

すばる HDS 用イメージスライサの開発と試験観測

田実晃人、青木和光（国立天文台）、山室智康（オプトクラフト）

Introduction

すばる望遠鏡高分散分光装置（HDS）は分光器としては最大約 15 万に至る波長分解能を持っているが、そのためにはスリット幅を典型的なシーイングサイズ（ $\sim 0''.6$ ）より狭く設定する必要があり、大きな光量損を生じる。

例：シーイング $0''.6$ では 45% の光しか $0''.3$ スリット（分解能 $R \sim 110,000$ ）を通らない。

同位体組成解析など、スペクトル線輪郭の解析を行う観測では、10 万あるいはそれを超える高い波長分解能を必要とするが、HDS では上記の問題のため必ずしも有効にその能力を活用できてはいなかった。

これを改善するためにイメージスライサの開発・製作を行った（科研費：基盤 A 代表 梶野敏貴）。

このようなイメージスライサは、今後 TMT での高分散分光器を考えるという点からも、避けて通ることのできない重要な技術であると考えられる。

このポスターでは、開発したイメージスライサの HDS への搭載、および試験観測から得られたその基本性能について紹介する。

仕様・設計

$\phi 1''.5$ のイメージを $0''.3$ ($\times 5$) にスライスし、波長分解能 110,000 のスペクトルを高効率で得る

製作：オプトクラフト

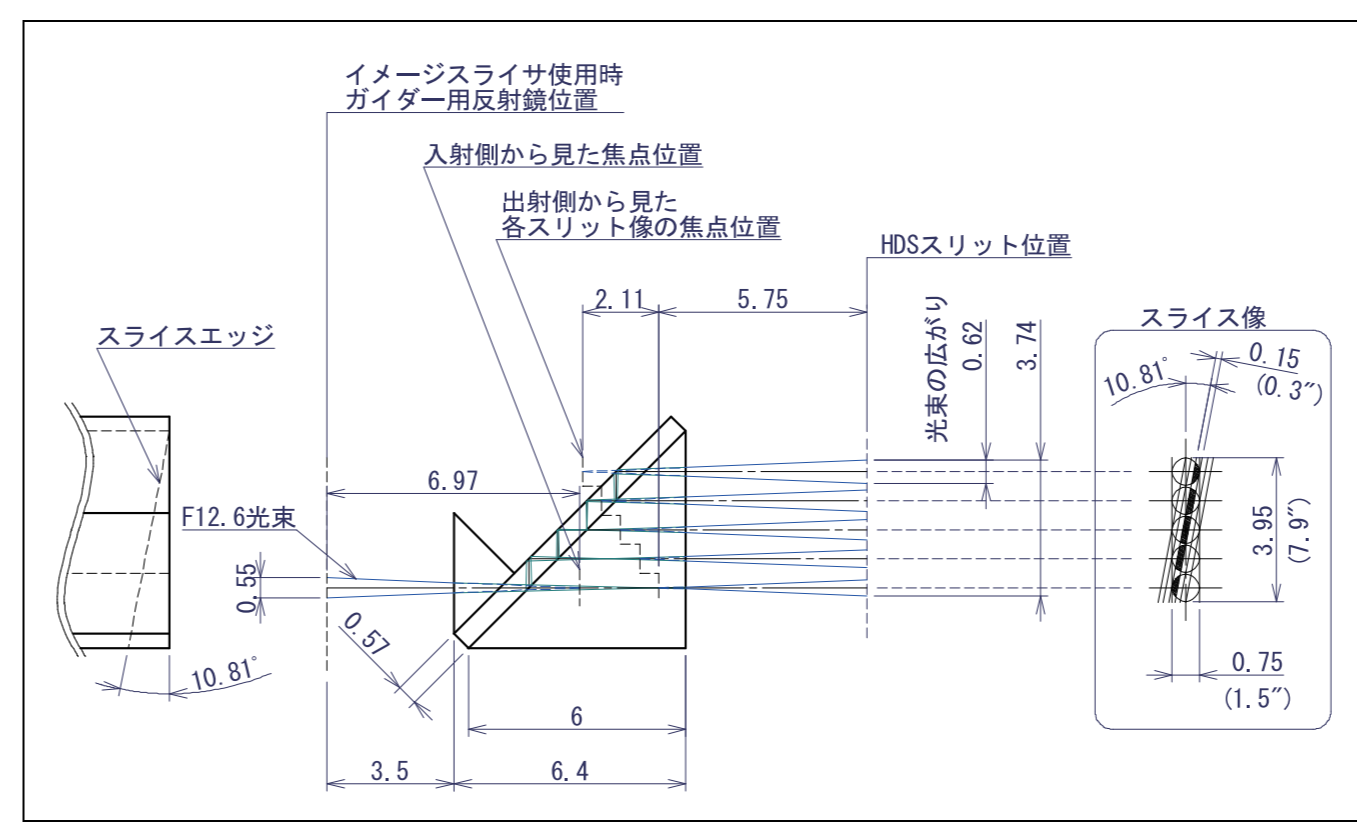


図 1-1 B.W.型イメージスライサの形状とスライス像

表 1 イメージスライサの主な仕様

項目	内容
1 対応装置	すばる望遠鏡 高分散分光装置 HDS
2 波長域	可視光領域 $\lambda = 400 \sim 700\text{nm}$ ($\lambda = 580\text{nm}$ に最適化)
3 方式	Bowen-Walraven 型 (B.W. 型)
4 スライスパターン	すばる望遠鏡ナミス焦点における $\phi 1.5''$ を $10.3''$ 幅で 5 分割スライスする
5 スライス素子材質	合成石英
6 AR コート	入射および射出面に $400 \sim 700\text{nm}$ に最適化した多層コート

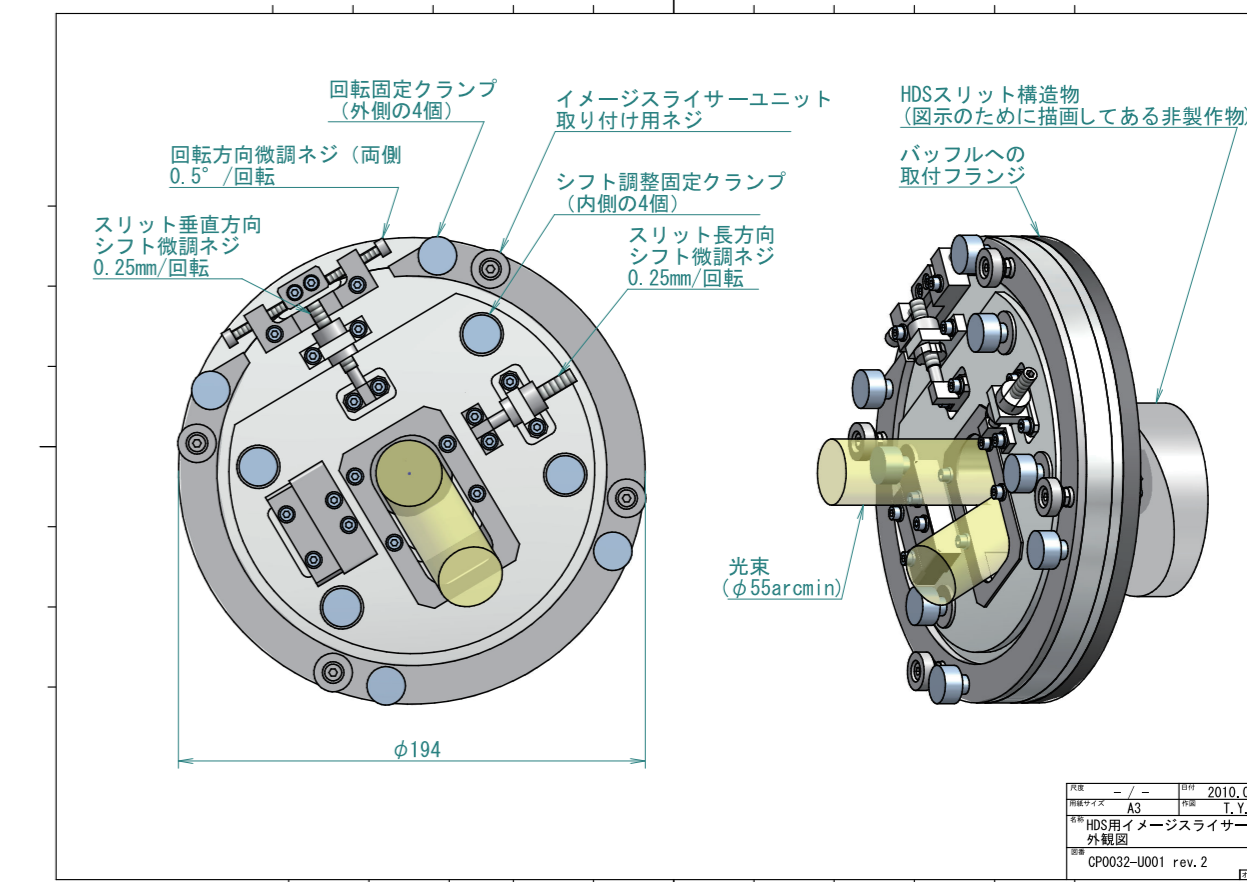


図 1-2 HDS用イメージスライサ外観図

HDS への搭載

HDS へのイメージスライサユニットの搭載は、望遠鏡ナミス焦点の HDS スリットユニットの前面（望遠鏡側）に 4 箇所（ネジ止め（手動）にて行っている）。

設置後にスリットユニット前に設置されている較正用光源を用いてスライサ素子位置の微調整を行い、スペクトルフォーマットが再現されることを確認した。スライサを用いることによる生じる分光器側からみた焦点位置のずれはコリメータの移動（ -7.3mm ）で対応した。その後、比較光源を用いて基本性能（波長分解能・透過効率）の測定を行った。

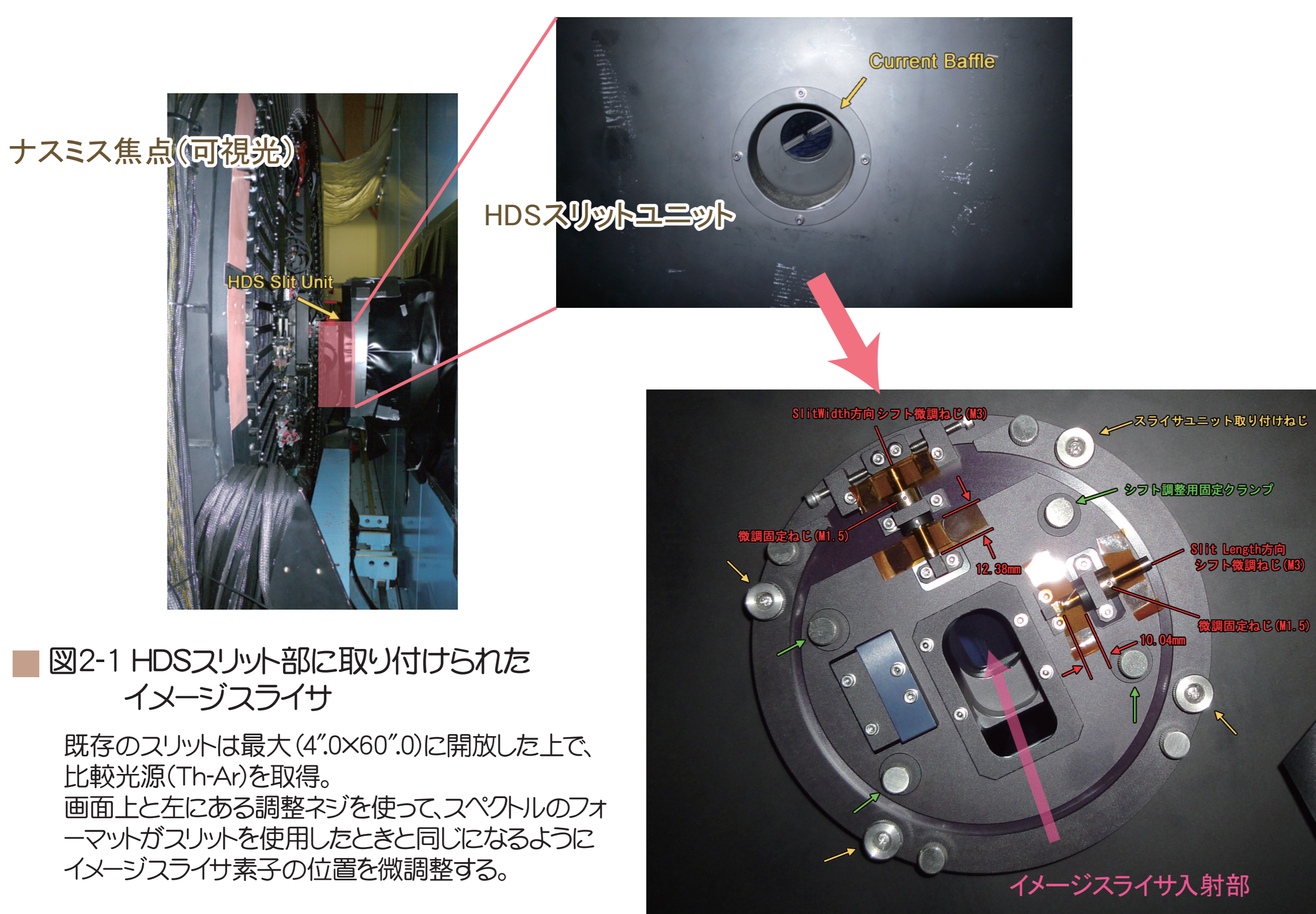


図 2-1 HDSスリット部に取り付けられたイメージスライサ

既存のスリットは最大 ($4'' \times 60'' \times 0$) に開放した上で、比較光源 (Th-Ar) を取得。画面上と左にある調整ネジを使って、スペクトルのフォーマットがスリットを使用したときと同じになるようにイメージスライサ素子の位置を微調整する。

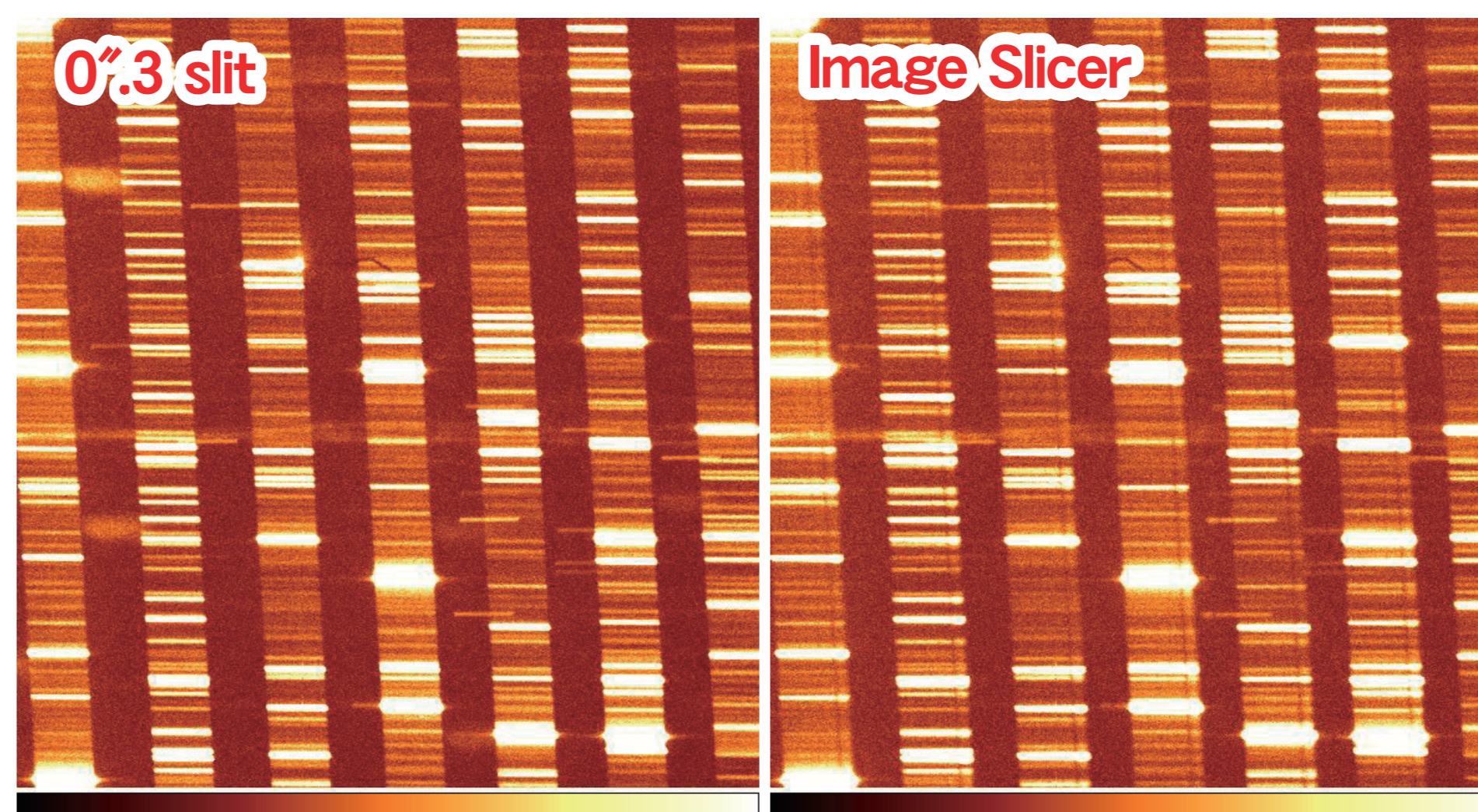


図 2-2 イメージスライサを用いて得られた波長較正用光源イメージ (右) スリット幅 $0''.3$ の場合 (左) に透色のないスペクトルイメージがとれている。イメージスライサ素子の位置調整 (図 2-1) によって、スペクトルフォーマットもスライサなしの場合をほぼ再現している。

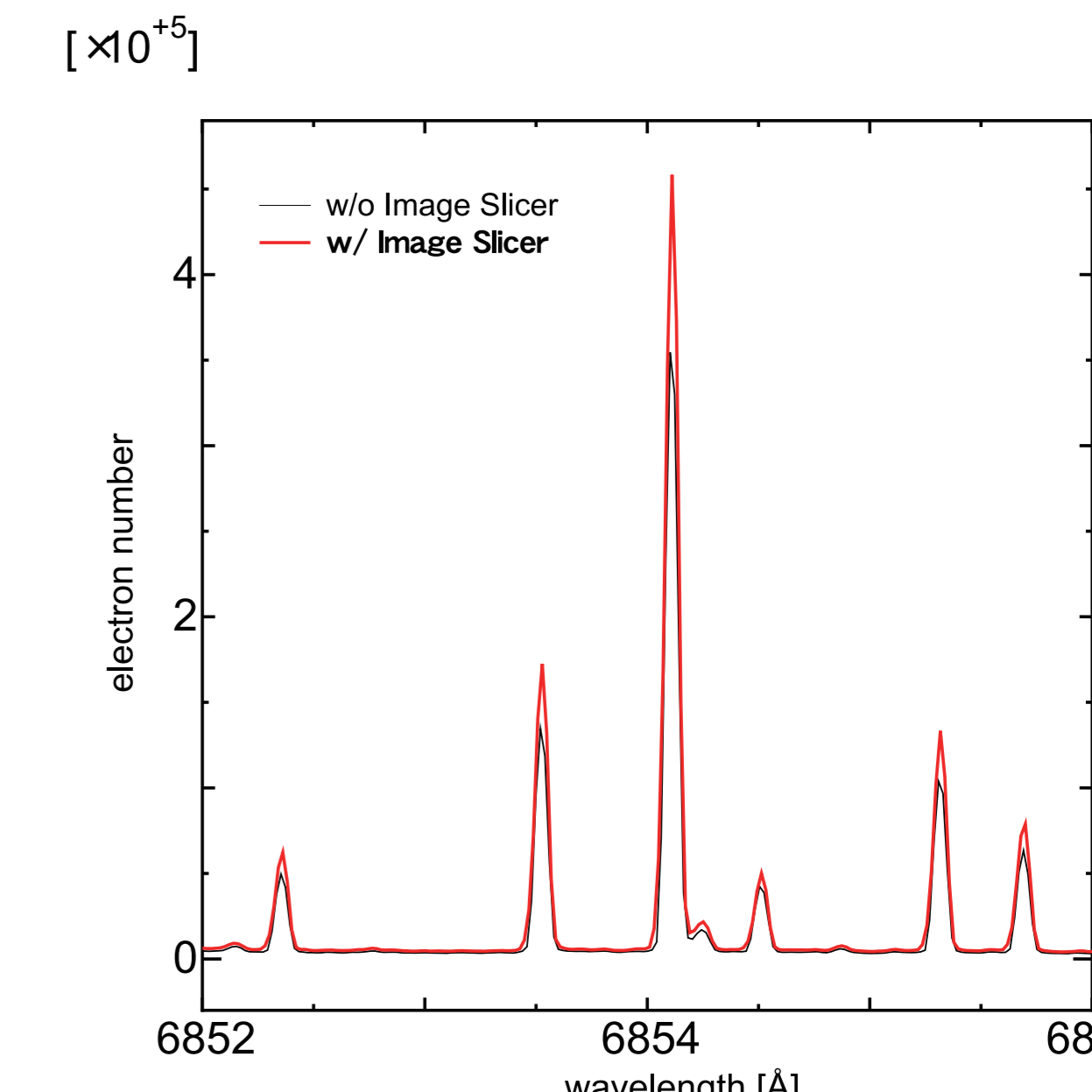
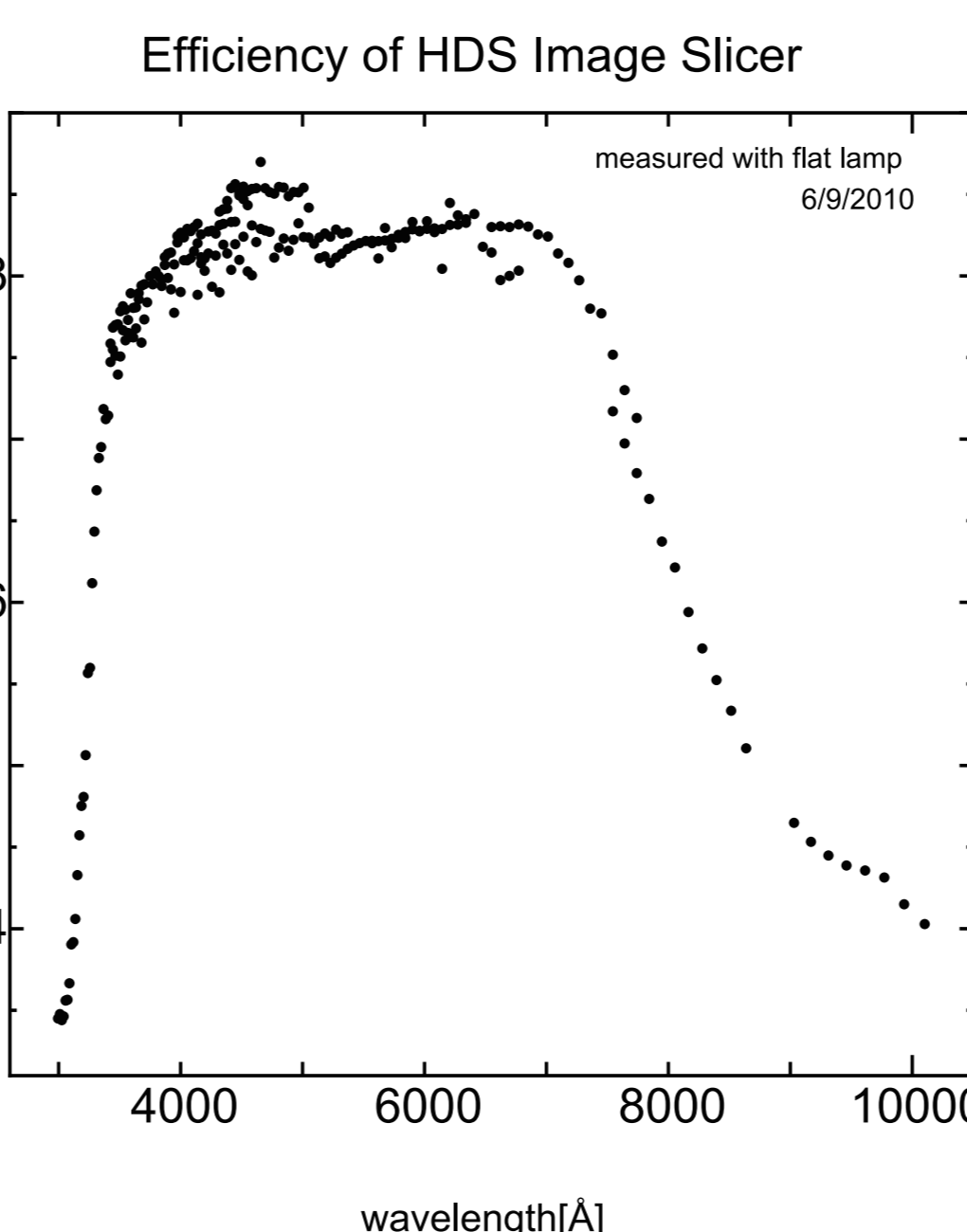


図 2-3 波長分解能とプロファイル
波長較正用光源 (Th-Ar) のスペクトルをイメージスライサ無し (スリット幅 $0''.3$) の場合 (図中央黒線) と比較し、スライサを用いた場合 (赤線) でもほぼ同等の波長分解能とプロファイルが確認された。波長分解能は 1.1 万弱で、スリット幅 $0''.3$ の場合に比べて約 5% 低くなっている。



- スペクトルフォーマットが再現できることを確認
- 波長分解能は約 11 万弱
- $4000 \sim 7000\text{\AA}$ の波長域で 80% 以上の透過効率を達成

図 2-4 イメージスライサの透過効率
フラット光を用いて、スライサあり・なしの場合のスペクトルのカウンタ値 (各エシエルオーダーの中央の値) を比較した。当初の設計どおり、 $4000 \sim 7000\text{\AA}$ で約 80% 以上の効率を達成していることを確認した。

試験観測

明るい星について試験観測を行い、イメージスライサを用いた場合と既存のスリット ($0''.3$ 幅) を用いた場合の比較を行った。

観測日時 (HST) : 6/30/2010 (2 hours) — ファーストライト / 天体導入・ガイドの確認
[Weather] Clear, [Seeing] $1''.24$ (on SV)
12/8/2010 (2 hours) — 望遠鏡側のフォーカス測定 / 効率測定
[Weather] Clear, [Seeing] $0''.68$ (on SV)

設定 : StdRa (観測波長 $510\text{--}631, 658\text{--}778\text{nm}$)

ADC を使用

- イメージスライサ無し (スリット幅 $0''.3$)
- イメージスライサ有り

観測天体 : ζ Oph ($m_V=2.58$) , ρ Oph ($m_V=4.63$) , HD146010 ($m_V=6.69$)
 σ Per ($m_V=3.86$) , ζ Per ($m_V=2.88$)

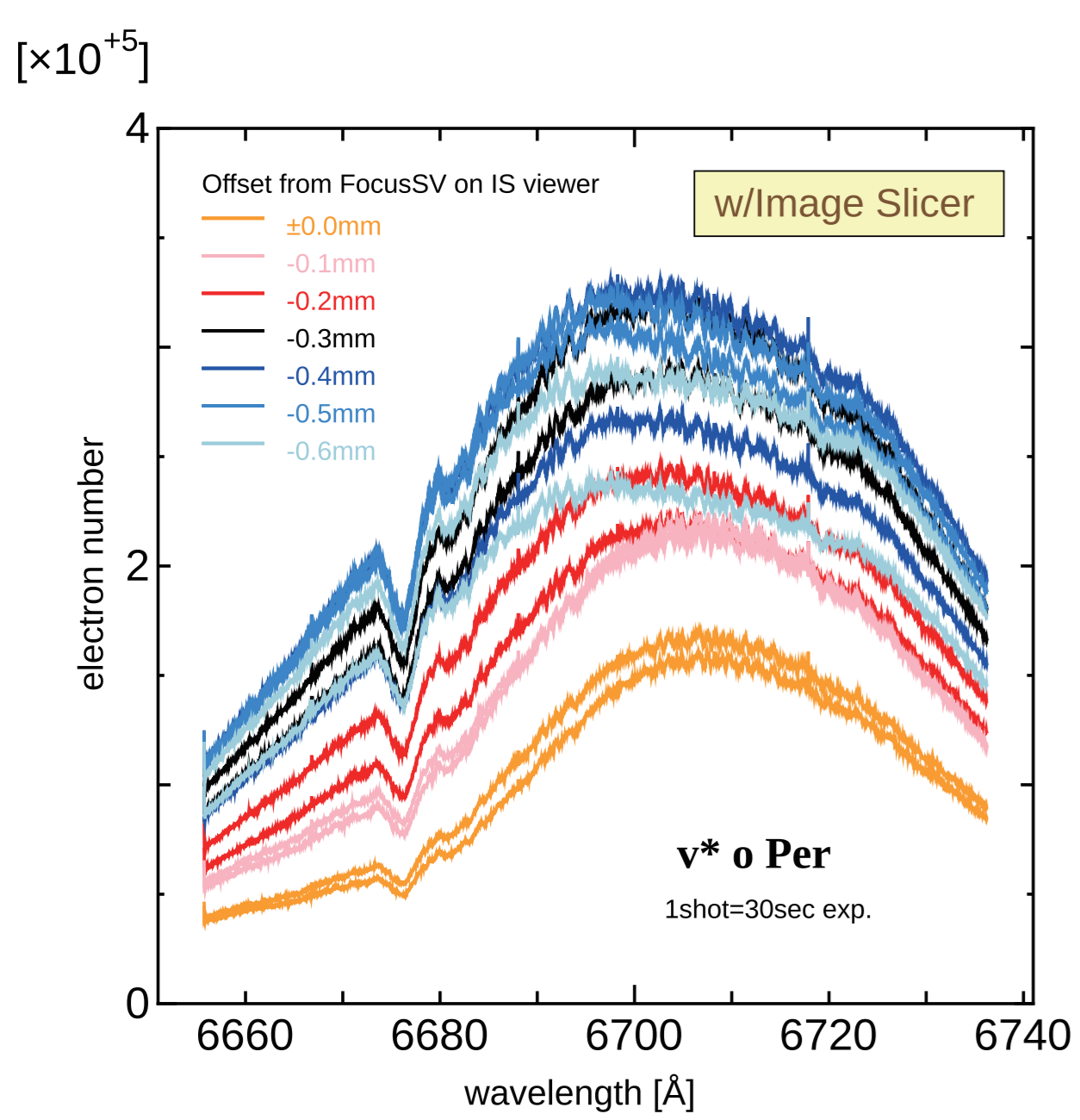


図 3-3 望遠鏡のフォーカスを変化させたときのスペクトル (イメージスライサ有り) の変化

イメージスライサを使用する場合は SV への反射鏡の位置が焦点面より前にずれるため、SV 画像からベストフォーカス位置を決定することができない。このため、望遠鏡の副鏡位置 (Z) を変化させながらカウンタが高くなる場所を調査した。このときのベストフォーカス位置はそれぞれ SV 上で
- スライサ無し : $Z = +0.0419\text{mm}$
- スライサ前面の反射鏡 : $Z = +0.6561\text{mm}$ であった。
スライサ有りのスペクトルのカウンタがもっとも高くなるのは、スライサ前面の反射鏡であつたフォーカス位置から $-0.4 \sim -0.5\text{mm}$ ずらした位置——したがって
- スライサ無しから $+0.15\text{mm}$
- スライサの反射鏡から -0.45mm 程度副鏡の Z をシフトさせた位置がイメージスライサのベストフォーカスになるといえる。

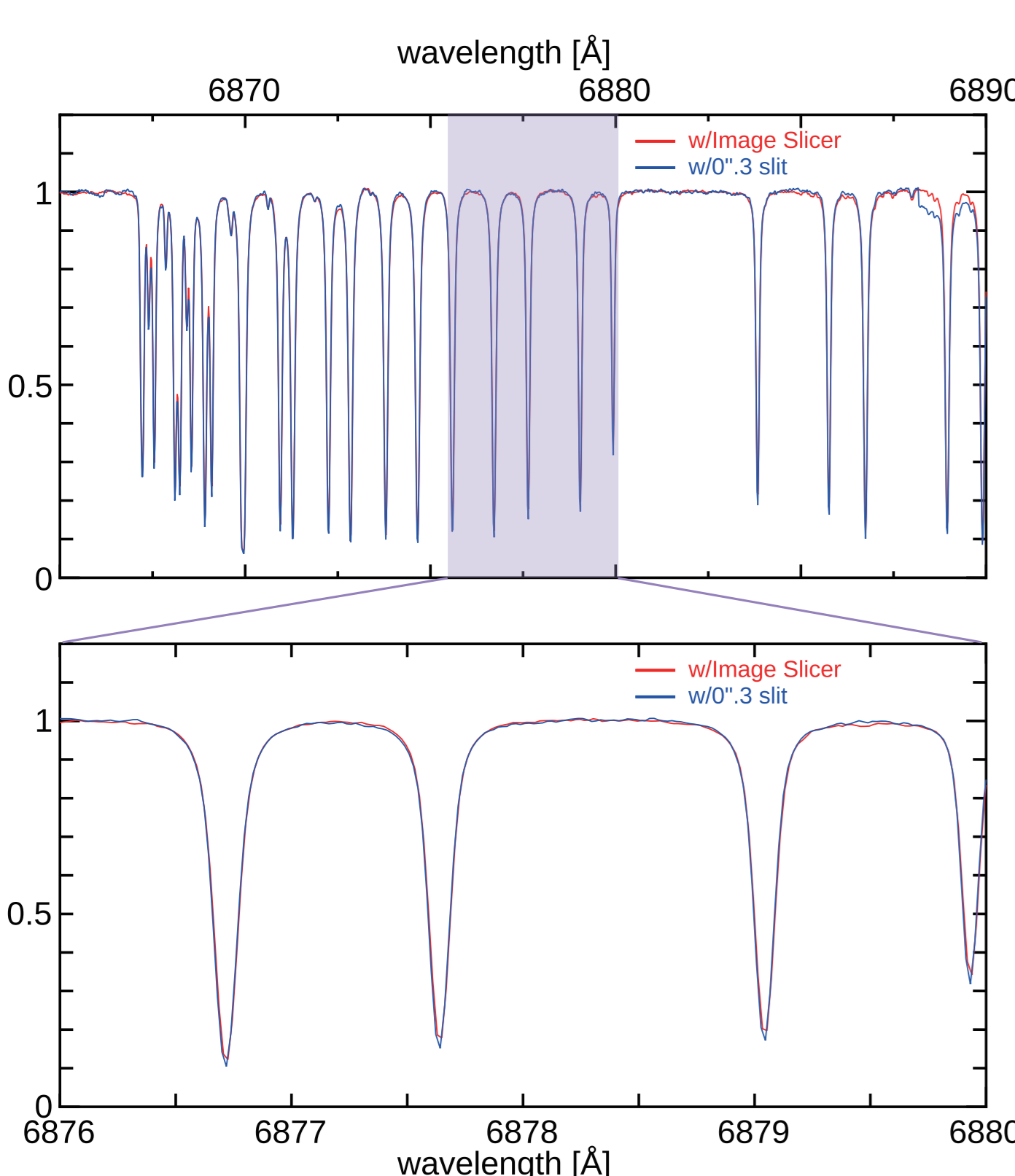


図 3-7 試験観測で得られた星のスペクトル

イメージスライサを用いて得られたスペクトルを従来のスリットでの観測と同じ手法にて IRAF 上で解析した。スライサのスペクトルは 5 本全体で約 $7''.9$ 相当の空間方向への広がりをもち、それを一括してアーチャーとして扱い一次元化しても特に問題はみられなかった。右図ではコンティニュームレベルを決定したスペクトルにおいて地球大気吸収線を比較しているが、イメージスライサを用いた場合とスリット ($0''.3$) を用いた両者のデータにおいて、スペクトル線幅・輪郭に顕著な違いは見られない。なお、コンティニュームレベルの決定には、解析による不定性がある。

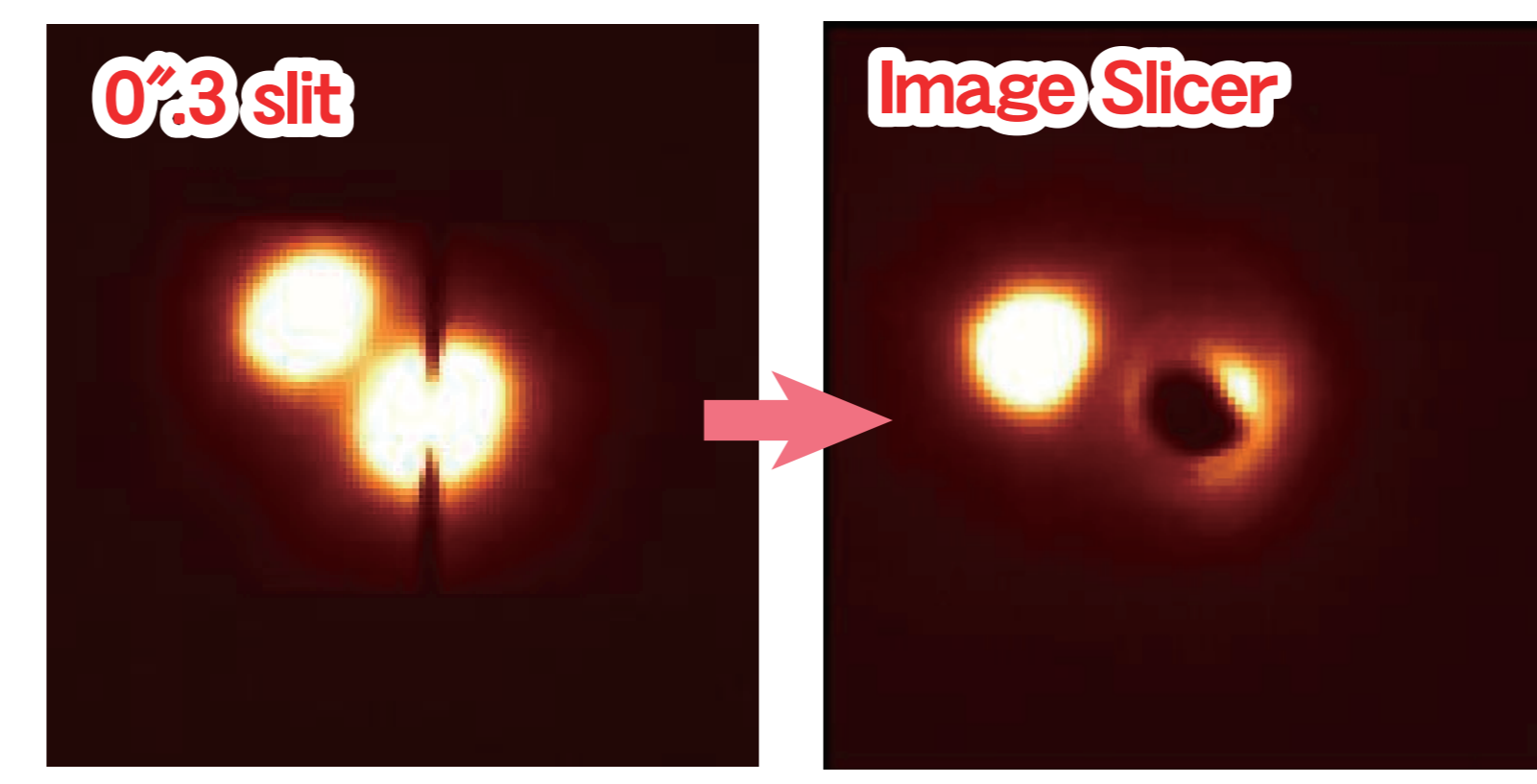


図 3-1 天体導入の様子 (スリットビュー [SV])

イメージスライサ (右) ではスライサ素子の前 (望遠鏡側) に反射鏡を置き、スリットを用いた場合 (左) と同様に SV にイメージを送って天体導入とガイドを行う。天体の光はピンホール (左図中央の黒い部分) を通して分光器に導入する。
ガイドはピンホール (スライサ無しの場合はスリット) の周囲の漏れ光を重心検出しておこなっている。ターゲットの左に見えるのは約 $3''$ 離れた天体の星で、これはガイドの重心計算の領域には入っていない。イメージスライサを使用する場合は、焦点面より前 ($\sim 7\text{mm}$, 図 1-1 参照) に反射鏡が置かれるため、SV 画像はややピンぼけになる (SV カメラには焦点調整機構がないため) が、明るい天体であれば導入・ガイド可能であることを確認した。

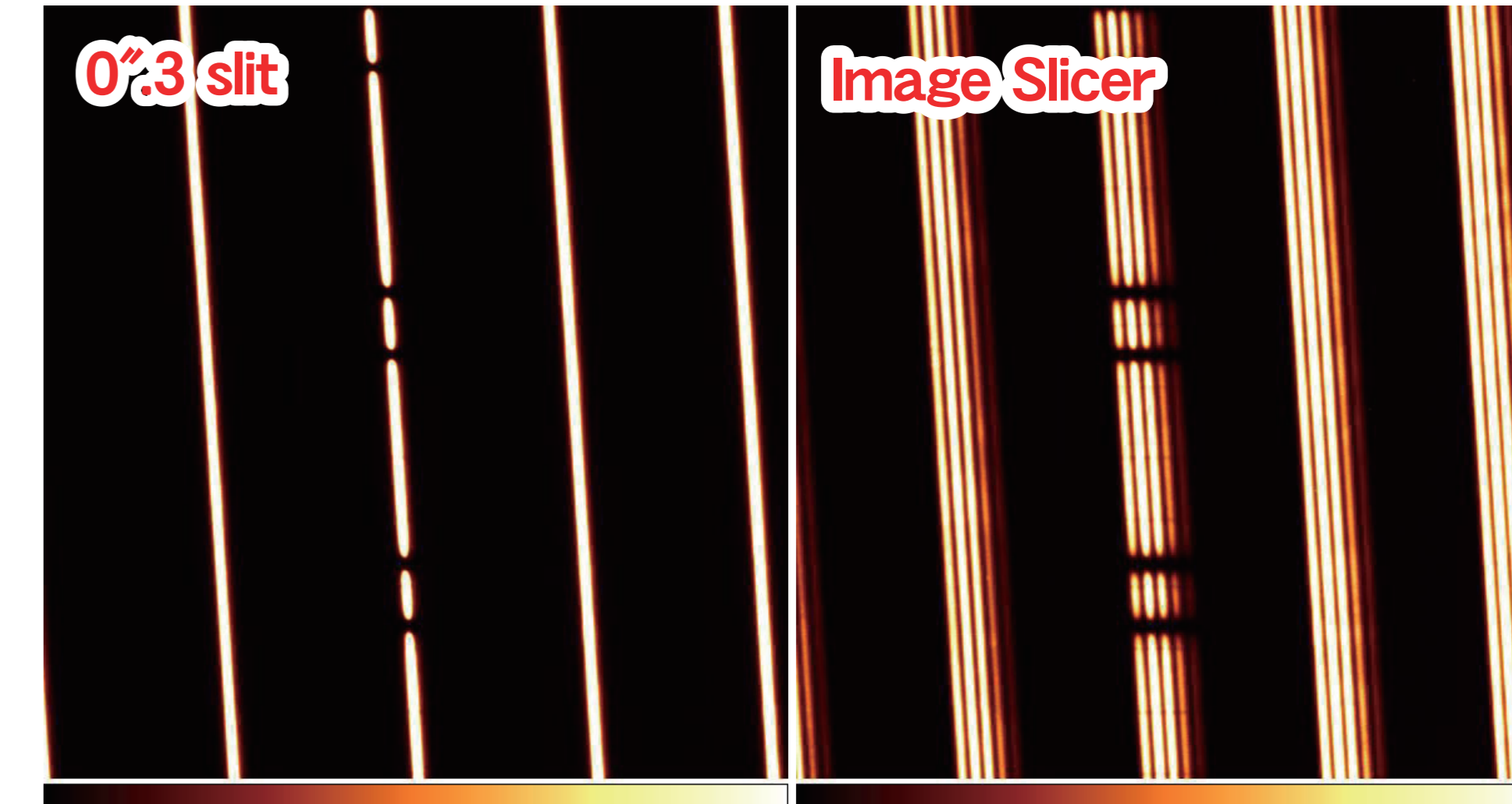


図 3-2 イメージスライサを用いて得られた天体スペクトルイメージ (右)

スライサを用いた場合は 5 本に分かれたスペクトルが得られる。スライサ自身の透過効率と、ガイドの影響により、各スペクトルのピーク自体はスリットを用いた場合 (左) に比べて低くなる。実際の IRAF 上でのデータ解析では、この 5 本のスペクトルはひとつの大きなアーチャーとしてまとめて一次元化し、それを解析することができる。本発表での解析はすべてこの手法で行った。

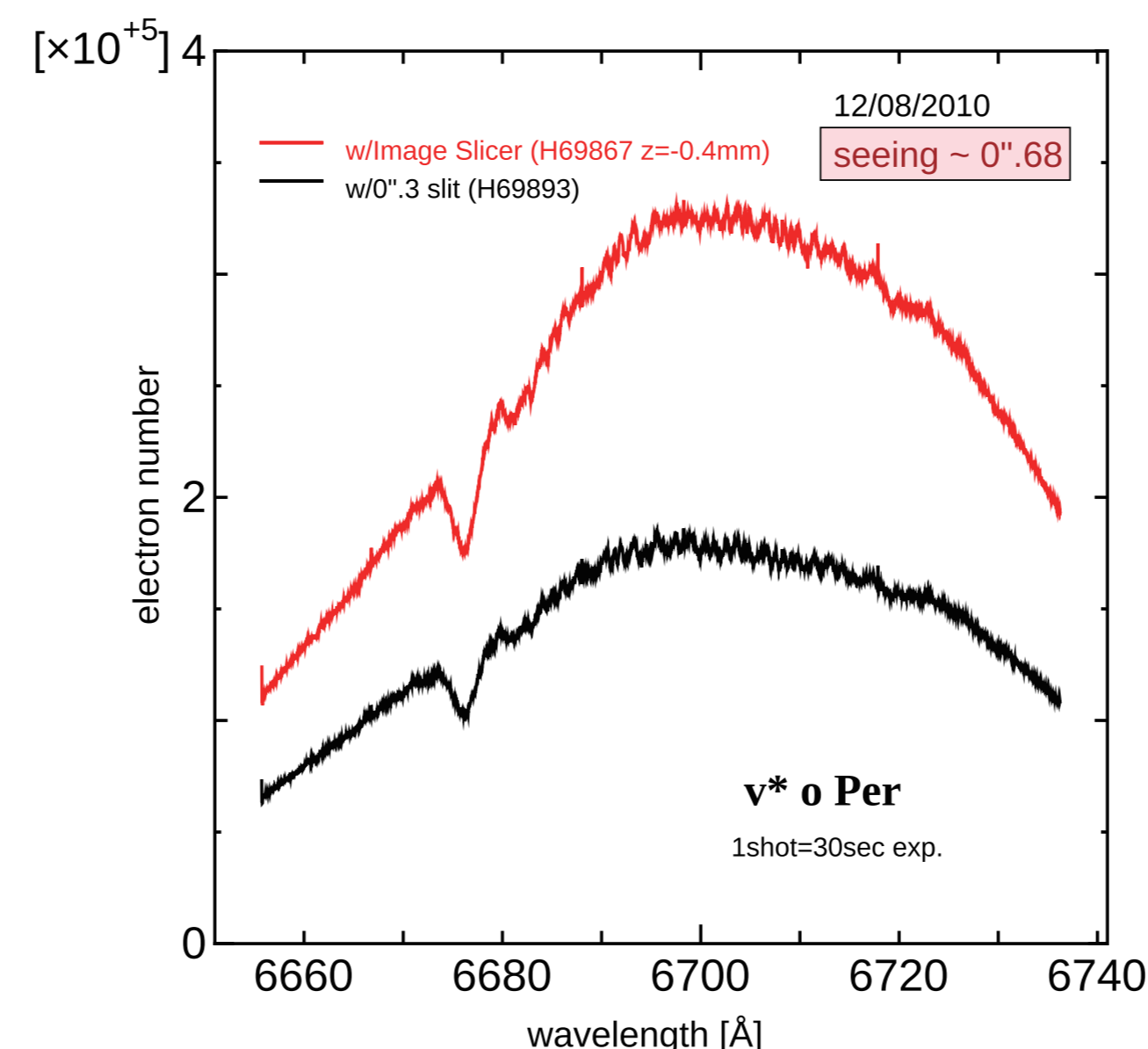


図 3-4 イメージスライサ (赤) と $0''.3$ スリット (黒) を用いた場合のスペクトルの比較

図 3-3 から推測したベストフォーカス位置でのスライサ有りのスペクトルと、同じ日に $0''.3$ スリットで得られたスペクトルを比較した (図はエシエルオーダーの 1 オーダーのみ)。スライサ有りのスペクトルは 5 本のスライスイメージ全体をひとつのアーチャーとしてまとめて一次元化したもの。イメージスライサを使用した場合に約 1.8 倍効率が増していることが確認された (シーイングは $0''.68$)。

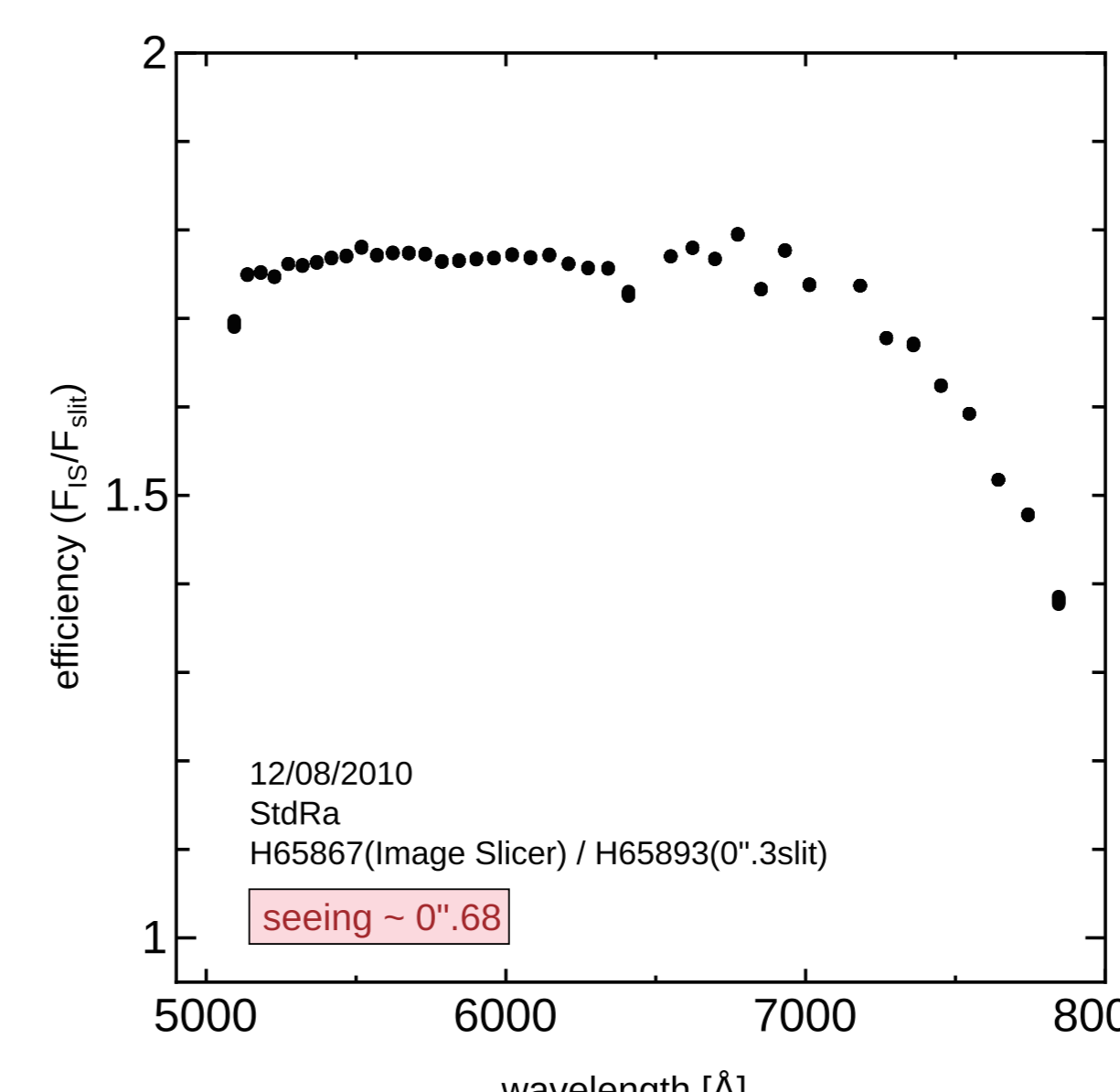


図 3-5 スリット ($0''.3$ 幅) と比較したスライサの観測効率

観測した波長域 (StdRa) 全域にわたって各エシエルオーダーの中心で測定。観測時のシーイングサイズは $0''.68$ であったが、この効率はシーイングで変化する。最適化された波長領域 ($< 7000\text{\AA}$) で 1.8 倍程度の効率を達成している。

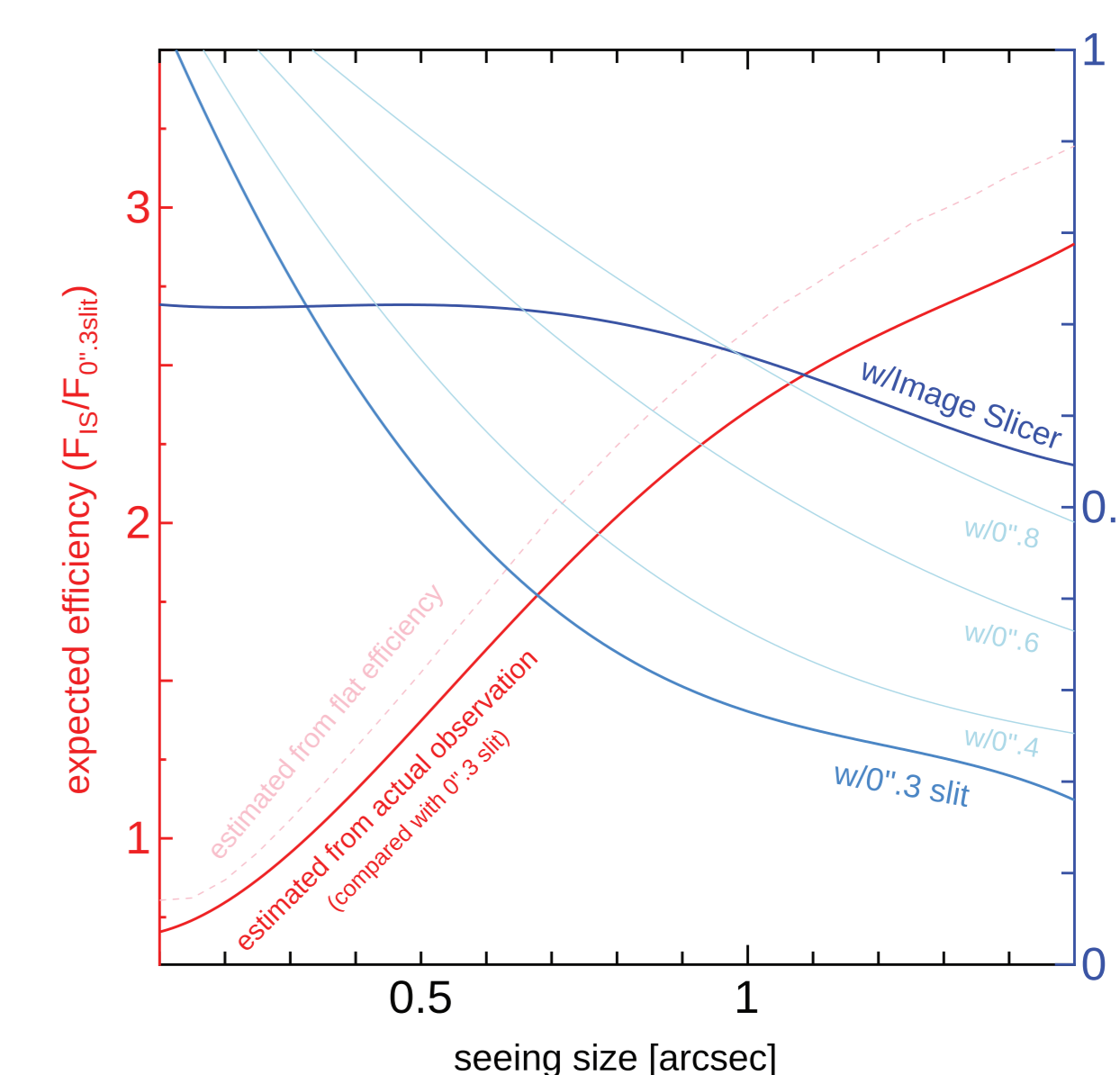


図 3-6 シーイングとイメージスライサの効率

最適化された $4000 \sim 7000\text{\AA}$ の波長領域において、スリット ($0''.3$ 幅) を用いた場合と比較したスライサの観測効率を得られた観測データから見積もった (赤)。フラット光源から求めた透過効率から予測される効率 (黒) よりも約 1 割の低下がみられるが、これはガイドのエラーなどによるものと考えられる。シーイングが $0''.3$ より大きくなると (マウナケアでは 100% と考えてよい) スライサを用いた方が観測効率が上回るようになる。また、シーイングの悪化による影響もスライサを用いることで非常に小さくすることができる。

- シーイング $\sim 0''.68$ の条件にて $0''.3$ スリットの観測と比較して約 1.8 倍の効率増加
⇒ ほぼすべてのシーイング条件下でスリットでの観測よりも効率の改善が見込まれる
- 波長分解能約 11 万を達成。プロファイルにも問題は見られなかった。
⇒ 各スライス像は一括してひとつのアーチャーとして解析可能
- スライサによる焦点の移動は望遠鏡側は副鏡 (+0.15mm)、分光器側はコリメータ (-7.3mm) の移動で対応
- スライス像は空間方向に約 $7''.9$ の広がりをもつため、波長設定には制限が生じる
⇒ オーダー間の重なりを排除するためには、赤設定では $> 5000\text{\AA}$ (\sim StdRa)、青設定では $> 4000\text{\AA}$ (\sim StdYa) が目安
- スライサを使用する場合はややピンボケの SV 画像で導入・ガイドをすることになる
⇒ 暗い天体に対応する場合は AG でのガイド (イメージローテータ無しでは安定性に問題) もしくは SV の改修が必要
⇒ イメージローテータ・AG でのオフセットガイドと組み合わせれば空間を分解する "スリットスキャン" 的な使用も可能?
- スライサの搭載は人の手で行っているため夜間の取り付け・外しは観測時間のロスを招く
⇒ もし共同利用に供する場合は、効率的な運用手順を確立する必要がある
- 2010 年 6 月および 12 月の試験の間では取り付け・外しによるフォーマットの変化等は見られなかった