



日本天文学会2025年秋季年会@海峡メッセ下関

2025年9月9-11日

# 超小型X線衛星 NinjaSat 搭載ガス検出器 GMC の 応答関数の構築

## 武田 朋志 (広島大学)

玉川 徹 (理研), 榎戸 輝揚 (京都大), 北口 貴雄, 加藤 陽, 三原 建弘 (理研), 岩切 渉 (千葉大), 沼澤 正樹 (都立大), 大田 尚享, 青山 有未来, 岩田 智子, 高橋 拓也, 山崎 楓, 土屋 草馬, 中野 遥介, 周 圓輝, 内山 慶祐, 吉田 勇登, 林 昇輝, 重城 新大, 渡部 蒼汰 (理研/東理大), 喜多 豊行 (千葉大), 一番ヶ瀬 麻由 (立教大), 佐藤 宏樹 (理研/芝浦工大), Chin-Ping Hu (彰化師範大/理研), 高橋 弘充 (広島大), 小高 裕和 (大阪大), 丹波 翼 (ISAS/JAXA), 谷口 絢太郎 (理研/早大)

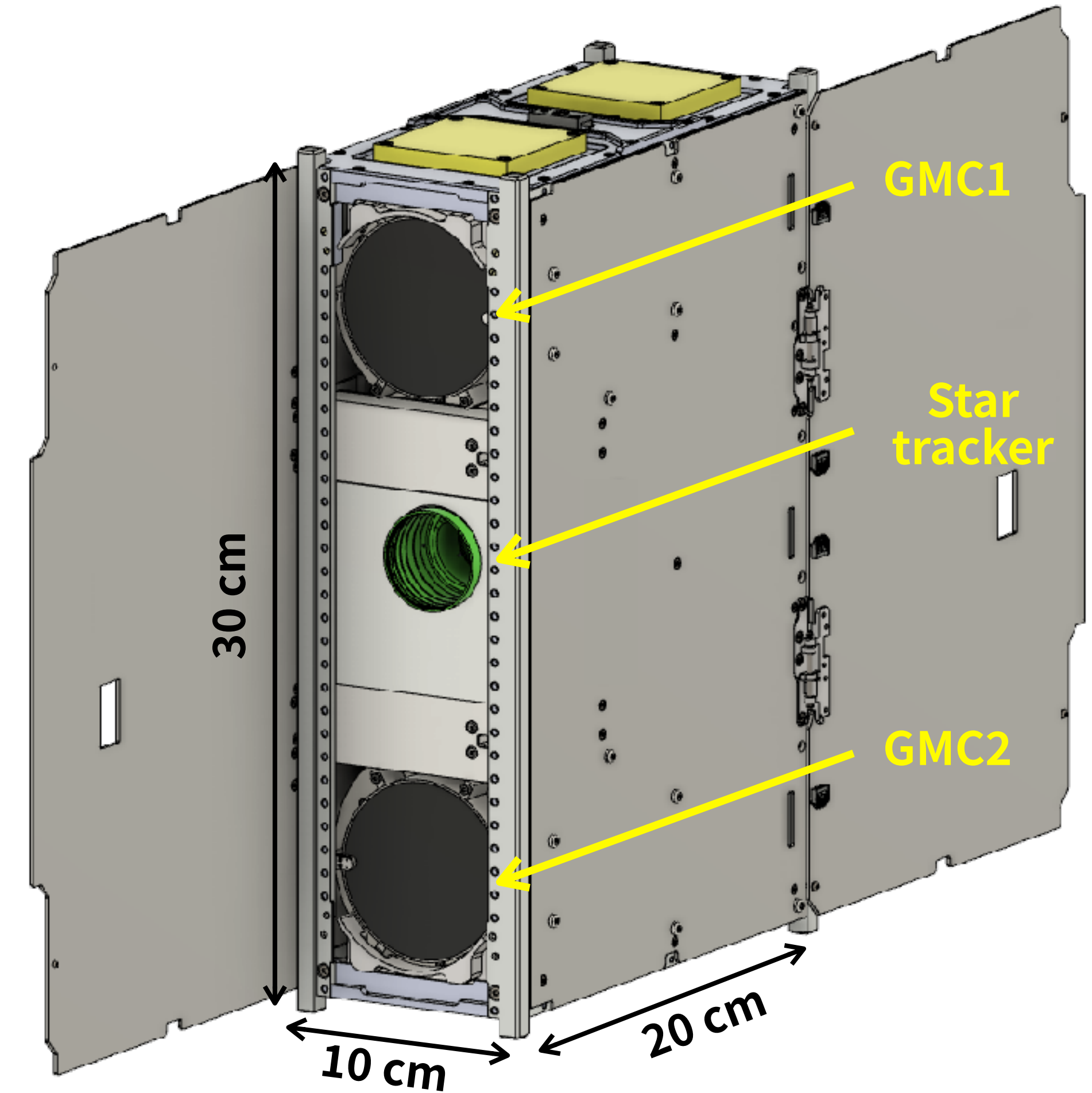


## ■ 6U サイズ (10×20×30 cm<sup>3</sup>) の超小型X線衛星

- 2023年11月打ち上げ, 2024年2月から科学観測開始
- 来週中に大気圏突入予定
- 約1.5年間の科学観測

## ■ ガスX線検出器 Gas Multiplier Counter (GMC) × 2台

- サイズ ~ 1U (10 cm 立方), 重量 ~1.2 kg
- 封入ガス: XeArDME (75%/24%/1%) @1.2 atm
- ガス電子増幅フォイル (GEM) で電子数を数百倍に増幅
- コリメータ型で視野角 2.1° (FWHM)
- 観測エネルギー帯域: 2–50 keV
- 有効面積: 32 cm<sup>2</sup> @6 keV /2台 (超小型衛星では過去最大)



総電力 : 16 W

総重量 : 8.4 kg

# 超小型X線衛星 NinjaSat

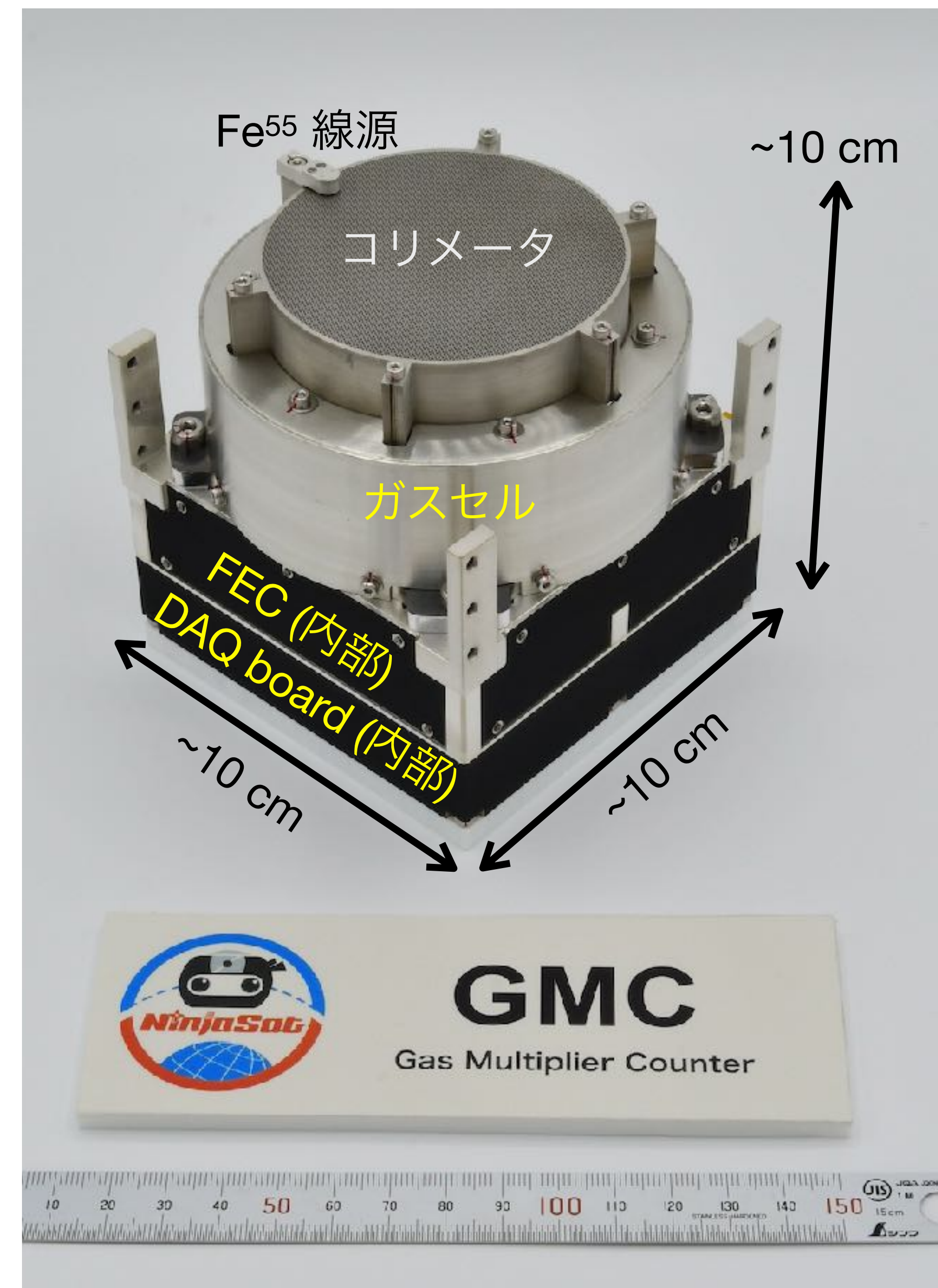
## ■ 6U サイズ (10×20×30 cm<sup>3</sup>) の超小型X線衛星

- 2023年11月打ち上げ, 2024年2月から科学観測開始
- 来週中に大気圏突入予定
- 約1.5年間の科学観測

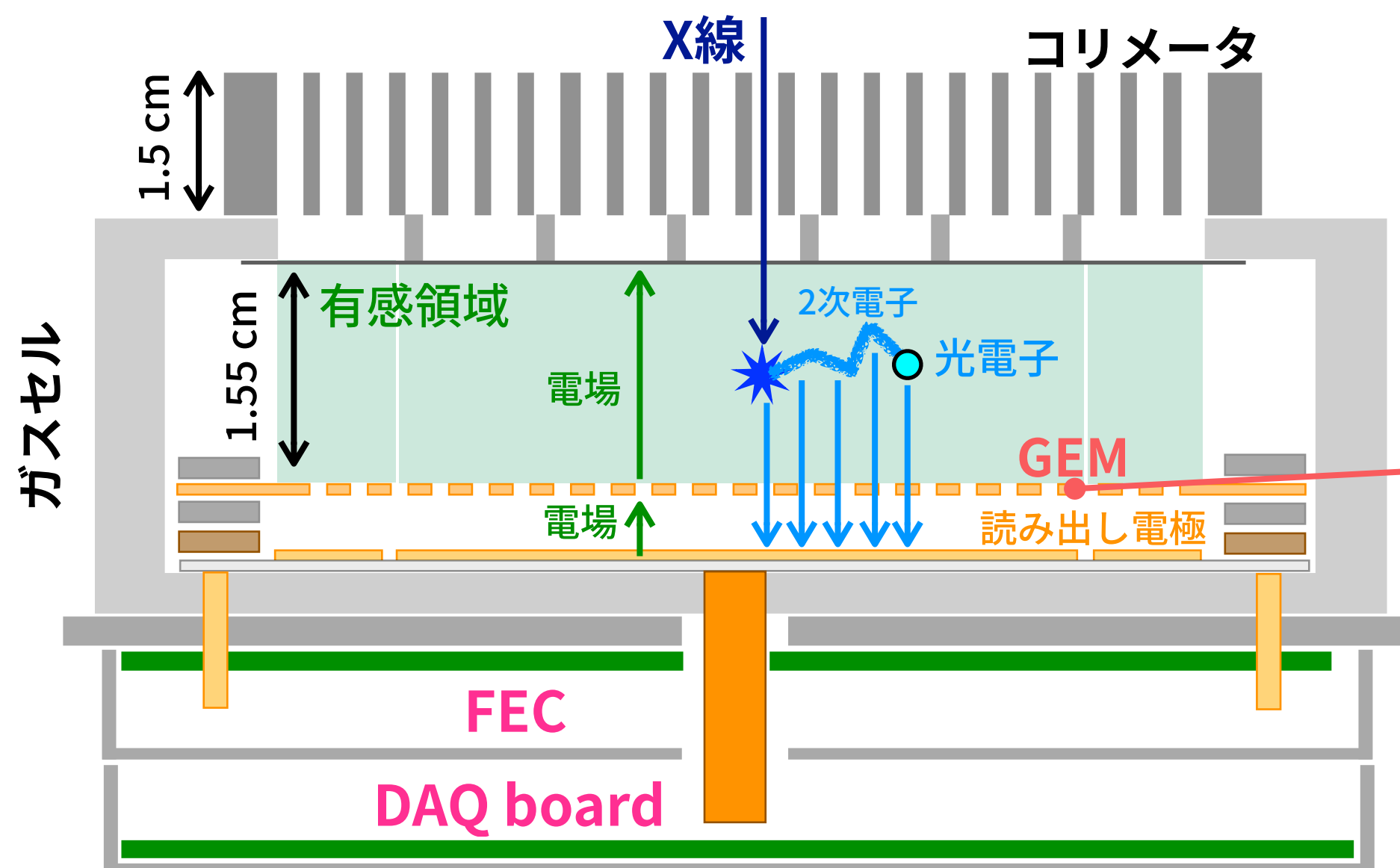
## ■ ガスX線検出器 Gas Multiplier Counter (GMC) × 2台

- サイズ ~ 1U (10 cm 立方), 重量 ~1.2 kg
- 封入ガス: XeArDME (75%/24%/1%) @1.2 atm
- ガス電子増幅フォイル (GEM) で電子数を数百倍に増幅
- コリメータ型で視野角 2.1° (FWHM)
- 観測エネルギー帯域: 2–50 keV
- 有効面積: 32 cm<sup>2</sup> @6 keV /2台 (超小型衛星では過去最大)

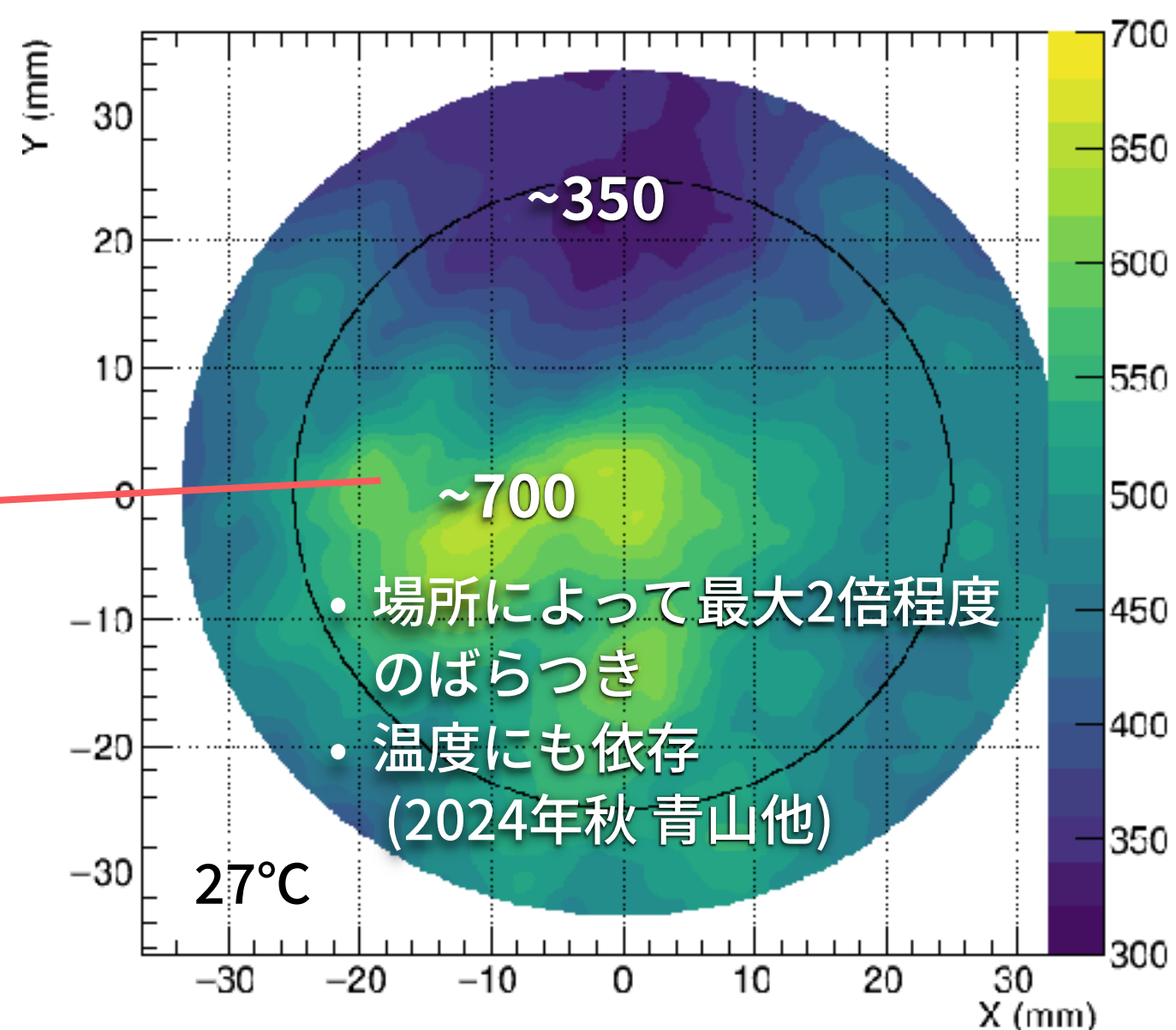
**本研究の目的: 応答関数 (レスポンスファイル) の作成**



### GMC の断面図



### GEM の電子増幅度マップ



### X線信号模擬の流れ

Geant4

光電効果でガスセル内に生じる  
二次電子の3次元分布の取得

C++ コード

Be窓-GEM 間における  
電子の輸送・拡散

GEM による電子増幅

GEM-電極間における  
電子の輸送・拡散

アナログ回路の応答の畳み込み

- GMC の応答関数は (1) X線エネルギー (2) 検出位置 (3) 温度 に依存

→ 実験データのみから応答を作成するのは現実的ではない

→ モンテカルロ・シミュレータの開発

- 計算コスト削減のため工夫: 電子の輸送・拡散・増幅

- 🙅 素過程 (e.g, 電子とガスの衝突) まで再現すると計算コストが膨大

- 🙇 確率分布でモデル化することで、計算量を削減 (e.g., Kitaguchi+2014)

# 二次電子の3次元分布の取得

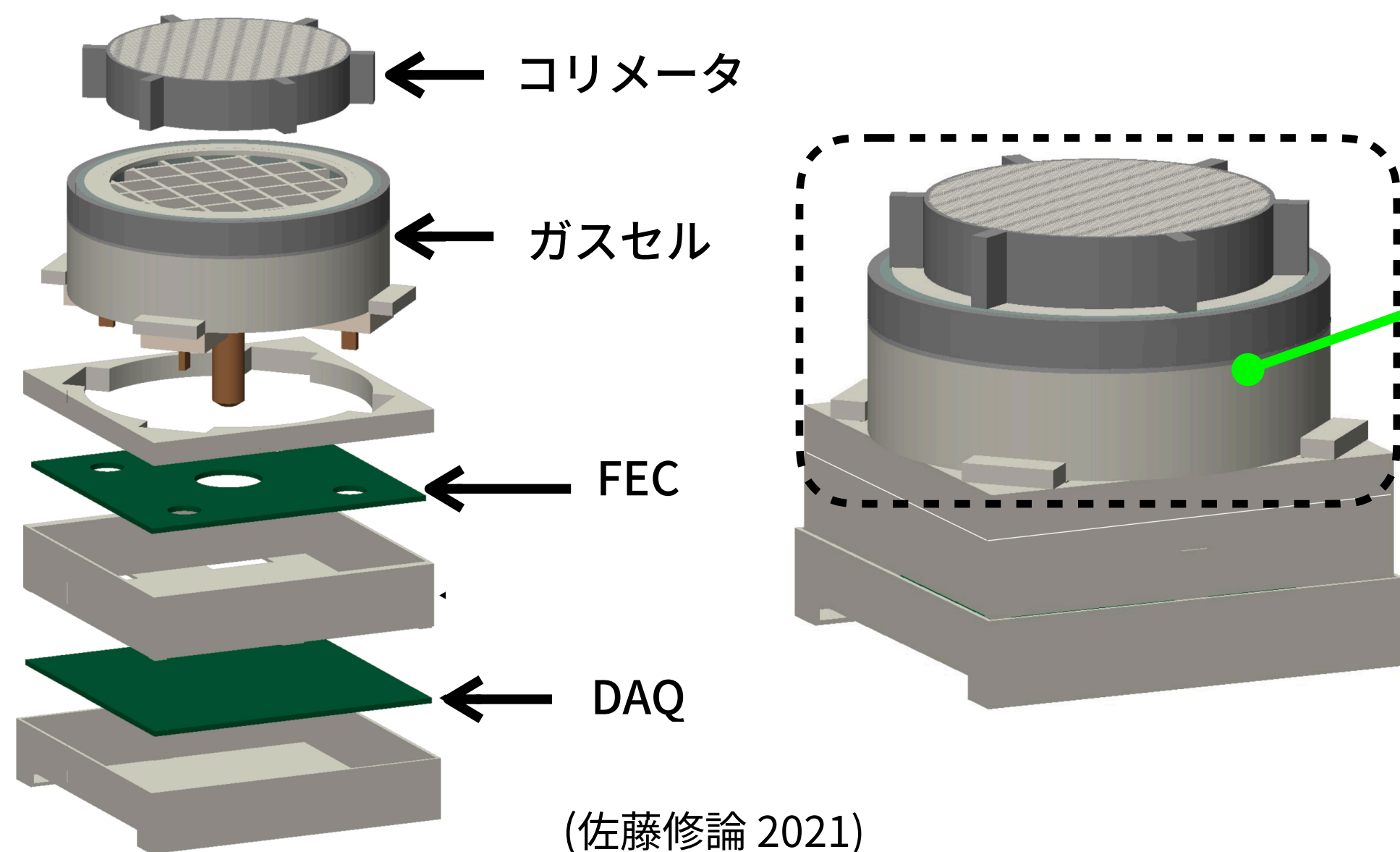
## Geant4 で GMC のジオメトリを実装

## 二次電子の3次元分布

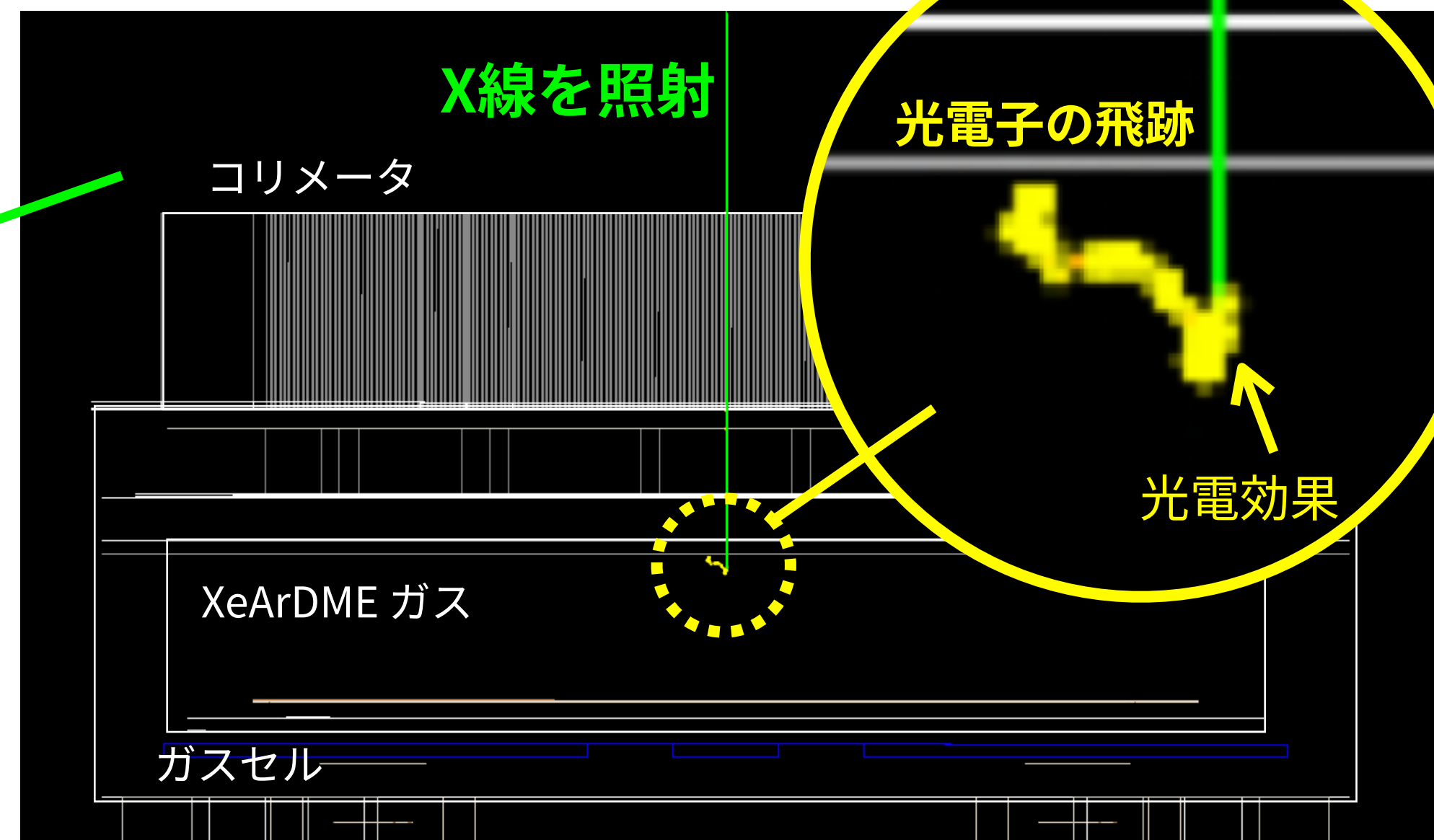
- Geant4 では有限サイズのステップごとに、位置 (x, y, z) と エネルギー損失 を取得可能
- 平均イオン化エネルギーを用いてエネルギー損失を電子数に変換

✓ 平均イオン化エネルギー  $w = 23 \text{ eV}$   
 ✓ Fano factor  $F = 0.2$

Geant4 モデル



X線イベントの例



## Geant4

二次電子の分布

C++

Be窓-GEM 間  
電子輸送・拡散

GEM による  
電子増幅

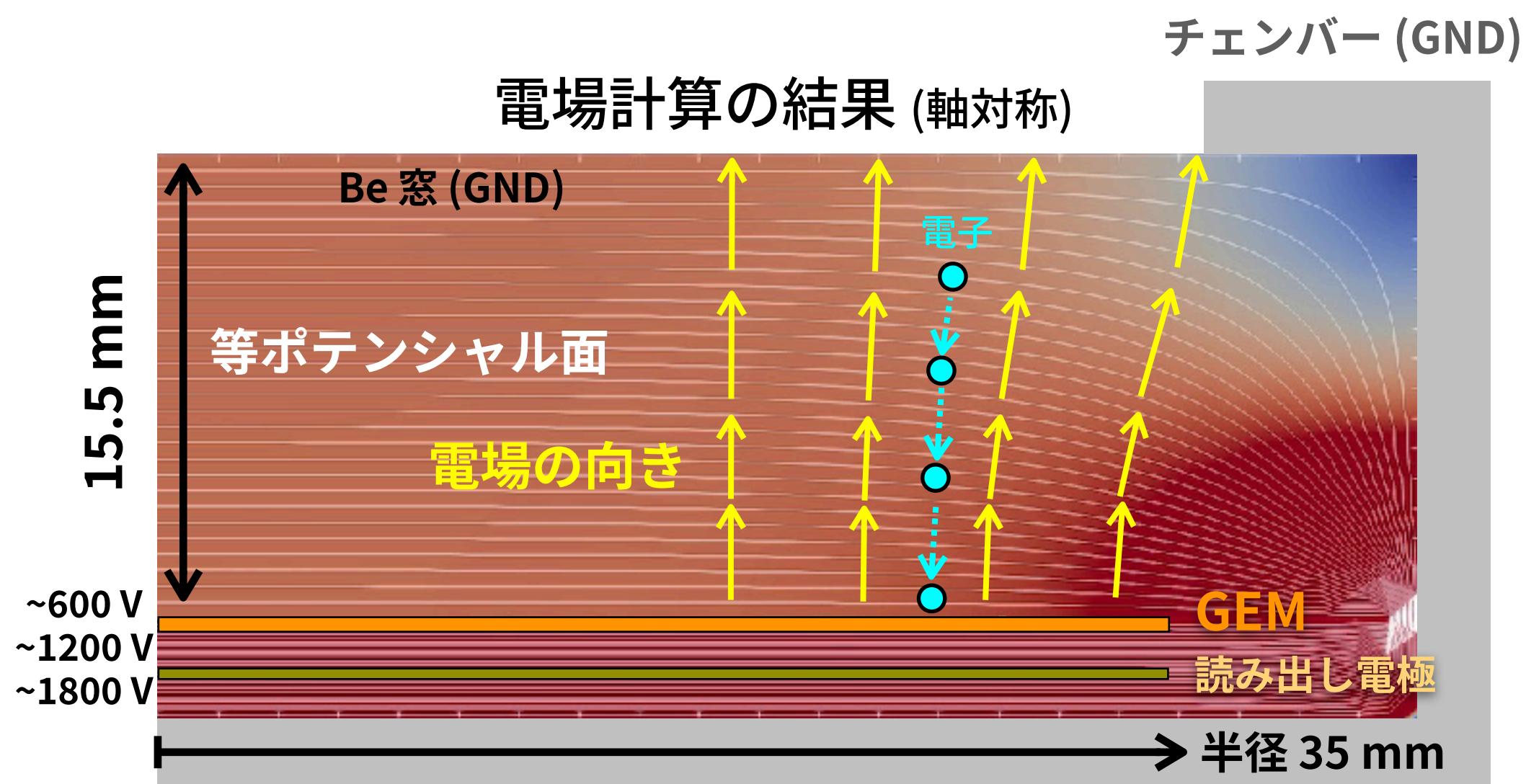
GEM-電極間  
電子輸送・拡散

回路応答  
の畳み込み

## 電子の マクロな輸送経路 と 拡散 に分けて実装

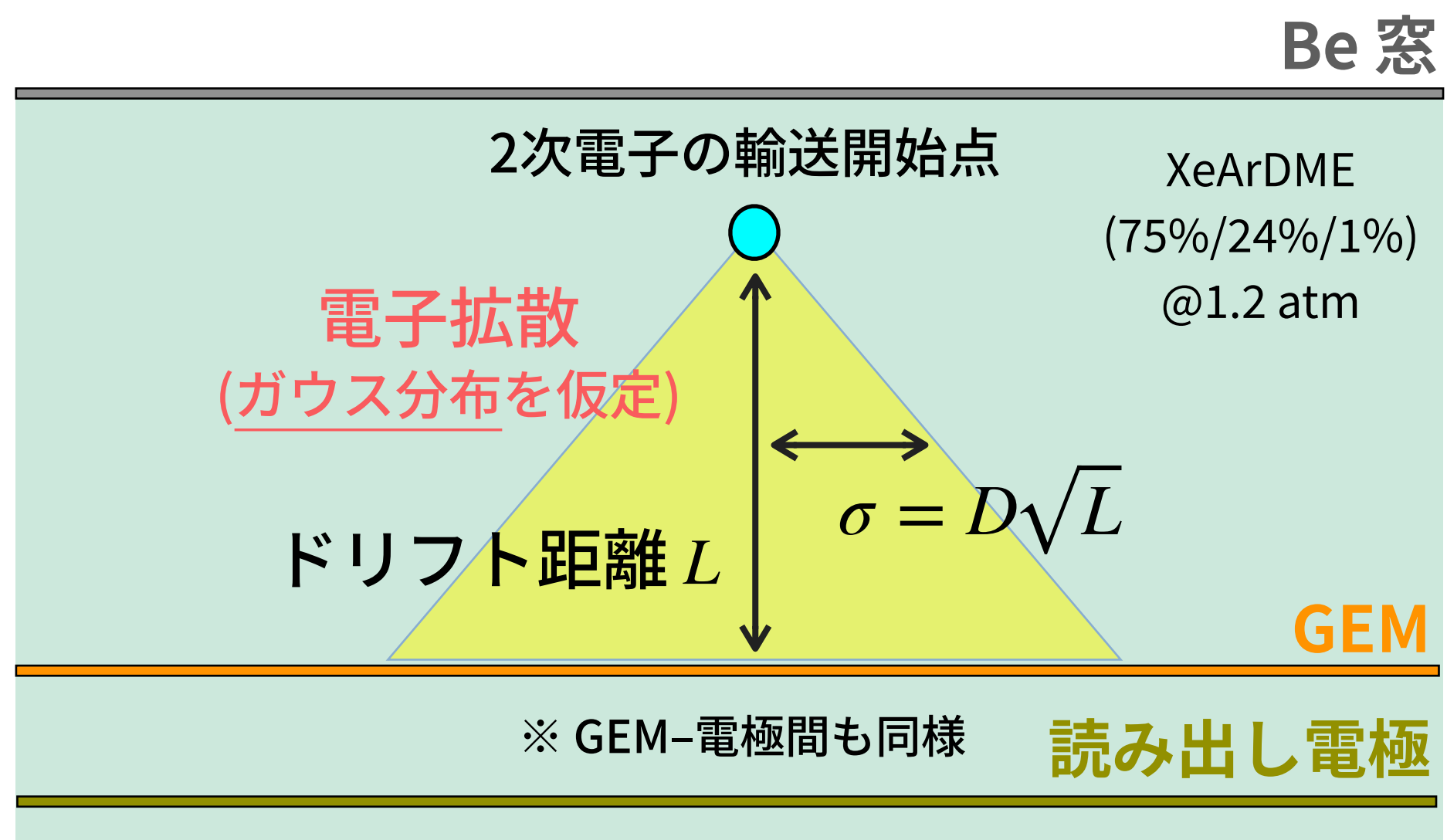
### マクロな輸送経路

- 有限要素法 (FEM) ソルバー Elmer を用いてガスセル内の電場を計算
- 二次電子の初期位置 と 輸送経路 が1対1対応 → あらかじめ求めておくことで高速化



### 電子拡散

- 電子拡散係数  $D$  電子輸送シミュレーションコード Magboltz より
  - Be窓-GEM:  $0.64 \text{ mm/cm}^{1/2}$
  - GEM-電極:  $0.49 \text{ mm/cm}^{1/2}$
- ガウス分布 ( $\sigma = D\sqrt{L}$ ) を仮定して乱数を振る



### Geant4

二次電子の分布

C++

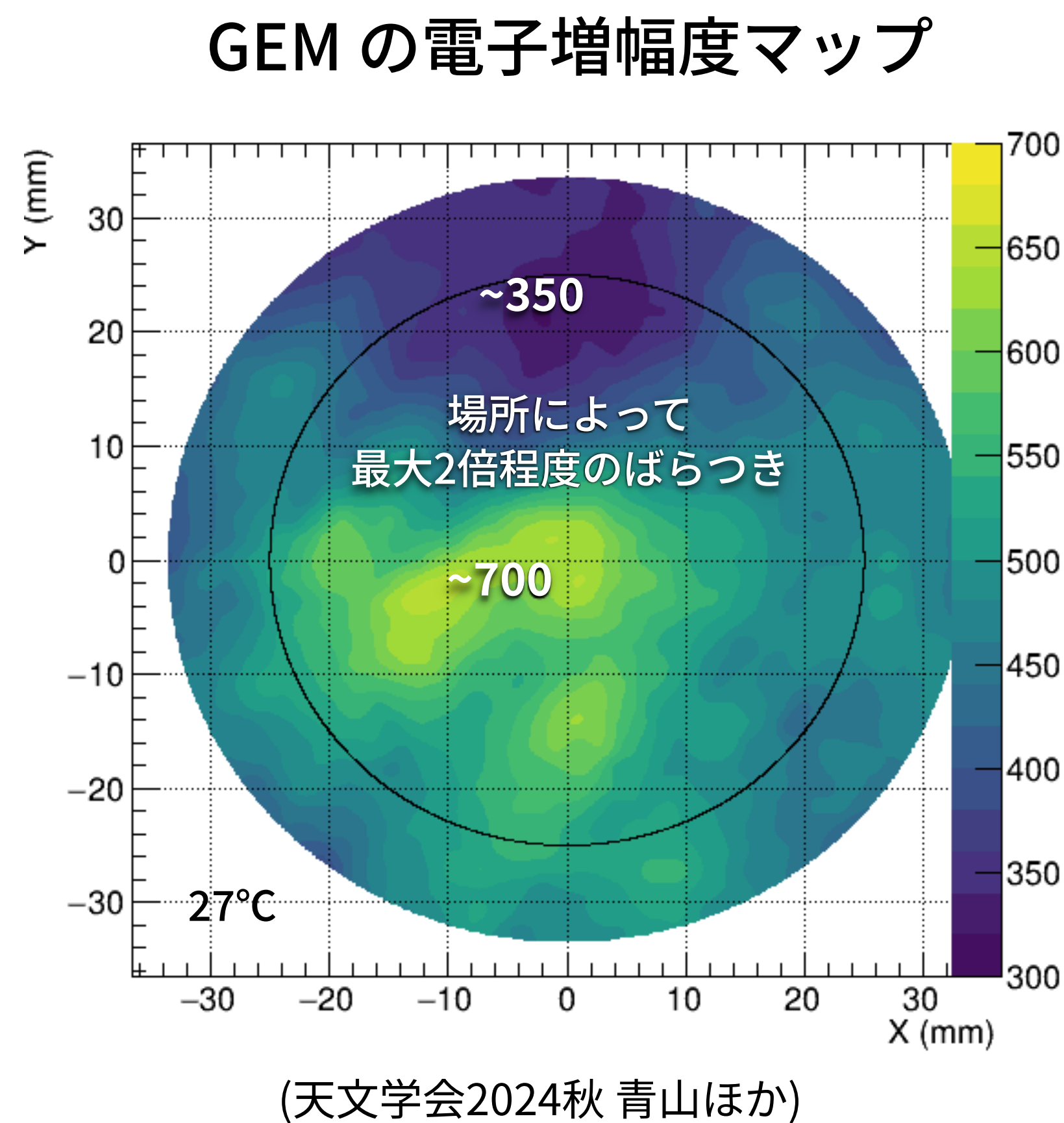
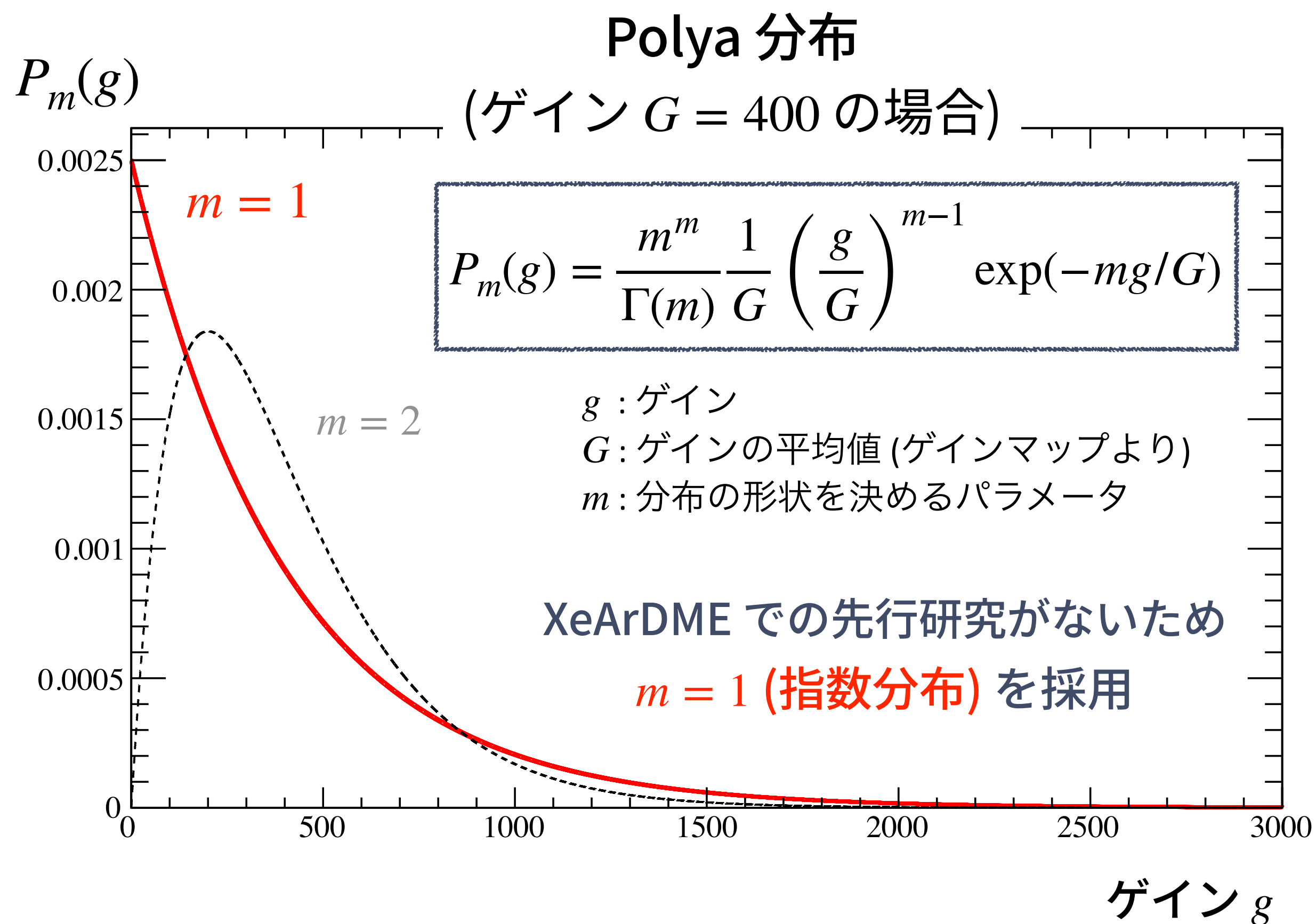
Be窓-GEM 間  
電子輸送・拡散

GEM による  
電子増幅

GEM-電極間  
電子輸送・拡散

回路応答  
の畳み込み

- 各二次電子の増幅後の分布が Polya 分布に従うと仮定
- 各点のゲインの平均値  $G$  として、実測の電子増幅度マップを使用



Geant4

二次電子の分布

C++

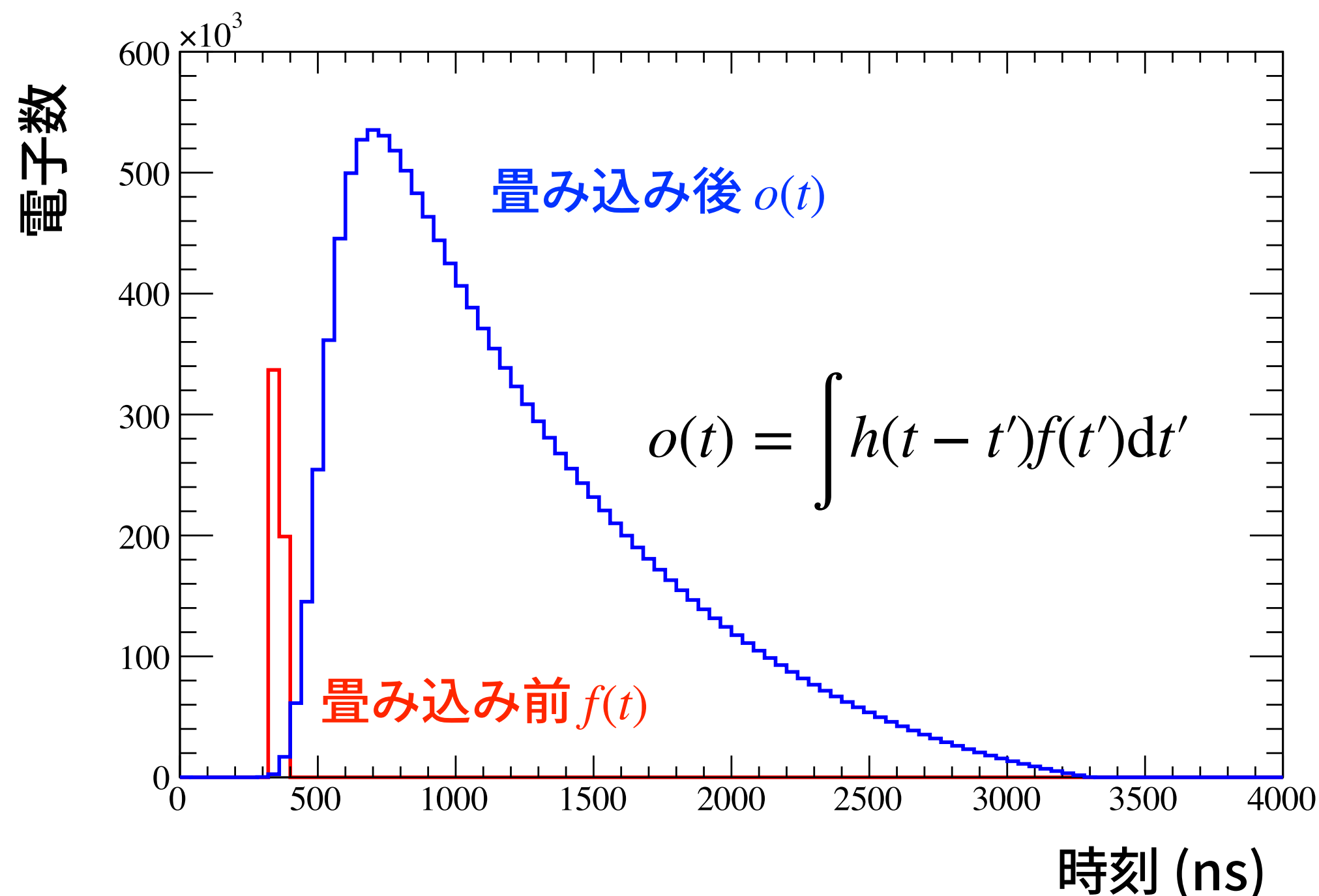
Be窓-GEM 間  
電子輸送・拡散

GEM による  
電子増幅

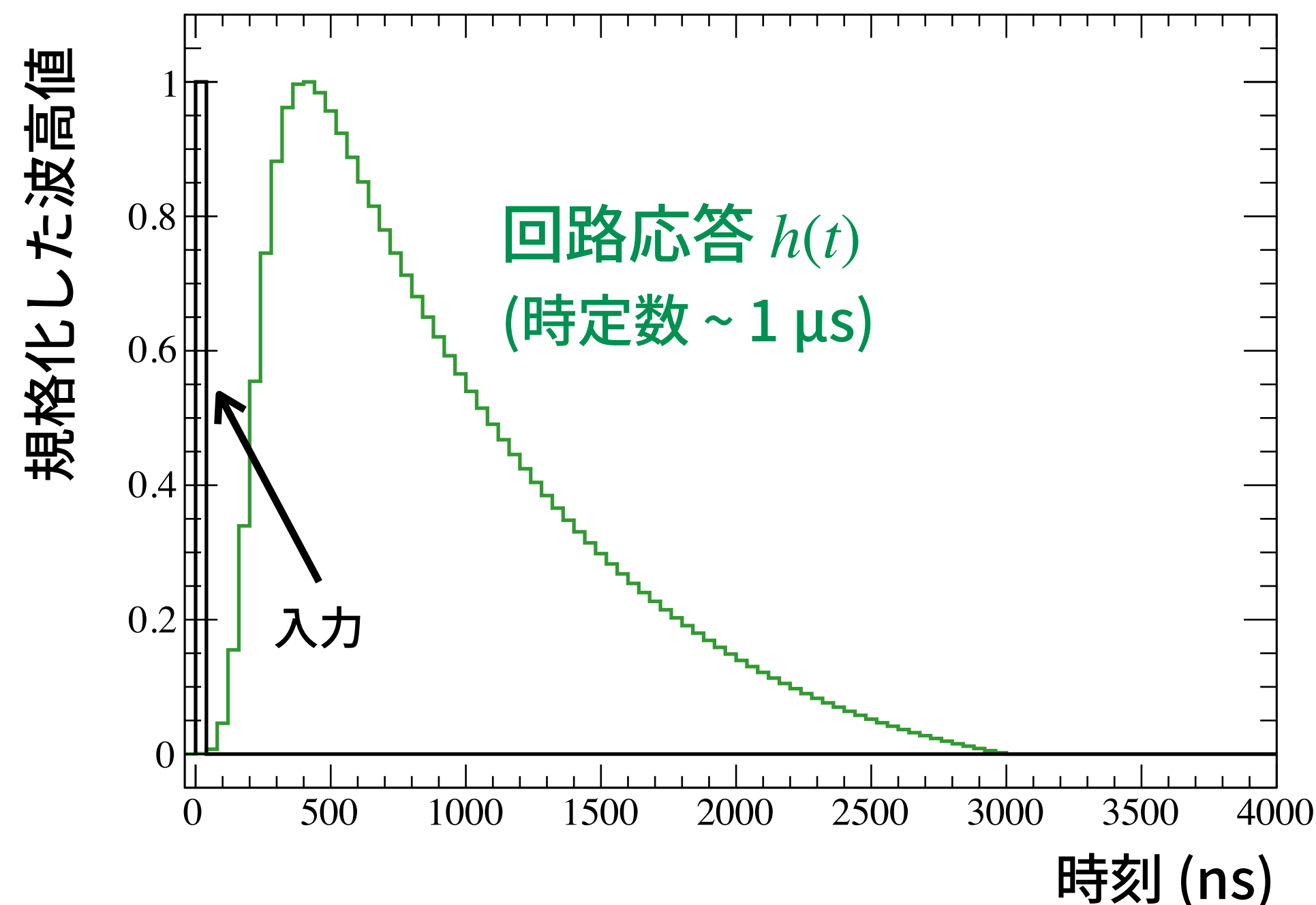
GEM-電極間  
電子輸送・拡散

回路応答  
の畳み込み

## 電子数 vs. 時刻



## アナログ回路の応答 (最大値で規格化)



- 各2次電子が電極に到達する時刻 = 電極までの距離 / 電子のドリフト速度
- 各時刻について、読み出し電極に到達する電子数を取得
- アナログ回路の応答を畳み込み、信号波形を模擬。波高値  $\propto$  検出エネルギー

開発したシミュレータを用いて GMC の応答関数 (レスポンスファイル) を作成

Geant4

二次電子の分布

C++

Be窓-GEM 間  
電子輸送・拡散

GEM による  
電子増幅

GEM-電極間  
電子輸送・拡散

回路応答  
の畳み込み

## 校正天体「かに星雲」のスペクトル

- “星間吸収 × べき” でよく合う
- NuSTAR 衛星による最近の観測結果 (Madsen+22) をリファレンスとして採用

## 検証結果 (エネルギーレンジ: 2-20 keV)

- NinjaSat は有効面積を 17% ほど過大評価 (今後の課題)
- 有効面積を全エネルギーで一律17%減少させると、NuSTAR の結果とエラーの範囲で一致することを確認

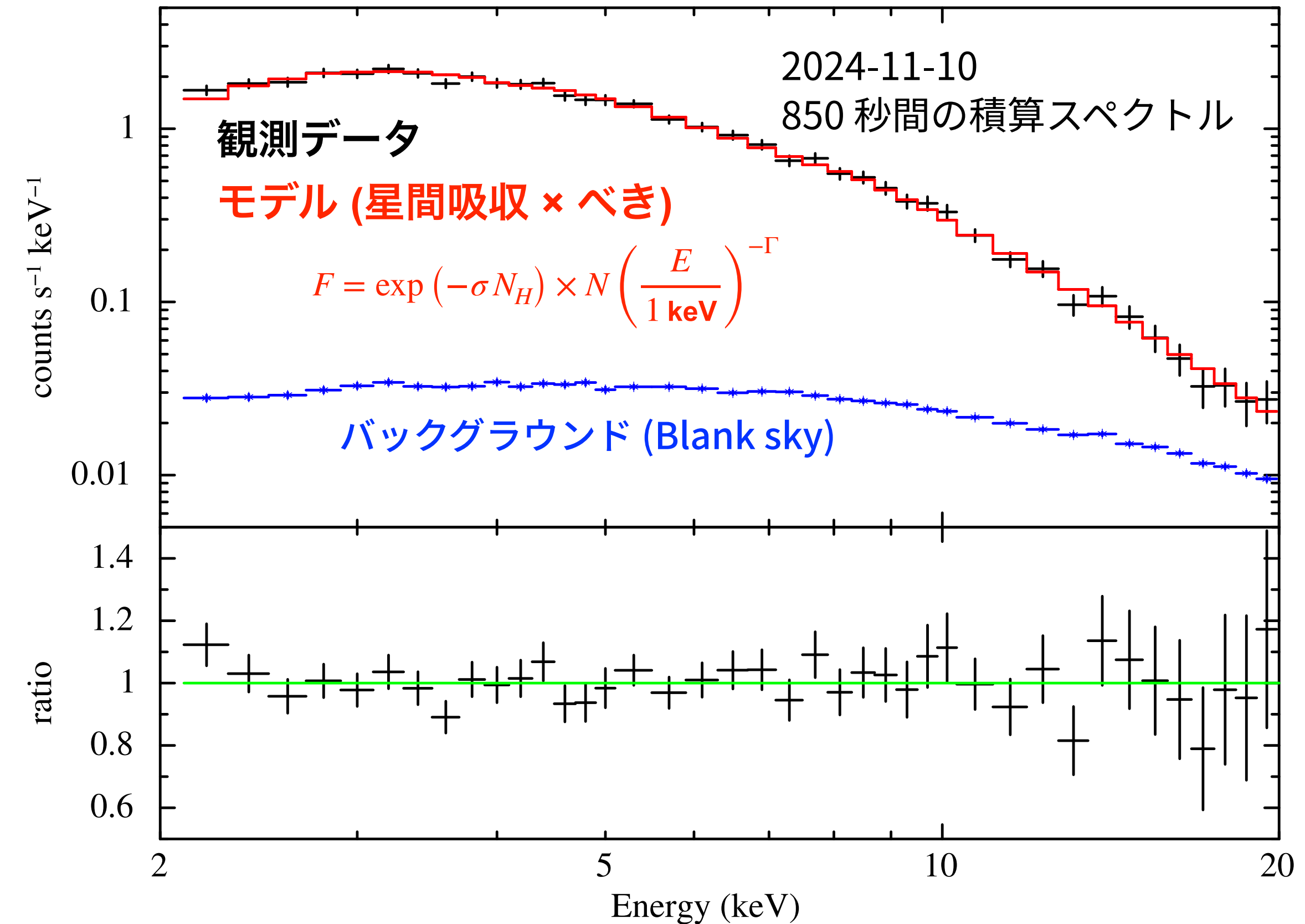
	NuSTAR (Madsen+22)	NinjaSat (有効面積補正なし)	NinjaSat (有効面積 -17%)
星間吸収 $n_H$ ( $10^{21} \text{ cm}^{-2}$ )	2.2	2.2 (fixed)	2.2 (fixed)
光子指数 $\Gamma$	2.103	2.12	2.13 ± 0.04
Norm. @1 keV (Photons $\text{keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	9.69	8.2	9.8 ± 0.7
2-10 keV フラックス ( $10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	2.09	1.74	2.08 ± 0.03

べきの値は一致

←→

-17% →

## エネルギースペクトルの例



### 開発した応答関数はすでに3つの観測論文で使用

- Aoyama+25: ApJL/arXiv 2504.04352
- Takeda+25: arXiv 2508.18837 (submitted to ApJL)
- Chin-Ping+25: submitted to ApJ

## ■ 超小型X線衛星 NinjaSat

- 2023年11月11日に打ち上げられた 6U サイズ (10 × 20 m × 30 cm<sup>3</sup>) の超小型衛星
- 明るいX線天体の迅速な追観測・長期観測を実現
- ガスX線検出器 Gas Multiplier Counter (GMC) を2台搭載

## ■ GMC の応答関数 (レスポンスファイル) の作成

- 新しく GMC のモンテカルロ・シミュレータを開発
- 特に、計算コスト削減のため、ガス中の電子の輸送・拡散・増幅を確率分布でモデル化し、高速化

## ■ 較正天体「かに星雲」を用いた応答関数の検証

- リファレンスである NuSTAR の観測 (Madsen+22) と比較して、有効面積を 17% 過大評価 (今後の課題)
- 有効面積をスケールすることで、NuSTAR の結果とエラーの範囲で一致することを確認
- 開発した検出器応答はすでに3つの観測論文 (Aoyama+25, Takeda+25, Chin-Ping+25) で使用

