GREX-PLUS高分散分光器実現に向けた要素開発: イマージョングレーティング材料の極低温中間赤外線屈折率測定

榎木谷海、松原英雄^{1,2}、中川貴雄^{2,3}、馬場俊介²、平原靖大、李源、趙彪、笹子宏史⁴、 古賀亮一⁵、和田武彦⁶、高田真緒⁷ ¹総合研究大学院大学²JAXA宇宙科学研究所³東京大学⁴名古屋大学⁵名古屋市立大学⁶国立天文台⁷関西学院大学

我々は中間赤外線高分散分光観測(観測波長 10–18 μm、波長分解能 ~ 30,000)の実現のため、 次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS への搭載を目指し、 CdZnTe 製イマージョン・グレーティング (IG)の開発を行なっている。IG は媒質中に光を通すことで、通常の回折格子に比べ、その大きさを 1/n 倍 (n: 屈折率)にでき、装置全体を小型化できる。現在は CdZnTe 製 IG の実証に向けて、地上 用の実証用分光器を設計している。しかし、IG にとって重要なパラメータである n は CdTe からの 推定値しかなく、観測波長域、また使用温度における CdZnTe の n の実測値がない。宇宙機搭載用 の分光器を設計する上で目的の波長の回折効率を最大にするために、CdZnTe の $n e \Delta n < 10^{-3}$ の 精度で求めたい。

我々は CdZnTe の *n* を測定するために極低温中間赤外線屈折率測定装置を開発している。本装置 では、可視光線によるプリズムの頂角測定と赤外線による最小偏角測定が実施可能である。最小偏 角測定の測定波長は4つのバンドパスフィルタ(10.6、11.4、14.0、17.1 μm)から選択でき、測定温 度は12.4 K ~ 常温で調節可能である。波長 17.1 μm、温度 22.347±0.003 Kにおける CdZnTe の 屈折率は *n* = 2.61885±0.00103であった。

第26回 惑星圏シンポジウム (SPS) 0-D2-31



Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!

Venus

(+Mercury)

Outer

Planets

李源、趙彪、笹子宏史、古賀亮一、和田武彦、高田真緒

中間赤外線高分散分光観測が開くサイエンス



中間赤外線高分散分光観測(観測波長 10-18 µm、 波長分解能 ≥ 25,000)が必要

$GREX-PLUS \ \ \ \ Galaxy \ Reionization \ EXplorer \ and \ PLanetary \ Universe \ Spectrometer$

	GREX-PLUS 仕様		
	打ち上げ	予定	2030 年代
	望遠鏡	口径	1.0 m
		温度	< 50 K
	観測装置	広視野カメラ	2 - 10 µm
		高分散分光器	10 - 18 μm
		波長分解能	> 25,000
		温度	< 22 K

惑星大気気温構造と大気組成の理解

木星以遠の巨大惑星大気の高高度の気温を精度良く測定し、 対流圏から上部成層圏までの気温の鉛直分布を導出。 大気微量成分および同位体を網羅的に検出。

戦略的に実施する中型計画を目指す時限WG設立提案書 より

4

イマージョングレーティング

● 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

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

L:光路長、 R:波長分解能、
 λ:波長、 n:屈折率



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 µm 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 µm、使用温度 < 22 K において、屈折率の要求測定精度 ∆n_{reg} < 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、

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

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

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



入射角 $heta_1$

✓最小偏角 δ_{\min} ✓ 頂角 α を測定し、屈折率を求める



従来の最小偏角測定手法





9

極低温中間赤外線偏角測定

- ・ 各入射角 $heta_1$ で偏角 δ を測定
- 装置のセットアップ
 - 角度測定:光学エンコーダ
 角度分解能 10⁻⁴度
 - ・ 光源:
 1,200 K フィラメント光源
 - ファイバー:中空ファイバー
 - 測定波長:
 バンドパスフィルター(BPF)
 により選択
 - 検出器:MCT検出器
 - 冷凍機:
 機械式冷凍機4~300 K





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¹¹

CdZnTe プリズム サンプル



最終的なイマージョ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

Measurements and Results



頂角測定結果

CdZnTe サンプルのA、B面それぞれにおいて、3回ずつオートコリメーション測定を行った。



仕様値の有効数字の範囲内で頂角 α は一致している

Measurements and Results



極低温中間赤外線偏角測定結果(1)

波長10.7, 11.5, 14.1, 17.1 μm において、CdZnTe プリズムの偏角測定を設定温度4、20、 50、70 K でそれぞれ複数回測定を行った

(例) 波長10.7 µm、温度 22.47 ± 0.06 K



波長10.7 µmにおける偏角の入射角依存性を得た

極低温中間赤外線偏角測定結果(2)



屈折率測定結果



波長 10.7, 11.5, 14.0, 17.1 μm、 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、 $\Delta n_{\rm sta} < 0.35 \times 10^{-3}$

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

屈折率の要求測定精度 ∆n_{reg} < 10⁻³をほとんど満たしている

博士論文では、以下について議論している ① 本装置の不定性評価 $\rightarrow \Delta n_{total} < 1.3 \times 10^{-3}$

- ② CdTeからのCdZnTe屈折率推定値と本結果の比較
 →有意に異なっていたことを示した
- ③本結果がGREX-PLUS高分散分光器設計に与えるインパクト

【宣伝】

- 低温(4~300 K)、中間赤外線(10.7, 11.5, 14.1, 17.1 μm)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 µmも測定可能
- 今後の展望として検出機に小型の2DFTIR (ZHAO et al 2024)を搭載
 予定
 - 連続波長での測定が可能になる予定

まとめ

- 宇宙望遠鏡でしか観測不可能な中間赤外線高分散分光(観測波長 10-18 μm、 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10~17μm、温度12.4~300K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
- これまでのCdTeから推定していたCdZnTeの屈折率は測定値とは有意に異なっていたことを示した
- 材料の屈折率を測りたい方がいらっしゃいましたら、ぜひお声掛けください