

赤外線天文学の将来

アラン・トクナガ

〈ハワイ大学天文学研究所・国立天文台〉

訳：家 正 則

〈国立天文台〉

20 世紀後半の技術革新による検出器と望遠鏡技術の発展に支えられ、天文学上の重要な発見が近年特に加速度的になされてきた。だが、このような発見の時代がいつまでも続くはずはない。波長域・波長分解能・空間分解能の 3 つの次元を持つ「観測多様体」の中での利用空間が爆発的にひろがってきた様子を振り返ると、今後の発展の方向と限界が見えるはずである。赤外線天文学の観測能力も爆発的に進歩しているが、観測多様体の未開拓領域を具体的に同定し、すばる望遠鏡などを用いた今後の観測の戦略について考察する。

1. 歴史的傾向

本日の講義の目的は、天文学の発展がこれまでどのように起きてきたか、将来はどの方向に進むべきかを考えることにあります。私の示す考え方はほんの一例であり、多分より良いアプローチがあると思いますので、大いに議論して戴きたいと思います。

将来のことを考えるには、まず過去のことを振り返る必要があります。手始めに、ハーウィット (M. Harwit) 著の“Cosmic Discovery, The Search, Scope, and Heritage of Astronomy” (1981, Harvester Press Ltd.) という本を引用してみましょう。ハーウィットはこの本の中で、天体物理学上の新しい現象の発見に至った要因を系統的に調べています。何をもって天文学上の重要な発見と定義するかは人それぞれでしょうが、ハーウィットは天文学上の重要な発見を図 1 のようにまとめています。図 1 に見られるように、重要な発見の件数が指数関数的に増えて

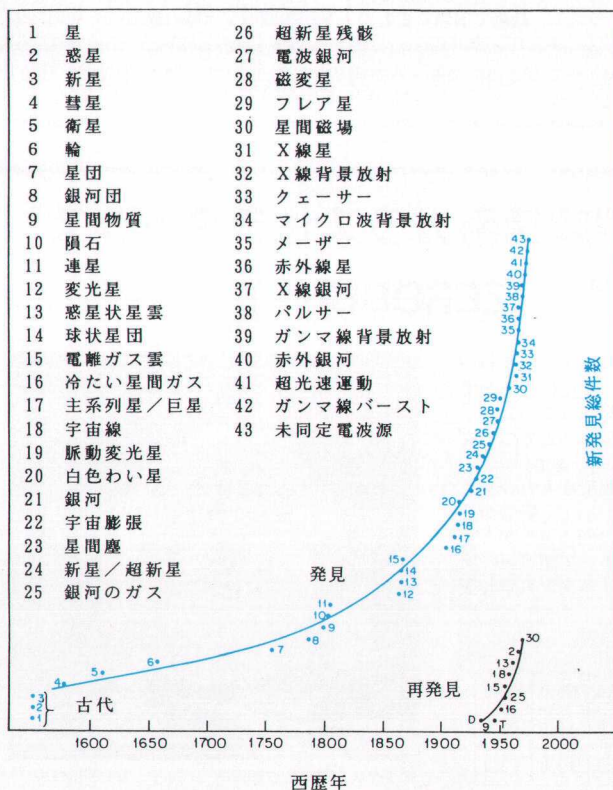


図1 天文学上の重要な発見 (M. Harwit: 1981)

Alan Tokunaga: Future Directions in IR Astronomy: Some Thoughts

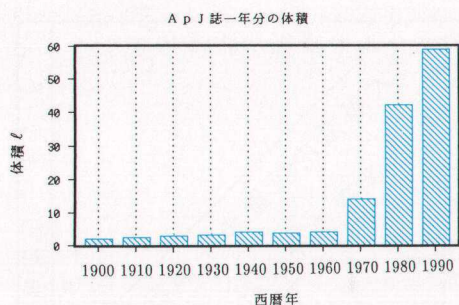


図2 Astrophysical Journal 誌の年間出版量 (体積: 冊) の変化

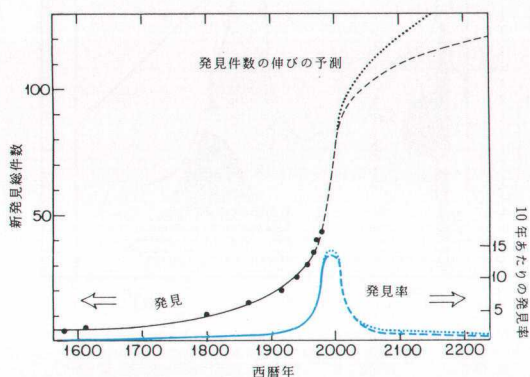


図3 重要な発見の件数と発生率の推移と将来予測 (M. Harwit: 1981)

きていることは、天文学の論文出版量が図2のように指数関数的に増大していることとも符合します。しかしながら、このような指数関数的な増大が無限に続くはずがないことも明かです。実際、ハーウィットは重要な発見の発生率は、図3のようにもうすぐ極大を迎えるだろうと分析していま

す。もしも、彼の分析が正しいとすると、我々は最もエキサイティングな「発見の時代」のまっただ中になることになるわけです。

彼の分析が基本的には正しいことは、まだ未開拓の観測領域がどれくらい残されているかを考えるとうなずけます。実際、観測波長、波長分解能、空間分解能の3次元多様体の中で現在征服されている領域を調べてみると、特に可視域から電波領域にかけては、ハーウィットのいう「観測位相空間」が、すでにかなり埋め尽くされようとしていることが分かります。観測位相空間のカバー状態を、図4に波長と波長分解能の断面、図5に波長と空間分解能の断面でそれぞれ示します。観測位相空間が埋め尽くされれば、重要な新発見の発生する確率は小さくなります。さらに、時間分解能、偏光特性、感度の3次元を加えたとしても、事情は基本的には変わりません。なんだか、あまり未来が明るくないかのような印象を与えたかもしれませんが、一方で、ハーウィットは、発見率の減少は急激には起こらないため、天文学での最後の大発見がなされるまでには今後まだ数千年はかかるだろうと、一筋の救いを残した予想をしています。宇宙線、ニュートリノ、重力波など電磁波以外の情報からの発見も基本的には同じ道筋をたどることになるでしょう。

ハーウィットの分析結果は次の3点にまとめられます。(1)全く新しい天体現象をとらえるには、

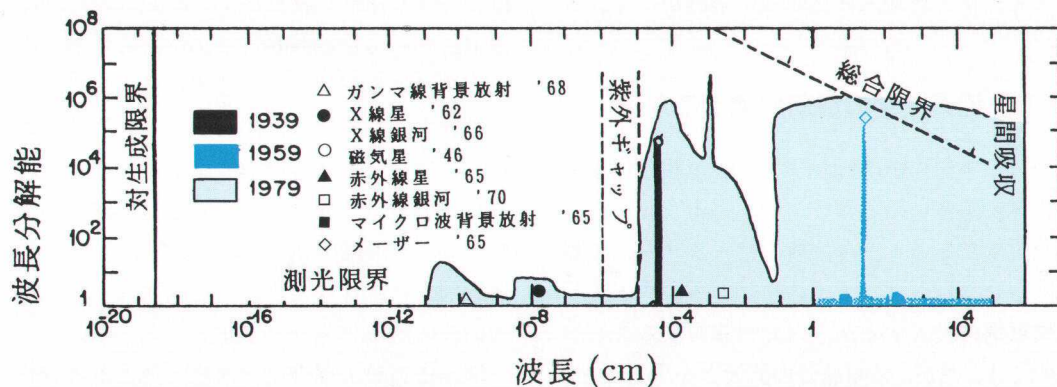


図4 波長と波長分解能の断面で見た観測位相空間の征服領域の変遷 (M. Harwit: 1981)

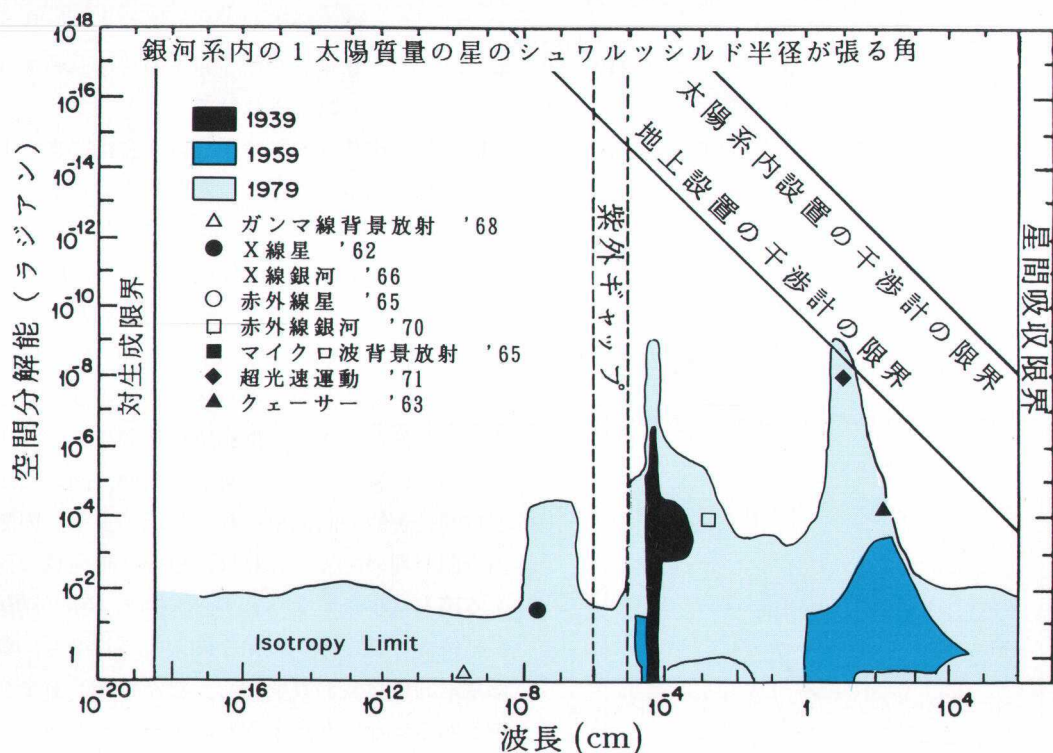


図5 波長と空間分解能の断面で見た観測位相空間の征服領域の変遷 (M. Harwit: 1981)

それまでのおよそ 1000 倍以上の観測能力の向上が必要とされることが多い。(2) 1950 年代以降の重要な発見の多くは物理学者によってなされてきた。(3) これからも新しい重要な発見がなされるようにするには、科学技術政策上の工夫が必要である(これまでも、全く新しい装置を作った小人数の研究者グループが大発見をした事例がいくつもある)。

2. 赤外線天文学の最前線はどこか？

赤外線領域を 1-1000 μm とすると、観測位相空間の未開拓領域に踏み込むには、宇宙空間からの観測が重要であることは、論を待ちません。予算的制限さえなければ、大型の冷却望遠鏡や干渉計を衛星軌道に投入するか、月面に建設することが理想的です。だが、必要経費の巨大さを考えると、少なくとも今後二、三十年間は、まだ現実的には

地上望遠鏡が活躍することでしょう。

たとえ、宇宙空間からの観測でも、惑星間空間に漂う塵による黄道光が存在するため、背景放射を黄道光以下にはできないということも忘れてはなりません。惑星間空間の塵による熱放射成分は波長約 20 μm で最強となり、太陽光の散乱成分は波長約 0.6 μm で最強となります。このため、両成分の谷間にあたる波長約 4 μm の帯域が、遠宇宙の観測に最も有利な窓であると言えます。黄道光の影響を免れるには、観測装置を太陽系の外縁部にまで持って行かねばなりません。そうすれば、背景熱放射は「赤外シラス」として存在が確認されている星間空間塵による成分と 3 K の宇宙背景放射だけになります。最終的にはこの宇宙背景放射が観測限界となります。

地上望遠鏡の場合には地球大気による背景放射が極めて大きく、問題になります。波長 1.65 μm

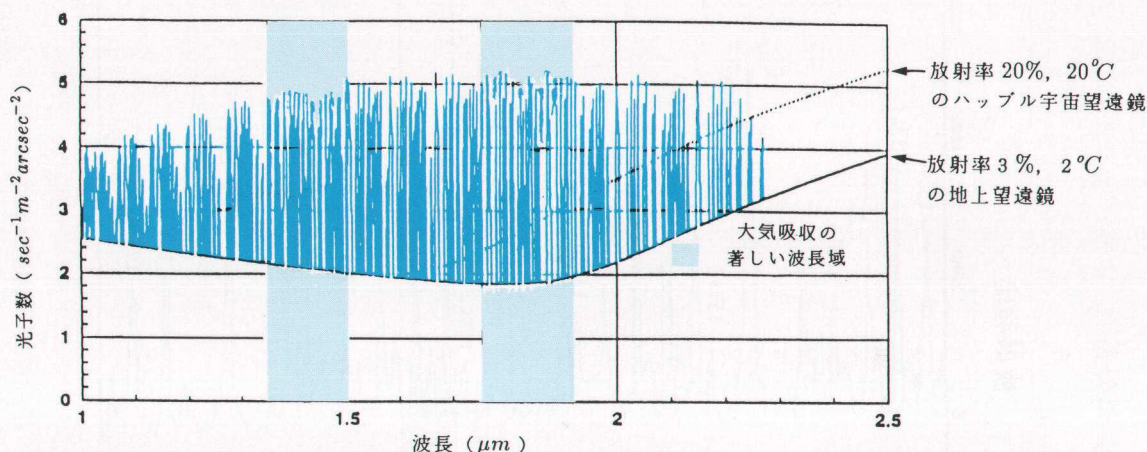


図6 ハッブル宇宙望遠鏡での背景放射(放射率20%, 温度20°Cを仮定)と同一口径の地上望遠鏡での背景放射(放射率3%, 温度2°Cを仮定). (R. Thompson: 1992 Space Science Reviews, vol. 61, p. 69)

のHバンドでは黄道光の約700倍にも達します。望遠鏡自体の熱放射率が例えば10%だとすると、波長10 μm ではこれは黄道光の40万倍もの背景光に相当することになります。地上観測での背景光放射は赤外観測にとって厄介なしろものですが、以下に述べるいくつかの工夫で、状況を大幅に改善する余地があります。

2.1 南極へ行こう

図6はハッブル宇宙望遠鏡(HST)の背景放射と、高度4200mのマウナケア山頂に設置した同一口径の望遠鏡の背景放射のレベルを比較したものです。Hバンドでは、HSTの背景光は黄道光と望遠鏡の熱放射だけですから、そのレベルは100光子/秒/平方米/平方秒角程度です。地上望遠鏡の場合、OH輝線の波長では背景光強度はほぼ1000倍にも達します。だが、波長2.3 μm 以上では(少なくとも2.8 μm までは)OH輝線はありません。実際には、2.5 μm 以上では大気吸収の影響がありますから、その合間の波長域2.3-2.5 μm では望遠鏡の熱放射を低くすることさえできれば、非常に感度の高い観測が可能となります。冬季の南極点では気温が-60°Cにも達することがありますので、このような時には望遠鏡からの熱放射は

570分の1になります。これは黄道光の強度とほぼ等しく、この目的に限れば、宇宙望遠鏡を打ち上げた費用よりはるかに小額の予算で非常に高感度の観測ができることになります。

このため、シカゴ大学のグループは南極点に口径60cmの望遠鏡を持ち込んで、2.3-2.5 μm 域での試験観測を1993年夏(南極の冬)に行うことを計画しています。うまく行けば、より本格的な2.5m級の望遠鏡を設置して、継続的な観測を行うことが検討されています。水蒸気の少ない南極は遠赤外線やサブミリ波の観測にも適しています。

2.2 OH輝線の隙間を見よう

1-2.3 μm のOH夜光輝線が強い波長域でも、波長分解能が1000以上の分光観測モードでは、OH輝線の合間を縫って観測することにより、背景光にじゃまされない観測ができます。分散を大きくするとOH輝線の合間には背景光が低い波長域があることが、図7により確認することができます。非常に高感度な近赤外検出器が利用できるようになったこともあり、特に大型望遠鏡での高分散分光に期待が高まっています。1-2.5 μm での高分散分光では大型地上望遠鏡のほうが

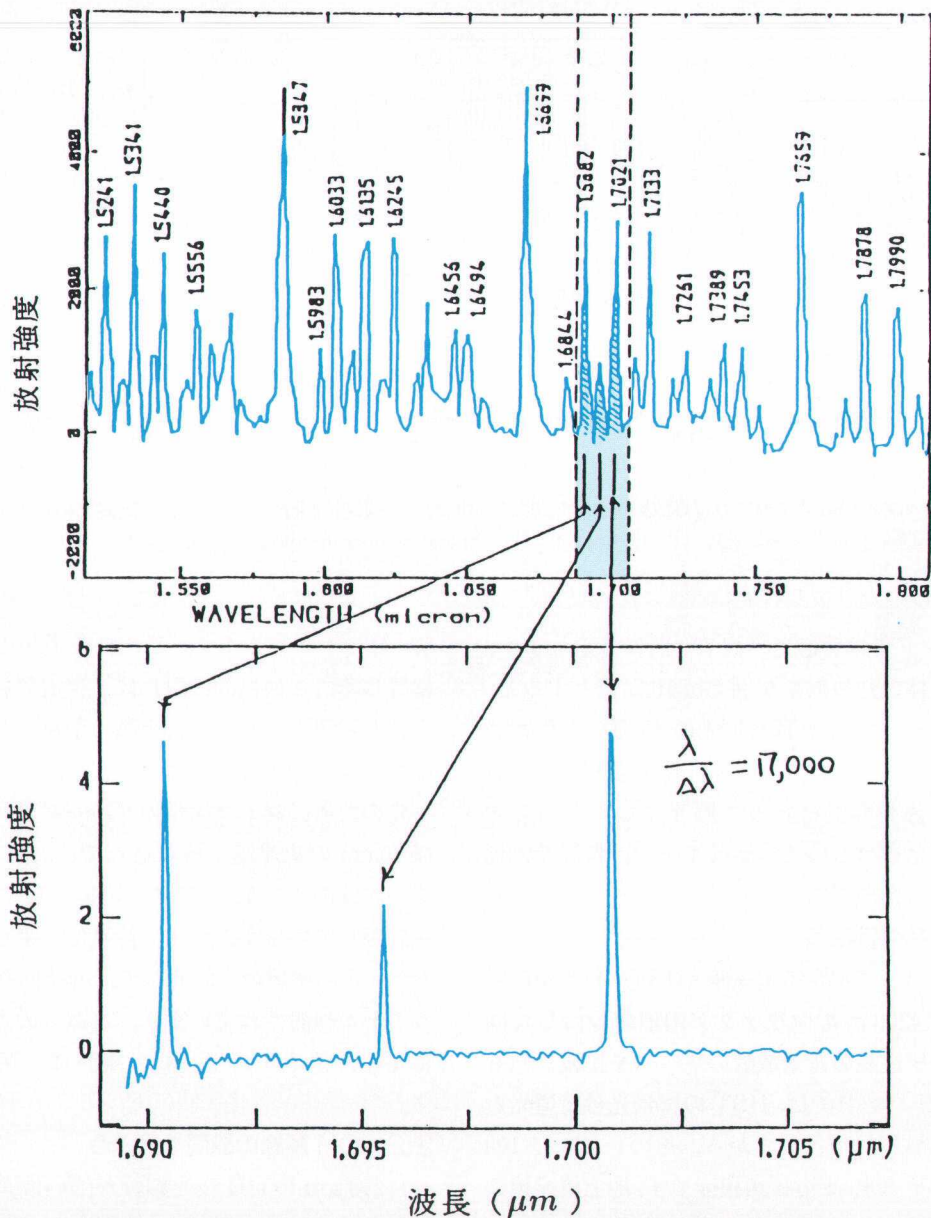


図7 OH 輝線スペクトル。(上) Moorwood (1987), (下) Maihara et al. (1993)

HST に勝る観測能力を持つことになります。

2.3 OH 輝線を除去しよう

京都大学の舞原博士のグループはOH 夜光除去分光撮像装置を試作しました。この装置は、1—1.8 μm の光を一旦分光して、OH 輝線成分を取り除き、光を再度白色光に合成してから、改めて撮像や分光観測を行うというものです。このユニー

クな装置は、OH 輝線を取り除くことにより背景光レベルを約 30 分の 1 に減少させて、波長分解能 100 程度の低分散分光やスリット撮像ができるという特徴を持っています。背景光を 100 分の 1 程度に抑えた装置をつくり大望遠鏡に設置すれば、HST と対等な性能を達成できるはずです。

2.4 背景熱放射を最小にしよう

波長 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上では、熱放射が決定的になります。放射冷却現象を利用するか冷凍機で積極的に冷やした望遠鏡を宇宙空間に打ち上げることができれば、この波長域では撮像と低分散分光では究極の感度を達成することができるようになります。しかしながら、地上望遠鏡でも二つの方法で熱放射を減らす工夫ができます。第一に、点光源の場合には、できるだけ大きい望遠鏡をつくり、その回折限界で観測することで背景放射を最小にすることができます。背景放射で感度がきまるカメラを回折限界で用いる場合には、望遠鏡口径の逆 4 乗に比例して露出時間が短くてすみます。従って、 $8-10\ \text{m}$ 級の地上望遠鏡は $10\ \mu\text{m}$ 帯での天文学にぴったりなのです。

地上望遠鏡のもう一つの活路は高分散分光です。波長 $10\ \mu\text{m}$ 、波長分解能 10 万の観測では、背景光は黄道光のほんの 5 倍程度でしかありません。ここでは、高価な軌道望遠鏡での観測は地上望遠鏡での観測と比べてあまり大きなメリットがなくなります。

2.5 干渉計をつくろう

これまで述べた工夫は感度の向上が目的のものでしたが、解像力の向上も大きな課題です。人類が達成できる究極的な解像力は、図 5 に示したように地球もしくは太陽系の大ききで決まる回折限界が現実的な限界となります。しかしながら、現状では可視光も赤外線も、これよりずっと短い基線長での実績しかありません。四台の $8\ \text{m}$ 望遠鏡からなる VLT も、二台のケック $10\ \text{m}$ 望遠鏡も、干渉計としても動作するように設計されています。これらの干渉計は基線長が $200\ \text{m}$ 以下ですが、微かな天体の高解像観測に活躍するでしょう。基線長のもっと長い観測は別の専用装置(例えば、オーストラリアの基線長 $640\ \text{m}$ の SUSI 干渉計など)で実現されるでしょう。

赤外干渉計やサブミリ波干渉計の実験計画が他にも検討されていますが、これからの 10-20 年間

は地上望遠鏡や軌道望遠鏡を用いた本格的な干渉計を構築して高解像観測を実現することに、かなりの努力が注がれることは間違いないと思われます。

2.6 広視野と高時間分解能で

位相空間を広げよう

画素数の非常に大きい赤外線検出器が利用できるようになってきたため、視野の広い赤外線観測が可能となり、赤外線での掃天観測が始まりつつあります。個人的な見解ですが、重要な発見をもたらす可能性が最も大きいのは、近赤外線での全天サーベイ観測だと思っています。全天を近赤外の 2 色で、少なくとも 2 度にわたり、これまでの 100 万倍の感度で観測できれば、そのチャンスがあるのではないのでしょうか。これは技術的には充分可能です。このような観測計画が南極点望遠鏡計画や 2 MASS 計画、上野氏たちの銀河面サーベイ計画などとしていくつか具体的に検討されています。

3. 赤外線検出器の発展は偉大な発見をもたらしたか?

大胆な物理学者が単一チャンネルの測光器を携えて天文台に出かけることから始まった赤外線天文学は、今では感度が 10 万倍もあり画素数も 64000 にも及ぶ検出器を駆使する時代となっています。新発見に至るには一般に約 1000 倍の進歩が必要であるという先の議論を考えると、赤外線天文学でも当然何か新しい発見があつてしがるべきです。それなのに、センセーショナルな新発見がまだなされていないのはなぜでしょうか。理由は 4 つほど考えられそうです。

(1) 新発見の対象となる現象はデータとしては記録されているが、まだだれも気がついていないのかもしれません。例えば、キューサー 3C 273 は 1887 年のハーバード掃天観測で撮影されていましたが、電波観測とスペクトル観測でその特異性に着目されるまでは、新しい種類の天体

であることに気が付かなかったことを、想起してください。

- (2) 赤外カメラで撮影された天域はまだ非常に限られており、観測位相空間でカバーされた領域が不十分なためかもしれません。
- (3) 赤外検出器で調べられた観測位相空間中には、本質的な新現象は存在しないのかもしれませんが。実際、新しい観測機能が実現したとしても、新発見につながるという保証はないのです。
- (4) ハーウィットが間違っているのかもしれませんが。あるいは、少なくとも彼の分析の一部に誤りがあるのかもしれません。

4. 世界の観測天文学の状況と「すばる」望遠鏡

現在、大望遠鏡と観測装置が世界中でまさに爆発的に作られようとしています。これは今後100年が天文学の「黄金時代」となることを意味しているのでしょうか。そうだとすると、「すばる」を最も有効に使って成果を出すために、他の装置をも使って研究を総合的なものにするなどの創意工夫を凝らすことが大切となります。

「すばる」望遠鏡の使命は何か？ 天文学の最前線を「すばる」でどう切り開くか？「すばる」が他の望遠鏡を凌ぐ観測位相空間領域はどこか？「すばる」は他のどの装置と連携するのが最も有効か？

「すばる」望遠鏡には、もちろん、良い観測装

置と目的意識のはっきりした熟練した観測天文学者が不可欠です。斬新なアイデアに基づく野心的な装置はどうやったら生まれるのでしょうか？ 不断の装置設計、試作、改良の努力が決定的に重要です。観測天文学を行いながら、これを可能にする複数の小型望遠鏡が利用できることも大変重要なポイントです。「すばる」の利点を生かすために、気象条件やシーイングの良い夜を有効利用できるように観測プログラムの最適スケジューリングの確立も重要な課題です。

私の結論は、未来は明るい（赤外の言葉では熱い）ということです。私ももう一度若い大学院生時代に戻れればと思います。「すばる」を超一級の観測装置とするために、本講義で述べた問題についてより深く考え、常日頃から議論することが大切だと思います。

訳者注：本文は国立天文台客員教授として1992年から1993年にかけて約半年間滞在したハワイ大学天文学研究所のアラン・トクナガ博士が行った6回の講義の内の1993年4月13日に行われた第4回目の講義内容の抄訳です。講義はハワイ大学の協力を得て国立天文台が建設を進めている「すばる」望遠鏡で目指すべき天文学を考えるという視点でなされましたが、前半の科学進化論は他の科学分野にも当てはまる考察と思います。2章の内容で専門的な部分は御本人の了解を得て、論旨を再構成しました。

