

液体キセノン中における シンチレーション光の散乱過程の研究

横浜国大工¹，東大宇宙線研²，KEK³

中村正吾¹，狩野芳樹¹，石原慧¹，中畑雅行²，
佐々木慎一³，齋藤究³，三原智³，笠見勝祐³

液体キセノンシンチレータの特徴

長

所

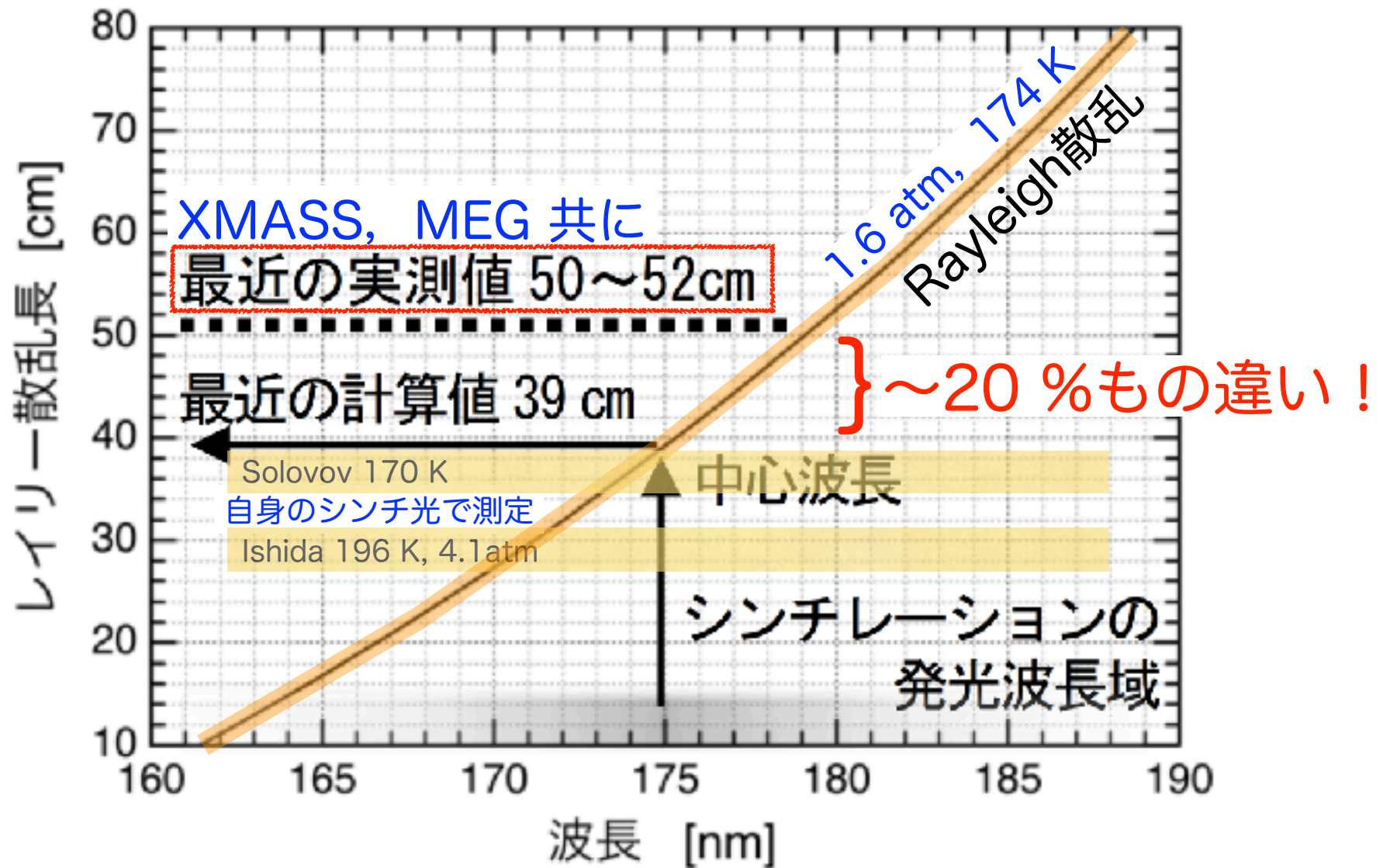
- ・発光量が多く，比較的高速（ $\tau \sim$ 数–約20ns）
- ・電荷も利用可能 → TPCの媒質にもなる
- ・大型かつ自由な形状が可能 ⇒ 減衰長との兼ね合い
- ・エキシマ（ Xe_2^* ）発光なので，自己吸収が少ない
- ・超低放射能が可能 → 使用しながら純化も可能
- ・希ガスの中で最も高密度（ $\sim 2.95\text{g/cm}^3 @ 1\text{atm}$ ）
- ・原子番号が大きく（ $Z=54$ ）， γ 線を良く吸収
- ・放射線損傷に強い， 他

短

所

- ・低温（ -110°C ）もしくは高圧（60気圧）が必要
- ・真空紫外で発光（ $\lambda < 190\text{nm}$ ） ⇒ 強いレイリー散乱
- ・使用中に不純物の混入に注意が必要， 他

液体キセノン中の散乱長の現状



⇒ 計算値を短く見積もってしまう原因があるか？

液体キセノン中のレイリー散乱長： L

(波長)⁻⁴ 比誘電率 ϵ の揺らぎの2乗平均
(屈折率)⁴

$$\sigma \propto \frac{1}{L} = \frac{\omega^4}{6\pi c^4} \left[\underset{(\delta\rho)^2}{kT\rho^2\kappa_T} \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial\rho} \right)_T^2 + \underset{(\delta T)^2}{\frac{kT^2}{\rho c_v} \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial T} \right)_\rho^2} \right]$$

ϵ : 比誘電率 ω : 角振動数 ρ : 密度

k : ボルツマン定数 T : 温度

κ_T : 等温圧縮率 c_v : 等積比熱

ランダウ・リフシッツ, “理論物理学教程 電磁気学 2” 東京図書(1987)

G.M. Seidel et al., Nucl. Instr. and Meth. A 489 (2002) 189.

液体キセノン中のレイリー散乱長： L

$$\sigma \propto \frac{1}{L} = \frac{\omega^4}{6\pi c^4} \left[kT \rho^2 \kappa_T \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T^2 + \frac{kT^2}{\rho c_v} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right)_\rho^2 \right]$$

(波長)⁻⁴ $\frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{3\rho}$ (屈折率)⁴

ω^4 $\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T^2$ $\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right)_\rho^2$

無視可能

⇒ 散乱長は長くなる方向

ϵ : 比誘電率 ω : 角振動数 ρ : 密度

k : ボルツマン定数 T : 温度

κ_T : 等温圧縮率 c_v : 等積比熱

ランダウ・リフシッツ, “理論物理学教程 電磁気学 2” 東京図書(1987)

G.M. Seidel et al., Nucl. Instr. and Meth. A 489 (2002) 189.

液体キセノン中のレイリー散乱長： L

$\sigma \propto$

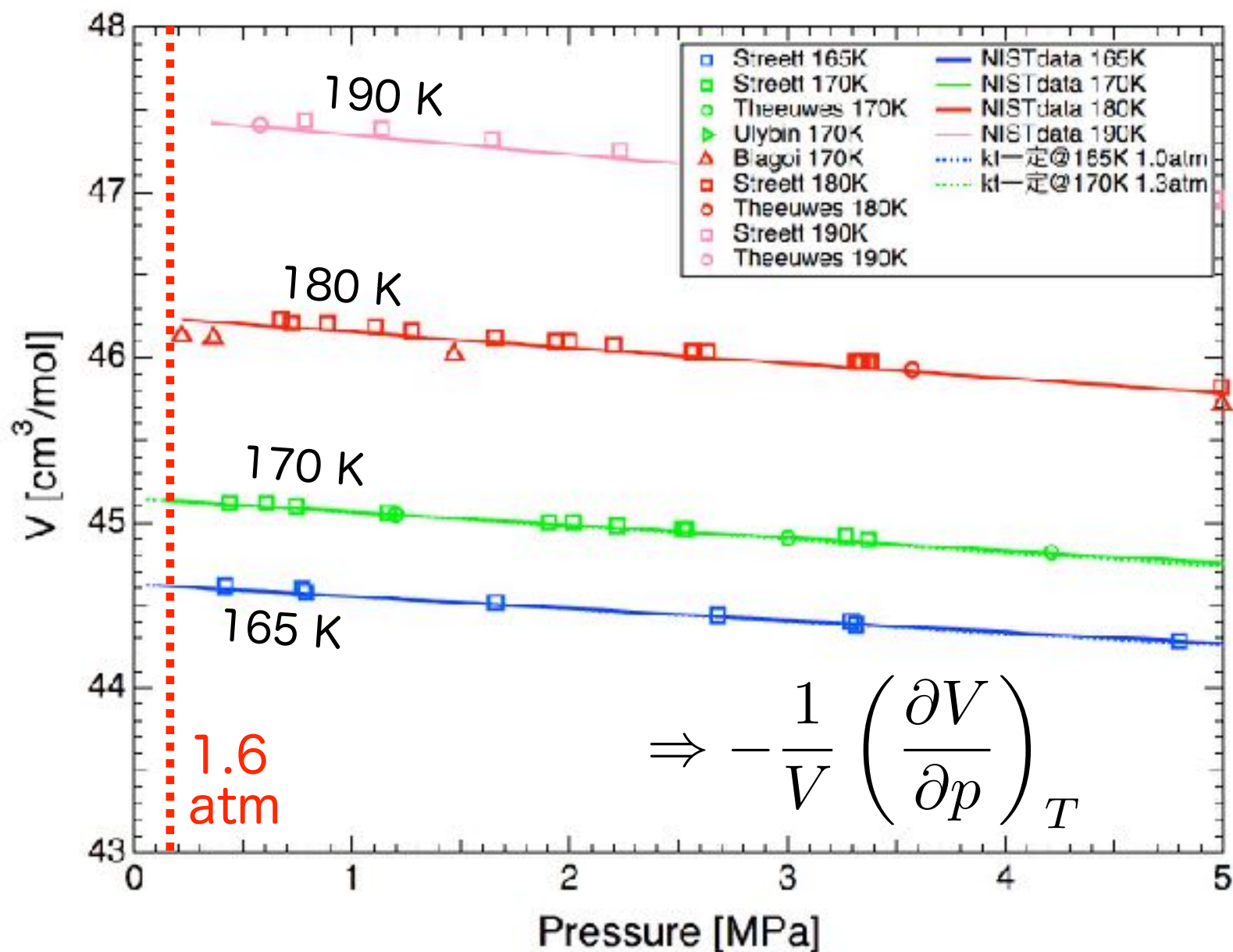
$$\frac{1}{L} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \left[k_B T \kappa_T \frac{(n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2}{9} \right]$$

λ ：波長 T ：温度 k_B ：ボルツマン定数

n ：屈折率

κ_T ：等温圧縮率

液体キセノンの体積vs圧力 ⇒ 等温圧縮率



液体キセノン中のレイリー散乱長： L

$\sigma \propto$

$$\frac{1}{L} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \left[k_B T \kappa_T \frac{(n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2}{9} \right]$$

λ : 波長 T : 温度 k_B : ボルツマン定数
 n : 屈折率 κ_T : 等温圧縮率

1.6 atm
174 K

$\Rightarrow$

$n \sim (1.629 \pm 0.007) @ 174.8 \text{ nm}$ $\kappa_T \sim (1.85 \pm 0.05) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{J}$

$(n-1)$ の誤差 $\sim 1.1 \%$

κ_T の誤差 $\sim 2.7 \%$

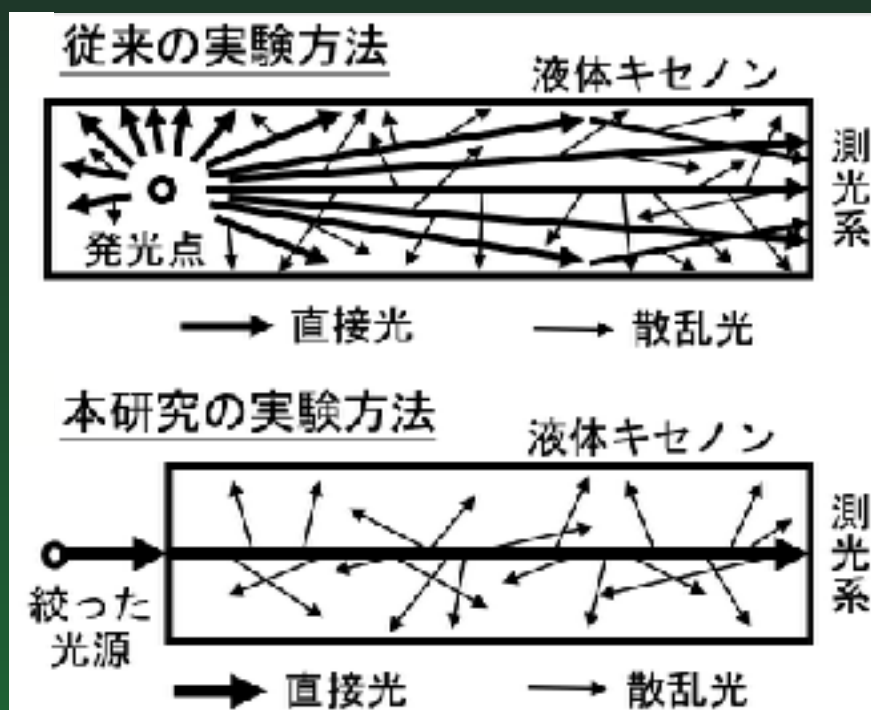
Preliminary

$\Rightarrow L$ の誤差 $\sim 4.4 \% \ll 20 \%$

G.M. Seidel et al., Nucl. Instr. and Meth. A 489 (2002) 189.

散乱長の新たな測定を準備中

1. 細いビーム光を用いて減衰を測りたい



⇒ 一次光と散乱光
を区別する

2. 散乱長の波長依存性を測りたい

⇒ レイリー散乱など散乱過程の特徴を得たい
シンチレーションのスペクトル内の変化？

⇒ 外部光源＋分光器の導入

散乱長測定のための光学系案

液体キセノンの有無で
透過光の強度を比較する

ex)

$$e^{-57 \text{ mm}/L} = \begin{cases} 0.864 & \text{for } L=39\text{cm} \\ 0.894 & \text{for } L=51\text{cm} \end{cases}$$

+ 窓の反射の補正
⇒ 3 %強 の違い

L9455-3-2 (特注)
(HAMAMATSU)

石英窓キセノン
フラッシュランプ

- ・ 明るいパルス光源
- ・ 安定した光量
- ・ VUVを含む広い波長で発光

VM-502-S (Acton)
 λ : 150 - 550 nm
 $\Delta\lambda \sim 0.1 \text{ nm}$

液体キセノン

真空

MgF₂

現在 57 mm

VUV用 PMT

出来れば分布を
測る系に置換え

石英窓キセノンフラッシュランプ＋分光器

発光部が小さい
～1.5 mm

L9455-3-2
(HAMAMATSU)

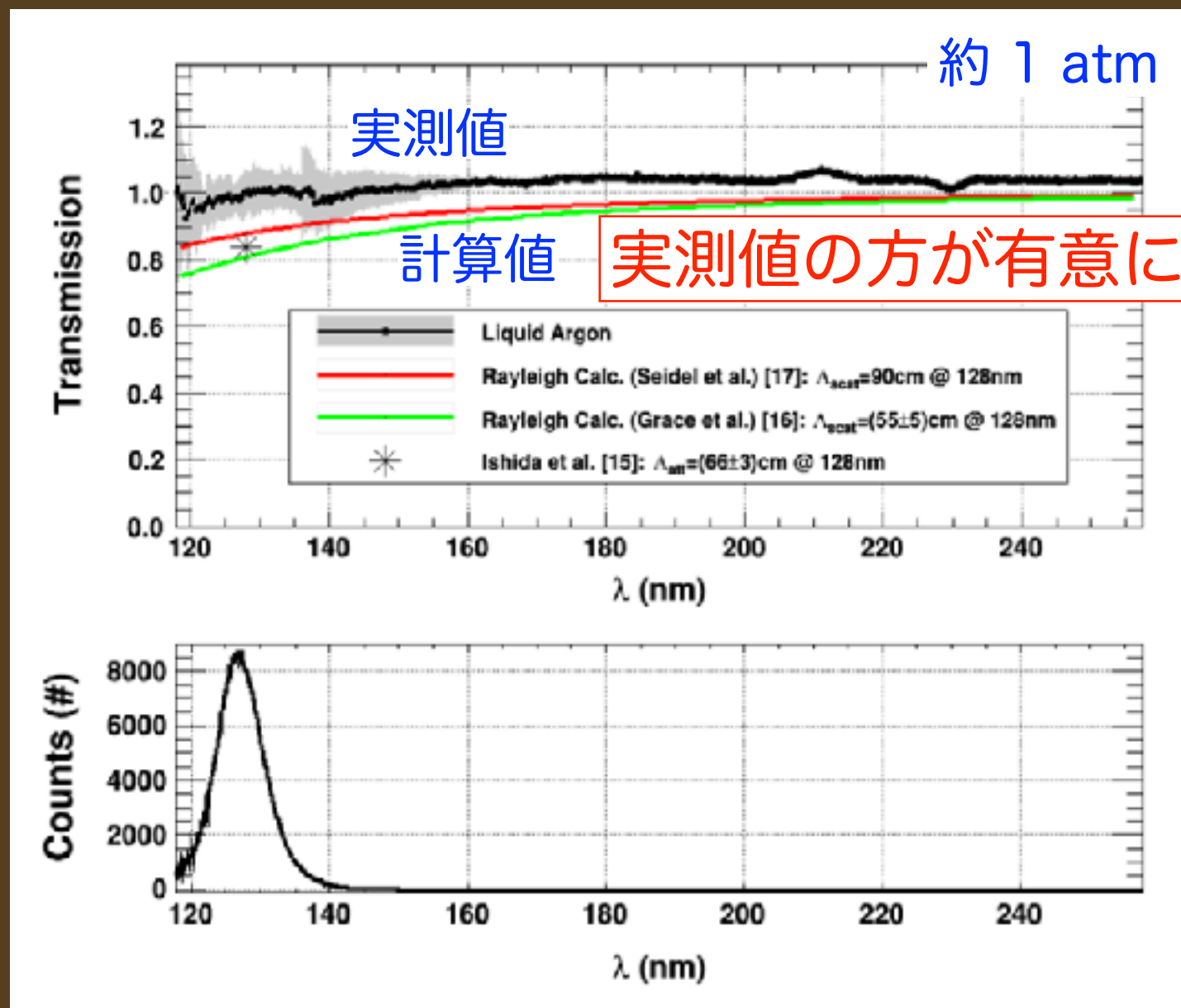
例えば,
～100 mmの時
光の広がり
～0.015 rad

100 mm進んで
1.5 mm幅しか
広がらない！

※レンズの付加
でより平行に

⇒ 明るくて安定な、波長可変な細いビーム光源

液体アルゴン中の減衰長も. . .



[1] A.Neumeier et al., NIM A 800 (2015) 70-81.

[2] A.Neumeier et al., Euro. Phys. J. C 72 (2012) 2190.

まとめ

- ・ 液体キセノン中におけるシンチレーション光の散乱長を，レイリー散乱の理論に基づいて計算したが，最近の実測と合わない。
- ・ 散乱長を，波長の関数として精度良く測る測定実験を計画し，現在準備を進めている。

査定額

物品費： 20 千円 ⇒ 真空系の消耗品

旅費： 100 千円 ⇒ 準備の為の神岡への旅費