# CdZnTe製イマージョングレーティングによる 中間赤外線高分散分光計の開発

馬場俊介<sup>1</sup>, 中川貴雄<sup>1</sup>,鈴木仁研<sup>1</sup>,松原英雄<sup>1,2</sup>,榎木谷海<sup>1,2</sup>,平原靖大<sup>3</sup>,笹子宏史<sup>3</sup>,李源<sup>3</sup>,趙彪<sup>3</sup>,金田英宏<sup>3</sup>, 古賀亮一<sup>4</sup>,細畠拓也<sup>5</sup>,海老塚昇<sup>5</sup>,山形豊<sup>5</sup>,中岡俊裕<sup>6</sup>,和田武彦<sup>7</sup>,野村英子<sup>7</sup>,野津翔太<sup>8</sup>,池田優二<sup>9</sup> <sup>1</sup> ISAS/JAXA,<sup>2</sup> 総研大,<sup>3</sup> 名古屋大,<sup>4</sup> 名古屋市立大,<sup>5</sup> 理研,<sup>6</sup> 上智大,<sup>7</sup> NAOJ,<sup>8</sup> 東京大,<sup>9</sup> フォロクロス

本研究は科研費基盤S「中間赤外線高分散分光システムによるスノーライン探査」 (代表:中川貴雄、2023-27)の支援を受けています





- ための地上観測用分光計
- 分光計仕様の検討状況
- まとめ

• GREX-PLUS/HRS、CdZnTe イマージョングレーティング、技術実証の

### CdZnTeの透過率・屈折率測定、超精密加工・反射防止開発の状況

可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024



## GREX-PLUS/HRS とその主要サイエンス



岩石惑星/ガス惑星の形成を分ける鍵 = H<sub>2</sub>O スノーライン HRS により 波長 10–18 µm を *ℛ ≡ λ/δλ ~ 30,000* で分光し 光学的に薄い H<sub>2</sub>O 輝線の速度プロファイルから 原始惑星系円盤におけるスノーラインの位置を同定する

Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer 次期戦略的中型ミッション候補として検討中(2030年代中盤打上げ目標)

Wide Field Camera (WFC) + High Resolution Spectrometer (HRS) 標準構造形成理論の検証 および ハビタブル惑星形成過程の解明









### リソースの限られる宇宙機で高分散を達成するため**イマージョングレーティング (IG)** を採用 高屈折率媒質中に回折面を作るエシェル格子で、光路差が屈折率で伸びる分、分光計を小型化できる



### イマージョングレーティング (IG)



サイズを 1/*n* に縮小

波長 10-18 μm における有望な高屈折率透明材料として Cd<sub>0.96</sub>Zn<sub>0.04</sub>Te (CZT; n~2.65) を選定し(Sarugaku et al. 2012)、 IG への超精密加工も実証済み (Ikeda et al. 2015) しかし、<u>CZT 製 IG で実際に分光観測を行った例はまだ無い</u>



# CZT製IGの技術実証のための地上観測用分光計

- CZTIG による中間赤外線高分散分光計の技術実証として、地上観測用の分光計を試作する それを用いて、スノーラインと関連の深い高温 H<sub>2</sub>O ガス輝線を試験観測する • 望遠鏡:ISAS 屋上 1.3 m 望遠鏡 (→海外適地)
- 波長帯:Nバンド(~7.5-13.5 µm)
- 波長分解能: *R* ~ 30,000 (HRSと同等)
- 注目輝線: o-H<sub>2</sub>O 12.453 µm (ほか [Ne II] 12.814 µm など)
  - A 係数が大きく円盤赤道面でなく表層の高温 H<sub>2</sub>O ガスをトレース
  - 原始惑星系円盤モデルの制限に寄与できると期待





FY2025 に大型 IG 製作・分光計組立て FY2026 に試験観測開始を目指す









- CZTの吸収係数 α が極低温で十分に小さいことの確認
  - ・感度要求から α < 0.01 cm<sup>-1</sup>
- CZT 屈折率 n の極低温における精密測定
- CZT 結晶の機械加工方法の確立
- CZT 結晶の表面に施す反射防止の開発
  - 感度要求から反射率 R < 0.1</li>
- 分光計の設計の具体化

### • 微小な $\alpha$ を測定するため、また、分光計設計を最適化するために、 $\Delta n \sim 10^{-3}$







使用温度 (<20 K) における CZT の吸収係数 α の実測値は無かった 極低温下での透過率測定から、要求値  $\alpha < 0.01$  cm<sup>-1</sup> が満たされているか確認する



## CZT 透過率:低抵抗結晶での結果 (Maeshima et al. 2022)



10-20 µm では自由ホールによる吸収が支配的で低温になるほど 吸収係数は低下するという従来の予測に反し、吸収係数が増大 極低温で「不純物準位に束縛されたホールが価電子帯へ遷移する ことによる吸収」が卓越するというモデルで説明できる 抵抗率(残存不純物濃度に依存)で透過率は大きく変化する 可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024



# CZT 透過率:高抵抗結晶の測定(Liet al. in prep.)

n 型高抵抗 (>10 GΩ cm) 結晶で、吸収係数の要求値が満たされるか確認する 測定系を改良し、吸収係数をより低い値まで測定できるようにする







# CZT 透過率:高抵抗結晶の結果 (Li et al. in prep.)

5.6 K までの測定を波長 10, 15, 19 µm で実施



いずれの波長でも透過率の温度依存性は小さい(<1.5%;低抵抗結晶とは異なる結果) 無限回フレネル反射を仮定して吸収係数を導出すると要求値 <0.01 cm<sup>-1</sup> は満たされている

Temp /K Li et al. in prep.

可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024



## CZT 屈折率:以前の状況

吸収係数と同様、使用温度 (<20 K) における CZT の屈折率の実測値は無かった 従来の GREX-PLUS/HRS の検討では、常温での値や CdTe の類似から推定した値を使用 (1a) 2-13 µm では常温における CZT の測定値 (Sarugaku et al.) を使用 (1b) 13-22 µm では CdTe 屈折率 (Klocek 1991) を (1a) と接続するようオフセットさせて使用 (2) (1a)+(1b) を CdTe 屈折率の平均 dn/dT (Klocek 1991) を用いて一律に極低温までシフトさせる



馬場 俊介

極低温における屈折率の正確な値は 透過率から吸収係数への換算においても 分光計設計の最適化においても重要 高精度の測定 (Δn~10<sup>-3</sup>) が必要







頂角  $\alpha$  の  $\mathcal{O}$  リズムに 入射した 際の 偏角  $\delta$  は 入射角と出射角が等しい時に最小値となる



## CZT 屈折率:最小偏角測定 (Enokidani et al. submitted)

CZT 屈折率: 測定結果 (Enokidani et al. submitted)



## CZT結晶の超精密加工:背景と課題

- CZT結晶に機械加工を施すうえでの課題
  - 脆性材料であるため鏡面加工が困難
  - 急性毒性区分4であり厳しい安全管理が必要
- CANON 独自の加工装置で CZT-IG のサブモデルが すでに試作されている (Ikeda et al. 2015)
- 理研の設備で同等の精度の達成と大型化を目指す
- TAO/MIMIZUKUのGeグリズムをフライカットで 加工した際の技術の蓄積を CZT-IG へ展開する









### CZT 結晶の超精密加工: 旋削試験

最初の加工実験



### CdZnTe試験片 $10 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$



{110}:劈開面





### 超精密加工機(10 nm制御) 芝浦機械 ULG100A



細畠さん発表資料



## CZT結晶の超精密加工:最適な切削方向の特定

### 実験結果(白色光干渉計 Zygo NewView7200)



### 鏡面切削に成功+明確な方位依存性を確認



脆性破壊によるピット多数

細畠さん発表資料

### 劈開面内での切削に最適な方向は 直交する劈開面に垂直または平行



今後はIG加工に向け、 フライカット条件の探索 粗加工用の研削条件の探索 を進めていく









### 波長以下の微細構造で実効的な屈折率を制御する



CZTへの直接のウェットエッチングのほか、Si モスアイ構造の CZT への接合なども検討中

中岡さん発表資料





Wavelength (µm)





# 試作分光計の仕様検討:ISAS 望遠鏡および検出器



宇宙科学研究所屋上望遠鏡 主鏡口径:1.3 m 焦点モード: カセグレン・**ナスミス**(合成 F/18) 観測可能波長: >1μm ※大学共同利用装置(詳細は P310b 宮川ら) 所在地(相模原市)におけるNバンドの 典型的なシーイングは2"程度と想定



可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024







Raytheon 製 SB-189 512x412 Si:As IBC アレイ (1-28 μm、ピクセルサイズ 30 μm pix<sup>-1</sup>) 天文衛星「あかり」のヘリテージ



## 試作分光計の仕様検討:エシェログラムの用語の整理







## 試作分光計の仕様検討:波長分解能の達成可能性

 $\mathscr{R} = \frac{2nd_1 \tan \delta}{D\phi'}$ (Littrow 配置、シーイング限界)

- $n: 屈折率、 d_1: 入射ビーム径、 \delta: ブレーズ角、$
- $D: 主鏡口径、 \phi': シーイング$

CZT母材はIG 溝面が劈開面 {110} になるよう切り出す  $CZT インゴットの厚みと直径で d<sub>1</sub> と <math>\delta$  が制限される





現在、調達を進めている インゴットのサイズは直径6インチ

ブレーズ角 $\delta = 75^{\circ}$ 、 ビーム径  $d_1 = 25 \, \mathrm{mm} \, \mathbb{C}$ 、 分解能 ぷ~30,000 を達成できる

インゴットのうちどれだけの領域が 単結晶になっているかを調査中

## 試作分光計の仕様検討:次数の条件とスキャン方針



ライン分布関数の幅は $\delta \lambda \sim \lambda_b / \mathcal{R}$ 、FSR に含まれる数は  $\Delta \lambda / \delta \lambda \sim \mathcal{R} / m$ Nyquist サンプリングには、この2倍以上のピクセルが必要 SM 波長分解能と検出器サイズで、何次以上のスペクトルにすべきか決まる CD の切替え・回転で次数をスキャン SM 今回の試作分光計の場合 Ge 製 IG 分光計 GIGMICS (Hirahara et al. 2012)の 次数は少なくとも *m* > 150 駆動機構のヘリテージを利用 Nバンドは200以上の次数に分割 IV16 検出器内に一度に収まらない  $FM_3$ フリー回転機構 IG . FM CD 表裏 2 種 × 傾斜変化

ズ波長:
$$\lambda_b = \frac{2n\sigma\sin\delta}{m}$$
  $\sigma$ :溝間隔  
域幅 FSR: $\Delta\lambda \sim \lambda_b/m$  ( $m \gg 1$ )  $m$ :回折次数

可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024



## 試作分光計の仕様検討:設計パラメータの初期案の例

- 口径  $D = 1.3 \,\mathrm{m}$ 、スリット幅  $\phi = 4''$ 、シーイング  $\phi' =$
- ビーム径 d<sub>1</sub> = 25 mm
- IG ブレーズ角 $\delta = 75^{\circ}$ 、傾き $\theta = 0^{\circ}$ (Littrow配置)、
- 短波長 CD ブレーズ角  $\delta_c = 32^\circ$ 、傾き  $\theta_c$ (右 4 種)、
- 長波長 CD ブレーズ角  $\delta_c = 24^\circ$ 、傾き  $\theta_c$ (右 3 種)、
- カメラレンズ焦点距離 $f_2 = 160 \,\mathrm{mm}$
- 検出器サイズ (W,H) = (412,512) pix、ピクセルサイス



- 7″	Sub-band	θ <sub>c</sub> (deg)	λ (µm)	m
- ∠	SHORT	1.5	7.49 – 8.25	479 – 435
		7.0	8.15 – 8.91	441 – 403
海间俯 $\sigma = 699.3 \mu\text{m}$		12.9	8.80 – 9.56	408 – 376
浦间隔 $\sigma_c = 8.5 \mu m$		19.2	9.43 – 10.18	381 – 353
溝間隔 $\sigma_c = 14.5 \mu m$	LONG	4.8	9.82 – 11.16	366 – 321
$\vec{X} \Delta = 30 \mu \mathrm{m}  \mathrm{pi} \mathrm{x}^{-1}$		10.4	11.02 – 12.37	326 – 290
		16.3	12.21 – 13.56	294 – 264

次数4,5本のオーバーラップを確保 スペクトルをギャップなく結合







$$\begin{split} \lambda &= 9.8 - 13.6 \,\mu\text{m} \\ D &= 1.3 \,\text{m}, \,\phi = 4^{\,\prime\prime}, \,\phi' = 2^{\,\prime\prime} \\ d_1 &= 25 \,\text{mm} \\ \delta &= 75^\circ, \,\theta = 0^\circ \,\sigma = 699.3 \,\mu\text{m} \\ \delta_c &= 24^\circ, \,\theta_c = 16.5^\circ \,(\sigma_{c0} = 10^\circ), \,\sigma_c = 14.5 \,\mu\text{m} \\ f_2 &= 160 \,\text{mm} \\ (W, H) &= (412, 512) \,\text{pix}, \,\Delta = 30 \,\mu\text{m} \,\text{pix}^{-1} \end{split}$$

### [Estimates]

Detectable wavelengths:	12.21 – 13.56 μm	(294 <sup>th</sup> – 265 <sup>th</sup> )
Worst diffraction limit:	2.15″	
Minimum LSF width:	3.60 pix	
Minimum order separation:	15.59 pix	
Required IG base length:	93.30 mm	





x (pix)



## 試作分光計の仕様検討:光学レイアウト設計







# 試作分光計の仕様検討:部品等の調達

- 現有品(「あかり」やGIGMICSへリテージ)をできるだけ利用
- 検出器
- 検出器ユニット+熱パス
- 極低温回転機構
- 冷凍機・チラー
- 真空チャンバー
- 真空ポンプ
- etc...













- 地上観測用の分光計(Nバンド、波長分解能 30,000)を試作する
- in prep.)
- より長波長での測定へと拡張中
- 最終的なフライカット加工の条件の探索へと移行する
- 表面反射防止:サブ波長モスアイ構造と誘電体多層膜の2つの手法を開発中

• GREX-PLUS/HRSの鍵である CZT 製イマージョングレーティングの性能を実証するため、

- CZT 透過率:高抵抗 (~10 GΩ cm) 結晶ならば極低温で要求値を満たすことを確認 (Li et al.

- CZT 屈折率:極低温での測定が波長 10.68 μm について完了 (Enokidani et al. submitted)、

• CZTの超精密加工:劈開面内における最適な切削方向を確認したので、粗加工用の研削と

分光計設計:概念検討はほぼ完了し、今後、入手できる部品等を踏まえて詳細化していく

