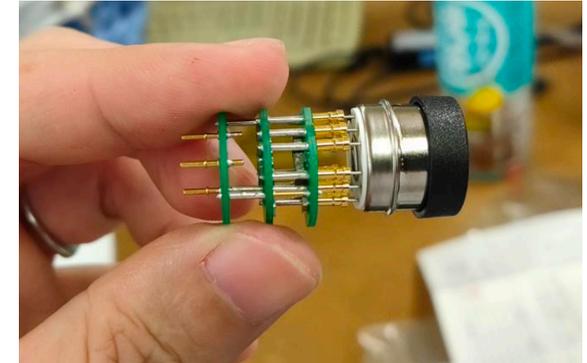
浜松ホトニクス社の光電子増倍管 (R9880U-110) の
光電面をアルミニウム膜に置き換えた構造

(Yosuke Ashida, et. arXiv:1805.07712. 2018)

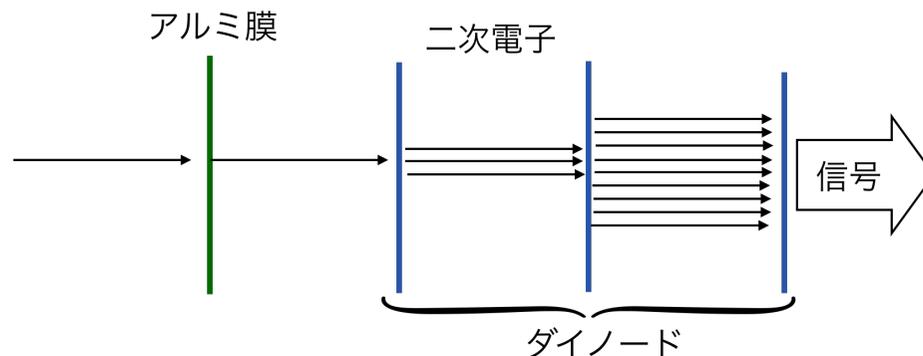
T2Kのビームモニターのために開発された

アルミ膜とダイノードによる二次電子増幅

EMT



検出原理



EMTの特性

ゲイン	2.0×10^6
時間分解能	0.2 ns
ダイノード数	10
有感面積	0.50 cm ²

*PMT状態で-1000 V印加

約2000kGyの放射線照射でも出力信号の低下は5%以下

(修士論文. 本條貴司. 京都大学. 2020)

検討課題と研究内容

目的

ロスに対するEMTの応答性を評価し、EMTの測定からロスを推定する

必要な情報

- ロスによる二次粒子の生成量 \longrightarrow シミュレーションによる推計
- EMTのアクセプタンス
- 検出効率 \longrightarrow 測定により決定

数百MeVの電子を仮定してAIの二次電子放出効率から計算すると
検出効率は 0.6 %

エネルギーの高い電子を多数照射する必要がある

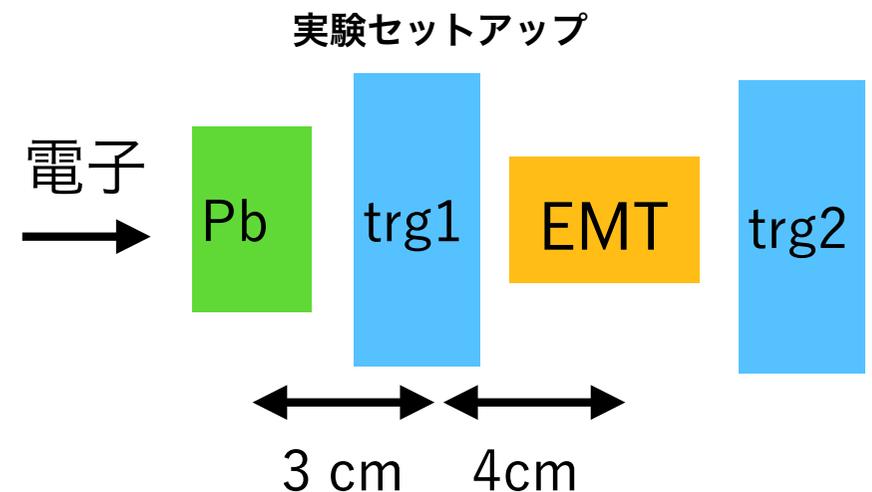
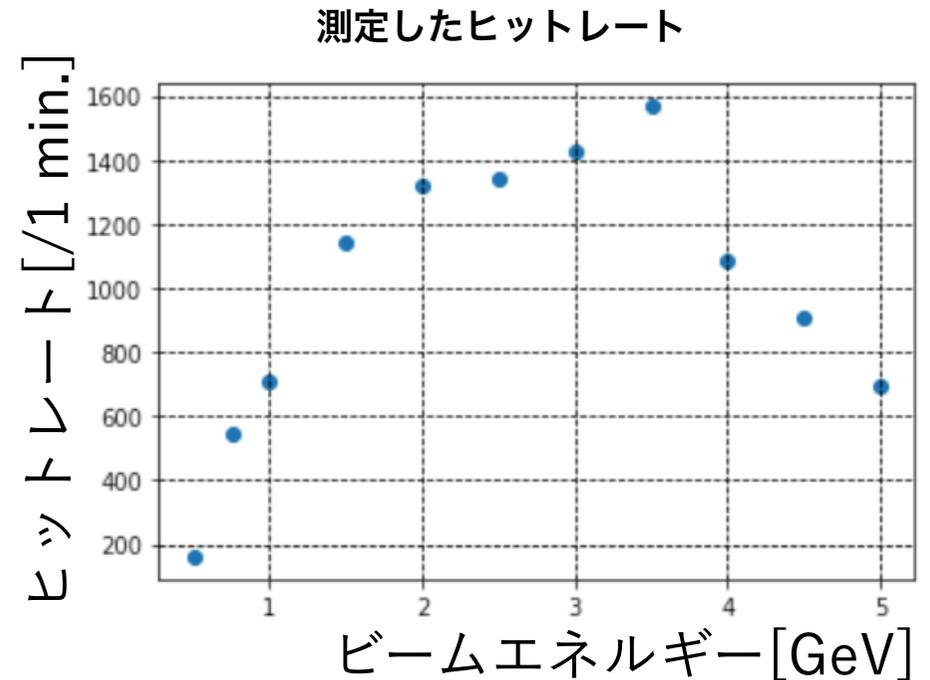
実験セットアップ

実験はKEKのPhoton Factory Advanced Ring テストビームライン(ARTB)を用いた

- 放射光実験施設(PF)の電子加速器の1つに作られたテストビームライン
- 最大6 GeV程度の電子ビームを生成
- 横10 cm、縦3 cm程度のビームサイズ

実験セットアップ

- ビーム取り出し口から3 m下流に設置
- 上流に鉛(1.5 cm厚)を設置し、散乱を再現
- トリガー(trg)として CsI + PMT を使用
- 3.5 GeVの電子ビームを使用
- EMTには-1000Vを印加

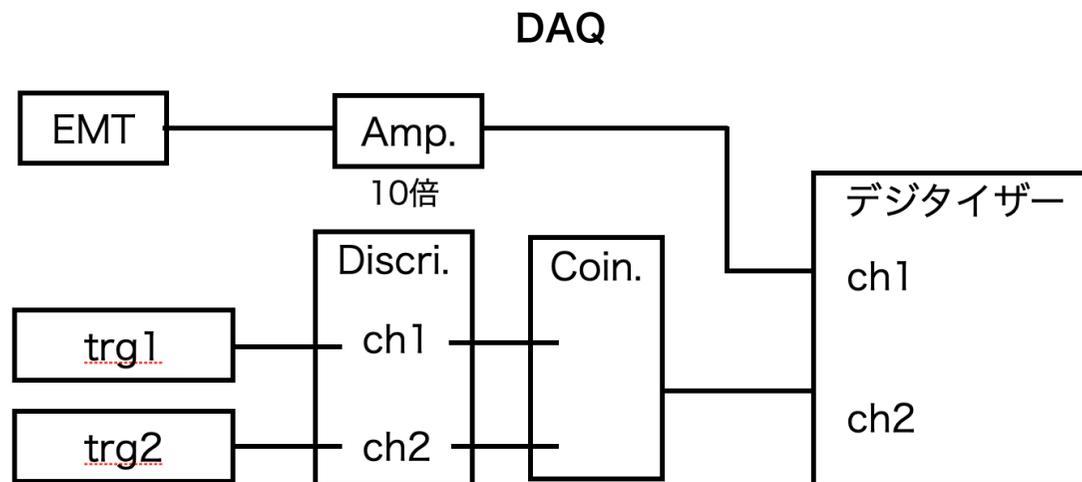


データ取得と解析

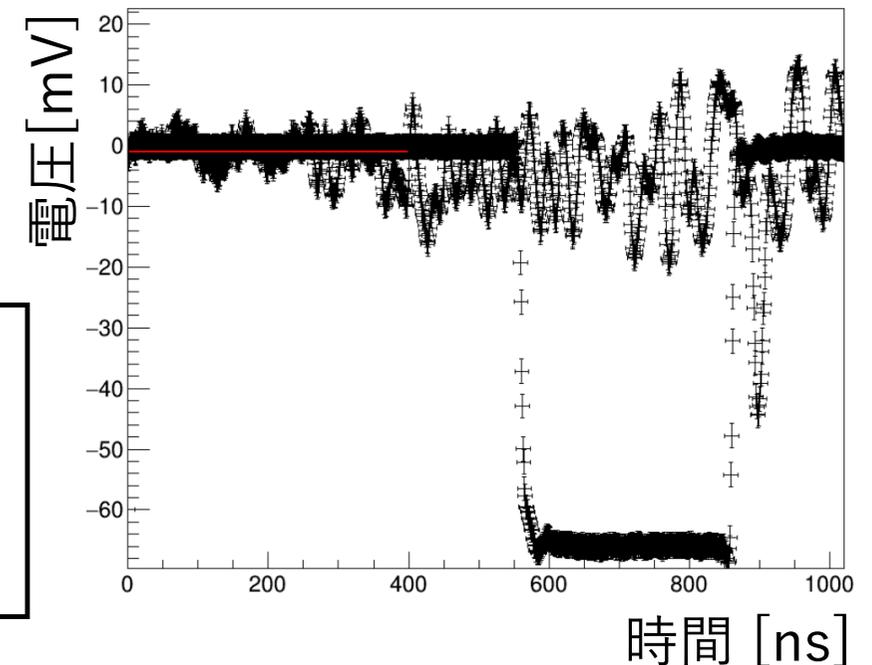
- 2つのトリガーシンチレーターのコインシデンスがトリガー
- デジタイザーで30分間データを取得
- 波形解析により波高、時刻情報を取得



トリガータイミングから300 nsで-40 mV
以下の信号を計数



デジタイザーで取得したデータ



検出効率の導出

検出イベント数

1015

検出効率 =

trgが応答した電子数

47010

×

二次電子放出係数 × アクセプタンス

6.94

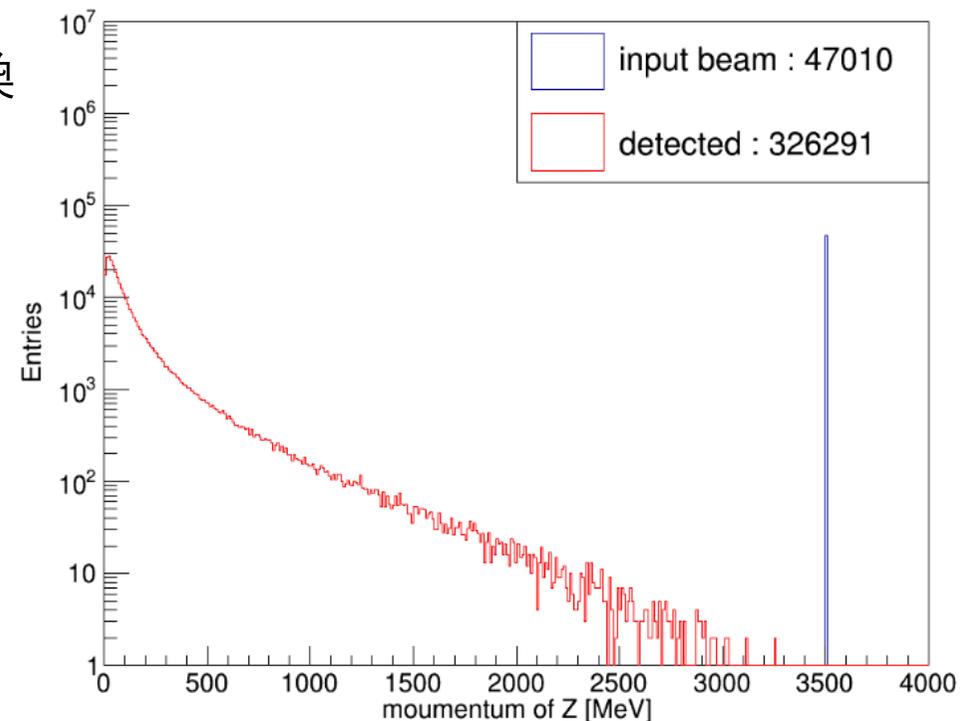
Geant4を用いて鉛のコンバーターで変換された後の電子をシミュレーション

3.5 GeVで30分間にtrgが応答した47010個の電子を入射



0.3 %程度の検出効率

散乱された後の電子の運動量分布

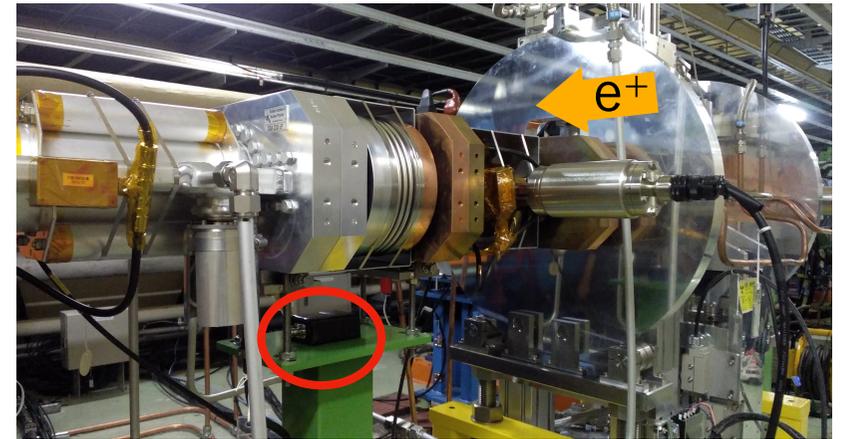


ビームロスの測定

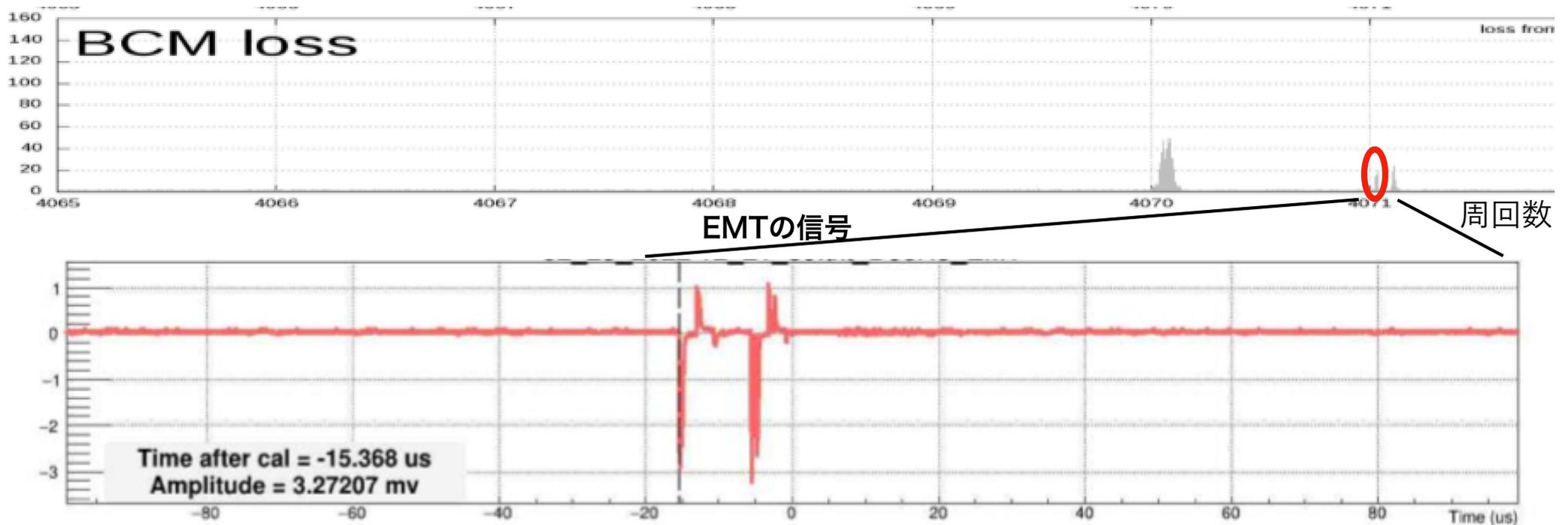
D6H3付近に設置したEMT

2022年の運転期間中に実際に加速器内に設置

- -650 V印加
- Picoscopeによる読み出し(~ 8 ns)



BCMが測定したロス



EMTが測定したロス

EMTの出力波高 3.2 mV

ゲイン補正により 1000 V 印加に換算

$$3.2 / (4 \times 10^4 / 2 \times 10^6 \times 10) = 1.6 \times 10^3 \text{ mV}$$

測定した検出効率を用いてEMTに到達した電子数を推定

$$(1.6 \times 10^3 / 40) / 0.003 = 1.3 \times 10^5 \text{ 個}$$

BCMで測定されたロス量 $O(10^7)$ 個がほぼ等倍で二次電子に変換された
とするとそのうちの1%程度がEMTに到達したと考えられる

コリメーター付近の構造は複雑な上、ビームの衝突角度など未知のパ
ラメーターが多くアクセプタンスの正確な見積もりは今後の課題

まとめ

Belle II 実験に用いられるSuperKEKB加速器では、ルミノシティ向上のため、大電流での運転を実施

原因不明の大きなビームロスが観測され、原因究明のためビームロスを測定するモニターに時間分解能、放射線耐性のあるEMTを追加

EMTの測定値からコリメーターのロス量を推計するためには検出効率や二次粒子の生成率が必要

実際のビームによる散乱を再現するためARBTを用いてEMTの検出効率を測定し、0.3%の効率を得た

今後の展望

ロスの種類ごとのアクセプタンスや二次粒子の正確な見積もり
放射線量の測定と耐性の確認