

Belle II実験 シリコンストリップ崩壊点検出器 を用いた ビームバックグラウンドの研究

東京大学 後田研究室 D1

谷川 輝

第26回 ICEPPシンポジウム, 2020/2/17

Belle II 実験

$e^+ e^-$ 衝突

- $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$: $B\bar{B}$ threshold

世界最高の瞬間ルミノシティ (KEKB) の40倍を目指す

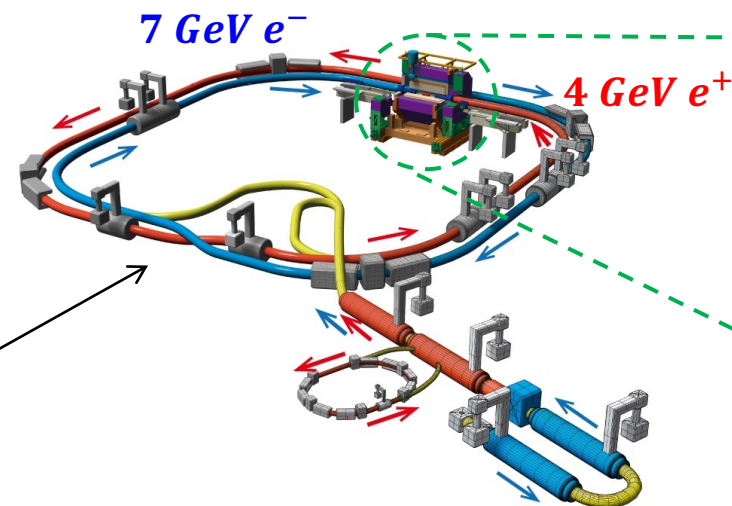
⇒ クリーンな B, D, τ 事象を大量に蓄積

- 標準模型の精密測定による新物理の間接探索

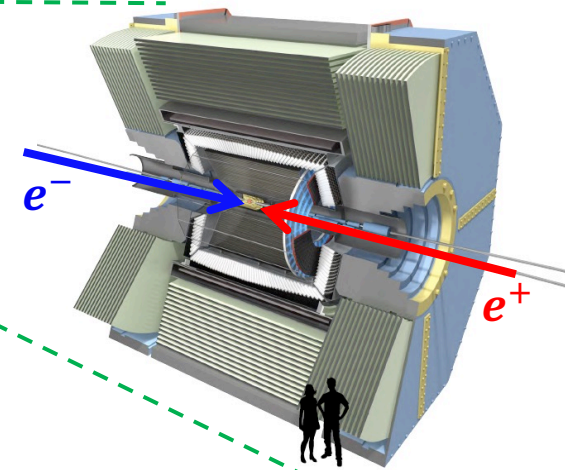
2019年3月 本格運転開始

e^+, e^- を貯蔵するメインリング

SuperKEKB加速器 (KEK, つくば)

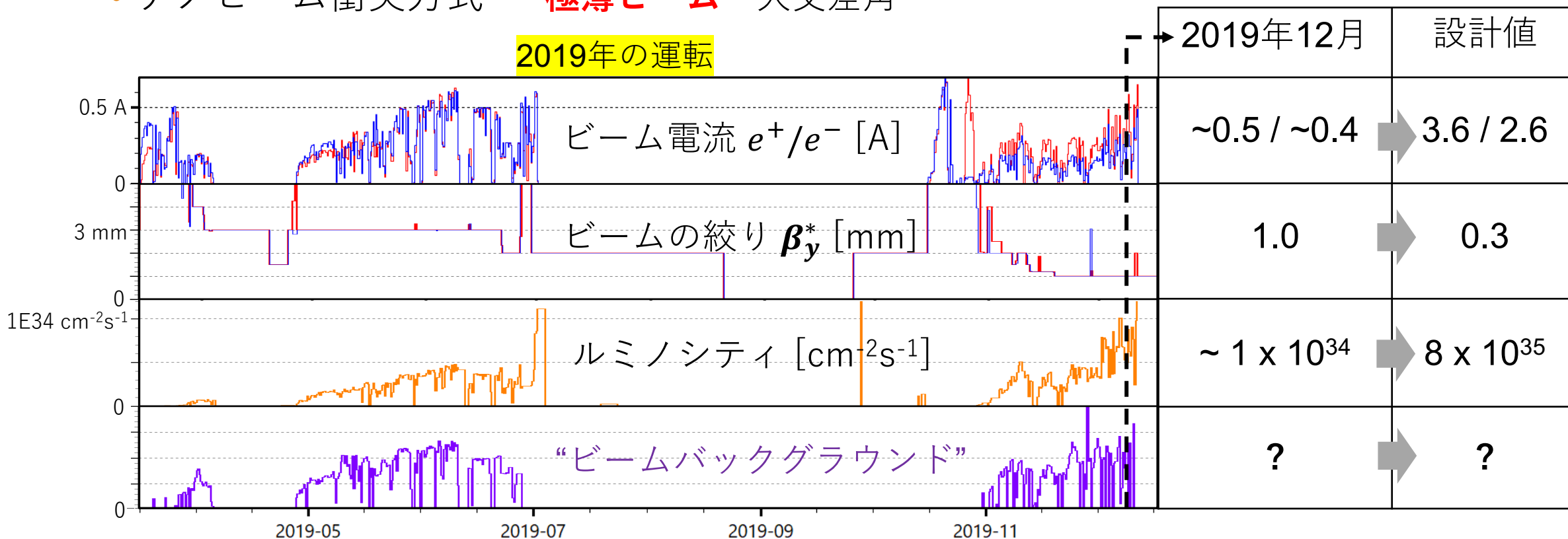


Belle II 測定器



ルミノシティの増強

- **ビーム電流の増強**
- ナノビーム衝突方式 … **極薄ビーム**・大交差角



ルミノシティに伴って“**ビームバックグラウンド**”も増加

とは？

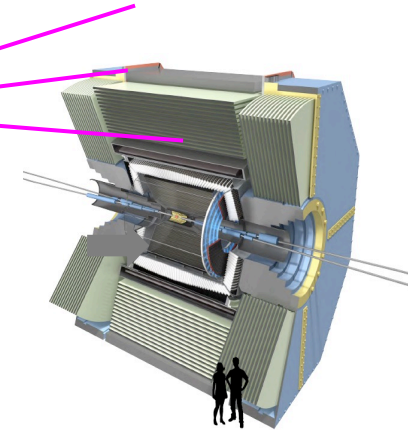
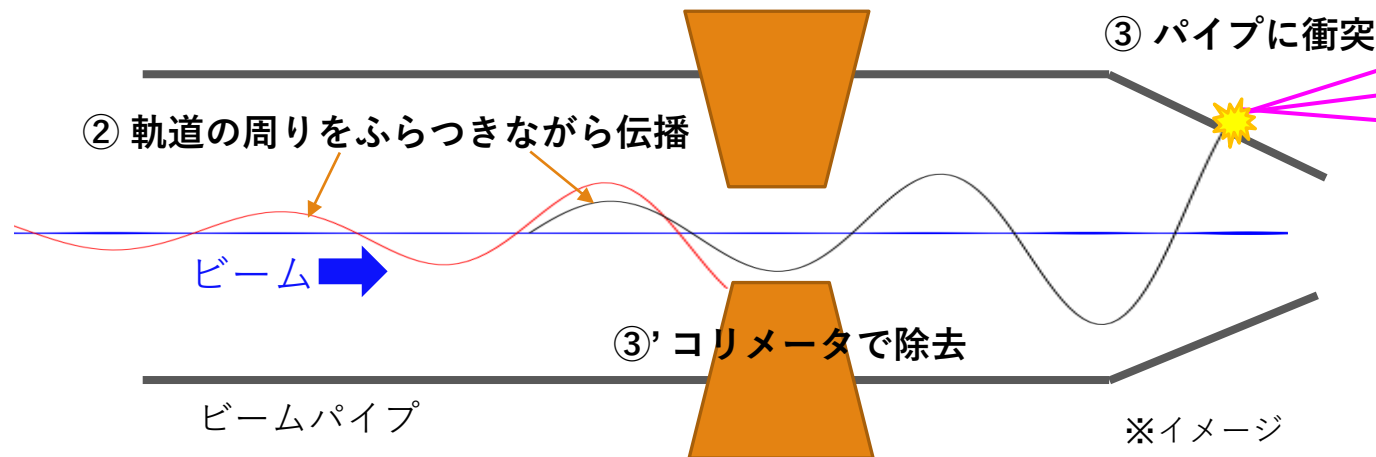
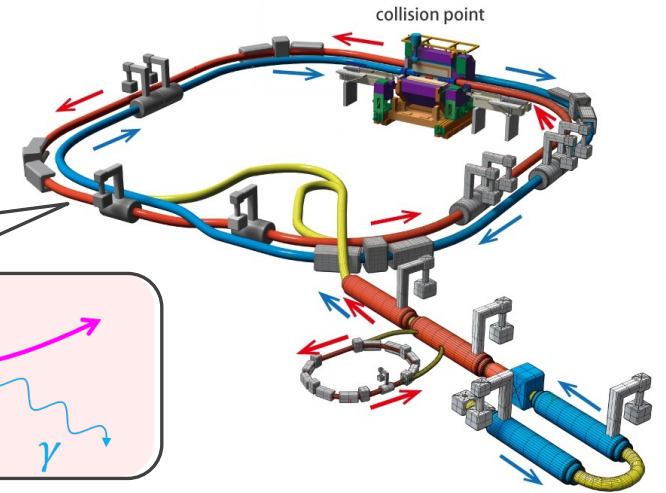
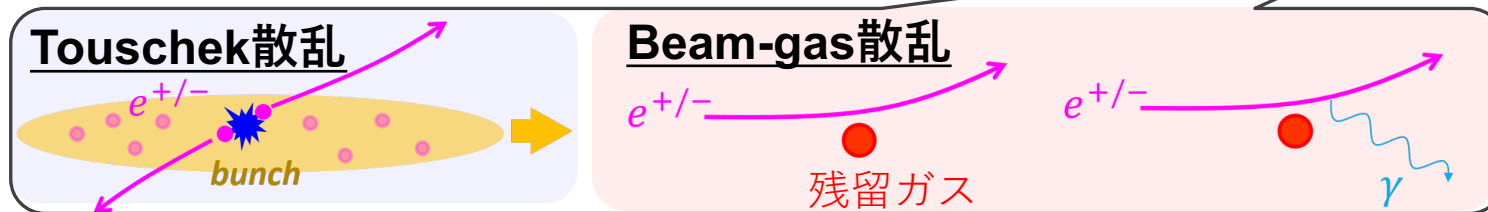
ビームバックグラウンド (以下BG)

軌道を外れたビーム粒子 → 電磁シャワー・中性子 → 検出器の放射線損傷・偽ヒットなど

主な原因

Single-beam BG (e^+, e^- ビームそれぞれから)

- ① リング周回中にビーム粒子が散乱



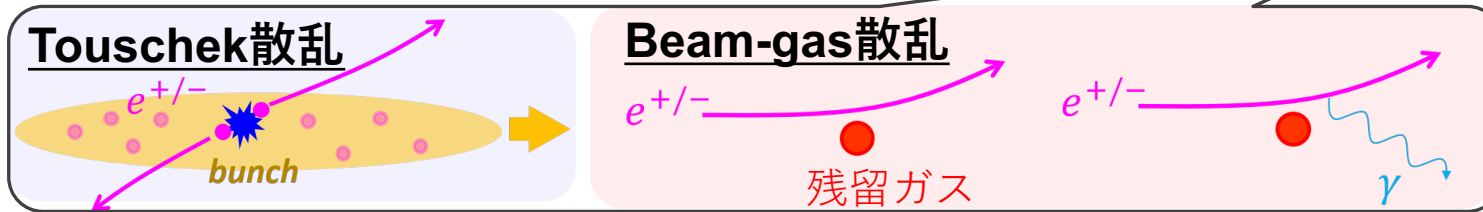
ビームバックグラウンド (以下BG)

軌道を外れたビーム粒子 → 電磁シャワー・中性子 → 検出器の放射線損傷・偽ヒットなど

主な原因

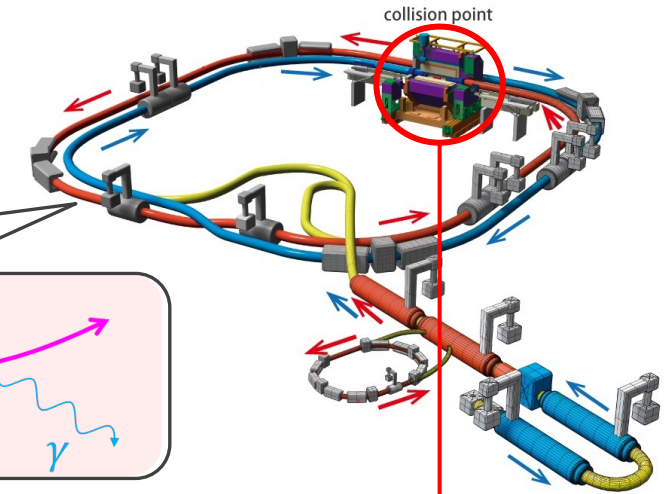
Single-beam BG (e^+, e^- ビームそれぞれから)

- リング周回中にビーム粒子が散乱



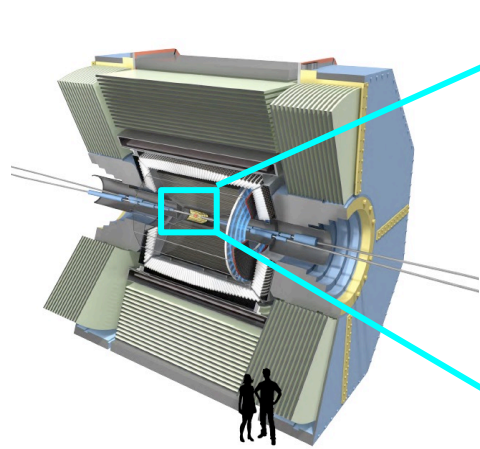
Collision BG

- 高頻度の衝突事象に由来

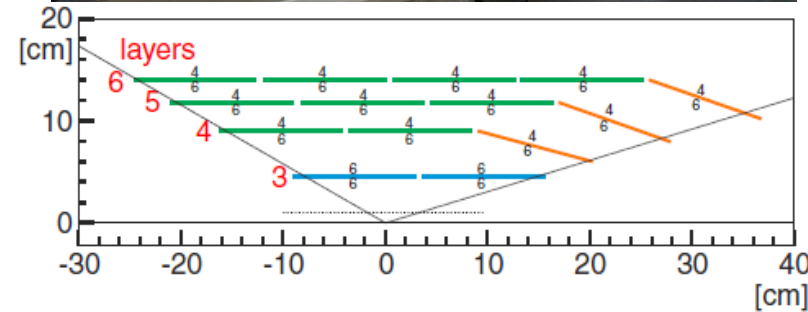
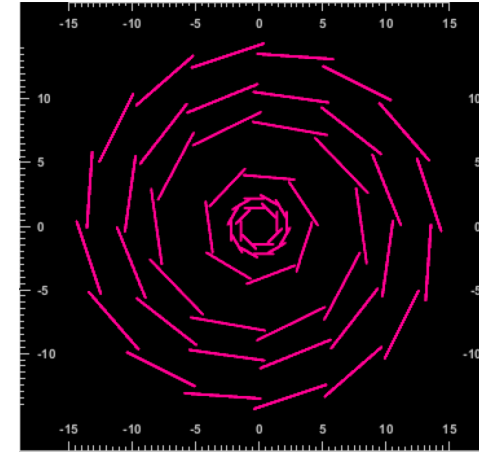
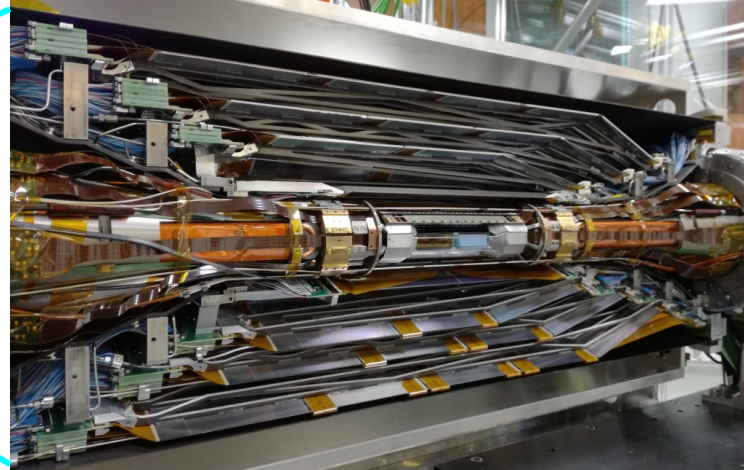


ビーム強度・ルミノシティの増強 ⇒ BG増加、検出器の運用を妨げる
BGの理解・制御が重要

SVD (Silicon Vertex Detector)

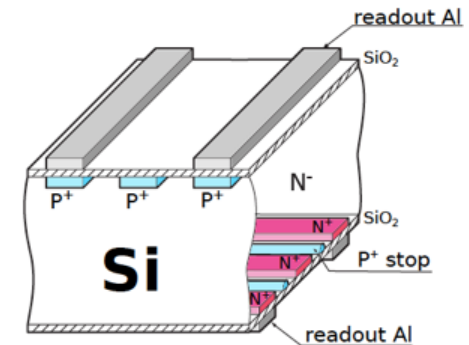


Belle II測定器



SVD (Silicon Vertex Detector)

- 4層の両面シリコンストリップ検出器
- 荷電粒子の飛跡再構成・親粒子の崩壊点を決定



SVDへのBGの影響

影響	指標	許容量	見積もり(MC)
放射線損傷	TID	10 Mrad	1 Mrad
	NIEL	$10^{13} n_{eq}/cm^2$	$2 \times 10^{12} n_{eq}/cm^2$
偽ヒット	occupancy*	2-3 %	~1 %

*occupancy: 1センサー当たり、鳴ったストリップの割合

※以降、SVD最内層のBG量について言及する

シミュレーションによる**見積もりはSVDの許容範囲内**

- 設計ルミノシティでの10年間 (10^8sec) の運転を仮定

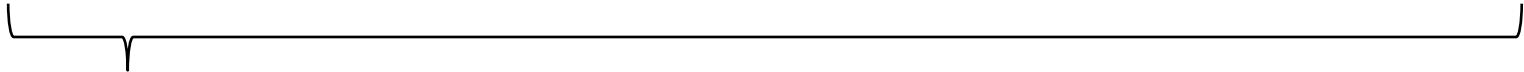
だが、**MCの妥当性を確認**する必要がある。

研究内容・発表の流れ

① BGの測定・切り分け

- SVDへのBG量をOccupancyとして測定 (昨年12月)

total BG				
e^+ single-beam		e^- single-beam		
<u>e^+ Touschek</u>	<u>e^+ Beam-gas</u>	<u>e^- Touschek</u>	<u>e^- Beam-gas</u>	<u>Collision</u>



- 5つのBG成分に分解



② それぞれMC予想値と比較

- MCと実際のズレを評価

③ 設計ルミノシティでのBG量の予想 ⇒ SVDの許容量に収まるか？

- MCと実際のズレを考慮

①-1 Single-beam BGの測定

モデル：3つの測定量でSVD Occupancyを表す

$$\text{Occupancy}(I, \sigma_y, n_b) = p_1 \cdot \frac{I^2}{\sigma_y n_b} + p_2 \cdot I^2 + p_3 \cdot I + p_4$$

p_i : フィットパラメータ

測定量

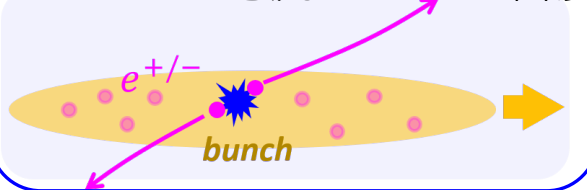
I : ビーム電流

σ_y : ビームサイズ (垂直方向)

n_b : バンチ数

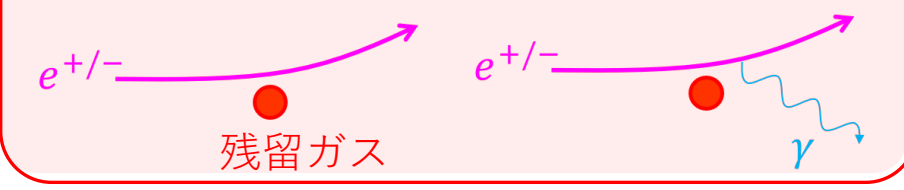
Touschek

\propto ビーム電流 \cdot ビーム密度



Beam-gas

\propto ビーム電流 \cdot 真空度 (電流の1次関数)



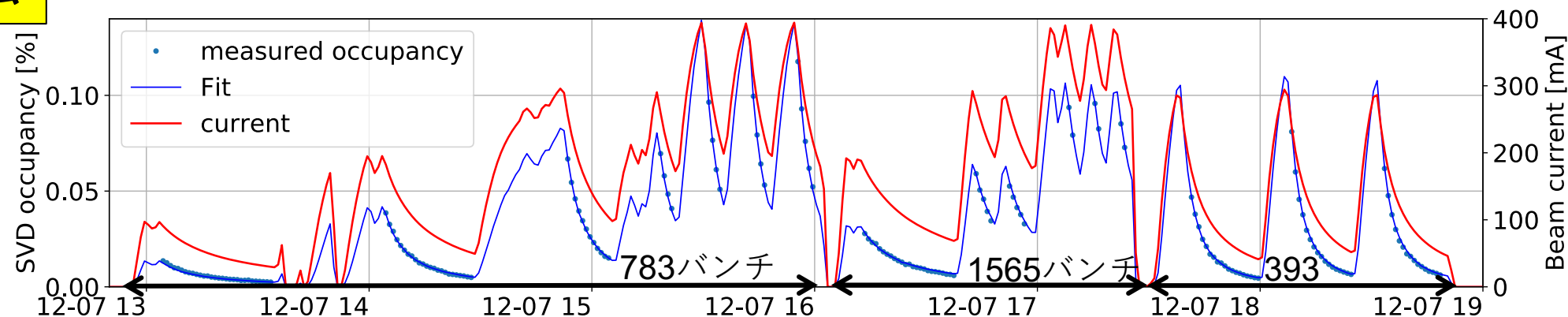
方法：

- 一方のビームのみを蓄積、occupancyを擬似ランダムトリガーで測定
- 異なるバンチ数 n_b で繰り返す (393, 793, 1565バンチ)
- バンチ数 n_b への依存性から、**Touschek**, **Beam-gas**成分を分離

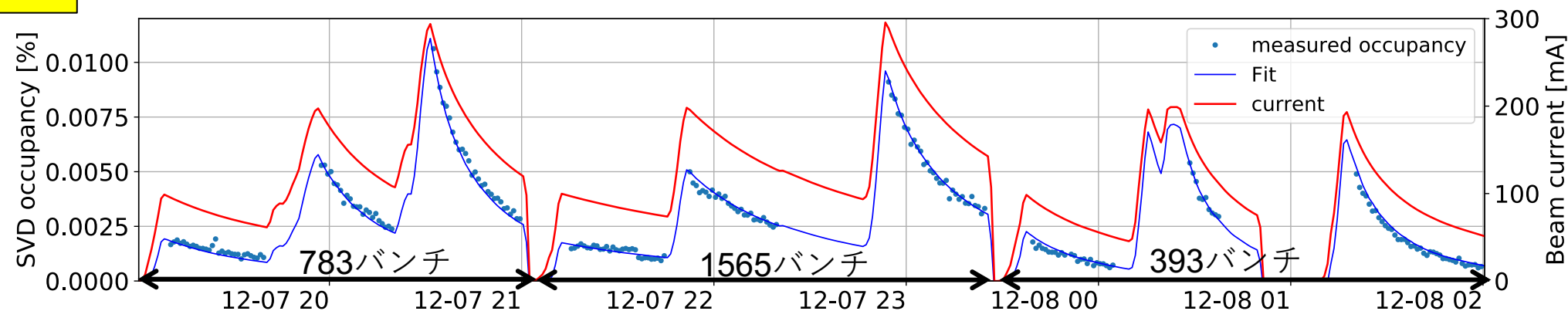
フィット結果

- Touschek, Beam-gasでよく説明できる
- フィット結果から任意の条件 (I, σ_y, n_b) での **BG量** を推定可能

e^+ ビーム



e^- ビーム

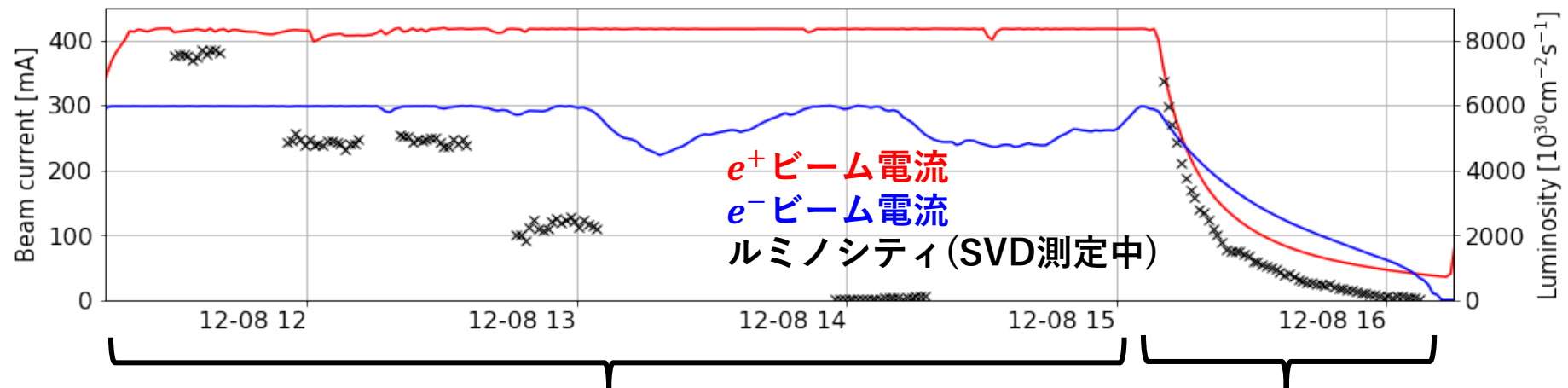


①-2 Collision BGの測定

$$\text{Collision BG}(\mathcal{L}) = \text{total BG (測定)} - \text{Single-beam BGs(推定)}$$

$$\propto \mathcal{L}$$

single-beam BGを差し引いた残りを、**ルミノシティ \mathcal{L} の関数として測定**



段階的なルミノシティ変化

連続ビーム入射によって電流を保ちつつ、衝突点でのビーム軌道をずらす

連続的なルミノシティ変化

ビーム入射を止め、電流を減衰させる

①-2 Collision BGの測定結果

$$\text{Collision BG}(\mathcal{L}) = \text{total BG (測定)} - \text{Single-beam BGs(推定)}$$

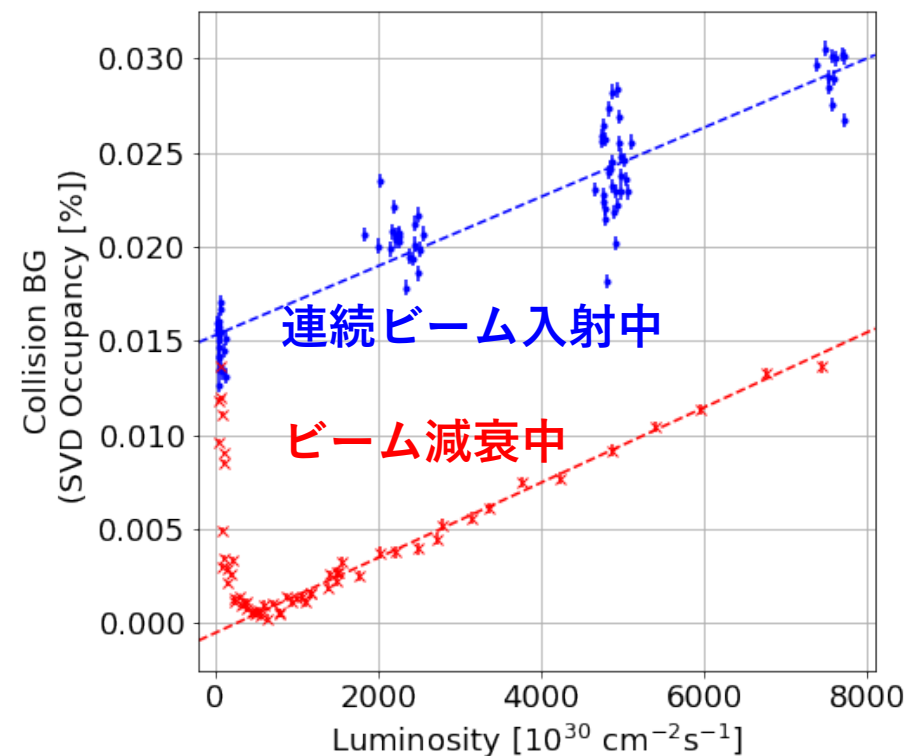
$$\propto \mathcal{L}$$

ルミノシティに比例するBG成分を確認

- 傾きは同程度 … 設計ルミノシティで occupancy 1.5%に相当

連続ビーム入射中の測定結果は**オフセット**を持つ

- 入射によるBGの増加か？（要調査）



① まとめ：BG成分表

以上の測定結果から、2019年12月の物理ラン中のBG構成を推定

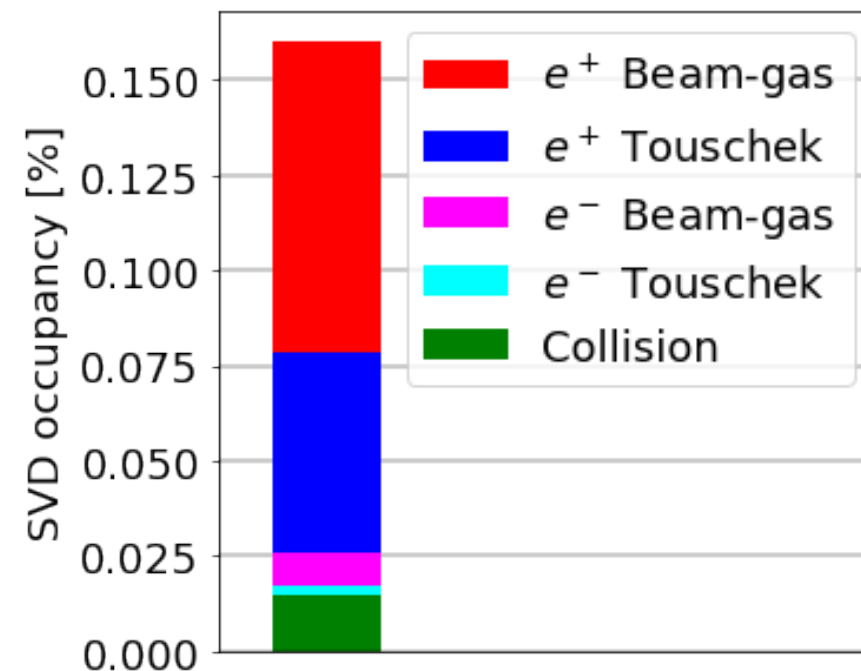
陽電子ビーム由来のBGが支配的

- 特にBeam-gas

現時点では全く問題にならない

- 許容量：2-3 %

BG成分	測定値
e^+ Beam-gas	0.082 %
e^+ Touschek	0.053 %
e^- Beam-gas	0.009 %
e^- Touschek	0.002 %
Collision	0.015 %



② MCとの比較

MCの結果と比較

- 測定時のビーム光学系、コリメータ設定を再現

測定されたBGは**MCより多い（特に e^- ビーム）**

- MCの予想値が非常に小さい
- 考えられる原因：
 - リング内の**真空度の偏り**を考慮していない
 - 理想的なコリメータ**を仮定（tip scatteringなし）

BG成分	測定値	MC予想値	測定/MC
e^+ Beam-gas	0.082 %	0.009 %	8.9
e^+ Touschek	0.053 %	0.044 %	1.2
e^- Beam-gas	0.009 %	0.0003 %	25
e^- Touschek	0.002 %	0.00001 %	160
Collision	0.015 %	0.01 %	1.5

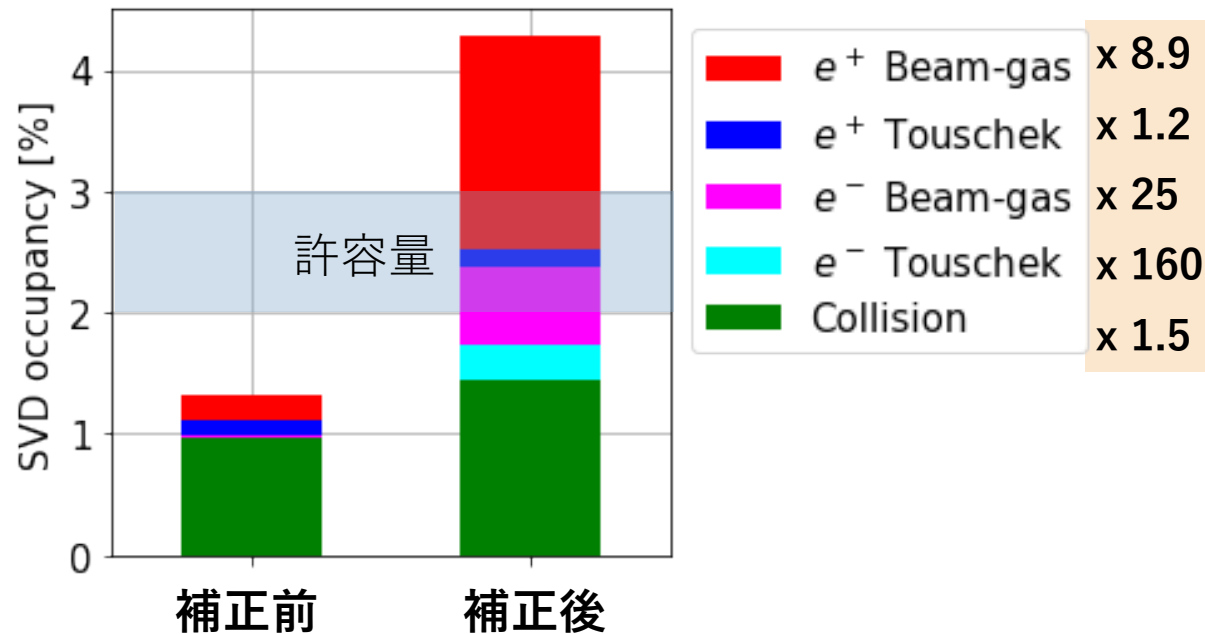
③ 設計ルミノシティでのBG量予想

設計ルミノシティを仮定したMCを補正

- 測定値とMCのずれでスケール

$$\sum_i MC_{\text{design}}^i \times \frac{\text{測定}_{2019}^i}{MC_{2019}^i}$$

i = 各BG成分
 MC_{2019}^i : 測定時の条件を再現したMC
 MC_{design}^i : 設計ルミノシティを仮定したMC



補正後のBG量はSVDの許容量を超過
ヒット時刻を用いたBG除去
 → 許容量の引き上げの見込み

課題：

- BGの低減**
 コリメータ・シールド追加
 真空の改善
- 予想の信頼性向上**
 MCとのズレの追究
 Collision BGの理解

まとめ

Belle II実験ではビームバックグラウンドの理解・制御が重要

SVDへのBG量を実測し、要因ごとに切り分けた

- 初めてCollision BGを観測
- 実際のBGはMCより多い（特に電子ビーム）
- → 設計ルミノシティではSVDのBG許容量を超えるおそれがある
BGを低減する必要

今後の課題

- Collision BGのより良い理解
- MCを実際に近づけ、予想の信頼性を高める

backup

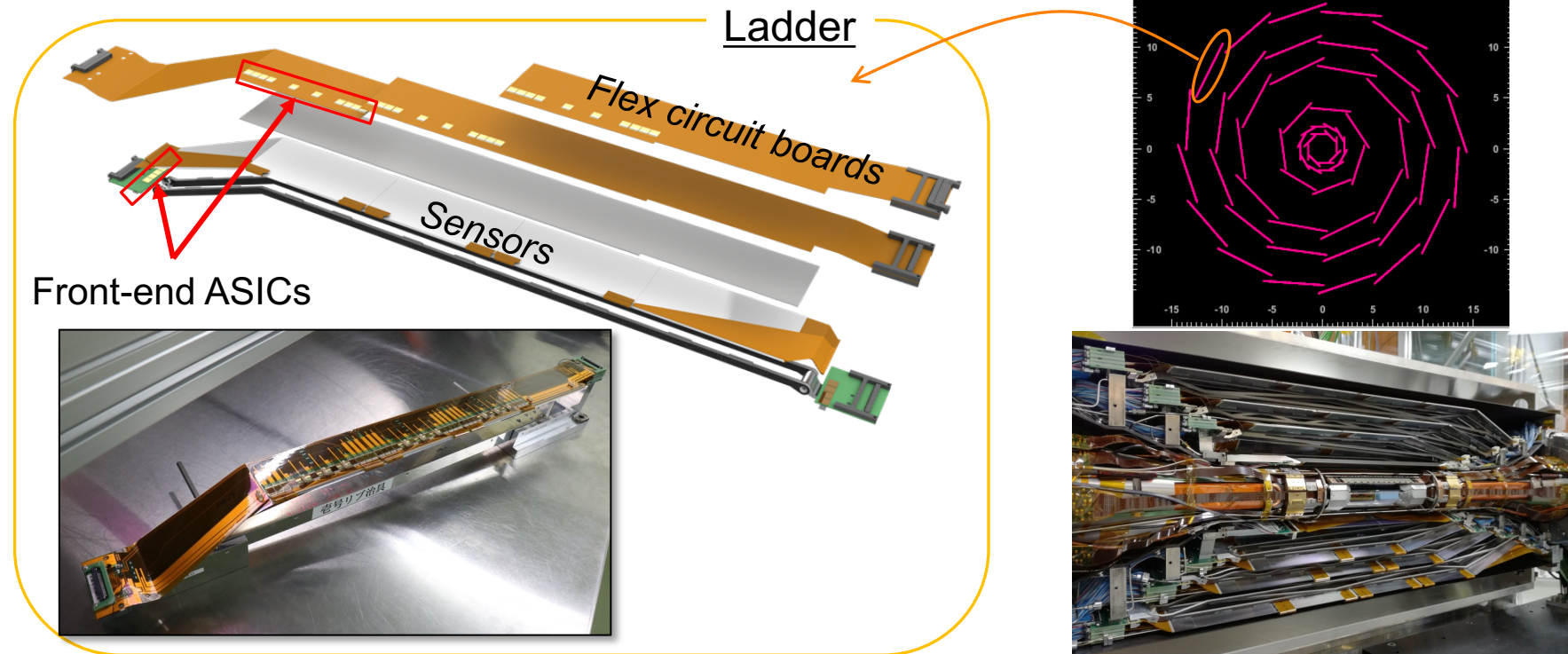
Structure of Belle II SVD

Each of 4 layers is a cylindrical array of **Ladders** mounted on end rings supported by carbon fiber structure.

Electric signals from sensors are processed by front-end ASICs on the ladder, guided by flex circuits and read out at the ladder ends.

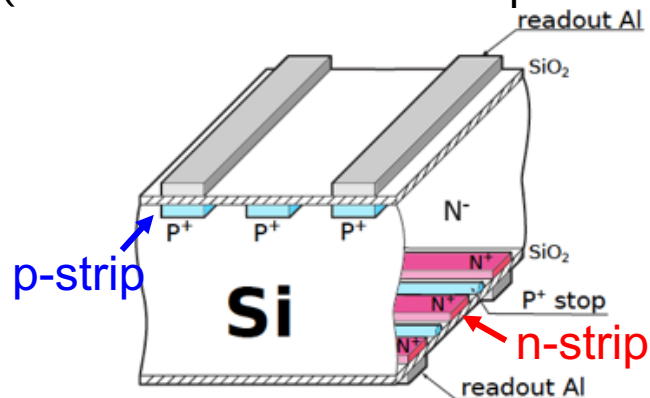
Evaporative CO₂ cooling system with thin SUS304 pipes

- Average material budget 0.7% X_0 per layer

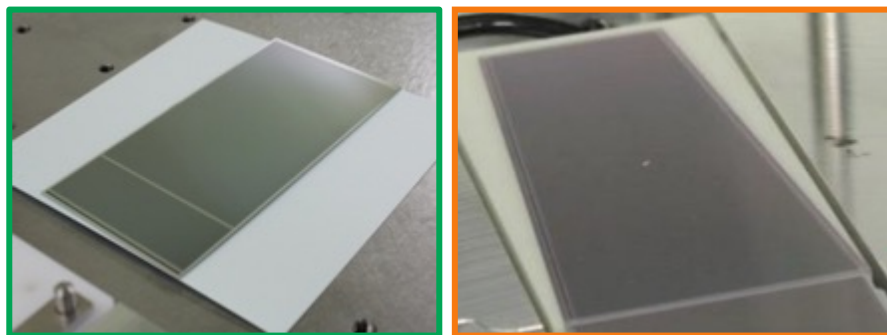


SVD Sensor

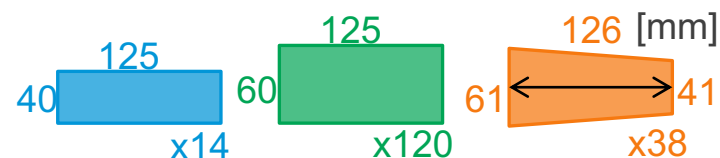
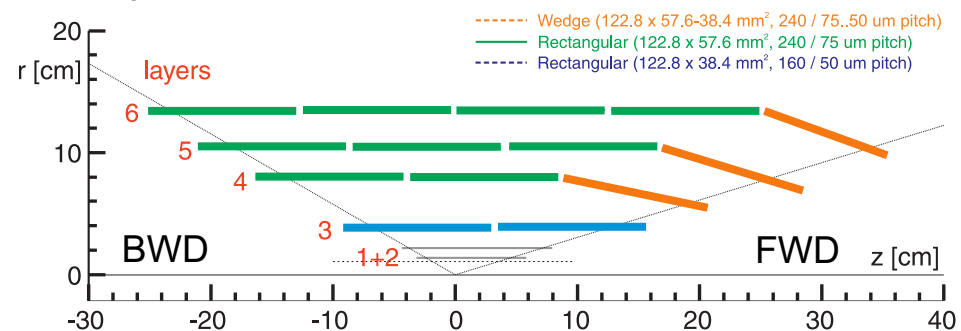
DSSD
(Double-sided Silicon Strip Detector)



Resistivity: 2kΩcm
Depletion Voltage: 40-60V
Operation Voltage: 100V



3 shapes of DSSDs are used in different locations.



	Small	Large	Trapezoidal
# of p-strips*	768	768	768
p-strip pitch*	50 μm	75 μm	50-75 μm
# of n-strips*	768	512	512
n-strip pitch*	160 μm	240 μm	240 μm
thickness	320 μm	320 μm	300 μm
manufacturer	HPK		Micron

*readout strips – one floating strip on both sides

T. Lueck

SVD standalone tracking

bkg scale	efficiency	fake rate	hit efficiency	occupancy L3 U/V
bkg x 1	0.961	0.054	0.957	0.013/0.012
bkg x 2	0.946	0.098	0.948	0.023/0.021
bkg x 3	0.935	0.136	0.937	0.032/0.030
bkg x 5	0.907	0.227	0.920	0.052/0.047
bkg x 10	0.819	0.488	0.884	0.102/0.090

Full tracking chain

bkg scale	efficiency	fake rate	hit efficiency	occupancy L3 U/V
bkg x 1	0.955	0.053	0.818	0.013/0.012
bkg x 2	0.939	0.086	0.744	0.023/0.021
bkg x 3	0.919	0.119	0.635	0.032/0.030
bkg x 5	0.856	0.189	0.422	0.052/0.047
bkg x 10	0.726	0.422	0.407	0.102/0.090

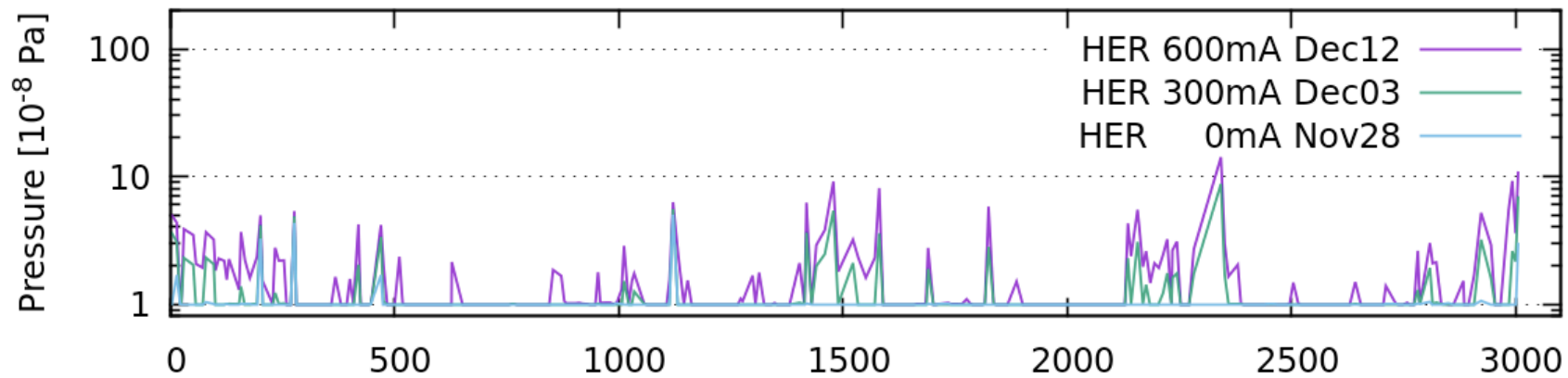
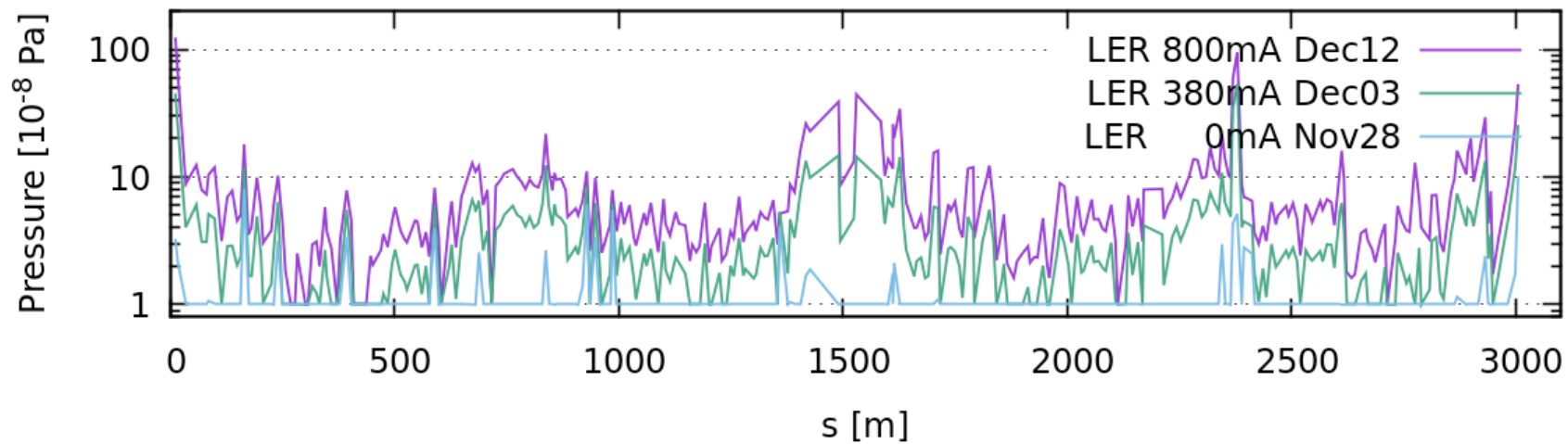
- Note: hit efficiency only on matched TC \Rightarrow biased!
- ave. # tracks in $B\bar{B}$ event = 11 \Rightarrow prob. fully reconstruct = ϵ^{11} :
 - $\epsilon = 0.955 \Rightarrow \epsilon^{11} = 0.603$
 - $\epsilon = 0.939 \Rightarrow \epsilon^{11} = 0.500$

Validation method

- generate 1000 MC events of $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$
- use MC-true tracks for normalization:
 - use true information to connect detector hits into a track candidate (TC) \Rightarrow MC-track candidate
 - a reconstructed TC is matched to a MC-TC if at least 60% of the contained hits are also contained in the MC-TC
 - finding efficiency: # reconstructed TC matched to MC-TC / # MC-TC
 - fake rate: # unmatched TC / # total TC

occupancy 2-3%

-> $B\bar{B}$ 事象のうち、50%を完全再構成



SuperKEKB collimation system

A. Natochii

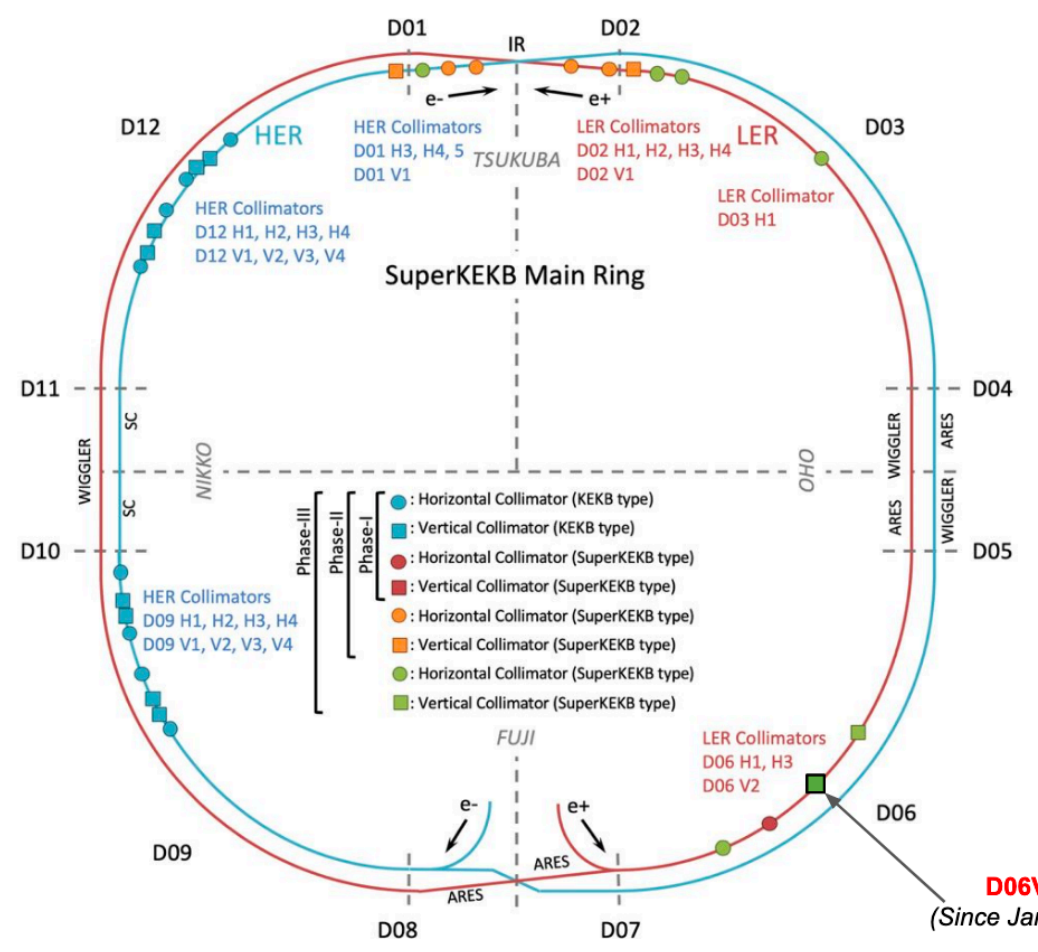
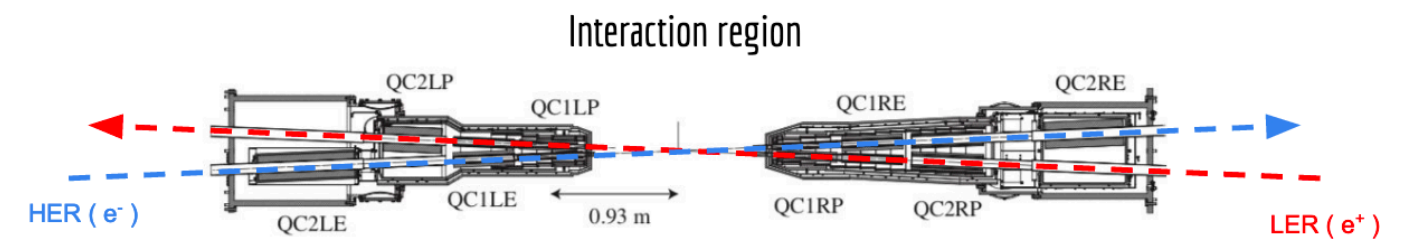
LER → 10 collimators:

- 7 horizontal: D06{H1,H3}, D03H1, D02H1, D02{H2,H3,H4}
 - 3 vertical: D06{V1,V2}, D02V1
- } Two-sides

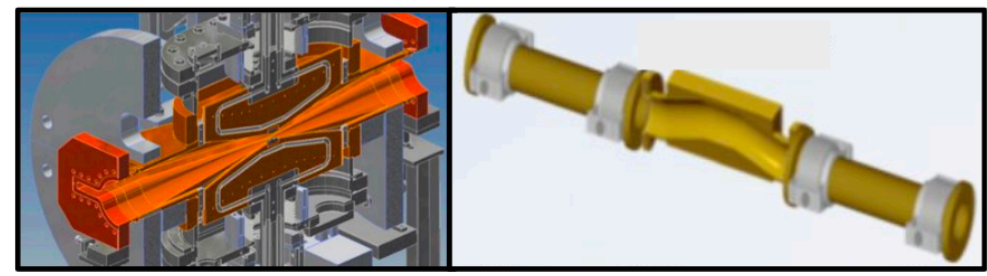
HER → 20 collimators:

- 11 horizontal: D01{H3,H4,H5}, D12{H1,H2,H3,H4}, D09{H1,H2,H3,H4}
 - 9 vertical: D01V1, D12{V1,V2,V3,V4}, D09{V1,V2,V3,V4}
- } Two-sides
} One-side
} Two-sides
} One-side

Have to be optimized



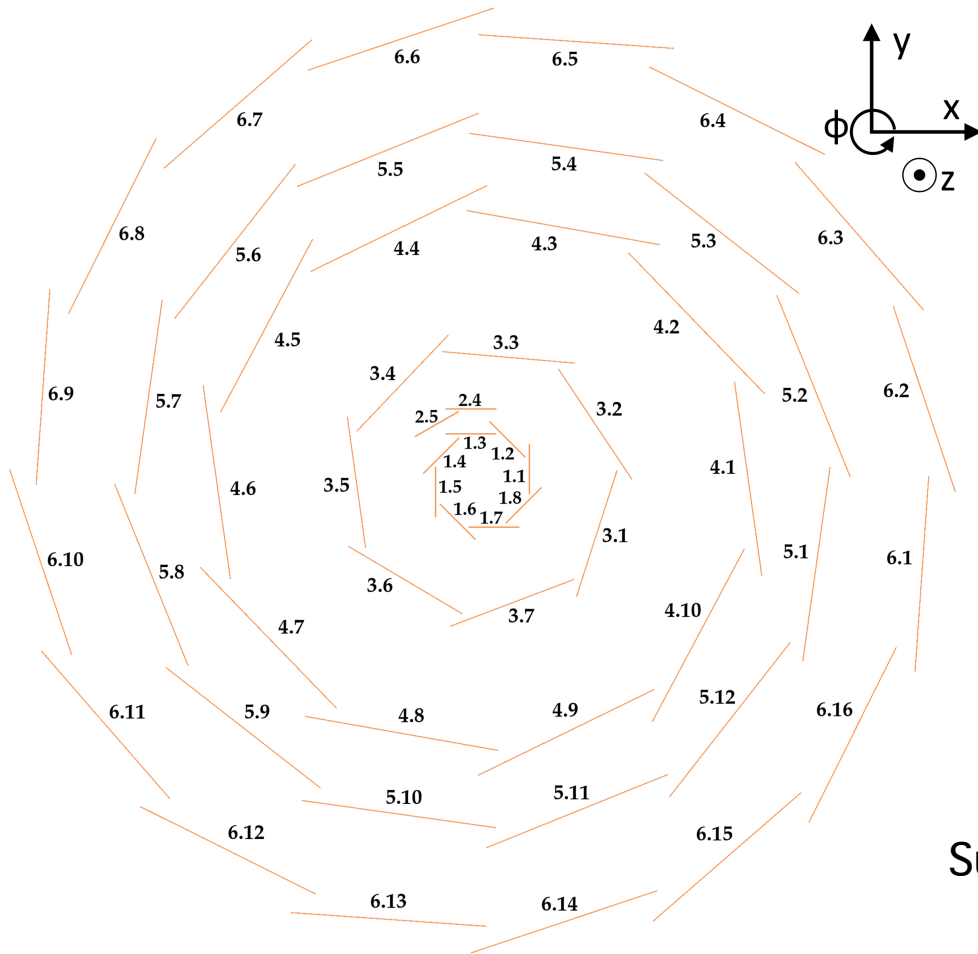
D06V1
(Since Jan 2020)



Two-sides collimator
SuperKEKB type

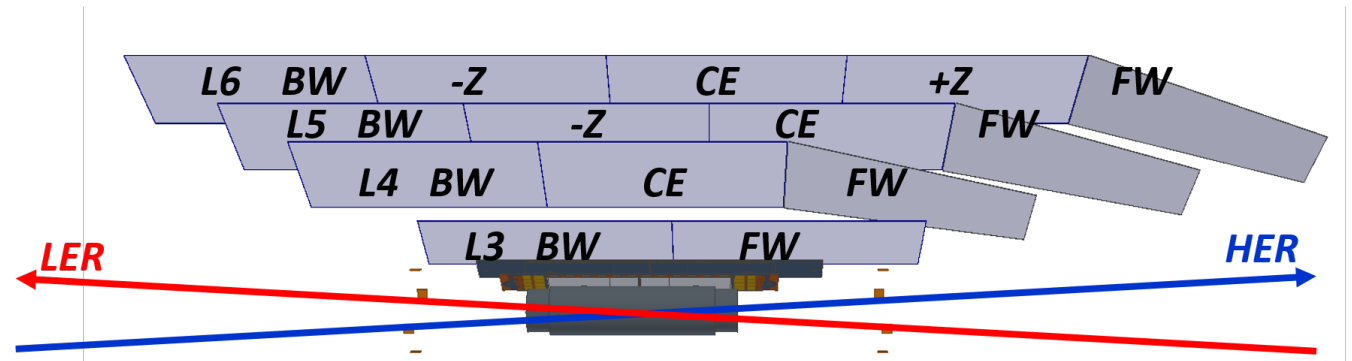
One-side collimator
KEKB type

data vs MC, Spatial distribution



Touschek / Beam-gas decomposition and data/MC comparison are done per

- Layer (r dependence)
- Ladder (phi dependence)
- Z position (z dependence)



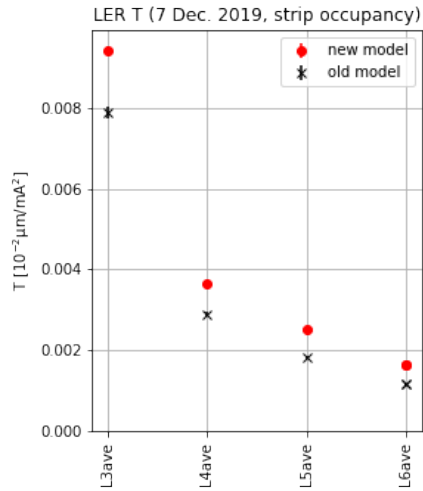
Summary:

the shape of phi, z distributions reasonably agree
 low LER BGs in Layer 3 (especially in BWD) ... missing hot spot in MC?

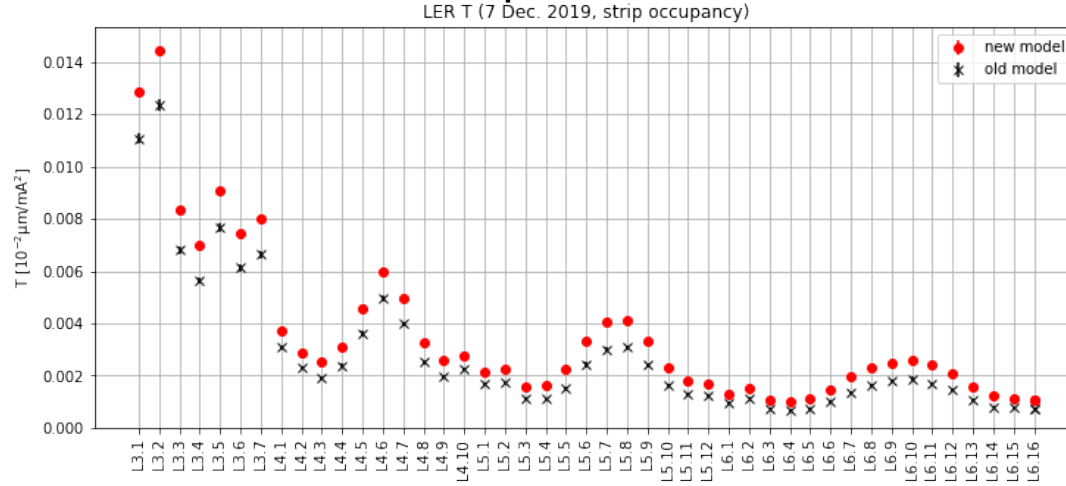
LER data vs MC

Touschek

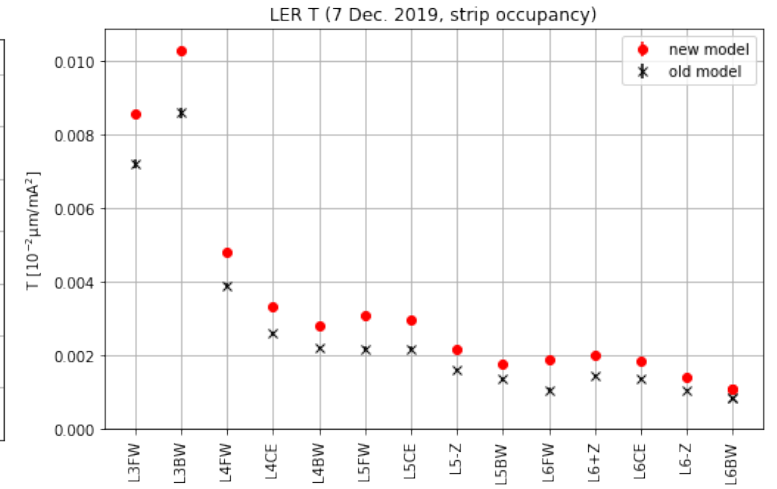
layer



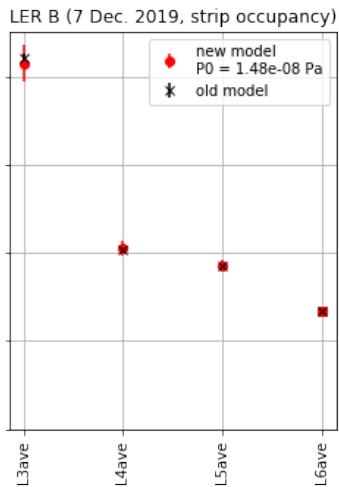
phi



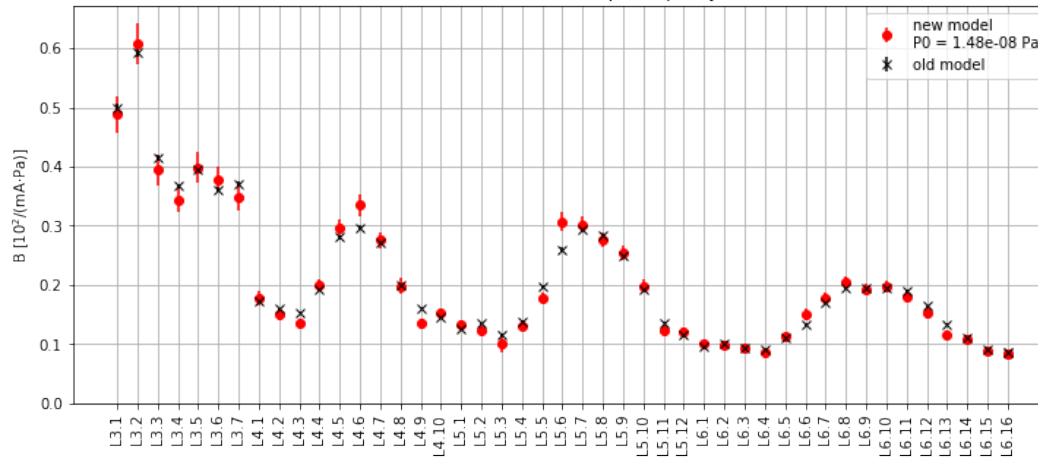
Z



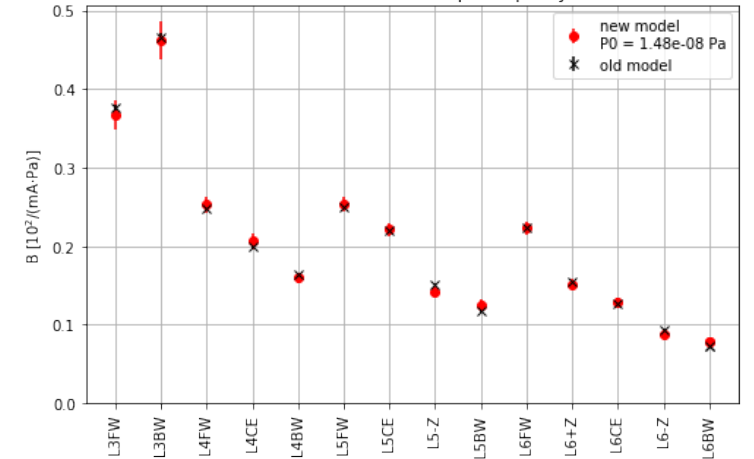
Beam-gas



LER B (7 Dec. 2019, strip occupancy)



LER B (7 Dec. 2019, strip occupancy)

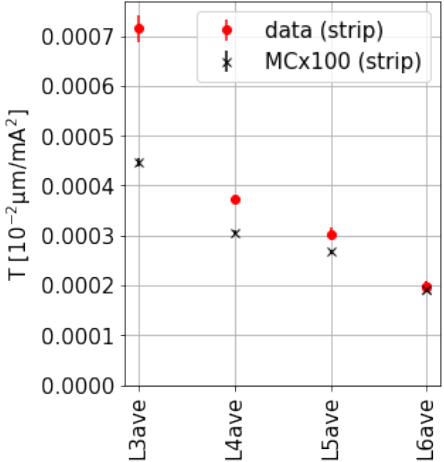


HER data vs MC

Touschek

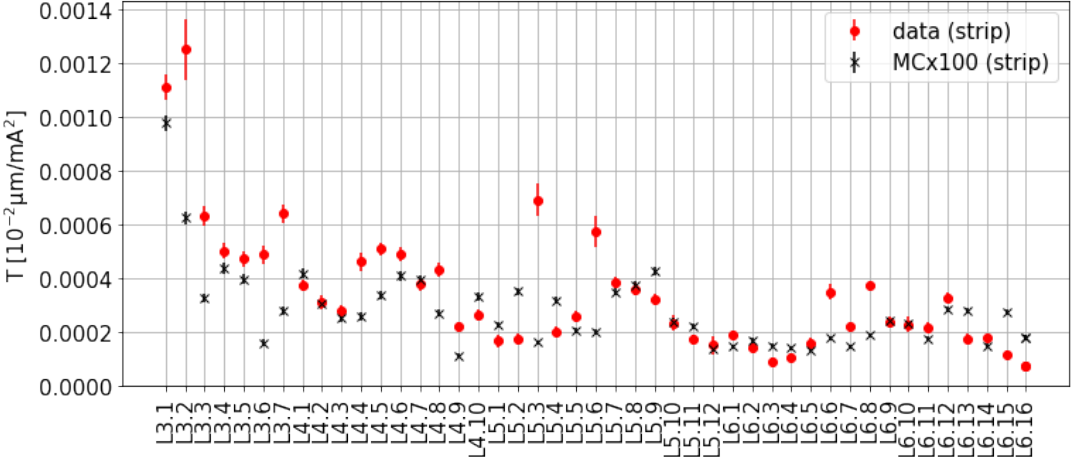
layer

HER T data vs MC (7 Dec. 2019)



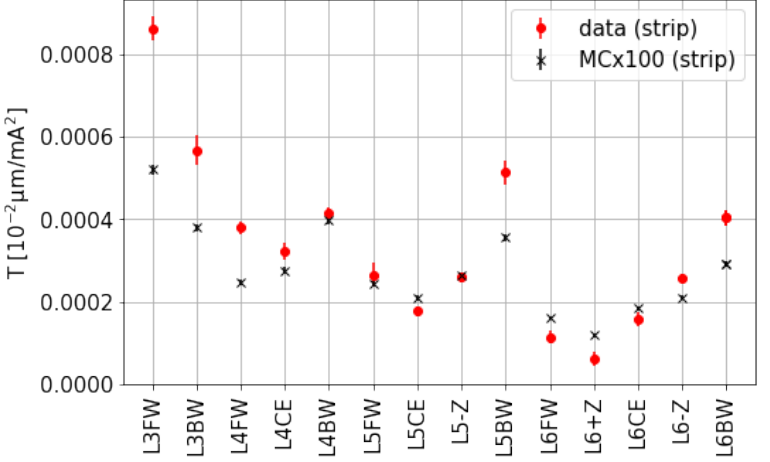
phi

HER T data vs MC (7 Dec. 2019)



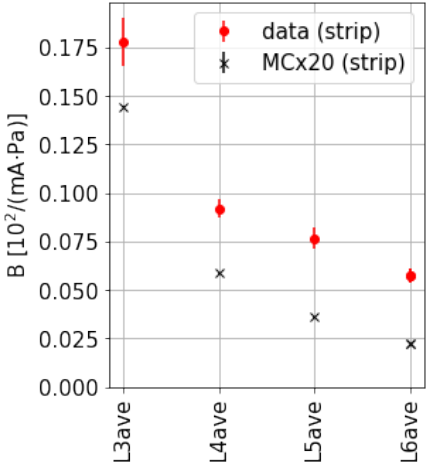
Z

HER T data vs MC (7 Dec. 2019)

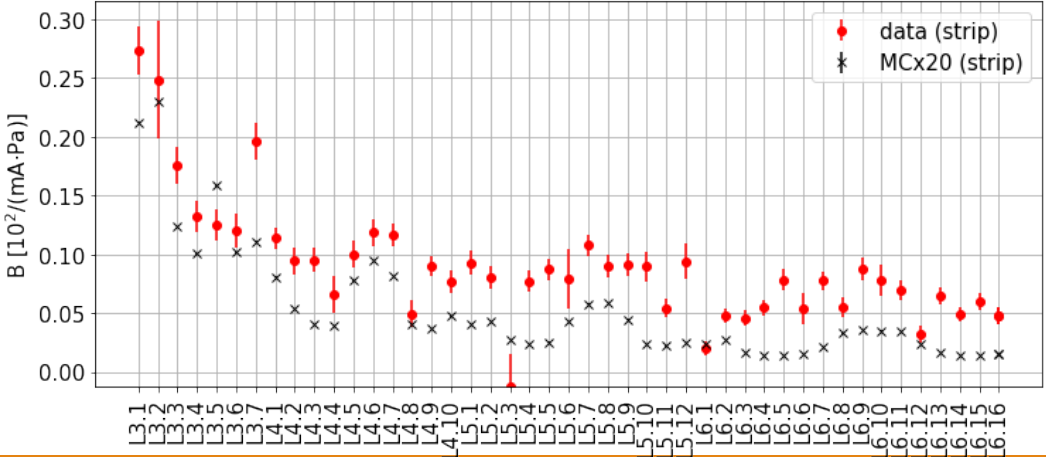


Beam-gas

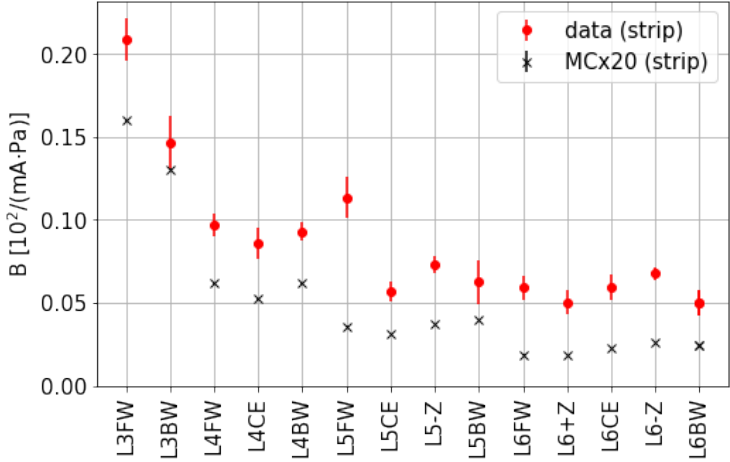
HER B data vs MC (7 Dec. 2019)



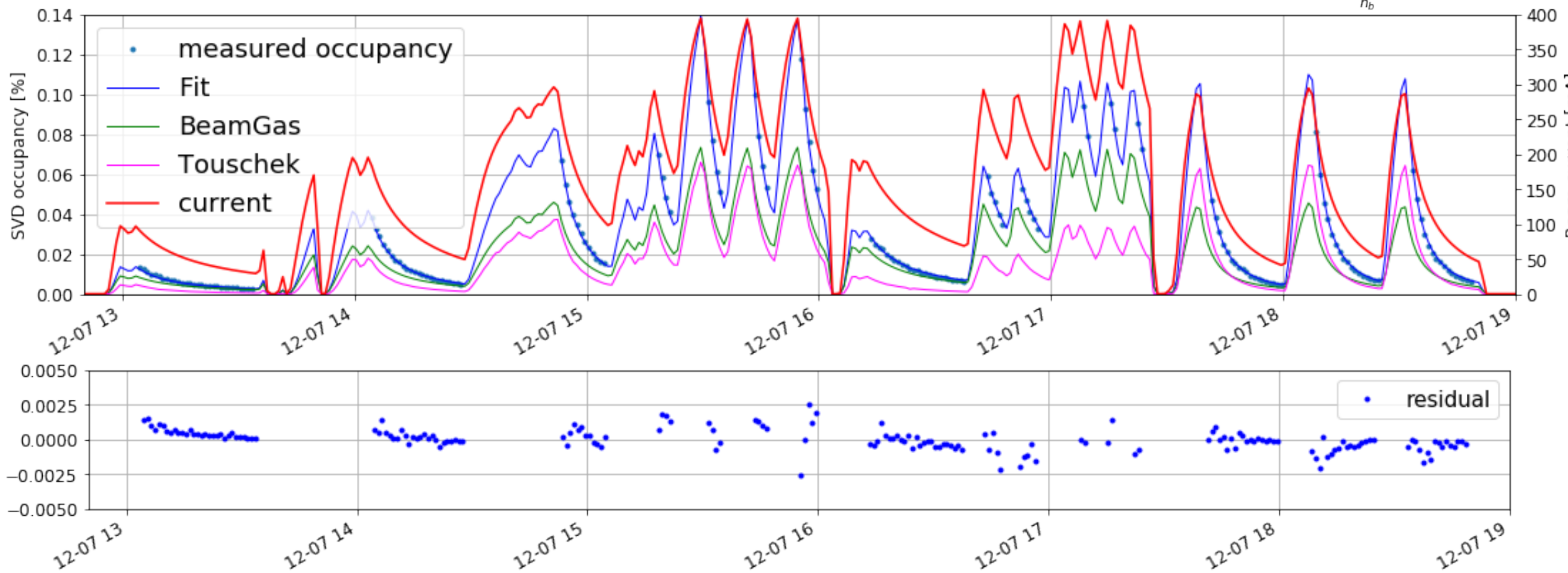
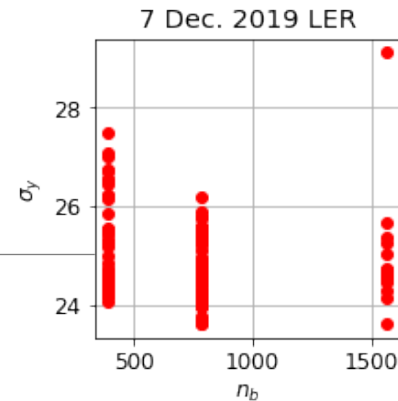
HER B data vs MC (7 Dec. 2019)



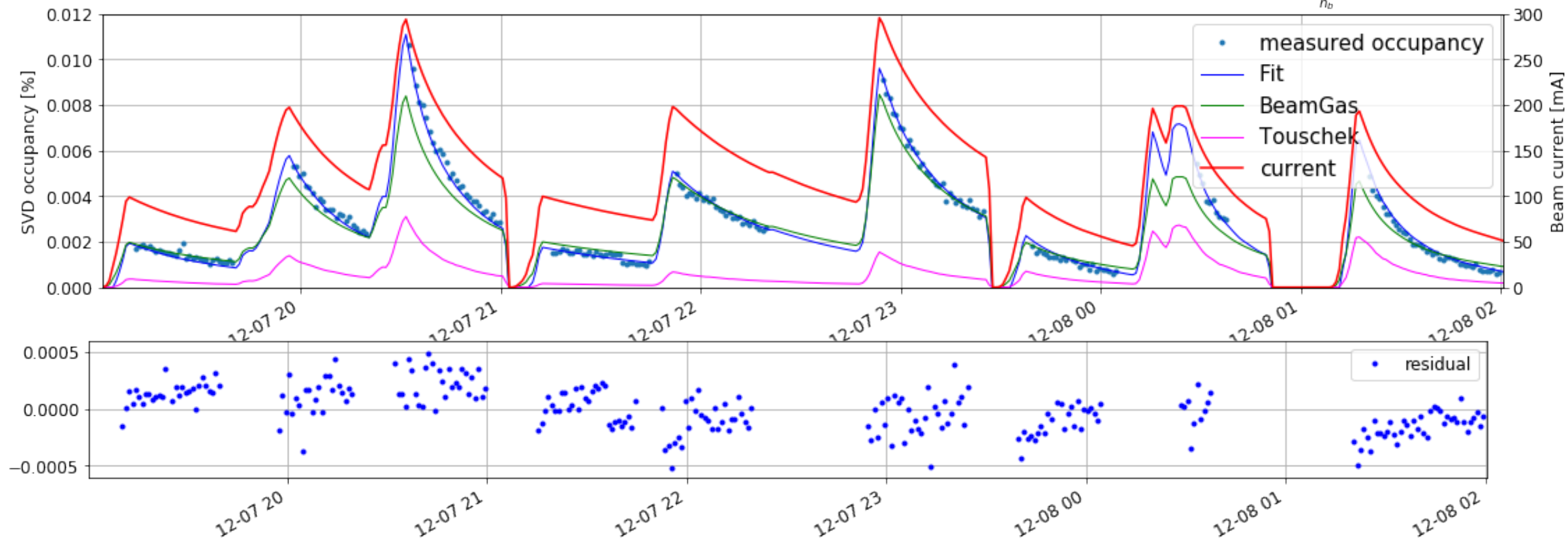
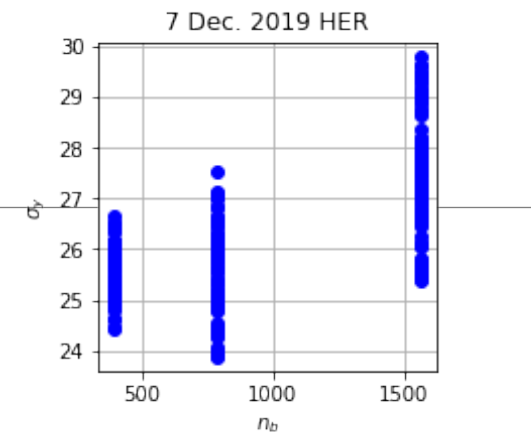
HER B data vs MC (7 Dec. 2019)



2019 Dec 7, LER



2019 Dec 7, HER



HER highE cluster

