

重力波源候補天体の即時分光フォローアップ 観測用可視光面分光装置の開発と観測



松林和也*・太田耕司

〈京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: kazuya@kusastro.kyoto-u.ac.jp; ohta@kusastro.kyoto-u.ac.jp

重力波の直接検出により、重力波天文学の幕開けとなった。これからの重力波天文学の発展には、可視光即時分光フォローアップ観測が大いに役立つと考えられる。われわれは即時分光観測を行うために、ファイバー型面分光ユニットを開発し、国立天文台 岡山天体物理観測所の可視光分光撮像装置 KOOLS と接続した装置 KOOLS-IFU を開発した。ファイバー型面分光装置を使うと、観測装置の切り替えが容易になり、また重力波源の可視光対応天体候補の位置や天体導入の精度が多少悪くてもよいため、素早くフォローアップ分光観測が可能となる。本稿では KOOLS-IFU の概要、2015-2016年に岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡に接続して行った観測、そして今後の KOOLS-IFU アップグレード計画について紹介する。

1. はじめに

2015年9月14日、ついに重力波が直接検出され¹⁾、つづいて12月26日にも検出された²⁾。重力波天文学の幕開けである。これらの重力波源はブラックホールとブラックホールの連星(BHBH)であったが、中性子星の連星(NSNS)や中性子星とブラックホールの連星(NSBH)の合体も有力候補であり、今後の検出が期待される。重力波源の解明のために電磁波多波長観測やニュートリノ観測が計画されているが、われわれは可視光分光観測を行い、その距離、物理状態、含まれる元素等を明らかにすることで重力波源に迫ることを目指している。

NSNSやNSBHが合体するとジェットが形成され、これをその軸方向から見るとショートガンマ線バースト(以下SGRB)として観測されることが考えられている³⁾。つまりSGRBは重力波源の電磁

波対応天体の有力候補である。SGRBはその発生直後からX線や可視光の残光を伴うことがあるが、この成分は急速に暗くなっていく。一方、数日後にはキロノバ(あるいはマクロノバ)と呼ばれる成分が見えてくるといふ理論的予測がある^{4),5)}。SGRBの一つであるGRB 130603Bではこの予測にあるような光度曲線が得られ、この説の信憑性が高まっている⁶⁾。重力波天体の可視対応天体の探査は、このキロノバを検出することを目標としている場合が多い。しかし、キロノバ成分は残光よりずっと暗く、大望遠鏡でないとその観測は困難である。

GRBは出現後すぐ(約1秒以内)に検出報告(アラート)が出されるが、重力波検出のアラートは現状では必ずしも即時とは限らない。そこで、われわれは重力波検出のアラートを待つことなく、とにかくSGRBが出現すれば、できるだけ早くその残光を分光するという作戦をとることに

* 現在の所属：国立天文台 岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口市鴨方町本庄 3037-5

した。SGRB自身にもまだ謎は多く、例えば距離がきちんと測られた例（残光のスペクトルに見られる吸収線から測定した例）でさえ、極めて希である。通常は、見かけ上で残光の近くにある銀河の距離をその推定値としているが、どの程度を適切な「近く」と考えるかによって母銀河が変わり、距離に大きな不定性がある³⁾。したがって、即時分光観測は、重力波源の解明だけでなく、SGRB自身の研究にも重要である。GRB発生後数分以内に開始する残光の即時「撮像」観測は、中小口径望遠鏡を中心に活発に行われてきているが、即時「分光」観測は極めて珍しい。小口径望遠鏡では光量が足りず、中大口径望遠鏡では即時装置交換によって分光器に切り替えることが通常は困難であるからである。即時分光観測が可能な体制が整えば、重力波源の可視候補天体を見つかった晩のうちに分光観測を行うことも可能であり、メリットは大きい。

そこで、われわれは、即時分光観測が可能なようにファイバーバンドルを用いた面分光装置を開発してきた。これはJ-GEM（諸隈記事参照⁷⁾）の一つの観測装置であり、本稿では、岡山天体物理観測所188 cm望遠鏡のファイバー面分光装置とその将来について紹介する。

2. ファイバー型面分光装置

面分光とは、古典的なスリット分光と異なり、2次元の視野で分光を行う観測手法である。空間2次元と波長1次元のフラックスデータが同時に得られる。面分光は一般的に、銀河などの空間的に広がった天体を調べるために使われるが、突発天体を即時分光観測する際にも有効である。

面分光にはいくつかの方式があるが、われわれは光ファイバー方式の面分光を選択した。図1が光ファイバー方式の面分光の概念図である。この方式では、数十本から数百本の光ファイバーを、一方の末端ではファイバー端面を2次元に、他方では1次元に並べたファイバーバンドルを用いる。

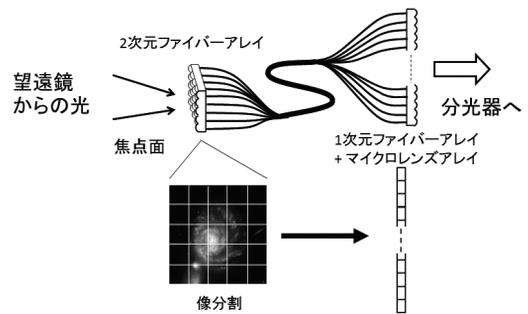


図1 ファイバー型面分光装置の概念図。

2次元ファイバーアレイを望遠鏡焦点面に置いて、1次元ファイバーアレイを分光器のスリット部分に設置すれば、各ファイバーに入射した光のスペクトルが得られる。光ファイバー方式を採用した理由は、短時間で観測装置を切り替えられ、観測のチャンスを増やすことができるからである。共同利用望遠鏡では数カ月前から観測スケジュールが決まっており、一般的には観測装置を夜中に変更できない。光ファイバー方式の装置であれば、2次元ファイバーアレイ部分のみを望遠鏡光路上に挿入するだけで観測装置を数分以内で切り替えられる。また、面分光装置であれば2次元の視野をもつため、SGRB残光のように天球上での位置が数秒角の精度しかなくても、また望遠鏡の指向精度が数秒角であっても、視野内のどこかで捉えることができる。

3. KOOLS-IFU光学系

われわれは、ファイバーバンドルと付属する光学系が一体となった面分光ユニット (Integral Field Unit; IFU) を開発し、それを岡山天体物理観測所188 cm望遠鏡の既存の可視光分光撮像装置 KOOLS に接続して、可視光面分光装置 KOOLS-IFUとして観測が行えるようにした。

図2上がKOOLS-IFUのファイバーバンドルである。このファイバーバンドルは端面形状が円形のファイバー127本で構成されており、各ファイバーはコア（光が通る部分）直径100 μm、ク

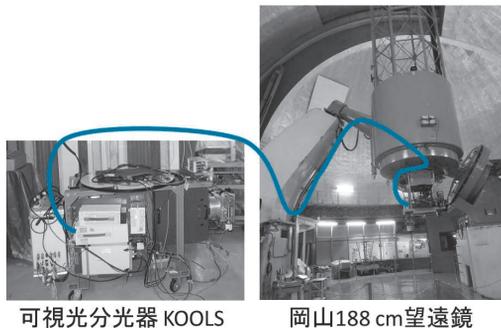
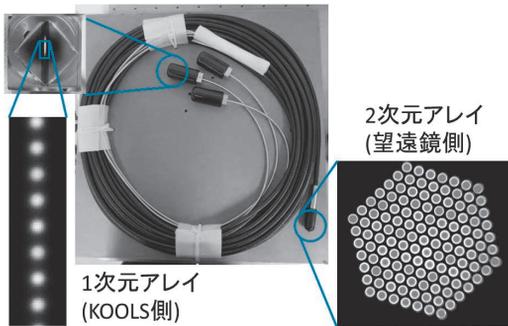


図2 (上4図) KOOLS-IFUのファイバーバンドル。
(下2図) 国立天文台 岡山天体物理観測所
188 cm望遠鏡に接続したときのKOOLS-IFU全
体図。青線がファイバーバンドルを表す。

ラッド(コアの周りの部分で、光を通さない)厚
12.5 μm 、長さ24 mである。2次元アレイ側は、
ファイバー端面が円の最密充填構造で並んでい
る。1次元アレイ側は、三つのバンドルに分か
れ、それぞれファイバー端面が一列に並んでい
る。また、1次元アレイ側には、ファイバー出射
光の広がりを小さくするために、マイクロレンズ
アレイ(MLA)が張り付けられている。1次元ア
レイの三つの部分は、一体としてKOOLSに位置
再現性良く脱着できるようになっている。

188 cm望遠鏡に入射した天体光は、ファイ
バーバンドルの2次元アレイ側に入る。IFU入射
部は、可視光高分散分光装置HIDES-Fの焦点面
ユニットに設置される。電動スライドベンチを動
かすことで観測装置をHIDES-FからKOOLS-
IFUにすぐに切り替えることが可能である。

KOOLSは2008年から188 cm望遠鏡のPI型共

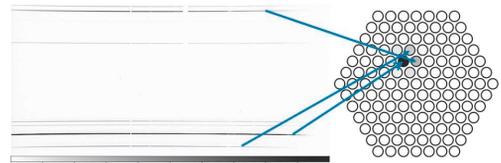


図3 (左図) KOOLS-IFUで観測した星のCCD上での
スペクトル。横方向が波長方向で縦方向に
ファイバーが127本並んでいる。(右図) この
データの2次元ファイバーアレイ上での再合成
画像。

表1 KOOLS-IFU 観測パラメータ。

ファイバーコア視野	1.87"
ファイバー間距離	2.34"
ファイバー本数	127本
全ファイバー視野	30.4"
波長範囲 ^a	5,020–8,830 Å
波長分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$) ^a	600–850
限界等級 (10σ , 30分積分) ^a	18.7 AB mag

^a SGRB 観測時に使うグリズムを使用したときの値。ほかに
グリズムが3種類あり、使用するグリズムを変えると
波長範囲、波長分解能、限界等級が変わる。

同利用装置として使われている、可視光分光撮像
装置である。KOOLSは望遠鏡のカセグレン焦点
に取り付けて観測を行うが、KOOLS-IFUでは
KOOLS本体を望遠鏡ドーム階に設置しておき、
KOOLSに1次元ファイバーアレイを接続して観
測を行う。ファイバーから出た光はコリメータレ
ンズ、グリズム、カメラレンズを通り、CCD上
で各ファイバーからのスペクトルが結像される。
グリズムを変えることで、波長範囲や波長分解能
が変わる。ファイバーバンドルの両端以外は望遠
鏡やドーム構造物に固定されている。

KOOLS-IFUの基本性能を確かめるために、
2014年10月と12月にKOOLS-IFUを188 cm望
遠鏡に接続し、試験観測を行った。図3が
KOOLS-IFUで星を観測したときのデータで、い
くつかのファイバーに星の光が入っている様子
がわかる。点源の観測はもちろん、銀河などの広
がった天体も観測できることを確認した。そのほ
かさまざまな試験を行い、求めたKOOLS-IFU

の基本的な観測パラメータを表1にまとめた。

4. SGRB 残光用自動 ToO アラート 発令システム

GRB 残光は急速に暗くなるため、GRB 発生後すぐに観測を開始できるように、GRB 観測衛星 Swift による GRB 情報を監視し、条件を満たせば自動で ToO アラートを発令するシステムも開発した。

ガンマ線観測衛星の天体位置決定精度は一般的にあまり良くないが、Swift には X 線望遠鏡 XRT も搭載されており、XRT で GRB 残光が検出できれば位置精度が数秒角にまで改善される。この値は、KOOLS-IFU の視野 (30") より十分小さく、GRB 残光がファイバーのどこかに入ることが期待される。XRT 情報を受け取った時点 (GRB 発生から数分以内) で望遠鏡を向けて分光観測を開始できる。

Swift によって検出される GRB の数は年間 100 程度あるが、そのうち SGRB は約 1 割しかない。しかし、GRB 発生時にはその GRB が long か short かわからない。だからといってすべての GRB に対して ToO 観測を行うのは効率が悪い。過去の Swift による GRB 情報の統計を取った結果、Swift から送られる GRB 情報の一つである trigger duration が短いほど SGRB である確率が高いことがわかった⁸⁾。そこで trigger duration が短い GRB のみについて ToO アラートを発令することにした。

実際の ToO アラート発令には以下の条件も考慮している。(1) GRB 発生時に岡山が夜で天体高度が十分高いこと。(2) 観測の障害となる月が GRB に近すぎないこと。(3) 望遠鏡に付いている観測装置が KOOLS-IFU か HIDES-F であることなどである。これらの条件をすべて満たした GRB が発生すると、望遠鏡と観測装置を操作している PC の画面に、ToO アラートが発令されたことを示すウィンドウを表示する。ToO アラ

ート発令ウィンドウ内のボタンをクリックすると観測マニュアルが表示され、その内容に従ってその晩の観測者に観測を行ってもらう。

5. SGRB と重力波源の電磁波対応候補天体の分光フォローアップ観測

SGRB の即時分光観測のプロポーザルを 188 cm 望遠鏡の共同利用観測公募に提出し、2016 年前期と後期に採択され、観測を行っている。3 月と 6 月に条件を満たす GRB が発生し^{9), 10)}、自動 ToO アラートを発して観測を実施したが、トラブルがあって観測を開始できなかったり、天体が暗かったため、どちらも天体スペクトル検出には至らなかった。

2015 年 12 月 26 日には Advanced LIGO により二つ目の重力波が検出された。重力波検出のアラート¹¹⁾後に、世界各地で電磁波対応天体を探すためのフォローアップ観測が行われた。自動サーベイ観測プロジェクト MASTER により候補天体発見の報告¹²⁾が早期にあったため、岡山天体物理観測所に (SGRB 観測とは別の) ToO 観測を申請し、KOOLS-IFU による分光フォローアップ観測を行った。しかし、報告されたほどの明るさはなく、またシーイングが 3" 以上と非常に悪かったため、天体スペクトルを得ることはできなかった。12 月 26 日のイベント以外の重力波イベントにも ToO 観測を一度行ったが、重力波検出そのものの有意性が低かったことが後にわかった。

6. 今後の展望

われわれは可視光面分光装置 KOOLS-IFU を開発し、SGRB や重力波源の電磁波対応候補天体の分光フォローアップ観測を行う体制を整え、少ないながらも観測経験を積むことができた。今後のいっそうの観測推進のために以下のような計画を考えているところである。

KOOLS-IFU の感度を向上させ、短い時間で精

度良いスペクトルが取得できるように、(1) CCDと読み出し回路を新しいものに交換し、量子効率を上げ読み出しノイズを下げる。(2) ファイバーバンドルの2次元アレイ側にMLAを付けたものに交換し、ファイバーの隙間に落ちる天体光がほとんどないようにする。(3) KOOLS-IFUを京大-岡山3.8 m望遠鏡に移設する。3.8 m望遠鏡は国内最大の光赤外望遠鏡で、軽量架台のおかげで機動性が高く、突発天体の分光フォローアップ観測に適した望遠鏡である。

また、ToO観測のいっそうの自動化を図りたい。現状では、その晩の観測者が観測を行うことになっているが、慣れない観測に手間取る可能性が高く、また観測者の負担が大きいことが問題である。そこで、自動ToOアラート発令に加えて、望遠鏡操作からKOOLS-IFU操作やオートガイド星選択まで自動で行うシステムの構築することが望まれ、これを検討している。

電波天文学やX線天文学の発展に、可視光分光観測が非常に寄与したことを考えると、このような即時可視光分光観測は、重力波天文学の発展に大きく寄与するものと期待される。分光観測は天体の状態を調べる有力な手段であるが、即時分光観測体制が整っている望遠鏡は現状では極めて少ない。上記の計画によってKOOLS-IFUの性能を高め、重力波源やSGRB、あるいは超新星などの突発天体の解明に寄与したいと考えている。

謝辞

KOOLS-IFUの開発や観測にあたって、国立天文台 岡山天体物理観測所 泉浦秀行氏、神戸栄治氏、筒井寛典氏、黒田大介氏をはじめとする観測所スタッフから多大な支援を受けました。ま

た国立天文台ハワイ観測所の岩田生氏と服部堯氏にいろいろと相談させていただきました。

本研究は科学研究費助成事業、光赤外線天文学大学間連携事業の助成を受けています。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 061102
- 2) Abbott B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 241103
- 3) Berger E., 2014, ARA&A 52, 43
- 4) Li L., Paczynski B., 1998, ApJ 507, L59
- 5) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, ApJ 775, 113
- 6) Tanvir N. R., et al., 2013, Nature 500, 547
- 7) 諸隈智貴, 2017, 天文月報 110, 14
- 8) 松林和也, ほか, 2014, 日本天文学会2014年秋季年会, J220b
- 9) Beardmore A. P., et al., 2016, GCN Circular 19126
- 10) Kocevski D., et al., 2016, GCN Circular 19478
- 11) Singer L., GCN Circular 18728
- 12) Lipunov V., et al., 2015, GCN Circular 18729

Prompt Follow-Up Observations with an Optical Integral Field Spectrograph

Kazuya MATSUBAYASHI and Kouji OHTA

Department of Astronomy, Kyoto University,
Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto,
606-8502, Japan

Abstract: Direct detection of the gravitational wave has opened the new frontier of the gravitational wave astronomy. Prompt optical follow-up spectroscopy of possible counterparts of the gravitational wave sources is expected to contribute to the development of this new field very much. We developed a fiber-fed integral field spectrograph to perform such follow-up observations. We describe the advantages of this system, results of observations, and a future upgrade plan.