

中性子を用いた未知相互作用の探索

松本 悟 (九州大学)

猪野 隆 (KEK)

神谷 好郎 (東京大学)

北口 雅暁 (京都大学)

嶋 達志 (大阪大学)

清水 裕彦 (名古屋大学)

谷 美慧 (東京大学)

吉岡 瑞樹 (九州大学)

(1) イントロダクション

(2) 実験の概要

(3) 未知相互作用による散乱の評価

(4) バックグラウンドの評価

(5) まとめと今後

INTRODUCTION

Newton's law of universal gravitation : $F_{12} = -G \frac{mM}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}$

- 高次元理論で逆2乗則からのズレが予言されており、 数十[μm]までの領域まで検証されつつある
- そこで、ミクロな領域では未知相互作用が支配的になるよう修正されることを想定する

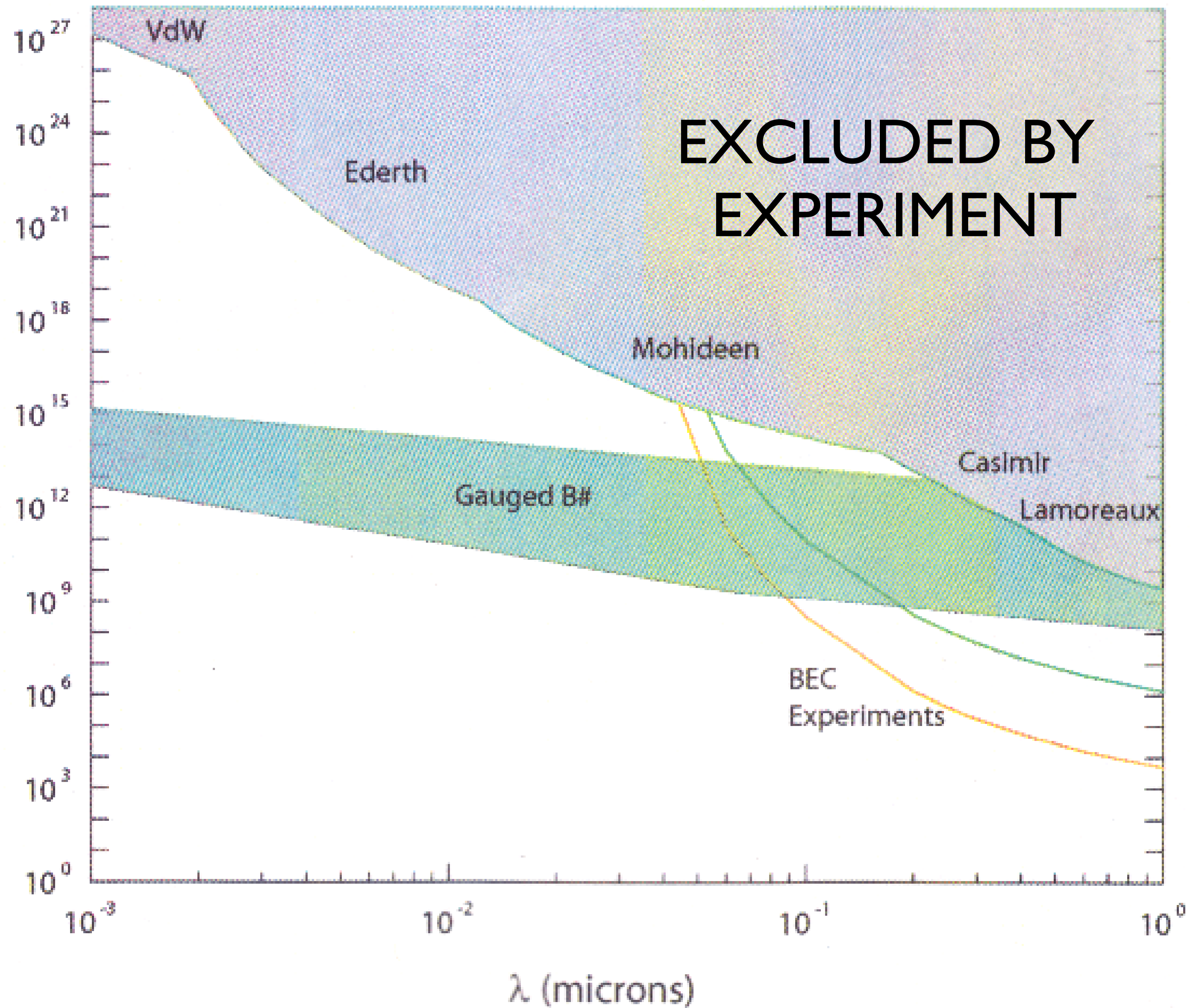
$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \left(1 + \alpha e^{-\frac{r}{\lambda}} \right) \quad \begin{array}{l} \alpha : \text{未知相互作用の結合定数} \\ \lambda : \text{未知相互作用のCompton波長} \end{array}$$

- 入射中性子のエネルギーを20[meV]とし、未知相互作用が支配的な領域での微分断面積はBorn近似より

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \alpha^2 m_T^2 \lambda^4 \left(\frac{1}{1 + C \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)} \right)^2 \quad C \approx 3800 \quad m_T : \text{標的の質量}$$

- 未知中間力の角度依存性から超前方についての中性子散乱を精密に測定することによりその有無が検証可能

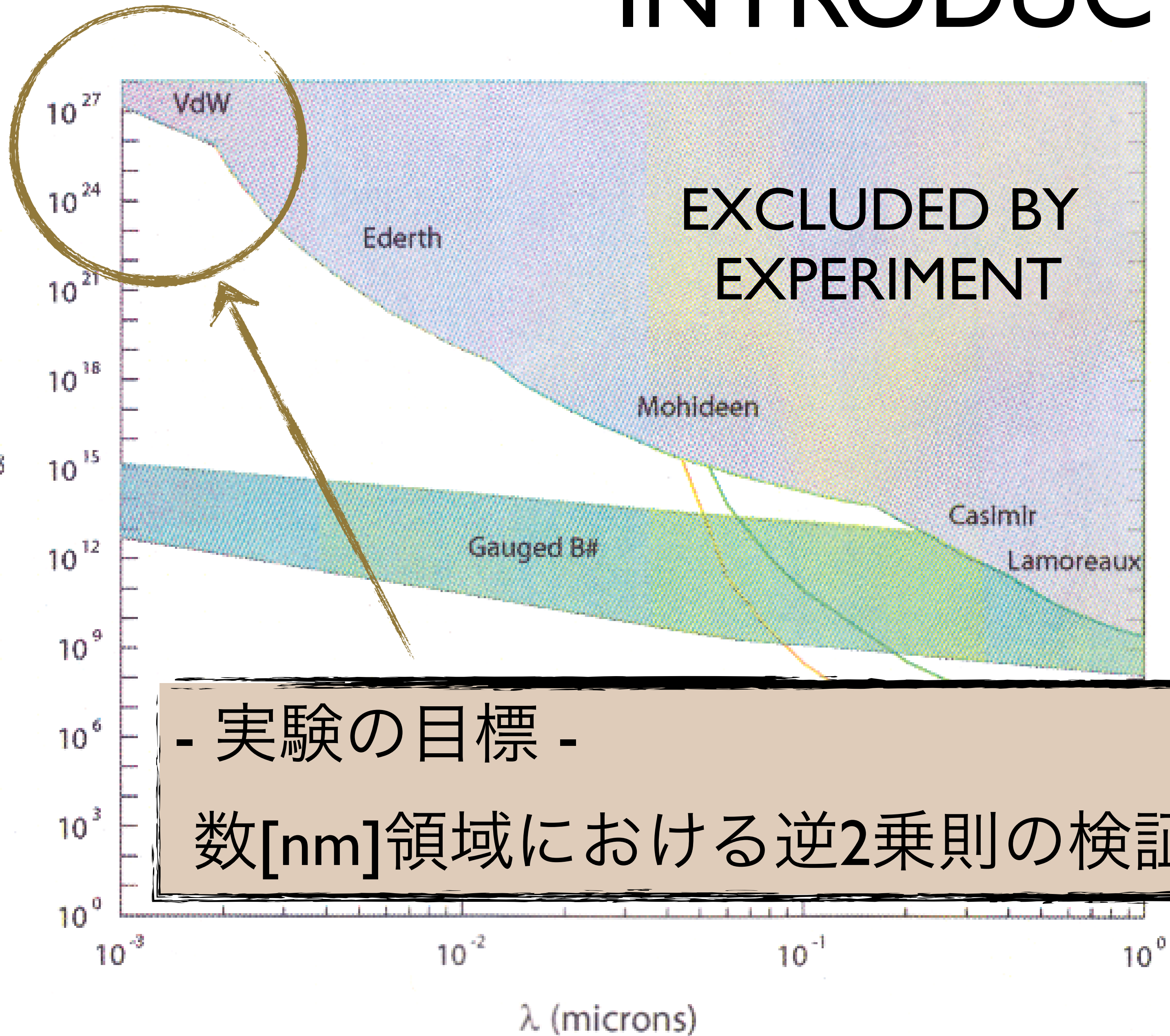
INTRODUCTION



α : 未知相互作用の結合定数

λ : 未知相互作用のCompton波長

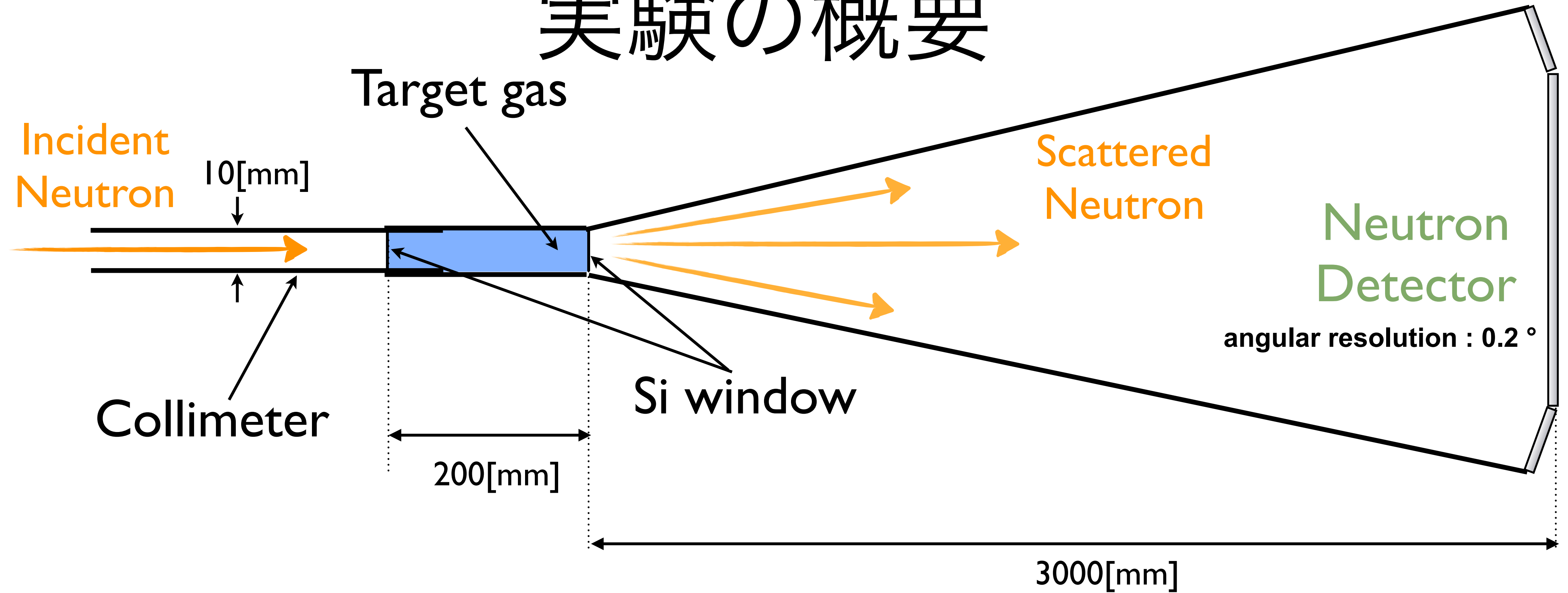
INTRODUCTION



α : 未知相互作用の結合定数
 λ : 未知相互作用のCompton波長

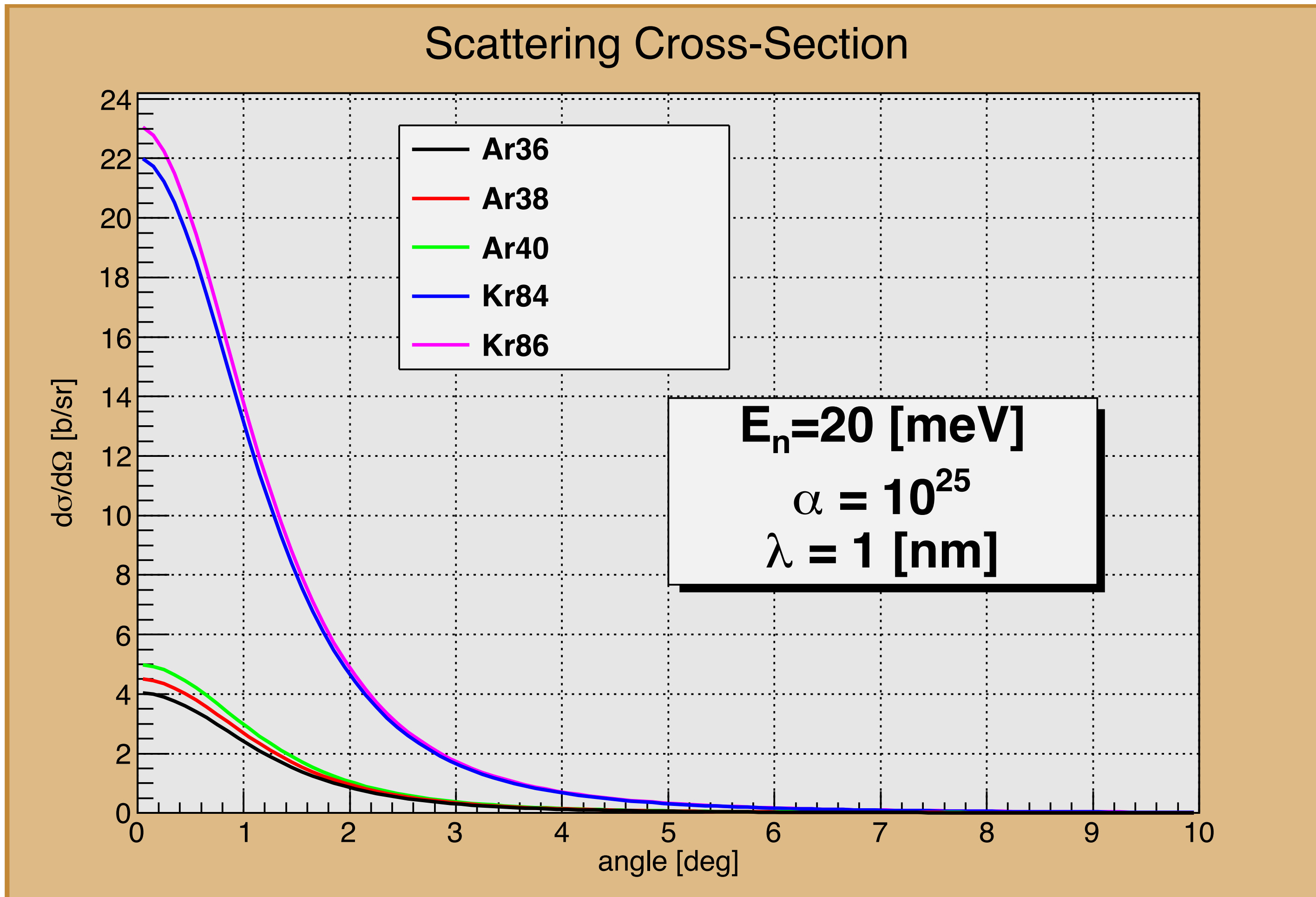
- 実験の目標 -
数[nm]領域における逆2乗則の検証を先行して行うことである

実験の概要



- 電磁相互作用の影響が小さく、また吸収・散乱断面積も小さいことが標的ガスの必要条件である
- 上述の条件を満たし、核力の影響を最小限に抑える為、中性子と希薄な希ガス標的を用いる
- 主に評価しなければならないのは未知相互作用による散乱、核力散乱、窓材による吸収及び散乱である

未知相互作用による微分断面積



- 仮定した未知相互作用

結合定数 : $\alpha = 10^{25}$

Compton波長 : $\lambda = 1$ [nm]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \alpha^2 m_T^2 \lambda^4 \left(\frac{1}{1 + C \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)} \right)^2$$

未知相互作用と核力による微分断面積

標的	Unknown Force [b/Sr]	Nuclear Scattering [b/Sr]	S/N (/ ³⁶ Ar)
³⁶ Ar	4.0443	6.199	1
⁸⁶ Ar	4.5055	0.1193	57.887
⁴⁰ Ar	4.9927	0.0335	228.44
⁸⁴ Kr	22.012	0.5252	64.24
⁸⁶ Kr	23.074	0.6525	54.203

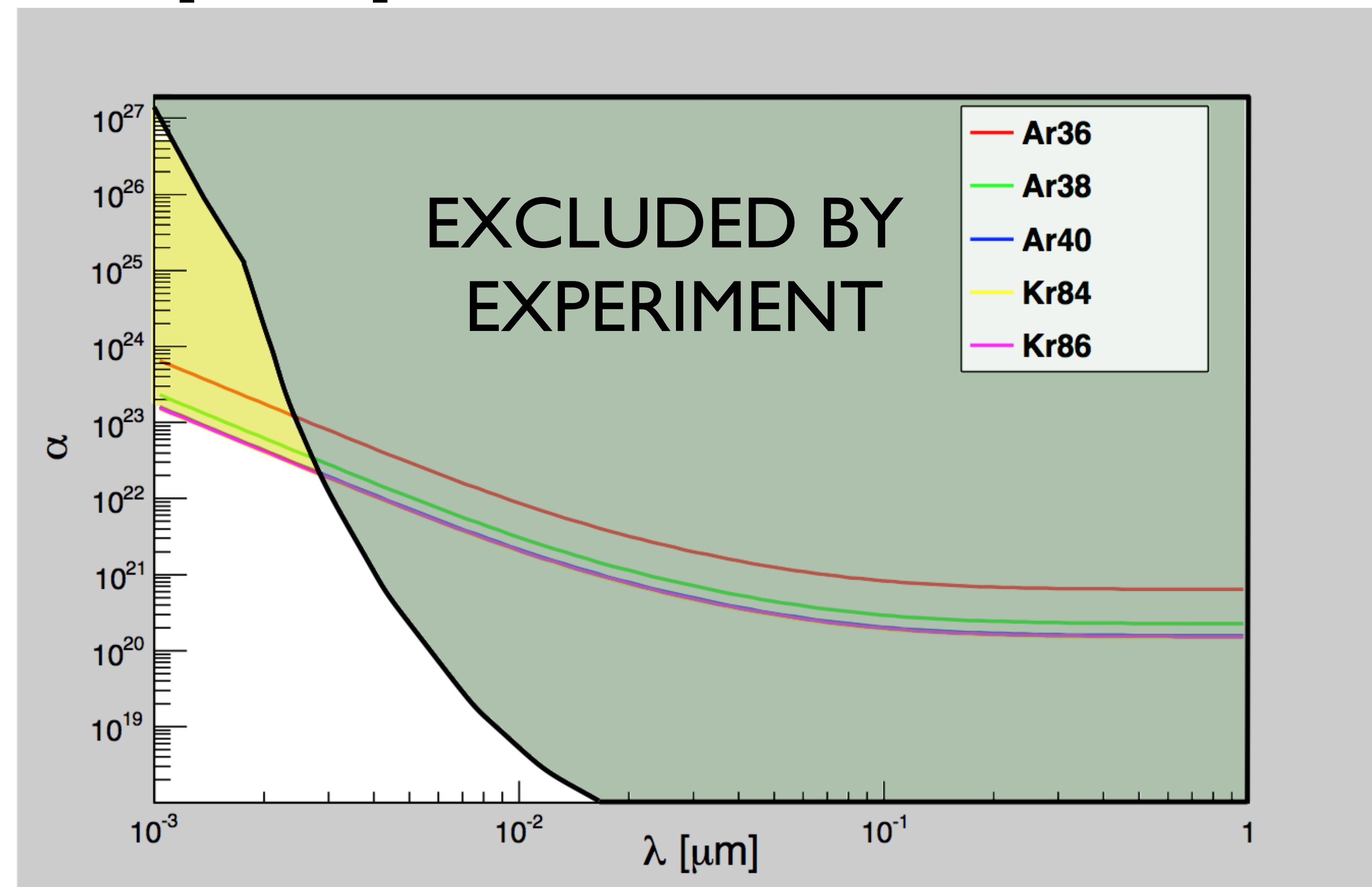
- 表中の未知相互作用の微分断面積の大きさは入射方向に対する広がり角度 $\theta = 0^\circ$ の値
- 核力散乱の実験値は NIST (National Institute of Standards and Technology) の値
- S/N比は上表の未知相互作用の値を通常核力散乱で割った値を³⁶Arの値を単位としたもの

検証可能領域

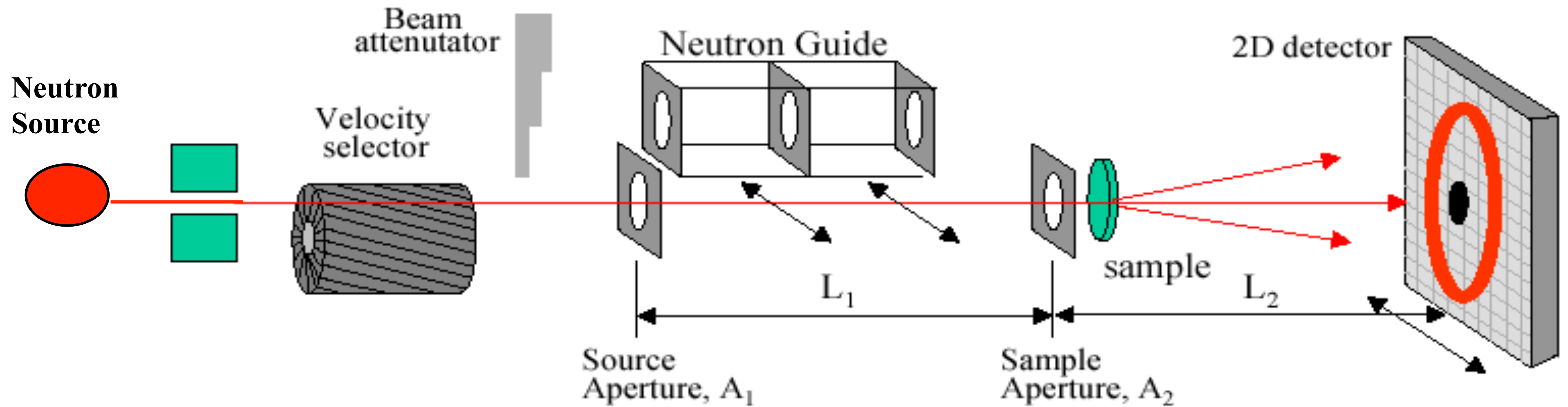
- 標的ガス(^{40}Ar)圧力を0.1[atm] ($0[^\circ\text{C}]$)
 - 標的ガスの数密度 = 2.687×10^{18} [個/ cm^3]、
- 有効標的の長さ=20[cm]
- 入射中性子数 = 10^8 [cps]
- 検出器効率 10%
- 30日間の測定

全カウント(未知相互作用+核力)の誤差幅に対して2倍の寄与が得られるような領域を図示(右図)

※窓の影響は含まれていない

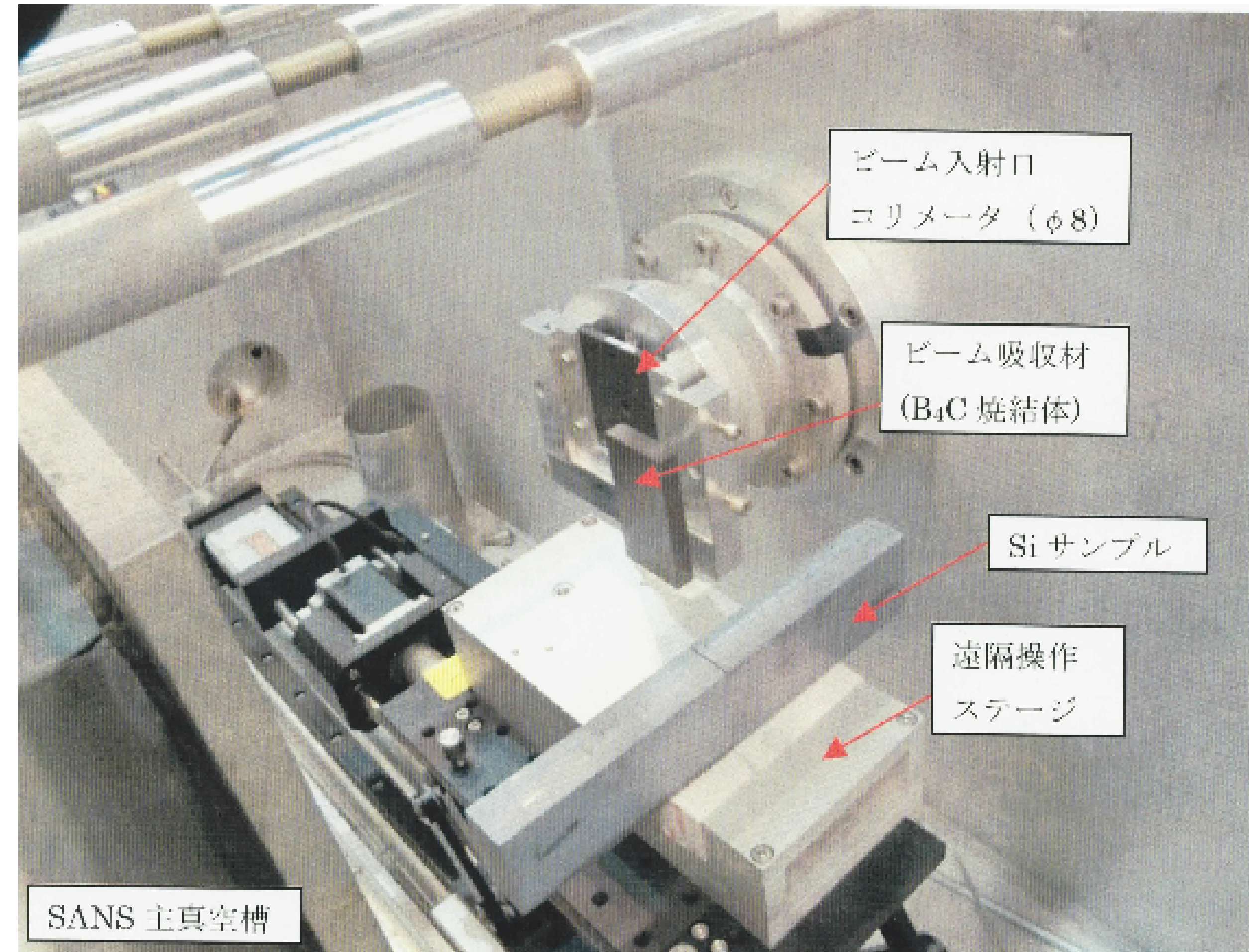
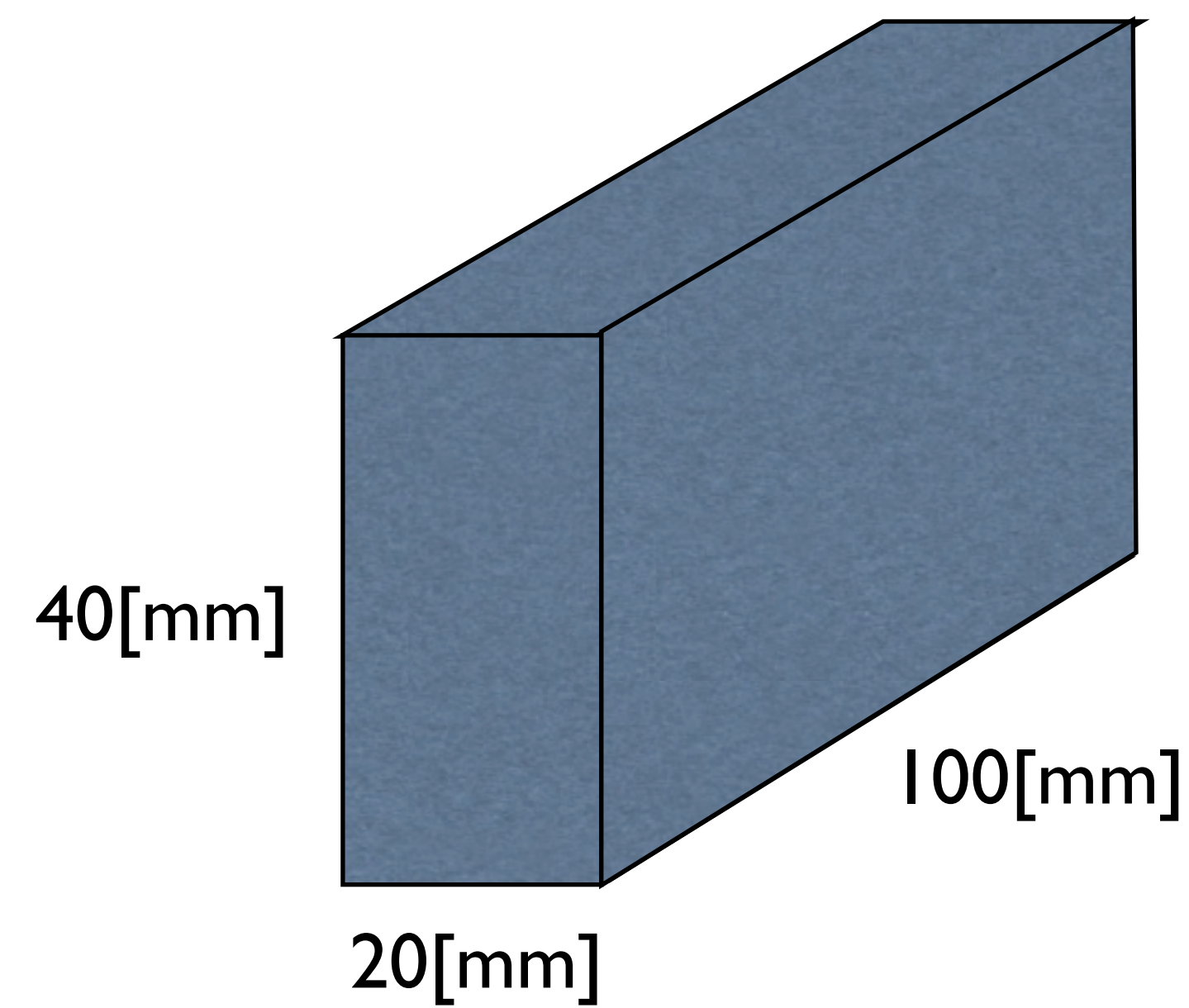


HANARO 40M SANS

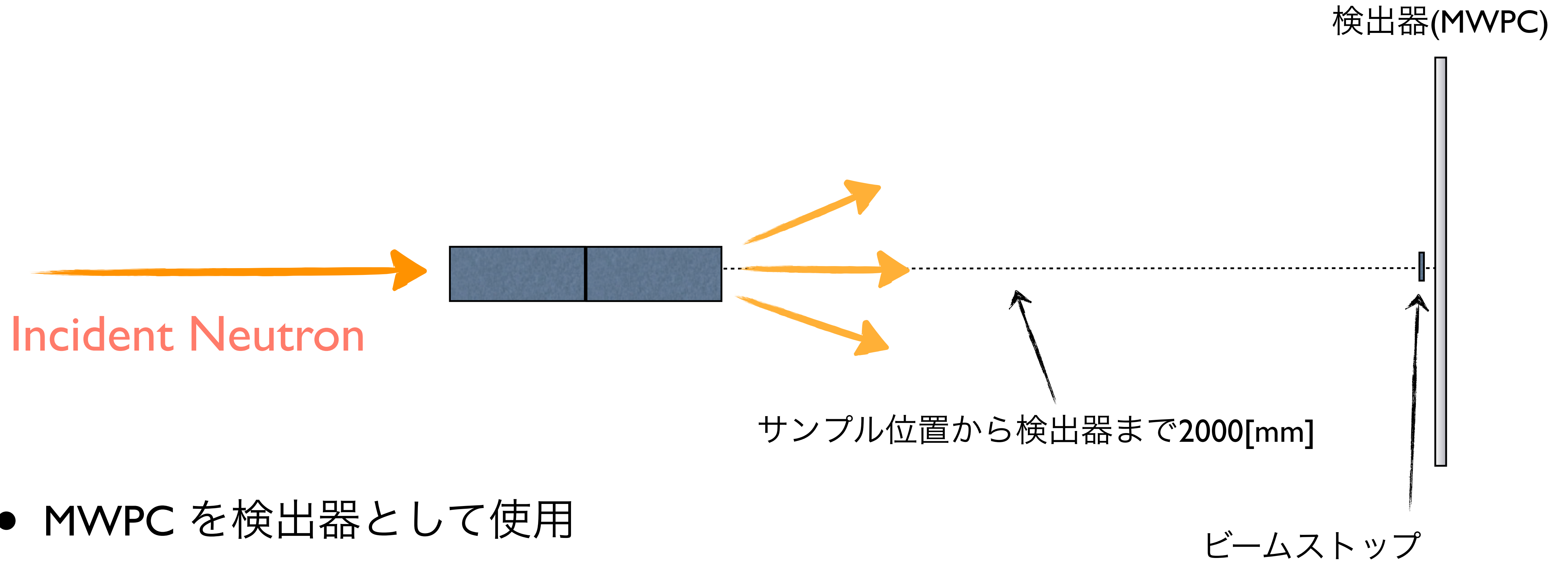


セットアップ

- Si単結晶(日野氏提供)



セットアップ

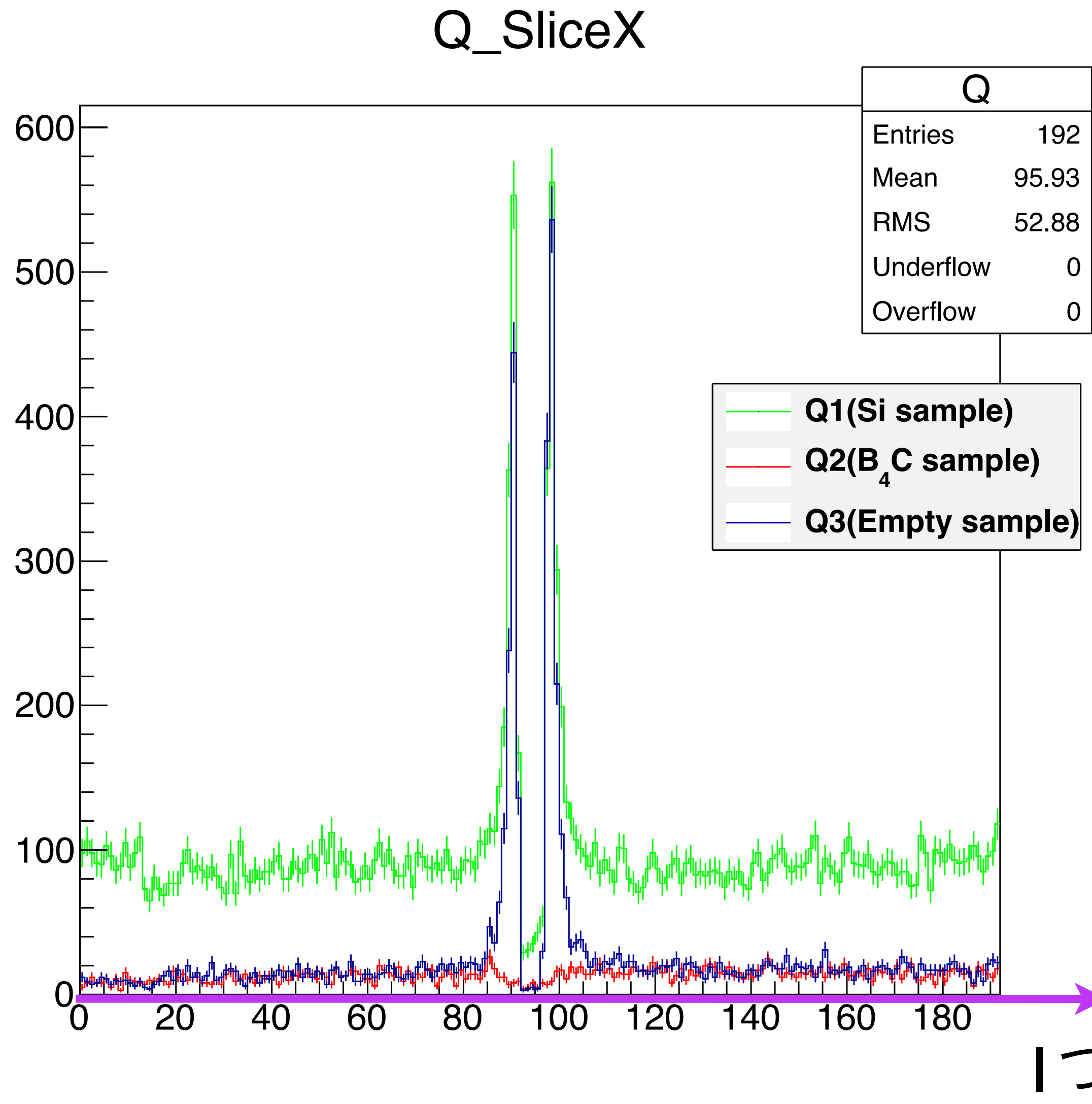


- MWPC を検出器として使用
 - MWPCの分解能は 5[mm]
 - MWPC の大きさはおよそ 960[mm]×960[mm]

測定データ (HANARO 40M SANS)

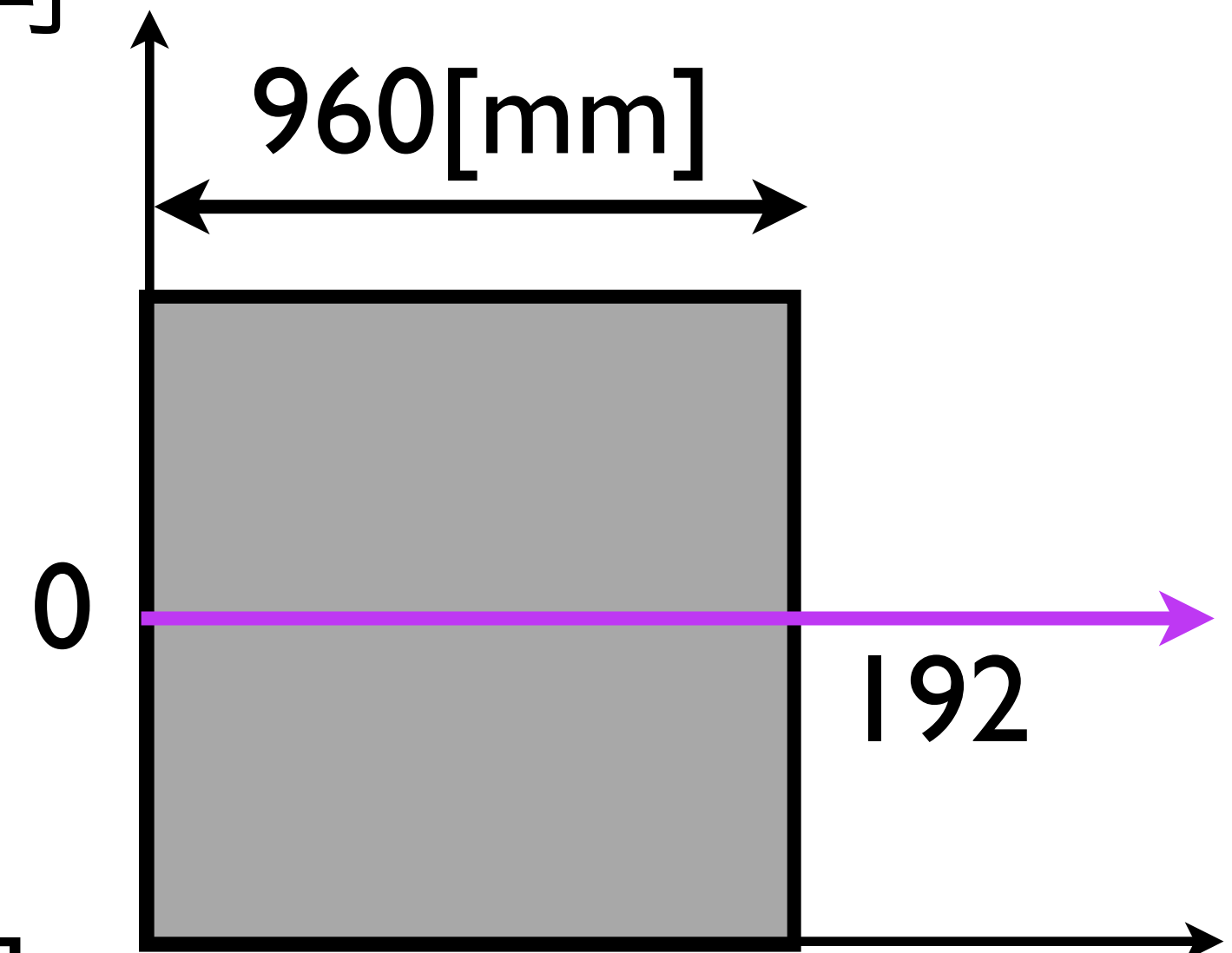
DATA	SAMPLE (TAGET)	ATTENUATE	BEAM STOP	MEASURING TIME
P1	-	透過率	-	300[s]
P2	Si	8.60575×10^{-5}		
Q1	Si	-	有	3600[s]
Q2	B ₄ C			
Q3	-			

実験結果

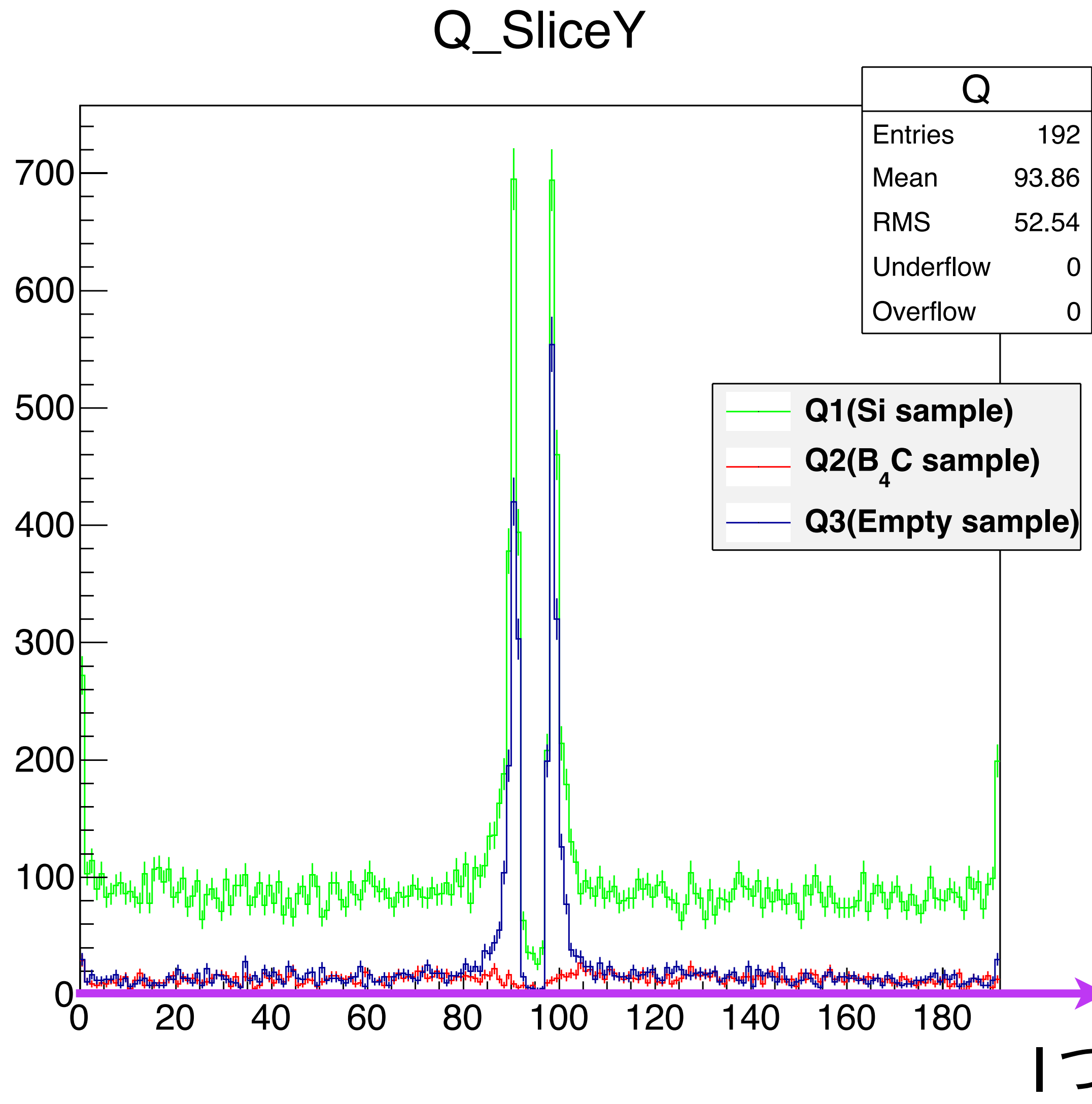


DATA	SAMPLE	ATTENUATOR	BEAM STOP	MEASURING TIME
Q1	Si	-	有	3600[S]
Q2	B4C			
Q3	-			

鉛直方向

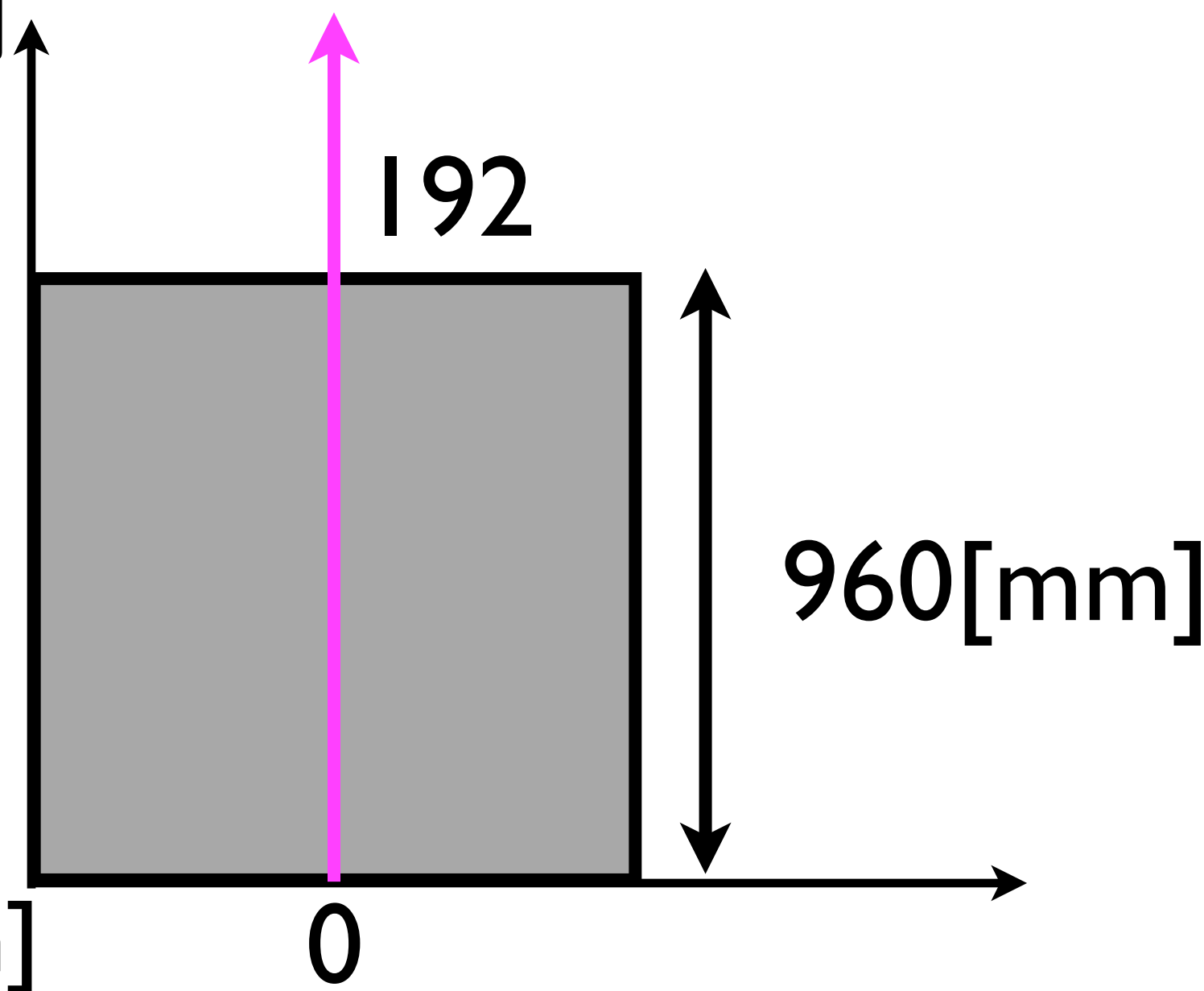


実験結果

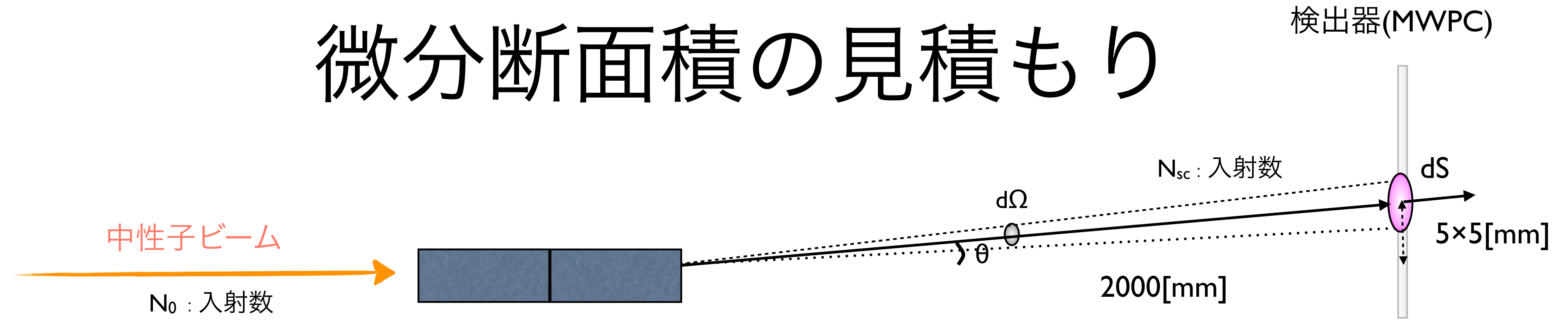



DATA	SAMPLE	ATTENUATOR	BEAM STOP	MEASURING TIME
Q1	Si	-	有	3600[S]
Q2	B4C			
Q3	-			

鉛直方向



微分断面積の見積もり



- 入射中性子ビームに対して、試料を通過して角度 θ 方向への散乱中性子を見積もる
- 角度 θ 方向に散乱された中性子数を N_{scat} とする
- 上図で  部の面積を dS とする。

検出器(MWPC)の分解能(5[mm])に合わせた値

- 入射中性子数 N_{In} 、 Siサンプル中心部の直方体に含まれるSi元素の数を N_{Si} とする

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right| = \frac{N_{scat}}{N_{In}} \frac{1}{N_{Si}} \frac{dS}{d\Omega} \approx 30[\text{mb/Sr}]$$

吸収断面積の見積もり

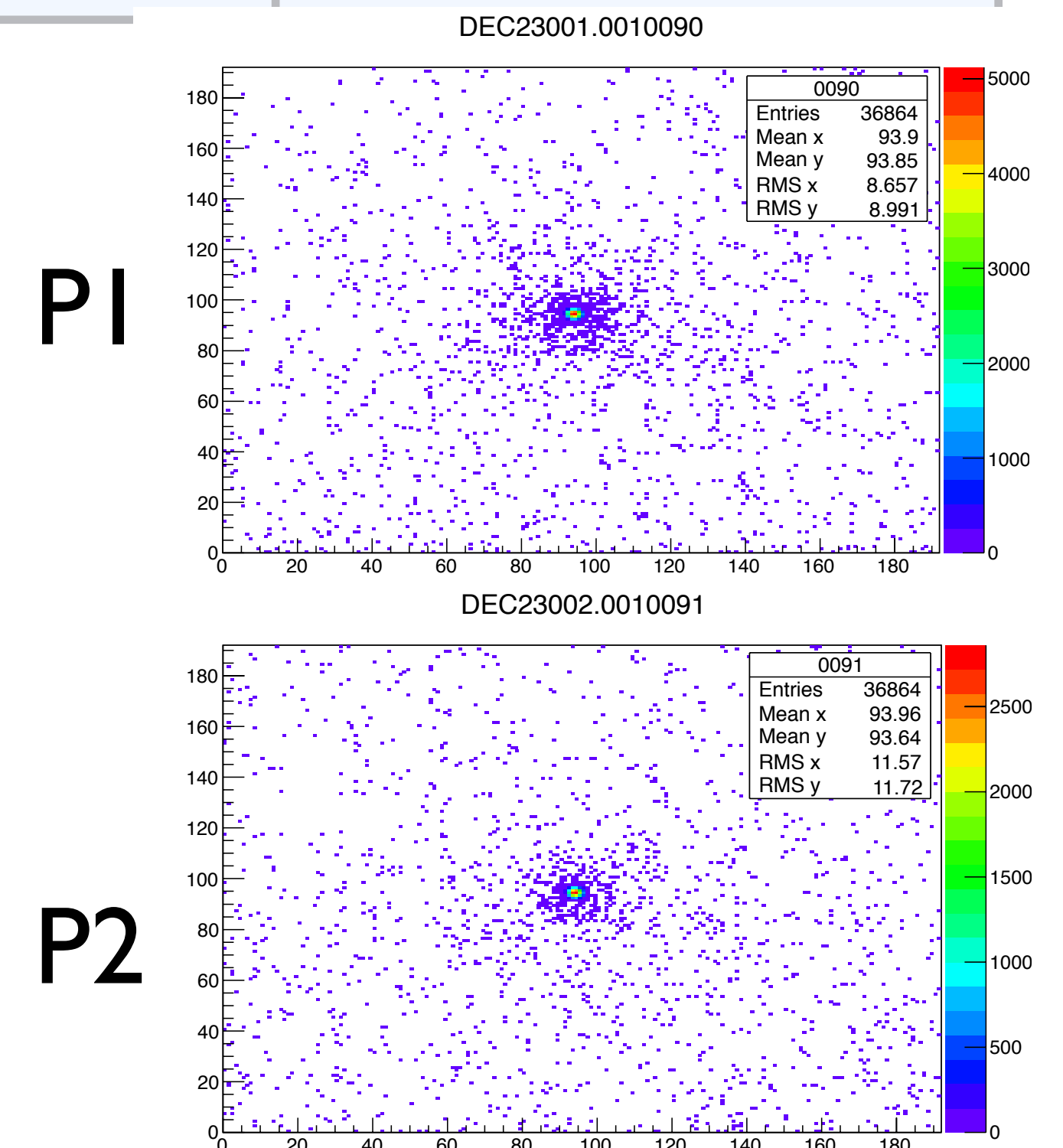
データ	サンプル	アッテネータ	ビームストップ	測定時間
P1	-	透過率	-	300[s]
P2	Si	8.60575×10^{-5}	-	

- 上記の二つのデータからおよその吸収断面積を見積もる
- P1の中心部は5000程だがP2では2500程になる
- 標的通過後の粒子数Nは入射粒子数を N_0 とすると、

$$N = N_0 e^{-nx\sigma_{abs}}$$

- 数密度 $n = \rho A^{-1} N_A$ A:原子量, ρ :密度, N_A :アボガドロ数

$$\sigma_{abs} = \frac{1}{nx} \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) \approx 690[\text{mb}]$$



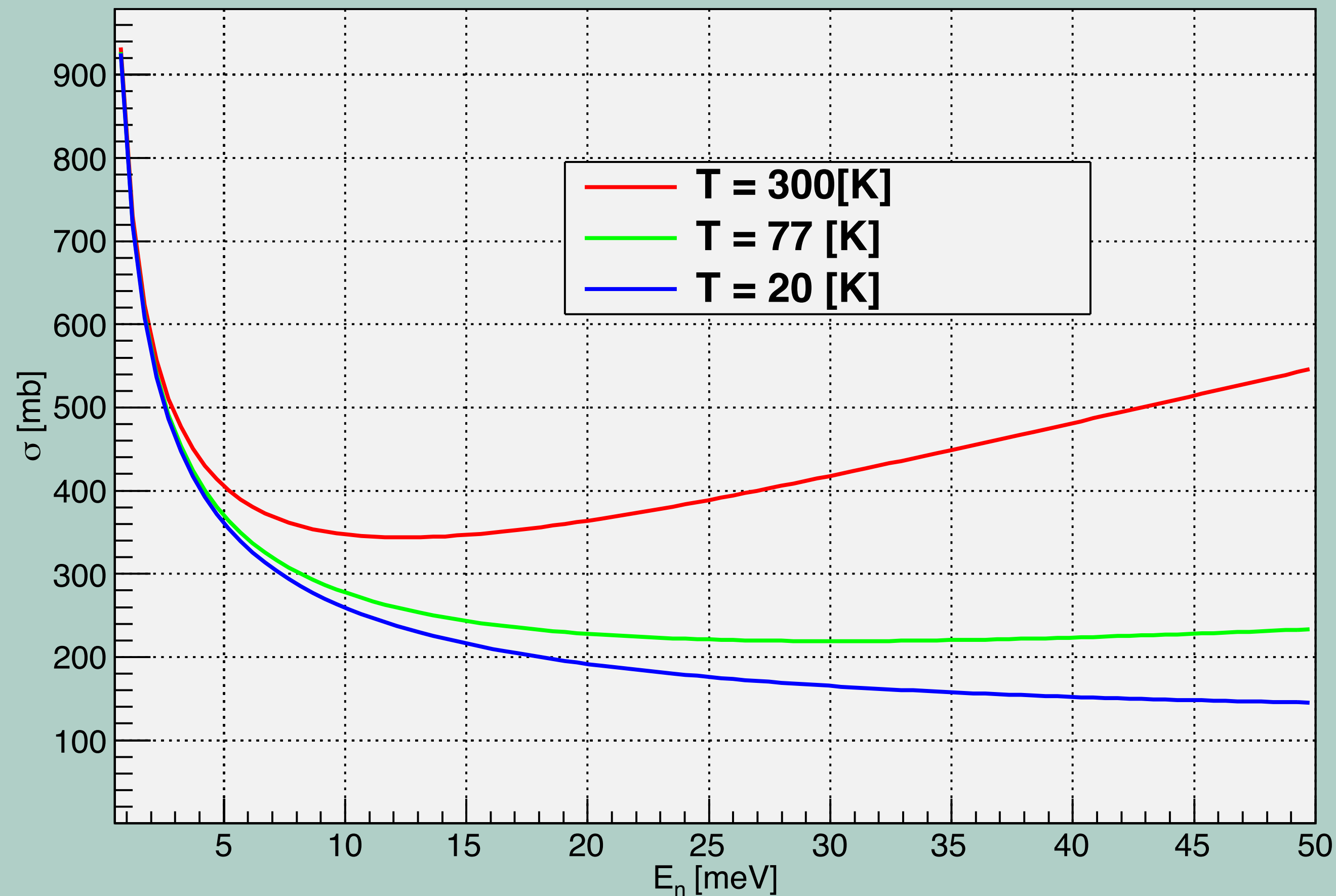
P1

P2

文献値による断面積の評価

NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 135(1976) 289-291
“A SINGLE CRYSTAL SILICON THERMAL NEUTRON FILTER“

The cross-section of single crystals of silicon



- 左記の文献によと、cross-section のエネルギー依存性は以下の式で近似される

$$\sigma_T [\text{b}] = \underbrace{\frac{0.8}{\sqrt{E}}}_{\sigma_{scat}} + \underbrace{2.25 (1 - e^{-CET})}_{\sigma_{abs}}$$

σ_T : Total cross-section [b]

E : Energy [meV]

C : const. (= 1.44×10^{-5} [K meV] $^{-1}$)

T : T [K]

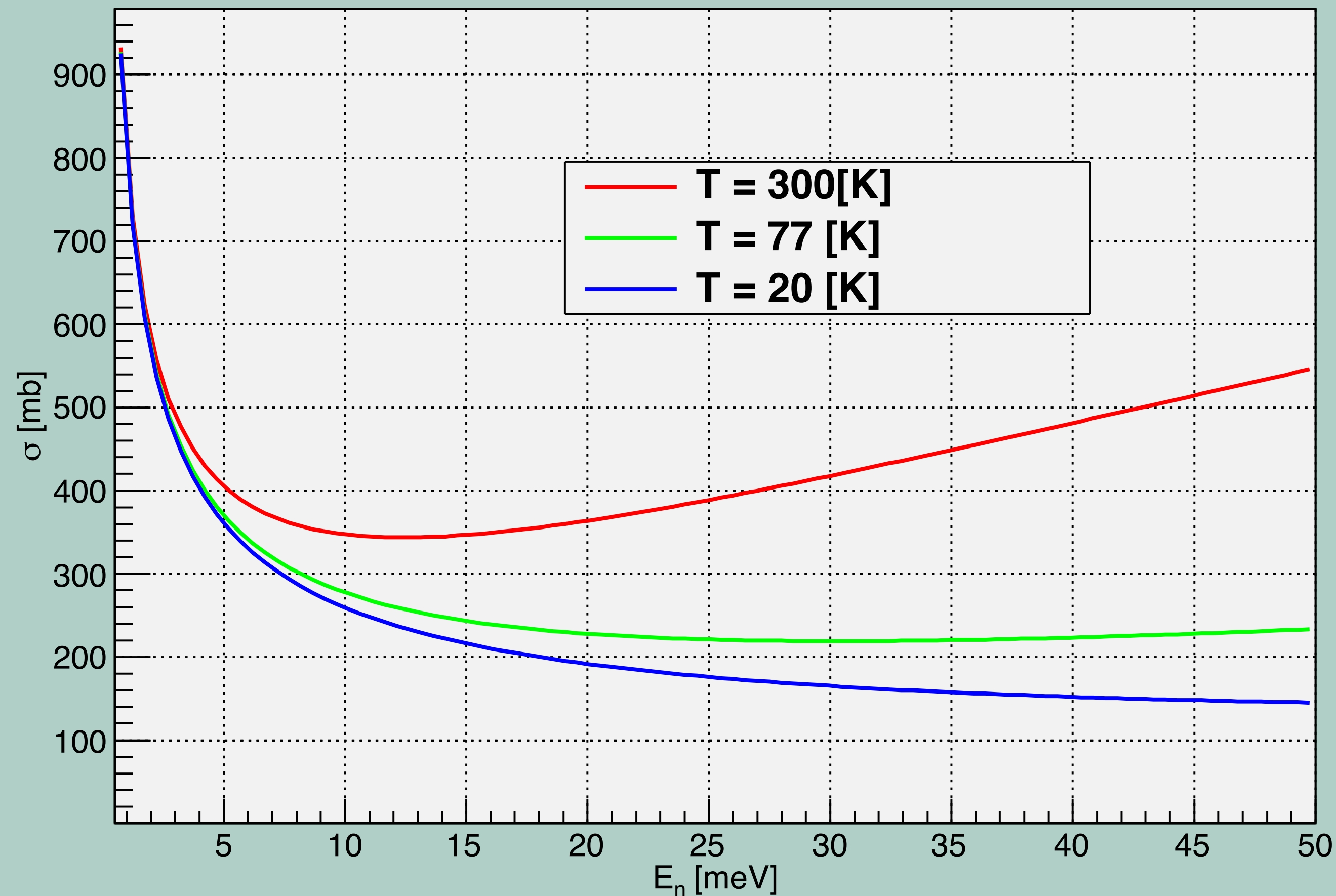
$$\sigma_T = 178.9[\text{mb}] + 186.2[\text{mb}]$$

(@ T=300[k]、 20[meV])

文献値による断面積の評価

NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 135(1976) 289-291
 “A SINGLE CRYSTAL SILICON THERMAL NEUTRON FILTER“

The cross-section of single crystals of silicon



- 左記の文献によと、cross-section のエネルギー依存性は以下の式で近似される

$$\sigma_T [\text{b}] = \underbrace{\frac{0.8}{\sqrt{E}}}_{\sigma_{scat}} + \underbrace{2.25 (1 - e^{-CET})}_{\sigma_{abs}}$$

	微分散乱断面積 [mb/Sr]	吸収断面積 [mb]
実験	30	690
文献値	14.2	186.2

まとめ

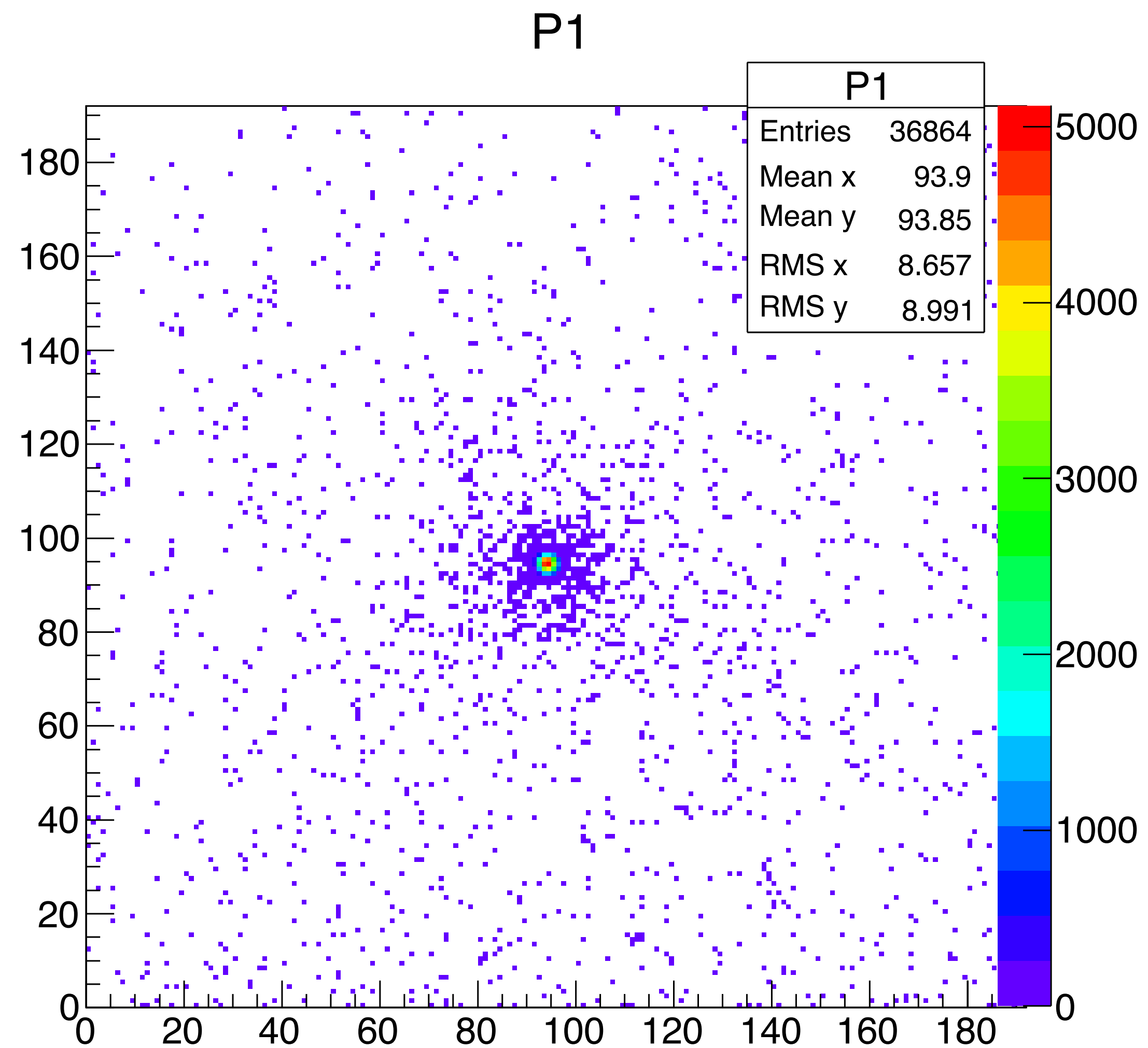
- 中性子散乱の微分断面積の精密測定は数[nm]スケールの未知相互作用の探索に対して有効である
- 窓材の候補である Si の散乱・吸収断面積の見積もりを行った
 - どちらもおよそ3倍の値であった

今後

- 今回の検証可能域のプロットは窓による効果や光学的な情報を含んでいないので、それらを加味してシュミレーションを行う
- チェンバー等のデバイスの設計

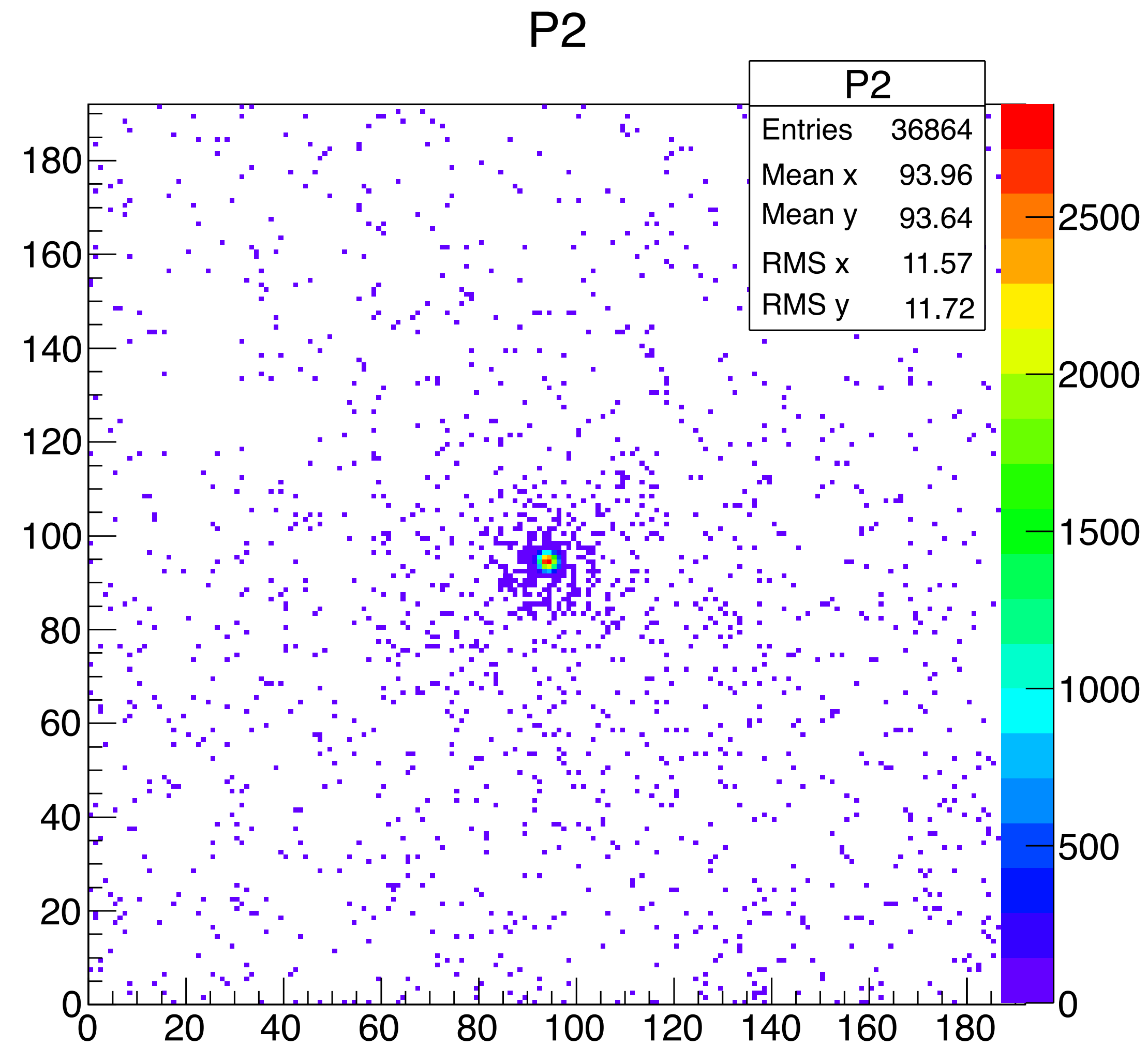
以下參考資料

PI (生データ)



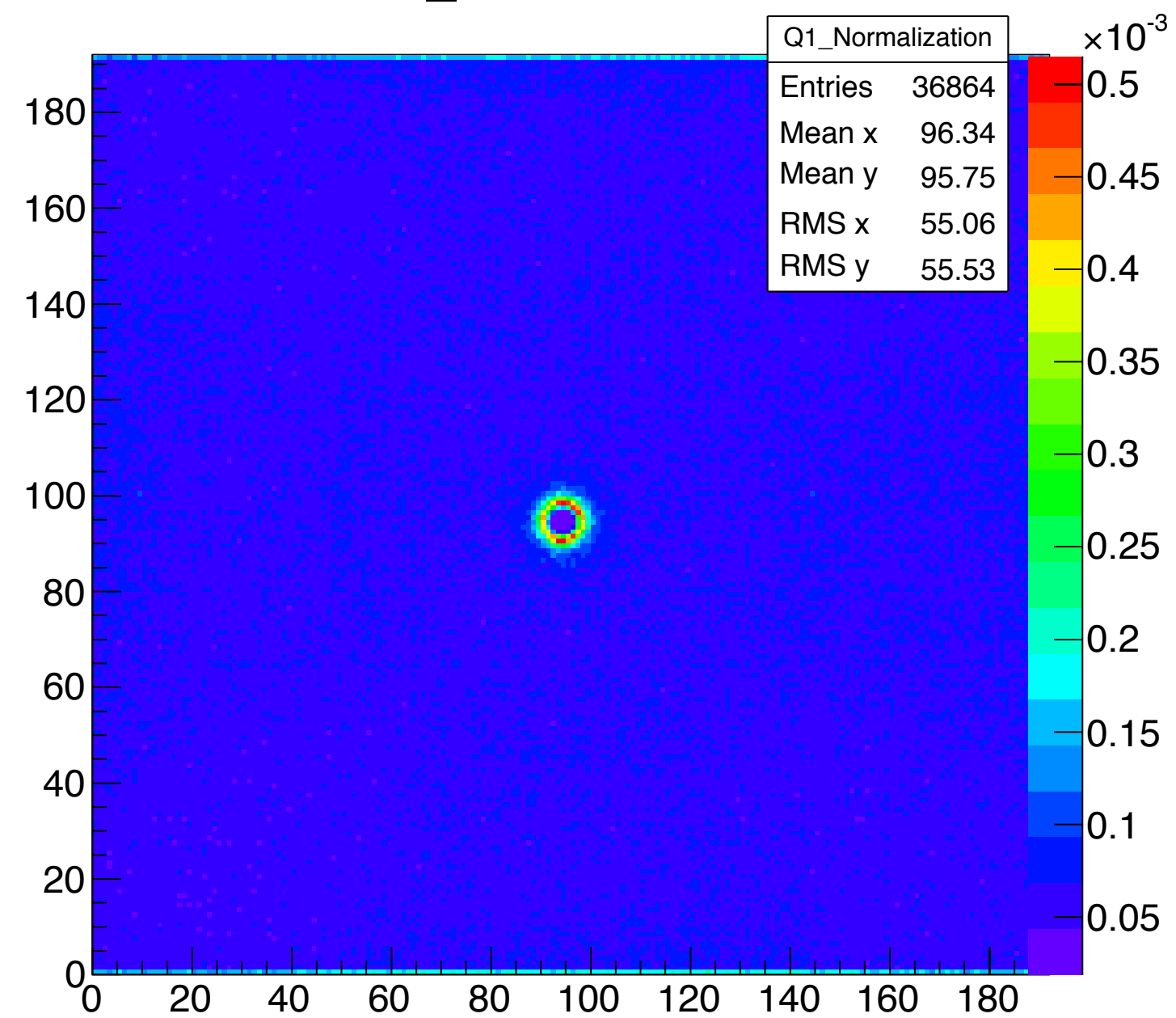
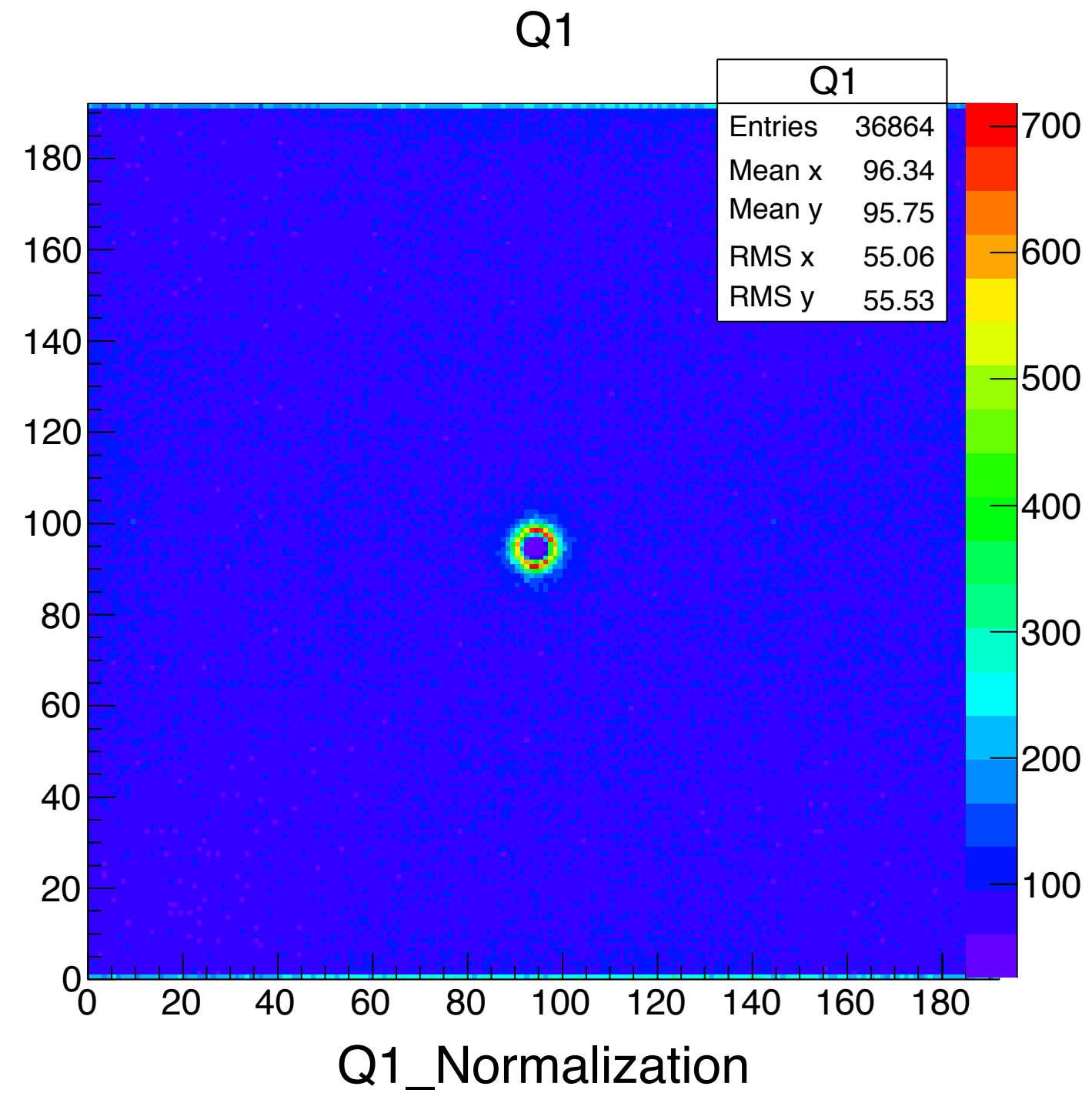
- サンプル無し
- アッテネータ有り
- ビームストップ無し
- 測定時間 300[s]

P2 (生データ)



- サンプルSi
- アッテネータ有り
- ビームストップ無し
- 測定時間 300[s]

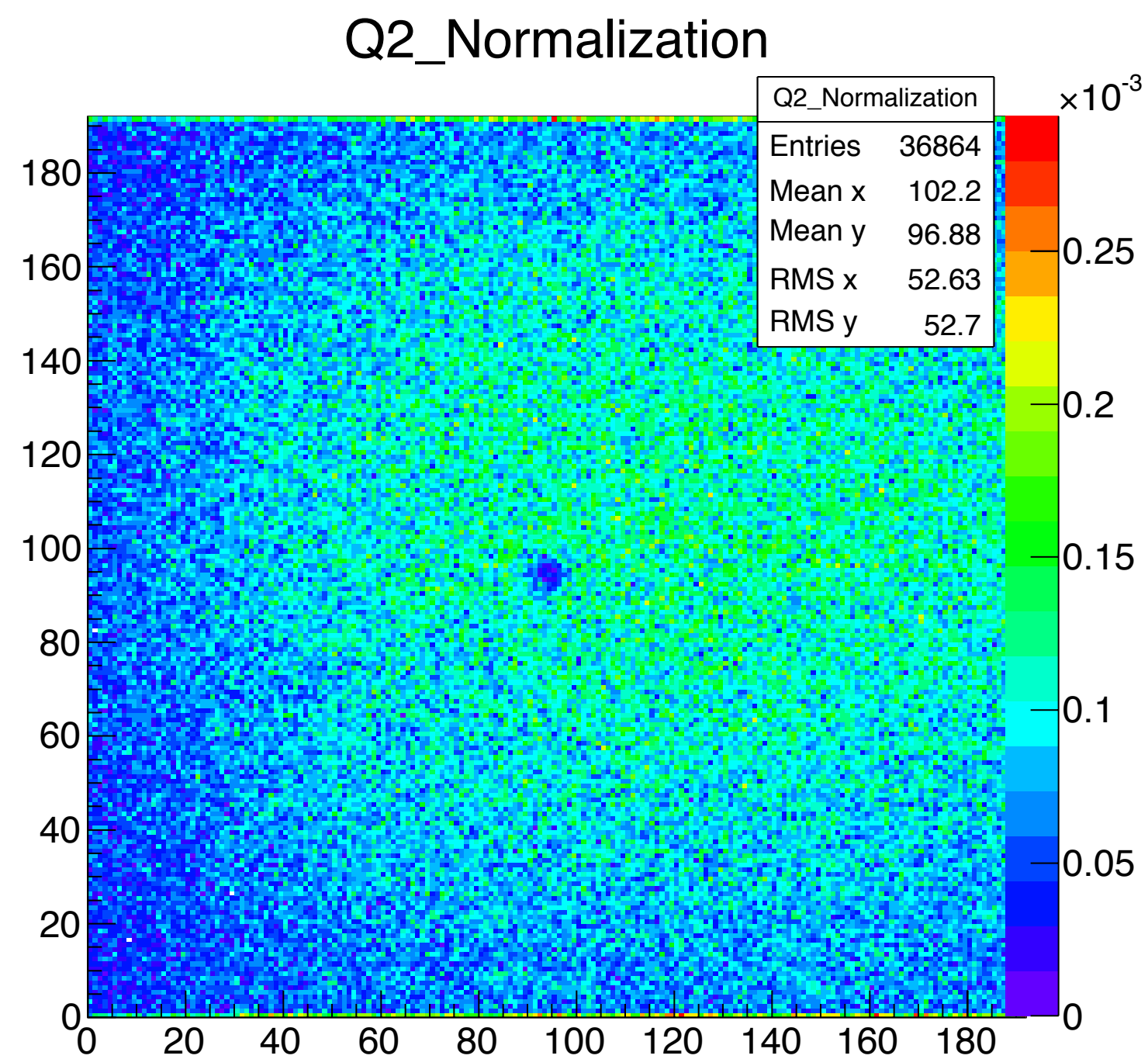
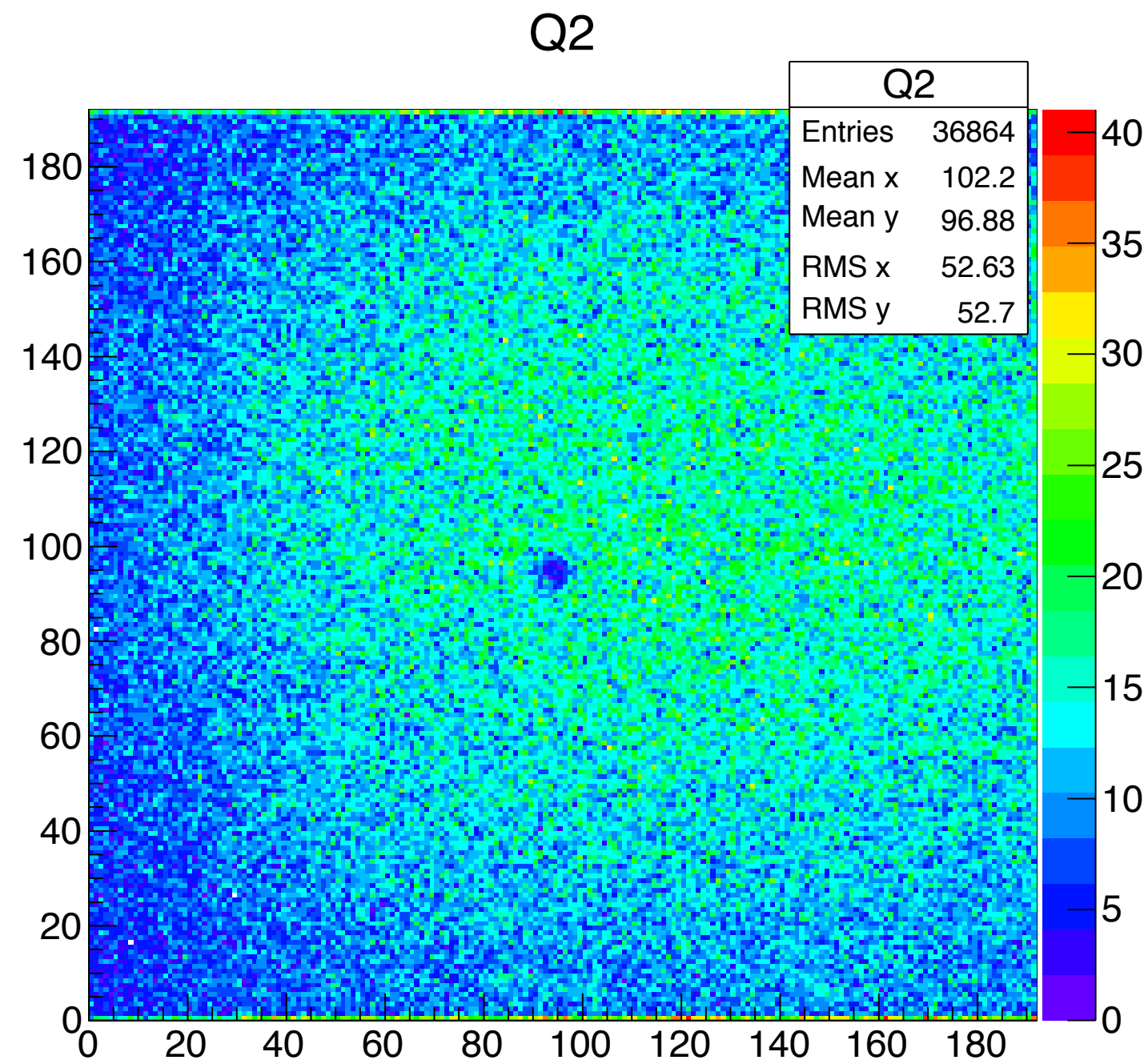
Q1



- サンプル Si
- アッテネータ無し
- ビームストップ有り
- 測定時間 3600[s]

- サンプル Si
- アッテネータ無し -> 有りに規格化
- ビームストップ有り
- 測定時間 3600[s] -> 300[s]に規格化

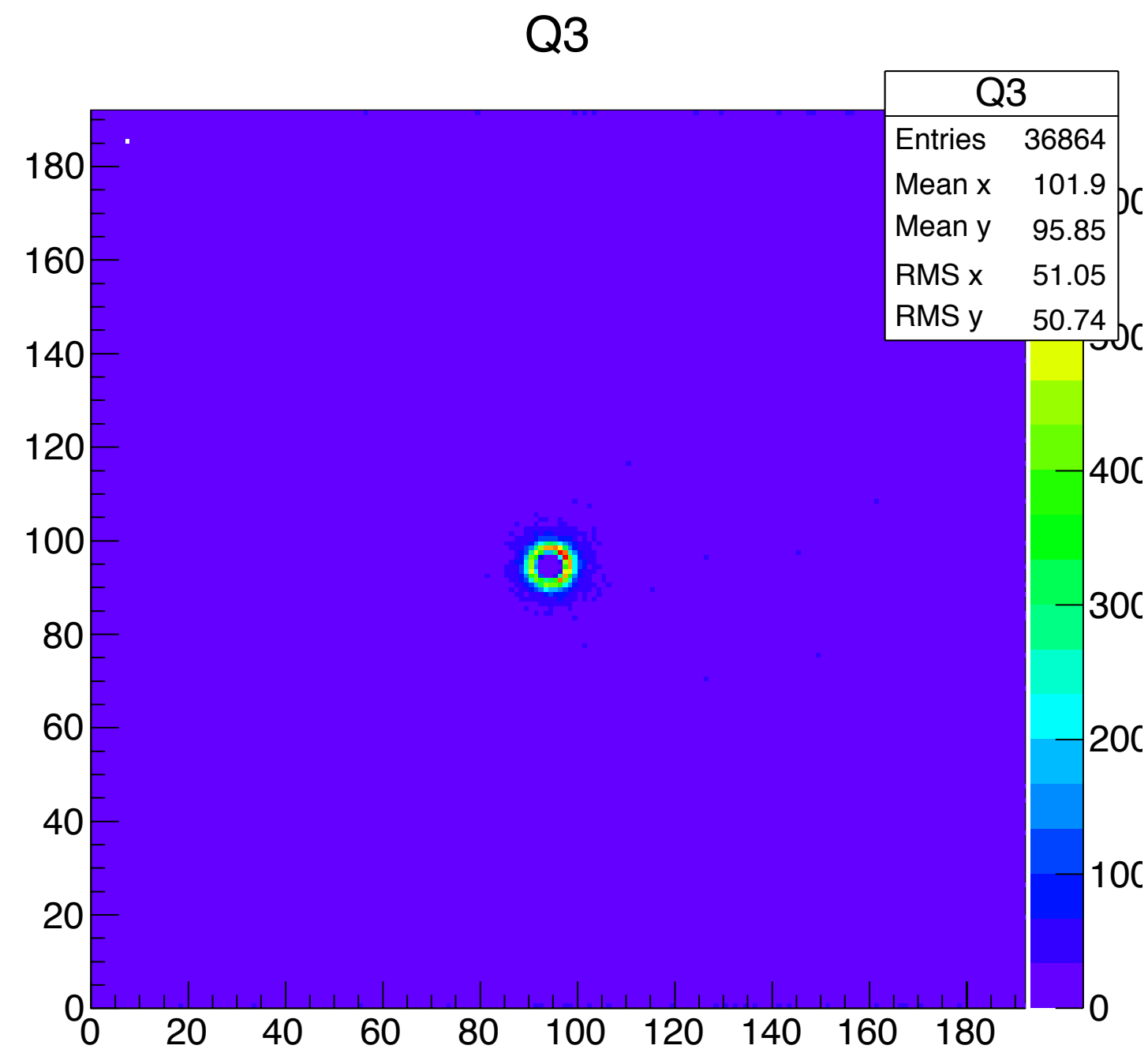
Q2



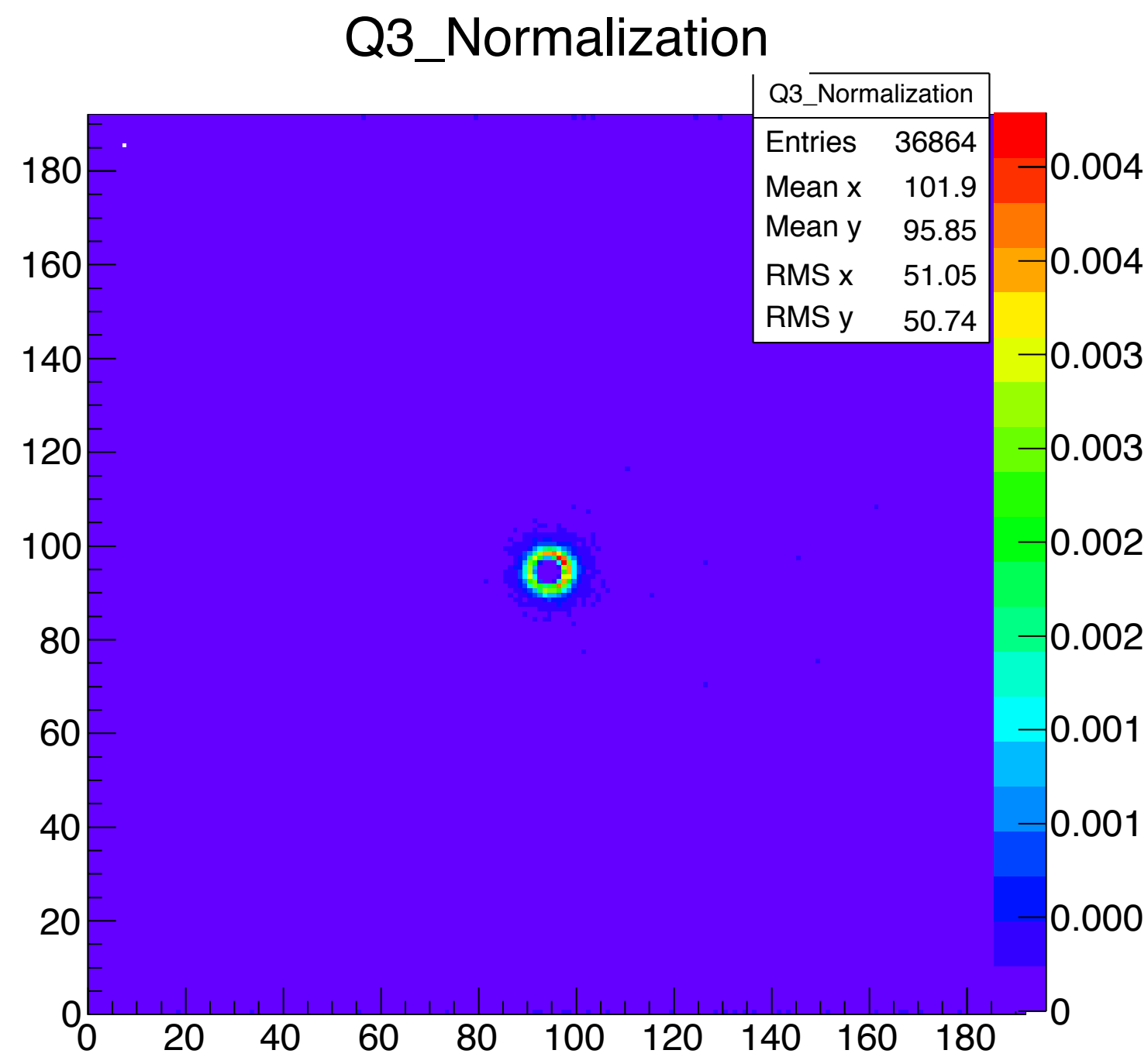
- サンプル B₄C
- アッテネータ無し
- ビームストップ有り
- 測定時間 3600[s]

- サンプル B₄C
- アッテネータ無し -> 有りに規格化
- ビームストップ有り
- 測定時間 3600[s] -> 300[s]に規格化

Q3

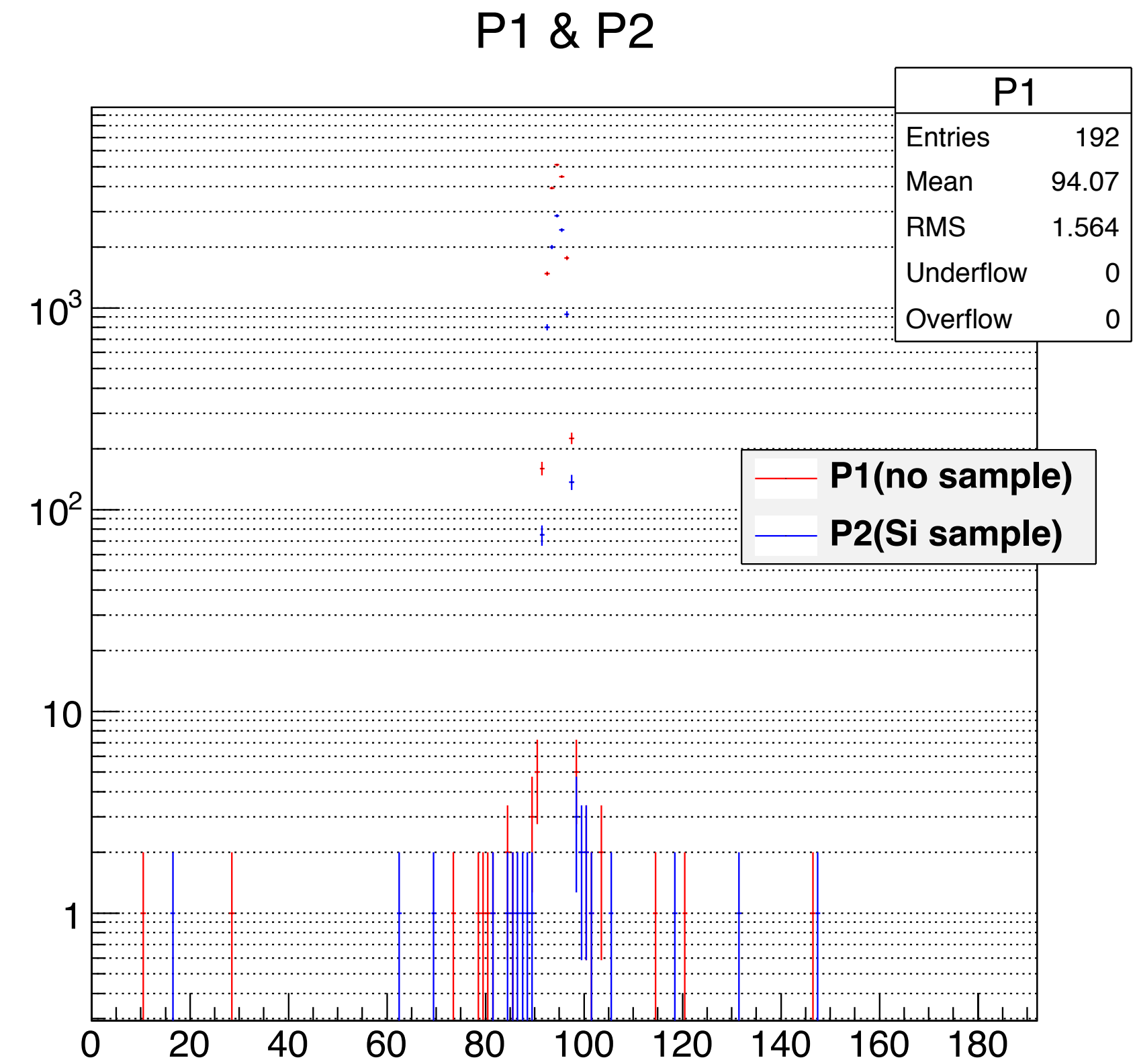
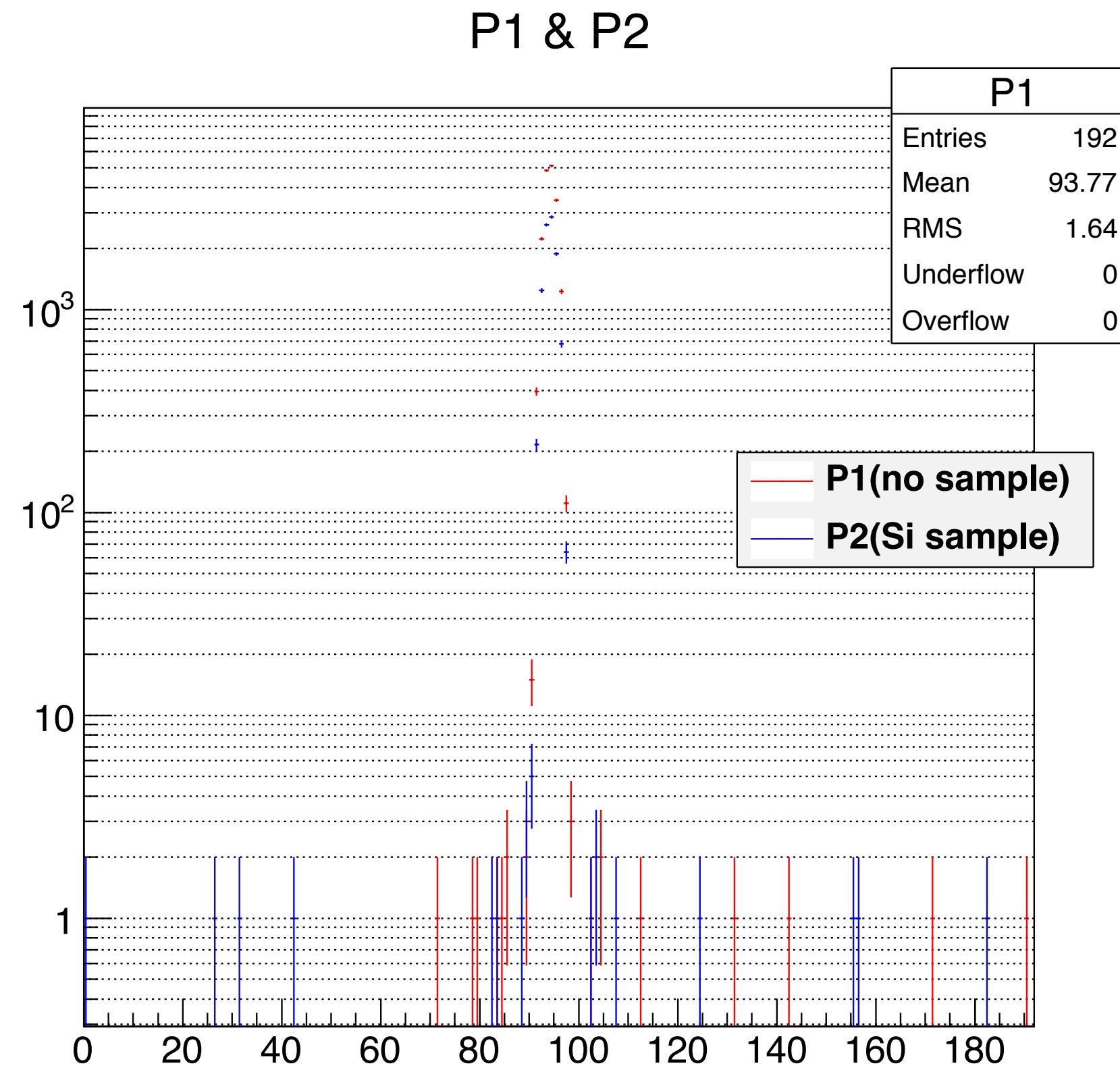


- サンプル empty
- アッテネータ無し
- ビームストップ有り
- 測定時間 3600[s]



- サンプル empty
- アッテネータ無し -> 有りに規格化
- ビームストップ有り
- 測定時間 3600[s] -> 300[s]に規格化

Slice of P



- PIとP2のスライス(左がx軸にそったビーム中心のスライス、右がy軸方向に沿ったビーム中心のスライス)