

# Gemini 天文台の科学運用と 装置開発計画の紹介

原著者: **Scot J. KLEINMAN**

〈Gemini 天文台〉

e-mail: skleinman@gemini.edu

**Inger JØRGENSEN**

〈Gemini 天文台〉

e-mail: ijorgensen@gemini.edu



Scot J. KLEINMAN Inger JØRGENSEN

和 訳: **今 西 昌 俊**

〈国立天文台ハワイ観測所〉

日本のコミュニティのために、Gemini 天文台の運用、および、観測装置の紹介をする。

ハワイ島マウナケア山頂にはすばる望遠鏡をはじめとして、Gemini, Keck, CFHT など多数の望遠鏡があります。国立天文台ハワイ観測所では Gemini, Keck 望遠鏡との時間交換を実施しております。とはいえ、実際にこれらの望遠鏡を使って観測をした方以外には、なかなか親しみにくいというのが実状ではないでしょうか？ そこで国立天文台すばる小委員会から Gemini 台長の Doug Simons 氏に依頼し、Gemini 望遠鏡の運用方法、観測装置、将来計画、などを紹介していただくことにしました。以下の文章は Gemini 望遠鏡装置担当の Scot Kleinman 氏が執筆されたものです。この紹介文を読まれた皆さんに Gemini 望遠鏡をより身近なものに感じていただければ幸いです。

(すばる小委員会 委員長 有本信雄)

## 1. はじめに

二つの望遠鏡、一つのア天文台。これが、米国ハワイ島マウナケアとチリのセロパチョンの山頂に存在する2個の Gemini 8.1 m 望遠鏡を一言で表す言葉であろう。Gemini 天文台は、アメリカ合衆国、英国、カナダ、チリ、オーストラリア、ブラジル、アルゼンチンからなる国際組織である。これほど大きくて、多様性に富んだコミュニティのため、広い波長範囲の装置群を有している。具体的には、可視光線の多天体分光器、面分光

(IFU: Integral Field Unit) 装置から、波長  $25\mu\text{m}$  の中間赤外線まで伸びる赤外線の撮像装置と分光器を備えている。望遠鏡自身は、赤外線に最適化されており、低放射率、小さな副鏡、精度の高い鏡の制御が実現できるように設計され、優れた星像を達成するために最新の注意が払われている。

すばる望遠鏡とは異なり、Gemini 望遠鏡では、カセグレン焦点だけにしか装置を付けることができないが、最大5個の装置を同時に取り付け可能である(図1)。実際には、5個のうち2個は、補償光学と較正用機器が占めているが、ある装置か

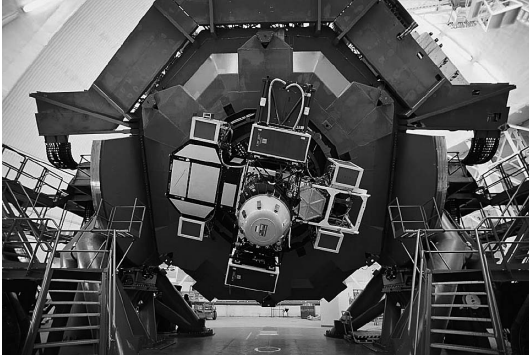


図1 ハワイ島マウナケア山頂にある Gemini 北望遠鏡をカセグレン側から見た写真。全5個の装置が取り付けられている状態。上から時計回りに ALTAIR, NIRI, 較正用機器, GMOS, GNIRS が中心部に、上向きに備え付けられている。

ら別の装置への交換に必要な時間は、一般には、望遠鏡をある天体から次の天体に向けるのにかかる時間よりも短い。装置変更をこれだけ素早く行うことが可能であるため、全観測夜の75%以上は、複数の装置が実際に観測に使用されている。Gemini 望遠鏡はこれだけ機動性に富むため、複数の装置によるキュー観測という強力な観測モードを実現している。キュー観測は、Gemini 所員が時々刻々と変化する天候条件に応じて、そのときに最適な観測プログラムを、最適な観測装置を用いて実施することを可能にする。短時間での装置交換が可能な Gemini のキュー観測は、天文学的に重要な突発現象に迅速、かつ柔軟に対応できるため、ToO (Targets of Opportunity) という重要な観測モードを効率的に実行することもできる。

## 2. キュー観測

Gemini では、すばる望遠鏡のような、観測者が実際の望遠鏡を訪問して採択プログラムを実行する従来の観測モードと、キュー観測モードの二つがある。両者の割合は、各コミュニティからの提案数に基づく要求に応じて決定される。原理的には、100%キュー観測にすることも可能である

が、従来の観測者訪問型の観測モードも常に選択肢として用意されている。直前の露出の結果に基づいて次の観測パラメーターを決定するような観測プログラムでは、柔軟性が要求されるため、従来の観測者訪問型の観測モードを希望する人もいる。Gemini 所員と知り合いになったり、望遠鏡や観測装置により習熟するために、初めてのときだけ従来の観測者訪問型のモードを希望する人もいる。しかし、コミュニティ全体としては、キュー観測が手頃で、要求どおりのデータを効率的に取得できるということ認識しているため、キュー観測モードを選ぶ傾向があり、全観測夜の約90%はキュー観測で占められている。

望遠鏡時間割り当て委員会 (TAC: Telescope Allocation Committees) の会合が終了し、採択プログラムが決定された直後に、キュー観測の準備が実際に始まる。キュー観測は、バンド1, 2, 3, 4に分けられる。TACでの評価が高い順にバンド1, 2, 3と分類される。各バンド内でのプログラム間では、優先順位は付けられない。バンド4は、条件の悪い観測夜を埋めるためのプログラムからなる。本来なら使用されない望遠鏡時間を有効に利用するものであるため、バンド4のプログラムは、いつでも提案でき、実際に観測が実施されても、各パートナー国の割り当て時間から差し引かれることはない。

キュー観測のバンド1-3には、天候や必要な較正、技術的問題が生じた場合の修復のための時間などを一切考慮せず、科学観測に利用できるすべての観測夜分のプログラムを割り当てる。したがって、キュー観測は実際に観測できるよりも多くのプログラムが採択され、各セメスターで約65%のプログラムが実際に観測されている。割り付けされた観測夜の約25%は悪天候や、較正用観測、不具合によって失われる。このように、実際に利用可能な夜数より多くの割り付けを行うのは、各夜の天候条件に応じて、柔軟に実施プログラムを選べるようにするためである。

キュー観測モードは、典型的に90%のバンド1のプログラムが完遂できるように調整される。バンド2のプログラムの観測実施率は75%、バンド3プログラムはもっと低くなる(下記参照)。バンド3は優先度が最も低いので、観測完遂率の不確定性は大きいですが、それでも、一度観測され始めたバンド3プログラムの80%に対して、意味のあるデータを取るのに必要な最低積分時間の75%以上を確保することを目標にしている。キュー観測は、使用できる夜数より多くの時間割り当てがされているので、いくつかのプログラムは観測されずに終わることもある。ほとんどはバンド3プログラムである。一方で、最高評価(バンド1)のプログラムは、非常に優れた天候条件を要求するものでも、実際に観測され、データが取得されている。非常に良い天候条件を必要とする、そこそこ評価の高いプログラムも、Geminiのキュー観測システムでは、従来の観測者訪問型の観測モードに比べて、意味のあるデータを取得できる確率は高い。

キュー観測の一般原則としては、

- 特定のバンド内では、すべてのプログラムの優先度は同じ
- 一度観測を開始したプログラムは、完遂させることを目標とする
- セメスター(1セメスターは6カ月の期間)の最初の時期にしか観測できないバンド1,2プログラムの天体は、早めに観測するようにする
- 要求された天候条件より良い条件のときに観測を実施することは避ける
- バンド3のどのプログラムの観測を開始するかは選択は、提案者が指定した意味のあるデータを取るのに最低限必要な時間を達成できそうな確率、バンド1,2の要求した天候と天体の位置と重ならず、学位取得のためのプログラムか否か、完遂できる確率が高いなどの条件を加味して決定される。

下の図2は、バンド1からバンド3のプログラムの観測完遂率を表したものである。複数の装置を用いたキュー観測は、2005年から始まったことに注意して欲しい。2009Bと2010Aのいくつかのプログラムに関しては、観測が2010Bに一部持ち越されるものもあり、完遂率はこの記事の執筆された2010年夏のもので、最終のものではない。2009Aセメスターは、エルニーニョ現象のため、Gemini北(ハワイ)望遠鏡の天候が非常に悪かったのだが、それでもバンド1プログラムのかなりが次のセメスターに持ち越されたため、十分高い観測完遂率が達成されている。悪天候による観測時間ロスの大部分は、優先度の低いプログラムが被るという結果になっている。これはキュー観測がうまく働いているということの証明であるが、バンド3プログラムの観測完遂率は、結果的に、そのセメスターで天候がどれくらい悪かったかの良い指標にもなっている。それでも、バンド3の全プログラムの60-80%に対して、要求時間の75%以上の観測がされていることは、特筆に値する。

各セメスターの終わりには、すべての国際パートナー間の天候によるロスが同程度になるよう

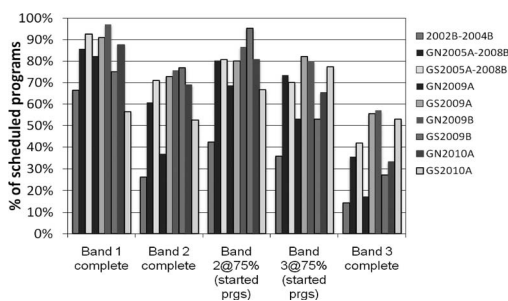


図2 2002年から2010年にかけての、Gemini キュープログラムの観測完遂率。2005年までは、複数の装置を用いたキュー観測運用が始まっていなかったことに注意して欲しい。2009Bと2010Aの完遂率は、最終のものではない。GN, GSはそれぞれ、Gemini北(ハワイ)、Gemini南(チリ)望遠鏡を意味する。

に、次の Semester での時間配分を調整する。長い目でみれば自然に各パートナーの実際の観測時間が、当初の割り当ての割合と一致するはずであるが、実際問題、これには長い期間かかるので、前の Semester で、各国際パートナーが天候によってどれくらいの観測時間を失ったかによって、次の Semester の割り当て時間を増減する方法を取っている。

### 3. キュー観測の優れている点

時々刻々と変化するそのときの天候条件に応じて、最適なプログラムの観測を実施することの高い効率性、必要以上に良い天候条件、あるいは、目的の科学目的がとて達成されないような天候条件の下で、観測するといった無駄を避けることができるという利点に加えて、キュー観測のモデルは、以下のような科学的に重要な特徴をもつ。一つは、平均より優れた天候条件を必要とする、バンド 1 や 2 の高評価のプログラムの観測が、実際に完遂する確率が高くなる。例えば、レーザーガイド星を用いて、補償光学装置 **ALTAIR** による観測を行う場合、科学目的を達成するには、雲がなく精度の高い測光観測が可能な天候条件（いわゆる測光夜）に加えて、地球大気による星像の乱れが小さくなければならない。これらの条件は、キュー観測なら十分満たすことが可能であるが、従来の観測者訪問型の観測では、実現される確率は高くはない。観測が実施されないバンド 1 のプログラムは 10% 程度あるが、それらは例外的に優れた天候条件を必要とし、かつ、観測できる時期が限られているものである。

キュー観測は、あらゆる積分時間のプログラムにも対応できる。1 時間積分だけ必要なプログラムも、キュー観測なら容易に組み込むことができるが、1 夜単位で時間割り当てが行われる従来の観測者訪問型の観測モードでは、そのような短時間のプログラムを入れることは難しい。非常に長い積分時間を必要とするプログラムも、各 Semester

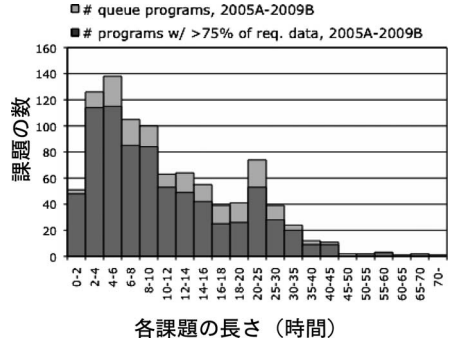


図 3 2005 年から 2009 年にかけての、キュー観測時間の分布。ここでは、ある特定の Semester での時間割り当てのみを示してある。いくつかのプログラムは、数 Semester にわたって観測が行われている。

ターに数夜、あるいは、数 Semester にわたって観測することにより、実現することができる。加えて、個々の天体の積分時間は短くていいものの、天空上の座標が大きく散らばり、Semester の複数の時期に短時間観測しなければならないというようなプログラムも存在する。従来の観測者訪問型の観測モードでは、実現が困難であるが、キュー観測なら簡単に組み込むことができる。図 3 は、2005 年から 2009 年にかけての、キュー観測プログラムの積分時間の分布である。2 時間以下、40 時間以上のプログラムが十分あることに留意していただきたい。

Gemini は、即時追観測 (Rapid Target of Opportunity)、標準的追観測 (Standard Target of Opportunity) の、二つのタイプの ToO (Targets of Opportunity) 観測モードを提供している。即時 ToO は、例えばガンマ線バーストのように、突発的現象が発生したら、現在実行中の積分を中断してでも、即座に追観測しなければならないような場合に実行する。標準的な ToO は、ある突発現象が生じてから 24 時間以内に観測すれば良いというような場合に適用される。このモードは、進行中のサーベイで面白い天体が見つかった場合の追観測に、しばしば利用される。

## 4. 望遠鏡の運用

昼間は、キュー観測のコーディネーターが、その日の夜に予想される天候条件を中心に複数のキュー観測計画を準備する。これらの観測計画は、各観測夜が始まる時間に、その日の観測チームによってチェックされる。昼間の間に、ヒロ（ハワイ）やラセレナ（チリ）から遠隔操作ですべての観測装置の状態をチェックし、その日の夜の観測の効率を最大限高めるようにしている。

Gemini での典型的なキュー観測夜は、望遠鏡操作の担当者 (System Support Associate; SSA) と天文学者の 2 名が、実際に望遠鏡に行き、観測することになる。望遠鏡操作の担当者は、望遠鏡操作に加えて、天文学者が観測装置をきちんと使うためのサポートも行う。天文学者の主な仕事は、その日の夜のキュー観測を実施し、得られたデータの質をチェックすることである。従来の観測者訪問型の夜の場合は、観測者は、Gemini の天文学者に簡単な講習を受け、自ら責任をもって自分の観測を実施することになる。Gemini のキュー観測システムを経験するために、訪問観測者が、予定されているキュー観測を自ら実施したり、手伝ったりすることも可能である。タイミングが合えば、自分自身のプログラムを実行し、観測データを取得することもある。観測装置のパラメーター設定、積分時間、ガイド星の選定を含む観測手順は、キュー観測、従来の観測者訪問型の観測どちらの場合でも、実際の観測が始まる前に準備される。この努力を行うことにより、その日の夜の観測効率を最大限向上させることが可能になる。もし観測者が、自分の観測をそのまま続けることに関して問題がありそうだと判断した場合、あるいは、装置が正常に動かなくなった場合などは、望遠鏡時間の無駄を防ぐため、すぐに別の観測に切り替えることができる。

## 5. Gemini の装置群

Gemini は、それぞれの望遠鏡にさまざまなタイプの観測装置を取りそろえている。望遠鏡にはカセグレン焦点しか存在しないものの、それぞれの望遠鏡に最大 5 個の観測装置を同時に備え付けることができ、第三鏡は素早い動作が可能であるため、即座に他の装置に切り替えることができる。両方の望遠鏡において、GCAL と呼ばれる較正用機器が一つの装置の場所を占めている。Gemini 北望遠鏡では、補償光学装置 ALTAIR (ALTitude conjugate Adaptive optics for the Infra-Red) が二つ目の場所を占めている。Gemini の次期の多層面補償光学 (Multi-Conjugate Adaptive Optics; MCAO) が使えるようになれば、Gemini 南 (チリ) 望遠鏡の一つの観測装置の場所につくことになる。つまり、それぞれの望遠鏡で、3 個の観測装置が使えることを意味する。(Gemini 南望遠鏡は、現時点では 4 個の観測装置が使用可能。)

Gemini は赤外線に最適化された望遠鏡であり、装置の設計、仕様もそれを反映している。Gemini の重要な方向性を 2 点まとめると、以下のようになる。

- このクラスの口径の地上望遠鏡で達成される最高の星像を提供する
- 放射率を最小に抑え、地上からの赤外線観測に最適化する

これらの目標は、薄い主鏡を制御する 120 素子からなる能動光学系、素早い Tip-Tilt 操作が可能な口径 1 m の小さな副鏡、綿密に設計された通気孔や望遠鏡ドーム内の空気の流れによって、実現されている。望遠鏡の光学系は、能動光学用に設計されたが、補償光学にも対応できる。

天体の追尾は、補償光学用の波面センサー、観測装置の視野の内側もしくは外側にある波面センサーを用いて行われる。これらの波面センサーは、主鏡による低次の収差を取り除き、望遠鏡の追尾誤差の埋め合わせをすることができる。補償

光学用の波面センサーの場合は、これに加えて、地球大気による星像の乱れも補正することができる。天候条件にもよるが、これらの波面センサーの限界等級は、可視光で 15 等である。

## 6. Gemini での補償光学

現在のところ、Gemini 北望遠鏡の補償光学システムは **ALTAIR** と呼ばれるもので、自然ガイド星、レーザーガイド星のどちらも利用することができる。Gemini 南望遠鏡では、新たな多層面補償光学 (**MCAO**) が開発中であるが、それに加えて、**NICI** という観測装置が、内蔵の補償光学システムを有しており、**GPI** という次期装置も同様に内蔵補償光学システム有する予定である。これら 2 個の装置の詳細については、以下を参照されたい。

**ALTAIR** は、177 個のアクチュエーターからなる可変鏡をもち、レーザーガイド星を用いれば、赤外線 ( $H$  バンド (波長  $1.65 \mu\text{m}$ ) で 20% 近いストレル比を、自然ガイド星を用いれば 25% 近いストレル比を達成できる。自然ガイド星だと、全天の数%しかカバーできないが、レーザーガイド星を用いれば、約 30% にまで改善される。ガイド星の可視光線  $V$  バンド (波長  $0.55 \mu\text{m}$ ) での限界等級は、自然ガイド星の場合 15 等、レーザーガイド星の場合 18 等である。

Gemini の多層面補償光学 (**MCAO**) システムは **GeMS** と呼ばれ (図 4)、5 個のレーザーガイド星用の波面センサーと、それぞれが約 800 個のアクチュエーターをもつ 3 個の可変鏡からなる計画である。3 個の可変鏡は、それぞれ地表 0 km, 4.5 km, 9 km の場所の大気の乱れを補正することに相当し、そのおかげで全体として 80 秒角という広い視野にわたって補正することが可能になる。50 ワットのレーザーが、5 個のレーザーガイド星のビームに分けられ、**Tip-Tilt** 補正に必要な最大 3 個の自然ガイド星と組み合わせることにより、このような広い視野での大気の乱れの補正が可能



図 4 GeMS レーザーの Gemini 南望遠鏡への取り付けの様子。ロッキードマーチン社によって製作された 50 ワットレーザーが、2010 年 7 月に取り付けられた。

になる。地球大気による星像の乱れが典型的な場合 (星像サイズの間中値) で、**GeMS** は近赤外線 ( $H$  バンド) でのストレル比が 40% に達することが期待され、しかも、全天の 30% をカバーできる予定である。**Tip-Tilt** ガイド星の限界等級は 18.5 等である。最高の性能を出すためには 3 個の **Tip-Tilt** 星が必要であるが、性能に対して少し妥協していいなら、1 個か 2 個の **Tip-Tilt** 星で十分である。

**GeMS** は 2011 年に Gemini 南望遠鏡で性能確認観測が始まる予定である。**GSAOI** (**Gemini South Adaptive Optics Imager**) と **Flamingos-2** が、**GeMS** 補償光学システムを主に利用する観測装置となる。**GSAOI** は 4 個のハイ-2RG 検出器からなる、視野 80 秒角の赤外線撮像装置である。すでに Gemini 南望遠鏡に届いているが、**GeMS** の完成を待って、望遠鏡取り付け試験、性能試験観測が開始される。

長期的には、地表面補償光学 (**Ground Layer AO system; GLAO**) を Gemini 北望遠鏡に取り付けたいと考えている。マウナケア山頂で地球大気が星像の悪化にどれだけ影響を与えているかはすでに調査済みであり、地表面補償光学 (**GLAO**) に優れた観測地であることを確認している。大雑把に見

積もって、現在は20%程度の観測時間でしか達成されない優れた星像が、80%の観測時間で実現されるはずである。非常に重要な進歩をもたらすため、多層面補償光学 (MCAO) の経験を活かして、開発を進めていきたい。

## 7. Gemini の装置群の詳細

Gemini 望遠鏡は赤外線に最適化されているので、観測装置は当然赤外線の波長のものに重点が置かれている。図5では、波長を横軸に、縦軸は波長分解能で観測装置の仕様がまとめられている。表1は、現在の観測装置に加えて、近い将来使用可能になる装置もまとめたものである。

GMOS (Gemini Multi-Object Spectrograph) は唯一の可視光線の観測装置で、Gemini 北、南の両方の望遠鏡で使用され、優れた性能が実証されている。全観測時間の50-70%は、GMOSによる観測である。GMOSは、5.5分角の視野をもち、可視光線で撮像、スリット分光、多天体分光、面分光ができる、極めて汎用性に富む観測装置である。Nod and Shuffle 法 (<http://www.gemini.edu/sciops/instruments/gmos/nod-and-shuffle>) は可視

光線の赤い側の波長で空の背景放射の差し引きの精度が劇的に改善するために、しばしば使用される。ただし、Gemini 北望遠鏡の面分光モードでは、残念ながらこのNod and Shuffle法は使えない。長時間露出の場合、特に波長0.6-1.0 $\mu\text{m}$ の可視光線で、空からの明るい輝線放射の差し引きの

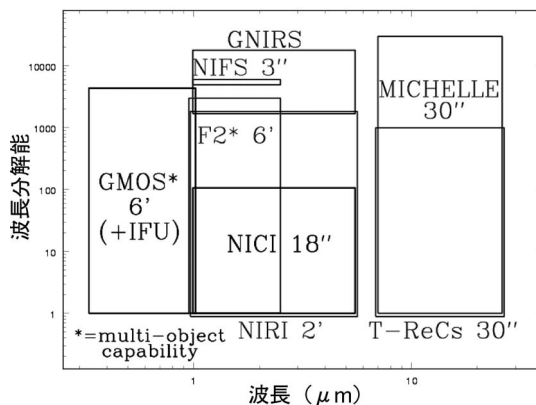


図5 Gemini 観測装置のまとめ。視野は、各装置の直後に書かれてある。同じ場所に重なる線は、見やすくするために少しずつ表示してある。GNIRSは単一スリットの分光器で、スリット長は最大99秒角まで可能である。

表1 現在、近未来に使える Gemini 観測装置の簡単なまとめ。

Gemini North			Gemini South		
装置名	仕様	波長	装置名	仕様	波長
GMOS-N	撮像, 多天体分光	可視光	GMOS-S	撮像, 多天体分光	可視光
NIRI	撮像, 分光	近赤外線	GSAOI*	GeMs 用高空間分解能撮像	近赤外線
GNIRS*	長スリット分光, クロディスバージョン分光	近赤外線	Flamingos-2*	撮像, 長スリット, 多天体分光	
MICHELLE	撮像, 長スリット分光, クロディスバージョン分光	中間赤外線	T-ReCS	撮像, 長スリット分光	中間赤外線
ALTAIR	観測所の補償光学システム (自然ガイド星, レーザガイド星両方に対応)		GeMS*	観測所の多層面, 広視野補償光学システム (最大5のレーザーガイド星に対応)	近赤外線
NIFS	面分光, コロナグラフモードあり	近赤外線	NICI	内蔵の補償光学を用いた2チャンネル同時コロナグラフ撮像	近赤外線
			GPI*	究極の補償光学, コロナグラフを用いた面分光	近赤外線

\*の印の付いている装置は、2010年7月時点で、実際の空で性能評価が完全に行われていないものである。

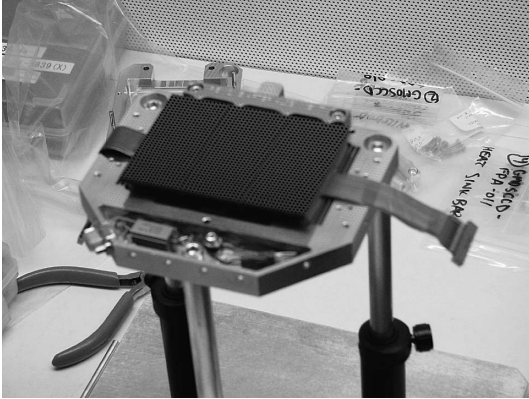


図6 3個の浜松フォトニクス社製の空乏層の厚い CCD が取り付けられた、新しい GMOS-N の焦点面。カナダのヘルツブルク天文学研究所で調整が行われている。

系統的誤差が、1桁近く改善される。

2011年前半までに、Gemini北望遠鏡のGMOS (GMOS-N)のCCDは、浜松フォトニクス社製の深空乏層型CCDに取り換えられる予定である(図6)。この新しいCCDは、現在すばる望遠鏡の主焦点カメラ(Suprime-Cam)で使用されているものと同様のもので、可視光線の赤側で感度が大きく向上し、それでいて、青い側でも現在のGMOS-Nの感度が維持される。

Gemini南望遠鏡のGMOS (GMOS-S)のCCDは、GMOS-Nよりやや青い側に最適化されている。将来的には、GMOS-SのCCDも新しいものに付け替える計画であるが、どの会社のCCDを採用するかはまだ決めていない。目標としては、現在達成されている青側の感度を維持しつつ、新しい深空乏層型CCDを用いて赤側での感度を飛躍的に向上させることである。

GMOSの仕様は、すばる望遠鏡のSuprime-CamやFOCASと重なる部分もあるが、面分光機能やNod and Shuffle法はユニークな特徴である。GMOSのもう一つの重要な特徴として、十分正確な天体カタログがあるという条件で、予備観測なしで多天体スリットマスクを製作できるという点が挙げられる。Geminiのキュー観測システム

では、予備観測の時間を確保することは比較的容易であるが、それでも標準的な天体カタログの情報だけで多天体スリットマスクを作れるのなら、それはそれで便利である。典型的には、GMOSは30-60個のスリットマスクを作れるが、マスク設計を工夫すれば、さらに多くの数を実現することもできる。以前には、GMOSを用いて、数百個の天体の視線速度を一度に測定した例もある。

NIRIとGNIRSはGemini北望遠鏡に備え付けられている赤外線観測装置である。NIRI (Near InfraRed Imager and spectrometer)は、 $1,024 \times 1,024$ 素子数のアラディン-2検出器を用い、赤外線の波長領域 $1-5 \mu\text{m}$ に感度がある。GNIRS (Gemini Near-InfraRed Spectrograph)はGemini南望遠鏡から北へ移され、2010Bのセメスターで性能確認試験が行われる。現在のところ、NIRIは撮像、分光観測に用いられているが、GNIRSを実際の天体観測に使えるようになれば、標準的な赤外線の分光観測は、NIRIでなくGNIRSを用いて行われるようになるだろう。NIRIは3種類のカメラをもっている。合成焦点比が $f/32$ ,  $f/14$ ,  $f/6$ で、それぞれ $0.022$ 秒角、 $0.050$ 秒角、 $0.117$ 秒角のピクセルスケール、および、 $22 \times 22$ 平方秒角、 $51 \times 51$ 平方秒角、 $120 \times 120$ 平方秒角の視野をもつ。NIRIの撮像モードは、すばる望遠鏡のIRCSとかなり似ているが、 $f/6$ で $120 \times 120$ 平方秒角という広撮像モードを有している点が大きな特徴であろう。NIRIは、より優れた星像を実現するため、一般には補償光学装置ALTAIRと組み合わせて使われる。

GNIRSがGemini南望遠鏡に取り付けられていたとき、不運にも事故が起きて、装置の全面的補修、および、 $1,024 \times 1,024$ 素子のアラディン-3検出器の取り換えを行わなければならなかった。この補修も無事終了し、2010年7月に、GNIRSはマウナケア山頂のGemini北望遠鏡に運ばれた。2011Aセメスターでの科学観測に使用できるようにするために、実際の空に向けての性能確認



観測を実施する予定である。しかし、後から到着する一部の光学素子を取り付ければ、より高い性能が実現されるため、2回目の改修も計画している。補償光学装置 ALTAIR とともに併用して使用する装置であるため（注：Gemini 南では補償光学システムなしでの運用だった。）、いくつかの光学素子の品質の改善も必要なのである。GNIRS は、赤い側（波長  $2.5\text{--}5.0\ \mu\text{m}$ ）と青い側（波長  $0.9\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ ）それぞれに2通りの焦点距離の、計4種類のカメラを有している。加えて、クロスディスページョン分光モードを用いれば、 $0.9\text{--}2.5\ \mu\text{m}$  の広い波長範囲を、波長分解能 1,700 で一度にカバーし、分光観測することができる。分解能 5,900 の場合は、一部の波長しか一度にカバーできない。長スリットモードでは、波長分解能 1,700, 5,900, 18,000 での分光が可能である。

GNIRS が Gemini 南望遠鏡で使われていたときは、面分光モードも提供されていたが、Gemini 北望遠鏡では、面分光観測は NIFS (Gemini's Near-infrared Integral Field Spectrometer) を用いて行う。NIFS は、 $0.95\text{--}2.40\ \mu\text{m}$  の波長を、波長分解能 5,000 で3次元分光することのできる装置である。NIFS もよく補償光学装置 ALTAIR と併用して使用され、自然ガイド星/レーザーガイド星を用いて、0.1 秒角スケールに空間分解した面分光観測が可能になる。NIFS では、遮蔽マスクを用いたコロナグラフ分光も可能である。NIFS は、ピクセルスケールが 0.103 秒角であり、横 0.103 秒角、縦 0.04 秒角のイメージライザーを用いて、視野  $3\times 3$  平方秒角の面分光観測を可能にする。

Flamingos-2 (図7) は、Gemini 南望遠鏡で性能確認観測を行い、すばらしい初期画像を提供した (<http://www.gemini.edu/node/11328>)。しかし、Gemini 望遠鏡に運ばれている間、ハワイ-II 検出器がダメージを受け、性能が低下していることが判明した。そのため、付け替えが必要な状況である。加えて、より効率的で、安定した観測を実現するためには、装置自身に解決しなければならな

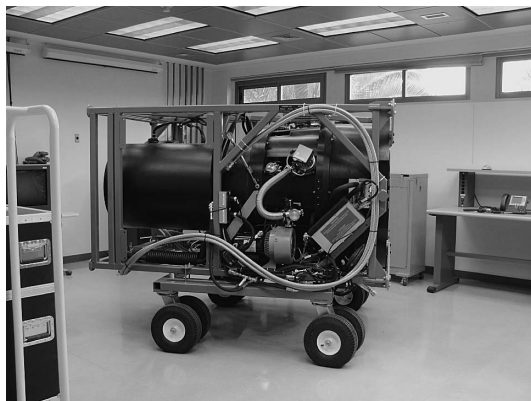


図7 チリのラセレナの Gemini 山麓施設にある Flamingos-2.

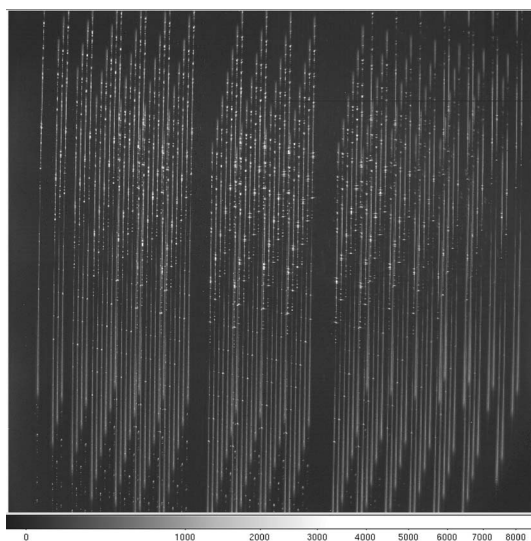


図8 Flamingos-2 多天体分光モードのときの検出器上での画像。実験室での測定。

い問題がいくつかあることがわかった。現在これらの問題解決のための改善作業中である。2011年には望遠鏡に再び取り付けの性能確認観測が始まる予定である。Flamingos-2 はハワイ-II 検出器を用い、6 分角の視野を実現する。 $0.9\text{--}2.5\ \mu\text{m}$  の波長での撮像、長スリット分光、多天体分光機能を有し(図8)、かつ、補償光学システム GeMS と組み合わせても観測できるため、非常に需要の高い観測装置になると期待される。すばる望遠鏡の MOIRCS と同様、Flamingos-2 は、9 種類のマ

クを同時に格納でき、昼の間に取り換えてその日の夜の観測で使用することができる。各マスクは、最大 80 個のスリットを刻むことが可能である。Flamingos-2 は数種類のフィルターとグリズムをもっており、波長分解能 1,000–3,000 での分光観測ができる。さらに、エタロンを用いた波長可変の狭帯域フィルターを、 $f/32$  の GeMS と併用して観測できるように準備中である。Flamingos-2 は、補償光学による星像の改善を受けた、すばる MOIRCS の南天版の装置であると言えるだろう。

NICI は、Gemini 南望遠鏡の、近赤外線コロナグラフ撮像装置である。2 個の  $1,024 \times 1,024$  素子のアラディン-2 検出器を、85 素子のカーバチャー型の補償光学、および、精密なリオットコロナグラフと組み合わせて用いる。撮像のピクセルスケールは 0.018 秒角で、視野は  $18 \times 18$  平方秒角である。コロナグラフモードでは、分光差分型撮像 (SDI) と空間差分型撮像 (ADI) を用いる。現在のところ、NICI は 1 個のビームスプリッターで、光を 2 チャンネルに分けているが、将来的には、2 個のダイクロイック鏡を用いて、1 個は  $H$  バンドのメタンバンド (波長  $1.65 \mu\text{m}$ ) のオンとオフを分け、もう一つは  $H$  バンド ( $1.65 \mu\text{m}$ ) と  $K$  バンド ( $2.2 \mu\text{m}$ ) を分離する計画である。最初の試験観測では、NICI はストレル比 40% を定常的に達成し、30 分積分で 0.7 秒角離れた 12 等級の差 (光量比約 4 桁) の天体を分離できていることが確認された (図 9)。数カ月のうちに、NICI による、系外惑星の最初の科学成果を出したいと考えている。

GPI (Gemini Planet Imager) は、2011 年に Gemini 南望遠鏡に取り付け予定の、次世代の究極の補償光学を用いるコロナグラフ撮像装置である。2012 年には一般共同利用に提供できるようになると考えている。GPI はハワイ-2RG 検出器を用いる、面分光機能をもつ装置で、偏光観測も可能である。GPI 内蔵の補償光学システムは、2 種類



図 9 NICI の最新の成果 (Tokovinin A., et al., 2010, AJ 140, 510). 大きく離れた連星系として知られていたこの系は、実は四重連星に分解できることがわかった。二つの系の間隔は 10.7 秒角で、それぞれの主星が、0.42 秒角、0.29 秒角離れた伴星をもつ。

の可変鏡をもつ。一つは、低周波の波面誤差補正用の、大きなストロークの  $11 \times 11$  素子のウーファー (woofer)、もう一つは、高周波成分を補正するためのポストマイクロマシン社の 1,600 個のアクチュエーターのツイーター (tweeter) である。内蔵較正用装置により可視光線の  $I$  バンド (波長  $0.8 \mu\text{m}$ ) で 8 等より明るい天体に対しては、非共通の光路誤差 5 mm、5 等より明るい天体に対しては 1 mm からくる誤差を修正できる。アボダイズされた瞳でのリオットコロナグラフは、焦点面とリオストップを用いて、回折ノイズ、スペckル雑音を抑える。GPI は、7 桁ものコントラスト (主星と惑星の光量の比) を実現できると期待される。

Gemini 望遠鏡が設計段階から力を入れてきた中間赤外線では、Gemini 北望遠鏡に Michelle、Gemini 南望遠鏡に T-ReCS という観測装置がある。共に 1 個のレイセオン社の  $320 \times 240$  素子の Si:As 検出器を用いており、 $7\text{--}26 \mu\text{m}$  の波長帯に感度がある。両装置とも、 $N$  バンド ( $10 \mu\text{m}$  帯)、 $Q$  バンド ( $20 \mu\text{m}$  帯) での撮像、分光機能を有し、Chop and Nod 観測モードを用いた撮像のためのシリコンフィルターも何枚か備えている。Michelle は最大 30,000 もの波長分解能の高分散分光、および、偏光撮像観測機能も備えている。

Gemini 望遠鏡は放射率が非常に低く、赤外線に最適化された設計であるため、地上からの中間赤外線観測において、これらの装置は非常に強力である。

## 8. Gemini の将来

2013 年初期に英国が Gemini から抜けるため、使える予算が減少する。そのため、Gemini は運用費を抑える努力をしなければならない。まだ最終的な解を得るには至っていないが、いくつかの点は、現時点でも明らかである。

- Gemini 北、南望遠鏡共に、新たな装置や技術開発は続けていく。
- しかし、それぞれの望遠鏡でサポートできる装置の数は、補償光学システム以外に 4 個に減らさざるをえないであろう。
- キュー観測と従来の観測者訪問型の観測モードの両方を維持しつつ、望遠鏡運用の合理化を図る。
- コミュニティーがキュー観測と観測者訪問型の観測モードをどのような割合で希望しても対応できるように、100%キューにも対応できる所員数は確保し続ける。
- 新たなパートナーを探すことはもちろん重要である。しかし、国際パートナー間の交渉は非常に複雑であるため、新たなパートナーがたとえ明日見つかったとしても、そのパートナーが実際に加入するまでには、数年はかかるであろう。

装置の最新情報としては、Flamingos-2 は Gemini 南望遠鏡の山麓施設で改修中であり、2011 年には望遠鏡に取り付けられ、観測が開始されるであろう。GPI は装置の組み上げが始まろうとしている段階で、2011 年後半に Gemini 南望遠鏡に来る予定である。GSAOI はすでに Gemini 南望遠鏡に届けられており、GeMS が使用できるようになるのを待って、共同利用に供されることになっている。

これら以外の Gemini の将来装置に関しては、現在議論中である。Gemini は各国際パートナーからの意見を積極的に聞き入れ、どのような機能が一番欲しいかの要望を集めている。各国際パートナー、Gemini 科学委員会、Gemini ボード、予算割り当て機関とのやり取りを通して、Gemini は次世代の装置開発計画の策定を進めている。Gemini としては、時間交換プログラムを実施しているすばるコミュニティーとも議論して、将来の方向性を定めていきたいと考えている。なぜなら、互いに相補的な装置群を準備すれば、双方のコミュニティーが、双方の望遠鏡を使って、より面白い研究成果を出すことができるからである。2010 年およびそれ以降の Gemini の次世代の新たな装置開発の方向性を決めるにあたって、是非すばるコミュニティーからも積極的な意見をいただきたい。

予算が減り、サポートできる装置の数も限定される時代になれば、近隣の望遠鏡同士が互いに協力し合いながら、限られた人的資源/予算を有効利用していくことが今後ますます重要になっていくであろうし、それは、すべての望遠鏡に利益をもたらすことにつながるはずである。すばると Gemini が協力することで、互いの望遠鏡のやや弱い部分を補い合うことができる。現在の時間交換プログラムの存在は双方のコミュニティーに知れ渡りつつあり、今後も、この建設的な協力関係をさらに拡大させ、双方のコミュニティーから、重要な科学成果がよりいっそう数多く出続けることが、われわれの願いである。

この原稿を準備するにあたっては、Andy Adamson, Sandy Leggett, Nancy Levenson, Doug Simons, 臼田知史氏、すばる小委員会 (Subaru Advisory Committee) の助言を得た。ここに感謝する。この原稿を天文月報に載せる機会を与えてくれた有本信雄氏にも、感謝の意を表明したい。