

地上大口径 vs. スペース

本原 顕太郎 (東大天文センター)、小林 尚人 (国立天文台ハワイ観測所)、
大坪 政司 (国立天文台)、大内 正己 (東京大学)

1 海外の大型計画のおさらい

光赤外の将来の大型計画を考えるにあたって、海外の計画がどのようなになっているかということ
を認識しておかなければならない。

以下では地上とスペースそれぞれの現状を簡単におさらいしておく。詳しくは家さんの集録を参
照して頂きたい。

1.1 地上大型望遠鏡：CELT

CELT はカリフォルニア大学と Caltec を中心とした大学連合によって計画されている、セグメント 30 メートルの主鏡を持つ望遠鏡である。2002 年 8 月の SPIE の感触では、予算がついたかどうかははっきりしなかったものの見通しがほぼ立っているのは間違いないようである。Conceptual design も完了し、green book¹ と呼ばれる 300 ページあまりのプロジェクトブックも配布されている。予算は現時点で約 1000 億円、予定されている 6 つの観測装置予算が 150 億以上にもなる非常に巨大なプロジェクトである。ファーストライトは 2010 年を目指しており、これは ALMA のファーストライトと揃えようという意図である。

建設メンバーの一人である Djorgovski と話したところ、現時点での他グループとの collaboration は考えていないとのことであるが、将来については含みを残していた。

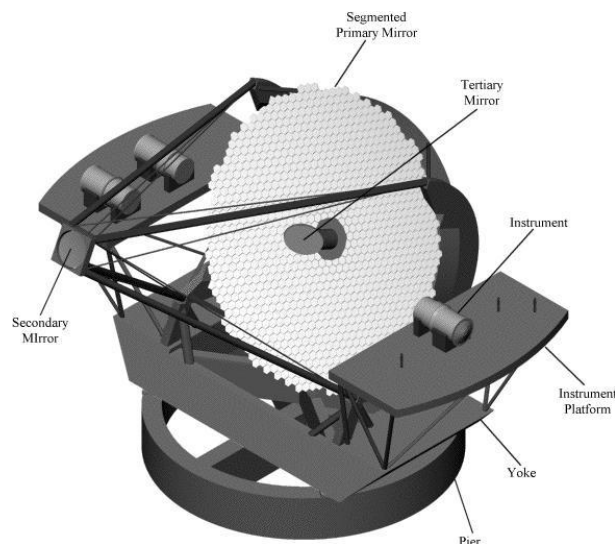


図 1: CELT の全景図。

¹<http://celt.ucolick.org/reports/greenbook.pdf>

1.2 他の計画

他の海外の計画等をまとめたものを図 1 に示す。数値など一部不正確なものがあるのに注意して欲しい。

現時点での実現度の印象は、CELT はほぼ間違いなくできるというていいだろう。OWL もスペックダウンするにしても作ってくると思われ、それ以外はもう 1 台くらいできそうかな、といった程度である。

いずれにしても今後 10 年のスパンでの見通しとしては

- 30 メートル望遠鏡の時代は必ず来る。
 - － ただし、非常に高価 (>1000 億円)
 - － できたとしてもせいぜい世界で数台くらいか?
- サイエンスは豊富
 - － 必ずしも diffraction limit は要求されない。分光のための『光バケツ』でもいいかも。
 - － とはいっても AO がちゃんと働くと非常に強力
- AO, セグメント鏡がキーテクノロジー

といえるだろう。

	口径 (m)	主鏡	AO	予算 (円)	母体
OWL	100	球面 2m×1600	可視/赤外 5×10^5 素子	1200 億	ESO
CELT	30	双曲面 1m×1080	近赤外 5×10^3 素子	1000 億	UC+Caltec
GSMT	30	放物面 1.2m×618	? $2400 - 5 \times 10^4$ 素子	800 億	NOAO/AURA
Euro50	50	楕円面 2m×576	K 4×10^3 素子	800 億	Sweden
LPT	15	双曲面 5m×4 – 6	TBD	130 億	France
HDRT	22 (eff. 16)	放物面 6.5m×6	? 400 素子	200 億	Univ. Hawaii
XLT	20	? 1.5m×342	?	400 億	Canada

表 1: 海外の大型地上計画の主なもの。細かい数値/仕様は 2002 年 5 月の時点のもので、間違いもある可能性が高いので注意。

1.3 宇宙冷却望遠鏡：JWST

衛星ミッションは数多くあるが、ここでは光赤外、という観点で JWST に話を絞る。

James Webb Space Telescope(JWST)²は元々は NGST と呼ばれていた計画で、口径 6m の分割主鏡の冷却望遠鏡を L2 ポイントに投入して放射冷却で 45K 程度まで冷やし、 $0.6 - 28\mu\text{m}$ の撮像/分光観測を行うというものである。

2002 年 9 月に主契約先が TRW/Ball に決定し、約 1000 億円の契約を結んだようである。総予算は \$2 billion ということで、日本円にして 2500 億円という莫大なものになる。打ち上げは 2010 年を目指している模様。

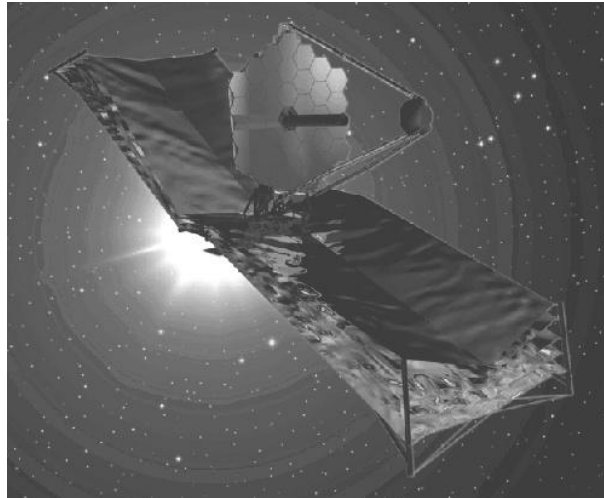


図 2: JWST の想像図。

2 スペースと地上の比較

では、スペースと地上ではどのような利点、欠点があるのか？

2.1 限界等級

まず限界等級はどうか？ 30m 地上望遠鏡と 4m 宇宙望遠鏡の感度比較を図 3 に示した。30m 地上望遠鏡は XLT³の感度計算⁴を用いている。また、4m 宇宙望遠鏡の感度計算には JWST の sensitivity calculator⁵を使用した。

これを見ての印象は「思ったほど地上とスペースの差がつかない」、というものだった。
ポイントは

- 地上では AO 技術が鍵となる

²James Webb は NASA の 2 代目の長官で、Apollo 計画を実行したという業績があるらしいが、日本人にはあまりなじみのない人だなあ

³<http://www.hia.nrc.ca/STAFF/cbt/XLT/>

⁴<http://www.hia.nrc.ca/STAFF/cbt/XLT/Reports/ngCFHTScience.pdf>

⁵http://www.ngst.stsci.edu/nms/nms_flux_form.html

- スペースでは望遠鏡を冷却しないと近赤外性能がまるででない

という、すばる/HST の比較でも良く言われてきたことであった。

では、感度以外の利点/欠点を以下で見ていこう。

2.2 地上望遠鏡の特性

地上望遠鏡の利点、欠点は以下のようなものが考えられる。

利点

- とにかく photon がたくさん集められる。光パケツ的な使い方ができる、ということで高分散分光には特に有利になるだろう。
- AO がちゃんと動けば、(点源に対する) 驚異的な感度と分解能が実現する。口径 30 メートルで $K = 27\text{mag}$ FWHM = $0.02''$ 。とくに、近赤外での空間分解能はスペースのそれを凌駕する。
- 可視の AO の実現可能性も見込め、実現すれば可視でもスペースに匹敵する分解能を期待できる。

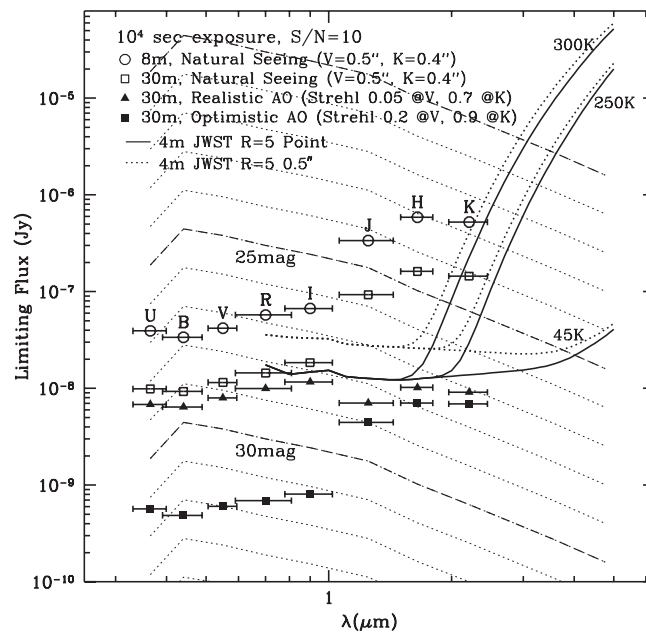


図 3: 地上 30m/4m 宇宙望遠鏡の比較。黒丸は AO なしの地上 8 メートル望遠鏡、緑四角は口径 30 メートルの時。青三角は、地上 30 メートルで現在の技術レベルの AO を使ったとき (Strehl 比 0.7 @ K , 0.05 @ V)。紫四角は理想的な AO が実現したとき (Strehl 比 0.9 @ K , 0.2 @ V)。実線は点源に対する 4m 宇宙望遠鏡の感度。波線は $0.5''$ に広がった天体に対する感度。望遠鏡の温度が 45K, 250K, 300K の時の限界等級をそれぞれ緑、赤、水色で示した。

- 最新の観測機器が積める。建設中、建設後のデバイスの進歩を取り入れることが容易。
- 望遠鏡自身の寿命は非常に長い。少なくとも 30 年は使うことができ、インフラストラクチャとしての価値も大きい。

その一方で以下のような欠点も挙げられる

欠点

- AO では広い視野は取れない。現在の AO ではせいぜい $1'\phi$ であり、しかも視野内での PSF が非一様になってしまう。これを解決する技術として deformable mirror のレイヤを複数用いた MCAO が提案されているが、これを用いてもせいぜい数分の視野しか確保できないし、MCAO 自身まだまだ未知の要素の多い技術である。
- 可視の解像度はシーイングできまる。もちろん可視域での AO が実現すればこれも変わってくるが、その見通しは今のところ暗い。
- 大気背景放射が強い。特に、近赤外 $1-2\mu\text{m}$ では大気上層部からの OH 夜光輝線が、 $2-5\mu\text{m}$ では熱放射の影響により非常に強い背景放射を受けるため、深い観測が妨げられる。
- 大気の窓があるために波長が切れ切れになる。波長 $1\mu\text{m}$ 以上の波長域では大気中の水蒸気を主とした分子による吸収が強く効いてきて、図 4 のように透過波長域が切れ切れになってしまい、有効波長域は $1-5\mu\text{m}$ で半分ほどしかない。このため、特に high- z 天体などでは赤方偏移によっては目標とする輝線が観測できないなどの事態が生じる。

2.3 スペース望遠鏡の特性

それではスペース望遠鏡の利点、欠点はどうなるか？、というと先に述べた地上望遠鏡のほぼ裏返しとなる。

利点

- 最も大きな利点は、近赤外の感度が圧倒的に高くなるということである。 $1-2\mu\text{m}$ では大気の OH 夜光がなくなるためにどんな軌道に上げてても劇的な感度向上が見込める。また、L2 軌道に上げるなどして冷却望遠鏡にすることによって $2-5\mu\text{m}$ でも非常に高い感度が期待できる。限界等級は 4m 望遠鏡で $K = 27\text{mag}$ (撮像)、 23mag (分光) 程度となる。
- 広視野で diffraction limited の画像が取得可能。これは地上で観測している限りは期待できない特性である。4m 望遠鏡で $2\mu\text{m}$ で FWHM = $0.1''$ の画像が $1^\circ\phi$ 以上の画角で期待できる。
- 新しい波長帯を見ることができる。即ち、図 4 のような大気の窓を気にすることなく、どのような波長でも観測が可能となる。これによって $1-5\mu\text{m}$ での有効波長域は実質 2 倍となり、同時にこれは観測できる赤方偏移域も 2 倍に増加することを意味する。

こうやって見てくるとスペースはいいことだらけ...なのだが、もちろんことはそんなに簡単にはいかない。みんながスペース一辺倒にならないわけは色々ある。

欠点

- 打ち上げ、故障のリスク。Astro-E の記憶もまだ新しいように、スペースには打ち上げ失敗のリスクが必ず付きまとう。これは非常に大きく、一度失敗すればそのリカバーには最低でも 5 年以上はかかる。この間どのようにして研究を進めていくのか？

また、打ち上げに成功しても機器の不具合などの故障のリスクも無視できない。

- 衛星の寿命が短い。地上の望遠鏡が一声 30 年、着実なメンテを行えば 50 年間の運用も可能なのに対し、衛星は 5-10 年程度しか運用できないと考えられる。HST のように 10 年以上運用を行っているものもあるが、これは定期的なサービスミッションで修理/アップグレードを行っているためであり、L2 ポイントに望遠鏡を置くとすればあまり参考にはならない。
- 最新機器が搭載できない。衛星は設計段階から観測装置を含めた機器を組み込んでいくため、途中の大幅な変更は基本的には許されない。このため、新たなデバイスなどが開発途中で登場し、それによって劇的に物事が進歩するとしてもそのようなものは搭載することができない。(HST の NICMOS が 256×256 を積んでいるのがその一例だろう。)

また、低軌道周期に望遠鏡を載せて HST のようなサービスミッションをすることを考えるとしても、そのためには莫大な予算が必要になることを頭に置かなければならない。HST の Service Mission-II (NICMOS がインストールされたミッション)⁶ を例にとると、搭載機器の開発やソフトウェア開発などミッション自体の費用が 400 億円、シャトルの打ち上げ費用が 500 億円で、これだけで総額 1000 億円クラスのプロジェクトになってしまう。

最後に、光赤外のコミュニティがそろって衛星を推進するということになった際にはわれわれの研究スタイルを大幅にかえないといけなくなるだろう、ということに注意を向けておきたい。各自がそのような覚悟があって、その上でもスペース計画を推進したいかを真剣に自問すべきであろう。

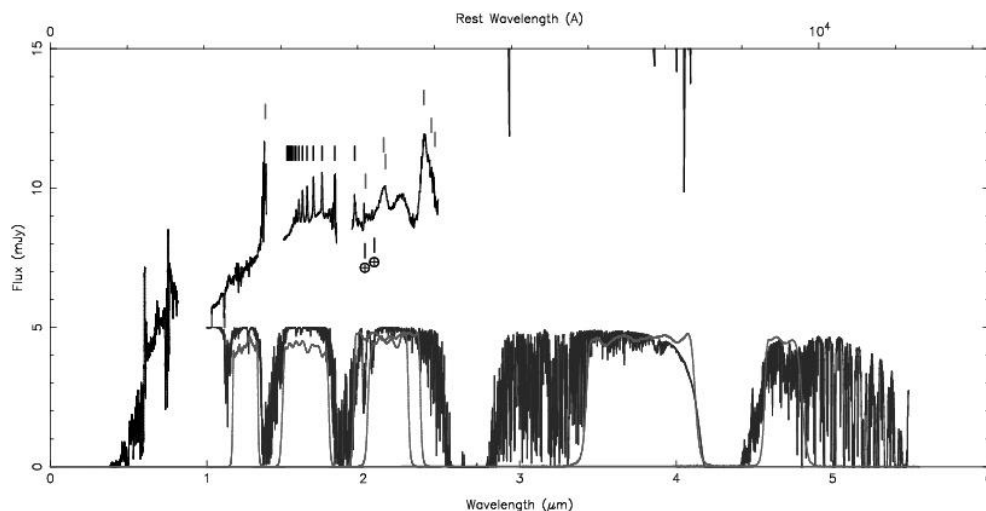


図 4: 近赤外域での大気の透過率 (青実線) とすばる/IRCS で使われている広帯域フィルタの透過率 (赤実線)。特に $2.5 \mu\text{m}$ を越えたあたりから水蒸気による吸収が強く効き始め、観測できる波長域が大幅に減っているのが分かる。また、黒実線でクエーサーのスペクトルを $z = 4$ に持っていたものを表示した。多くの輝線が大気の透過率が低い領域に落ちてしまっているのがわかる。

⁶http://www.gsfc.nasa.gov/gsfc/service/gallery/fact_sheets/spacesci/hst-cost.htm

3 どんなものを作るのか？

それでは、どのようなものを推進して行けばいいのだろうか？ 具体的な計画は今後を待つとして、いくつかのアイデアを以下に示す。

3.1 地上大型望遠鏡

地上大型望遠鏡を作る際のポイントになるのは、CELT との違いをどのように出してゆくのか、ということにある。

3.1.1 クリーンな PSF

CELT のようなセグメント鏡を用いる際には、各セグメントのエッジでの光の散乱によって PSF にサブピークが多数現れ、たとえば系外惑星系の直接撮像には大きな障害になると予想される (図 5: HDRT 提案書⁷からの引用)。よりクリーンな PSF を作るためにはセグメントを大きくする必要があり、たとえば HDRT は off-axis な 6.5m 鏡を 6 枚並べることによってこれを解決しようとしている。

3.1.2 大型干渉計

CELT との違いを出すもうひとつの方法に、口径は CELT よりも小さくして干渉計化する、というのも考えられる。Keck や BLT の大型版ともいえるが、さらにもう一工夫してベースラインを変更できるようドームと望遠鏡ごと円形レール上に載せて移動できるようにしたものが AURA の Roger Angel のアイデアの 20/20 望遠鏡である。ただし、容易に想像できるように技術的課題は多岐にわたる。

3.1.3 最新技術、観測装置

最新技術を導入した望遠鏡にするのももう一つの手である。たとえば、主鏡に軽量複合材ミラーを導入したり、あるいは超薄型分割鏡を製作し、デフォーマブル主鏡として用いて AO を行う、等も考えられる。

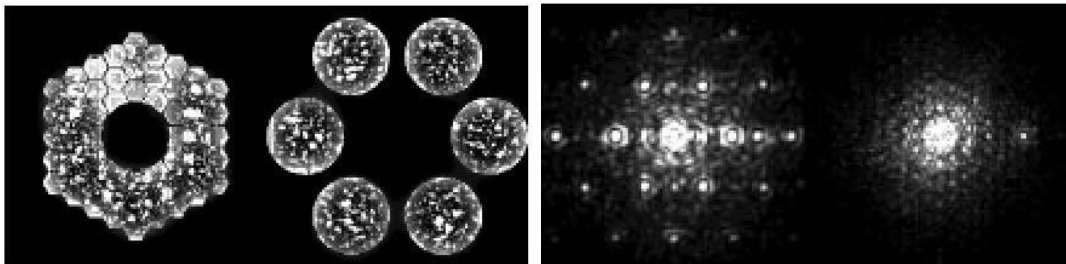


図 5: (左) Keck(左側) と HDRT(右側) の瞳像。(右)0.36'' 離れた中心ピークの 1PSF のシミュレーション。左が Keck、右が HDRT。Keck では伴星が偽のピークに埋もれてしまうことが分かる。

⁷<http://www.cfht.hawaii.edu/News/Projects/NGCFHT/hdrrept.pdf>

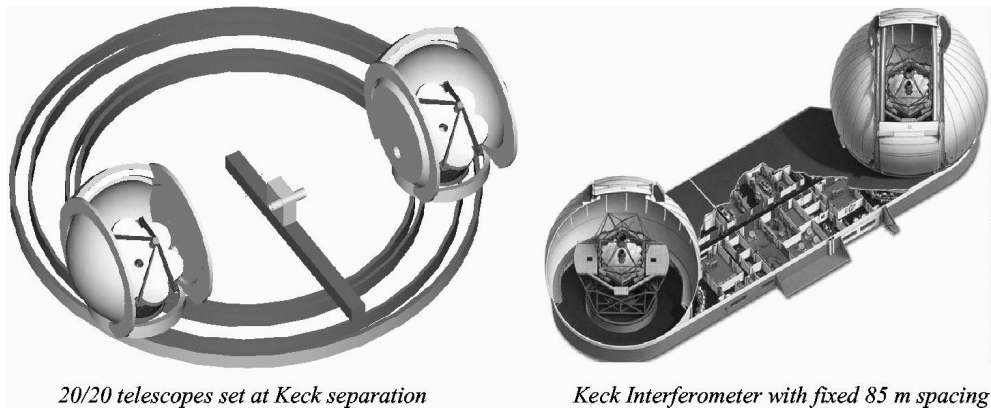


図 6: 20/20 望遠鏡の概念図。

その他、たとえば CELT にないような特徴のある観測装置を作るという考え方もある。ただし、それが望遠鏡の売りになるかというとなかなか難しい。

3.1.4 まとめ/素案

以上をまとめると、以下のような望遠鏡が考えられる。

例) 超巨大望遠鏡 (CKB)

- 口径 20m 主鏡、8.4m セグメント 6 枚
- AO 不可欠
- 観測装置は
 - － 近赤外コロナグラフ分光器
 - － 高分散分光器
 - － (近赤外広視野撮像カメラも悪くはない?)
- 最終的には複数台作って干渉計化

3.2 スペース望遠鏡

スペース望遠鏡を作るとすると JWST との違いがポイントとなる。ただ、スペース望遠鏡はある程度機能を絞ったものにせざるを得ないこともあり、狙いどころ (ニッチ) はたくさんあるのが地上望遠鏡と違うところである。

3.2.1 クリーンな PSF

JWST も CELT と同様にセグメントミラーを用い、先述したのと同様の問題を持つ。これは単純により小口径でいいから単一のミラーを使うことにすれば良い。

3.2.2 可視近赤外での IFU 分光

Integral Field Unit (IFU) というのはある視野全体の分光情報を得るための焦点部ユニットのことを指し、マイクロレンズやファイバー、イメージスライサーを使うことによって実現できる (図 7)。

得られるサイエンスも豊富で、たとえば

- High- z 銀河の kinematics
- AGN ディスクの高空間分解分光
- 惑星形成領域のディスクの分光

等が考えられる。

JWST ではマイクロシャッターアレイの近赤外多天体分光器を搭載することが決まり、IFU 分光器は見送られた模様で⁸、これを採用することによって JWST と違ったサイエンスの領域を狙うことが可能となる。

3.2.3 近赤外広視野撮像装置

近赤外域での広視野撮像能力をもたせることも非常に魅力的である。これを用いて近赤外でこれまでにないディープサーベイを行うことによってたとえば $z \sim 6$ の初期天体、さらには第一世代の星/銀河の検出が可能になるかもしれない。詳細についてはこの集録の大内発表分を参照して頂きたい。

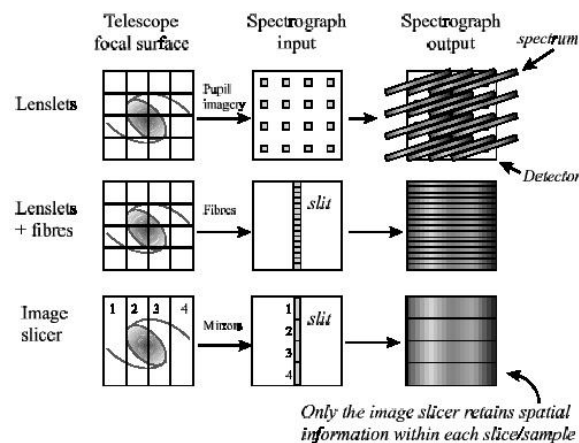


Figure 5 : Integral field spectroscopy possible concepts

図 7: IFU の原理の概念図。上段がレンズアレイを使ったもの、中段がファイバーを使って視野全体をマップし、それをスリット状に並べるもの、下段が視野をミラーを用いて複数のスリットに分割してそれを 1 列に並べるものである。前者 2 方法は最小単位以下の空間情報は失われる。

⁸<http://www.stsci.edu/ngst/instruments/nirspec>

3.2.4 紫外/可視での高空間分解能

JWST では鏡面精度の問題もあり $0.6\mu\text{m}$ より短波長側はターゲットとしていない。高精度軽量単一主鏡を製作して、特に紫外域をターゲットとするのもおもしろいかもしれない。しかし、口径があまり大きくできないことを考えると HST に対してどの程度アドバンテージを取れるかを検討する必要がある。また、TPF など NASA の次々世代望遠鏡がどうなるかも十分に見極めなければならない。

3.2.5 近赤外高分散分光

先述したように、宇宙空間では地上で問題になる近赤外の大気の窓/吸収線の影響から完全に開放される。結果、すべての波長域に渡って高質の近赤外分光データを得ることが可能となる。

近赤外の高分散分光器を搭載することによって、星間物質の吸収線や、クエーサーの吸収線系の観測など地上からは困難/制限のある観測を容易に行うことが可能となる。

3.2.6 まとめ/素案

以上をまとめると以下のような衛星が考えられる。

例) 光学赤外宇宙望遠鏡 (KSUB)

- 高空間分解能/高ダイナミックレンジ望遠鏡
 - － 単一の口径 3m 以上の主鏡
 - * ULE サンドイッチパネル
 - * イオンビームエッチング
 - * 重量 1t 以下
 - － 波長域は UV-可視-近赤外
- コロナグラフ/IFU 分光撮像カメラ ($0.01''/\text{pix}$)
- あるいは超広視野近赤外カメラ ($1^\circ \times 1^\circ$ FOV)

4 現実問題：予算、タイムライン

国家プロジェクトサイズの大型計画にとって避けては通れない問題として、予算と、さらに他の大型プロジェクトとの年度的兼ね合いがある。ここでは少しその問題を見ていきたい。

先に挙げたような計画は、いずれも予算規模としては 1000 億円以上になってくるのはほぼ間違いなく、もはや日本が単独で実行できる規模を越えている。必然的に国際協力を視野にいれた計画にしていかなければならない。

しかしながら、現在の日本、それに国立天文台の予算制度の中にあっては次期大型プロジェクトが完了するまでは他の大型プロジェクトを行うことはほぼ不可能である。即ち、具体的には国立天文台で ALMA 建設が完了予定となっている 2011 年度まではその次の大型計画を承認することすらできないのである。

ところが、現状を見る限りでは他国の大型計画 (CELT 以外) の様子を見る限り、それより先に実際の建設を始めてしまう可能性が非常に濃厚である。このような中でどのように次期計画を進めて行くべきなのか、更なる議論が必要であろう。

5 国立天文台光赤外は何をすべきか

光赤外の将来を考えていく上で、そのコミュニティの中心的存在である国立天文台の光赤外研究系が果たす役割は非常に重要である。

そのような中、コミュニティのために天文台の光赤外が行っていくべきことは大きく以下の三つにまとめられるだろう。

1. 技術開発 (Technical Path)
2. 組織整備 (Organization Path)
3. サイエンスのサポート (Science Path)

5.1 技術開発 (Technical Path)

観測天文学はより高性能の望遠鏡、観測装置を開発し、それを使った観測を行っていくことによって進歩してきた。即ち、新規技術の開発とその実用化は非常に重要な要素である。このような技術開発を支援/実行して行くために『技術ラボ』を国立天文台の独立行政法人化の際に導入が予定されているラボ制の一部として設立する。

具体的には以下のようなものが考えられる。

○ AO ラボ

地上観測で今後必ずキーになる AO 技術の改良などを進めて行く。この技術は地上のみならず、スペース望遠鏡で主鏡精度の補償のために使うことも十分に考えられる。

○ 鏡ラボ

主に衛星に向けた高精度の大口径軽量ミラーの開発を進める。ただ、軽量ミラーはスペースだけでなく地上大口径望遠鏡への応用も十分に考えられる。

5.2 組織整備 (Organization Path)

まず必要なのは、今以上に大学へのサポートを進めるなど大学とより密接した関係を構築してゆくことだろう。具体的には技術開発の分担やそれに伴う予算措置などを進める必要があると思われる。

もう一つは、国際協力体制の整備である。現時点では海外とのコネクションは必ずしも十分とは言いがたい。個人レベルでも組織レベルでも特に欧米の研究者、研究機関、それに企業との密接な関係を構築して行く努力が必要だろう。大げさに言うならば、“Astronomical Businessman” の養成である。このために一番効果的なのは、やはり海外の研究機関への積極的な人の派遣だと思っている。博士取得者が海外のポスドクに応募するように積極的に推奨すべきであるし、スタッフについても機会があれば積極的に出てゆくべきだろう。

もちろん、このようなことを進めつつも現有インフラの整備をおこない、競争力を維持することは非常に重要である。すばるのグループの強化は着実に進めて行くべきである。

また、スペースの計画を進めるのであれば、宇宙研との強い協力関係を構築する必要がある。このためには、人事交流などをおこなってスペースのノウハウを移入することなどを積極的に行わなければならない。

5.3 サイエンスのサポート (Science Path)

先にのべたように 2011 年まで次世代計画が動かない可能性が大きい現在、今後 10 年以上、コミュニティが競争力のある天文学研究を行っていける環境を整備してゆかなければならない。

このためには以下のようなことが考えられる。

- 地上巨大望遠鏡へのアクセスの確保

2010 年頃には立ち上がってくるであろう 30 メートル級の望遠鏡に何とかアクセスを確保する。たとえば、CELT にしても運用費をどのようにするのかははっきりしておらず、運用費協力で望遠鏡時間を確保できる可能性がある。

- すばるの将来

2010 年まですばるが世界のトップクラスの望遠鏡であり続けるために、すばるの将来計画をきちんと策定してそれを実行してゆくべきである。

- 大学の中小計画のサポート

すばるだけではコミュニティ全体の研究要望を満たすにはあまりにも時間が足りない。大学が持っている数億円～数十億円規模の中小計画をしっかりとサポートしていくべきである。

6 実現までの流れ

最後に、具体的にこのような計画を実現するまでにはどのような流れになるのかを簡単に見てみる。

6.1 地上大型望遠鏡を作る場合

地上大型望遠鏡を作る場合、まず ALMA 計画が完了する 2011 年度 (?) までは次期計画は動き出さないとされる。それまでは数十億円程度の中規模計画なら何とかなるかもしれない。以上を前提として話を進める。

そうすると、2011 年まではポイントになるセグメント鏡と AO などの基礎技術の開発に専念すべきであろう。たとえば口径 4m くらいでセグメント鏡の実験用望遠鏡を岡山あたりに建設して、セグメント主鏡の経験を積むと同時に、すばる望遠鏡で AO の技術の改良を進めて行く。同時に、20～30 メートルクラスの望遠鏡の検討を進め、国際協力の体制を整備する。サイエンスについてはすばるのアップグレードを確実に進める。

以上を表 2 にまとめた。

年度	地上大型望遠鏡	サイエンス	
2005	マルチミラー技術開発スタート	すばる	↓
	国内に実験用 MMT 建設開始	↓	↓
	望遠鏡検討開始、国際協力検討	↓	ASTRO-F
2008	サイト調査	↓	
2010	サイト決定	↓	SPICA
2011	望遠鏡建設開始	↓	↓
2018	ファーストライト	↓	↓

表 2: 地上大型望遠鏡を作るための (いい加減な) スケジュール

6.2 スペース望遠鏡を打ち上げる場合

スペース望遠鏡を上げる場合、こちらも SPICA の後、2011 年度以降となる。それまでは修行期間となり、SPICA への軽量鏡開発などの協力などを行うと同時に宇宙研との人事交流を行い、スペースの開発がどのようなものであるかを身につける。その後は口径 3 メートル以上の高精度軽量鏡の開発に精進することになる。

これに関しても大体のスケジュールを表 3 にまとめた。

年度	地上大型望遠鏡	サイエンス	
2005	SPICA スタート	すばる	↓
	↓ SPICA 手伝い	↓	ASTRO-F
2008	↓ 次世代衛星基礎開・ミラー	↓	
2010	SPICA 打ち上げ	↓	SPICA
2011	次次世代衛星本格開発スタート	↓	↓
2017	次次世代衛星打ち上げ	↓	↓

表 3: スペース望遠鏡を作るための (いい加減な) スケジュール

6.3 スペース望遠鏡も地上大型望遠鏡もどちらもやる

要するに、前 2 オプションいずれもやる、という場合である。

これにはもちろん予算の問題もあるだろうが、そもそもマンパワーがどの程度確保できるかが問題になるだろう。

7 最後に

ここまでいろんな人と話をし、それなりに調べてきたが、結論としては何をやるにしても大変で、コミュニティが一丸となって頑張らなければ何もできないだろう、という印象を受けた。

その他にもキーワードとして、

- どのように独自性を出すか?
- 国際協力が鍵

の2つが挙げられると思う。

いずれにしても足りないものはたくさんあって（基礎技術開発、組織、欧米コミュニティとの交流、サイエンスを含めた長期展望 etc....）、どれも急には改善できるものでもない。結局、大きなプロジェクトを少し無理して行わないと欧米に置いていかれてしまうなあ、という不安を感じると同時に、10年、20年の長期的展望を持ちつつ、地道にできることをコツコツと積み上げていく努力も重要だという、ジレンマに苛まれることになるのである。

本稿が、このような難しい状況の中、すくなくとも将来に禍根を残さない将来計画を立てていく助けになれば幸いである。

（文責:本原顕太郎）