

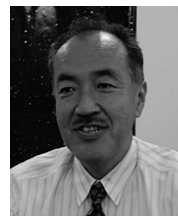
究極の宇宙サーベイ その2



八木



川野元



谷口

八木 雅 文

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yagi.masafumi@nao.ac.jp

川野 元 聡

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kawanomoto.satoshi@nao.ac.jp

谷 口 義 明

〈放送大学 〒261-8586 千葉市美浜区若葉 2-11〉

e-mail: yoshiaki-taniguchi@ouj.ac.jp

究極、それはいつも儚い。一つの究極は一瞬の後に破られる運命を自ら持っている。それでも人々は究極に挑む。限らない可能性とロマンをいつも追いつける……本稿では「究極の宇宙サーベイ」¹⁾に引き続き、将来の夢の光赤外サーベイ計画を夢に見つつ、おそらくは今まであまり考えられてこなかった細かい論点を比較的眞面目に検討してみたい。本稿はいわゆるひとつのスペース・ファンタジーの構築を試みた小論である。

1. 究極の再確認

以下、読者の皆様は2017年9月号の記事「究極の宇宙サーベイ」¹⁾(以降「その1」)を読んでいるものとして話が進みます。未読の方はお手数ですがバックナンバーを探してお読みください。

1.1 究極の限界

さて「その1」記事の初稿を読んだ私(筆者1)は、最初の1週間ほどの間は「月面望遠鏡群にとって難しい点はどの辺に来そうか」をあれこれ考えていました。細かいところまで気になるのは私(筆者1)の悪い癖です。そして、いろいろ考えていると往々にして思考は発散し迷走します。

うだうだと考えているうち、「φ4,000 m望遠鏡4,000台で全天サーベイって、本当に『究極』なんだろうか?」と疑い始めてしまいました。「最強はインフレする」というジャンプの法則の亜種みたいなものなのかもしれません。

そんなわけで宇宙に思いを馳せてみました。目を閉じて宇宙空間の中に観測者が漂っていることを想像します。どっちを向いても宇宙、どこまで行っても宇宙、そんな遥かな星を数える夢の旅人にとって究極の観測とはどういうものになるのでしょうか。そして気づいたのです。光赤外線観測を行おうとした場合、究極の観測限界がどこに来るかといえば「可視近赤外域の光が来なければ、

光赤外線での情報は得られない」という点ではないか*1！ と。逆に考えれば究極の観測とは、「届いた光の情報を余すところなく全てしぼり取る」ことになるでしょう。干渉などの厄介事はひとまず考えず、独立な光子がぼつぼつとやってくるモデルに単純化すると、「光の情報」とは、個々の光子のエネルギー、運動量、スピン、そして到着時刻になります。このようなモデルにおける究極の光赤外線観測とは、ある観測地点において、そこに来た光子のエネルギー、運動量ベクトル、スピンを、時刻情報をつけて記録していくことである、というのが「究極の（光赤外線）観測とは何か」というお題に対する私（筆者1）の答になりました。

その光の記録を撮像情報に戻すには、エネルギーがある範囲に入る記録だけを選びだし、見たい天域内で最終的な画像の画素（ピクセル）に相当する位置の中心を少しずつ動かしながら、画素中心方向と運動量ベクトルのなす角が画素サイズ相当の角度以下のものだけさらに抜きだして、スピンのことは忘れて*2、ある時間当たりの光子の個数、あるいはエネルギーの総和を計算して画素を埋めてやれば良いはずです。そういう検索要求を光の記録のデータベースに投げれば良いはずです。一方、エネルギー範囲を狭く区切りながら計算してやれば分光になります。光子を数える箱の条件だけの違いです。なお、画素に格納する光の強度情報については、本来はエネルギーの総和を数える方が自然な気もするのですが、この後の統計の議論を単純化するために、エネルギー範囲

（BバンドやRバンドなどのフィルターのバンド幅）を区切ったうえで、光子「数」で考えるという単純化をしています。現在でも、観測装置としてCCDやCMOSや赤外アレイを使うと、結局光子「数」を数えているので、これと同じです。

このとき、光の強度の観測精度はどうなってるかという、天文学で観測する可視近赤外光は確率過程で出てくるはずなので、一定時間内に観測される光子数は、まあポアソン分布に従っていると仮定しても大きな狂いはないでしょう。ここでは、観測時間に相当するある時間の間に、ある方向に向けて発せられる光子の数は天体から出てくる時点でポアソン分布で近似できている（はず）*3、また、天体から観測装置に届くまでの光子数の増減は全て独立な確率過程である、という仮定を置いています。このような場合、天体の明るさの誤差の下限は、観測される天体からの光子数の平方根に反比例して決まります。光子数は、単位を適切に揃えたうえで、（見ている天体の明るさ）×（見ている天体の範囲）×（エネルギー範囲）×（観測時間）×（光を受ける面積）になります。これが何を意味しているかと言えば、

- ・ 光を受ける面積（これは望遠鏡で言えば口径の2乗になります）
- ・ 観測精度（光子数の逆数の平方根）
- ・ 限界等級（天体の明るさの逆数（の対数））
- ・ 角度分解能（見ている天体の範囲の逆数、ただし分解能の下限は天体の広がり（シーイング）で決まってしまう）

*1 いや、もちろん、光が来ないということも一つの情報ではあるのです。「便りの無いのは良い便り（no news is good news）」ということわざもありますし。しかし今回はその方向はちょっと忘れておきます。

*2 スピン（＝円偏光情報）については、直線偏光を考える際には量子的な混合状態として考える必要がありそうだと思うところまでは、専門家に話を伺ってなんとなくわかった気になっているのですが、まだ完全には理解できてません。どなたか機会ありましたらご教示ください。

*3 仮に厳密に1秒に1光子発するような不思議な天体があったとすると、その天体の観測はポアソン統計に従わなくなる可能性があります。途中で0.1%にまで減光されるとかでない限り。（……とか書いていたら、「1秒に1回光のような人工天体（宇宙灯台？）を太陽系内で使おうと、太陽系内天体のサーベイに有用だったりしないだろうか？」という議論が始まってしまいました。けれどもこれは別の議論。いつかまた別の時に話すことにしよう。）

- ・波長（エネルギー）分解能（エネルギー範囲の逆数）
- ・時間分解能（観測時間の逆数）

のどれかを犠牲にせざるをえない、ということなのでした。例えば、望遠鏡口径が決まっている中で0.1秒なり0.01秒なりの高時間分解観測を行いたいときには、測光精度が低く（例えば0.1等より悪く）ても我慢するか、対象を明るい天体だけにするか、あるいは、波長範囲をVバンドではなくV+Rに広げるか、などなど、他の何かは妥協をしなければならないということです。あちらを立てればこちらが立たない感じ、どこもなく不確定性原理っぽい何かを感じます。もっとも、光を受ける面積は無限に増やせそうな気がします。これが天文屋が際限なく大きな望遠鏡を欲しがる理由です。「もっと光を！」²⁾です。望遠鏡の口径を大きくすることには、このように「受光面積を増やす」と「角度分解能を上げる」ことの二つの意味があります。「その1」の議論でも面積が本質的だったのですが、その観点では空間分解能を1桁諦めて、4,000 mの代わりに400 mを100台で同じ天域を見ることにしても、この後の議論は概ね変わりません。

2. 観測所候補地

西暦2017年現在で天文学の観測をしようとして問題になるのはやはり地球大気存在でしょう。大気は有限の温度を持ち、波長に応じた放射率で電磁波を放射し、そして波長依存の吸収率で背後から来る天体由来の電磁波を吸収してしまいます。また、大気は有限かつ温度に依存して変化する屈折率を持つので、乱雑な温度構造を持つ大気は透過率の高い波長帯域であっても透過する電磁波の波面を歪めます。大気層の底で実施する観測において、十分な観測時間を投入した際に到達できる最高の信号雑音比（S/N比）は大気による吸収および前景放射が支配し、最高の角度分解能は大気揺らぎが支配することになります。これら

の影響から逃れるために西暦2017年の人類は地球大気層のできるだけ外側—高山さらには衛星軌道—に望遠鏡を設置するべく努力し、これにある程度成功していると言ってよいでしょう。

さて、我々は次はどこに向かうべきなのでしょう？ 現在、軌道上の宇宙ステーションでは少数とはいえ人が長期間生活できていますが、月や火星や木星などには人はまだ居住するに至っていません。地球以外の惑星や衛星などの自然天体上に設置された望遠鏡もありません。僕ら（筆者1 & 2）の生まれてくる前にはもう、アポロ11号は月に行ったというのに、これはどうしたことでしょう。そんなにも人類は重力に魂を縛られているのでしょうか。

「その1」では月面望遠鏡の夢が語られましたが、果たして月面が最善なのか、それとも他の場所がいいのか、「宇宙サイト調査」や、またその前段階の「サイトに対する要求仕様決定」が必要でしょう。この点については、過去いくつかの検討報告があります。一例を挙げると、Lesterら³⁾では、月面と地球衛星軌道やラグランジュ点のような自由空間を比較し、自由空間よりも月面が優れている点は特に無いと論じています。もっとも、Lesterらでは長期間継続しては観測所を運用しないという前提を置いていました。一方、本稿の考える究極のサーベイの運用期間は、とりあえず100年を想定しています。また、4,000 mの口径を想定した検討はされていなかったでしょうから、究極のサーベイでは最終的に異なる結論が出る可能性もあります。サイト調査は一般には極めて困難かつ多岐にわたる作業ですが、本章では以下いくつかの「究極のサーベイ」に特有かと思われる要素について議論を試みます。

まず、現在の観測装置の延長として開口4,000 mの望遠鏡を考えると、巨大な構造体であることからの共振周波数の低下—変位の伝播速度が音速だとして、構造全体に伝わるのに1秒近く掛かるでしょうから、系全体の共振周波数は1へ

ルツとかそれ以下になりそうです—とそれに伴う制御の難しさが発生すると考えられます。不測の擾乱を受けるような環境は設置場所としてあまり適さないこととなります。大気を持つ天体上に設置すると風の影響を避けられないため、大気をもたない小天体の方が候補としては適切と思われる。月はどうでしょうか？ 月には月震があります。もちろん規模は地球の地震に比べて非常に小さいものですが、地震波の周期が1ヘルツ程度と望遠鏡の固有振動数に近く、また減衰が遅いと言われているようですので、精密制御が必要な巨大構造物を設置するのにはあまり向いていない可能性があります。また、地球の潮汐力が多くの月震を引き起こしていることを考えると、母天体の潮汐力の影響を強く受ける衛星はできれば避けたほうが良さそうです。

いっそのこと巨大な人工プラットフォームを建設するほうが筋が良いかもしれません。せっかく作るなら天然天体にはない特性を持たせられないか？ というので、黄道面から遠く離れた位置に置く可能性を考えてみましょう。例えば黄道極方向に太陽光の放射圧で支持されるプラットフォームを設置する案はどうでしょうか。この案は観測の邪魔になる黄道光を軽減するという観点で絶大なメリットがあります*4。太陽系内に太陽の重力に束縛されない物体を置くのはなかなか難しいでしょうが可能性は検討してみます。太陽の総放射量を 3.9×10^{26} [W]、距離を1 [au] (1天文単位)、光速度を 3.0×10^8 [m/s]として⁴⁾、放射圧は 3.9×10^{26} [N m/s] / $(4\pi \times (1.5 \times 10^{11}$ [m])² × 3.0×10^8 [m/s]) = 4.6×10^{-6} [N/m²]、太陽による重力加速度は万有引力定数を 6.7×10^{-11} [N kg⁻² m²]、太陽質量を 2.0×10^{30} [kg]として⁴⁾、 6.7×10^{-11} [N kg⁻² m²] × 2.0×10^{30} [kg] / $(1.5 \times 10^{11}$ [m])² = 6.0×10^{-3} [N/kg] だから、1 m²あたり 7.7×10^{-4} [kg]以下で作れば軌道運動がなくても浮いていられる

こととなります。口径4,000 mの望遠鏡をどの程度の質量で作れるかはよくわかりませんが、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) が6.5 [m]/6,200 [kg]なので⁵⁾ 口径比の2乗 (3乗ではなくて) を掛けて 2.3×10^9 [kg]程度とします。これを放射圧だけで支えるためには 3×10^{12} [m²] = 1,700 km四方の面積を持つ (質量ゼロの) 帆が必要で、これはやっぱり難しそうです。さらに、太陽の放射圧がどれだけ安定なのかも不要要素となります。

では、直径10 km程度の小惑星 (太陽系小天体) 上に開口4,000 mの望遠鏡を作ることを考えてみます。メインベルト小惑星で大きさが10 kmだとまあ 10^4 個程度はあるので⁶⁾、1,000台の望遠鏡を作るのに数が足りないということはありません*5。スケールの小惑星そのものを中空にくくり抜いて光路にすることになるでしょうが、必ずしも強固な岩盤でできているとは限らないので、補強しないと崩壊するかもしれません。自転軸を光軸とし、適切な角速度で回しておけば遠心力でうまく保持されるでしょう。視野が回転してしましますが、これは一定の角速度で観測装置を逆回転させればキャンセルできるので補正しやすいです。10 kmスケールの小惑星の表面重力は地球のその数千分の一で、中抜きにしているともう少し小さくなっているでしょう。中空構造体の内部の、分布を持つ微弱重力下で適切な鏡面が自然に保たれるような解があれば望ましいのですが、これは未検討です。

さらに別のアイデアとして、例えば軌道長半径が100天文単位の黄極軌道に乗せられると、一周が1000年ですので、数百年にわたり黄道面から離れた場所で視差運動もほとんど発生させずに観測を行うことが可能となるでしょう。ただ、この場合は太陽系内で動かないという性質が逆に災いして、太陽の方向は数百年にわたりずっと観測

*4 黄道極方向に黄道面からどれだけ離れると黄道光がどれだけ軽減するかの情報は見つけられませんでした。

*5 10%の割合で人類の手の入った小惑星になっているというのはそれはそれで壮観。

できないというデメリットがあります。究極のサーベイでは全天を常に観測するつもりなので、2カ所以上への望遠鏡（群）の設置はそもそも不可欠なのですが、1年程度の短時間で周回する場合と違い、視野と望遠鏡が長期間1対1対応してしまうことで天域ごとの系統誤差を消しにくくなる恐れもあるでしょう。

さて、ここまでは「鏡をどこに置くか」だけを考えていて、電力や通信のことは考慮していませんでした。望遠鏡の電力は太陽電池だけで賄うのだとすれば、少なくとも太陽に当たっている面がある程度維持しなければなりません。例えば月面に置く場合には、極付近以外では太陽が半月ずっと当たり、半月は当たらないということになるため、相当大規模な蓄電池が必要になるでしょう。逆にこのことから極付近しか設置場所になりえないのかもしれませんが、また、遠距離の宇宙空間、例えば100天文単位の距離まで持っていくと太陽の光量は1万分の1程度、満月の数十倍程度になってしまいます。必要な太陽電池の面積は非常に大きくなるかもしれません。また、データを使う研究者が地球上にいとすると、観測所から観測データをどのように研究者まで届けるのかも大きな問題になりえます。この点は後ほど議論します。

もう一つ重要な観点はメンテナンスです。我々が簡単にアクセスできない場所に装置を送り込む場合には、メンテナンスが不要、あるいは遠隔から行えるようにしておく必要があります。これは今も広く行われている人工衛星ミッションと同じなのですが、100年にわたり運用しようと野望を抱くと、それに伴う問題が出てくるでしょう。例えば現在広く使われているような観測素子では100年はもたないでしょうから、予備の素子を積んでおいて適当な時期に遠隔操作で交換するのか、あるいは頑張って修理に行くのか、運用体制も考えなければなりません。この辺りは500年後

には現在よりは簡単にできるようになっていて欲しいものです。また、地球外の宇宙ステーションやスペースコロニーに人類が常駐するようになっていて、その人の住む所のすぐ近くに観測所を設置するようになっていたのであれば、また大いに話が変わってきます。それでもメンテナンス中に観測ができなくなることは、おそらく未来の技術でも避けられないでしょうから、同じ場所を観測する望遠鏡は、「その1」で議論されたような最小限の4,000台ではなく、多重化しておくことは最低限必要なのかもしれません。例えば空間分解能を多少犠牲にして4,000 m 1台を3,000 m 2台あるいは、2,500 m 3台にするというのも一つの解決策です。

3. 宇宙シーイング

西暦2525年の光学赤外線天文学がどのような姿になっているのかはもはや想像もつきません。例えば真空の屈折率を自由に操作できる技術を手に入れていれば、物質でできた光学系を使わずに結像系を構成することが可能になるでしょう*6。ですので、現在想像できる観測上の技術的な問題は解決されているものとして思考実験を続けましょう。とはいえこの時代の地球文明が依然としてサーベイ観測をやりたがっているという前提があるからには、時空間を自在に操る技術は存在しないと思ってよいでしょう（もしそのようなものがあるなら直接観測したい場所へ行ってみれば良いのだから……つまりタイムマシン⁷⁾とかどこでもドア⁸⁾は禁止)。つまり、技術的な制約として時空間を操ることは不可能でも、それ以外の困難は概ね克服されているものと仮定します。

そうすると例えば探査機の飛行速度は光速度までで、結果が出るまでに何世代も掛かるような計画は多分優先度が下げられるでしょうから（そもそも500年後って、現代からたったの20世代分

*6 どうかそれくらい実現しておいてほしいのですが、さてどうなりますでしょうか。

しか時間が経っていないのです), 直接観測が及んでいる領域はもしあったとしても距離はたかだか数百パーセク程度以内で(仮に今日, 光速度で飛べる探査機を上げたとしても!) 方向も数個程度以下に限られているでしょう. 500年後にも宇宙空間のごく狭い範囲で飛んでくる光子をただ待ち受けているという意味で質的に変わらない観測をしているなら, 西暦2017年の我々が究極の観測を制限するものについて考えることに意味はあるかもしれません.

地球大気の影響から逃れた人類の前に次に立ちふさがるのは何でしょうか? 直接さわれる範囲の現象については全て技術的に解決されているという前提なので, 宇宙空間での高エネルギー粒子その他の現在の観測装置だと影響を受けそうなものは問題にしません.

500年後でも手を出せずに残っていそうな問題として, 光子が宇宙を伝播してくる間に受ける擾乱による波面の歪みを考えてみます. まず, 惑星間空間プラズマ(まあ太陽風と言って良いでしょう)による波面揺らぎを考えてみます. これは電波で惑星間シンチレーション(interplanetary scintillation)⁹⁾として知られているものが可視近赤外域ではどうなるかという議論になります. 地球軌道周辺で完全電離を仮定して電子密度を N_e とします. プラズマの屈折率 n はプラズマ周波数を ω_p として $n = \sqrt{(1 - \omega_p^2/\omega^2)}$ と書けます. $\omega_p^2 = N_e e^2 / \epsilon_0 m_e$ ですから, 波長 λ に対して $dn/dN_e = \lambda^2 e^2 / (8\pi^2 c^2 \epsilon_0 m_e)$ となります. 屈折率揺らぎのスケールを L とすると, 屈折率が周りど dn だけ異なる媒質中を長さ L 通過する電磁波は長さ Ldn/n だけ遅れますが, この遅れの空間的変動も L 程度の長さなので波面の方向は結局 dn/n 程度変わることになるでしょう. n は1程度として, 波長 $1 \mu\text{m}$, dN_{me} を 3×10^6 個/ m^3 とすると, $dn = (1 \times 10^{-6} [\text{m}])^2 (1.6 \times 10^{-19} [\text{C}])^2 (8 \times \pi^2 (3.0 \times 10^8 [\text{m}])^2 (8.9 \times 10^{-12} [\text{F/m}]) (9.1 \times 10^{-31} [\text{kg}])) dN_e = 4.4 \times 10^{-28} [\text{m}^3] dN_e [\text{m}^{-3}] = 1.3 \times 10^{-21}$ 程度ですか

ら, 波面の進行方向のずれは 2.8×10^{-16} 秒角. さすがにこれは問題にはならないでしょう.

銀河系内星間空間はどうでしょうか? 驚いたことに分子雲による星間空間シンチレーション(interstellar scintillation)の先行研究がありました. Habibiら^{10), 11)}によれば, 遠方にある視直径の小さい天体の光は近傍の分子雲によって屈折を受け, 主に明るさの変化として観測に掛かる可能性があるようです. この明るさの変化は屈折面でもたまたま集光されたり発散されたりで起きるようですが, このときの屈折角を概算すると 10^{-6} - 10^{-7} 秒角に当たります(100-1,000パーセク先の2-3万km). まだ波長 $1 \mu\text{m}$ での口径4,000 mの回折限界には1.5桁ほど余裕がありますが, そろそろ2017年の我々の知らない何か邪魔をしそそうな気配もあります. また, 明るさの変化の時間スケールが数分程度, 変動(モジュレーション)が0.01-0.1あたりなので, 観測の時間分解能と測光精度の観点からも影響がないかどうか検討する必要があります.

銀河間空間まで行くとどうなるのでしょうか. 問題設定としては「宇宙の果ての点光源は, 銀河系外ではどのくらいの見かけの大きさ(何秒角)に見えるのだろうか」です. この点については次章後半で多少触れてはいますが, 十分な検討ができてはいません. 将来の検討課題です. また, これは別の問題として, 数度角サイズの画像データを1マイクロ秒角やそれより高い精度で重ね合わせようとする際に, 位置合わせの技術的問題や, マイクロレンズ効果による問題^{12), 13)}が発生しますが, これらの点の議論も本稿では省略します.

4. 考えていた究極はどのくらい究極なのか

さて, 4,000 m望遠鏡は地球の外に置くとして, 「その1」で示されたような40等あるいは45等の太陽系外縁天体や遠方天体を観測することはどのくらい究極なのか, 別の角度から計算してみます.

4.1 太陽系外縁天体

実際の観測では狙っている天体の光子に加え、ほかの天体や背景からの光の混入が必ずあり、そこが消せない誤差として圧倒してきます。どれが天体からの光子でどれが他の混ざり物なのかという判断は観測というよりは解析の領分なので、そこはひとまず脇に置きつつ、まず、「その1」で出てきた「40,000天文単位 (au) くらいにいる太陽系外縁天体」を検出し、例えば0.1等の精度で観測する場合を具体的に検討してみましょう。0.1等の精度が欲しい場合、許される誤差は10%ほどなので、最低でも光子100個くらいは必要です。この条件でまず考えます。2章では太陽系内に固定しておく案も検討はしましたが厳しそうでしたので、ここでは観測機器が地球と同じ速度で太陽を公転している場合を考えます。このとき、主に観測者の公転による視差が効いて、黄道面の衝付近で、見かけの位置は1秒間あたり1マイクロ秒角動きます。相手までの距離がわかっていない前提では位置を追いかけてながらの積分はできないので、例えば空間分解能10ミリ秒角ぐらい（ハッブル望遠鏡くらい）で積分した画像複数枚から移動天体を探すとすると、積分時間の上限は約10,000秒（約2時間47分）になります。観測波長域はVバンド、中心550 nm、バンド幅100 nmだと思えば、10,000秒に1 cm²に100個の光子が来るのが20等だと計算できます。「その1」で仮定したV=45等を考えると、等級差25等、100億倍ほど不足していますが、面積を1 cm²から1 km²に拡大すれば、100億稼げる計算になるので、まずは天体からの光子の量という観点では直径4,000 m望遠鏡（13 km²）であれば、1桁ほど余裕をもってクリアします。

次に前景光と背景光（以下まとめて背景光と書きます）を考えます。これは太陽系内でも場所依存が強いですが、地球周辺では例えば背景光の面輝度は黄道光など込み込みでVバンドで暗いところでも1平方秒あたり約23.5等くらいのように

す¹⁴⁾。これは10ミリ秒角四方では33.5等に相当し、目標天体より11.5等明るいので、背景光の光子数は4万倍ほどです。この状況下で0.1等の精度を出すには、天体からの光子が400万くらいになっている必要があります。4,000 m望遠鏡でも3桁以上足りなくなっていました。

この問題は天体の大ききギリギリになるまで空間分解能を上げることで改善が見込まれます。相手が仮に冥王星サイズ（2,000 km）だった場合、太陽系内での光束の拡がりも前章での計算のように効かないと思えば見かけの大きさは7マイクロ秒角程度です。先の10ミリ秒角の分解能は大きすぎて背景光の観点で大損をしていました。そこで、切りの良い数字、10マイクロ秒角まで測光範囲を小さくすると、天体の光子数はそのまま、背景光を15等落とすことができます。これなら、背景光は目標天体より3.5等、約25倍暗くなるのでまあ無視できるようになります。ですがしかし、積分時間上限は、今度は10秒になってしまいました。それ以上長い積分では、天体が隣の画素に動いてしまうからです。10秒では4,000 m望遠鏡でも光子は平均1個しか来ません。この辺りで太陽系外縁天体に関しては究極の限界が見えてくる気もしますが、さらに望遠鏡を置く場所を工夫することで何とかする余地はまだあります。例えば、木星軌道付近（5天文単位）までもっていけば公転速度は1/100程度になるので積分時間が伸ばせますし、前々章で検討したような公転しないような観測所が仮に技術的困難に打ち克って建造できれば視差運動はなくなります。この場合、40,000天文単位にいる対象天体の天球面での運動は、円軌道を仮定すると1日に0.4ミリ秒ほどなので、10マイクロ秒角の画素でも36分まで積分を伸ばせます。また、黄道面内でも太陽から5天文単位くらいにまでいけば黄道光が弱くなります。その辺りまでいくと銀河系内の散乱光や銀河系内の背景光のほうが効いてきますが、地球近傍に比べて5等（100倍）程度以上は暗くなるこ

とが期待できます。

4.2 遠方天体

遠方天体の積分時間の上限には、前節で議論した視差運動は影響しません。問題になりうるのは、天体自身の時間変動を見たいかどうか、また、背景光や太陽系内あるいは銀河系内の吸収は、例えば地球の公転に伴ってどのように時間変化するのか、というような点でしょうか。

天体自身の時間変動に関しては、初代星に変光星はいるのか、仮に脈動変光星がいた場合はその周期光度関係は近傍と同じなのか、等、筆者には全くわからないので、正確なところは後でどなたかに伺うことにして、例えば仮に静止系で1時間スケールでの変動サンプリングが欲しい場合でも、赤方偏移 $z \sim 30$ で30倍とかに伸びてくれれば、サンプリングのシビアさは随分緩和されるでしょうから、まずは影響が少ないと考えられます。

次に吸収等の議論ですが、これには天体の見かけの大きさが何秒角かという宇宙シーイングが重要になってきます。赤方偏移 $z=30$ に例えば半径1 auの星があったとして、それを太陽近傍から見た場合、間に何も擾乱がなければ、半径3ナノ秒角くらいで見えるはずですが（以下、宇宙論パラメータは、WMAP9年¹⁵⁾を使っていますが、Planck¹⁶⁾でも5%ほどしか変わりません）。これが実際に重力レンズや銀河系内外のプラズマやガスのおかげで典型的にどれだけ光束がボヤけた末に結局どのくらいの視半径で見えるのか（宇宙シーイングはどのくらいか）私たちに理解と勉強が足りず計算できていません。仮に全く光束が広がらない場合、銀河系内での吸収散乱の不均一性が見えてくる可能性があります。さらに、地球公転による視差運動を考えると3ナノ秒角の年周視差が出るのは3億パーセク（300 Mpc）程度の距離になり、これは赤方偏移 $z=0.07$ くらいに相当しますが、そこより手前に吸収散乱体があれば、

視差運動でこの光束を横切って明るさの変化を起こす可能性も考えられます。電波では銀河内の星間シンチレーション、太陽系内の惑星間シンチレーションが議論になったりしますが、可視近赤外で遠方の「点源」を観測することは、将来的にはこのような新たな困難を引き起こすかもしれません。逆に光束の拡がり例えば銀河系外ですでに十分大きければ、銀河系内での吸収散乱の天球面でのむらや微小移動はその拡がったビームの中で平均化されて影響が小さくなります。一方でそのような場合は口径を大きくして解像度を上げることは無意味になるかもしれませんし、あるいはこのような大気圏外での光束の拡がりに対応した補償光学（宇宙AO）を考える必要があるのかもしれない。

さて、そのうえで測光をどのくらいの測光範囲で行うかなのですが、前節同様、Vバンドで1平方秒あたり約23.5等の前景背景光を仮定します。この場合、4,000 m望遠鏡で積分時間4時間で観測しようとする際、40等の天体であれば、1ミリ秒角四方の測光範囲でも $S/N > 100$ となり、精度は十分です。45等になると、この測光範囲では $S/N \sim 2$ となり厳しいですが、0.1ミリ秒角四方程度の測光範囲であれば問題ありません。このように考えると、4,000 m望遠鏡は、遠方天体に関しては、まだ多少余裕がありそうです。

5. 未来への遺産

観測されたデータを将来にどのように遺産化していくかは悩ましい問題です。遺産がないのも寂しいですが、遺産が多すぎても困ります*7。しかも、天文のビッグデータはおそらく商売の役には立たないので、お金持ちの日本企業さまがたには見向きもされない可能性が高いでしょう。海外にはお金持ちや王侯貴族が気前良く大金を出してくれる文化もあるようですが、日本は残念ながらそ

*7 河合隼雄氏言うところの遺産過多¹⁷⁾。

の辺ははまだ欧米化もイスラム化もされていないのでした。

では、具体的な遺産量を計算してみましょう。観測時間と1観測当たりのデータ量が決まるとデータ生産レートが決まります。まずは、従来の撮像のような画素に入る光子の数を数える方向で考え、1章で述べたような光子を記録していく方向は後半で検討することにします。今までの議論に沿って、天球上を10マイクロ秒角で区切るとすると、全天の画素数は 5×10^{21} くらいになります。実際には明るい星の周辺は見なくて良いとかあるかもしれませんが、桁が変わることはないでしょう。可視近赤外線（近紫外線も含めてますが）の波長域、とりあえず300-4,000 nmの間を0.1 nmくらいの分解能で、ダイナミックレンジ（明るい限界と暗い限界の明るさの比）が十分なのか不安が残りつつも16 bit (=65,536) サンプルしたとすると、1回の露出ごとに 4×10^{26} バイト程度のデータになります。

次に、三次元検出器技術¹⁸⁾や撮像分光技術¹⁹⁾が向上して、1章で議論したような光子の時刻、エネルギー、運動量の一つずつ記録していくような観測が可能になった場合を考えます。光子一つの情報量としては、まず運動量の方向が10マイクロ秒角精度だとすると、67バイト程度で表現できます。時刻は例えばゆるく1ミリ秒精度だとすると、それをざっと100年観測するとすると39バイトほどで表現できるでしょう。エネルギーは例えば分解能10,000で300-4,000 nmくらいまで考えると、16バイトほどで表現できます。光子一つ当たりの情報量は122バイトくらいで良いでしょう。桁の話をするので、えいっと 10^2 バイトとしておきます。では、4,000 m望遠鏡群に全天から1秒間にどれだけの可視近赤外の光子がやってくるかですが、観測する面積としては直径4,000 mの球面を考え、全天の平均の明るさが、天体も背景も全部平均して1平方秒あたり $V=27.5$ 等相当だととりあえず仮定すると、1秒あたり 10^{24} 光子程度

になり、データは 10^{26} バイト程度になると予想されます。これはとても大雑把な計算なので2桁程度の誤差がありえますが、画素に区切って光子を数える撮像の場合、データ量は極端には違わないようです。そこで、今回は不定要素の少ない従来の撮像でのデータ量、1回の露出で400 YB（ヨタバイト）くらいをベースに計算してみます。

4×10^{26} バイトとはどれくらいの情報なのでしょう。大手企業の記憶容量は全部でどれだけのものは、ちょっと調べてもわからなかったのですが、例えばCISCO社の2016年7月の予想²⁰⁾では2020年の全世界のIP通信量は年間2.3 ZB= 2.3×10^{21} バイト、また、米EMCと米IDCの調査では2020年に1年間に生成されるデジタルデータの量が44兆GB= $4.4 \times 10^{13} \times 10^9$ バイト= 4×10^{21} バイトだそうで²¹⁾、つまりは天球上を10マイクロ秒角区切りで観測していると、数年後の全世界の1年のデータの10万倍が、1回の積分で出てくるくらいの勘定になります。

これを全部貯めておくのはかなりしんどそうです。実際、すでに神岡のニュートリノ望遠鏡ではイベントデータは一部しか記録保存しないようですし、木曾の新型CMOS観測装置（巴御前）でも1週間くらいで生データは消していくというお話を伺っています。つい先日（本稿を書いている時点では先日ですが、多分出版されるころには半年前くらいになっているでしょう）も、寄贈された図書を廃棄した図書館が話題になりましたが、古いものを保存しておくのにも金と労力がかかるのです。一般論として、何を残し、何を捨てていくかは今後多くの場面で問題になると思います。卑近な例を挙げると、本稿も、どの中間バージョンを残しておくか、それとも最終版だけ残せばいいのかが悩ましいところです。例えばある小説²²⁾の一節が「下人の行方は、誰も知らない」に決着するまでにいろいろなバージョンがあったことは文学研究者にとっては重要な情報でしょうし、僧が月下の門をおすのかたたくのかで最終的にたた

くになるまで²³⁾ 推敲過程があったわけです。前
 世期末から21世紀にかけての計算機の凄まじい
 発展のおかげで、紙の時代と比べると、書いては
 破り破いてはまた書く、が相当楽になりましたが、
 それでも全部の中間バージョンを保存しておく
 わけにもいきません。さはさりながら、天文学
 の厄介なところは、データを取得した時点ではそ
 の価値に気づかず、後になって有用性が出てくる
 ことが比較的良好であるという点です。古い例で
 言えばティコ・ブラーエの観測データを保存して
 いたおかげで、ヨハネス・ケプラーは法則を発見
 できました²⁴⁾。最近（と言っても10年前ですが）
 の例だと、かに星雲の膨張なども昔のデータを
 保存しておいてよかった例でしょう²⁵⁾。超新星が
 発生した後で、元はどういう星だったのか古い
 データを調べる、という研究も行われています²⁶⁾。
 他の望遠鏡の撮った過去のデータを使って
 太陽系外惑星を発見した研究もあります²⁷⁾。やは
 り観測データはなかなか捨てられないのです。

一方、世の中の技術革新はすごいものがあり、
 例えば現在開発が試みられている技術として、
 デオキシリボ核酸を用いて、1グラムあたり1 ZB
 (10^{21} バイト) のデータを保存可能な媒体開発な
 どが研究されているようです²⁸⁾。これが実用化
 され、量産の暁には、 4×10^5 グラム = 400 kg で
 1回の露出が保存可能、1年間毎秒撮りつづけて
 も、 1.3×10^{13} g = 1.3×10^7 トンくらいの媒体が
 あれば保存できます。デオキシリボ核酸の密度を、
 とりあえず桁はおよそ1だと仮定すると、体積は
 1.3×10^7 m³ ~ (235.1 m)³ なので、一辺235 m
 ほどの立方体を毎年増やしていけばよさそうです。
 ただ、書き込み速度が今のところ高速化しても
 100 MB/s = 10^8 B/s 程度とのことで、これだと
 10^{13} 並列くらいにしないとデータ生成に書き込み
 が追いつかず、ここが問題になりそうです。望遠
 鏡の数が 4×10^3 あったとしても、各望遠鏡ごと
 に 10^9 以上の並列度が必要になります。さらに、
 観測所が例えば小惑星軌道にあった場合など、記

憶媒体をどこに置き、観測装置から記憶媒体まで
 どうやって転送するかも問題になります。毎秒
 4×10^{21} バイトのデータ転送を求めると、例えば数
 年前の世界最高の 25 TB/s = 25×10^{12} B/s のファ
 イバーケーブル²⁹⁾ だと2億本ほどの並列が必要
 になります。宇宙空間に光ファイバーを張るのは
 全く現実的ではないので、データアーカイブを望
 遠鏡に併設するのか、無線で飛ばすのか、ちょっ
 と想像ができません。

そして、この莫大なデータの海から必要な情報
 をどう探し出すかが、また別の悩ましい問題にな
 ります。現時点ですら、データ、あるいは自分が
 昔書いた文章やプログラムが、ハードディスクの
 どこにあるかわからなくなってしまふ人はそれな
 りにいるのではないかと思います。本稿の最初
 のほうで計算したように、望遠鏡が受ける光の大
 部分は前景や背景放射で、ある意味ゴミなので
 す。砂の中のダイヤモンドを探すような、あるい
 は、幾千万の星から興味深い天体を見つけ、偶然
 をチャンスに変えるやり方を、今のうちから研究
 しておかなければならないのかもしれない。

6. 終わりに

最後に、私（筆者3）が先行して著した「究極
 の宇宙サーベイ」¹⁾ を振り返ってみることにしま
 す。究極の宇宙サーベイを考えるきっかけになっ
 たのは、2017年3月11日と12日、東京大学理学
 部4号館のセミナー室で開催された学術会議シン
 ポジウム「天文学・宇宙物理学のさらなる地平を
 探る」でした。須藤靖氏と山田亨氏が講演された
 「これ以上何を知りたいのか？」という問いかけ
 にすっかり触発されてしまいました。この研究会
 のあと、九州大学で日本天文学会・春季年会に参
 加していたのですが、お二人の講演のインパクト
 が強く、会期中ずっとこの問題について考える羽
 目になってしまいました。そこで、自分なりの考
 えをまとめるために書いてみたのが「究極の宇宙
 サーベイ」¹⁾ でしたが、原稿をまとめるには自分

の持っている情報だけでは全く足りませんでした。学会のあと、何回か国立天文台出張があったので、筆者1, 2と究極の宇宙サーベイについて議論する機会に恵まれました。このブレーン・ストーミングがなければ「究極の宇宙サーベイ」¹⁾をまとめることはできなかったと言っても過言ではありません。まさに談論風発、夢物語が紡がれていったのは至高の喜びでした。あまりにもたくさんの方柄が議論されたので、我々は方針を相談しました。その結果、まず私（筆者3）が概念設計を先行して書き、その後、パート2として詳細な議論をする、そのパート2が本稿になっています。口径4,000 mの可視・赤外線望遠鏡を4,000台のアレイとして宇宙を観測するのが本当に究極の宇宙サーベイかどうかはわかりません。しかし、これだけの施設の運用を考え出すと、今まで想像もしなかったことがどんどん気になりだしたのです。まだ見逃している課題もたくさんあると思われそうですが、とりあえず3人の中で議論に上がった項目をまとめてみた次第です。本稿を読まれて思いついたことがあれば、是非議論（あるいは往々にして駄話（筆者1））に参加していただけるとありがたいと思います。西暦2525年。人類は宇宙にどう立ち向かっているのでしょうか。

謝 辞

本稿執筆に際し、偏光の基礎について秋田谷洋さんに教えていただき、撮像分光素子MKIDの話題を田中壺さんに教えていただきました。また、重力レンズに関する情報を松田有一さんに教えていただきました。水本好彦さん、小宮山裕さん、諸隈智貴さんには本稿草稿を読んでいただき忌憚なきコメントを頂きました。ありがとうございます。

参考文献

- 1) 谷口義明, 2017, 「究極の宇宙サーベイ」, 天文月報 110, 598
- 2) Vogel C., 1833, Journal der practischen Heilkunde 3, 32
- 3) Lester D. F., Yorke H. W., Mather J. C., 2004, Space

- Policy 20, 99 (arXiv:astro-ph/0401274)
- 4) 大脇直明, 磯部瑋三, 齋藤馨児, 1989, 天文資料集 (東京大学出版会, 東京)
- 5) <https://jwst.nasa.gov/facts.html>
- 6) Masiero J. R., et al., 2011, ApJ 741, 68
- 7) 藤子不二雄, 1974, ドラえもん1 (小学館, 東京)
- 8) 藤子不二雄, 1974, ドラえもん6 (小学館, 東京)
- 9) Jokipii J. R., 1973, ARA&A 11, 1
- 10) Habibi F., Moniez M., Ansari R., Rahvar S., 2011, A&A 552, A93
- 11) Habibi F., Moniez M., Ansari R., Rahvar S., 2013, A&A 525, A108
- 12) Sazhin M. V., Zharov, V. E., Volynkin, A. V., Kalinana, T. A., 1998, MNRAS 300, 287
- 13) Yano T., 2012, ApJ 757, 189
- 14) "Wide Field Camera 3 Instrument Handbook for Cycle 25" chapter 9.7 http://www.stsci.edu/hst/wfc3/documents/handbooks/currentIHB/c09_exposuretime08.html
- 15) Hinshaw G., et al., 2013, ApJS 208, 19
- 16) Planck Collaboration, et al., 2016, A&A 594, A13
- 17) 河合隼雄, 中沢新一, 2003, 仏教が好き! (朝日新聞社, 東京)
- 18) Inadama N., et al., 2013, IEEE, Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)
- 19) Mazin B. A., et al., 2010, SPIE 7735, 773518
- 20) https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html
- 21) <https://japan.emc.com/about/news/press/japan/2014/20140410-1.htm>
- 22) 芥川龍之介, 1918, 鼻 (春陽堂, 東京)
- 23) Jia D., Changjiang ji 4
- 24) Kepler J., 1609, Astronomia nova AITIOLOGHOTOS seu physica coelestis, tradita commentariis de motibus stellae Martis ex observationibus G.V. Tychoonis Brahe (Prague)
- 25) Rudie G. C., Fesen R. A., Yamada T., 2008, MNRAS 384, 1200
- 26) Adams S. M., et al., 2017, MNRAS 468, 4968
- 27) Neuhäuser R., et al., 2005, A&A 435, L13
- 28) Exrance A., 2016, Nat 537, 22
- 29) van Uden R. G. H., et al., 2014, Nature Photonics 8, 865

Ultimate Survey 2

Masafumi YAGI¹, Satoshi KAWANOMOTO¹ and Yoshiaki TANIGUCHI²

¹ National Astronomical Observatory of Japan, Division of Optical and Infrared Astronomy 221 1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

² Open University of Japan, 2-11 Wakaba, Mihama-ku, Chiba 261-8586, Japan

Abstract: Regarding the ultimate survey, we further examined several points and ideas, based on realistic assumptions and calculations.