

中間赤外線イメージングレーティング材料の 極低温高精度光学特性測定

平原靖大、李源、趙彪、趙宸溟、笹子宏史(名古屋大学)、古賀亮一(名市大)、榎木谷海、松原英雄、馬場俊介(ISAS/JAXA)、中川貴雄(ISAS/JAXA・東京都市大)、和田武彦(国立天文台)

概要

我々は、宇宙理学観測計画：銀河進化・惑星系形成観測ミッション WG における科学的目標である、“原始惑星系円盤におけるスノーラインの検出”、“宇宙における星間物質の進化や物質循環過程の解明”、“惑星の大気中分子の化学進化の解明”を、スペースからの中間赤外線高分散分光観測により実現することを目指している。本シンポジウムにおいては、上記の科学的目標に向けて、GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer) に搭載可能な高分散分光器 HRS(High-Resolution Spectrometer：観測波長範囲 $10 < \lambda < 18 \mu\text{m}$ 、波長分解能 $R = \lambda / \Delta\lambda \sim 30,000$) の実現に向けて、高透過率・高波長分解能の高屈折率($n \sim 2.7$)・高透過率($< 0.01 \text{ cm}^{-1}$) の要求を満たす、イメージングレーティング(IG)の最有力材料である高抵抗型 CdZnTe の、極低温での高精度な光学特性の測定系の開発と、これらを用いて行った、CdZnTe の IG 母材としての適性の評価結果について報告する。

1：最小偏角法に基づく精密屈折率測定装置の開発と、極低温での屈折率の測定

U. Enokidani, H. Matsuhara, Y. Li, Y. Hirahara et al., “Measurement of the temperature dependence of the refractive index of CdZnTe”, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Vol. 11, Issue 2, 028004(2025). DOI:10.1117/1.JATIS.11.2.028004

宇宙研において現有のカルニュー分光計 GMR-1 に He 循環 GM 冷凍機を取り付け、極低温・中間赤外線における CdZnTe の屈折率を直接測定するための、最小偏角法に基づく精密屈折率測定装置を開発した。測定波長は、中間赤外線 10/11.5/14/17 μm (熱源とバンドパスフィルタ (~1% の帯域幅)) を選択でき、赤外検出器には液体窒素冷却単素子 MCT 検出器を採用した。また、4K まで冷却能力のある He 冷凍機を用い、プリズム試料を 12.4 K まで冷却可能であることを確かめた。この最低到達温度は GREX-PLUS 中間赤外線高分散分光器(HRS)の冷却光学系の温度 $\sim 30\text{K}$ を十分に満たしている。

この測定系を用いた温度 $\leq 12.4 \text{ K}$ 、波長 10 - 17 μm における偏角測定と可視光によるオートコリメーション頂角測定を行い、プリズム試料の頂角 α 、最小偏角 δ_m と屈折率 n との関係式:

$$n = \frac{\sin((\delta_m + \alpha)/2)}{\sin(\alpha/2)} \quad (\text{式 1})$$

を用いて、CdZnTe の屈折率 n を $\delta n \sim 10^{-3}$ で推定した(図1)。

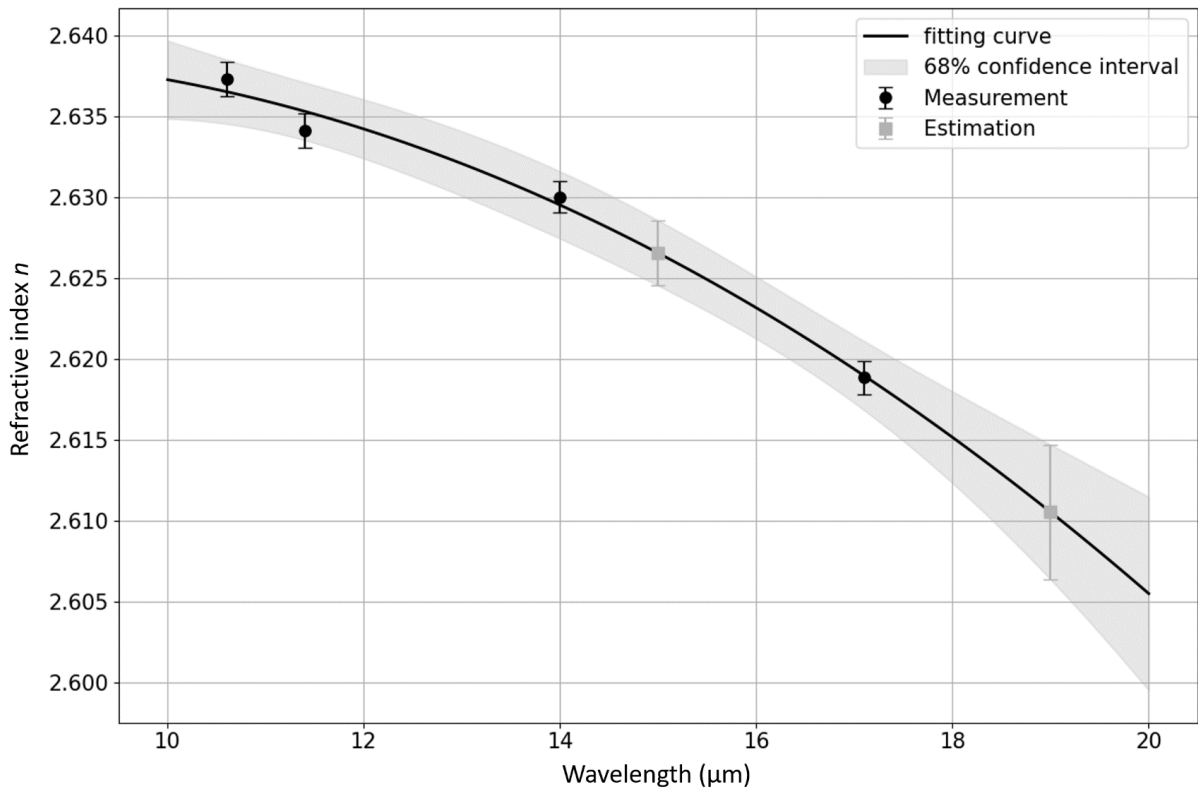


図 1: 温度 22 K で測定された高抵抗 CdZnTe 試料の屈折率 (Enokidani et al. 2025)。測定には中心波長 10.6、11.4、14、および 17.1 μm のバンドパスフィルタを用いた。エラーバーは、フィッティングパラメータの共分散行列に基づき、Student の t 分布を用いた統計解析によって推定された不確かさを示す。実線は波長の関数として行った最小二乗二次フィットを表す。吸収係数解析に用いた 15 μm および 19 μm における補間値・外挿値も、推定された不確かさとともに示してある。

2 : ダブルビーム極低温透過率測定装置の開発と、極低温での吸収係数の測定

Y. Li, Y. Hirahara, R. Koga et al., “Development of an accurate cryogenic transmittance measurement system for the validation of immersion grating material of next-generation space telescopes”, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, Vol. 11, Issue 3, 038003 (2025). DOI:10.1117/1.JATIS.11.3.038003

図 2 に示すコモンパス・ダブルビーム透過率測定装置の開発に取り組み、最低到達温度 5.6K から常温までの高抵抗 CdZnTe の分光透過率 τ_{inf} (無限回反射条件を仮定、式 2) を導出することに成功した。

$$\tau_{\text{inf}} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha t}}{1-R^2 e^{-2\alpha t}} \quad (\text{式 2})$$

また、得られた透過率は低抵抗 CdZnTe とは対照的に、低温条件下ではむしろわずかに上昇する傾向を示すことが判った。上記の研究項目 1 に示す屈折率測定の結果を、式(2)で示した無限回フレネル反射モデル式：における反射率 $R \equiv (n-1)^2/(n+1)^2$ に適用し、高抵抗 CdZnTe の吸収係数を推定した(表 1)。この結果、測定に用いた高抵抗 CdZnTe 試料に対しては、高分散 IG の成立条件: $\alpha < 0.01\text{cm}^{-1}$ を満たすことが初めて確認された。

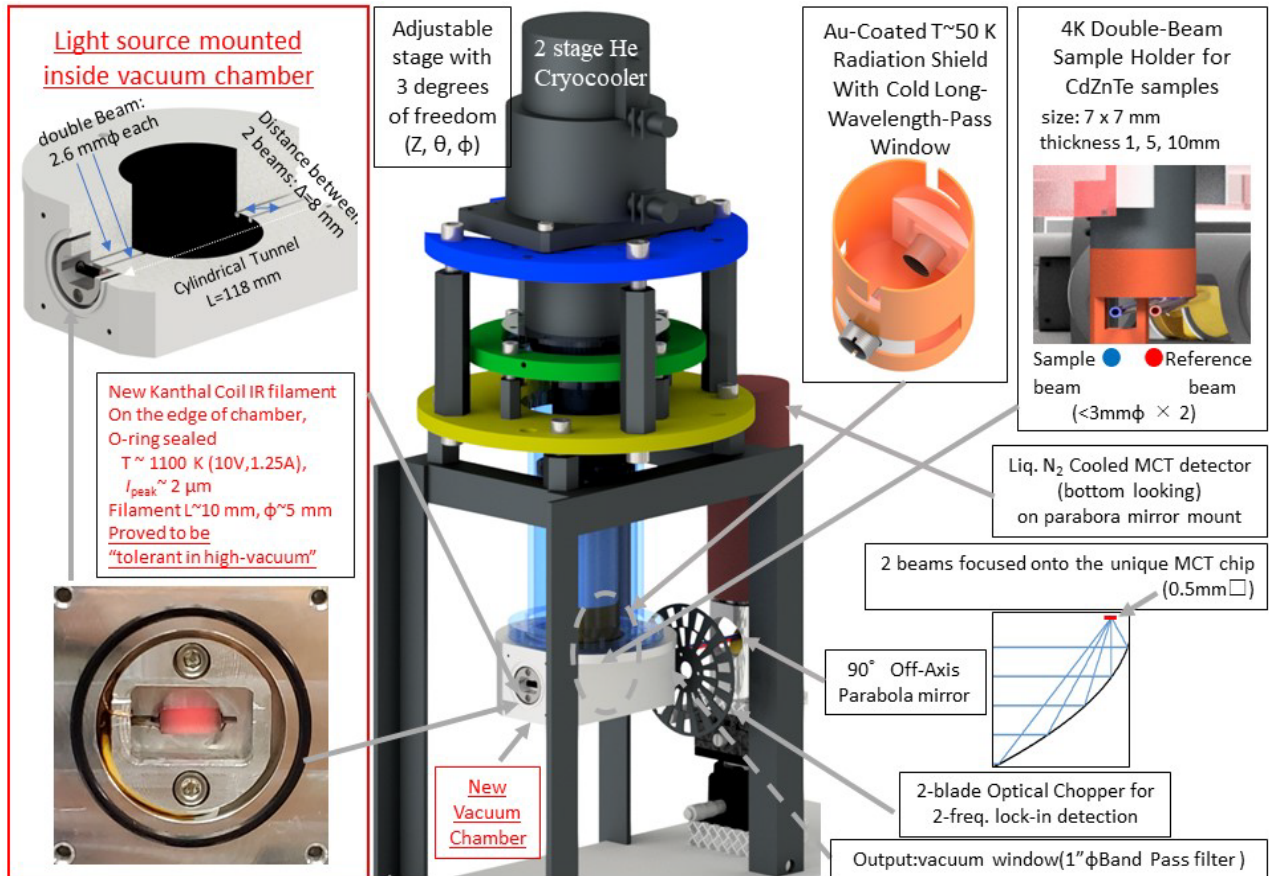


図 2：完成したコモンパス・ダブルビーム二周波チョッピング透過率測定装置

表 1: 高抵抗 CdZnTe の吸収係数 α の導出結果

Temperature (K)	10.6 μm		15 μm		19 μm	
	α / cm^{-1}	n	α / cm^{-1}	n^*	α / cm^{-1}	n^*
12.4	0.000508	2.63665	0.003441	2.62256	0.002529	2.60688
22	0.000491	2.63730	0.003338	2.62655	0.002486	2.61055
250	0.003036	2.65713	0.003566	2.64298	0.004585	2.62627

(* : 表 1 の屈折率測定結果の $n(\lambda)$ =二次関数フィッティングによる内挿・外挿値を仮定)

3：まとめと今後の展望

本研究で開発した極低温動作の精密透過率・屈折率測定装置は、実際の高分散 IG の製作・評価段階において重要な、品質管理上の課題：(1)IG の母材である、ドーピング過程を経た高抵抗 CdZnTe の大型インゴット内の透過率の均一性の評価、(2)結晶成長過程において生成する Te 微粒子のサイズと、それに伴う長波長領域での散乱の影響の評価、(3)製造ロットごとの品質管理指標である比抵抗 ρ と中間赤外線領域での α の相関など、CdZnTe 材料製造工程の検討においても活用することが期待できる。

CdZnTe IG を用いた高分散エシエル分光器の実現(GREX-PLUS HRS 実機および性能実証用地上観測装置)においては、クロスディスペルザーの高い回折次数での狭い FSR($\sim 0.024 \mu\text{m}$)の中心付近に精密に配置する光学設計が必須であり、低温における屈折率 n の温度依存性と波長依存性を、当初の目標よりもさらに高い精度: $\delta n \sim 10^{-4}$ で導出することが求められる(馬場他、2026 年春季天文学会年会発表ほか)。現有の最小偏角測定装置 GMR-1 の“ロータリーエンコーダーの偏角測定精度”はこの要求を満たすが、新規に導入した He 冷凍機と真空チャンバー内部に設置されたプリズム試料が、GMR-1 中心回転ステージ上に固定されているため、“本来の最小偏角法測定における重要な操作”である、プリズム試料の回転(最小偏角条件付近での $\sim \pm 15^\circ$)が困難であるという、本質的な問題が残されている。今後、引き続き、この問題を解決し、最小偏角測定の系統誤差を校正する赤外線レーザー光学系の構築によって、GREX-PLUS HRS の観測波長帯全域での屈折率の精密測定に取り組む。具体的には、真空チャンバー内部での冷却プリズム試料の自由回転機構の設計と製作を、主として名古屋大学において継続して進める。この目的のため、2025 年中旬に、最小偏角測定装置一式を名古屋大学に移設した。現在取り組んでいる、極低温プリズム回転機構の実現に向けた技術的な内容については、新しい特許取得の可能性があるので詳細な記述を控えさせていただく。