

## 次世代を見据えたイメージスライサー型近赤外面分光ユニットの開発

北川 祐太郎 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学教育研究センター)

### Abstract

近年、可視赤外天文学において面分光 (Integral Field Spectroscopy) と呼ばれる観測手法が急速に発展している。面分光とは一言で表すなら、「視野内の空間情報を保持したまま、その波長情報も同時に取得できる」観測手法と呼ぶことができ、3次元 ( $X, Y, \lambda$ ) のデータキューブから銀河内部の力学状態や物理量を空間分解して調べることが可能になる。

本集録ではまず、面分光とは何か? という基本事項から話をはじめ (Section I)。現在、世界で稼働している面分光装置の光学系 (Integral Field Unit: IFU) は3つの方式に大別することができ、波長やサイエンス目標に応じて適切な方式が採用される (Section II)。こうした IFU は銀河の形成進化機構に切り込む強力な観測的知見を与えてくれるが、特に近年はダストに埋もれた星形成領域の物理状態や、 $z > 1$  の遠方銀河の研究のための近赤外面分光装置の需要が高まっている。そこで筆者が現在開発を進めているのが、イメージスライサー型近赤外面分光ユニット SWIMS-IFU である (Section III)。SWIMS-IFU は他の近赤外面分光装置と比べて広視野 ( $140 - 220 \text{ arcsec}^2$ )、かつ  $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$  にわたる広波長帯の面分光データを一度に取得できるという特徴を有している。最後に SWIMS-IFU の完成に向けた技術的な課題とそれを克服する超精密加工技術に加え、次世代装置開発へ応用の可能性についても述べる (Section IV)。

## I 面分光観測とは

我々が天体に望遠鏡を向けて観測するとき、天体からやってくる信号には一般に多次元の情報が含まれている。すなわち、光子の輻射源の位置 ( $X, Y$ )、波長 ( $\lambda$ )、偏光 ( $\vec{P}$ )、あるいはそれらの時間変動 ( $\Delta t$ ) である。一方、可視赤外天文学ではこれら情報を CCD や半導体検出器などの2次元検出器で受けとめることになり、その際に多次元情報を2次元の検出器上にどう展開するか? という問題が発生する。そこで上記の情報の中から取捨選択をする必要があるが、我々が通常もちいている撮像、スリット分光観測はそれぞれ、 $X$  vs  $Y$ 、あるいは  $X$  vs  $\lambda$  という2次元情報を取得することに対応している。

一方、すばる望遠鏡のような大口径望遠鏡では一晩あたりの観測効率も重要な観点となる。銀河のような広がった天体全体のスリットスキャン観測は多大な時間が掛かるため、位置、波長情報を組み合わせた3次元 ( $X, Y, \lambda$ ) データの「同時」取得ができれば強力な観測手法になることは想像に難くない。では我々はどうすれば広がった天体の撮像をおこないつつ、同時に各領域の分光を行うことが可能になる

のだろうか? その答え (のひとつ) が面分光 (Integral Field Spectroscopy) である。

すでに述べたように通常、検出器上に一度に展開できるのは2次元情報となるが、次章で紹介する面分光ユニット (Integral Field Unit: IFU) と呼ばれる光学系を用いることで、空間情報を保持したまま各領域のスペクトル情報の取得が可能になる。面分光観測では天体内部の力学 (速度場、分散場) や物理量 (e.g. 星形成率、電離状態、金属量 etc) の空間構造を直接議論できるため、銀河の形成進化機構を解明する上で強力な観測手法となっている<sup>[1]</sup>。

## II Integral Field Unit

面分光を実現するために用いられる光学系は面分光ユニット (IFU) と呼ばれ、図1に示す3つの光学系に大別することができる<sup>[2]</sup>。ここではそれぞれを、(1) マイクロレンズアレイ型、(2) ファイバー束型、(3) イメージスライサー型と呼び、各々の概略を以下で説明する。なお実際の装置では望遠鏡焦点画像の拡大/縮小を行う前置光学系がつく場合が多い。

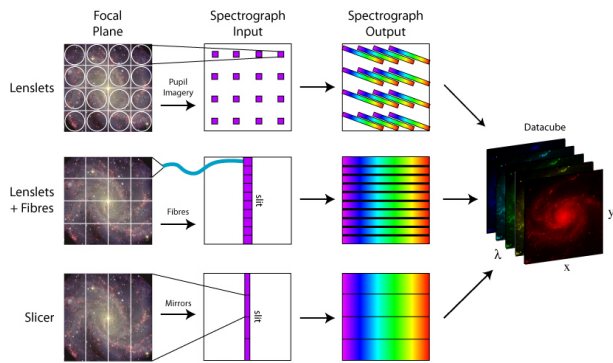


図 1: IFU に用いられる 3 つの光学系の概念図。図は [3] を元に M. Westmoquette 氏が作製したものを引用。いずれも 1 回の露出で 3 次元  $(x, y, \lambda)$  のデータキューブが得られる。

(1) **マイクロレンズアレイ型** 1 辺が  $\sim 1$  mm のマイクロレンズを焦点面像位置に 2 次元状に敷き詰めることで視野を小区間に分割し、スペクトルが重ならないような隙間があいた小さな瞳像群をつくりだす。これを分光器へのインプットとすることで各空間要素のスペクトルを取得する。この方式の長所としては、マイクロレンズは様々な分野で使用され他方式と比べて比較的成熟した技術であること、また光学系はレンズの集合であり設計や開発が容易という点を挙げることができる。短所としてはスペクトルを互いに重ならないように展開するため、検出器面上での波長方向の長さが制限されること、そして検出器受光面の利用率が他方式と比べ低くなることである。装置の例としては、WHT/SAURON<sup>[4]</sup>、Keck/OSIRIS<sup>[5]</sup> などがある。

(2) **ファイバー束型** この方式では光学ファイバーを (1) と同じように焦点面にアレイ状に敷き詰め、ファイバーを曲げることで 2 次元視野を 1 次元のロングスリット状に配置し直す。分光器へのインプットは通常のスリット分光と同様になり、データ解析が (1) と比べて簡便になる。またファイバーの柔軟性由来した装置レイアウトの自由度の高さも利点のひとつである。一方で各ファイバーは有限の厚み(クラッド)をもっているため空間サンプリングは離散的になってしまう。視野の充填率はファイバーのコア/クラッド比で決まるが、クラッド厚を薄くし過ぎると光の漏れだし(クロストーク)が起こるため経験的

に  $10\lambda$  程度の厚みが必要とされている。典型的なコア径を  $50\text{--}100\mu\text{m}$  とすれば、充填率は 63–75% である。他に focal ratio degradation (FRD) というファイバーからの射出光が入射光の F 値より小さくなるという問題もあるが、こちらは前述のマイクロレンズと組み合わせて使用することである程度解決される。このマイクロレンズ+ファイバー方式もよく用いられているが、レンズによる収差の影響もあるため、レンズを用いずにファイバー同士を圧着し充填率をあげる (densepak type) という方法もある。ファイバーを用いた IFU としては Gemini/GMOS-IFU<sup>[6]</sup>、HJST/VIRUS-P<sup>[7]</sup> などがある。

(3) **イメージスライサー型** この方式の概念図を図 2 に示した。スライスミラーと呼ばれるミラーアレイによって望遠鏡焦点面像は小スリット像に分割され、それぞれ異なる方向へと反射される。後段の瞳ミラーがこれを 1 次元ロングスリット状に並び替え、さらにスリットミラーによって分光器へ射出されていく。この方式の利点は視野を連続的に分割するため空間情報が失われない点であり、検出器受光面の利用率は 3 方式の中で最も高いものになる。また全ての光学素子を支持構造と同じ金属のミラーで構成できるので、光学系全体の冷却が必要な赤外域の観測装置に向いている。そしてアレイの一体加工はアライメントの手間を著しく軽減する利点もある。短所としては複雑な形状をもったミラーアレイの設計とその加工である。筆者が開発している SWIMS-IFU を含め、多くの近赤外 IFU は本方式を採用している。例

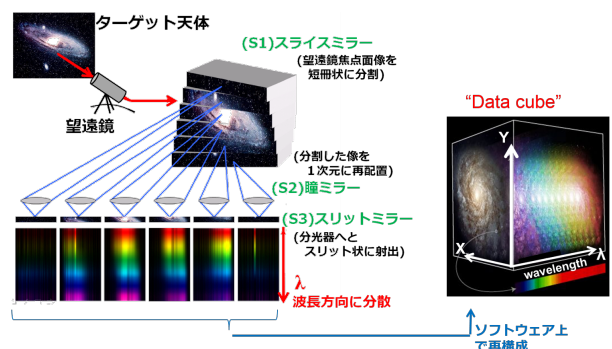


図 2: イメージスライサー型面分光の概念図 [8]。図中の脚注は筆者によるもの。

としては VL/SINFONI<sup>[9]</sup>、Gemini/NIFS<sup>[10]</sup> などがあ

### III SWIMS-IFU

冒頭で述べた近赤外面分光装置開発への需要に対して、開発期間の長期化やコストの観点から中-大型望遠鏡の装置開発を一から立ち上げることは決して容易ではない。そこで本研究では既に完成している多天体分光装置を利用し、そこに面分光モードを新たに付加するというアイデアを採用した<sup>[11][12]</sup>。これは多天体分光用スリットマスクと同じように取り扱える IFU モジュールを開発し、他の光学系(分光系、フィルター)や機械構造(真空冷却デューワー)は既存の装置のものと共有することで上記の問題を解決するというコンセプトである(図 3)。

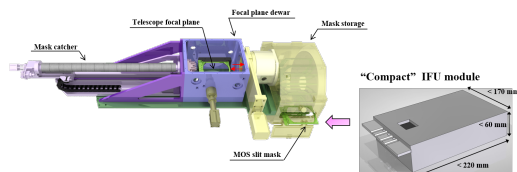


図 3: SWIMS のマスク交換機構ユニットと IFU。

ホスト装置となる多天体分光装置は現在、東京大学天文学教育研究センターが開発を行っている TAO 6.5m 望遠鏡の第 1 期装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-eld Infrared Multi-object Spectrograph) を用いる<sup>[13]</sup>。SWIMS はすばる望遠鏡にも取り付けることが可能であり、両望遠鏡で観測した場合の面分光スペックを表 1 に載せた。SWIMS 本来の撮像・多天体分光モードに加えて、真空・冷却を破らずリモートで面分光モードへと移行することが可能になる上、海外の近赤外 IFU と比べて広視野(140 – 220 arcsec<sup>2</sup>)かつ広波長帯(0.9 – 2.5  $\mu\text{m}$ )の面分光データを一度に取得できるという特徴を有している。

上記のコンセプトを実現するためにはスリットマスクと同程度の非常にコンパクトかつ軽量の IFU を設計する必要がある。実験と計算から IFU のサイズに対する制限は <math>\le 170\text{ mm} \times 220\text{ mm} \times 60\text{ mm}</math>、総重量は <math>\le 900\text{ g}</math> と算出した。IFU はイメージラ

表 1: SWIMS-IFU のスペック表。すばる望遠鏡と TAO の 6.5m 望遠鏡の違いは検出器の pixel scale であり、IFU 自体は同じものとして計算されている。

	Subaru 8.2m	TAO 6.5m
観測モード	"Two-color" Integral Field Spectroscopy	
波長	0.9–1.4 $\mu\text{m}$ (Blue arm) and 1.4–2.5 $\mu\text{m}$ (Red arm)	
波長分解能	Blue: $\lambda/\Delta\lambda \sim 1000 - 1500$ ; Red: $\lambda/\Delta\lambda \sim 800 - 1400$	
視野	14" $\times$ 5."2 (14" $\times$ 10."4 <sup>a</sup> )	17."2 $\times$ 12."8
スライス数	13 (26 <sup>a</sup> )	26
スライス幅	0."4	0."5
IFU スループット	> 85 % <sup>b</sup> at $\lambda = 1\ \mu\text{m}$	
入射 & 射出 F	12.2	

<sup>a</sup> 検出器 (HAWAII-2RG) を各 arm に 4 台置いた場合。

<sup>b</sup> 全てのミラーの表面粗さを 5 nm RMS と仮定したときの値。

イサー方式を採用し、まずはサイズ制限を近軸計算に対する束縛条件として与え、そのような光学レイアウトが存在するかどうか計算を行った。その結果、あるパラメータ範囲で束縛条件を満たす光学解が存在することを見出した。そしてその近軸解に基づき、光線追跡シミュレーションを行った(図 4 上)。各ミラーを最適化したあとの最終的なレイアウトでは 150 mm  $\times$  185 mm  $\times$  50 mm となりサイズ制限を満たすレイアウトが実現できた(図 4 下)。光学素子数を減らしつつコンパクトな空間に収めるべし、という仕様は収差を大きくする方向に働くが、スポットダイアグラムを評価した結果、検出器上の最も悪化したスポットで  $\sim 0."3$  と、seeing-limited 観測のもつで問題ない光学性能であることを実証した<sup>[14]</sup>。

### IV 技術課題と今後の展望

SWIMS-IFU の光学設計が完了し、本研究は次の段階であるミラーアレイの製作に着手している。ミラーアレイ製作の方法は 2 通り考えられ、(i) ガラス研磨で個別の反射面を製作、(ii) 金属切削による一体加工が挙げられる。すでに述べたように近赤外装置の光学系は冷却下に置かれるという観点から、支持構造と同じ金属(e.g. アルミ合金)でミラーを製作できる(ii)が望ましい。しかし、複雑な形状をもつミラーアレイを近赤外域での要求精度(表面粗さ <math>< 10\text{ nm}</math>、形状誤差 <math>< 100\text{ nm P-V}</math>)で一体加工することはチャレンジングな課題となっている。一方、この困難を解決すべく現在着目しているのが近年発展著し

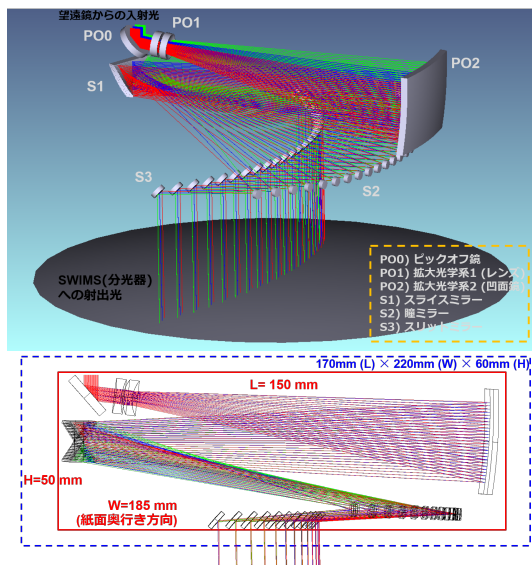


図 4: (上) 光線追跡シミュレーションの結果得られた SWIMS-IFU の最終光学レイアウト。(下) SWIMS-IFU の占める体積。青線は多天体マスク交換ユニットに収納するための上限を表している。

い超精密加工技術による金属切削加工である。これは厳密に温度管理された環境下 ( $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ ) において 1 nm オーダでダイヤモンド工具の動きを制御することにより、刃先の軌跡を加工対象に精確に転写する技術である。すでにこの加工技術を用いた 3 反射面をもつ試作スライスマラーの評価を行っており、上記仕様に近い値が得られることを確認している。今後はこれを 26 反射面に拡張し、上記精度を達成すべく加工条件等を洗い出していく予定である。近赤外域でのイメージスライサー型 IFU はその需要に対して装置実績が国内にまだなく、ミラーアレイの一体加工技術など重要な開発項目は多分に残されていると考えられる。

最後に、SWIMS-IFU で蓄積される要素技術の応用の可能性について述べておく。現在、面分光装置の開発は多天体化という新しい局面をむかえつつある。すでに KMOS/VLT が稼働しており、TMT の第二期装置提案にある IRMOS でも多天体面分光が仕様に含まれている。本研究の光学設計はコンパクトな空間でイメージスライサー型面分光を実現することから、このような多天体 IFU においても有用であると期待される。また「モジュール化されたコンパクト IFU」というコンセプトは、SWIMS-IFU を複

製 (+微調整) することで既存の多天体分光装置 (e.g. MOIRCS/Subaru) に短期間・省コストで面分光モードを付加できるという特徴を有する。

筆者は既存の多天体分光装置を利用することで、将来有用な要素技術を蓄積しつつ近赤外 IFU を短期間で実現することを目標として研究を進めてきた。今後、SWIMS は 2015 年度中にハワイに輸送され、すばる望遠鏡での初期科学観測を予定している。自ら開発した IFU で銀河がどのような進化を辿ってきたのか、その謎を解き明かせる日を楽しみにしている。

## 謝辞

本集録は筆者の修士過程での研究をもとに書かれたものである。指導教員の本原顕太郎准教授と SWIMS チーム (東京大学)、共同研究者である尾崎忍夫氏 (国立天文台 TMT 推進室) には一貫して有益なコメントを頂いてきた。簡単ではあるがここに謝意を述べたい。なお本研究の一部は JSPS 特別研究員奨励費 266780 の助成を受けて行われた。

## Reference

- [1] Förster Schreiber, et al. 2009. ApJ. 706:1364
- [2] Allington-Smith J, 2006. NAR. 50:244
- [3] Allington-Smith J, and Content R, 1998. PASP 110:1216
- [4] de Zeeuw, et al. 2000. The Newsletter of the Isaac Newton Group of Telescopes 2:11
- [5] Larkin J, et al. 2003. Proc. SPIE 4841
- [6] Allington-Smith J, et al. 2002. PASP. 114:892
- [7] Hill G, et al. 2008. Proc. SPIE 7014
- [8] Vives S, et al. 2008. Proc. SPIE 7018
- [9] Eisenhauer F, et al. 2003. Proc. SPIE 4841
- [10] McGregor J., et al. 2003. Proc. SPIE 4841
- [11] Dubbeldam M, 2006. NAR 50:342
- [12] Ozaki S, et al. 2012. Proc. SPIE 8450
- [13] Konishi M, et al. 2012. Proc. SPIE 8446
- [14] Kitagawa Y, et al. 2014. Proc. SPIE 9151