

IceCube-Gen2の光検出器 FOM開発に向けた ファイバーの評価

2024/3/26 空気シャワー研究会
大阪公立大学 石井達希

宇宙ニュートリノ

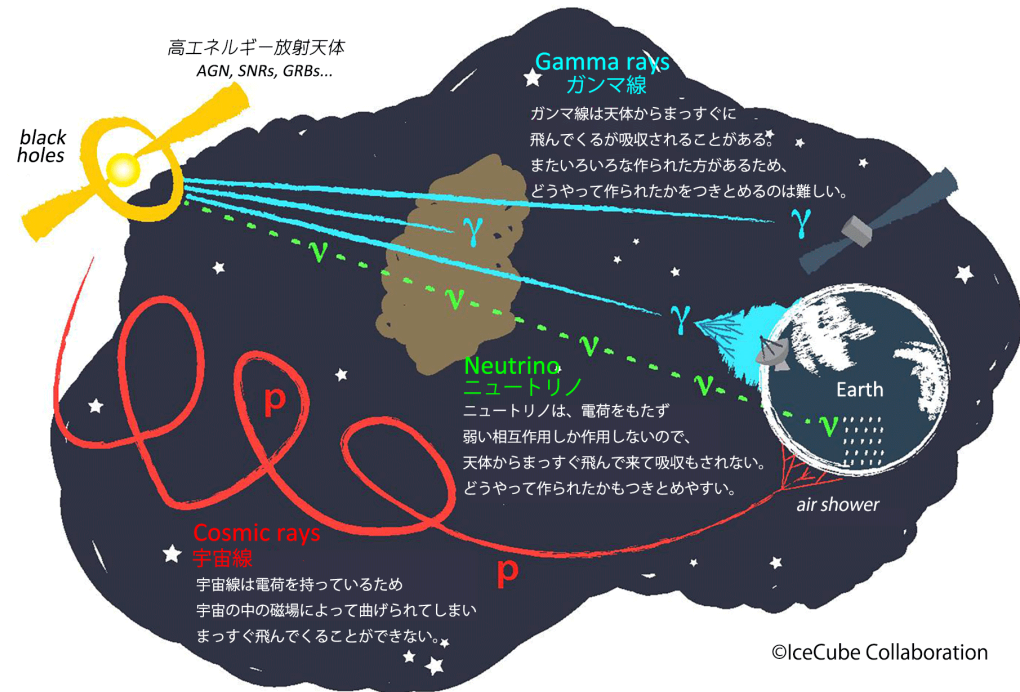
• 宇宙線

宇宙を飛び交う高エネルギー荷電粒子
これを観測し起源を探るのが
宇宙線物理学

• 宇宙ニュートリノ

宇宙線が生成し宇宙を飛び交う
ニュートリノ

電荷を持たず質量も非常に小さいため
宇宙をまっすぐ飛来してくる



宇宙ニュートリノを調べることで宇宙線の起源を同定する

IceCube-Gen2

• IceCube

南極の氷中に埋め込んだ光検出器で宇宙ニュートリノを観測

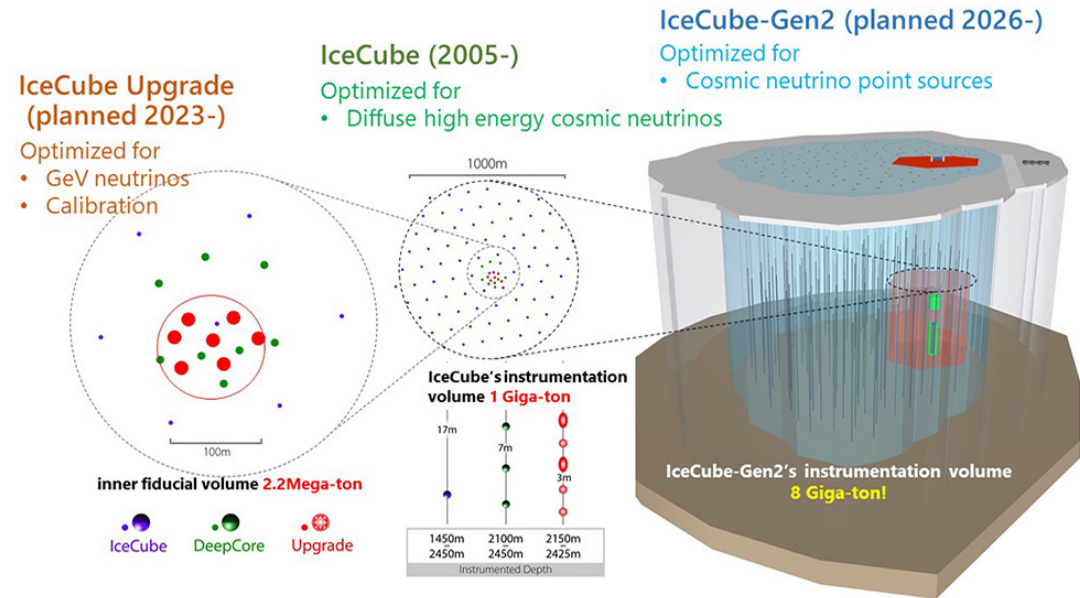
ニュートリノの相互作用で生成された荷電粒子が放出するチェレンコフ光を検出

• IceCube-Gen2

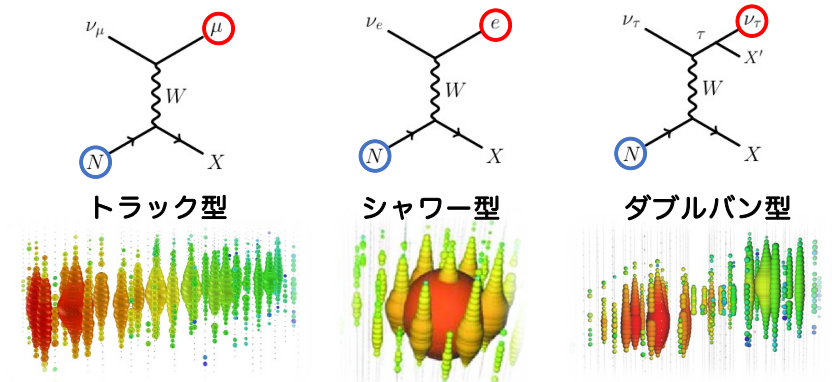
IceCubeのアップグレード計画

体積を約8倍まで拡大

- 相互作用の確率を上げる
- 到来方向決定精度を上げる
- フレーバー同定事象検出数が増える



©IceCube-Gen2 Collaboration



©IceCube-Gen2 Collaboration 3

検出器

- DOM



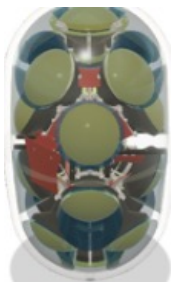
IceCube (2011~) の検出器
60個/本のDOM × 86本のストリング
PMT : 1本 直径 : 30 cm

- mDOM、D-Egg

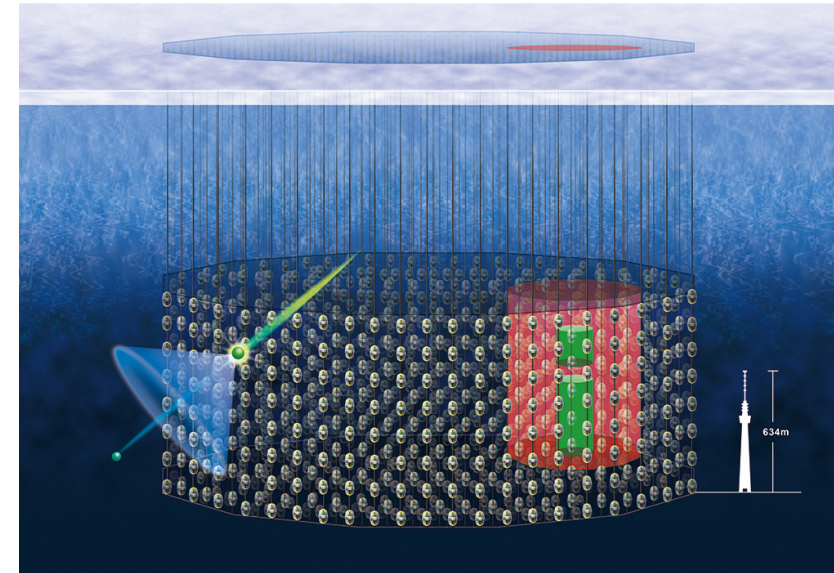


IceCube-Upgrade (2026~) の検出器
約100個/本のDOM × 7本のストリング
PMT : 24本、2本 直径 : 35 cm、30 cm

- LOM



IceCube-Gen2 (2028?~) の検出器
約80個/本のDOM × 120本のストリング
PMT : 18本 直径 : 31 cm



©IceCube-Gen2 Collaboration

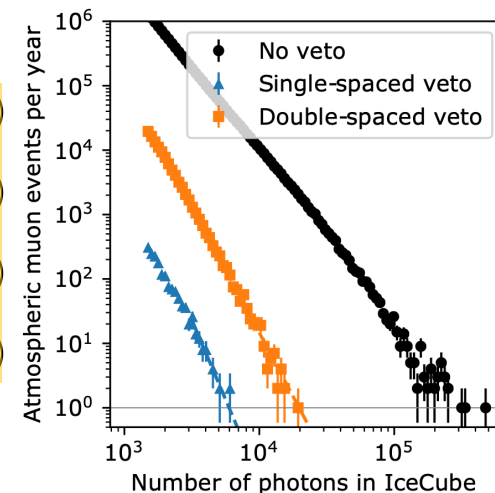
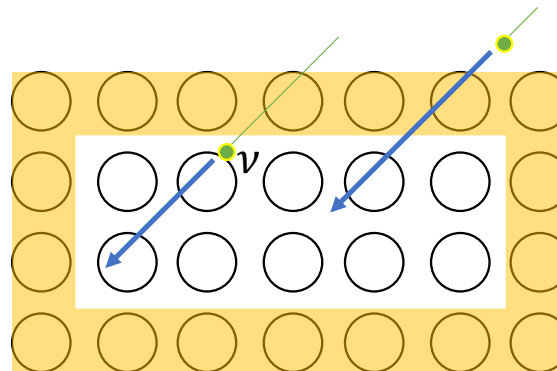
← 埋設間隔が125 mから
約2倍の240 mに

Gen2の課題

• Veto能力の低下

最も外側の検出器らは
事象の発生が検出器内外どちらかを
識別するためのVetoとして使用

検出器間隔が広がったことにより
この性能が低下

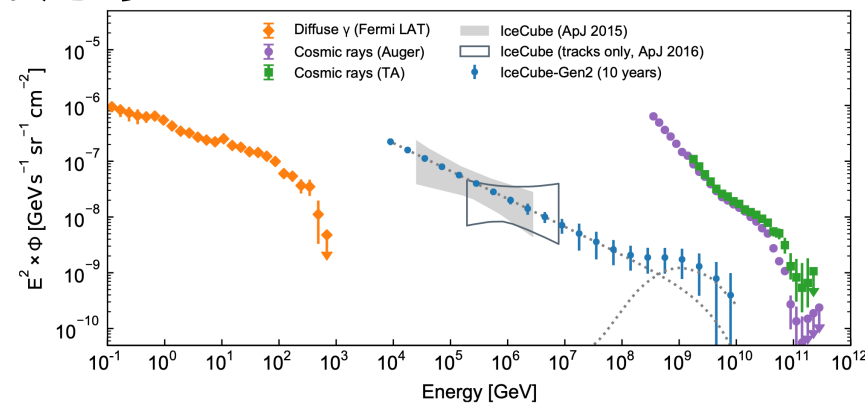


©IceCube-Gen2 Collaboration

• エネルギー閾値の上昇

氷中のチェレンコフ光の減衰長が約120 mのため
入射する光子数が約 $e^{-0.5} \approx 0.6$ 倍まで減少

観測できるエネルギーの閾値が
実質的に10 TeVほどまで上昇し、
これ以下の事象観測数の増加は限定的



©IceCube-Gen2 Collaboration

FOM

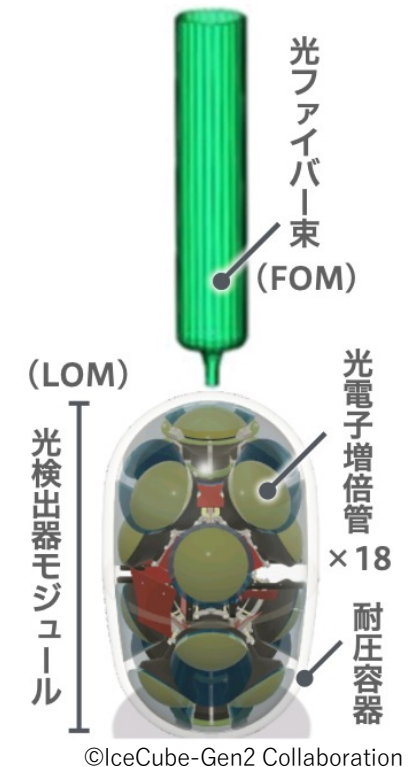
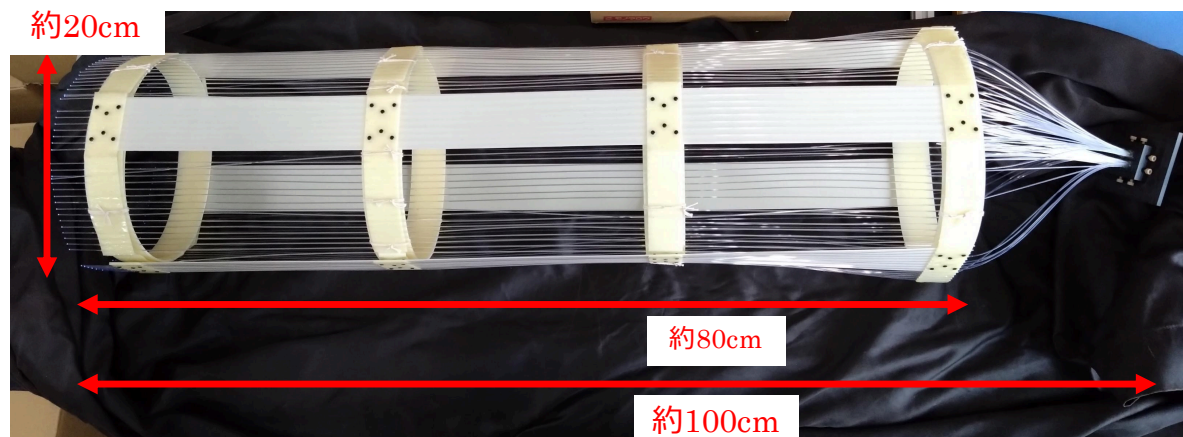
最善の解決策：もっと多く密に検出器を配置→費用面での限界

次善：耐圧容器内に検出面積を増やすデバイスを拡張設置→技術・費用面での限界

- Fiber Optic Module

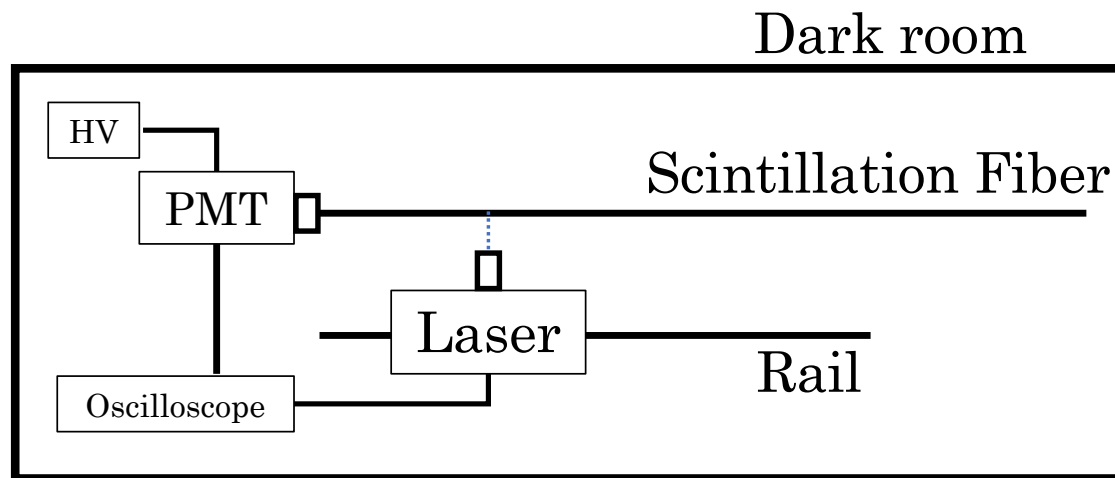
光が入射するとシンチレーション光を発する
シンチレーションファイバーを円筒状に束ねたもの

入射光を特定の波長の光に変換して内部を全反射させながら
ファイバー端まで伝搬し、接触しているLOMに受光させる



ファイバーの性能評価

FOMを構成するシンチレーションファイバーの性能を評価する

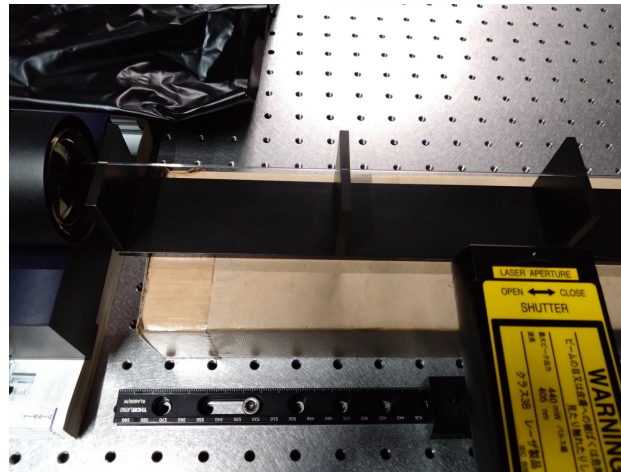


Laser : PLP-10 Laser diode head M10306-29
(Hamamatsu Photonics)
wavelength : 405 nm
pulse width : typ 60 ps, max 100 ps

Scintillation Fiber : Wavelength Shifting
Fiber B-3 (kuraray)
emission peak : 450 nm
attenuation length : > 4.0 m

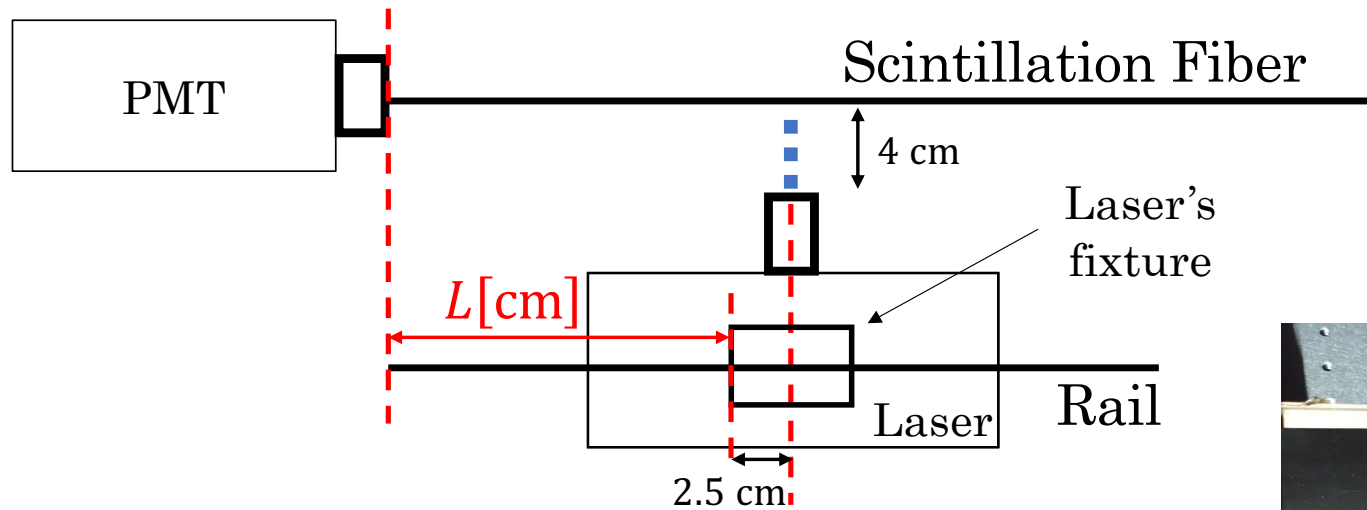
PMT : Photomultiplier Tube R1828-01
(Hamamatsu Photonics)
diameter : 2 inch
rise time : 1.3 ns

Oscilloscope : WaveSurfer 4104HD
(Teledyne LeCroy)
analog bandwidth : 1 GHz
rise time : 450 ps



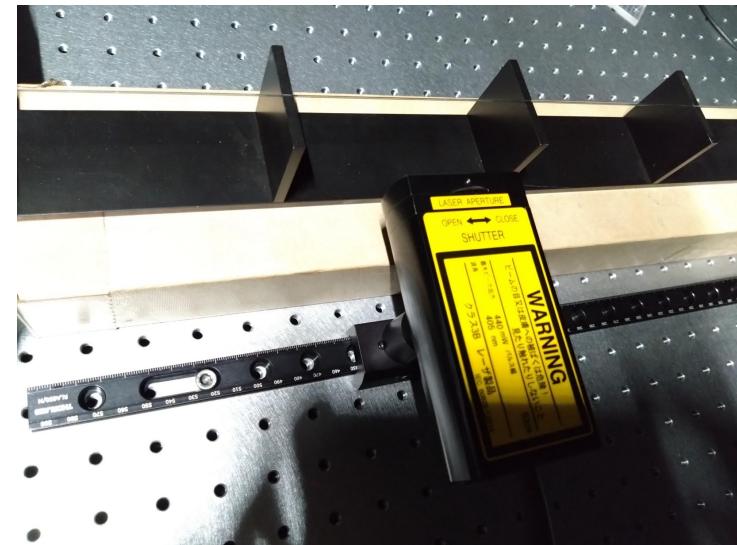
ファイバーの性能評価

レーザーの入射位置のPMTからの距離に対する応答を調べる



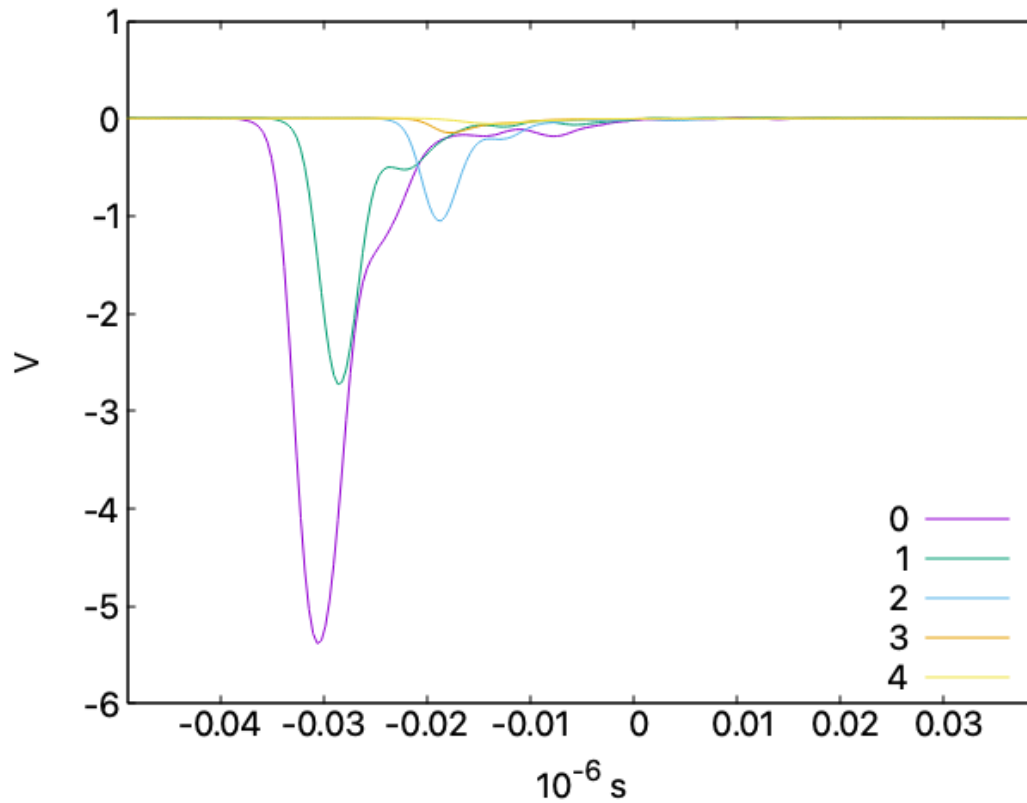
レールの端からレーザー固定具の左端までの距離 L を 0 cm から 1 cm ずつ大きくしていく

繰り返し周波数 : 1 kHz
HV印加電圧 : 1000 V

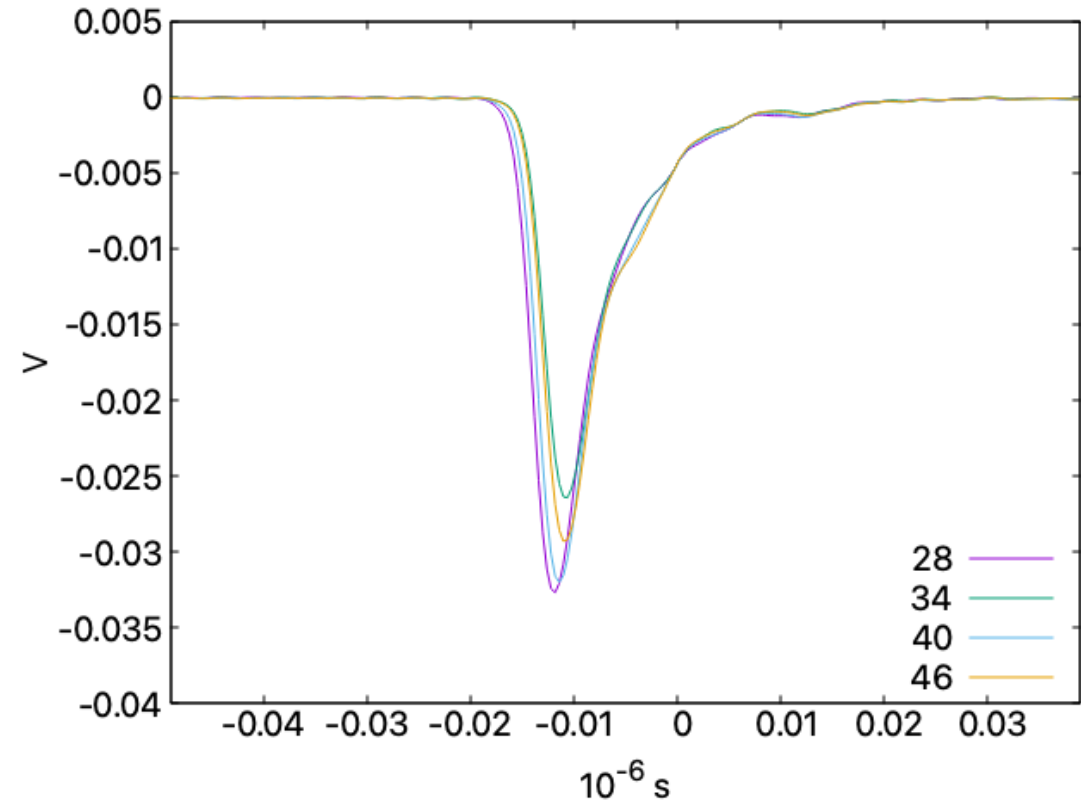


ファイバーの性能評価

• $0 \text{ cm} \leq L \leq 4 \text{ cm}$



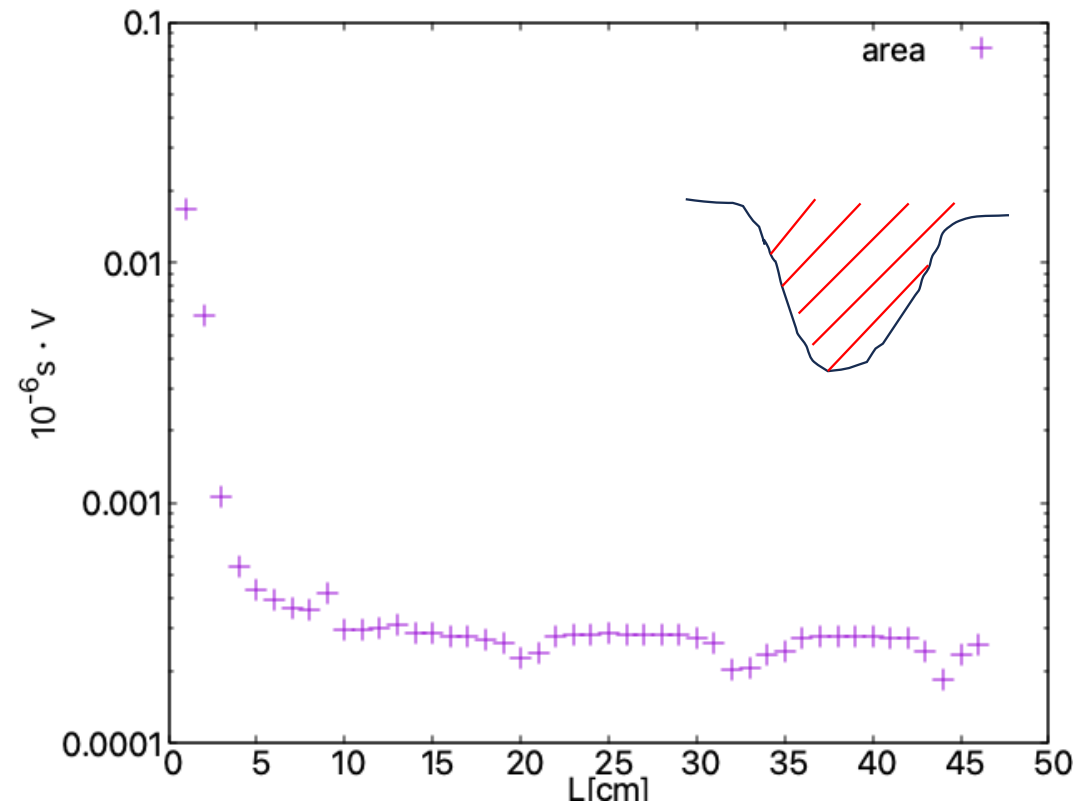
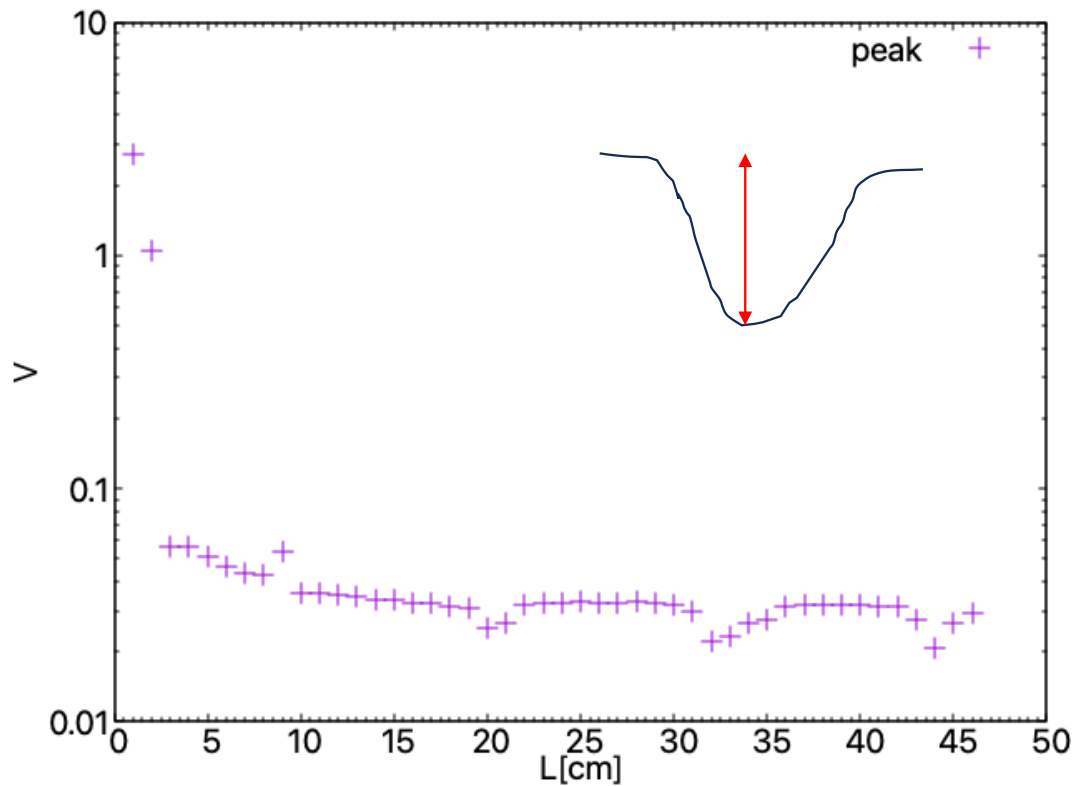
• $28 \text{ cm} \leq L \leq 46 \text{ cm}$



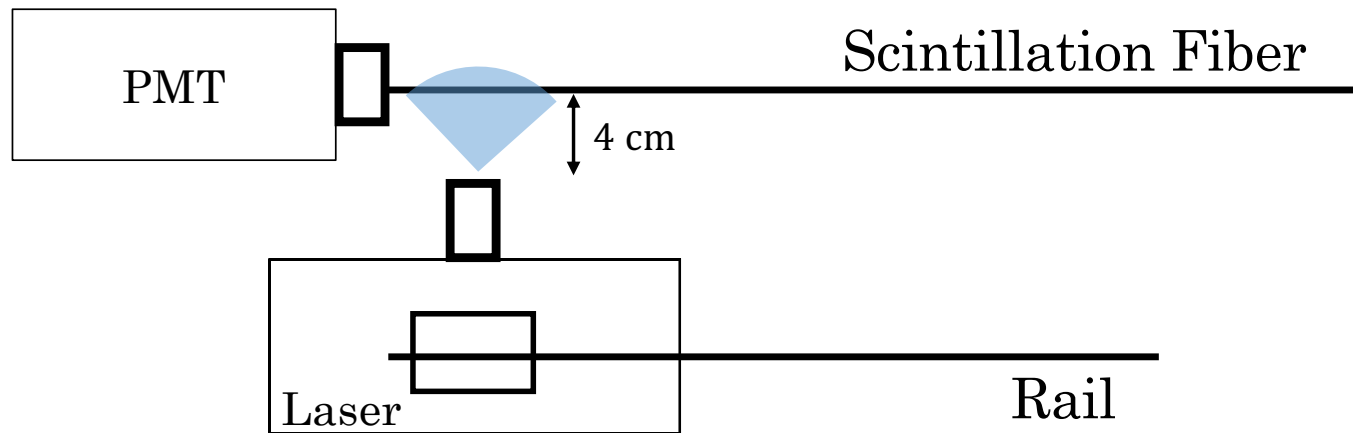
ファイバーの性能評価

• ピークの高さ

• 面積 (電荷に比例した量)



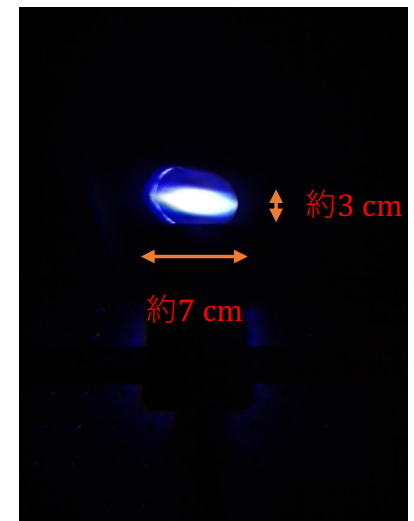
ファイバーの性能評価



レーザーは点光源ではなく広がっていくため
 L が小さいとSFを介さず直接PMTに入射しているのでは

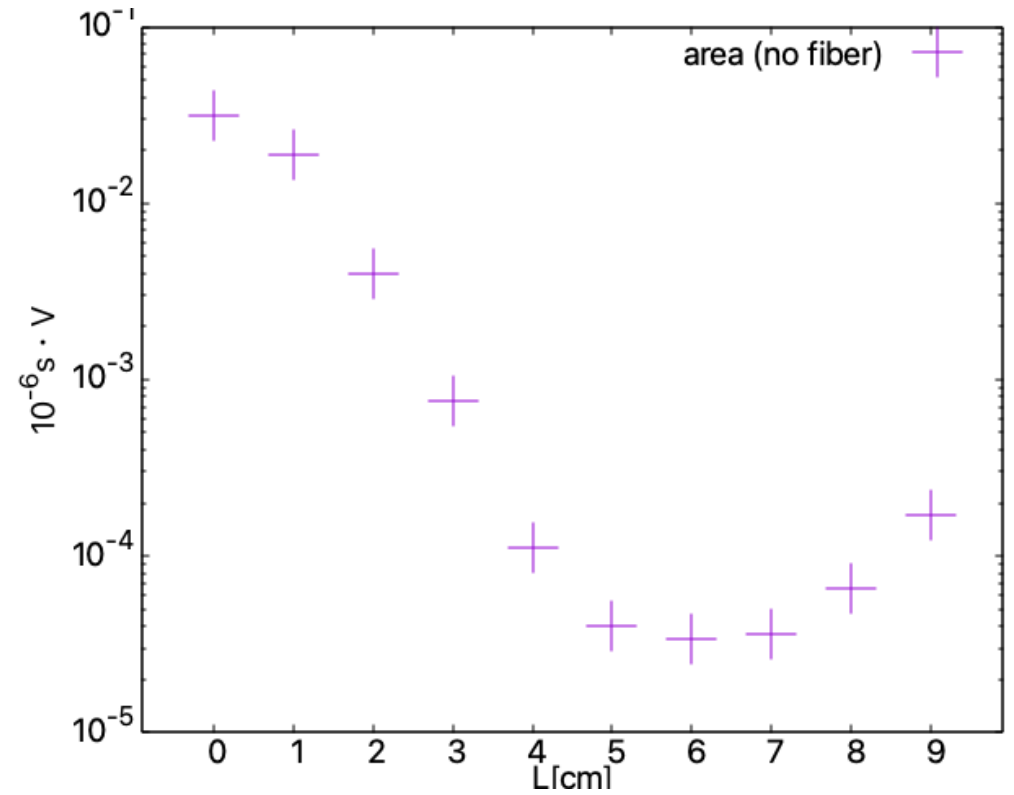
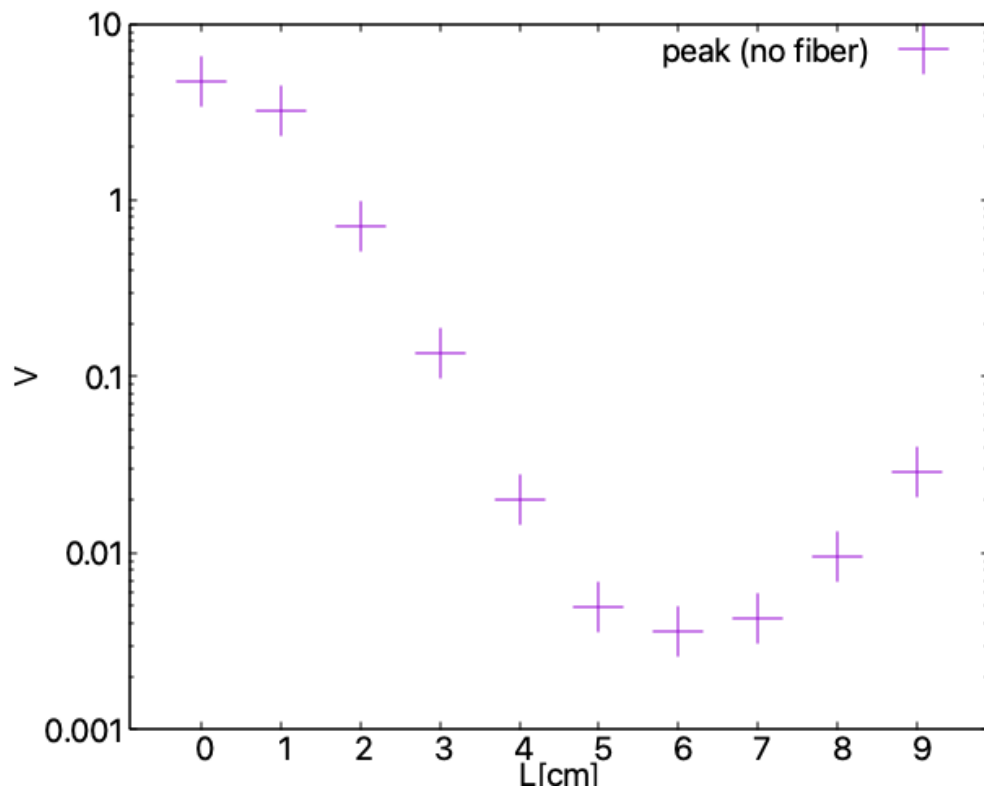


ファイバーを取り除いて測定



レーザーから4 cmの距離に
紙を置いて
投射される様子

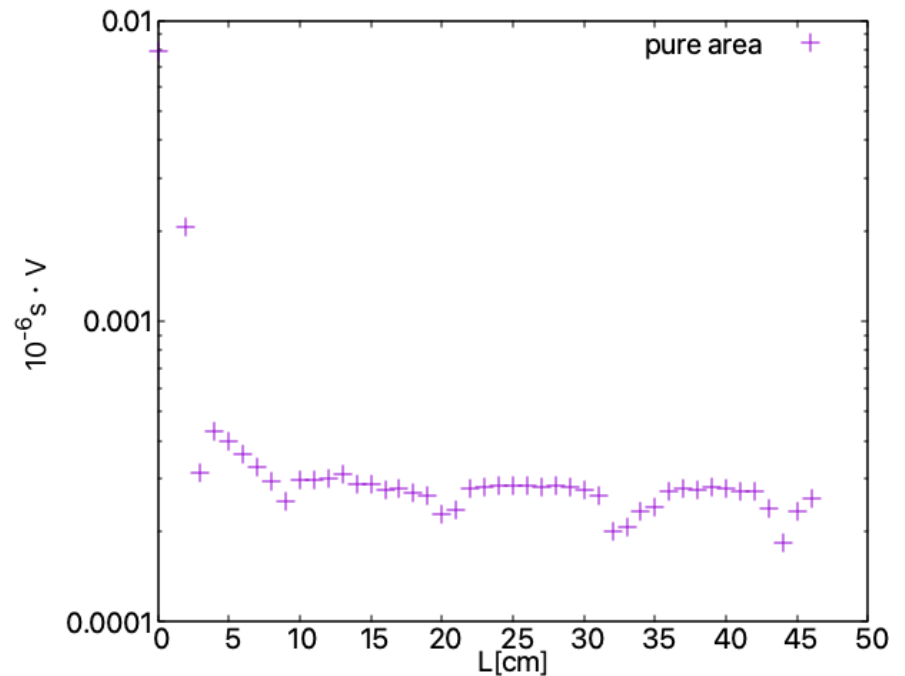
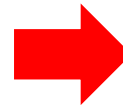
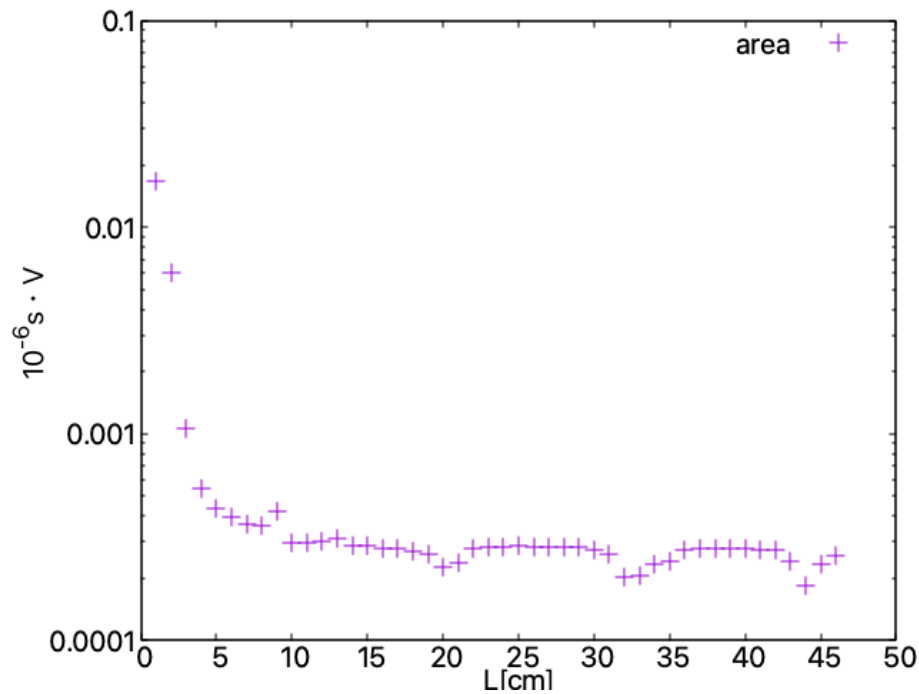
ファイバーの性能評価



予想通り直接PMTに入射しているように見える

ファイバーの性能評価

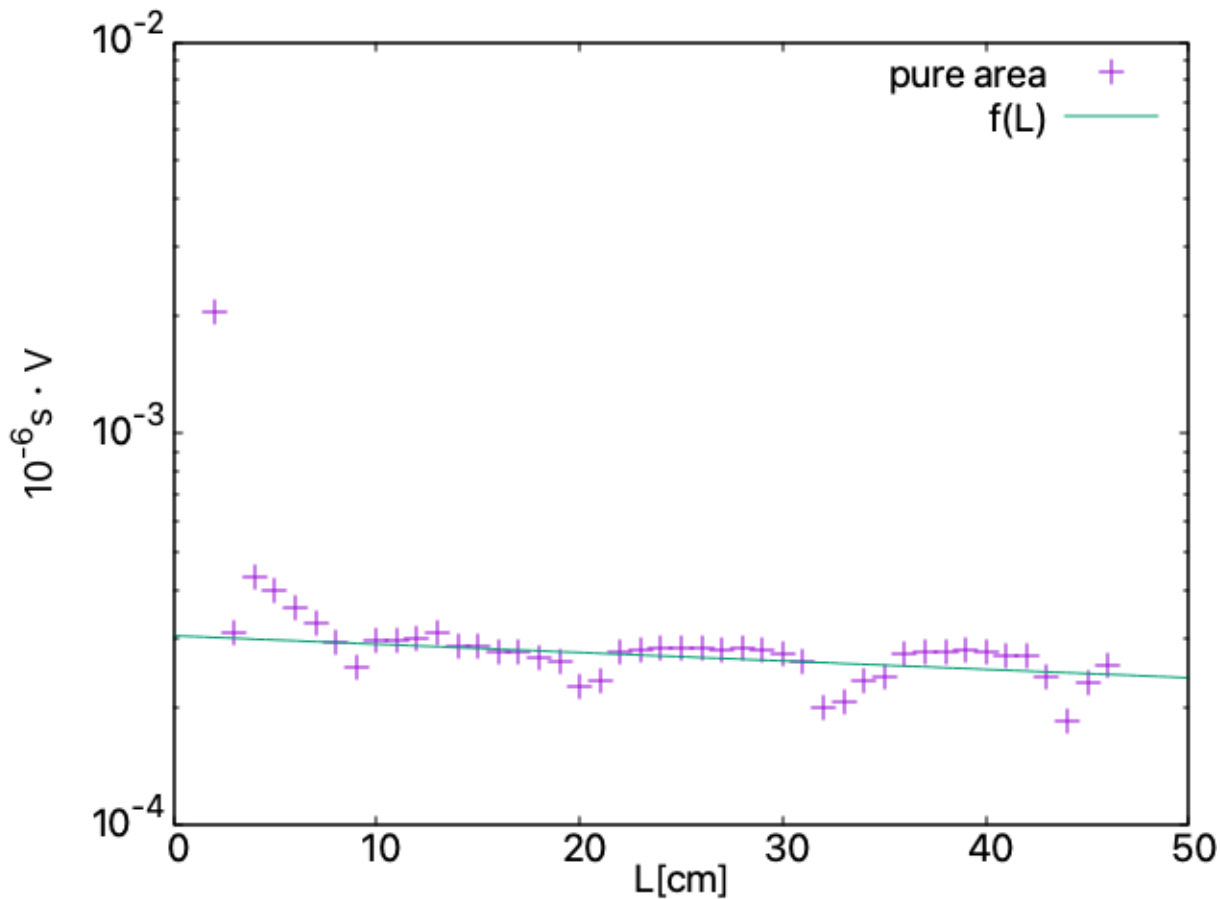
直接入射の影響を取り除く



$L \leq 10$ では急激に減少しており、 $L \geq 10$ では緩やかな減少に見える
指数関数的に減少すると予想される

ファイバーの性能評価

$f(L) = a \exp\left[-\frac{L}{b}\right]$ でフィッティング



$L \geq 10$ のみを使用

$$a = 0.000305 \pm 0.000013$$

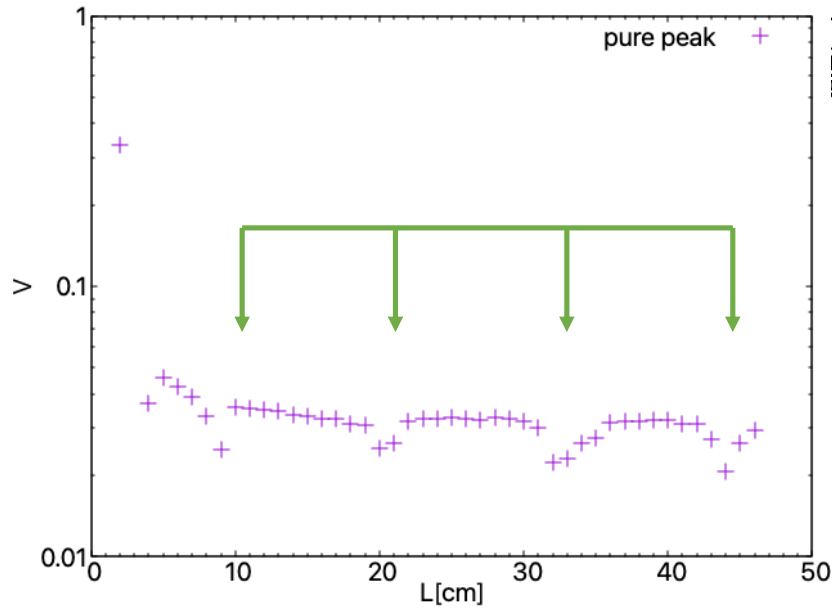
$$b = 202 \pm 60$$



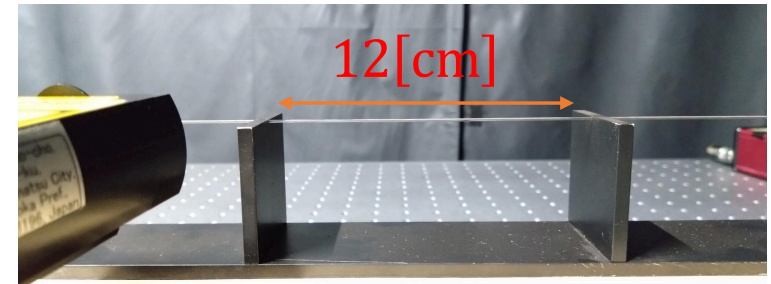
減衰長[cm]に相当

カタログの減衰長 : > 4.0 m

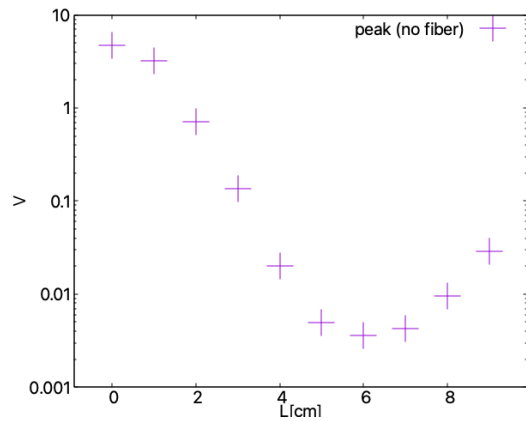
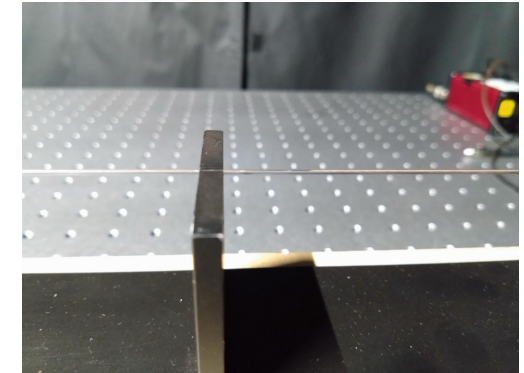
ファイバーの性能評価



12 cmごとの支点がファイバーを遮蔽することが影響していると考えられる



黒い金属製

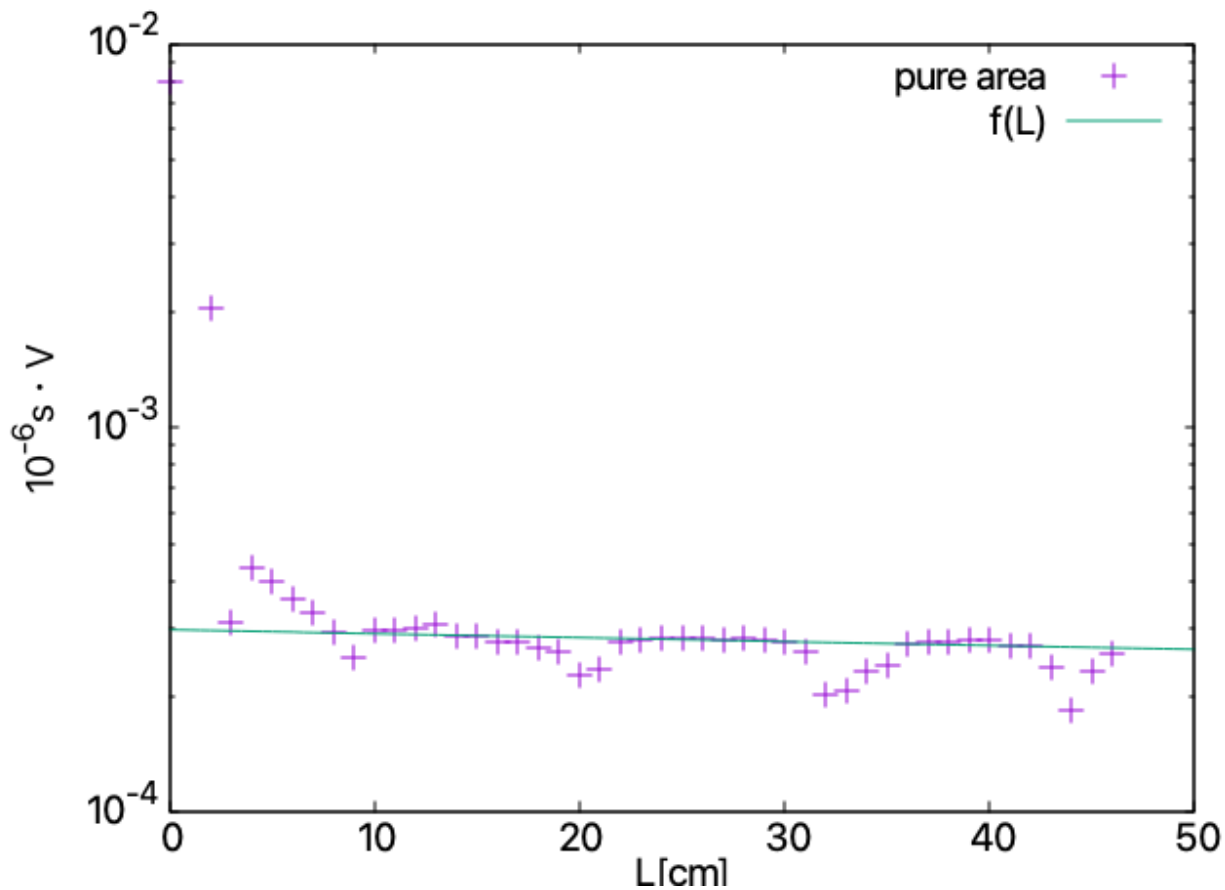


しかし $6 \leq L \leq 9$ で直接入射が増加傾向だったことを説明できない

支点は遮蔽しかつ反射も行っているのでは

ファイバーの性能評価

極端に凹んでいた部分を除去



$$a = 0.000298 \pm 0.000005$$

$$b = 422 \pm 106$$



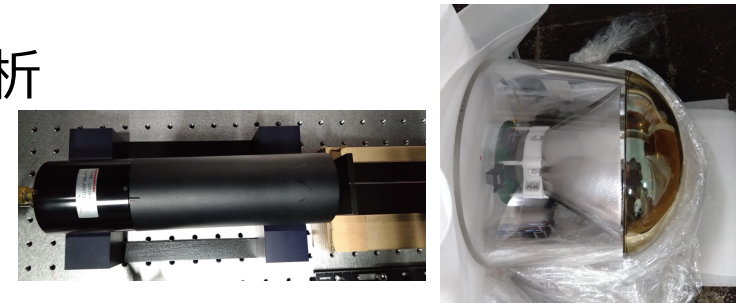
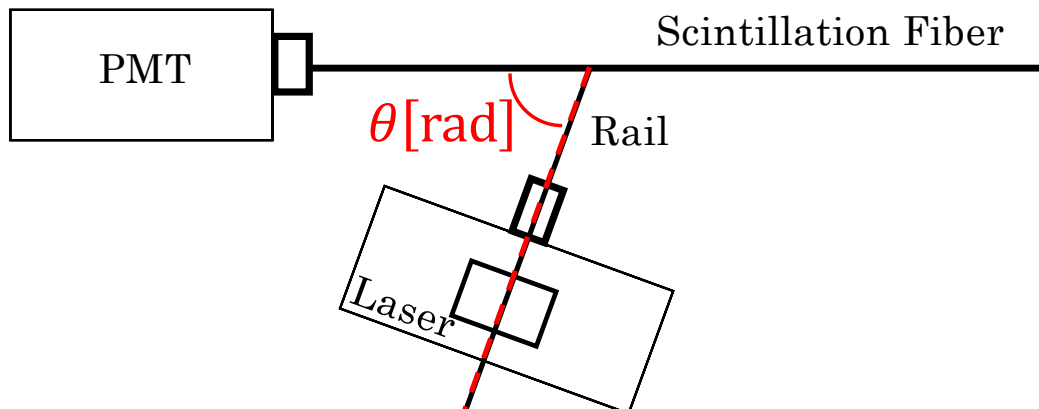
減衰長[cm]に相当

カタログの減衰長 : > 4.0 m

まとめと今後の展望

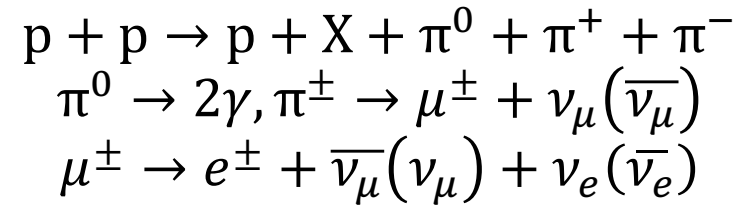
- 宇宙ニュートリノの観測を通じて宇宙線の起源を探る
- 大型検出器IceCubeのアップグレード計画IceCube-Gen2が進行している
- Gen2の課題を解決するFOMの開発と性能評価を行っている

- 支点の影響を受けない測定方法を検討、詳細な解析
- D-Eggに用いられているPMTを使用
- 南極の氷中を想定した冷凍庫内での測定
- ファイバーへの入射角度に対する応答を調べる



Back up

宇宙線と大気との反応

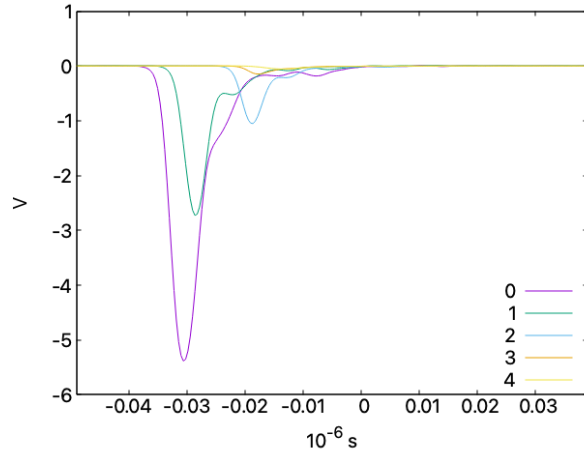


大気ミュオン：宇宙線と大気の相互作用によって生成されるミュオン

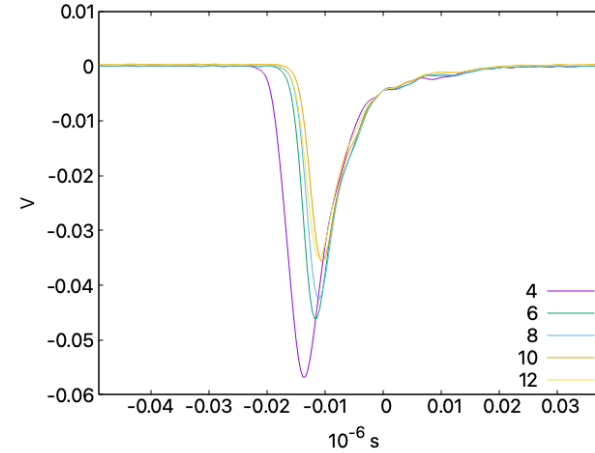
地下1450 m以下に埋め込むことで大気ミュオンの影響を減らす
IceTopとの比較も行う

ファイバーの性能評価

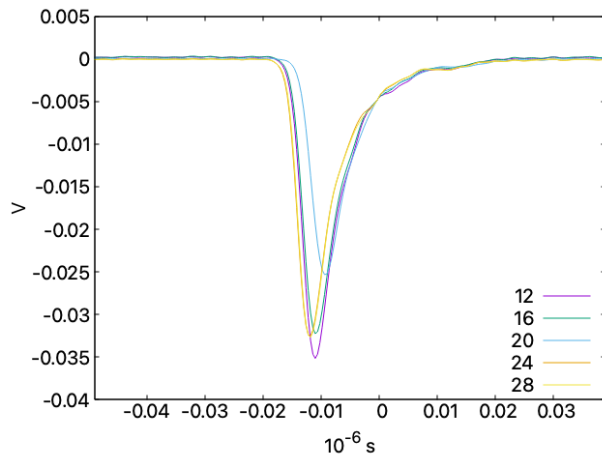
• $0 \text{ cm} \leq L \leq 4 \text{ cm}$



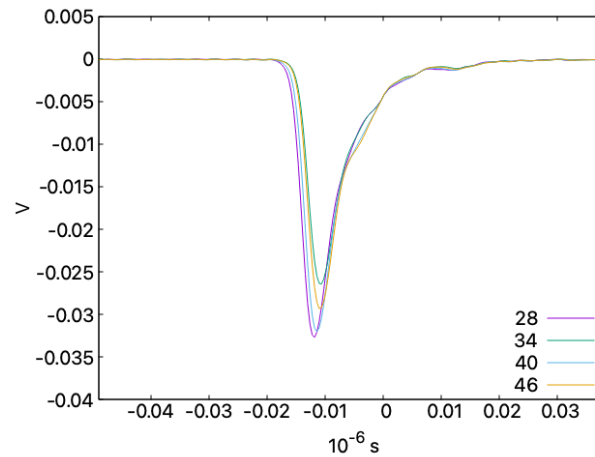
• $4 \text{ cm} \leq L \leq 12 \text{ cm}$



• $12 \text{ cm} \leq L \leq 28 \text{ cm}$

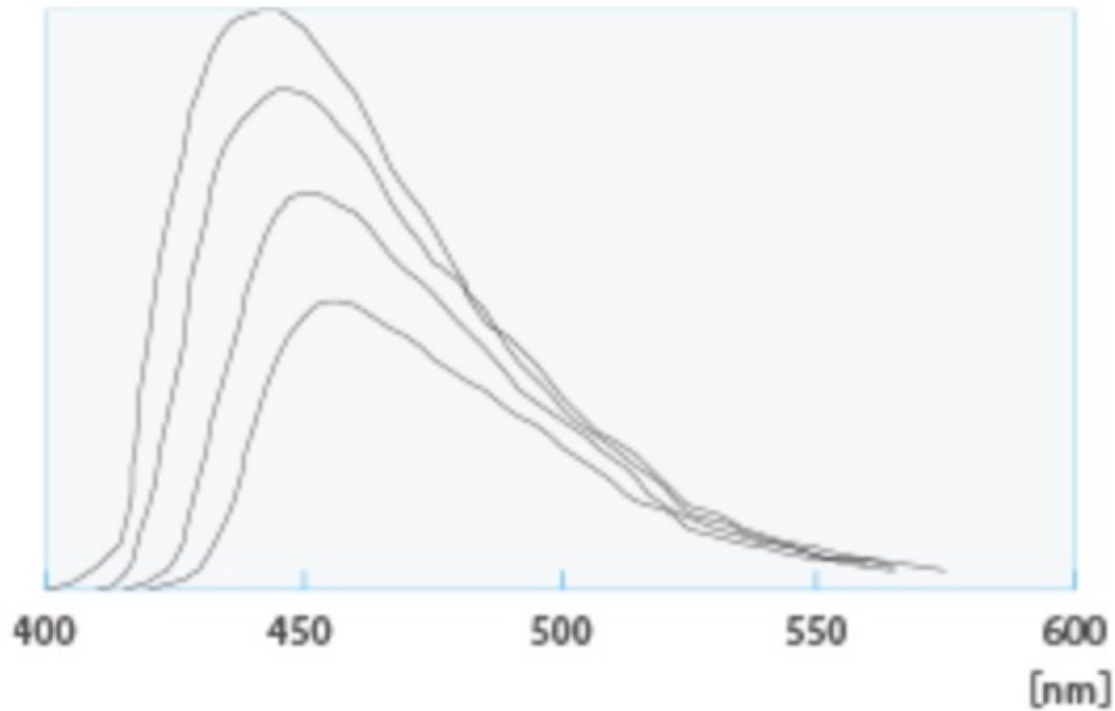


• $28 \text{ cm} \leq L \leq 46 \text{ cm}$

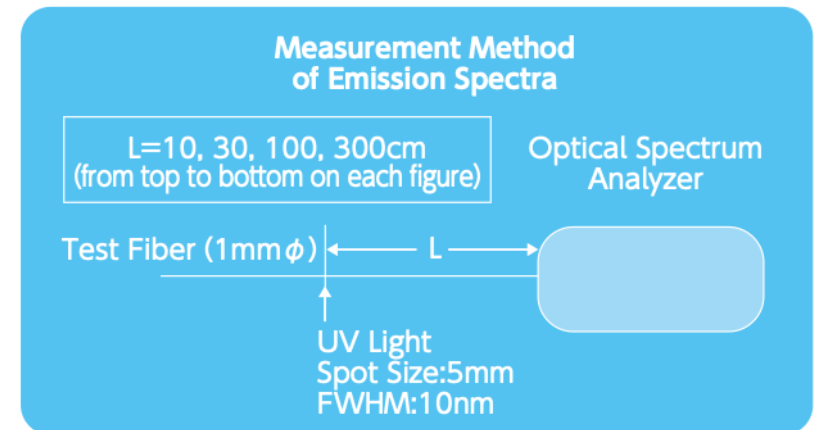


Back up

ファイバーの波長変換特性

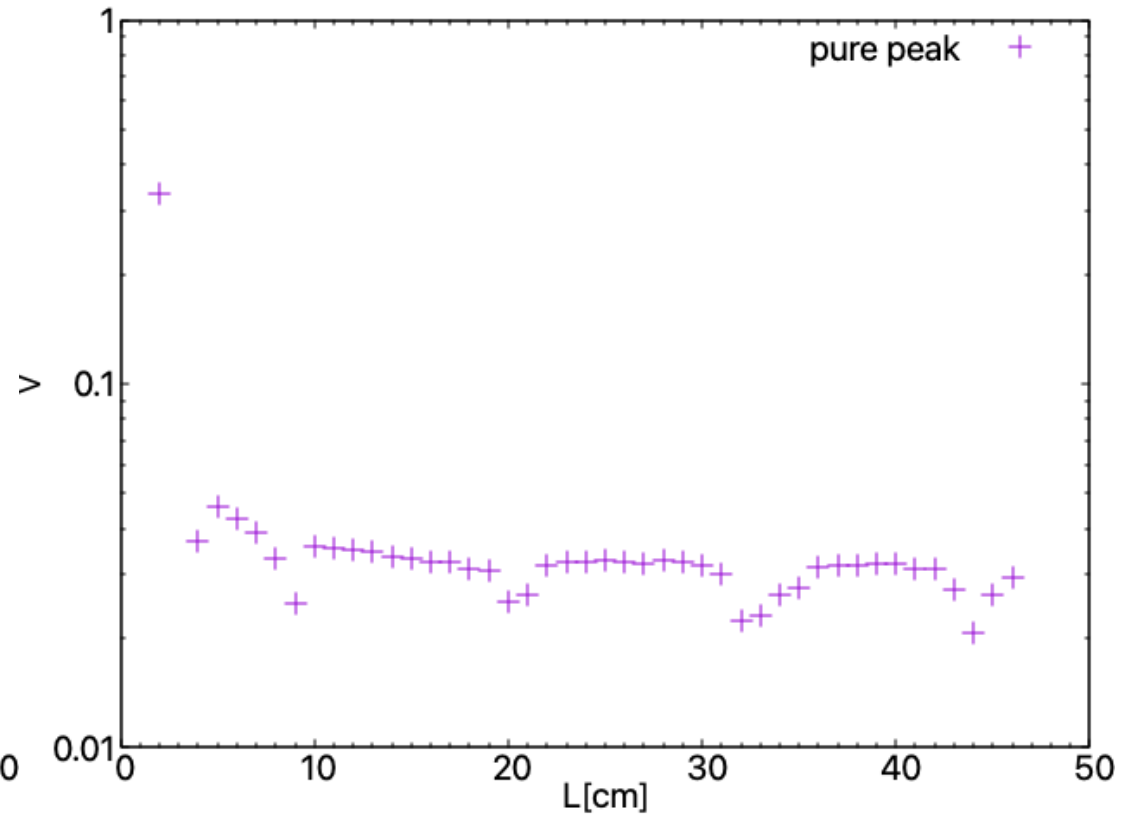
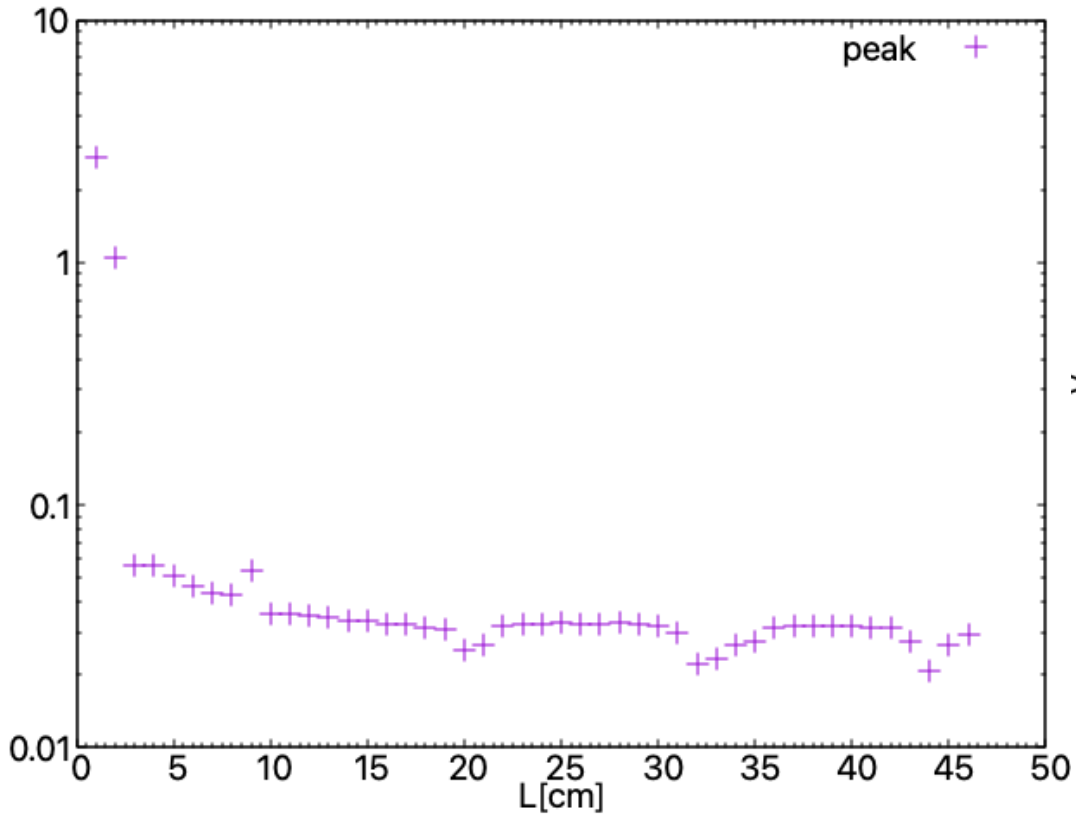


Exiting Wavelength: 430nm



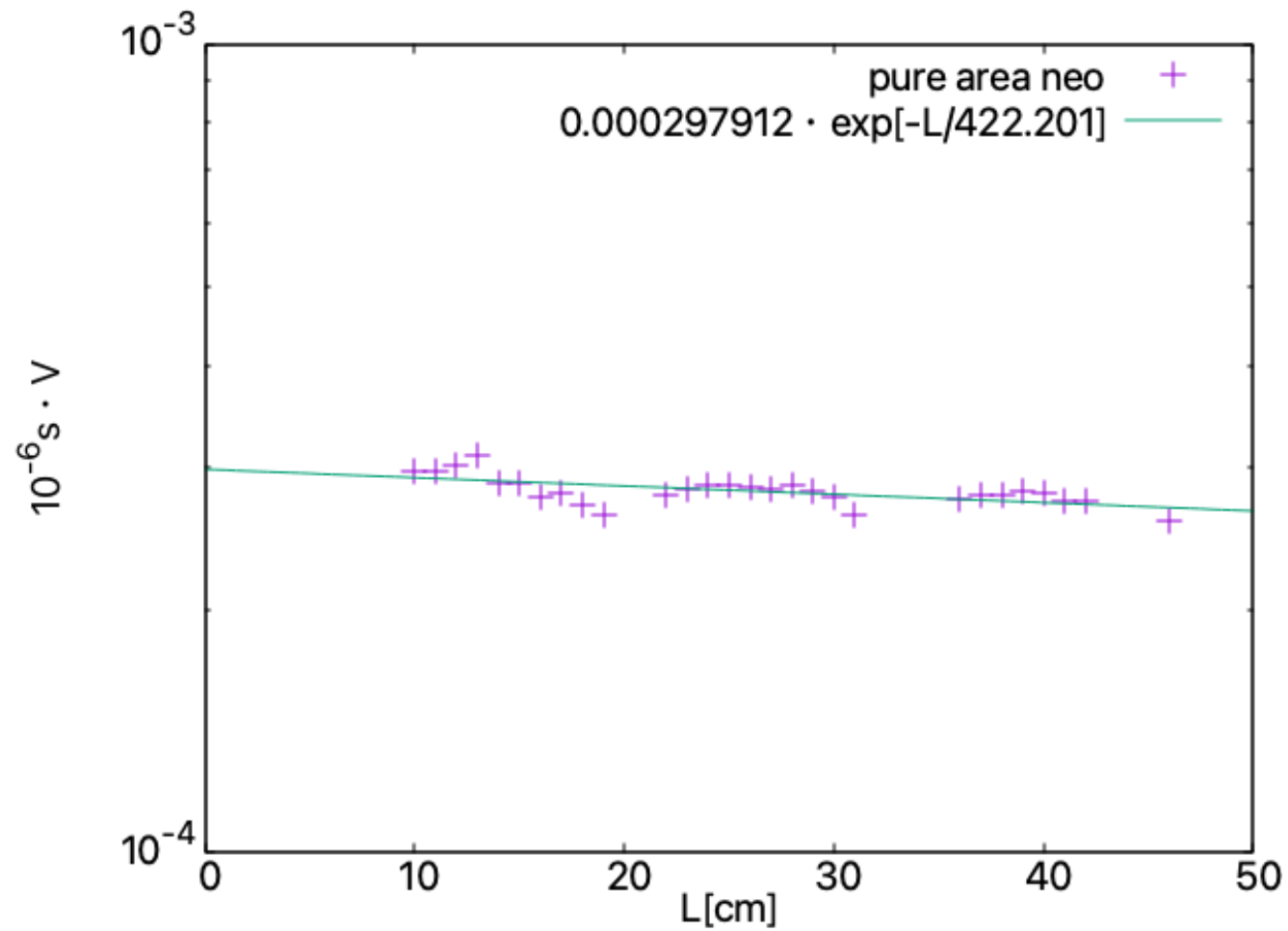
Back up

peak \rightarrow pure peak



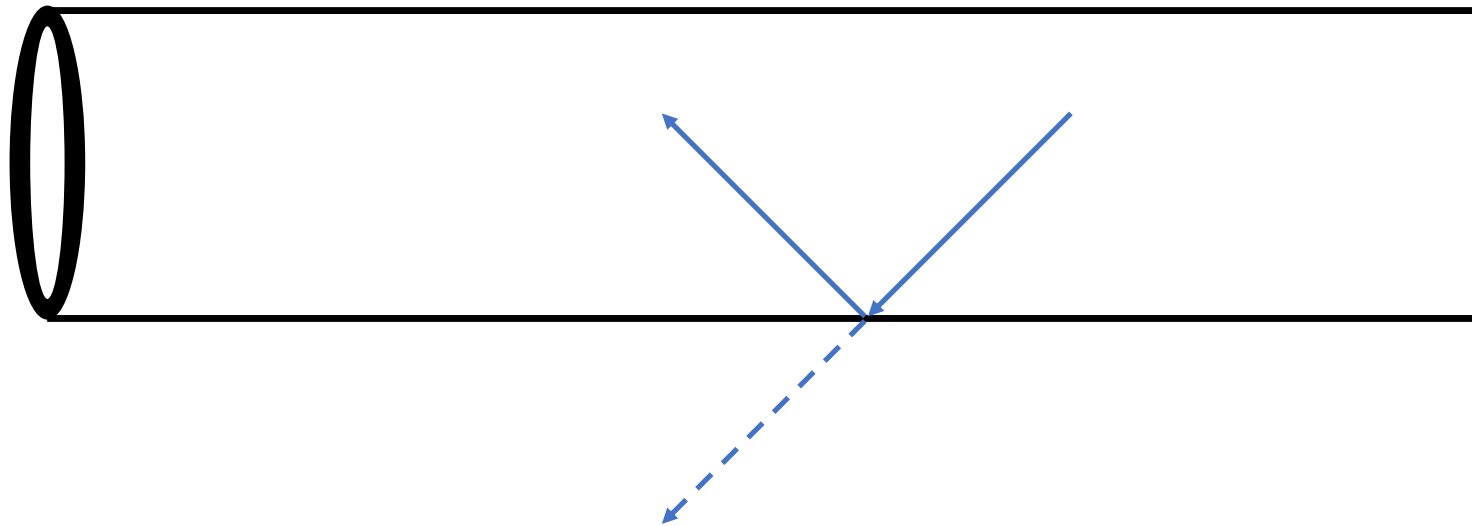
Back up

使ったものだけ



ファイバーの性能評価

ファイバー内で光の減衰が起こっている



指数関数的に減衰するはず