

## (第 135 回) 神奈川研究会議事メモ

開催日	2022 年 11 月 8 日 (火)	出席者 敬称略	西村二郎・大谷宏・山崎博・松村眞・ 持田典秋・猪股勲・宮本公明・飯塚弘・ 神田稔久
時間	15 時—17 時 15 分		
場所	リモート会議		
資料	天体望遠鏡と人工衛星 (飯塚)		
議題	<p>1. 技術課題 天体望遠鏡と人工衛星</p> <p>課題の概要</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 天体望遠鏡 (宇宙望遠鏡) ハッブル望遠鏡とジェームズ・ウェブ望遠鏡</li> <li>2. 天体望遠鏡 (地上設置) すばる望遠鏡、TMT、アロマ望遠鏡</li> <li>3. 人工衛星 超小型人工衛星と宇宙産業</li> </ol> <p>発表者からのコメント</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 天体望遠鏡 (宇宙望遠鏡) ～ハッブル望遠鏡とジェームズ・ウェブ望遠鏡～             <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 1990 年に打ち上げられた NASA のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) は輝かしい功績を残し、その後継機として待望のジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡 (JWST) が昨年 12 月 25 日に打ち上げられた。地球を中心として太陽と反対側、地球からの距離 150 万 km の所定の位置 (L2) に到達し、望遠鏡を冷却するために、太陽/地球などからの光を遮るテニスコート程の大きさの巨大な「日かさ」を広げた。この夏から観測が開始され、7 月に NASA を通じてその観測データが続々と公表されている。この JWST は、結果的に 1996 年の開発開始から、25 年の歳月と 1 兆円超の費用をかけようやく打ち上げられたのである。</li> <li>(2) 最初の公開画像 (7 月 11 日) から 1 週間後には、133.8、134.8 億年前という宇宙誕生から 3~4 億年後と言う宇宙創生の初期に存在した天体の画像が発表された。観測を始めてわずかの間にこれ程の成果を挙げ、JWST のミッションである宇宙誕生の際のビッグバンから約 2 億年後以降に誕生した「ファーストスターの観測」に向け、力強い一歩を踏み出した。</li> <li>(3) HST の名称にもなっているハッブルは、100 年程前に天体観測から宇宙が膨張していること、しかも遠方の星ほど加速度的に膨張していることを発見した。133.8 億年前の星の光は、宇宙の膨張のため実際には 320.9 億年掛かって地球に到達している。133.8 億年前の星は非常に高温のため、短波長の光 (電磁波) を発していたが、宇宙の膨張によりドプラー効果で、その波長は引き延ばされ (赤方偏移)、赤外光として観測される。HST は主に可視光を中心に紫外光、赤外光の一部 (0.1 ~ 2.5 <math>\mu\text{m}</math>) を観測、JWST は赤外光 (0.6 ~ 28 <math>\mu\text{m}</math>) を観測している。また、JWST は HST に比し、主鏡の大きさが 2.7 倍 (主鏡の直径 6.5m) で、感度が 100 倍になることより、より遠方の強度の弱い光を捉えることができる。両望遠鏡で観測された天体の画像を比較すると、JWST の優位性が一目瞭然である。</li> <li>(4) 32 年間宇宙での「人類の目」となった HST だが、打ち上げ当初、鏡面の 2 <math>\mu\text{m}</math> というわずかな歪 (主鏡の直径 2.4m) により性能が 95% 減の大きなトラブルがあり、新たなソフトウェアを開発し、また現地で修理するため、長期間修理の訓練を積んだ宇宙飛行士がスペースシャトルから修理に向かった。それが出来たのは HST が地球の上空 570km (スペースシャトルは 400km) と近く、150 万 km 離れた JWST は故障しても修理は不可能である。</li> </ol> </li> </ol>		

5) ドブラー効果は絶対零度近くまで温度を下げる方法に使われ、分子運動が小さくなれば温度が下がる。ランダムに運動している原子にその吸収波長よりわずかに長波長の光を照射すると、光に近づく原子はドブラー効果により、光の波長より短波長の光、すなわち原子の吸収波長の光を吸収し、減速しより低温となる。この光で原子をトラップする方法（光ピンセット）を利用した冷却原子による量子コンピュータは、「量子ビット」を容易に増やせることで、最近注目されている。

## 2. 天体望遠鏡（地上設置）

～すばる望遠鏡、TMT、アロマ望遠鏡

(1) すばる望遠鏡は、①晴天率がよい ②シーイング(大気の揺らぎの程度)がよい ③周囲に人工光がないことから、総工費約400億円掛けて、ハワイ・マウナケア山頂に設置され、2000年から運用された。観測できる光の波長は0.3-25 $\mu\text{m}$ （紫外線—可視光—近赤外線—中間赤外線）である。すばる望遠鏡の強みは、超広視野主焦点カメラ(HSC: Hyper Suprime-Cam)と多数の天体のスペクトルを一度に観測できる超広視野多天体分光器(PFS: Prime Focus Spectrograph)の視野である。HSCは主焦点に新たに搭載され、2014年から共同利用観測を開始したもので、116個のCCD素子を配置し、計8億7000万画素を持つまさに巨大な超広視野デジタルカメラである。後者は次世代の基幹観測装置の一つで、2023年からの本格観測運用開始を目指している。HSCを使った成果を紹介する。

(2) TMT (Thirty Meter Telescope、30メートル望遠鏡)は、現在、日本、米国、カナダ、中国、インドの国際協力事業として、ハワイ・マウナケア山頂に建設計画を進めている口径30mの光学赤外線・次世代超大型天体望遠鏡である。その名の通り直径30mの主鏡は、492枚の小さな六角形の鏡を組み合わせて作られる分割鏡である。従来の地上大型望遠鏡に対し、10倍以上の集光力、3倍以上の解像度を持ち、完成すれば、光学赤外線天文学の新しい世界が開けると言われている。TMTは、2014年7月にハワイ州が建設開始最終許可が得られ、起工式が行われたが、現在、TMT建設に反対する人々が道路を封鎖し、再開できない状態である。

(3) アルマ(ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)望遠鏡は、国際共同プロジェクトで、南米のチリ共和国北部にある標高5000mのアタカマ砂漠に誕生した地上最大の電波望遠鏡である。合計66台のパラボラアンテナ（直径12mアンテナ54台+直径7mアンテナ12台）を配置し、観測周波数は31GHz（ミリ波）から950GHz（サブミリ波）であり、いわゆるテラヘルツ（THz）帯までの本格的観測を可能としている。各アンテナで受信した天体からの電波信号を「干渉」させることによって、66台のアンテナ群をあたかも1つの大きな望遠鏡として動作させているため、「干渉計」と呼ばれている。0.01秒角の解像度を実現可能とし、これは、高解像度を誇る「すばる望遠鏡」や「ハッブル宇宙望遠鏡」の約10倍高い解像度となっている。光を見る望遠鏡では、数千度の星や銀河が放つ可視光や赤外線をとらえているが、ALMAでは、ミリ波やサブミリ波とよばれる電波（波長0.3-10mm）をとらえ、光では見ることのできない宇宙空間にある塵やガス（-260 $^{\circ}\text{C}$ にも達する）を観測し暗黒の宇宙の姿を描きだすことができる。銀河の誕生、惑星系の誕生、宇宙生命の起源を探ることが可能である。

## 3. 人工衛星

～超小型人工衛星と宇宙産業～

(1) 国際通信の大部分は海底ケーブルを使って行われており、今回のロシアのウクライナへの侵攻で地上のケーブルは切断され、ウクライナではスマホを始めとする通信遮断が奪われたようである。そこで現在活躍しているのは米スペースX社が提供した地上550km上空の衛星群「スターリンク」と地上の小型のパラボラアンテナである。今まで経済性に疑問符が打たれていた衛星通信の必要性がクローズアップした。また、Maxar Technologies社は4機による衛星コンステレーションにより高精細画像を提供している。マイクロ波レーダーを使った「SAR (Synthetic Aperture Radar) 衛星」も登場、夜間や悪天候でも24時間観測可能である。

(2) 衛星には低軌道(地球表面から 2000km 以下の軌道)衛星と高軌道(高度約 36,000km より外側を周回する地球衛星軌道)がある。低軌道衛星は地上から観測すると動いているように見え、1つの低軌道衛星では利用エリアを通り過ぎてしまうと利用不可能になるため、通信を途切らさないように多数の低軌道衛星を連携させる。高軌道衛星は地球の自転と同じ周期で廻るため、いつも同じ方向に存在するので静止衛星と呼ばれる。衛星の推進力は地球の万有引力を利用して地球を周回し、地球の中心を軸とした等速円運動をしている。そのため自転しても両者の距離が変わらない赤道上空を回っている。全地球測位システムと呼ばれる GPS 衛星は高度 20,000km の中軌道を周回し、複数の GPS 衛星からの電波を受信し、それぞれとの距離を割り出すことで現在位置を測定している。また、気象衛星ひまわりは赤道上空約 36,000km の軌道にあって地球の自転と同じ周回周期している静止衛星である。

(3) 従来は、中／高軌道の 1機数百億円の大規模機が主であったが、長期間の開発、失敗は許されない、顧客が限定されるなどで、その市場は限定されていた。そこに、1機 3億円以下、重量 50kg 程度で、低軌道周回し、数十機以上で全地球をカバーする(コンステレーション)超小型人工衛星が注目され、大学の研究室でも開発、打ち上げられるようになった。リモートセンシング、通信用として、中小企業、途上国などが市場に参入し始めた。日本でもデブリ除去、地球観測用などに、ベンチャー企業が名乗りを上げている。

(4) 2022年10月12日、固体燃料ロケットで JASA と宇宙企業「IHIエアロスペース」が開発したイプシロン 6号機が打ち上げに失敗し、搭載していた九州大学発ベンチャー企業である QPS 研究所の小型レーダー衛星 2基を含む計 8基が搭載されていた。同社は計 36基の衛星を連携させて運用する地表面の観測網「衛星コンステレーション」の構築を目指している。イプシロンは、小型衛星の打ち上げ需要に対応する基幹ロケットであり、ロシアのロケットの利用が困難な状況であり、日本の民間宇宙輸送産業の拡大を図ろうとする矢先の出来事である。

**参加者からのコメント**

【大谷】

- 毎度のことながら、飯塚さんの発表には感嘆しています。最先端分野の技術問題に関する情報を手際よく整理して示していただけなので、めんどくさくてほっとかしくなっていた分野について、改めて、関心と呼び覚ましてくれて、大変勉強になります。今回、発表頂いた事項に関しては、内容をフォローするのに精いっぱい、特別なコメントは無いのですが、次回以降、もし可能なら、飯塚さんにフォローして頂きたいとお願いしたいトピックスが一つあります。
- と言うのは、今回発表では、時間の制約もあり、そこまで対象を広げられなかったであろうことは十分理解しておりますが、“宇宙産業”に関する対象を“人工衛星”だけに限定しておられましたが、私は、今後、“宇宙開発”が人類の大きな夢の舞台になるのではないかと考えております。既に、米国はトランプ大統領時代に”アルテミス計画”を発表しており、有人月面探査計画や火星探査計画の具体的日程も発表されているようですし、中国、ロシアなども独自の計画を持っているようです。スペース X社のイーロン・マスクなどは火星移住計画の具体的なプラン迄、既に、検討しているようです。私見ですが、人類の“大宇宙探検・開発時代”が始まれば、現在のロシア・ウクライナ戦争のような地球上のみみっちい争いは少なくなっていくのではないのでしょうか？
- そんなことで、もし可能なら、飯塚さんにこの分野の動きをも取り上げて頂ければ有難いと思っている次第です。しかし、勿論、これは私の個人的な願望であり、飯塚さんの次回以降の発表テーマの選択に何ら制約を与えようとするものではありませんので、ご理解ください。

【神田】

久しぶりにスケールの大きい話を聞くことが出来ました。当日は、たまたま、天王星食も重なる稀有な月食の日となり、日ごろのコロナ禍のストレスなどを忘れて、宇宙の彼方に思いを馳せていました。飯塚さん、ありがとうございました。

- 宇宙の膨張に関する、共動距離と光路（光行）距離の概念が理解できませんでした。単純に、今の時点での距離が共動距離であり、光が発せられた時点での距離が光路（光行）距離と考えて良いのでしょうか？
- そうすると、光が発せられた時点での温度（波長）が問題になるのですが、極めて高温であることは分かりますが、どのように推定するのでしょうか？この推定を誤るとドップラー効果による波長の伸びの出発点が変わってしまいます。
- 宇宙は、光速を越えて膨張していると説明されていますが、光速を越えると言うことは、アインシュタインの相対性原理が適応されない世界となり、新たな宇宙を包括する原理が必要になると言うことでしょうか？
- 宇宙開発について、大谷さんは夢を託されているようですが、私は、それが資源獲得競争から戦争になるのではないかと恐れています。どうも人類は競争や戦争の世界から飛躍することができないようですから・・・。

【宮本】

- いつもながら最新の技術動向を広い範囲に詳しく話していただきありがとうございました。孫の世代になると、宇宙の成り立ちについての定説さえ書き換えられるのかも知れないと感じました。そのころには、近い惑星や衛星と頻繁な往来が普通になっているかもしれません。そんな社会をめざして、現在の各国の宇宙技術開発が進められているのでしょうか、地上の人間生活に直接の利便をもたらす以上の開発計画としてどのようなものがあるのかを知っておくことは、今後の国際協調を進めるうえで、大事になるのではと思います。たとえば、アルテミス計画では月資源の調査などが目標として挙げられていますが、中国の対抗する計画ではなにを狙っているのかとか、それ以外になにか大きな目的が有るのか無いのかなどは気になる点です。

【西村】

- 宇宙論は最も難解な学問領域である。ビッグバン、宇宙の果て、膨張、ブラックホール、ダークマター、・・・これに比べれば、量子力学も相対論もまだマシである・・・しかし、興味深々でもある。今回のプレゼン、とても面白かった。各種天体望遠鏡の存在と観測結果（写真）の紹介も私には新鮮だった。とくに宇宙空間に衛星として設置された望遠鏡の鮮明な写真には興奮させられた。
- 新たな個人的疑問として、ビッグバン以前の時間の存在が浮かび上がった。  
\*絶対零度近くで起きるドップラー冷却という現象、説明されれば「成程」ということになるが、今まで知らなかった。気体の断熱冷却だけであのような極々低温に到達できるとは思えなかったので納得。
- 基礎研究の成果は、タイムラグがあるとしても、必ず人類の役に立っている。天文学がどのような形でそうなるか、スケールが大き過ぎて、創造も付かないが、分かり易いのは観測技術等、副次的効果である。衛星ビジネスはその一つである。宇宙空間における太陽光発電とマイクロ波伝送は実用化が近い？
- 大学での軍事研究が禁句状態となっている日本で、糸川ロケットが誕生し、現在のJAXAに繋がっている。軍事衛星など、表立っては飛ばせないが、すでにビジネスになっている民間主導の低軌道衛星は、いわゆる、スパイ衛星と同じ機能を持っているといえるだろう。
- 最近、環境研究会で郷さんの「核融合」の紹介プレゼンを聴き、自分の基礎学力の欠如を思い知らされたが、今回はその第2弾であった。しかし、齢を取っても、新しい事を知ることは楽しいことであると、つくづく思う。

【持田】

- 毎度のことながら、飯塚さんの話題はついて行くのが精一杯の（あるいは置いて行かれる）先端的な話題を提供してくれます。これには感謝しています。  
今回は天体望遠鏡が、この様な内容に展開されるとは全く想定外でした。また、人工衛星においても様々な話題をかなり細かく網羅して話してくれました。
- 2年ほど前、大学の講演会で「宇宙で活躍する技術と惑星を探る科学～宇宙開発を支える科学技術～」を聴講しました。内容的には、専門性は避けて一般向けでもあるので、私にとっては聞きやすい講演でした。その中には、松永教授の宇宙システムの開発の展開、はやぶさ2のサンプリングの話やホリエモンロケットの会社の社長の打ち上げ成功の話もあり、その時も宇宙そのものに興味を惹かれましたが、中ではアクセルスペースの社長の話した「超小型人工衛星サービス事業」が、今後広まってゆくのではないかと感じたことを覚えています。

【松村】

- 研究会は途中で退席したので改めて配布資料を読み、この分野の大きな進に感心しました。飯塚さん、膨大な内容の紹介ありがとうございました。この分野になじみの薄い私には難しくて難解な部分が多かったのですが、体系的によく整理されているのにも感心しました。いつのまにかカーナビが標準装備になり、バイクの宅配員は住所さえわかればスマホで届場所を容易に確認できるようになりました。そういえば以前は会合案内に地図をつけていましたが、今は不要になりましたね。これも人工衛星の恩恵ですね。ウクライナの戦争ではドローンが大活躍していますが、偵察ドローンが見つけた攻撃目標に攻撃ドローンが爆弾を投下するのですから、これも人工衛星からの情報なしには不可能でしょう。ベトナム戦争では米軍が武装ヘリで地上の目標を攻撃していましたが、今後はその役割を無人のドローンが担うようになるような気がします。戦争の姿も過去から大きく変わる可能性があるように思いました。農業や漁業も人工衛星の情報をもっと有効に利用するようになるでしょう。宇宙産業の今後の展開が気になるようになりました。(松村)

【山崎】

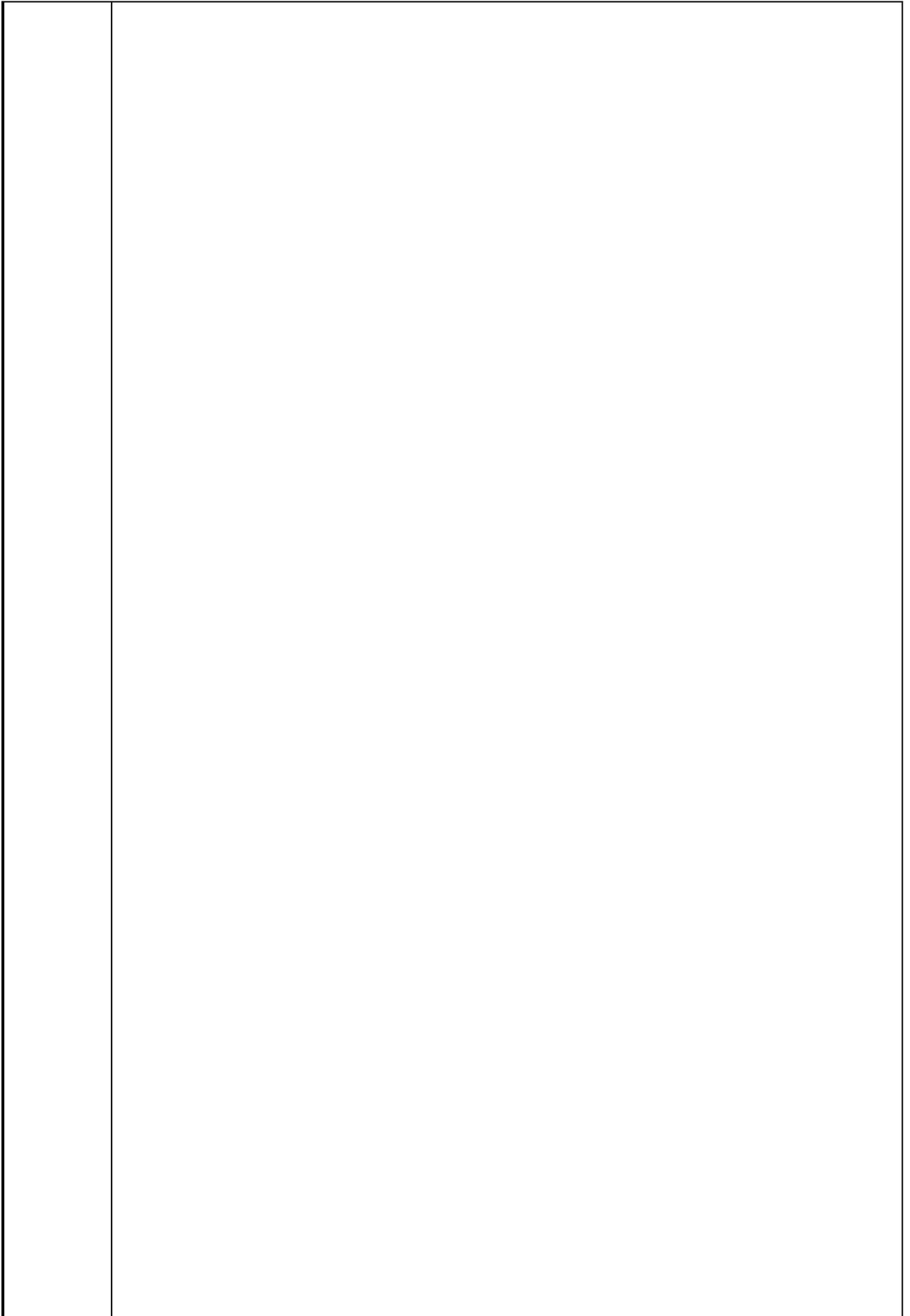
- 天体望遠鏡と人工衛星を組み合わせる宇宙探査の話、大変勉強になりました。飯塚さんの作られた「天体望遠鏡と人工衛星」の3部からなるプレゼン資料は、解りやすくしかも充実した内容で、今後も時にふれ参考にしたいと思います。
- 最近、138億年前のビッグバンによる宇宙の創生から4～5億年後の約134億年前の美しい天体画像が公開されましたが、更にビッグバンから約2億年後の水素とヘリウムからなる最初の星が誕生した当時の観測に迫ろうとしており、人知を結集した宇宙観測技術の進歩と、宇宙の謎に迫る分析成果には眼を見張るものがあります。
- また、太陽系外惑星も次々に発見されその数は既に4500を超えており、その中には地球と同じような環境の惑星も発見されつつあります。その中から、生物のハビタブル惑星が見つけれられるかなど、大変興味深いところです。
- 一方で、銀河系宇宙の質量構成は、原子5%、暗黒物質（ダークマター）26%、ダークエネルギー69%から成ると推定されています。天の川銀河の中心近くに、重い星の超新星爆発によってできると推定される、巨大なブラックホールの存在が確認されました。ブラックホールの生成に対する科学的な解明が待たれます。
- アインシュタインが一般相対性理論で予言した、時空の歪みが重力波として伝播する現象を捉える「重力波望遠鏡」の利用も期待されます。2015年にブラックホールが合体する瞬間を米国の「重力波望遠鏡LIGO」が記録しました。日本では2020年に岐阜県の旧神岡鉱山内の地下200mの場所に「重力波望遠鏡KAGURA」が設置されました。当地の研究者は約200名とのことで今後の研究活動が期待されます。

- この分野を理論解明するには、量子力学や一般相対性理論が適用の限界領域と考えられ、超弦理論という新たな理論の適用が試みられているようです。超弦理論では9次元+時間次元が考えるベースになっているようです。超弦理論については、Youtube上に幾つか解説講義があるので聞いてみましたが、私には、内容がどれも難解でした。
- 宇宙に関するSF映画は数多く公開されています。私の記憶に今も残るSF映画は、アポロ11号が月面着陸した前年の1968年に公開されたスタンリー・キューブリック監督の「2001年宇宙の旅」です。地球外生命体、意識を持った人工知能HALが登場し、幻想的な美しい映像と音楽が融合した哲学的・幻想的な映画でした。
- 最近評判になった2014年に公開されたSF映画「インターステラー」は、異常気象により人類滅亡の危機が訪れた近未来に、ワームホールを通り抜けて新しい惑星を探するという内容で、「重力波」の研究で2017年のノーベル物理学賞を受賞したキップ・ソーン博士が製作の指揮をしており、最新の知見が盛り込まれた美しい映像が各所に見られます。私は、Amazon primeで無料ビデオ版を観ました。
- 最近、民間企業や大学の研究室からも超小型衛星が次々に打ち上げられ、宇宙衛星の利用が一般化してきました。情報衛星として様々な利用が期待されますが、日本もこの分野で世界に通じるベンチャー企業を育て先行してもらいたいものです。また、衛星の推進機として燃費の優れた日本製イオンエンジンの利用拡大が期待されます。
- 今回の天体望遠鏡と人工衛星に関するテーマに触発され、Youtubeを利用しましたが、特に、第23回自然科学研究機構シンポジウム「現代天文学のフロンティア：第二の地球とダークな宇宙」(2017/3/5)は、今回のテーマに関連が深く参考になりました。<https://www.youtube.com/watch?v=Fxc48c8dcnM>

#### 発表者からの追記

貴重なコメントありがとうございます。一部コメントに対して追記させていただきます。

- 宇宙膨張は、1915年に発表されたアインシュタインの一般相対性論に基づいて宇宙のモデルを考察して、旧ソ連のフリードマンが1922~1924年に膨張宇宙の方程式とその解を導きました。一方、1924~1929年にハッブルは、当時世界最大であった口径2.5mの望遠鏡を使って観測によって宇宙膨張を明らかにしました。宇宙膨張は理論でも観測でも当時専門家の関心事であったようです。遠方の銀河はある所で光速を超えてしまい、それより先へは光は届かず観測が不可能となります。この領域が「宇宙の地平線」と呼ばれています。ただ、我々の身近な太陽系、銀河系はこの膨張の影響を受けているわけではなく、宇宙の膨張とは切り離されて、自分自身の重力で星をつなぎとめているようです。また、光速を超えて膨張することは、アインシュタインの相対性理論に矛盾している訳ではなく、光速を超えるものは存在しない、というのは物体に適用されることであって空間の膨張には当てはまらないようです。
- 今回は、宇宙からやってくる人間の目で見ることが出来る「光」、更には赤外線、電波、X線と言った様々な波長の電磁波を観測することで、宇宙の歴史や成り立ちの一端をご紹介しました。近年ではコメントをいただきましたように、宇宙から到来する「重力波」や「ニュートリノ」など、電磁波以外のシグナルも捉えられるようになり、全ての情報を組み合わせる「マルチメッセンジャー天文学」で、宇宙の謎に迫ることができるようになりました。
- 一般相対性理論から膨張する宇宙、ブラックホールを説明できました。一方、自然界の物質は全て素粒子からなっており、量子力学により物質は粒子と波動の二面性を持ち、量子コンピュータまで実現されつつあります。この一般相対論と量子力学の融合が宇宙誕生の鍵を握ると言われています。果して「無」から「有」が生まれるのか、はたまた宇宙の膨張の果てはどうなるのか。興味は尽きないところです。



	<p>2. 幹事会報告</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・中尾代表が2週間入院されたが、すでに退院されて業務も再開されています。</li> <li>・来年度の会計予算を検討し、今年度と同じく収支とも 180 万円で立案した。今年度の決算予測は△88 万円と大幅な赤字の見込みであるが、これは、学会本部の資金不足を補うため従来の交付金75万円を25万円にしたことと、オンライン会議ソフトなどで30万円の支出増があったためである。次年度では交付金を75万円に戻し、オンラインの出費も抑えることで均衡財政としたい。</li> </ul> <p>3. 今後の予定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>12月 持田氏</li> <li>1月 山崎氏</li> <li>2月 猪股氏</li> <li>3月 西村氏</li> <li>4月 宮本氏</li> <li>5月 見学会</li> <li>6月 大谷氏</li> <li>7月 松村氏</li> <li>8月 神田氏</li> <li>9月 飯塚氏</li> <li>10月 見学会</li> </ul>
次回日程	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 日時 令和4年12月13日(火)15時~17時</li> <li>2. 方式 ハイブリッド方式会議(予定)</li> <li>3. 技術課題 持田氏から提供</li> </ol>
次々回日程	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 日時 令和5年1月10日(火)15時~17時</li> <li>2. 方式 未定</li> <li>3. 技術課題 山崎氏から提供</li> </ol>