

SuperKEKB/Belle II実験の
突発的なビームロス事象の原因究明に向けた
音響センサーテストの解析結果

岡田 伊織

奈良女子大学大学院

人間文化総合科学研究科数物科学専攻

2024/12/04

FPWS 2024

Introduction: 突発的なビームロス事象

SuperKEKB/Belle II実験: $\sqrt{s} = 10.58$ GeVの電子陽電子衝突実験

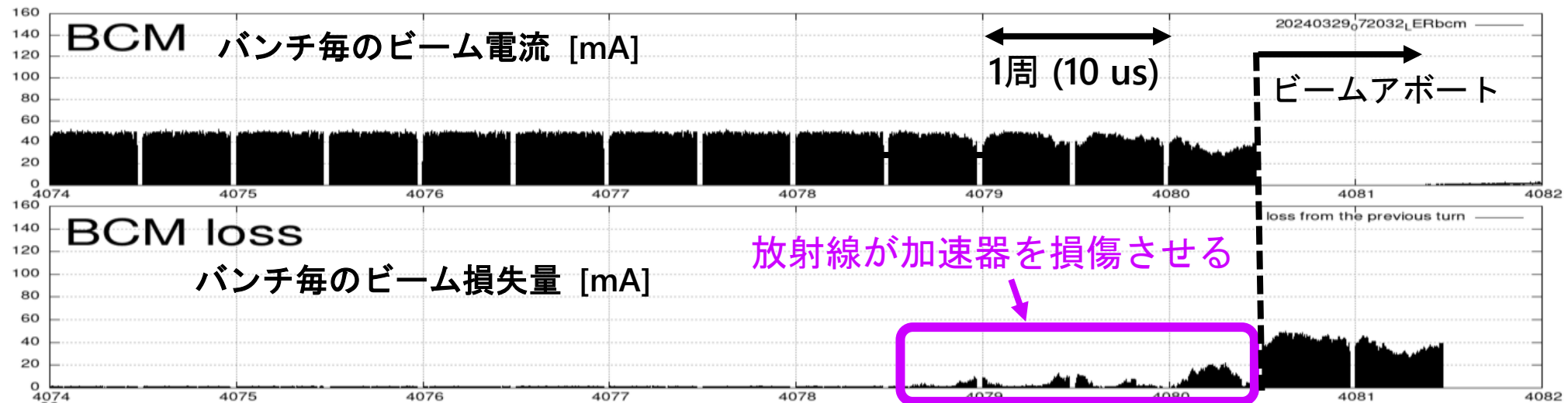
- 大統計データを用いた新物理探索 → ルミノシティの向上が重要

現在まで: $L_{\text{peak}} = 4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 525 fb^{-1} (目標値: $L_{\text{peak}} = 6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 50 ab^{-1})

高ルミノシティへの電流増強を阻む要因: 原因不明な突発ビームロス事象の発生

Sudden Beam Loss

- ビーム電流の数割が1, 2周で損失する現象

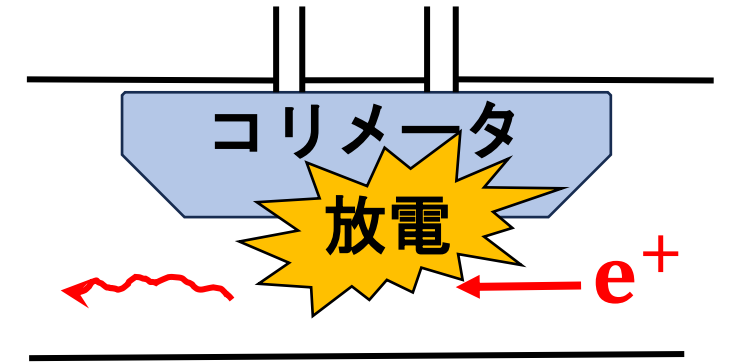


ルミノシティ向上のため、Sudden Beam Lossの原因究明は最重要課題

Sudden Beam Lossの原因を探る音響観測

Sudden Beam Lossの原因として考えられる候補

- ビームコリメータ付近で大真空放電
 - ビームコリメータ付近はビームの通路間隔が狭い
(アパーチャー)



リング内のコリメータで放電が発生しているか確認したい

本研究:音響センサーを用いて放電による音を観測

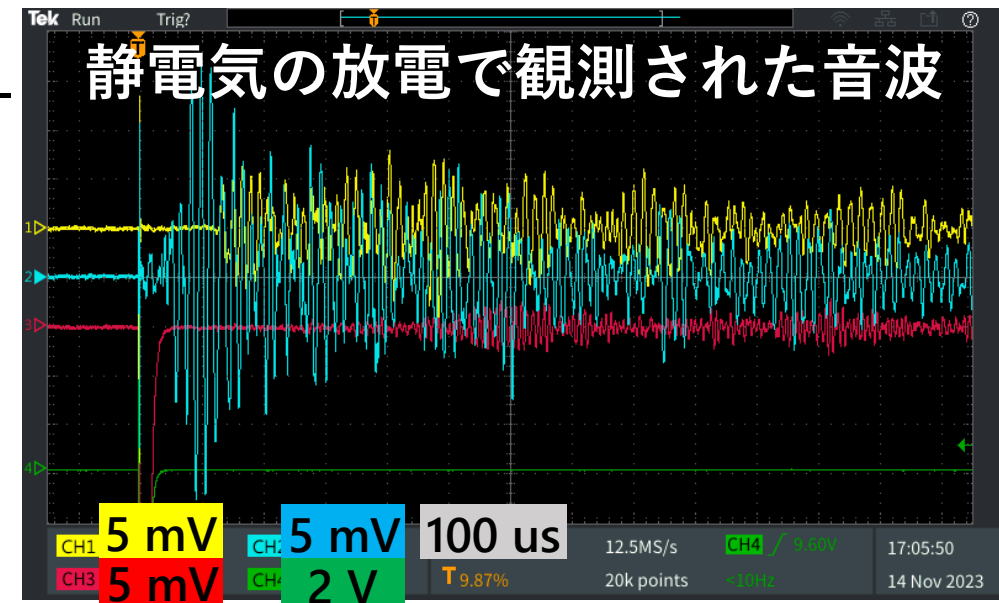
- 圧電体に力が加わると電流が生じることを利用したセンサー
 - 1 cm角の大きさ、共振型
 - 検知可能帯域: 数10-2000 kHz

音響センサーの信号

- 振幅は時間で変化し、周期的



カスタム品
マテックス建材株式会社製

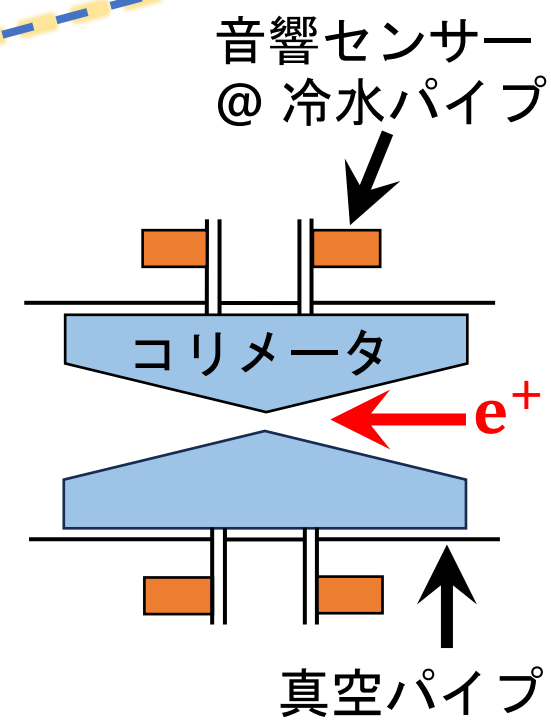
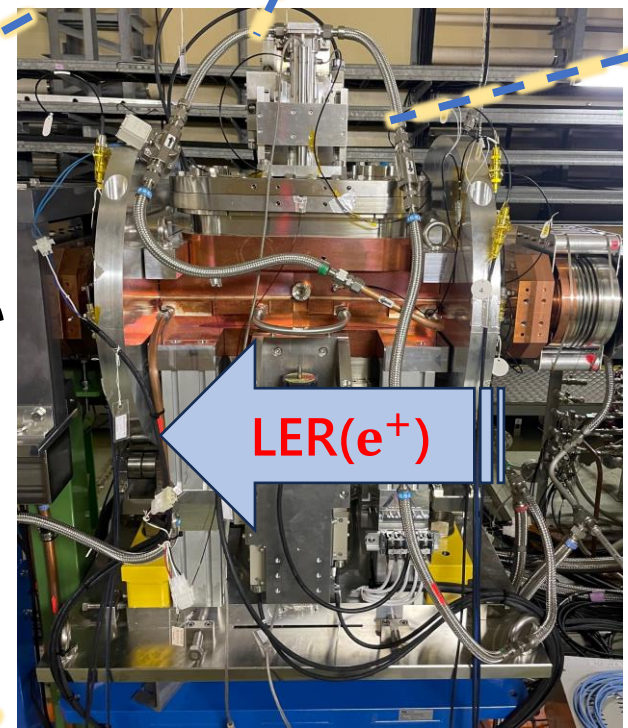
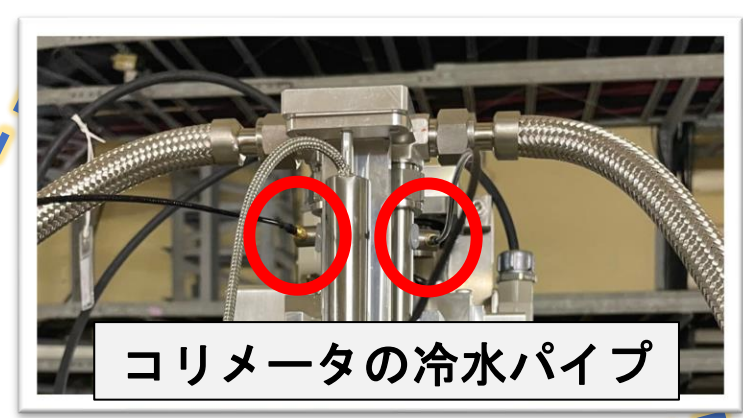
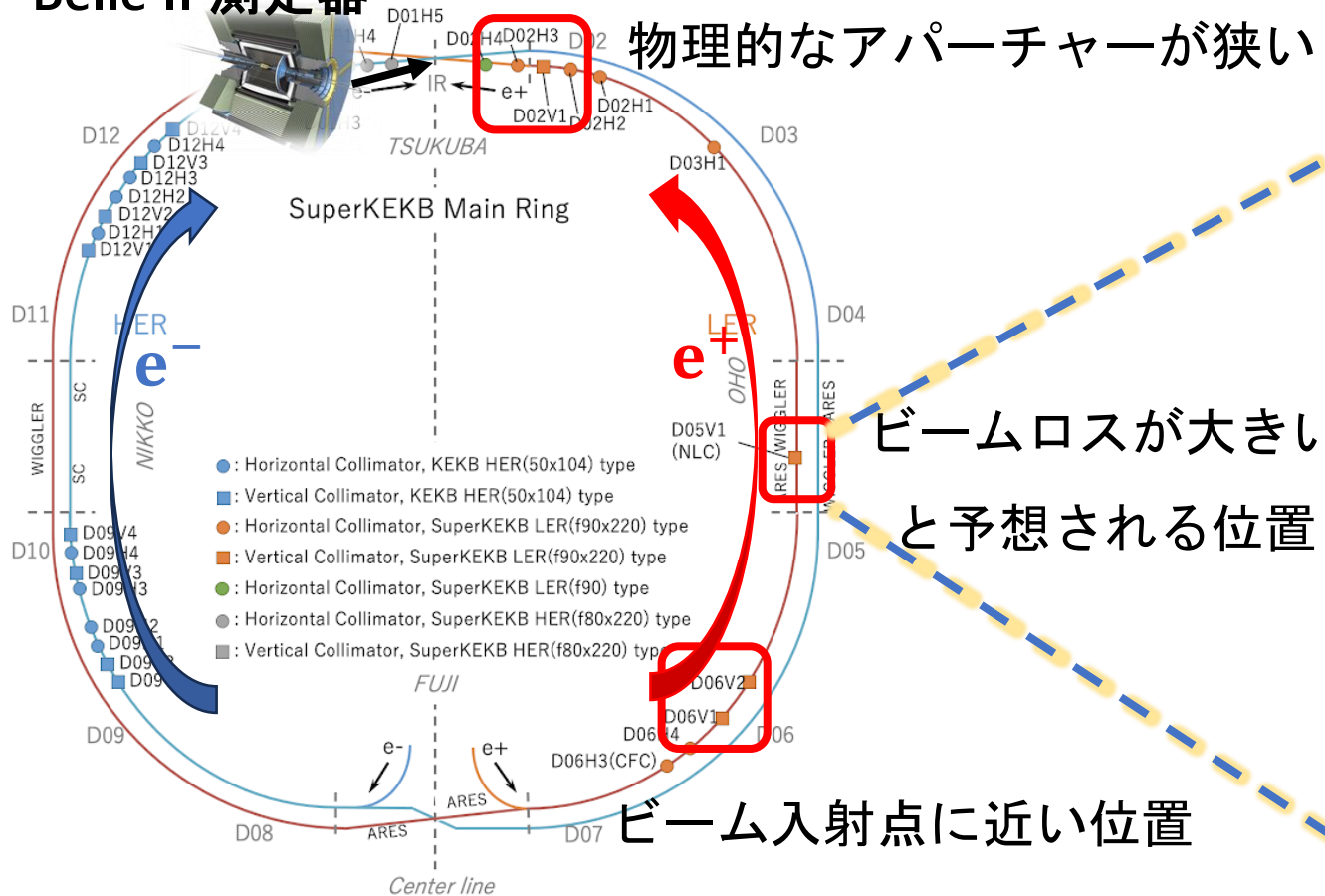


音響センサー設置位置

陽電子リング内のコリメータ4台に音響センサー計32個設置

- 冷水パイプに上下2個ずつ最大4個付けている

Belle II 測定器

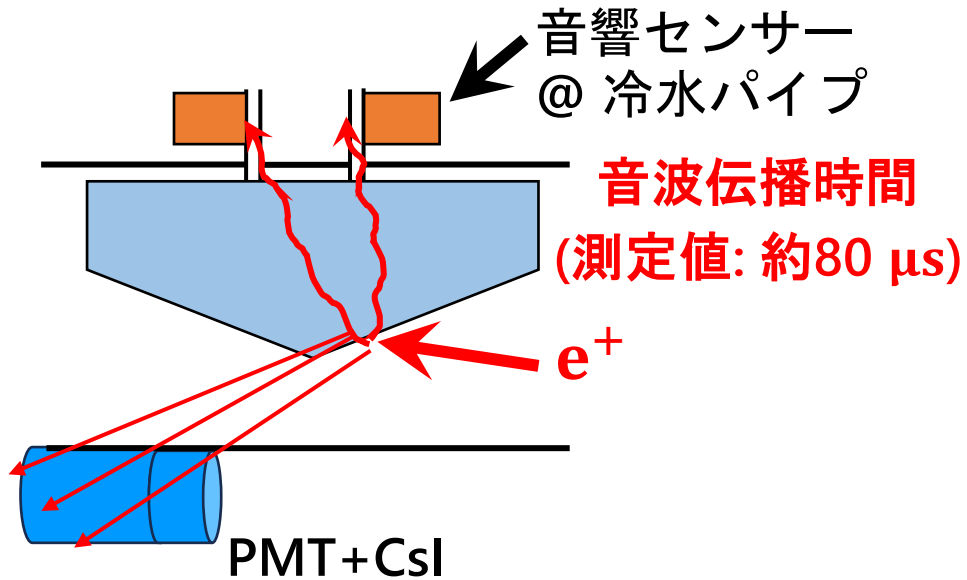


2024年1月から7月の運転で音響観測を行い、約150件のSudden Beam Loss事象のデータを取得

リング内での音波の観測

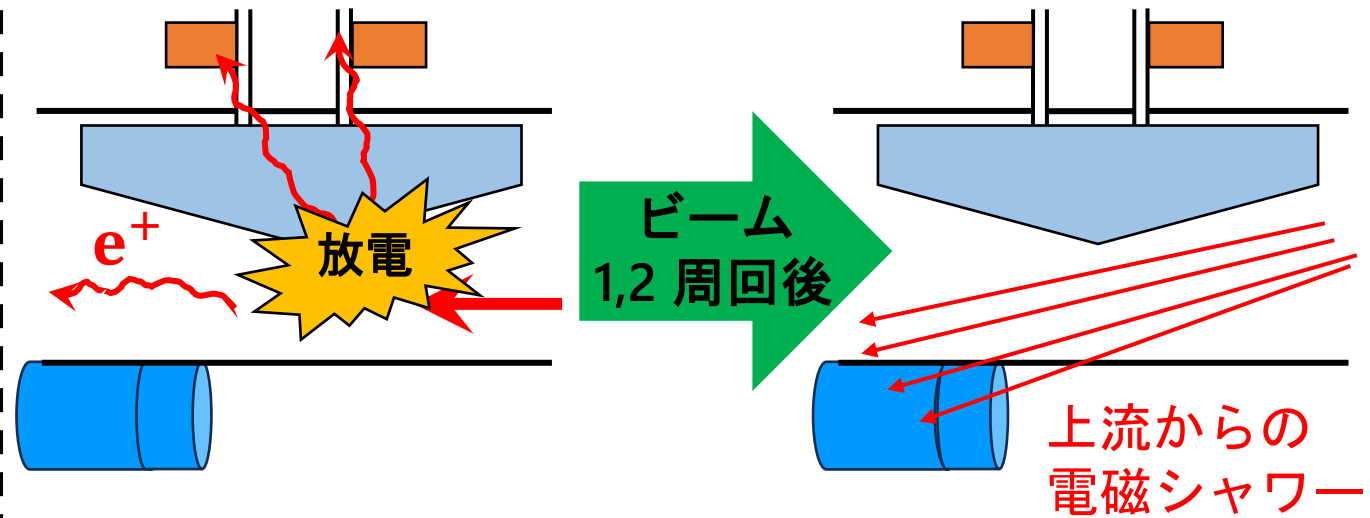
音響センサーで観測できる事象: ビームがコリメータに直接当たる事象 or 放電

① ビームがコリメータに直接当たる事象



音波が発生する時間と
PMTの信号観測時間は同じ

② 放電がコリメータで発生した事象



音波が発生する時間は
PMT信号観測よりリング1,2周分はやく

意図的にビームを当てた結果 → [Link: 2024春学会](#)

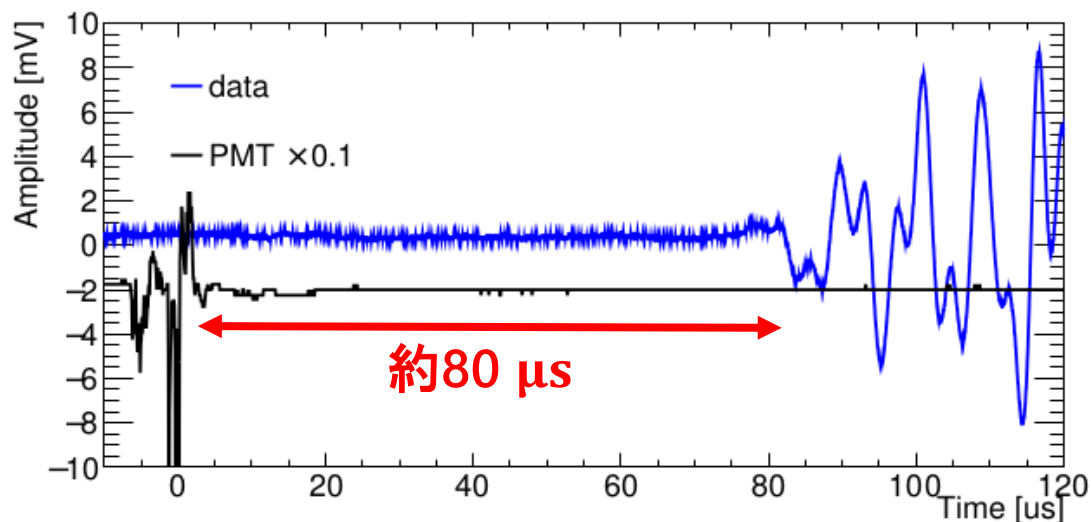
リング1周: 10 μ s

リング内での音波の観測

音響センサーで観測できる音波： ビームがコリメータに直接当たる事象 or 放電

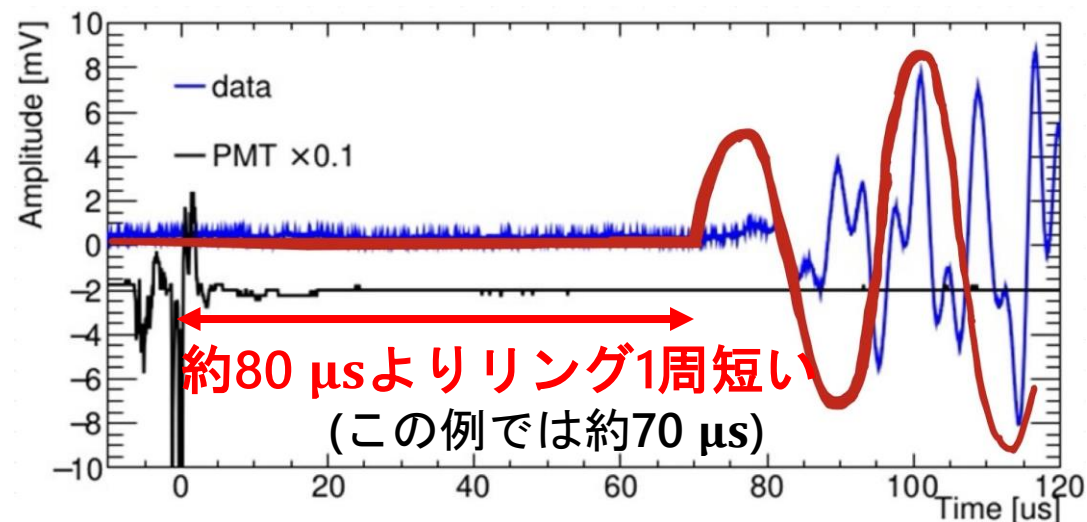
→ ビームロスを検出するPMT信号との時間差を利用して、放電事象を同定する！

① ビームがコリメータに直接当たる際の波形



PMTで信号が検知された時間を $t = 0$

② 放電がコリメータで発生した際に期待される波形



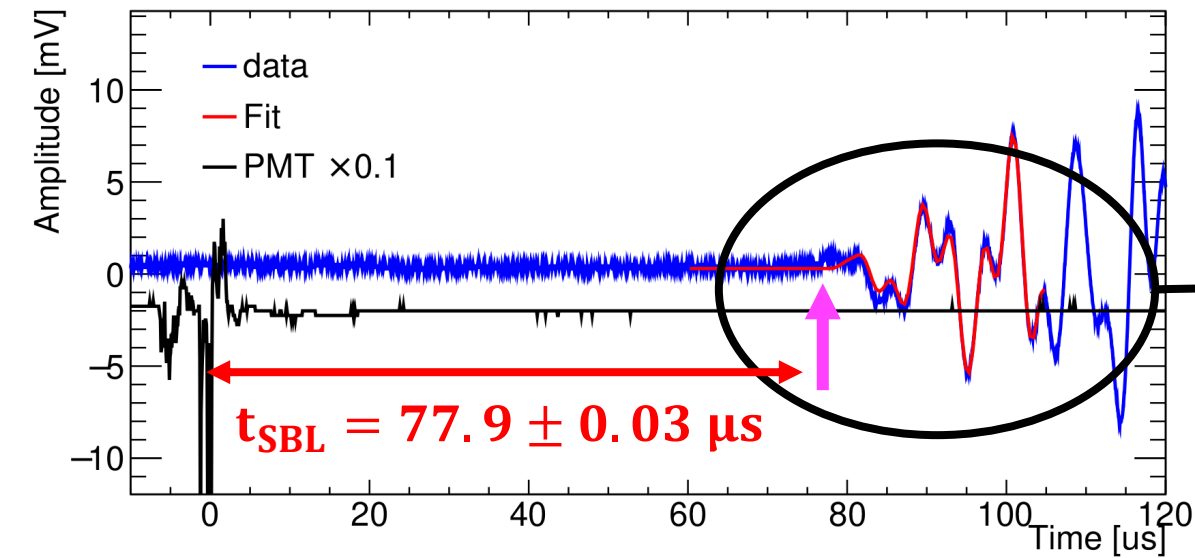
PMTで信号が検知された時間を $t = 0$

ビームが直接当たる場合より、放電事象の方が、10~20 μs 以上早く音波を観測できる
波形データから音波が伝播される時間を算出することが鍵

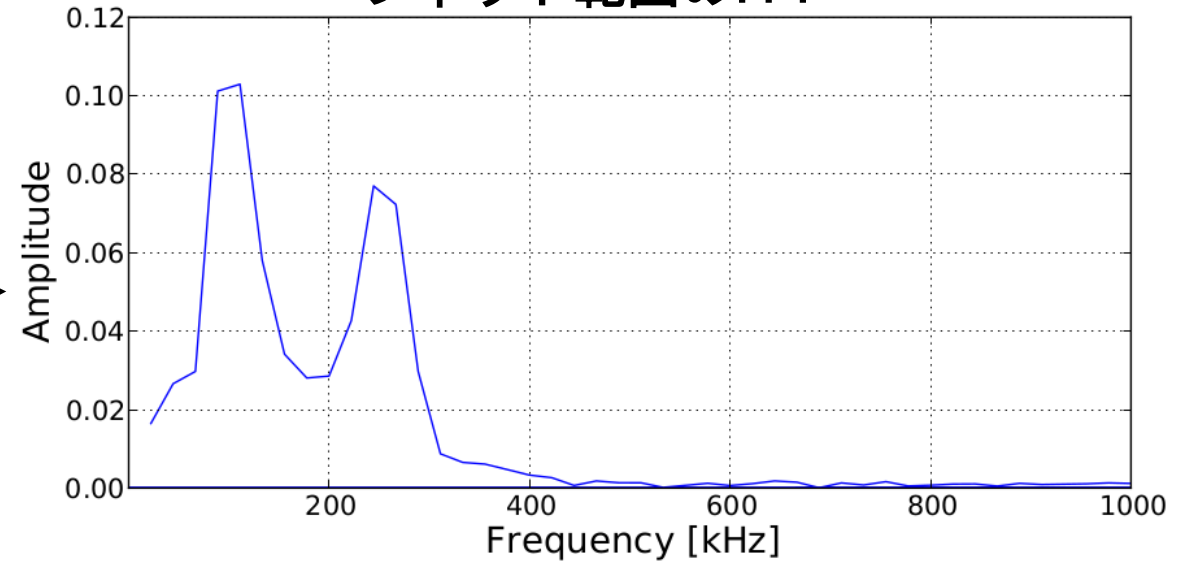
音波伝播時間の算出方法

2つの周波数を含む共振器モデルに基づく関数で音波の立ち上がり部分をフィット

2024/3/21のSBLによる音波



フィット範囲のFFT



$$f(t) = A_1 \left(1 - e^{-\frac{\omega_1}{2Q_L}(t-t_1)} \right) \sin(\omega_1(t-t_1)) U(t-t_1) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{\omega_2}{2Q_L}(t-t_2)} \right) \sin(\omega_2(t-t_2)) U(t-t_2)$$

周波数 f_1 の共振器モデル

周波数 f_2 の共振器モデル

A: 漸近振幅
 t_1 : 信号発生時間
 ω : 角周波数
 Q_L : 負荷Q値 (事前の測定値32.4で固定)

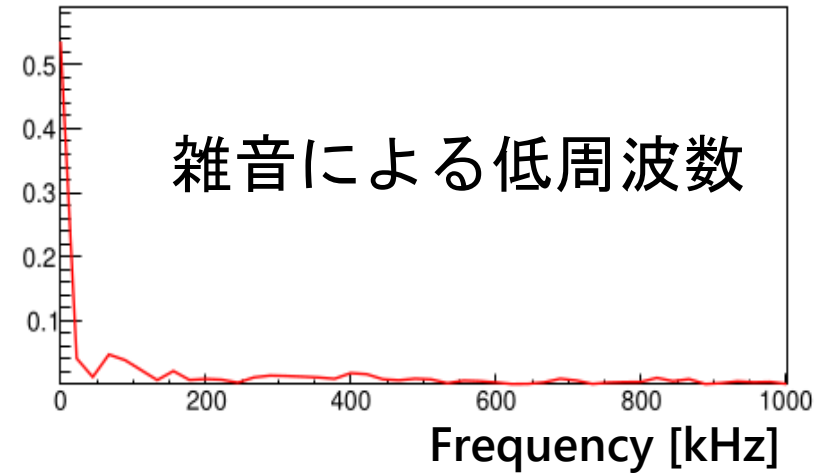
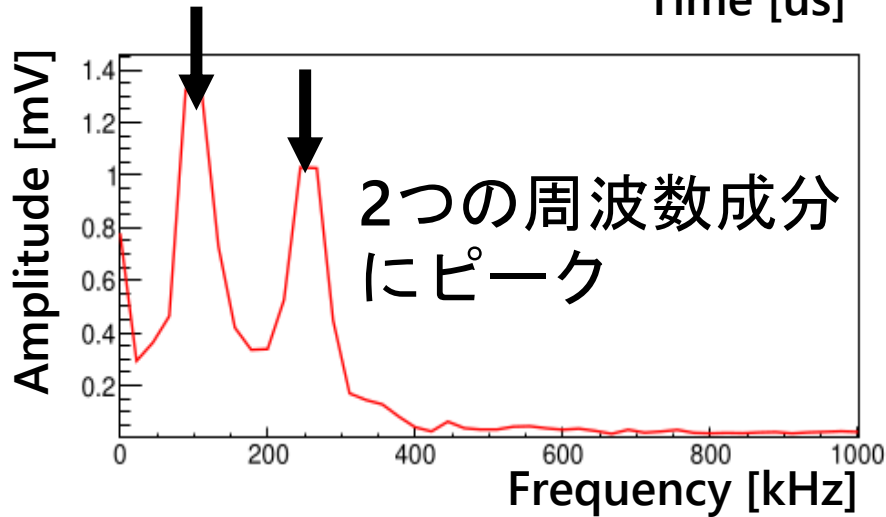
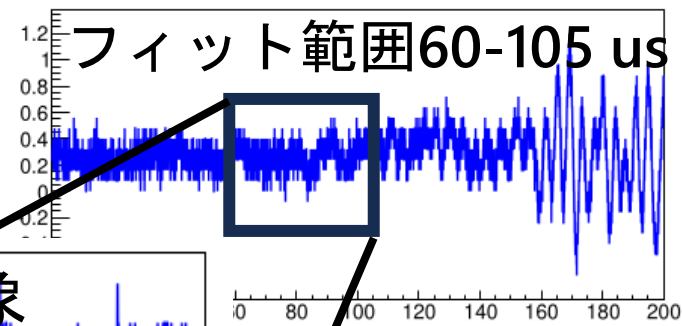
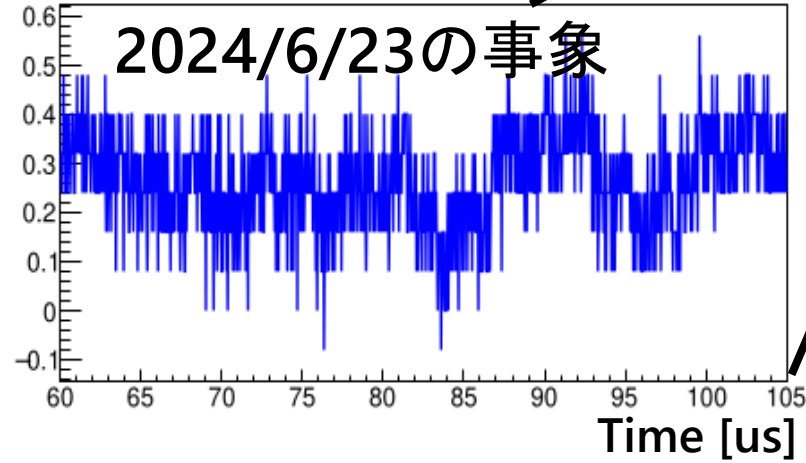
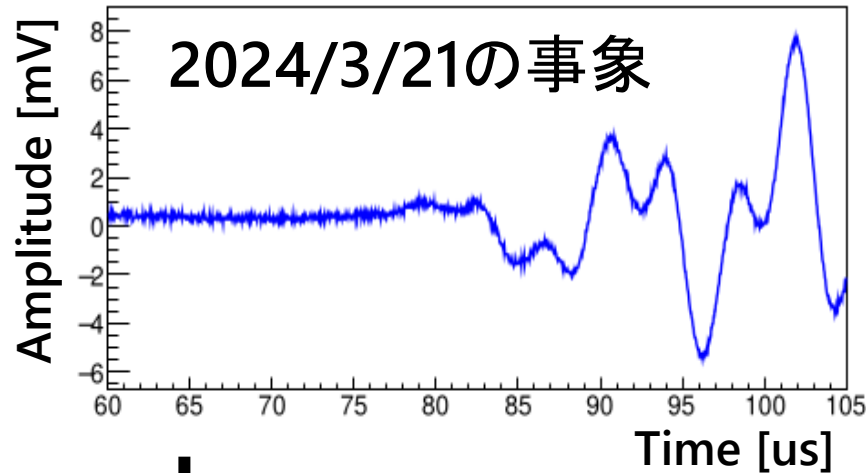
$U(x)$: 単位ステップ関数
$$U(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases}$$

$$t_{SBL} = \min(t_1, t_2)$$

ロスモニターの信号を検出してから音波が観測されるまでの時間, $t_{SBL} = 77.9 \pm 0.03 \mu s$

観測される音波の大きさ

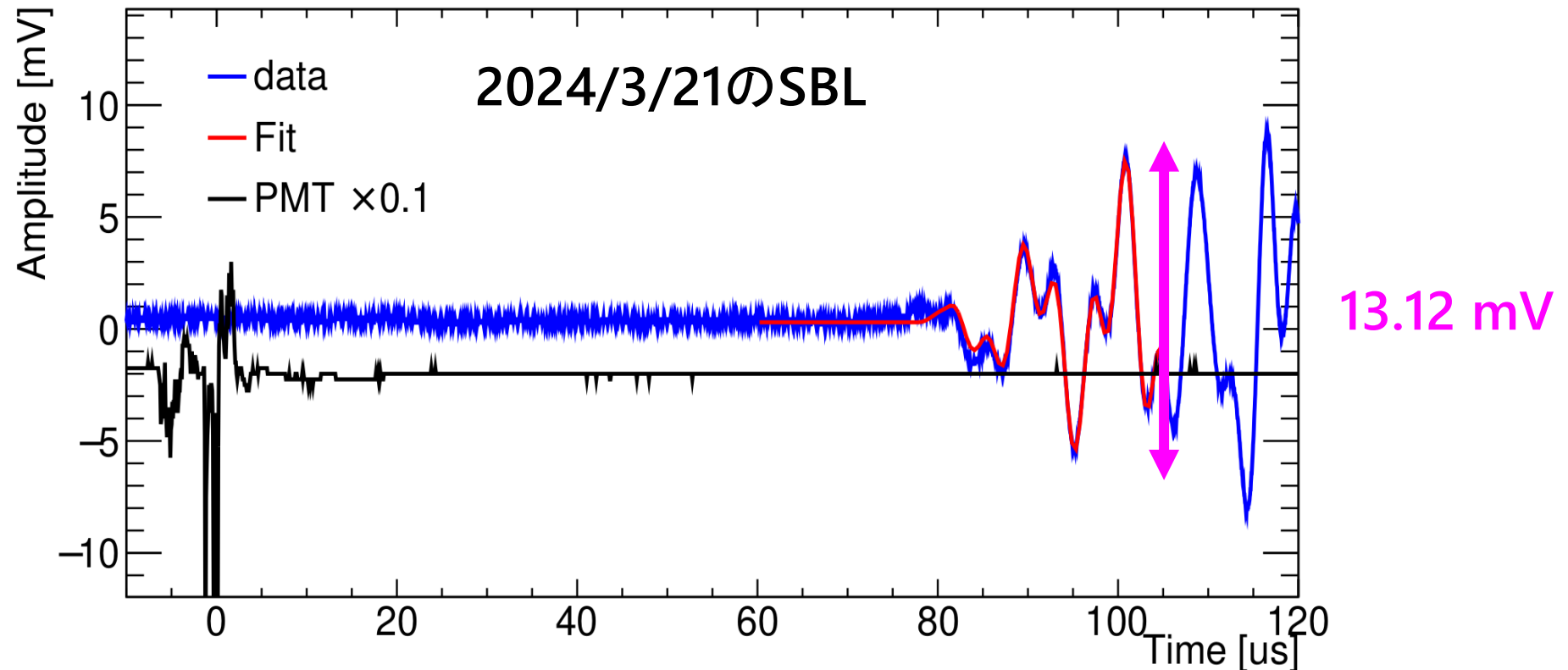
- 一般的に信号が大きい方がノイズと切り分けやすく解析しやすい



音波が十分大きいものに絞って解析を進める

十分に大きな音波の定義

- 信号の大きさの定義…フィット範囲内の信号の最大値と最小値の差

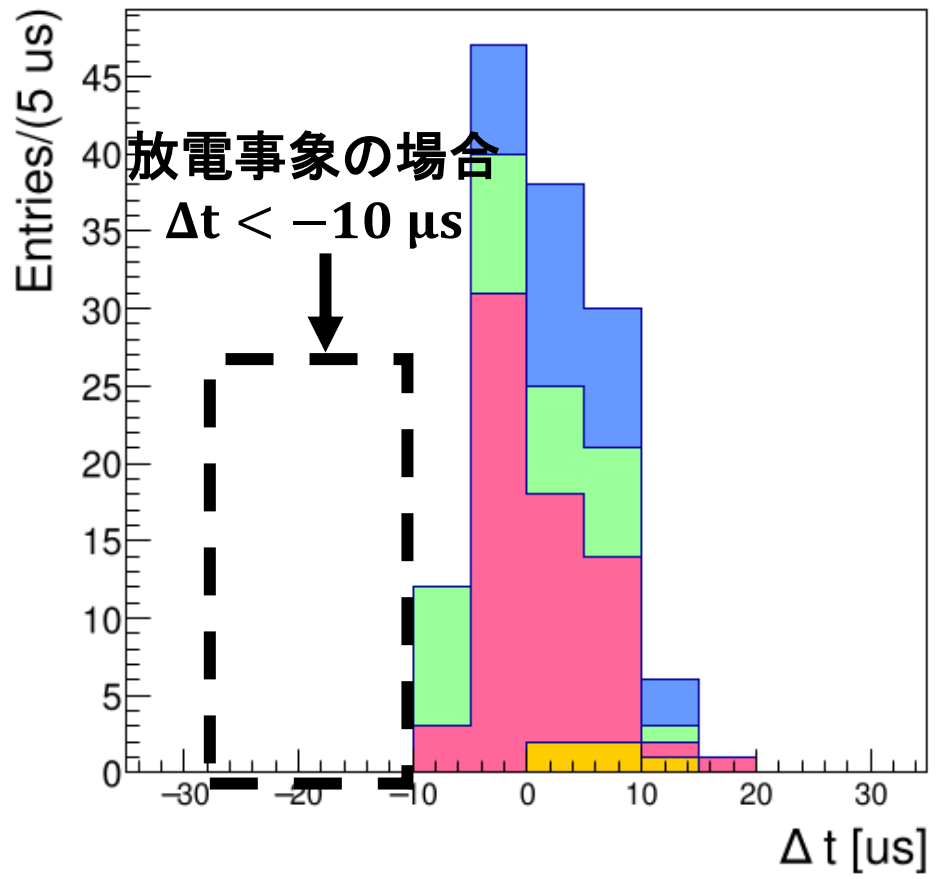
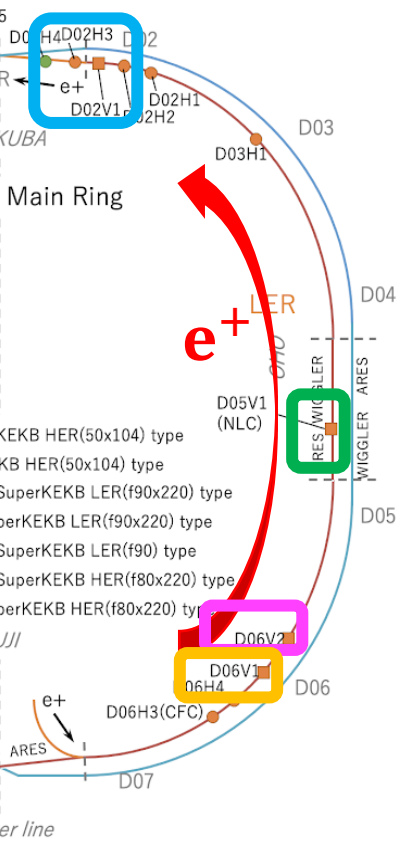
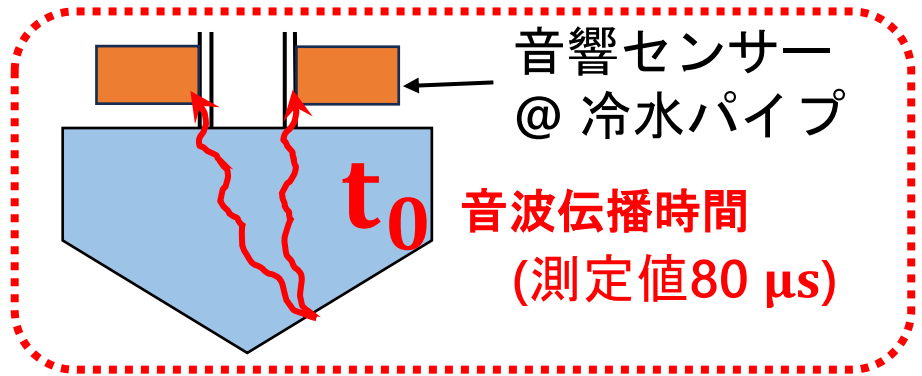


- SBLを引き起こす事象は音波が十分に大きい → 「(信号の大きさ) >2.0 mV」に着目
十分に大きな音波に対して音波発生時間をフィットにより算出する！

音波伝播時間から放電事象の候補をさがす

約150件のSudden Beam Lossによって発生した音波から放電事象の候補を選別

• 時間差: $\Delta t = t_{\text{SBL}} - t_0$

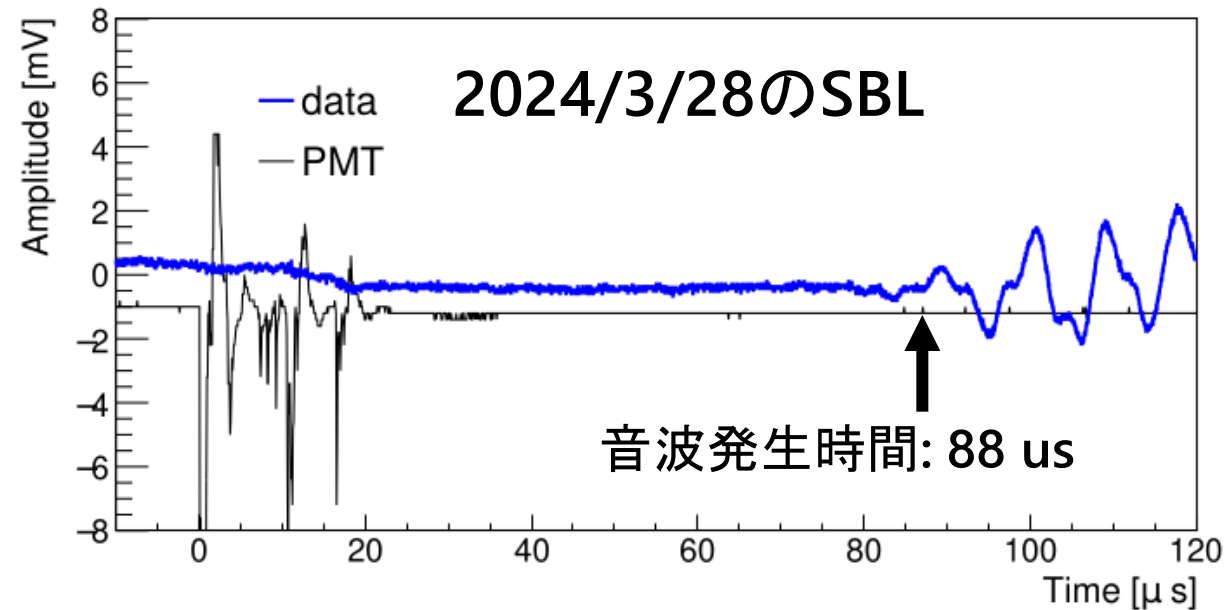
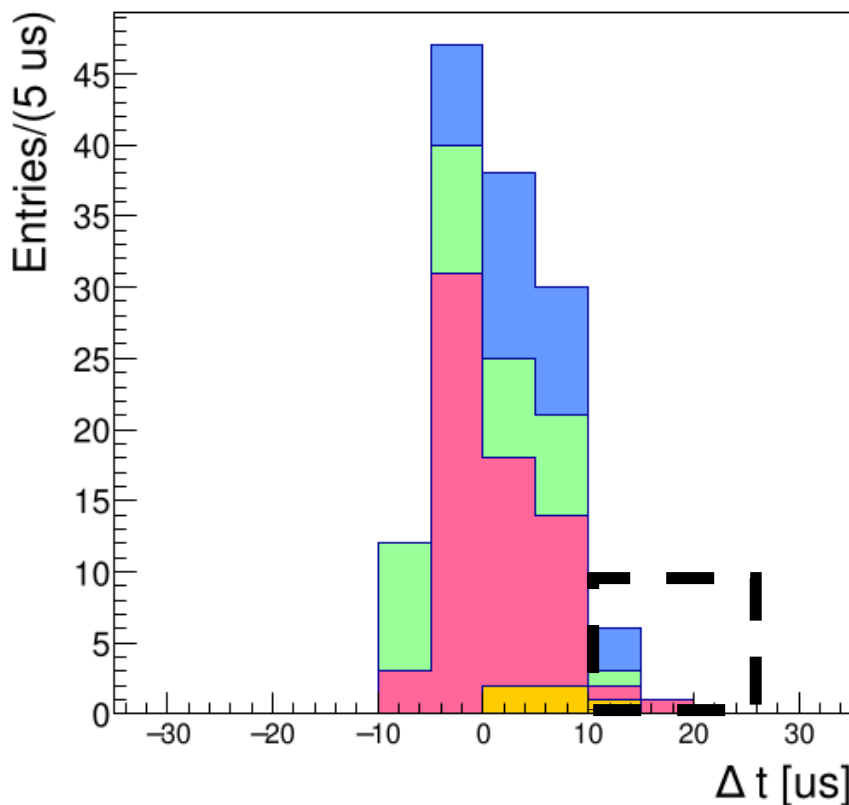
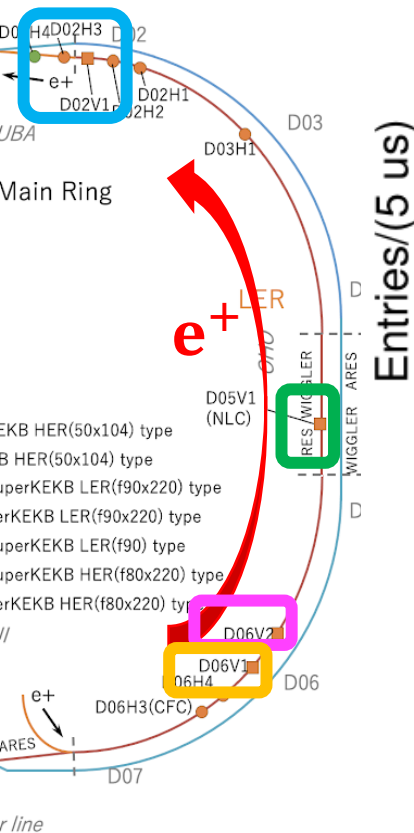


- コリメータにビームが当たる事象は主に $\Delta t=0$ 付近に分布
 - 放電事象: t_{SBL} は t_0 より $10 \mu\text{s}$ (リング1周) 以上小さい
 - 放電事象候補数: 0個
- コリメータ付近の放電による事象は見出されなかった

Δt が遅い事象について

$\Delta t > 10 \mu\text{s}$ の波形の特徴

- 時間差: $\Delta t = t_{\text{SBL}} - t_0$
(測定値: $80 \mu\text{s}$)



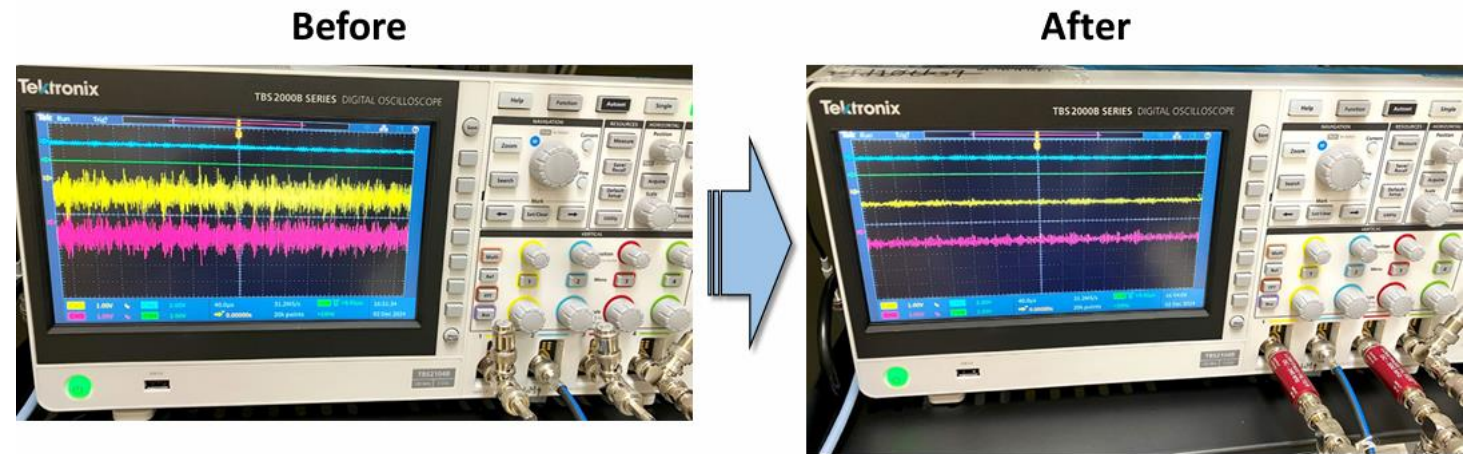
- 2つ目のピークでコリメータに当たったと考えられる
→ Δt は10 us遅れる

放電事象の場合は早く聞こえる

Δt が大きい事象は放電事象にならない

小さい信号を解析するための対策

- 音響センサーの立ち上がり部分の信号の大きさは微弱 (数 mV)
 - 信号とノイズの切り分けのため → (信号の大きさ) > 2.0 mVのみ解析に使用
- S/N比をあげるためアンプとローパスフィルターを用意して、今期測定している



工夫して小さい信号にもアクセスしようとしている

→ 解析は現在進行中

まとめと今後

- SuperKEKB/Belle II実験は大統計データを用いて新物理探索を行う
 - 高ルミノシティの運転が必須 → 突発的なビームロスの原因究明をする必要がある
- リング内のコリメータ付近で大真空放電の発生が仮説として考えられる
- 音響センサーを用いてリング内の放電事象の有無を検証する測定方法を確立した
- 2024年の運転で発生したSudden Beam Lossに対する音波の観測に成功
- 十分に大きな信号に着目して解析 → 設置したコリメータで放電事象は無かった
 - Sudden Beam Lossは放電起因でないことが示唆された
- 10月からの運転では電子リングにも設置し、データは問題なく取得できている
- 小さい信号の解析のためアンプとローパスフィルターの導入
- ビーム軌道の変化など他のモニター情報との関連も調べる