

第44回 天文学に関する技術シンポジウム

# Development of a cryogenic minimum deviation angle measurement system for mid-infrared refractive index determination

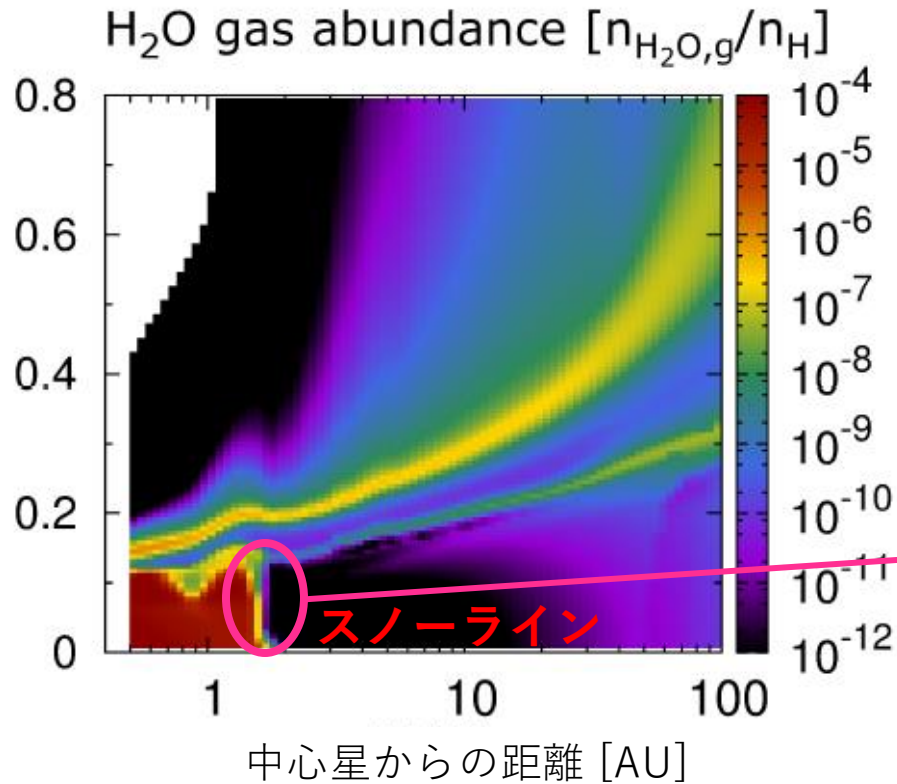
極低温で中間赤外線で物質の屈折率を測定する装置を開発しました

榎木谷海、松原英雄、馬場俊介（宇宙研）、中川貴雄（東京都市大）、  
平原靖大、李源、趙彪、笹子宏史（名古屋大学）、  
古賀亮一（名古屋市立大学）、和田武彦（国立天文台）

# 中間赤外線高分散分光観測が開くサイエンス

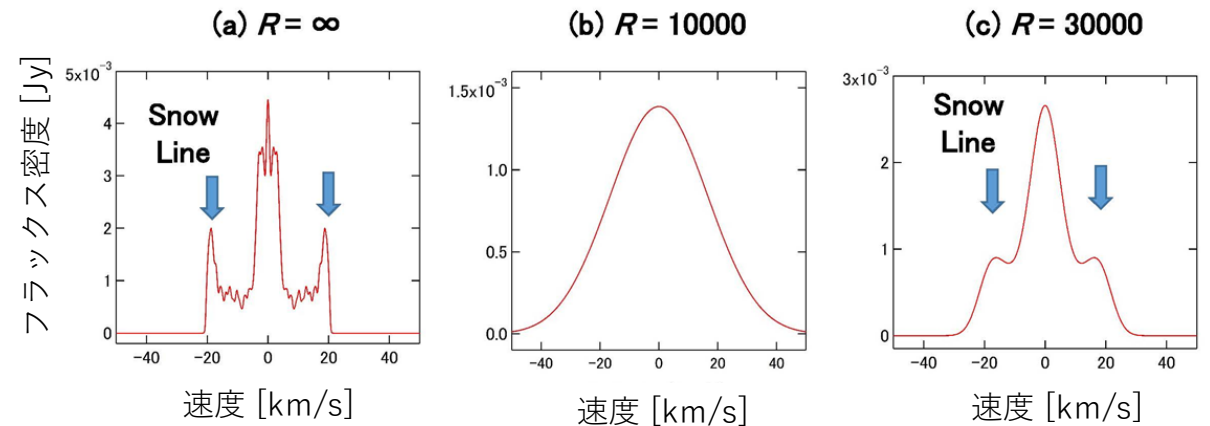
## 原始惑星系円盤のH<sub>2</sub>Oスノーライン観測

赤道面からの高さ/中心星からの距離



Notsu et al. (2016, 17, 18)

- スノーライン内側の成分検出のためには、円盤の中を見通すことができる水スペクトル線（アインシュタインA係数の小さなスペクトル線）の観測が必要
- 例えば、17.754  $\mu\text{m}$  H<sub>2</sub>Oガス輝線の観測で、その位置同定が可能になるとモデル計算で示された (Notsu et al. 2016, 2017)



中川氏科研費資料より引用

中間赤外線高分散分光観測(観測波長 10-18  $\mu\text{m}$ 、波長分解能  $\geq 25,000$ )が必要

# イメージンググレーティング

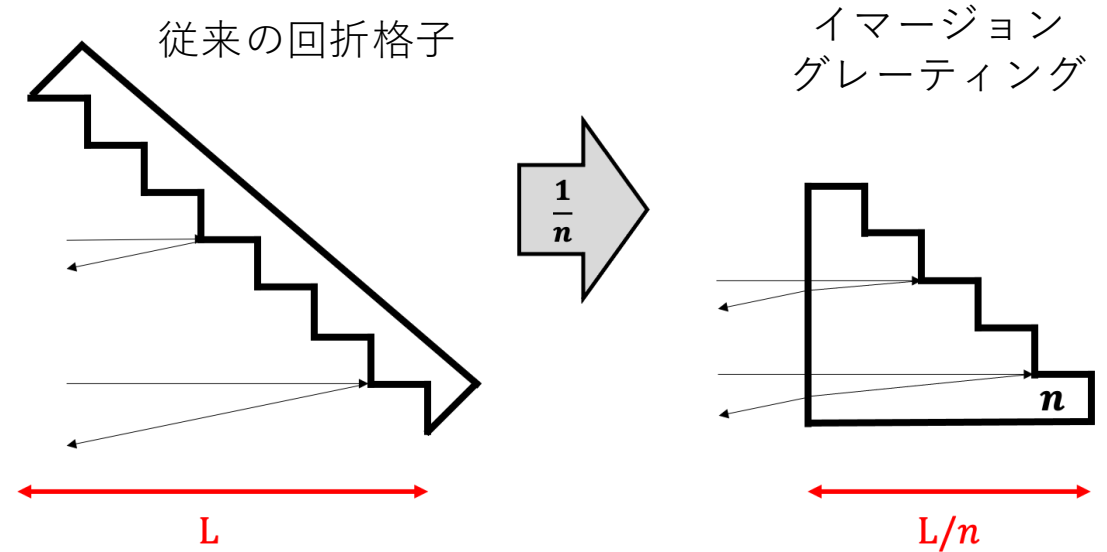
## ● 課題：分光観測装置の大型化

光を分けるためには、分散素子が必要  
高分散の分光器を実現：回折格子

波長分解能は得られる光路差に比例する  
ため従来の回折格子では巨大になる

$$L \sim 22 \text{ cm} \left( \frac{n}{1.0} \right)^{-1} \left( \frac{\lambda}{17.75 \text{ } \mu\text{m}} \right) \left( \frac{R}{25,000} \right)$$

$L$  : 光路長、 $R$  : 波長分解能、  
 $\lambda$  : 波長、 $n$  : 屈折率



## ● 解決策：イメージンググレーティング

屈折率  $n$  の媒質中に光を通すことで、  
長さで  $\frac{1}{n}$  （体積で  $\frac{1}{n^3}$ ）に小型化可能

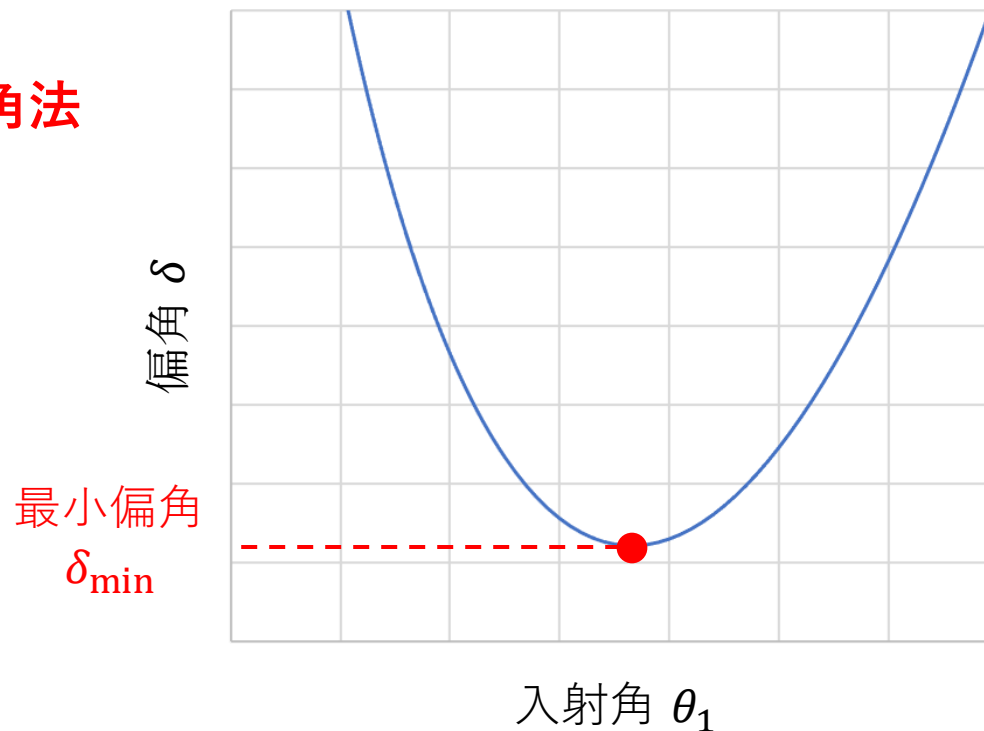
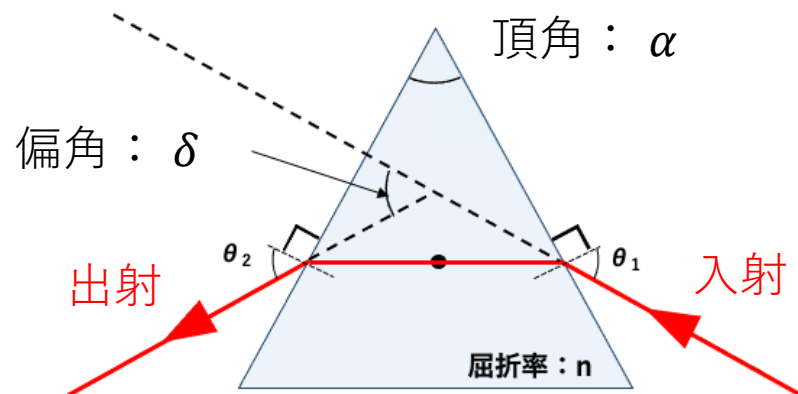
分光観測装置の大型化という課題を解決できる

→ 波長 10-18  $\mu\text{m}$  における有望な材料 CdZnTe の屈折率の実測値がない

本研究の目的：波長 10 ~ 18  $\mu\text{m}$ 、使用温度 < 22 K において、屈折率の要求測定精度  $\Delta n_{\text{req}} < 10^{-3}$

# 屈折率測定原理

絶対屈折率を測定でき、測定精度の高い**最小偏角法**



幾何学的な関係式とスネルの法則より、

$$\delta = \theta_1 + \theta_2 - \alpha$$

$$\delta = \theta_1 - \alpha + \arcsin \left[ n \sin \left[ \alpha - \arcsin \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \right] \right]$$

$$\frac{d\delta}{d\theta_1} = 0, \theta_1 = \theta_2, n = \frac{\sin \frac{\delta_{\min} + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

✓ 最小偏角  $\delta_{\min}$

✓ 頂角  $\alpha$

を測定し、屈折率を求める

# 世界の屈折率測定装置の現状

以下の3つの条件を満たす屈折率測定装置を比較

- 手法：最小偏角法
- 測定波長：赤外線
- 測定温度：低温

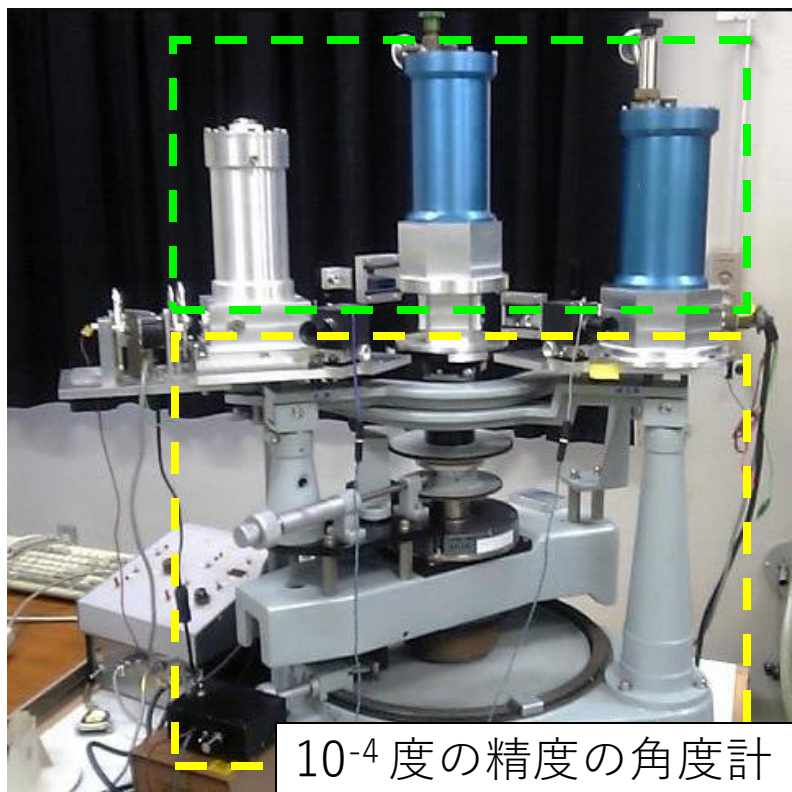
| Study                       | Wavelength ( $\mu\text{m}$ ) | Temperature (K) |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| Yamamuro et al. 2006        | 0.365 – 3.5                  | 80 – 293        |
| Shimadzu GMR-1D             | 0.254 – 2.325                | 233 – 353       |
| Spectrometer NRI-200        | 0.4 – 14                     | 233 – 353       |
| CHARMS NASA GSFC            | 0.4 – 5.6                    | 15 – 340        |
| Liao Sheng et al. 2011      | 1.0 – 12                     | 100 or 300      |
| Simon G. Kaplan et al. 2002 | 1.0 – 5.4                    | 10 – 295        |
| Di Yang et al. 2000         | 1.0 – 5.0                    | 10 – 1000       |

波長 10 ~ 18  $\mu\text{m}$ 、使用温度 < 22 K をカバーする屈折率測定装置はなく  
本装置でカバーする

## 屈折率測定装置の開発

本研究の目的：波長  $10 \sim 18 \mu\text{m}$ 、使用温度  $< 22 \text{ K}$   
において、屈折率の要求測定精度  $\Delta n_{\text{req}} < 10^{-3}$

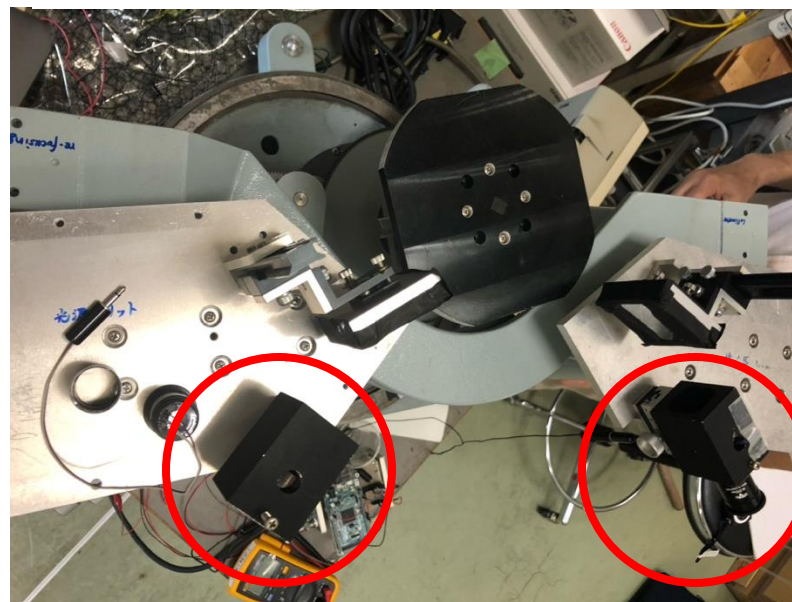
窒素冷却(77 K)・近赤外線 ( $\sim 3.5 \mu\text{m}$ )



10<sup>-4</sup> 度の精度の角度計

改修前の屈折率測定装置  
(Yamamuro et al. 2006)

開発スタート時 (修士2年次)

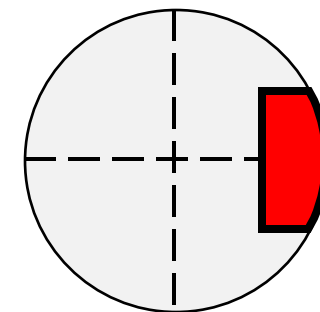
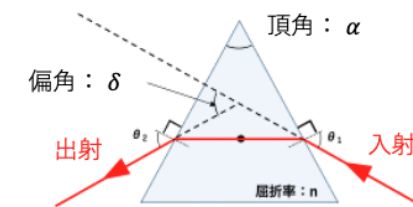


eye piece + LED

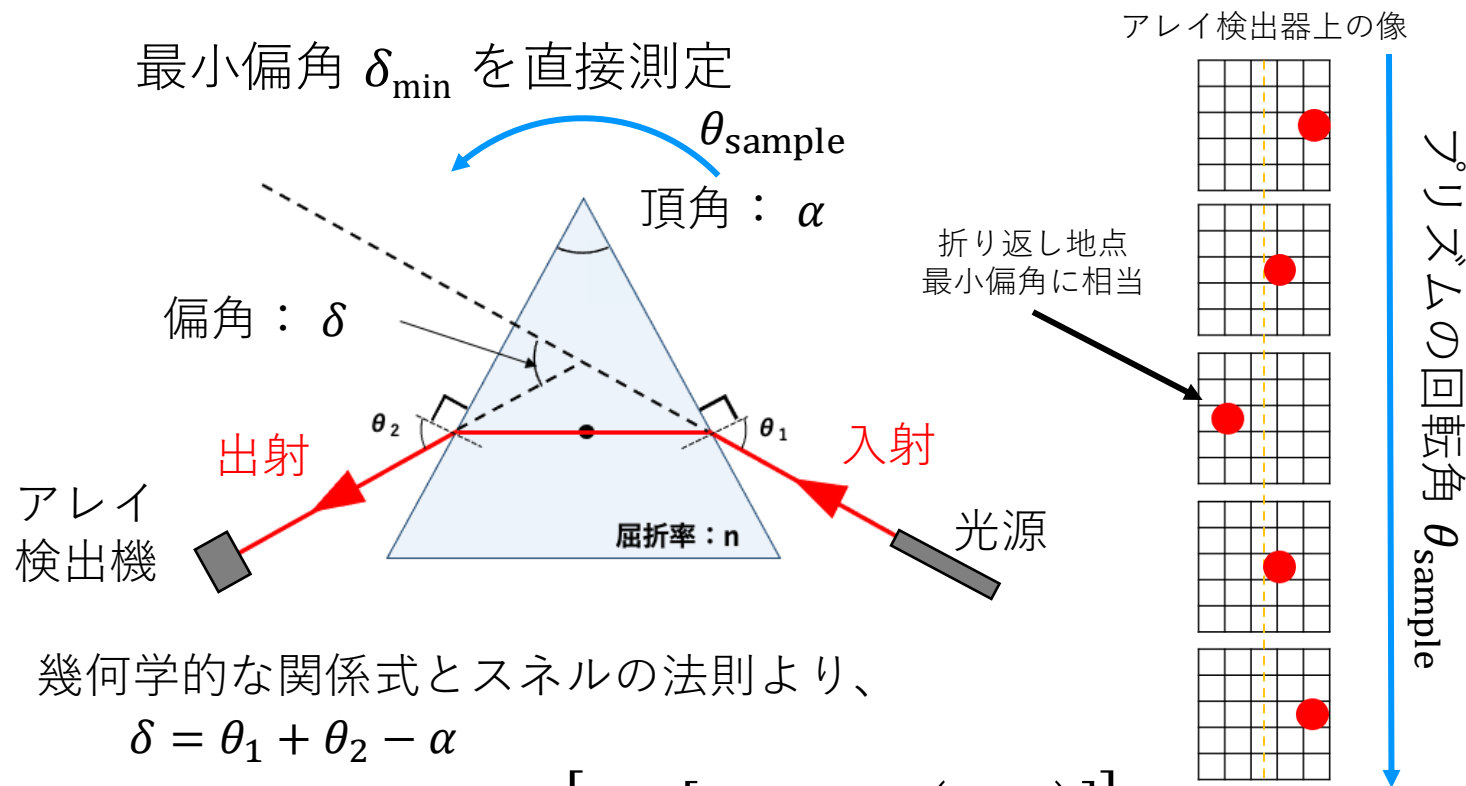


目的の仕様に達するために、以下のコンポーネントを準備する必要があった。

- 光源 → レーザー？  $17 \mu\text{m}$  のレーザーは700 万円
- 検出器 → 中間赤外線アレイ検出器？
- 冷却系 → 4 K 機械式冷凍機



# 従来の最小偏角測定手法



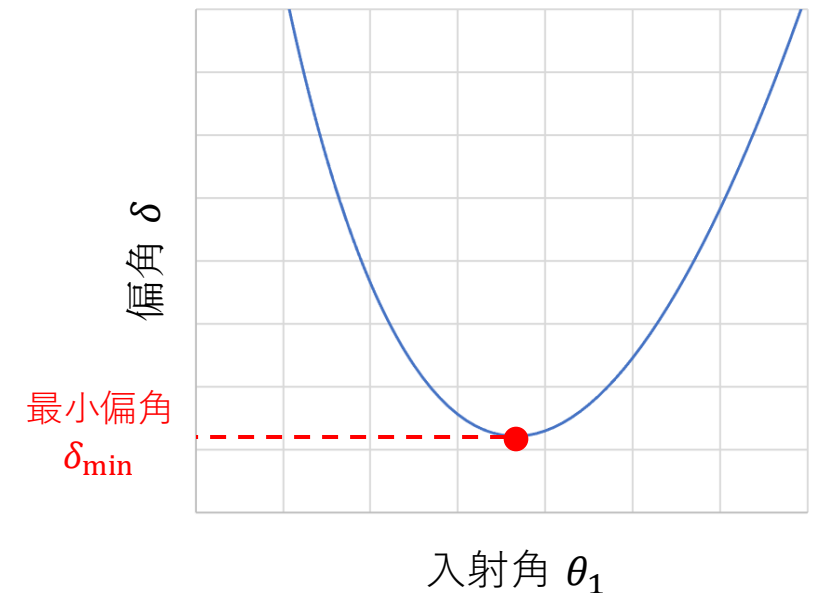
幾何学的な関係式とスネルの法則より、

$$\delta = \theta_1 + \theta_2 - \alpha$$

$$\delta = \theta_1 - \alpha + \arcsin \left[ n \sin \left[ \alpha - \arcsin \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \right] \right]$$

$$\frac{d\delta}{d\theta_1} = 0, \quad \theta_1 = \theta_2, \quad n = \frac{\sin \frac{\delta_{\min} + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

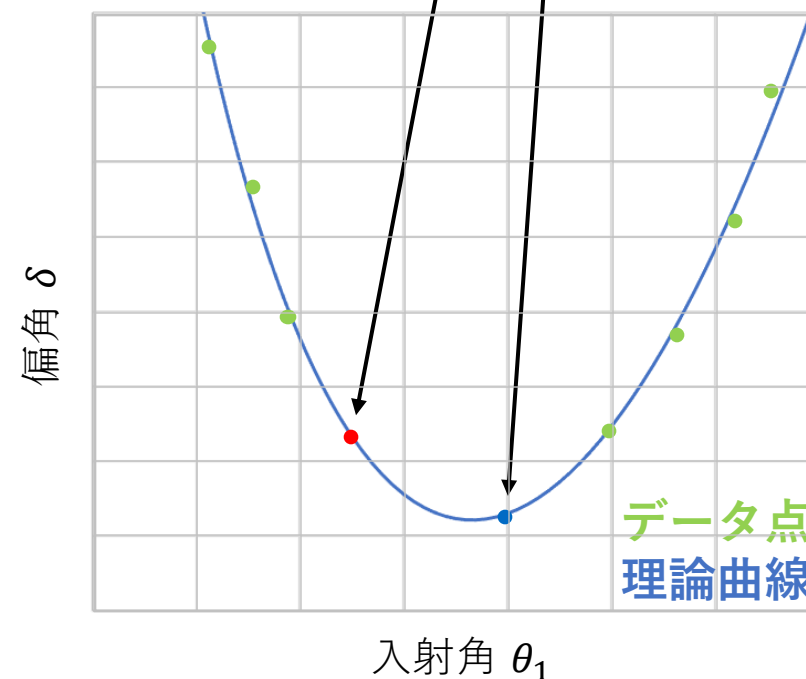
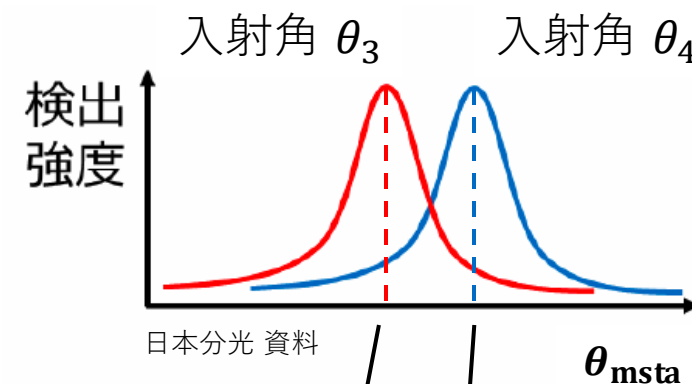
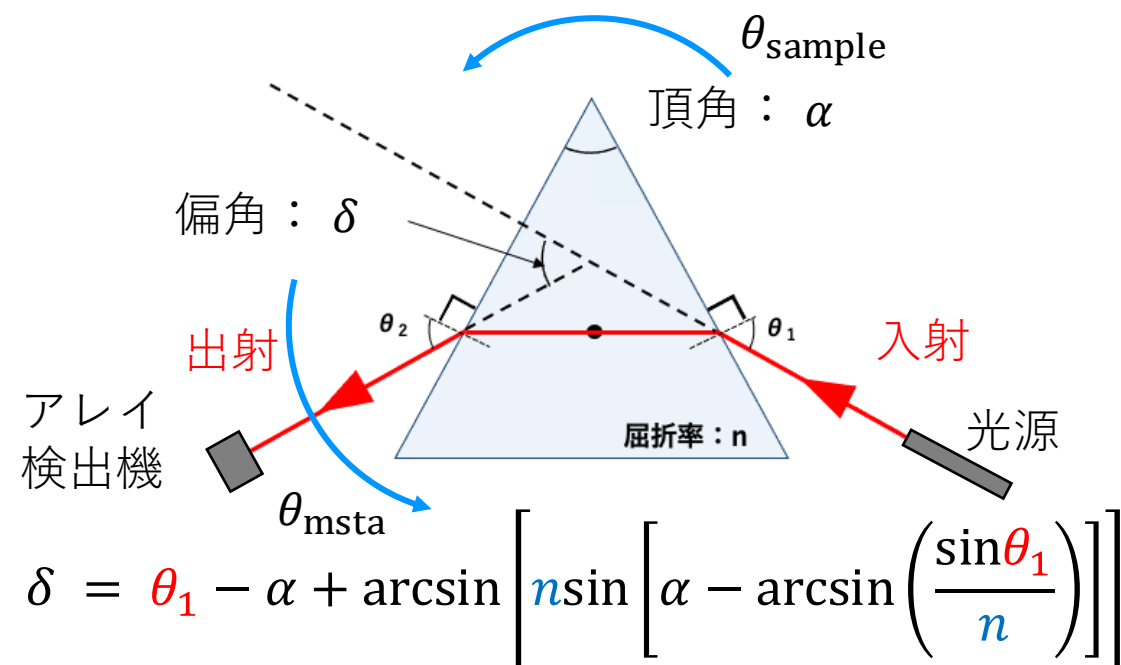
- ✓ 最小偏角  $\delta_{\min}$
  - ✓ 頂角  $\alpha$
- を測定し、屈折率を求める



折り返し地点の角度が最小偏角  $\delta_{\min}$   
**【課題】** 折り返し判定が難しい

# 本研究の偏角測定手法

折り返し判定が難しいという課題に対して、本研究では偏角  $\delta$  の入射角  $\theta_1$  依存性を利用して、**フィッティングにより、折り返し地点を精度良く求めることで解決**する。



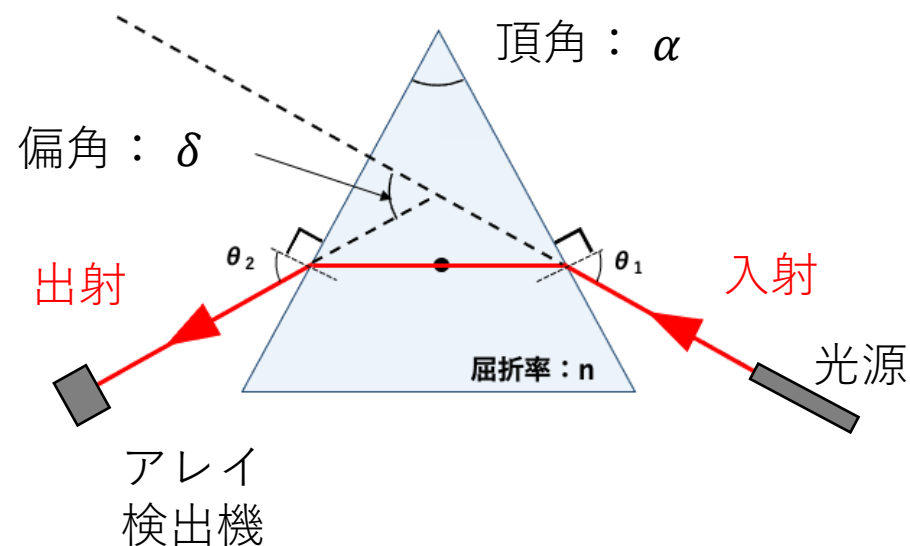
装置の制約上入射角  $\theta_1$  は直接は測定できない。初期角度を  $\theta_{\text{sample}} = 0^\circ$  とし、  
 入射角  $\theta_1 = \theta_{\text{sample}} + b$  ( $b$ : 入射角オフセット) とおく

$n$  と  $b$  をフリーパラメータとしてフィッティングを行い、屈折率を求める

# 本研究手法のメリット

この測定手法では、単素子検出器で十分

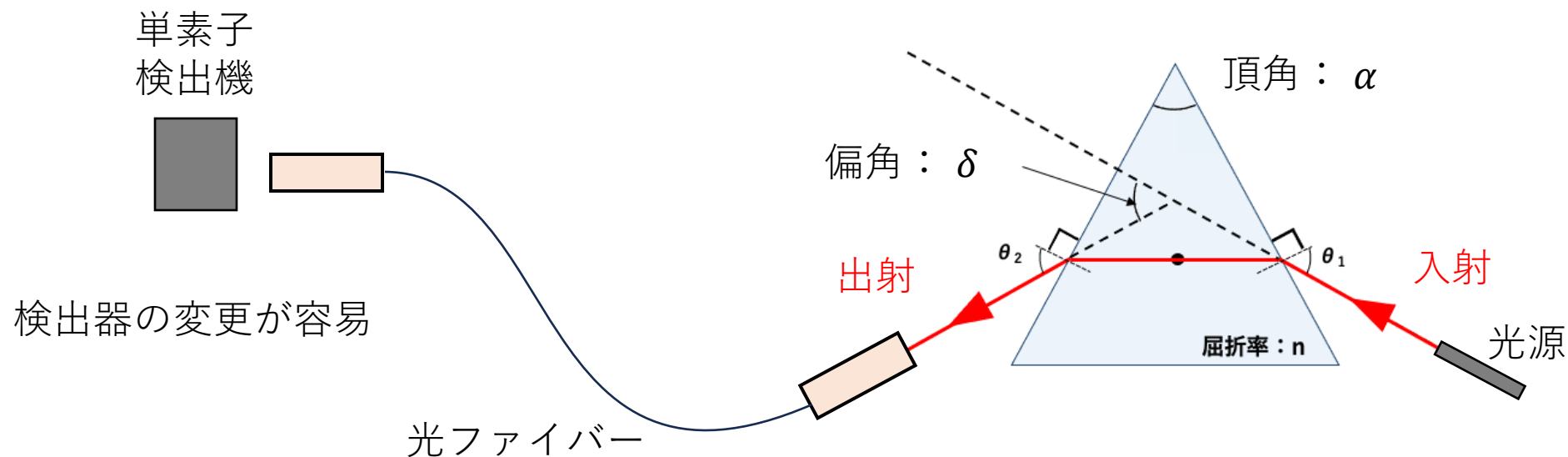
- アレイ検出器よりもコストを抑えられ、入手性も高い
- 検出器上で位置の情報が不要なく、ファイバーを使った光学系を構築できる
  - 検出器の設置場所の制約の緩和
  - 検出器の変更が容易



# 本研究手法のメリット

この測定手法では、単素子検出器で十分

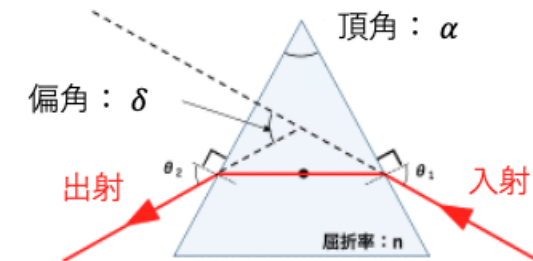
- アレイ検出器よりもコストを抑えられ、入手性も高い
- 検出器上で位置の情報が必要なく、ファイバーを使った光学系を構築できる
  - 検出器の設置場所の制約の緩和
  - 検出器の変更が容易



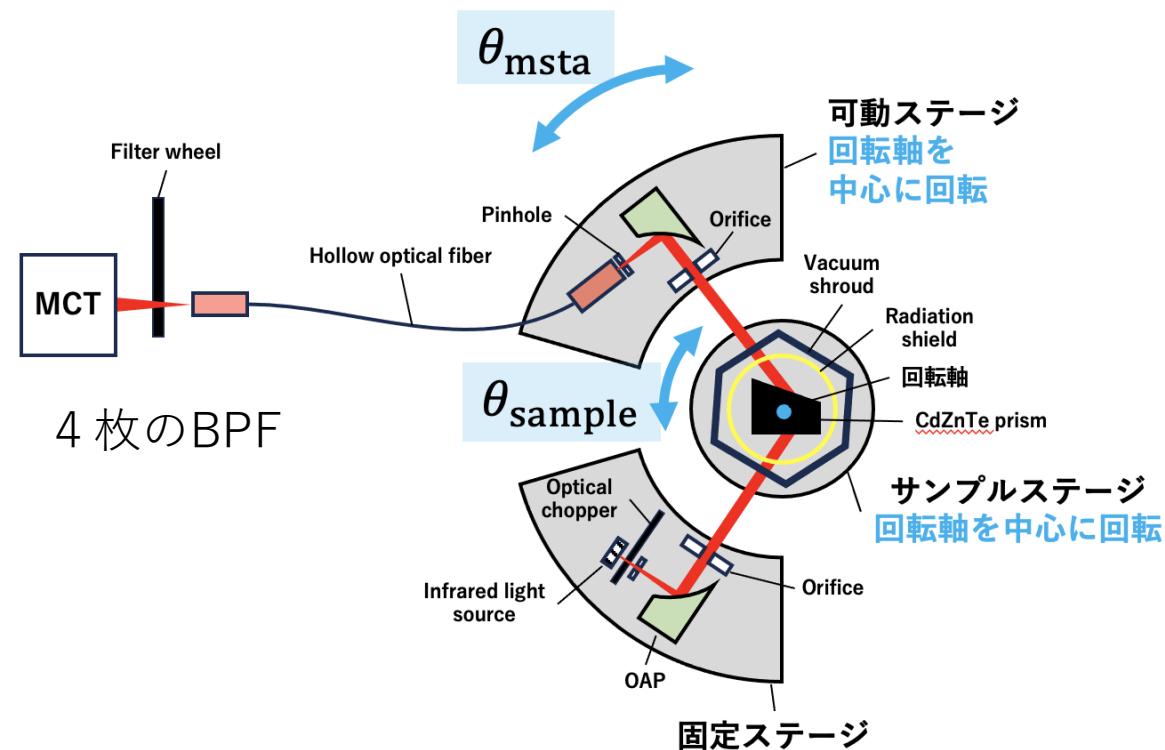
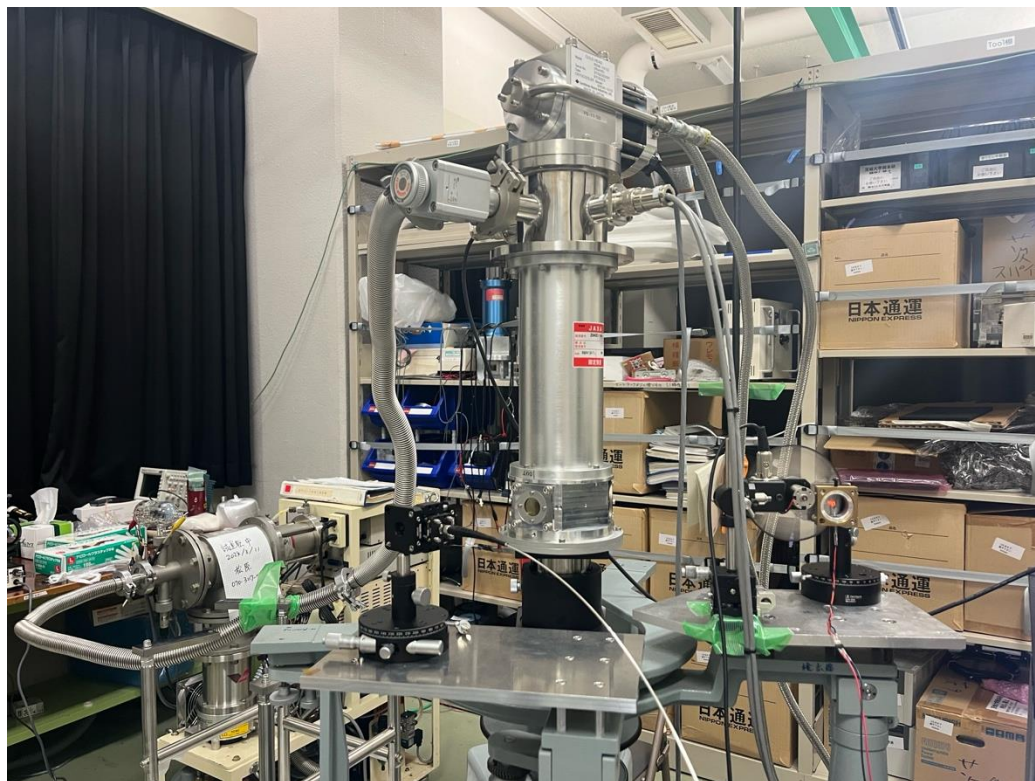
## 極低温中間赤外線偏角測定装置

全て購入することは難しい、、、

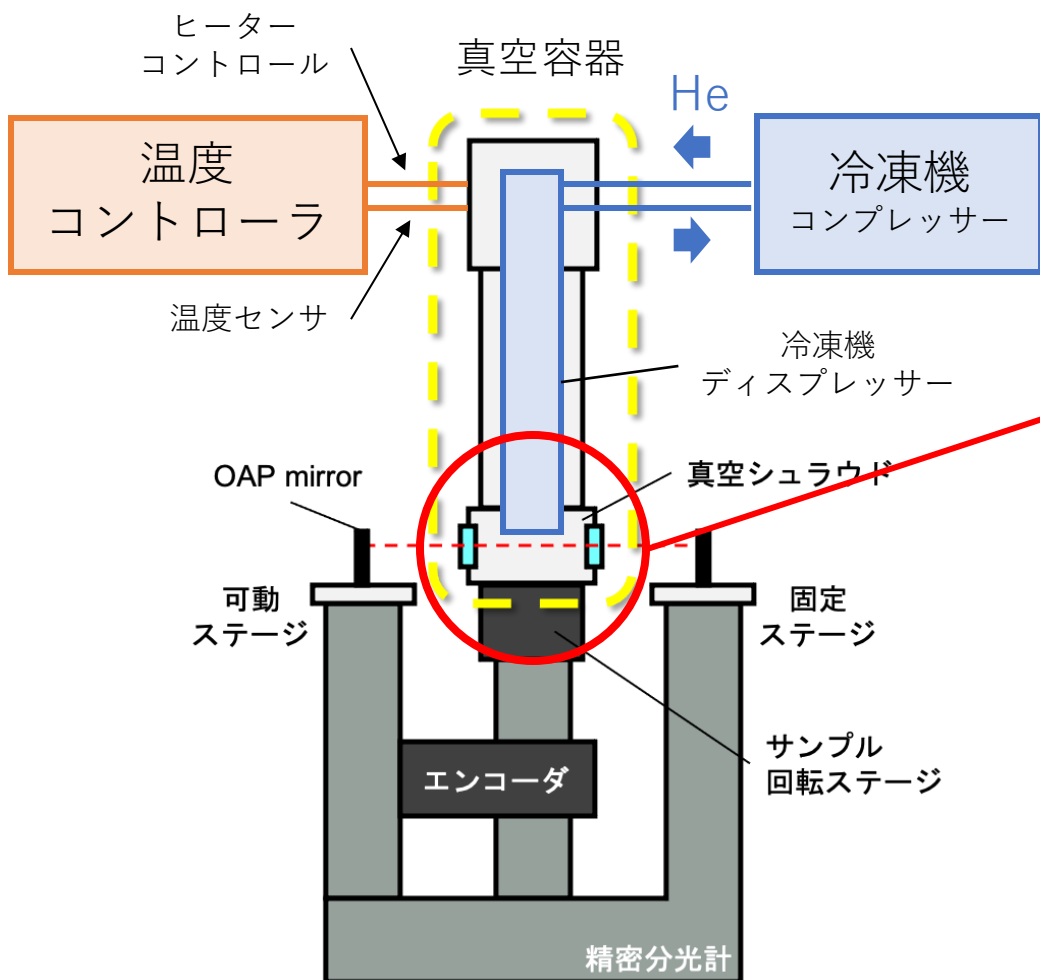
- 光源 → タングステンフィラメントランプ（黒体光源と仮定）とBPF
- 検出器 → BOMEM DA8からひっぺがした単素子のMCT検出器
- 冷却系 → 4 K 機械式冷凍機



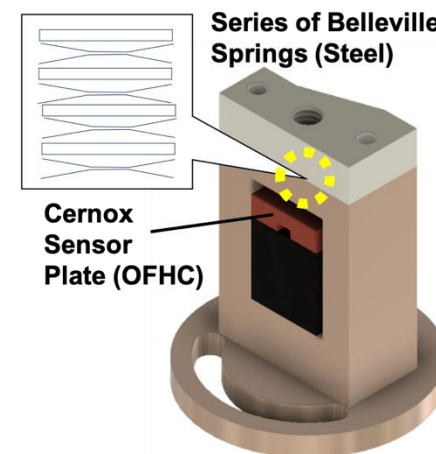
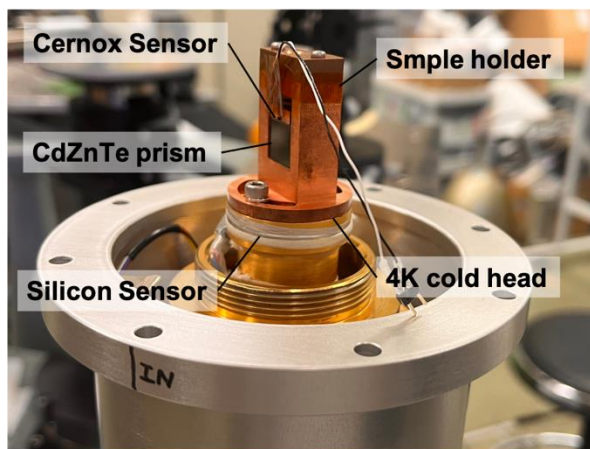
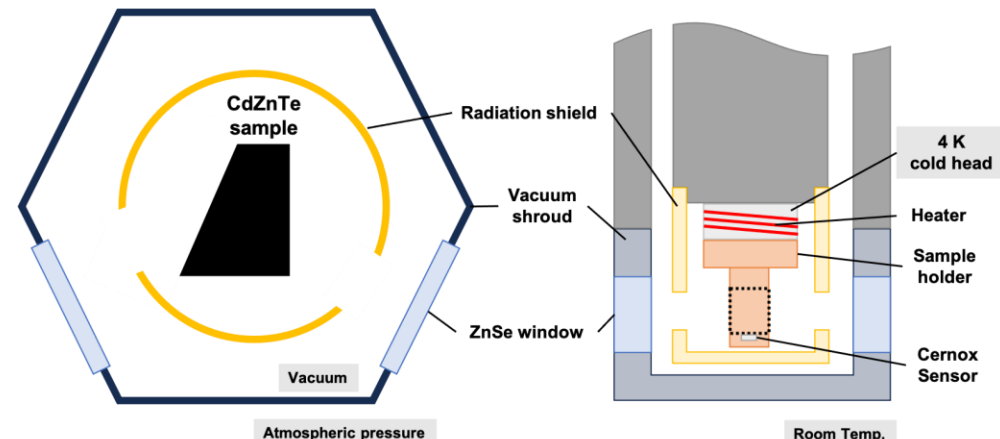
- ✓ 最小偏角  $\delta_{\min}$
  - ✓ 頂角  $\alpha$
- を測定し、屈折率を求める



## 冷却システム

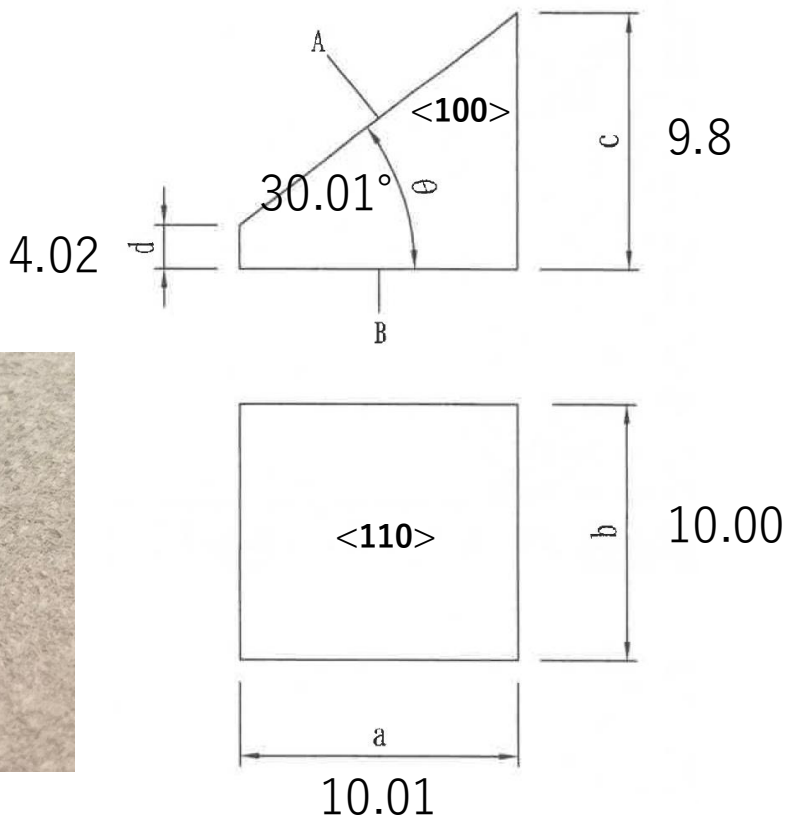


- 屈折率測定用のサンプルを  $< 20\text{ K}$  の極低温に冷却するために、機械式冷凍機を導入
- サンプル温度  $12.4\text{ K}$  に到達し、要求温度を満たした
- ヒーターによる温調機能 ( $\pm 0.25\text{ K}$ ) あり



サンプルホルダとサンプルの熱膨張率の違いによるサンプルの破壊と応力変形を防ぐ工夫をしている<sup>12</sup>

# CdZnTe プリズム サンプル

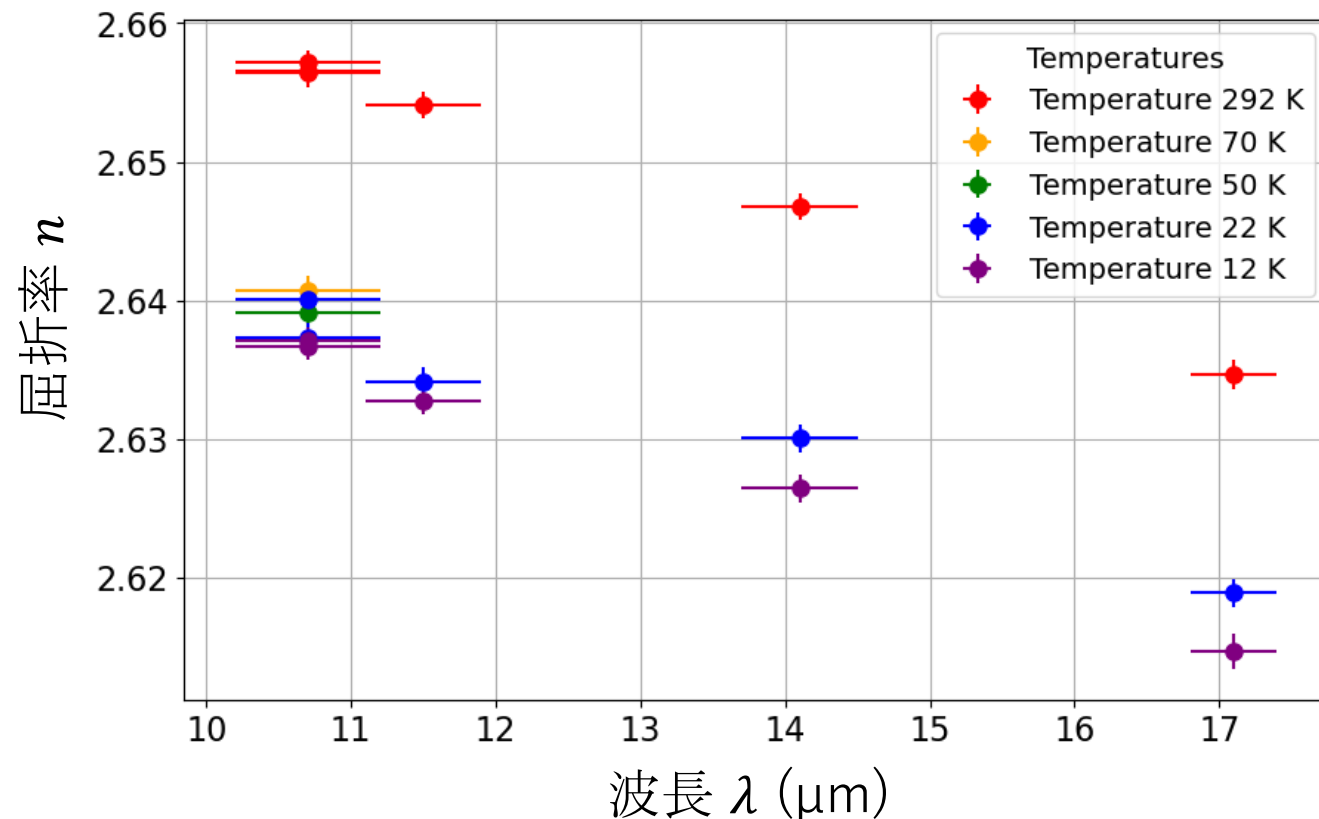


|      |   |                                                    |
|------|---|----------------------------------------------------|
| 組成式  |   | $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$        |
| 結晶構造 |   | 立方晶系                                               |
| 面方位  |   | $\langle 100 \rangle$                              |
| 抵抗率  |   | $> 1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$<br>(高抵抗型) |
| 面粗さ  | A | 0.014 wave                                         |
|      | B | 0.033 wave                                         |

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$

最終的なイメージングレーティングに用いる材料と  
同じ組成比、結晶面方位のサンプルを測定

# 極低温中間赤外線偏角測定結果



波長 10.7, 11.5, 14.0, 17.1  $\mu\text{m}$ 、  
温度 12.4 ~ 292.8 K における、  
CdZnTeの屈折率の絶対値を得た

屈折率の統計誤差は、  
 $\Delta n_{\text{sta}} < 0.35 \times 10^{-3}$

系統誤差を含めると、  
 $\Delta n_{\text{total}} < 1.3 \times 10^{-3}$

屈折率の要求測定精度  $\Delta n_{\text{req}} < 10^{-3}$  をほとんど満たしている

SPIE/JATISで近々publish予定

## まとめ

- 中間赤外線高分散分光(観測波長 10-18  $\mu\text{m}$ 、波長分解能 = 30,000) によるサイエンスの展開が期待されている
- 波長10 ~ 17  $\mu\text{m}$ 、温度 12.4 ~ 300 Kで屈折率を測定可能な装置を開発した
- 極低温中間赤外線におけるCdZnTe の屈折率  $n$  を初めて直接測定した
  - その測定精度は  $\Delta n < 1.3 \times 10^{-3}$  であり、測定要求精度  $\Delta n < 10^{-3}$  をほぼ満たしている

### 【宣伝】

材料の屈折率を測りたい方いらっしゃいませんか！

- 低温(4~300 K)、中間赤外線(10.7, 11.5, 14.1, 17.1  $\mu\text{m}$ )で屈折率を測りたい材料はありませんか？
  - 1.5, 2.0, 2.3, 5.0  $\mu\text{m}$ も今年度中に測定可能になる見込み
  - 今後連続波長での測定を可能にすべく、小型の2DFTIR (ZHAO et al 2024)の搭載を検討中