

2020/6/2

新学術領域「地下宇宙」合同研究会 パラレルセッション

Hyper-Kamiokandeにおける PMTガラス素材の 透過率測定

横浜国立大学 理工学府 修士1年
南野研究室 佐野翔一

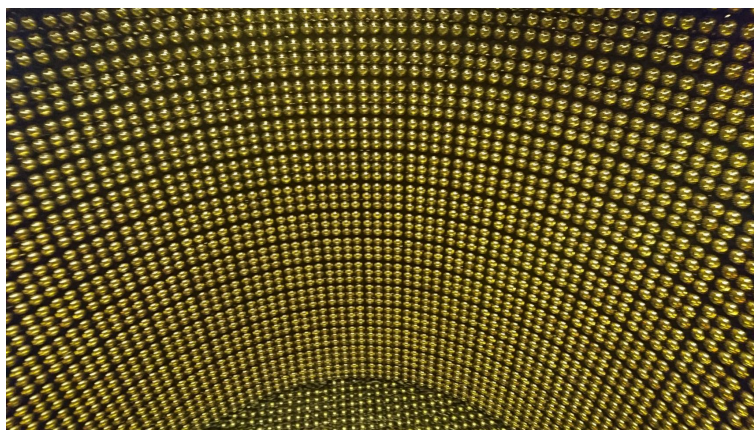
Hyper-Kamiokande(HK)計画

- SKに続く超大型水チェレンコフ検出器 (有効体積はSKの約10倍)
- ニュートリノの性質の解明、陽子崩壊の探索
- 岐阜県神岡にて2020年建設開始、2027年測定開始
- 水槽壁面に約4万本の光電子増倍管(PMT)

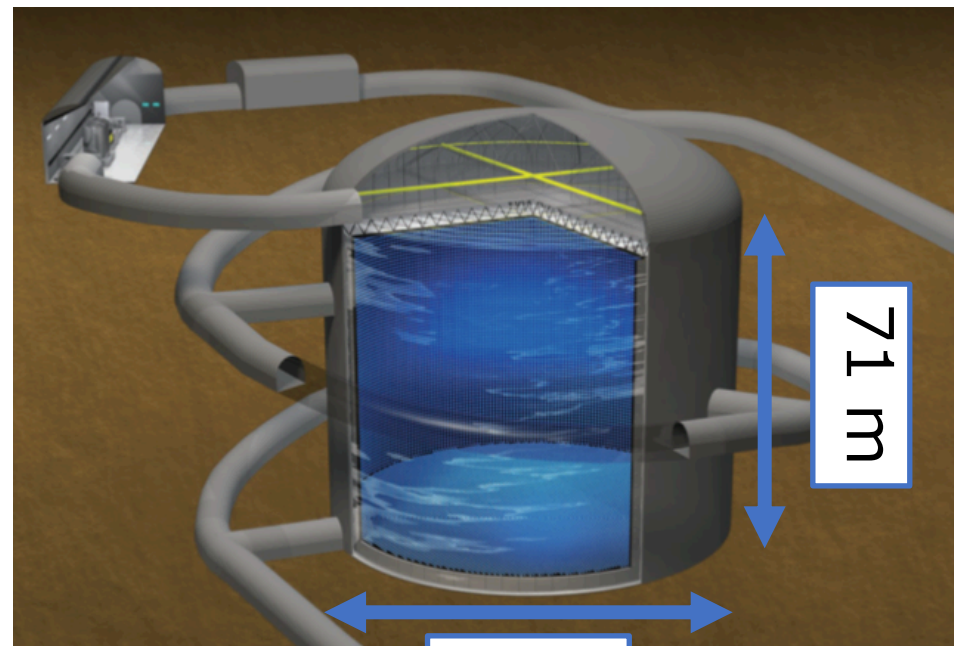
スーパーカミオカンデ(SK)

2015年ノーベル物理学賞を受賞。

ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノに質量があることを発見した。



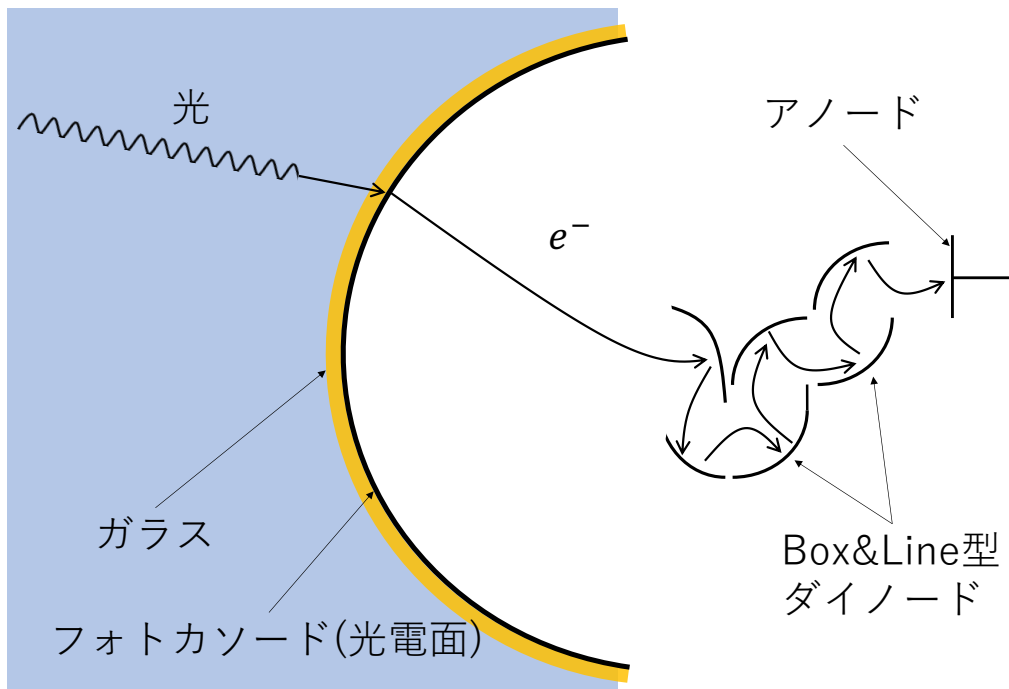
ハイパーカミオカンデ(HK)



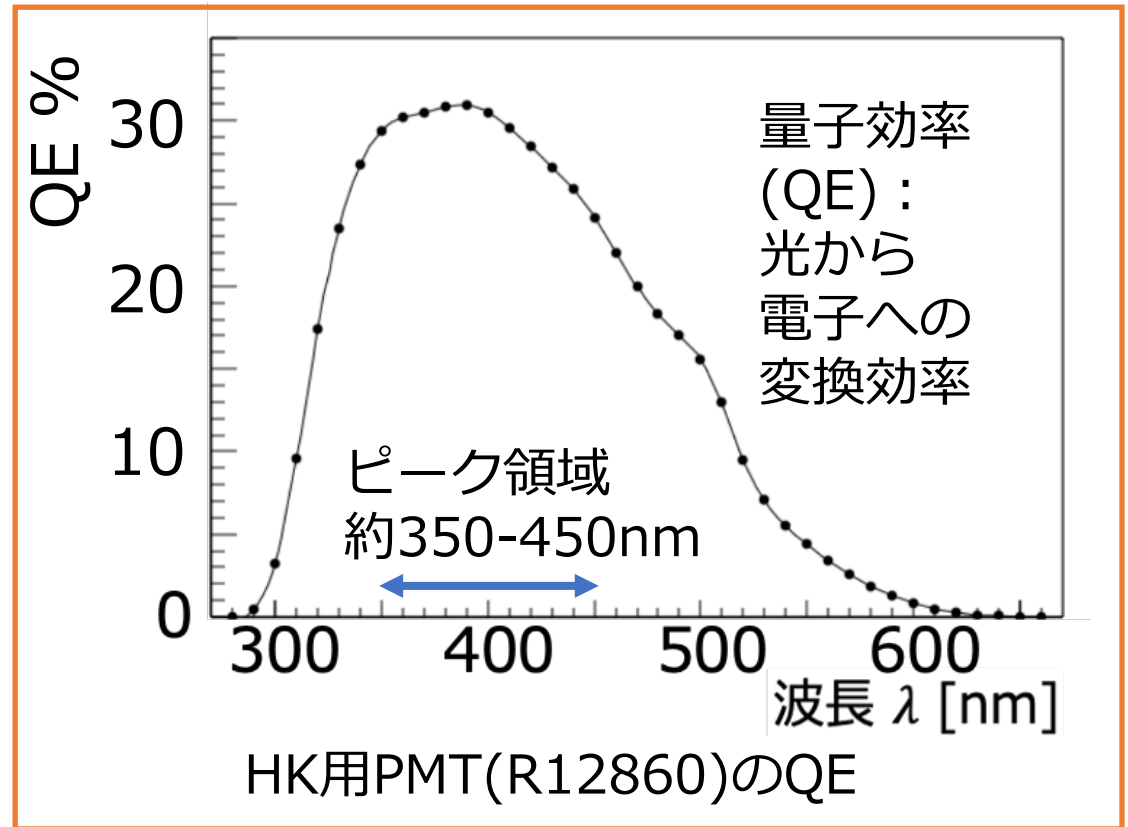
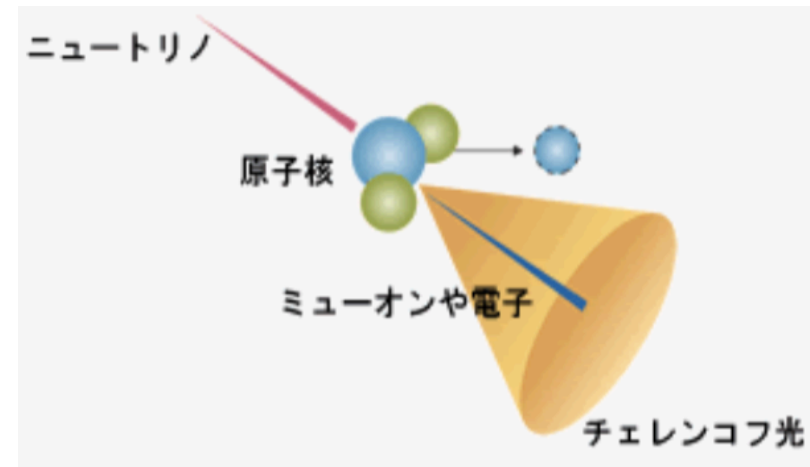
総水量：258,000t

光電子増倍管(PMT)

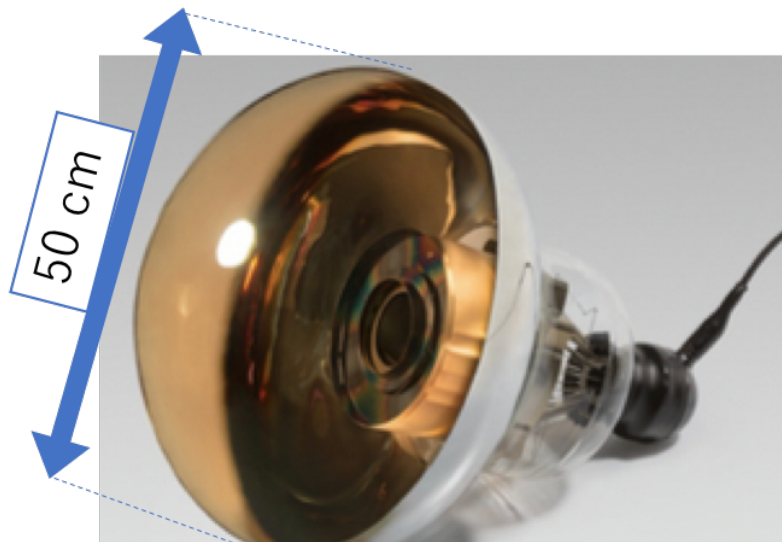
- 入射した光をガラス管内の光電面で電子に変換(光電効果)
- 変換された e^- をアノードを含めたダイノードで $\sim 10^7$ 倍まで増幅



チェレンコフ放射と
光電子増倍管(PMT)の概念図



光電子増倍管(PMT)

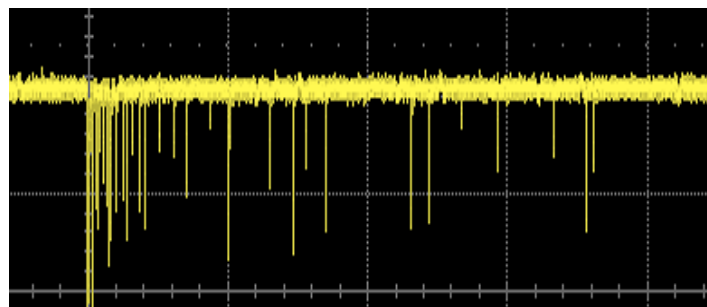


R12860(浜松ホトニクス社)
HKに向けて開発された世界最大のPMT
検出効率_{CE}はSKの約2倍

| | R12860 | HK目標値 | |
|----------------------------|---------------|----------------|---|
| 検出効率 ($CE \times QE$) | ~ 28.5 % | $\geq 16 \%$ | ○ |
| 時間分解能 | 2.6 ns | ≤ 5.2 ns | ○ |
| 耐水圧 | 1.25 MPa | ≥ 0.8 MPa | ○ |
| ダークレート (ノイズ) | <u>~ 6kHz</u> | ≤ 4 kHz | × |

CE:収集効率

ダークレートはHKの目標値を満たしていないため、低減が必要



数十マイクロ秒に渡ってパルスが連続的に発生する連続パルスと呼ばれる信号が、ノイズの一因となっている。

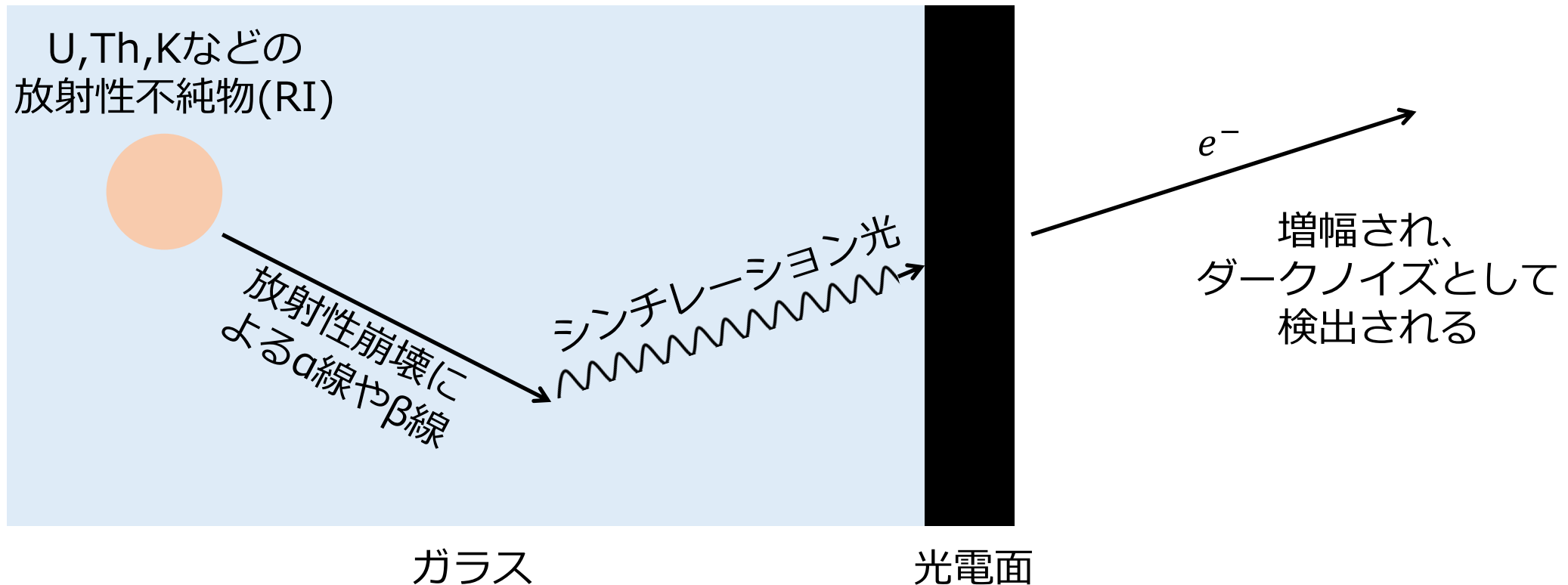
連続パルスの原因調査が行われた。

光電子増倍管(PMT)

[1]岡本浩大「ハイパーカミオカンデによる超新星背景ニュートリノ観測に向けた光センサのノイズ低減」(横浜国立大学大学院、2020、修士論文)
[2]望月俊来「ハイパーカミオカンデに向けた50cm口径光電子増倍管及び中性子信号検出アルゴリズムの開発」(東京大学大学院、2019、修士論文)

先行研究[1][2]により連続パルスには、光電面ガラス中に含まれる ^{238}U 系列などの放射性不純物(RI)起源のガラスシンチレーション光の寄与があることが判明

RIを低減したガラスを開発した

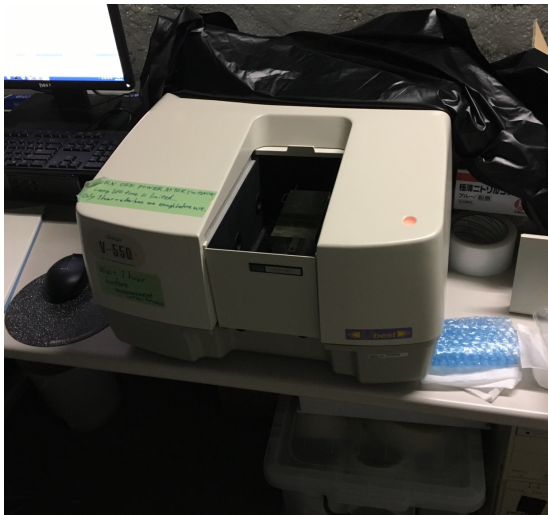


光電面ガラスの透過率測定:測定器

目的

- RI低減前Glassと
- RI低減後Glassの透過率の比較

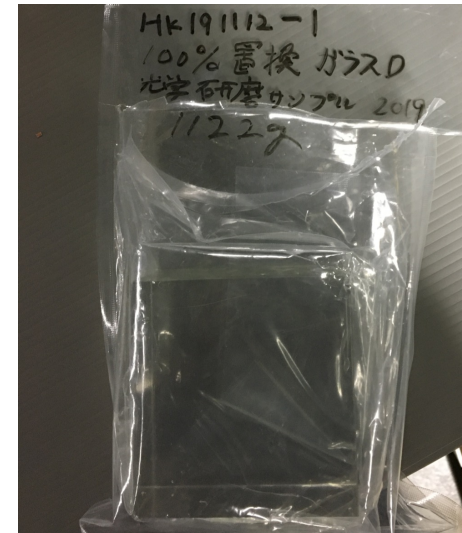
透過率：光が物質を透過する際の減衰率を表す指標。
ガラスの透過率が低い→PMTに入射した光が光電面に到達する前に減衰され、検出されない。
高い透過率の実現は、高い検出効率の実現にとって重要。



測定器

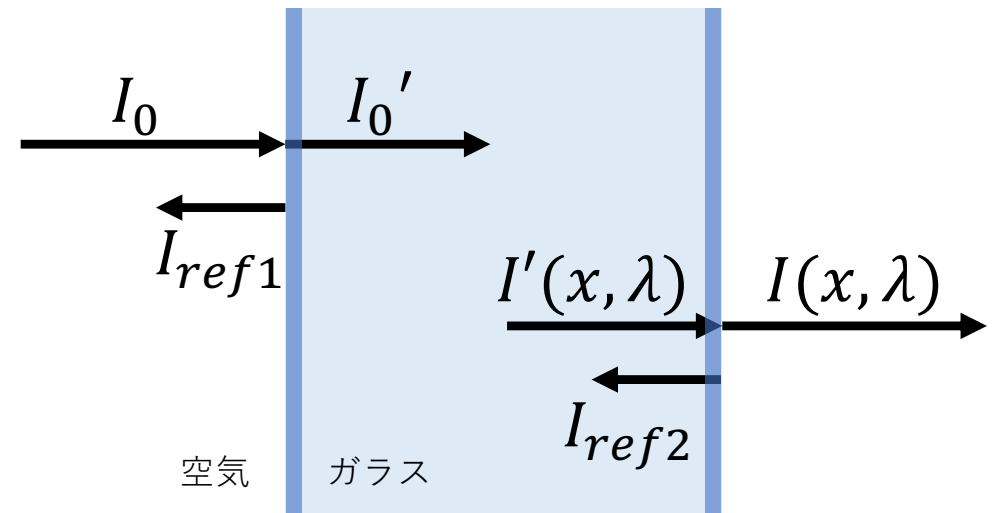
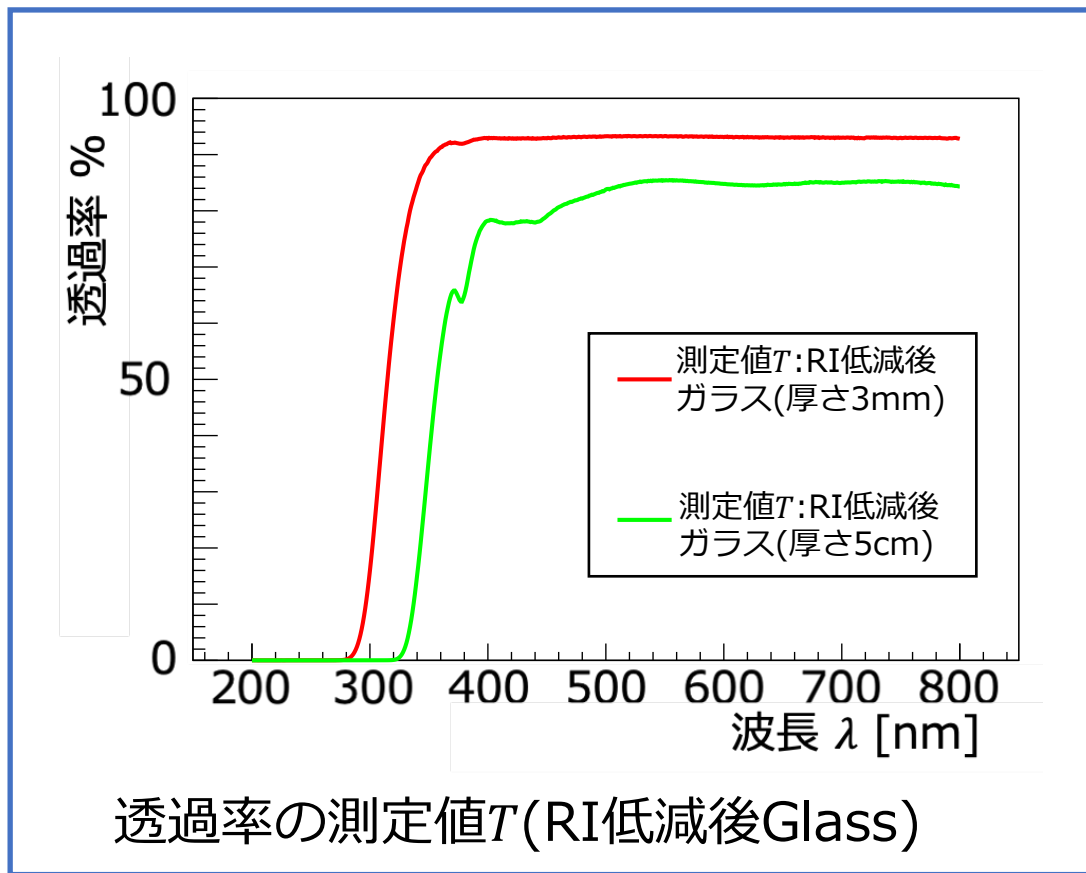
(日本分光社 分光分析器V-550)

分解能:0.1nm
波長範囲:200~800nm
光源:重水素放電管
(200~350nm)
ハロゲンランプ
(330~800nm)
検出器:光電子増倍管



透過率を測定したガラスブロック
(RI低減後Glass 厚さ5cm)

光電面ガラスの透過率測定:測定結果



$$T(x, \lambda) \equiv \frac{I(x, \lambda)}{I_0} : \text{透過率の測定値}$$

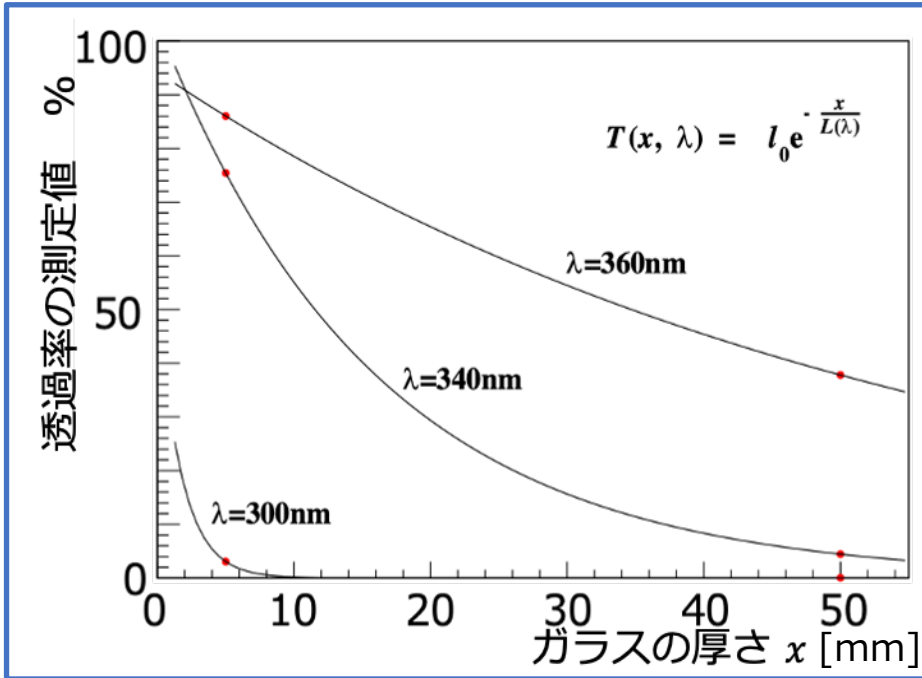
$$T'(x, \lambda) \equiv \frac{I'(x, \lambda)}{I_0'} : \text{真の透過率(欲しい値)}$$

ここで、
透過率の測定値 $T(x, \lambda)$ には
反射の影響が考慮されていない

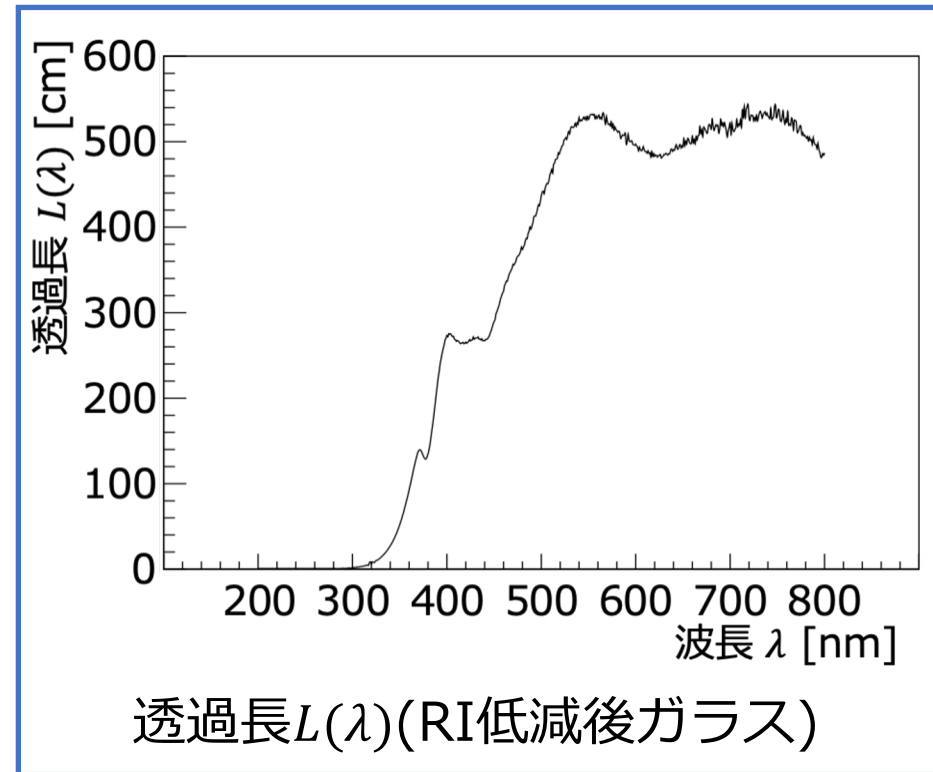


反射の影響を考慮した
透過率の真の値 $T'(x, \lambda)$ を
求める必要がある

光電面ガラスの透過率測定: 反射を考慮



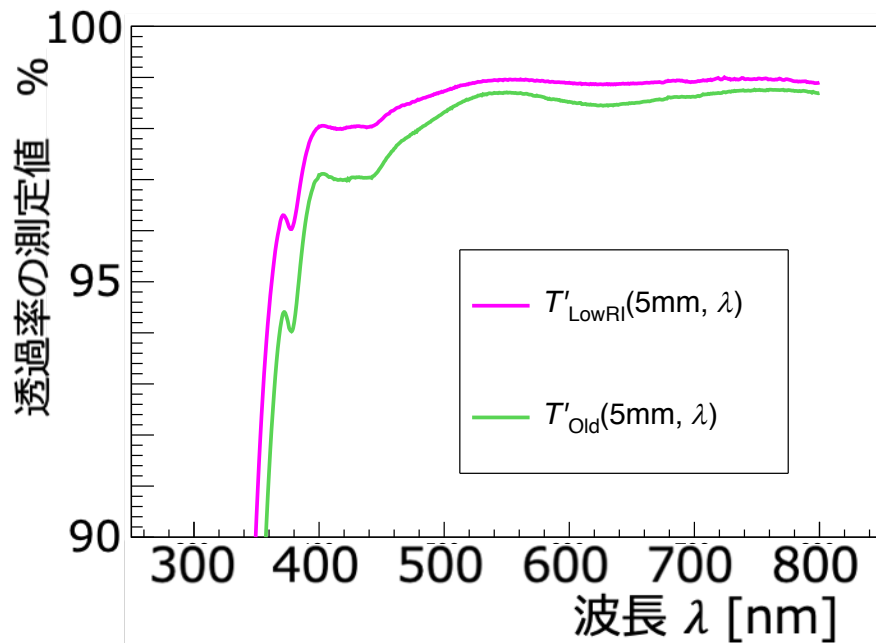
光はガラスの厚さ x に対して
指数関数的に減衰する
 $T(x, \lambda) = I_0 \exp\left(-\frac{x}{L(\lambda)}\right)$
測定値から
フィットにより
透過長を求める



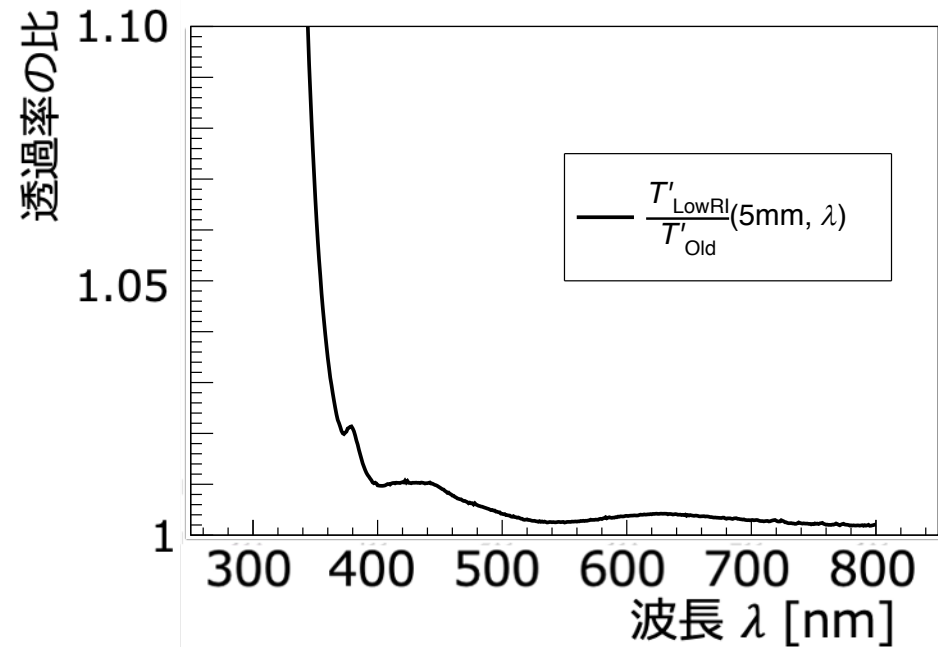
反射による効果は $T(3\text{mm}, \lambda)$ と $T(5\text{cm}, \lambda)$ に同様に乗算で入るため、2つの厚さのデータから求めた透過長 $L(\lambda)$ は反射の影響が考慮されている。

$L(\lambda)$ を $T'(x, \lambda) = \exp\left(-\frac{x}{L(\lambda)}\right)$ に代入し、
透過率の真の値を得る。

光電面ガラスの透過率測定:結果



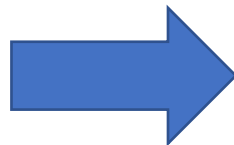
厚さ5mmでのR12860Glassの
RI低減前後の真の透過率 T'



厚さ5mmでのR12860Glassの
RI低減前後の真の透過率 T' の比

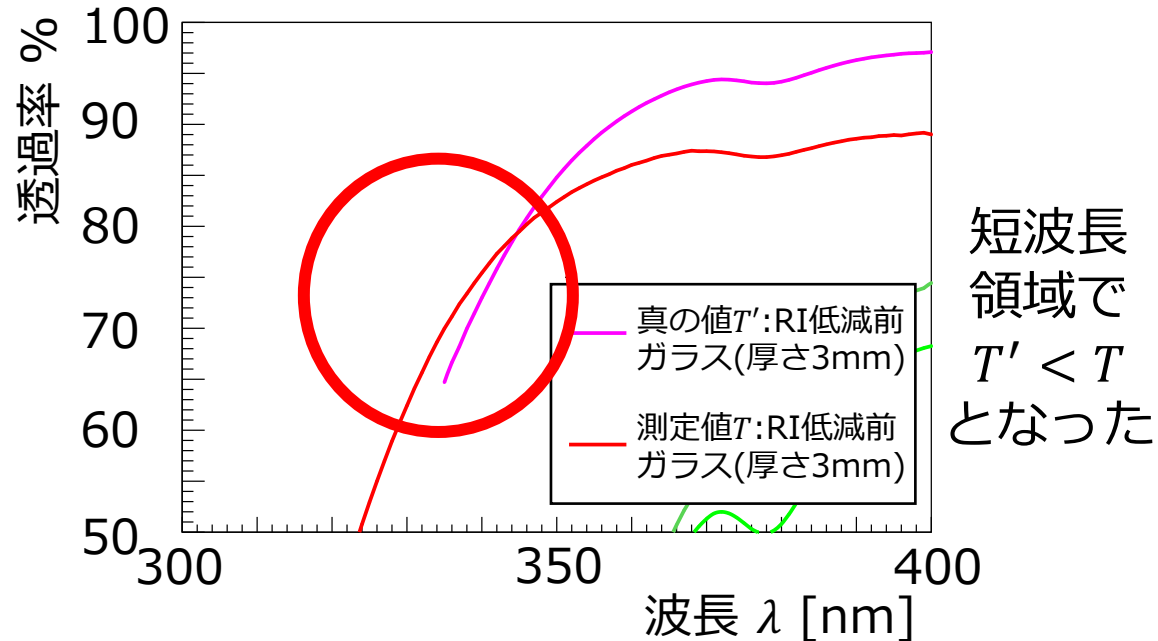
5mm : R12860バルブの厚み

RI低減前→後
 $x = 5\text{mm}$, $\lambda = 350\text{nm}$ で
7%の上昇



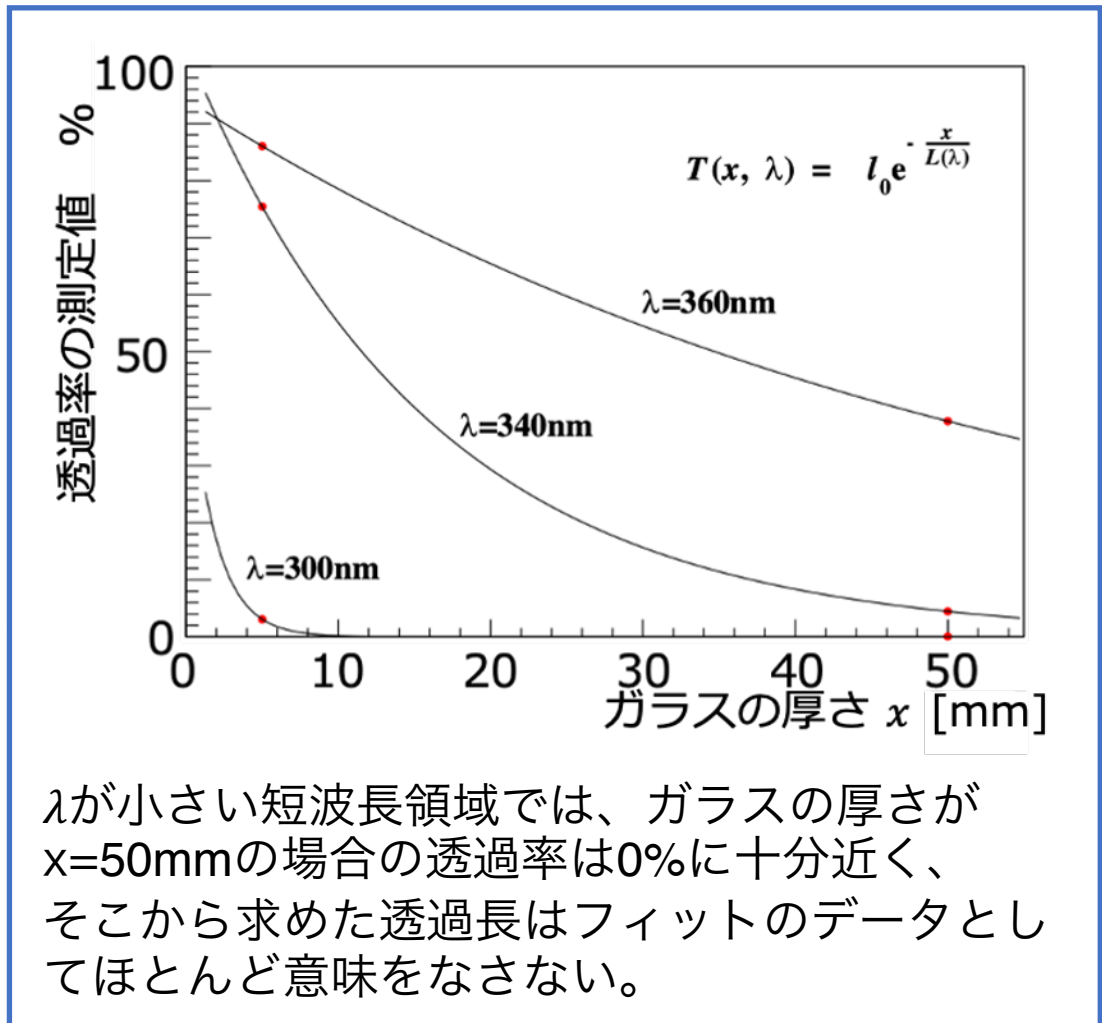
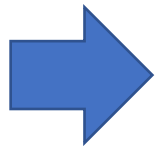
RI の低減によってQEのピークの領域
で透過率が上昇しており、
PMTの検出効率の向上に貢献した。

考察・今後の展望①



透過率の測定値 T と真の値 T' (RI低減前の光電面ガラス)

透過率の測定精度、
真の値の算出精度を
上げるには？

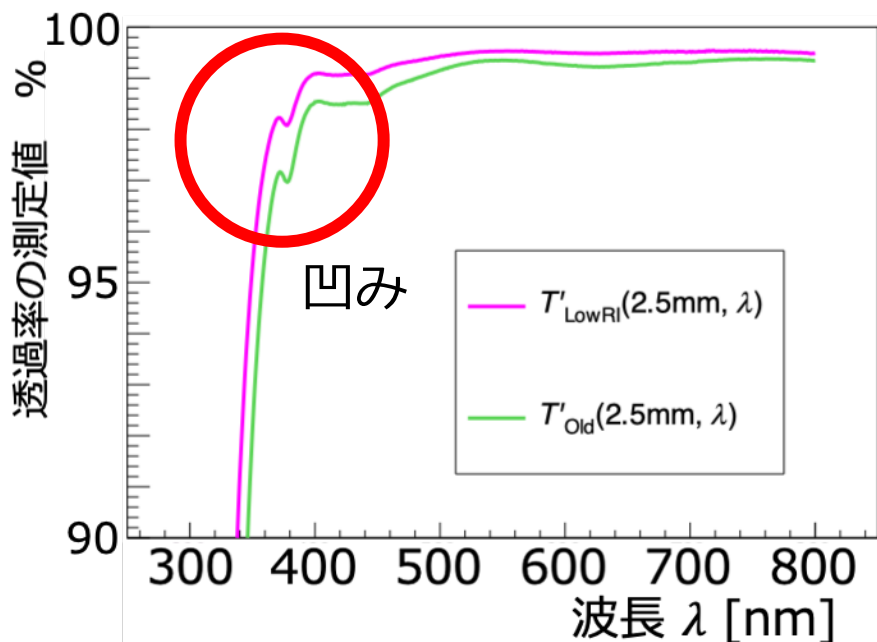


λ が小さい短波長領域では、ガラスの厚さが $x=50\text{mm}$ の場合の透過率は0%に十分近く、そこから求めた透過長はフィットのデータとしてほとんど意味をなさない。



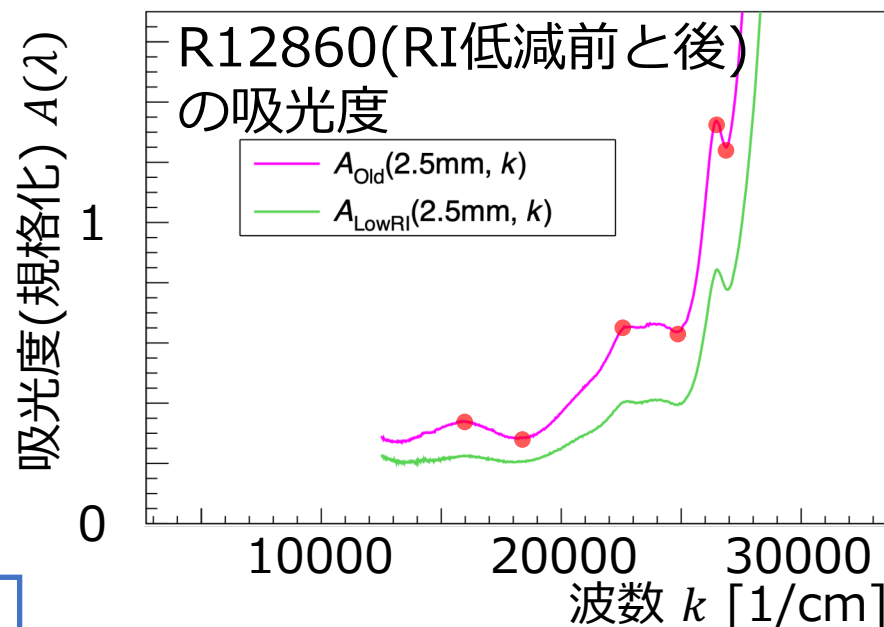
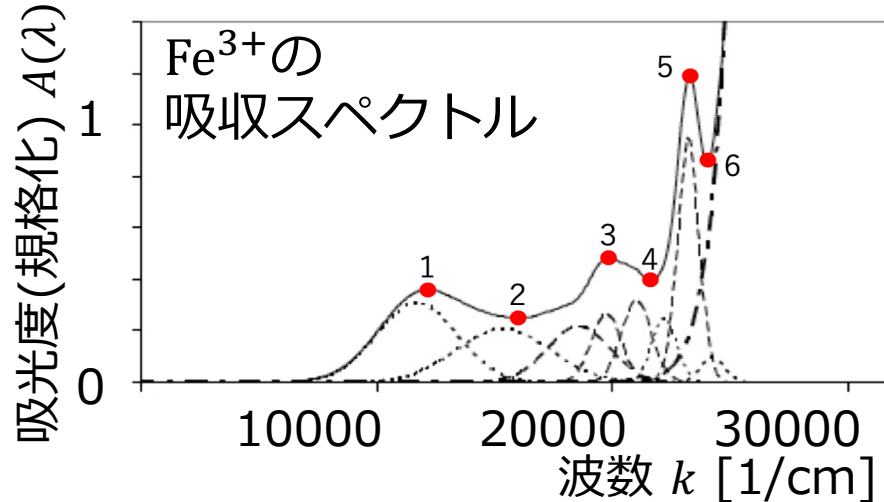
違った厚さのガラスサンプルの測定結果をデータに追加することで精度の向上が期待できる

考察・今後の展望②



透過率の凹みがQEのピーク領域(350-450nm)に入っていて、検出効率向上の面から好ましくない。

透過率の特徴的な凹みの原因は？



[3] T.T.Volotinen et al. "Concentrations and site partitioning of Fe²⁺ & Fe³⁺ ions in a sodalime-silica glass obtained by optical absorbance spectroscopy" (2018)

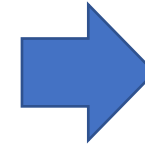
$A(\lambda) \equiv -\log T'(x, \lambda)$: 吸光度を計算し、文献[3]のFe³⁺吸収スペクトルと比較

各極値が一致。
Glass中のFe³⁺が凹みの原因

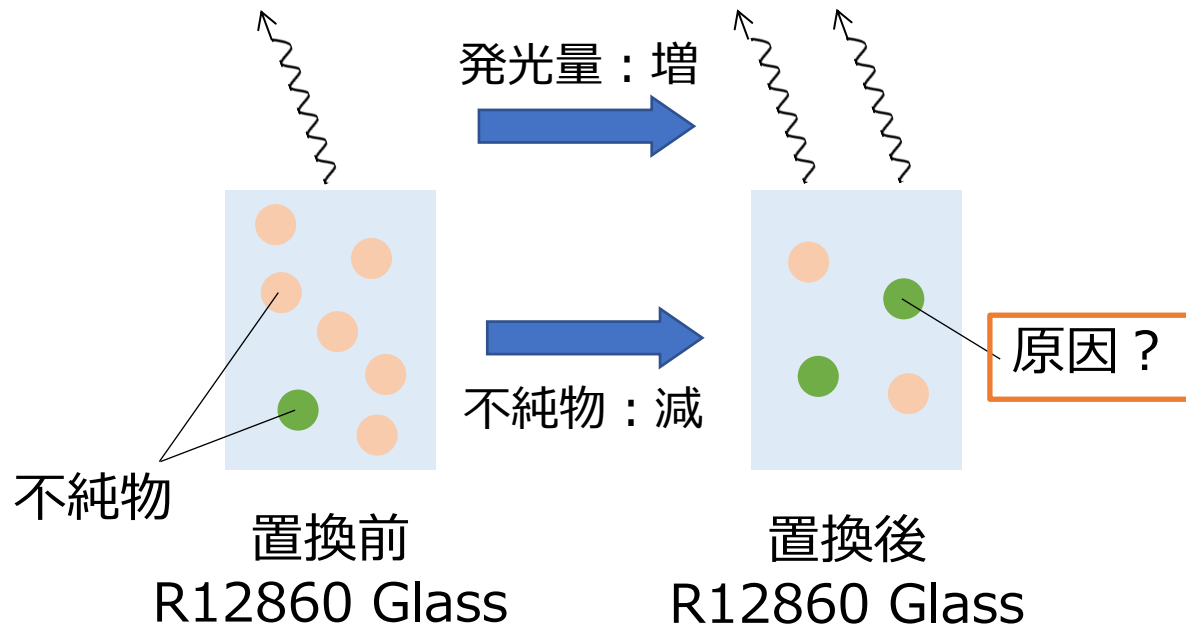
Fe³⁺を除くことでさらなる透過率upにつながる

考察・今後の展望③

ガラス中不純物によるシンチレーション光が連続パルスの一因となっている可能性も



原因となる不純物元素を突き止める



発光量の比較、
不純物量の比較

発光量に対する
透過率の影響を見るため、
連続パルスの発光波長帯の
詳細を追求

まとめ

- Hyper-Kamiokande計画に向け、新型光電子増倍管(R12860)が開発された。
- R12860のダークノイズには、光電面ガラス中の放射性不純物(RI)の寄与があることがわかり、RIを低減したガラスが新たに作られた。
- RIを低減した際の副次的効果として、不純物(鉄)の混入が減少した。不純物(鉄)の減少による透過率向上の効果を確かめた。
- 光電面ガラスの透過率の向上は、検出効率の向上に重要である。RI低減前後のガラスの透過率を比較したところ、波長 350nm においては **7%の上昇**が見られた。RI低減がPMTの検出効率向上に貢献した。
- 透過率の測定精度の上昇には、測定する厚さのサンプル数を増やすなどの対策が考えられる。

R12860Glass及びPMTのRI低減による効果

PMT GlassのRI低減

低減前後Glassで比較して、U系列は**40%**、Th系列は**50%**の**低減**。

RI低減による発光量の低減

低減後Glassは前Glassに比べて、単位エネルギーあたりの発光量が多い。
PMTガラス中のRI低減と単位エネルギーあたりの発光量の違いから、ガラス中のRIによる発光は旧ガラスと比べて**20%低減**する見込みを得た。

RI低減によるダークレートの低減

低減前後のGlassで作ったPMTのダークレートを比較することで、シンチレーションによる成分を**約20%低減**させることに成功した。
SKではRI低減前で5kHz半ばを達成しており、低RIを実現したGlassで4kHz達成を目指す。
また、大量製造時の品質向上、HKの安定した環境下での運用などにより、さらなるダークレートの低下が期待できる。要求値である4 kHzの達成を目指す。