

# ワイヤーチェンバーの ゲイン低下モデルの検証

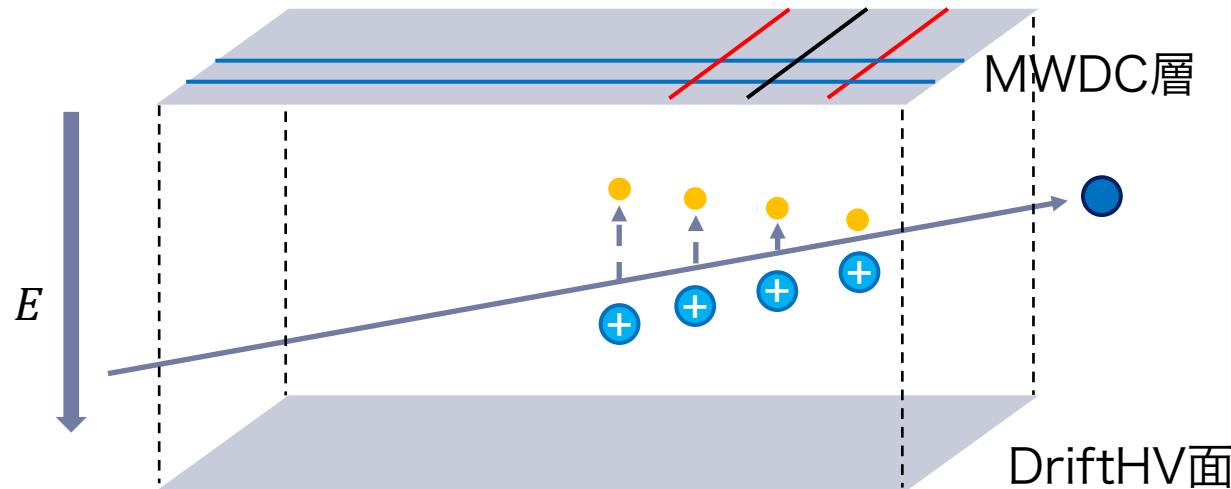
東京大学大学院 理学系研究科  
茂木 駿紀

# Time Projection Chamber(TPC)

- ▶ MWDC層+ドリフト部から形成される検出器
- ▶ 粒子の3次元飛跡トラッキングが可能

## ガス動作TPCの例

- ▶ ドリフト部を荷電粒子が通過するとガスが電離される
- ▶ 電子は電場によってMWDC層方向へとドリフトされる
- ▶ Anode wire近傍に到達した電子はカスケードを起こし増幅される



# 背景

## ▶ J-PARCでの中性子寿命測定実験

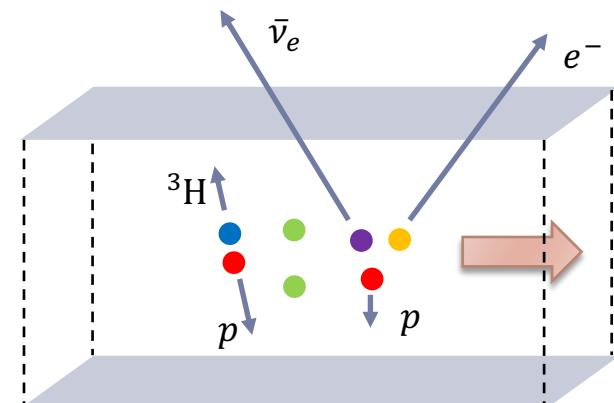
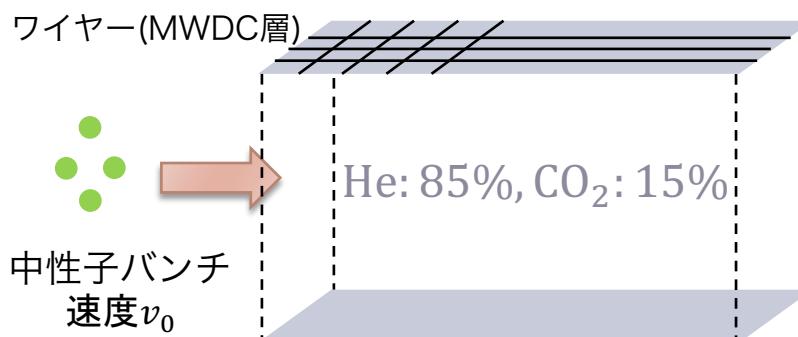
$^3\text{He}$ 吸収事象( $n + ^3\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + p$ )と $\beta$ 崩壊事象( $n \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + p$ )を  
Time Projection Chamber(TPC)で同時に計測

$$\tau_n = \frac{1}{\rho \sigma_0 v_0} \left( \frac{N_{^3\text{He}} / \varepsilon_{^3\text{He}}}{N_\beta / \varepsilon_e} \right)$$

で寿命を求める

→系統誤差の一部をキャンセル

$v_0$	中性子ビームの速度(2200m/s)
$\sigma_0$	$^3\text{He}$ 吸収事象の断面積( $v_n = v_0$ )
$\rho$	$^3\text{He}$ の個数密度
$N_{^3\text{He}}$	$^3\text{He}$ 吸収事象の検出イベント数
$N_\beta$	$\beta$ 崩壊事象の検出イベント数
$\varepsilon$	検出効率



# 背景

$^3\text{He}$ 吸収事象と $\beta$ 崩壊事象は主にエネルギーで区別できる

- ▶  $^3\text{He}$ 吸収事象

エネルギー損失大(陽子 :  $\sim 770\text{keV}$ )

- ▶  $\beta$ 崩壊事象

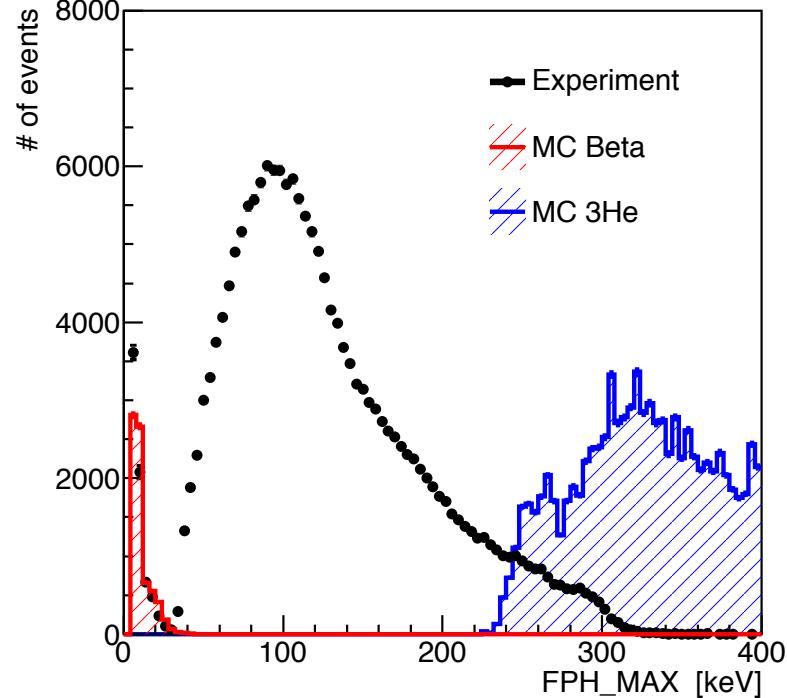
エネルギー損失小(電子 :  $\sim 10\text{keV}$ )

ところが、実際に得られたデータでは

$^3\text{He}$ 吸収事象（エネルギー損失大）において測定値とMCの間でずれが存在



このゲイン低下の定量的な評価を目指す

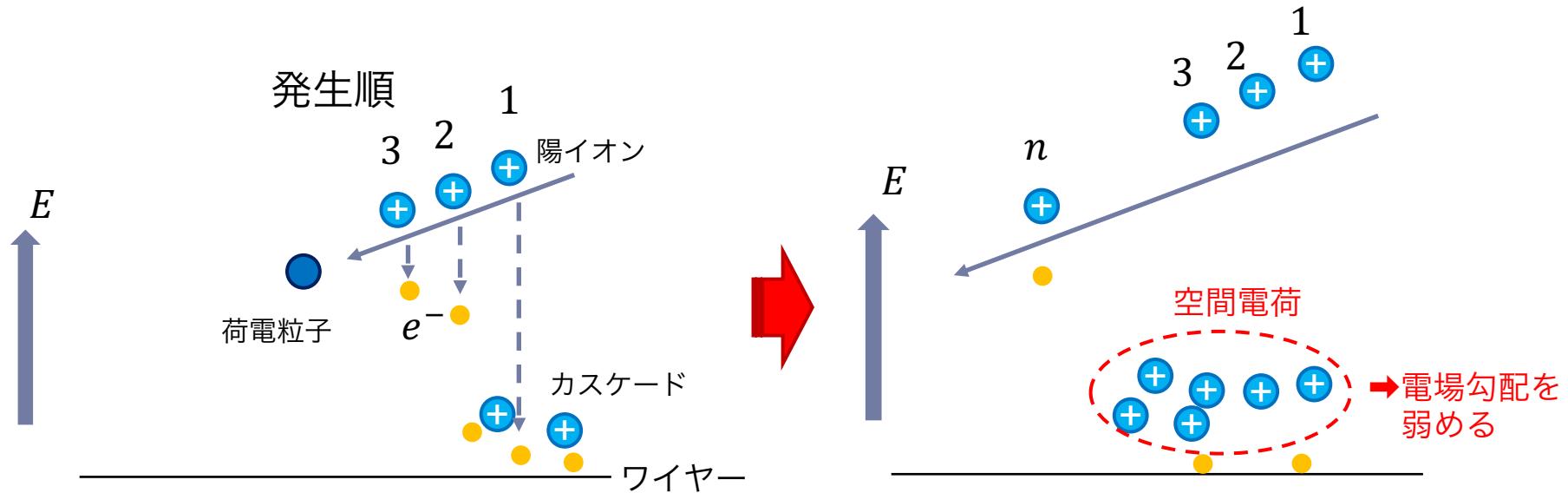


長倉直樹, 「Estimation of Systematic Uncertainties for Precise Neutron Lifetime Measurement」修士論文, 2016

# ゲイン低下モデルの提案

ワイヤーチェンバーを高い增幅率で動作させ、エネルギー・デポジットの大きな信号を測定する際、ゲイン低下が生じる

我々はこのゲイン低下を **自己誘導型空間電荷効果**によるものと考えた



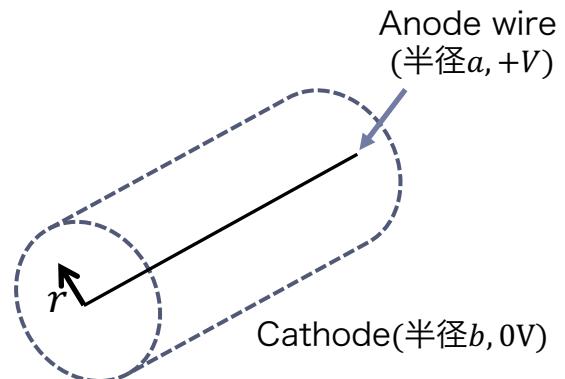
→ $n$ 番目に発生した電子が $n - 1$ 個の先行する電子（同一の荷電粒子による）のカスケードによる陽イオンの影響を受ける

# ゲイン低下モデルの提案

円筒型ワイヤーチェンバーにおいて空間電荷が軸対称に存在すると仮定(密度 $\rho(r)$ )

- ▶ ゲイン低下量 $s$ を以下で定義

$$s \equiv \frac{\log\left(1 + f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0\right)}{f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0}$$



$f$  : 空間電荷効果を押し込めたパラメータ (ガス種, ワイヤー径に依存)

$\Delta E / \Delta l$  : ワイヤー長当たりのエネルギー損失密度

$G_0$  : 空間電荷がないときの増倍率



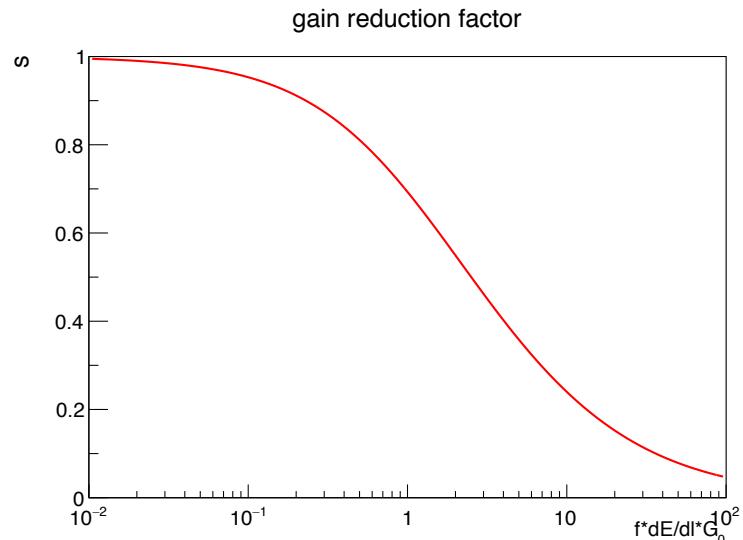
このモデルを検証し, 測定されたエネルギー損失の補正を行う

# ゲイン低下モデルの提案

## ▶ 測定量との関係

$$s = \frac{\log \left( 1 + f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0 \right)}{f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0}$$

$$(0 < s < 1)$$

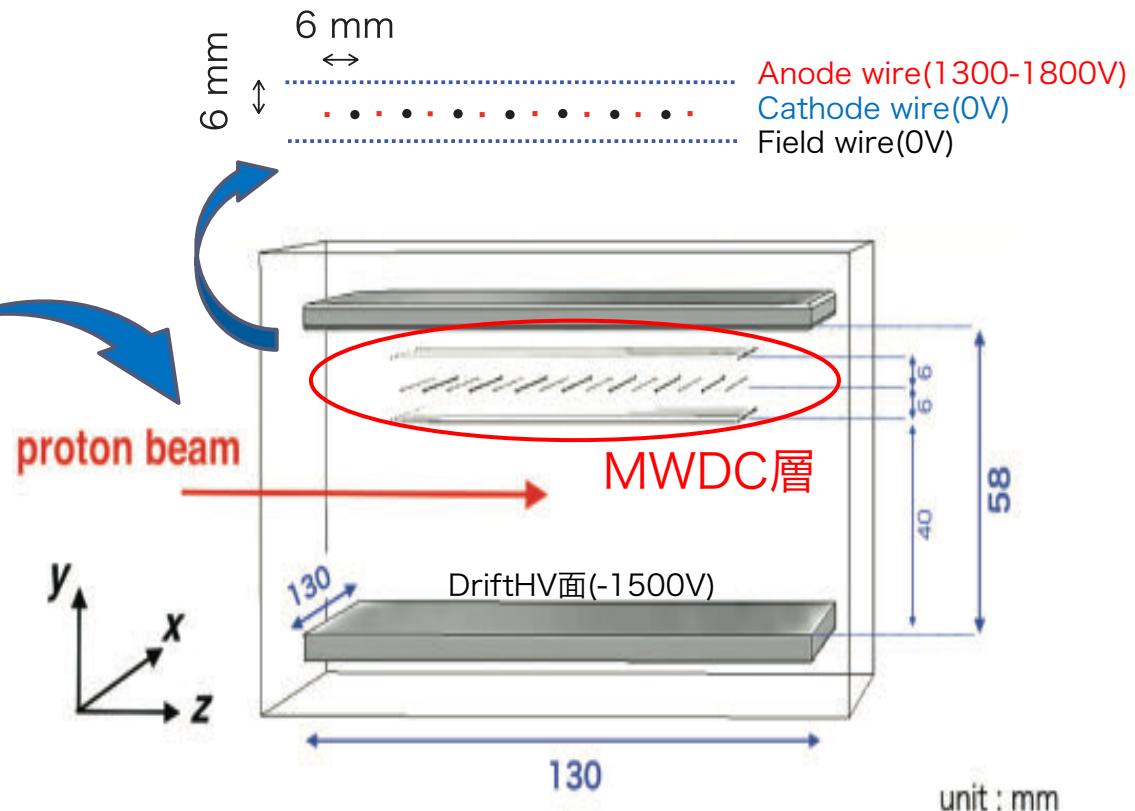
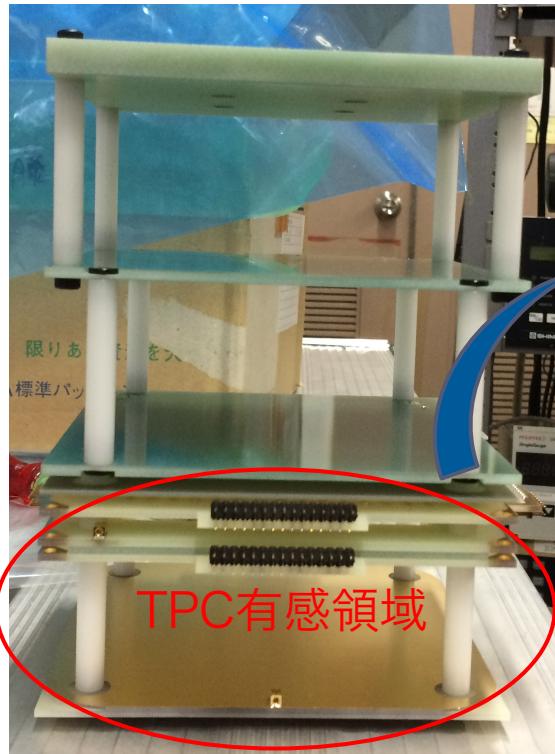


- $s$  : (実測のエネルギー損失) / (MCで計算したエネルギー損失)
- $\Delta E / \Delta l$  : 入射粒子に対するワイヤーの角度を変えた時のエネルギー損失から計算
- $G_0$  : <sup>55</sup>Feのデータでエネルギーキャリブレーションを行い算出
- $f$  : ?? → フィッティングパラメータ

# ゲイン低下モデルの検証

TPCを作成し、陽子ビームを用いてゲインを測定

製作したTPC

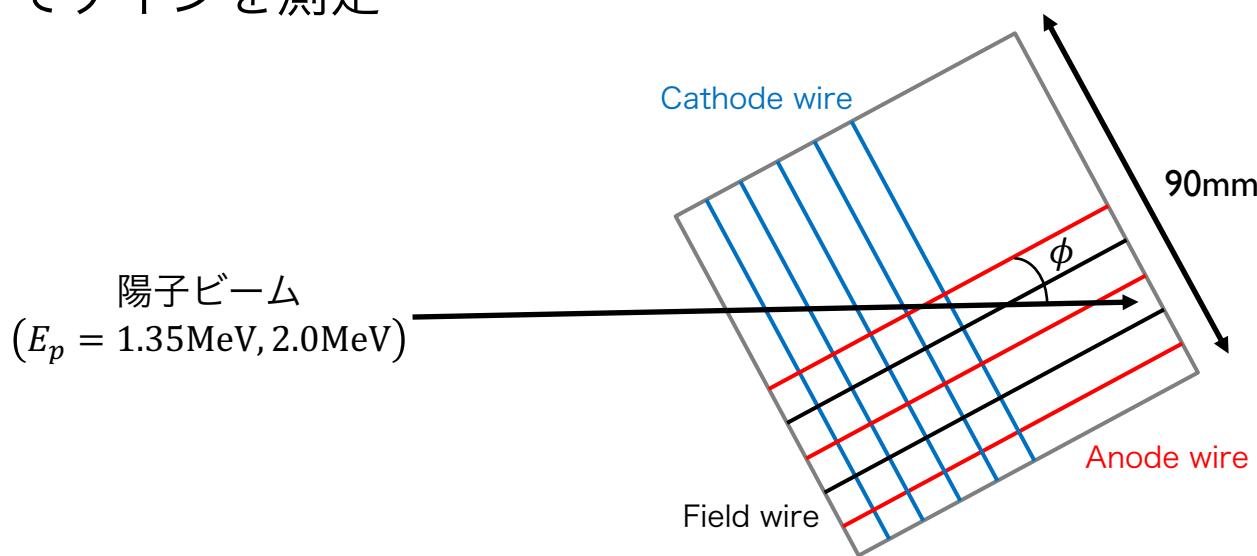


# ゲイン低下モデルの検証

筑波大学1MVタンデトロン加速器を用いてTPCに陽子ビームを入射

- ・ 陽子ビームのエネルギー  $E_p$  : 1.35MeV, 2.0MeV
- ・ Anode wireのビームに対する角度  $\phi$  :  $40^\circ - 90^\circ$
- ・ Anode電圧  $V_0$  : 1300V – 1800V(增幅率  $10^3 - 10^4$  に相当)
- ・ ガス : He 85%, CO<sub>2</sub> 15% (1 atm)

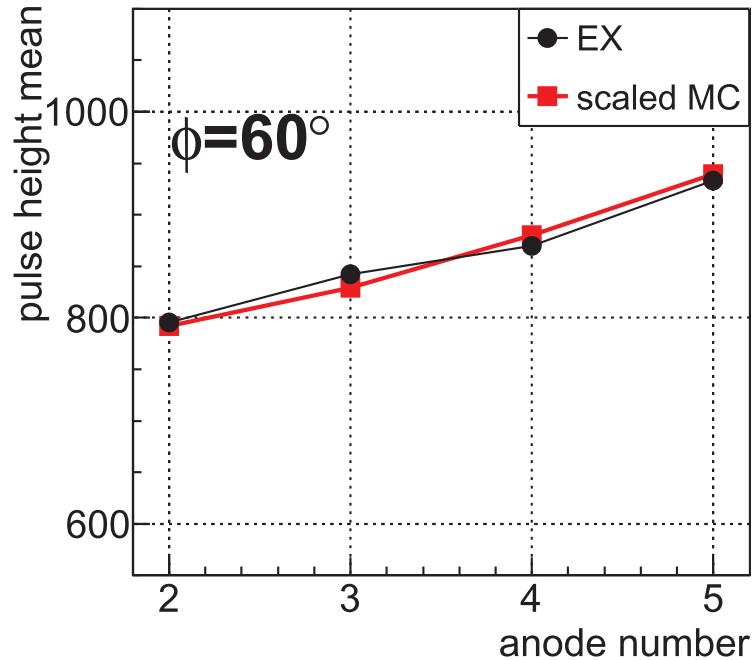
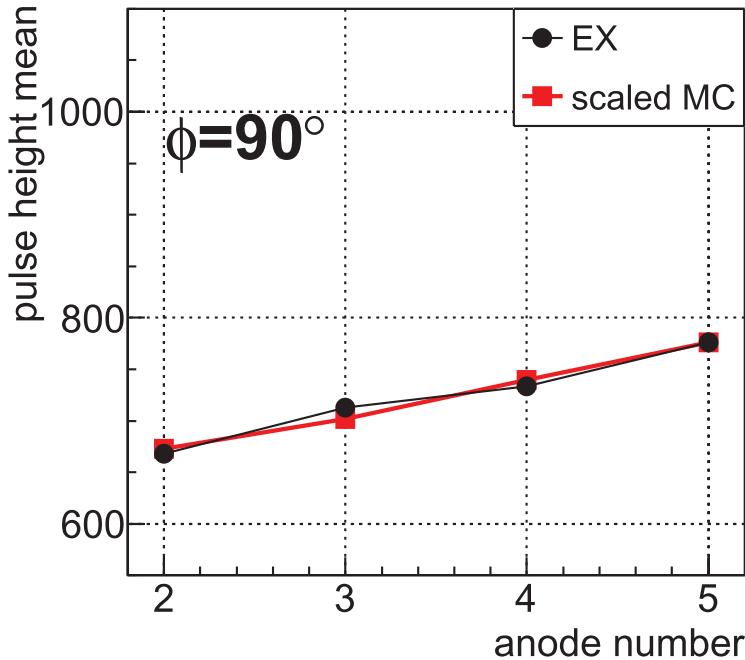
の条件でゲインを測定



# ゲイン低下モデルの検証

$E_p = 2.0\text{MeV}, V_0 = 1350\text{V}$  でのpulse height

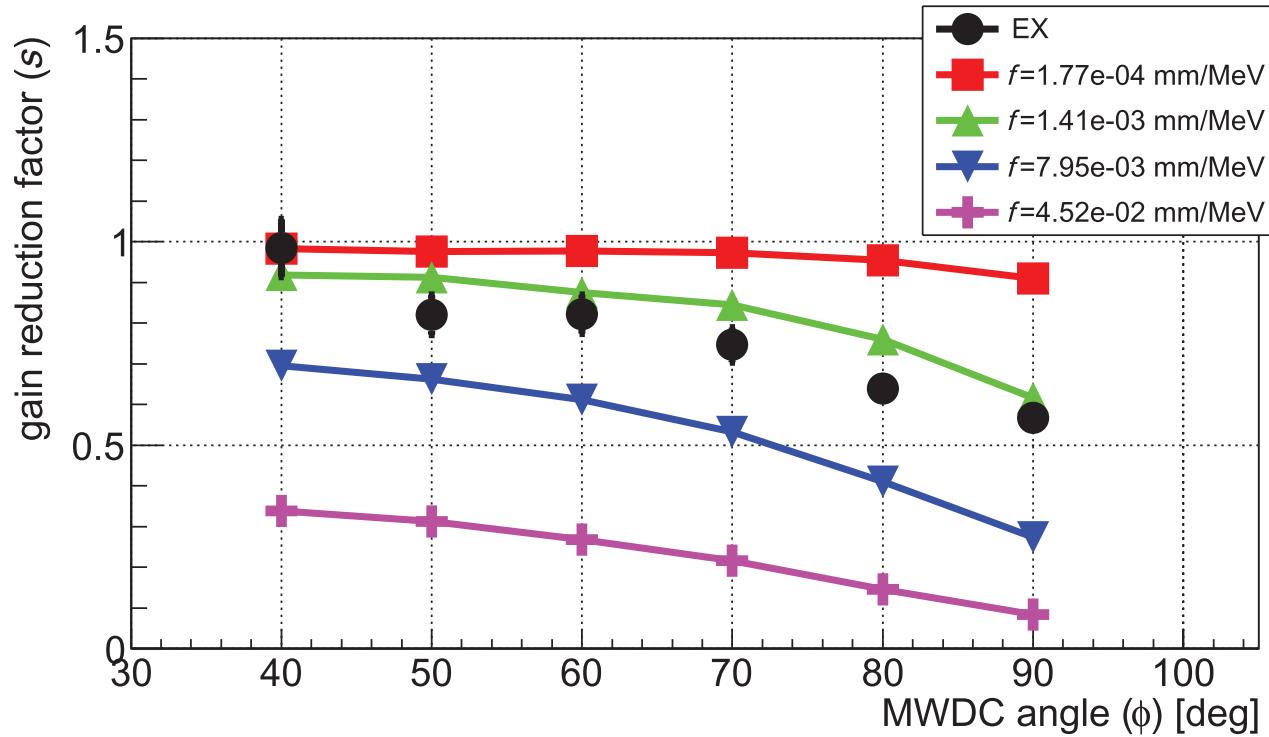
→低電圧(低増倍率)ではゲイン低下が生じない



# ゲイン低下モデルの検証

$E_p = 2.0\text{MeV}, V_0 = 1700\text{V}$  での ゲイン低下量 $s$

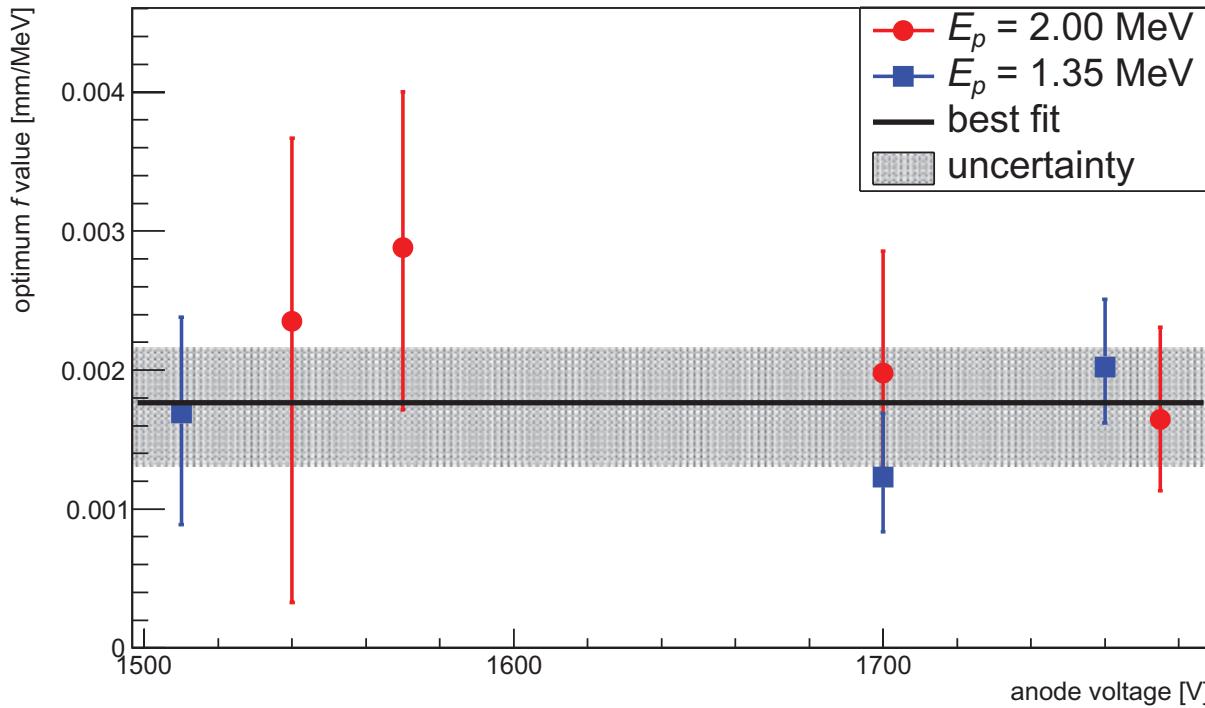
→角度の増加( $\Delta E/\Delta l$ の増加)に伴い $s$ が減少



# ゲイン低下モデルの検証

測定された $s$ を最も良く再現する $f$ をフィッティングにより求めると

$$f = (1.8^{+0.5}) \times 10^{-3} \text{ mm/MeV}$$

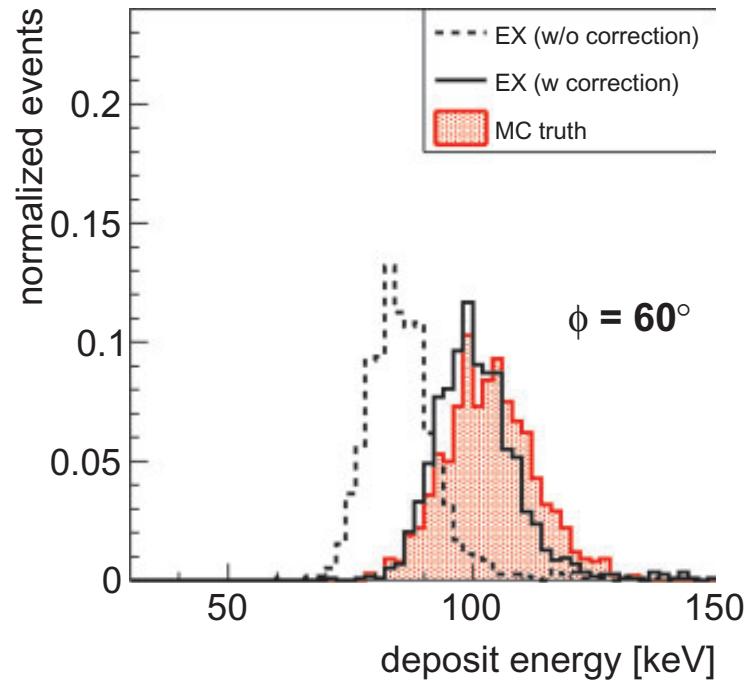
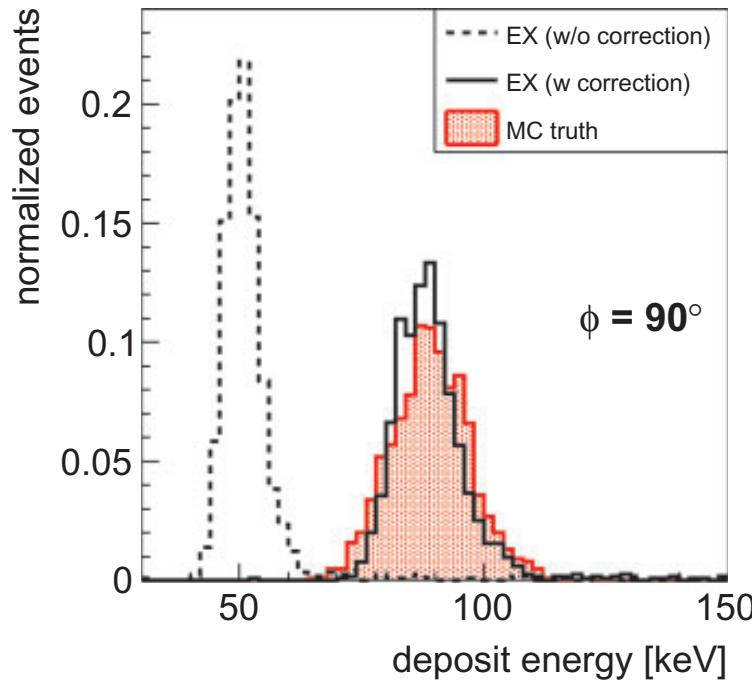


# ゲイン低下モデルの検証

測定されたエネルギー損失をこの $f$ の値を使って補正, MCと比較

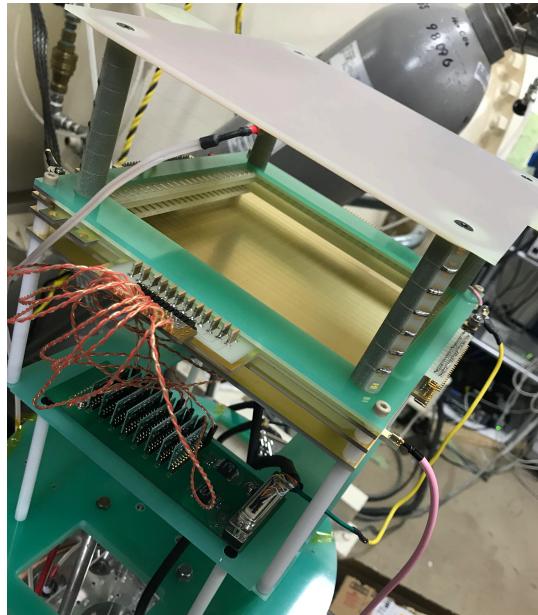


MCの結果を再現



# まとめと現状

- ▶ 提案されたモデルでゲインの低下が説明できることが確認できた
- ▶ 空間電荷の振る舞いを押し込めたパラメータ $f$ の値(ガス種, ワイヤー径に依存)が決まれば, モデル式からゲイン低下が計算でき, 様々な実験で応用できる
- ▶  $f$ の詳細な理解を目指し, アップグレードしたTPCで様々な線源・ガス種の下, データ取得を行っている



# Backup

# 背景

- ▶ 中性子寿命

$$\tau_n = 880.2 \pm 1.0 [\text{s}] \text{ (PDG 2018)}$$

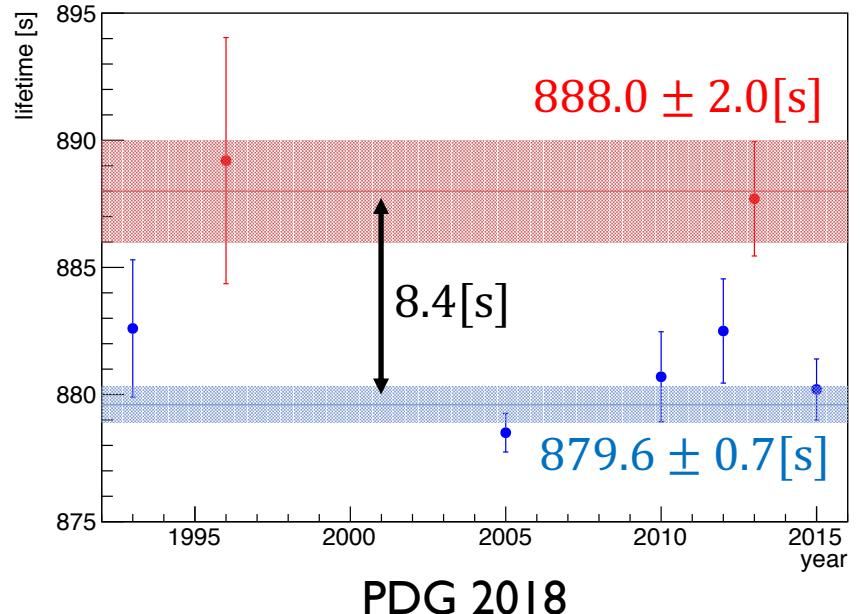
- ▶ 陽子計数法

容器に中性子を入射,  
崩壊による陽子をカウント

- ▶ 中性子蓄積法

超冷中性子を容器に蓄積,  
残った中性子をカウント

→ 2つの測定手法により 8.4[s] の差



上記手法とは異なる方法で中性子寿命を 1[s] 精度で測定する実験が J-PARC/MLF で行われている

# 中性子寿命測定

- ${}^3\text{He}$ 吸収事象( $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p$ )

$$N_{{}^3\text{He}} = \varepsilon_{{}^3\text{He}} \times N \left( 1 - \exp(-\rho\sigma L) \right)$$

$$\cong \varepsilon_{{}^3\text{He}} N \rho \sigma L$$

- $\beta$ 崩壊事象( $n \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + p$ )

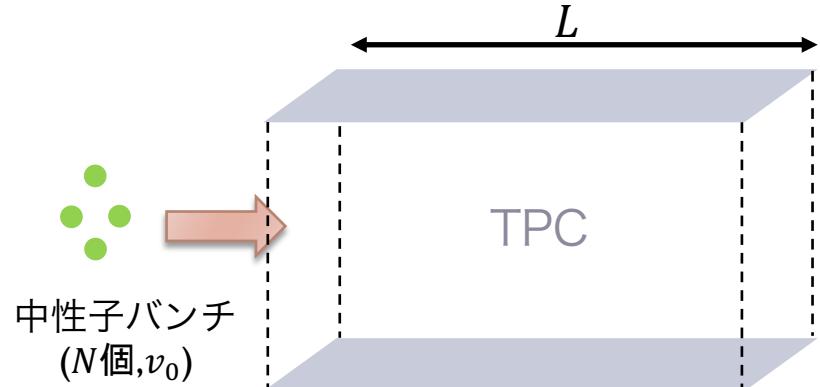
$$N_\beta = \varepsilon_e \times N \left( 1 - \exp \left( -\frac{L}{\tau_n v} \right) \right)$$

$$\cong \varepsilon_e N \frac{L}{\tau_n v}$$

➡ 
$$\tau_n = \frac{1}{\rho \sigma_0 v_0} \left( \frac{N_{{}^3\text{He}} / \varepsilon_{{}^3\text{He}}}{N_\beta / \varepsilon_e} \right)$$

$(\sigma v = \sigma_0 v_0 = \text{const.})$

$v_0$	中性子ビームの速度(2200m/s)
$\sigma_0$	${}^3\text{He}$ 吸収事象の断面積( $\nu_n = v_0$ )
$\rho$	${}^3\text{He}$ の個数密度
$N_{{}^3\text{He}}$	${}^3\text{He}$ 吸収事象の検出イベント数
$N_\beta$	$\beta$ 崩壊事象の検出イベント数
$\varepsilon$	検出効率

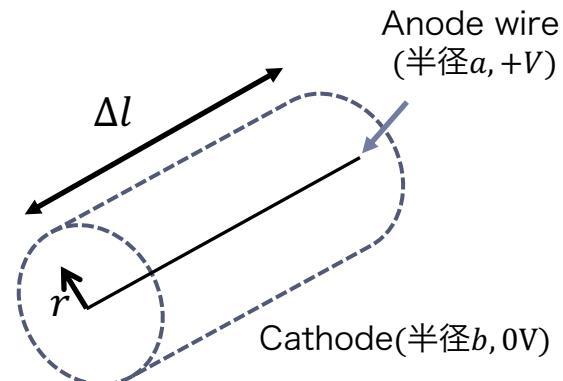


# ゲイン低下モデル

$\Delta l$ の広がりを持つ空間電荷があるとき

$$E(r) = \frac{e\sigma}{2\pi r \varepsilon \Delta l} + \frac{e}{r \varepsilon \Delta l} \int_a^r \int_0^{\Delta l} dr' dz' (r' \rho(r'))$$

$\sigma$  : ワイヤーの電荷線密度



境界条件( $V = \text{const.}$ )より

$$V = - \int_b^a E(r) dr = \frac{e\sigma \log(b/a)}{2\pi \varepsilon \Delta l} - \frac{e}{\varepsilon \Delta l} \int_b^a dr \left[ \frac{1}{r} \int_a^r \int_0^{\Delta l} dr' dz' (r' \rho(r')) \right]$$

$n$ 個の電子による増倍が終了しているとすると,

$$\int_a^r \int_0^{\Delta l} dr' dz' (r' \rho(r')) \equiv \left( \sum_{j=0}^{n-1} G_j \right) f(r), \quad f(a) = 0, f(b) = 1$$

$G_j$  :  $j$ 個の先行する電子があるときの増倍率

ただし,  $\rho(r)$ はスケールのみ変化, 形状は変わらないとする.

# ゲイン低下モデル

$\sigma$ を消去して

$$E_n(r) = \frac{V}{r \log(b/a)} - \frac{e}{2\pi r \varepsilon \Delta l} \left( \sum_{j=0}^{n-1} G_j \right) \left[ \frac{1}{\log(b/a)} \int_a^b \frac{f(r')}{r'} dr' - f(r) \right]$$

$$E_n = E_n(r=a) = \frac{V}{a \log(b/a)} - \frac{eC}{2\pi a \varepsilon \Delta l} \left( \sum_{j=0}^{n-1} G_j \right)$$

ゲイン  $G_n$  は  $E_n(r)$  のスケール  $E_n$  のみに依存するとし,  $G_n = \exp(A + BE_n)$  と仮定

$$G_n = \frac{G_0}{1 + \frac{eBC}{2\pi\varepsilon a \Delta l} n G_0}$$

$$\therefore s \equiv \frac{1}{nG_0} \sum_{j=0}^{n-1} G_j = \frac{\log \left( 1 + f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0 \right)}{f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0}, \quad f = \frac{eBC}{2\pi\varepsilon a w}$$