

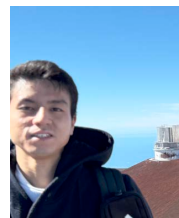
アンドロメダの距離を測る

直川 史寛

〈東京大学理学系研究科物理学専攻, 東京大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

〈東北大学理学研究科物理学専攻 素粒子・宇宙理論グループ 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉

e-mail: fumihiro.naokawa.e7@tohoku.ac.jp



2024, 25年の2期にわたる計30日間, 学生PI渡航制度にご支援いただき, ハワイ島にてすばる望遠鏡を用いた観測を行いました. 主焦点に構えるHyper Suprime-Cam (HSC)でアンドロメダ銀河の長期モニタリング観測を行い, 史上最高精度での絶対距離測定を目指すものです. HSCは現在, 麓のヒロオフィスからのリモート運用を行っており, 私もマウナケアには登らずリモート観測を行いました. それでは, わざわざ現地に赴く意味はあるのでしょうか?私の回答としては「大いにあり」です. 以下では, その理由をお話します.

1. アンドロメダと宇宙論

1.1 天の川は宇宙のすべてか

人里離れた秋頃の夜空にぼやっと浮かぶアンドロメダ銀河. 人類はこの天体を, 古来より眺め続けてきました. 古くは10世紀, ペルシャの天文学者の記録に残り, 1764年にはメシエカタログM31の符号が与えられます [1]*1.

20世紀の始め頃, M31は歴史に残る論争的的となります. このような星雲が, 天の川銀河に属する天体なのか, それとも全く独立したはるか遠くの天体か. 前者の立場をとるシャプレーと, 後者の立場をとるカーチスとの間で繰り広げられた議論は, 天文学史における「大論争 (The Great Debate)」という名で知られています.

この論争に終止符を打ったのが, エドウィン・ハッブルでした. 1920年代前半, 彼はウィルソン山の60インチ望遠鏡でM31の中にセファイド型変光星を発見します. 変光周期と絶対光度の間

に相関のあるセファイドの性質を利用してM31までの距離を割り出し, この天体が明らかに天の川銀河と独立したはるか遠くの天体であることを見出しました.

この発見は当時ニューヨーク・タイムズ誌に掲載されています [6]. 我々の宇宙観が天の川の外の世界まで広がってから, まだわずか100年ほどしか経っていないことは, その後の宇宙論の発展を鑑みると驚くべきことのように思います.

1.2 宇宙の膨張

ハッブルと聞いて多くの方が最初に連想するのは, 宇宙膨張の観測 (あるいはハッブル宇宙望遠鏡) ではないでしょうか. ハッブルは, ほかの銀河についても距離 d を測定し, また後退速度 (銀河が地球から遠ざかる速度) v も求めました. そして, その両者に正の相関があることを発見します. これは宇宙が膨張していることの決定的な証拠となり, 人類の宇宙観が再び大きく変化することになりました. この宇宙膨張の法則は, 同時期

*1 本節の歴史的な部分に関しては, このほかに [2-5] を参考にしました.

に独立にこの関係を見出したルメートルとともに「ハッブル・ルメートルの法則」と呼ばれ $v = H_0 d$ という式で表されます。比例係数 H_0 （ハッブル定数）は、宇宙膨張の度合いを表す最も基本的な宇宙論パラメータの一つです。このハッブル定数は、現在に続く新たな「大論争」を引き起こします。

1.2.1 $H_0 \sim 50$ vs $H_0 \sim 100$

ハッブルが測定したハッブル定数は $H_0 \sim 500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （以下単位は省略）でしたが、彼の測定にはいくつかの大きな系統誤差が含まれており、現在知られている値からは大きくずれていました。その後、距離指標天体の研究と観測が進み、1970年代前半までは $H_0 \sim 100$ と落ち着きます。しかしながら、 $H_0 \sim 50$ とする研究グループも現れ、その後約20年にわたり両者の間で激しい論争が繰り広げられました。

より正確な値の決定について、ハッブルの名を冠したハッブル宇宙望遠鏡（HST）が重要な役割を果たすこととなります。セファイドを用いたHSTによるハッブル定数の測定プロジェクト（HST キーププロジェクト）の最終報告では、上記の論争のちょうど中間あたり $H_0 = 72 \pm 8$ と決定されました [7]。2001年のことでした。

1.2.2 $H_0 \sim 67$ vs $H_0 \sim 73$

20世紀の終わり頃から、ハッブル定数を含む宇宙論パラメータの測定に新たに強力な手段が登場します。まずはIa型超新星です。Ia型超新星は、その光度曲線と絶対光度との間に相関があり、より遠方宇宙の距離指標として用いることができます。また、WMAP衛星の登場により宇宙マイクロ波背景放射（CMB）が精密に測定されるようにもなります。WMAPは9年分の測定データを用いてハッブル定数を $H_0 = 70.0 \pm 2.2$ [8] と与え、HSTや超新星による測定と統計誤差の範囲で見事に一致しました。

しかしその後、Planck衛星によるCMBのさらなる精密観測や、超新星観測の進展に伴い測定精度が向上すると、新たな問題が生じるようになりました。両手法（CMBによる手法と天体による手法）で測定されたハッブル定数の値の間に、統計的に有意なずれが生じるようになったのです。この「ハッブル定数問題」は年を追うごとに深刻になります*2。現在では例えば、天体による手法で $H_0 = 73.29 \pm 0.90$ [9]に対し、CMBでは $H_0 = 67.37 \pm 0.54$ [10]とその差の有意性は 5σ を超え、近年の宇宙論研究における最重要テーマの一つとなっています。そしていま、この問題の解決に向けて、M31の距離測定が再び重要な意味を持つようになっているのです。

2. 宇宙の三角基準点

前置きが長くなりました。ここから我々の研究課題の話に移ります。ハッブル定数問題の原因としては、理論・観測の両面から様々な仮説が提案されています。例えば原因が何であろうと、測定手法自体の信頼性向上は、この問題に対するひとつの固いアプローチとなるでしょう。例えばデータ量を増やせば、統計誤差を減じることができそうです。しかし、本研究で注目するのは測定上の「系統誤差」です。

2.1 アンカー銀河と宇宙の距離はしご

天体観測を通じたハッブル定数の測定では、セファイドやIa型超新星などの距離指標天体を用います。しかし、これらによって測定できるのは、あくまでも天体同士の「相対的な」距離です。それを絶対的な距離に変換するためには、ゼロ点較正（絶対較正）が必要です。そのために用いられるのが「アンカー銀河」と呼ばれる天体です。アンカー銀河とは、十分な精度で絶対的な（幾何学的な）距離が決定され絶対較正基準に利用可能な銀河のことを指します。この銀河を基準

*2 ハッブル定数問題についての最近のレビューとしては例えば [11] があります。日本語で書かれたこちらの文献 [12] もわかりやすいです。この記事を書くうえでも参考にしました。[5]の「ハッブル定数問題の緊張」の項もおすすめです。

点として、まずはセファイドを絶対較正し、さらに遠方の超新星などを順次較正します。この一連の作業は宇宙の距離はしごと呼ばれます。しかし、現在我々が利用できるアンカー銀河は主に、天の川銀河、マゼラン雲、NGC4258 (M106) の三つほどに留まります。それぞれ、年周視差法、食連星法、水メーザー法と呼ばれる異なる手法で絶対距離が高精度で決定されています。アンカー銀河、すなわち較正基準点が少ないことは、ハッブル定数の測定、ひいては一般に宇宙の距離測定における潜在的な系統誤差要因となります。

そこで我々はM31を、新たなアンカー銀河として付け加えることを目標としています。M31 (約0.7 Mpc) はマゼラン雲 (約50 kpc) とNGC4258 (約7.6 Mpc) の間に位置します。ここはアンカー銀河の空白地帯です。これまでM31の絶対距離測定は行われてきましたが、現状では数個の食連星系を用いた測定にとどまり十分な距離決定精度ではありません [13]。アンカー銀河に必要な精度を達するためにはM31全体からくまなく数百個程度の食連星の光度曲線を精度よく拾い集めることが必要となります。しかしそのような観測は容易ではありません。

2.2 すばるHSC

そこで我々はすばる望遠鏡を用いたM31の大規模時系列観測を提案しました。アンドロメダ銀河の個々の星々を分解し、ある程度の暗さの星までを十分な精度で観測するには大口径望遠鏡が必要です。銀河円盤全体を効率よく観測するためには、M31全体を覆う大きな視野が必要です。M31が観測しやすい北半球にて、これらの要求を同時に実現できるユニークな観測装置…それが

すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC) なわけです。

我々は2024年後期と2025年後期の二度にわたり、併せて17半夜という大きな時間を割り当てていただきました^{*3}。私はその両方で学生PIとしてハワイ現地に渡航し、サポートアストロノマー (SA) や現地職員の皆様に支えられながら観測を行いました。以下では、現地だからこそ得られた経験や学びについてお話しします。

3. ハワイでの観測と生活

すばる望遠鏡の観測で現地に赴いた方々は大抵、マウナケア中腹の中間宿泊施設「ハレポハク」に滞在し、観測を行うたびに山頂とを往復するという生活になります。ところがHSC観測の場合は少し違います。HSCはヒロ市内にある国立天文台のオフィスからの運用が行われています。山頂には2名のオペレータのみを残し、SAも含めヒロオフィスあるいはその他の場所からの遠隔操作で観測を行います。そのため、PIとして渡航した場合も、山頂へは行かずに、ヒロ市内に滞在し毎晩NAOJのオフィスから観測を行うこととなります。

3.1 ヒロオフィス

ヒロ市中心部から車で10分ほど、ハワイ大学ヒロ校のの近くにNAOJのオフィスがあります。コの字型2階建て、中庭には南国らしい木々が生い茂る美しい建物です。この一帯にはNAOJだけでなく、東アジア天文台、ジェミニ望遠鏡、カルテクなど、マウナケアにドームを構える各国の天文台の拠点が集まっており、一つの天文村のようになっています。イミロアセンターと呼ばれる博物

^{*3} このような観測は2010年代に仏坂健太さん (東大) や増田賢人さん (阪大) らを中心に構想されていましたが実現に至っていませんでした。2020年、学部生であった私は仏坂さんからその話を伺い、いつか自分が挑戦したいと思いました。大学院入学後、なかなか実行に移していなかった折に「学生の間なら現地に行けるらしい」と本渡航制度の話聞き耳に挟みます。「今しかない!」と奮い立ち、仏坂さんや増田さん、そして重力レンズ天体探索でM31の解析経験の豊富な杉山素直さん (IPMU) を始めとする方々とともに、アーカイブデータの再解析などを行ったうえで観測提案を行いました。



図1 後半夜の終わり、ヒロオフィスから臨む朝焼け。

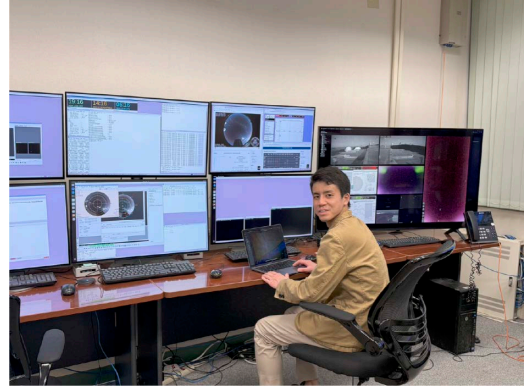


図2 HSCのリモート観測を行う、ヒロオフィス内の制御室にて。

館もあり、ハワイでの天文学・文化や歴史について学べます。一度は訪問することをお勧めします。

3.2 ヒロ市内での生活

滞在中は主に、NAOJが現地で借り上げている民家を宿舎とさせていただきました。宿舎には家具や家電製品が一通り揃っており、快適に過ごせました。家主の方がとてもよい方で、滞在中色々気にかけてくださったことも大変助かりました。

宿舎はヒロ中心部から少しはずれに位置し、夜になると満点の星が頭上に広がります。観測のない夜などは宿舎の外で自ら天体観測を楽しみました。1年目は初冬の渡航で、日本よりはるかに高く上がる冬の冬の大三角の南には、カノープスが明るく輝いていました。2年目は夏本番。南側には大迫力の銀中、東側の空にiPhoneを向け少し露光をかけるとM31、M33が写りました。

市内の移動はもっぱら車です。ほぼ毎日Uberでタクシーを呼び、宿泊先とオフィスとの往復を行いました。前半夜の割り当て(1年目)の場合、観測が終わると夜12時。タクシーが拾えるか心配でしたが、毎晩問題なく帰宅できました*4。むしろ後半夜の場合(2年目)、朝方にドライバーを探すのが難しいことがありました。現地のドライバーはすばる望遠鏡を知っている方も多く、「今夜の宇宙はどうだった？」と聞かれることも。ドライバーと話が盛り上がった結果、宿舎に到着しているのに、なかなか降りれないなんてことも

ありました。

オフィスや宿舎の近くに、レストランやスーパーはありません。何日かに一度車でスーパーに行き食材を買い込み、基本的に自炊をしていました。ハワイの食文化は日本に近いものも多く、親しみやすく感じました。特にスーパーで量り売りになっているポケをよく買って食べていました。何度か観測所の方々に現地のレストランに連れて行ってもらい、ラウラウやサイミン、ロコモコ丼など、ハワイ料理も楽しみました。

3.3 憧れの「すばる」での観測

突然自分語りになりますが、宇宙少年であった私は、小さい頃から本などですばる望遠鏡を見て育ちました。いつの日か、こんな大きな望遠鏡を使える人間になりたいと思っていました。宇宙物理学者を志し大学院に入学した頃、小平桂一元国立天文台長の著書『宇宙の果てまで』[14]を読み、戦後の日本の天文学及びすばる望遠鏡が出来るまでの壮絶な歴史を学びました。すばるは、僕にとって憧れの望遠鏡です。そんな思いを胸に2024年11月27日前半夜、いよいよ初日の観測のためヒロオフィスのリモート制御室へ向かいます。

制御室では既にSAの藤吉さんが様々な作業を

*4 1年目には一度だけ、感謝祭の日に昼間のUberのタクシーが全く見つからないということがありました。宿舎の家主の方がご厚意でオフィスまで送って下さり大変助かりました。

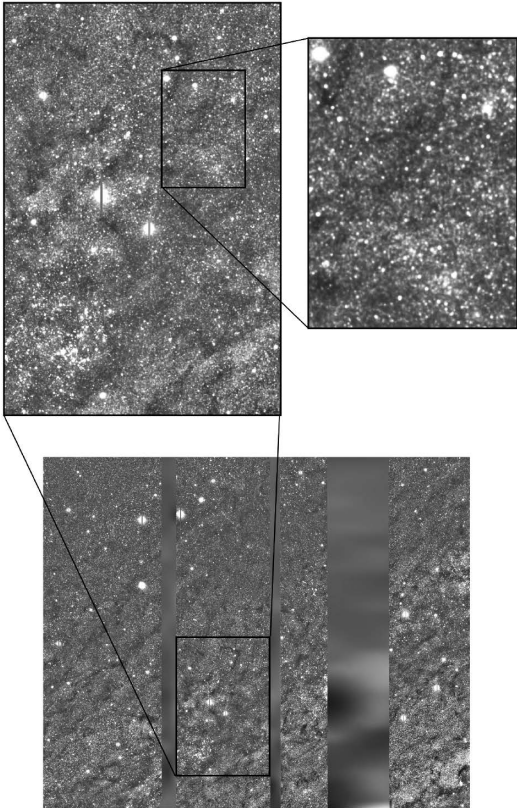


図3 現在解析の途上にある、本課題で観測されたM31の一部分(HSCの視野は広いので、本当にごく一部!). 細部を拡大していくと、一つ一つの星が分解されているのがよくわかる。

始めてくださっていました。日没後に装置の冷却やフラット撮影などを終わると、観音開きのドームシャッターがご開帳、M31に向けてゆっくりと動き始めます。いま、「すばる」が自分の観測のために動いてくれている。一天文少年として育った自分にとって、なんとも表現し難い夢のような心地を感じました。

ちなみに、ハッブルによるM31の距離測定がニューヨークタイムズ誌に掲載されたのは、1924年11月23日。ほぼちょうど百年後に、再びM31に最先端の望遠鏡を向け、その距離測定と

宇宙論の謎に挑戦できることを、とても嬉しく思いました。

焦点合わせを終えると、観測開始です。M31の定点モニタリングである我々の課題は、いざ観測が始まると後は単調にキューを実行するだけです。しかし、飽きることはありません。なぜなら120秒ごとにクイックルックに表示される撮れたてのM31の画像があまりにも美しいからです*5。画面いっぱいM31の円盤が広がり、拡大してみると、一つ一つの星が分解され「銀河は本当に星の集まりなのだなぁ」と実感できます。

キューを単純に投げ入れるだけとは言っても、大気の状態や焦点位置は刻一刻と変化します。SAの方が常にその状況をチェックし、星像をよりよくするために夜通し焦点の微調整を続けてくださる姿が印象的でした。焦点位置の見極め方をご説明いただきましたが、長年の経験によるところも大きいらしく、自分がすぐに再現できる気はしませんでした。

割り当てられた夜はほぼすべて晴れ、シーイングも良好でした。装置トラブルや湿度により観測できない夜が何度かありましたが、約15半夜分の良質なデータを得られ、マウナケアの透き通る空の威力を肌で感じる事ができました。

3.4 「すばる」とご対面

ヒロ市内に滞在し、観測もヒロオフィスからリモートで行うわけですが、ハワイ島まで来て望遠鏡のご本尊を見ずに帰るというわけにはいきません。事前に色々ご相談した結果、ハワイ観測所助教の岡本桜子さんのご好意にあずかり、日中に山頂見学をさせてもらえることに。オフィスから公用車で約30分ほど揺られるとハレポハクにつきます。ここでお茶を飲みながら30分ほど休憩し、高地に体を慣らします。さらに30分ほどマウナケア山を車で登ると、山頂域の望遠鏡群に到

*5 そう感じるのは私だけではないようです。ある夜、ハワイ観測所を訪問中の研究者らが、私の観測中に制御室を見学に訪れました。スタッフが制御室の説明をしている途中も、クイックルックに表示され続けるM31の画像に参加者は見惚れてしまい…という一幕がありました。

着します。

山頂ではまずドーム内部を順番に見学させてもらいました。当たり前ですが、今までに見たどの光学望遠鏡よりも大きなすばるの筐体に圧倒されました。はるか上を見上げると、毎晩自分が使用しているHSCが装着されています。主焦点にこれほど巨大な装置がぶらさがり異様さを肌で感じることができました。ドーム内には当時開発の最終段階にあったPFSも置かれていました。

一通り見学を終えた後、制御室にて昼食をとりました。食事中酸素ポンペを外していると、少し息苦しくなりました。酸素吸引を再開するとすぐに息苦しさはなくなり、本当に意味があるのだなと感じました。室内には昼食を食べに多くのディクルーの方が集まっていました。我々が夜に望遠鏡を問題なく使えるのは、日中に非常に多くのクルーの方が整備や運用を行っているからだ、恥ずかしながらこの時初めて知りました。

3.5 現地での交流

滞在中は観測だけでなくヒロオフィスや周辺の研究機関の研究者らとの交流もできました。まず、広報室の白田・佐藤功美子さんには、買い出しや外食などに送迎いただくなど幾度となくお世話になりました。2年目には広報室主催の七夕ブロックパーティが開催され、私も参加させていただきました。区画一帯での夏祭りのような企画で、各天文台オフィスが所内の見学や展示ブースなどを出展します。生憎の曇り空でしたが、地域の人々とともに天体観望会を行ったり、様々なブースを見学したりし、ジェミニをはじめほかの天文台関係者と交流する貴重な機会となりました。

国立天文台TMT推進室長の白田知史さんにお誘いいただき、1年目にTMTオフィスのクリスマス昼食会に参加しました。TMT建設に向けての尽力や、地元の方々との対話・交流についての話を現地スタッフから伺い、日本にいただけではわからない一端を知ることができました。

補償光学装置を開発している Olivier Guyon さ

んと研究の話で盛り上がり、民生カメラを用いた装置開発を見学させてもらったりしました。2年目には観測終わりの朝方5時台に出勤する彼に出会いました。どうしてこんなに朝早くから出勤するのかと尋ねると「昼間の時間をフル活用して装置をテストするため、今から山に登るんだよ」とおっしゃいました。望遠鏡というものは昼も夜も1秒たりとも無駄にせずを使うものなのだなあと感じました。

観測所の「すばるセミナー」にて発表をする機会もいただきました。1年目は、本観測課題について発表し、その後宮崎所長とも議論させていただきました。HSCを開発してくださったことへの感謝も伝えました。2年目には、博士論文の内容について発表しました。博士論文はCMBや電波銀河など主に電波観測に関連する内容ですが、可視光観測がいかに応用できるか議論を行うことができました。

このほかにも非常に多くの方と交流させていただいたのですが、すべてを書ききれないことが残念でなりません。

3.6 渡航の意義

ヒロリモート観測なら三鷹でやるのと変わらないし、わざわざ渡航して意味があるの？と思われるかもしれませんが、2回に渡り渡航させていただいた回答としては「大いにあり」です。

ヒロオフィスや周辺研究所の方々との様々な交流は、ヒロリモート観測ならではの経験だといえます。ふとした出会いや現地のスタッフとの交流は、その場での議論の価値はわずかながな、その後の研究生活にも生きています。このような偶然の出会いはオンライン会議などではなかなかうまれにくく、現地に行ってこそその産物です。普段オンラインでやり取りする人であっても、人となりは対面で直接話して初めてわかる部分も多いものです。一度顔を突き合わせて話しておくことは、コミュニケーションの円滑化に大きく寄与します。

また、普段直接接している研究者以外にも、非

常に多くの方々に支えられ研究を行っていることを強く認識する機会となりました。今回お世話になったヒロオフィスのスタッフや山頂見学時に出会ったデイクルーの方々はその一例です。高度に分業化された現在の天文学において末端のデータだけを触り研究していると、ともすればそのことを忘れがちだと思います。場合によっては全く気づかないまま研究人生を終えてしまうことにもなりかねません。

最後に心に残った言葉を一つ。山頂見学の際、昼食時にお話ししたクルーの方に日頃の整備についてお礼を伝えると「それはいいんだよ。撮ったデータをしっかり論文にしてね。デイクルーの仕事はそのためにあるのだから。」とおっしゃいました。現状思うように解析が進んでおらず申し訳ない気持ちでいっぱいですが、きちんと観測成果を論文にまとめあげたいと思います。

謝 辞

本記事の執筆のお声かけをいただきました、田中壺さんに厚くお礼申し上げます。また、田中さんのほかにも観測遂行にあたりサポートいただいた、SAの寺居剛さん、藤吉拓哉さん、新井彰さんにも厚くお礼申し上げます。ノリコRothさん、岡本桜子さん、白田-佐藤功美子さん、白田知史さんをはじめ現地のスタッフの方々には現地での生活や見学などをサポートいただき、大変お世話になりました。また、宿舎の家主の矢野さんの手厚いサポートにも大変助けられました。本渡航プログラムを推進してくださった宮崎聡ハワイ観測所所長にも改めて感謝申し上げます。誌面の都合上、本渡航に際してお世話になった方すべてを挙げることができず大変申し訳ございません*6。最後に紹介したデイクルーの方の言葉を胸に、きち

んとデータを成果につなげ、お世話になった皆様への恩返しとさせていただきたいと思います。

参考文献

- [1] 早水勉, 2023, Web連動ビジュアル星空大全 (技術評論社)
- [2] 谷口義明, 2018, 銀河I [第2版] (シリーズ現代の天文学)(日本評論社)
- [3] 二間瀬敏史, 2019, 宇宙論II [第2版] (シリーズ現代の天文学)(日本評論社)
- [4] 岡村定矩, 1993, 天文月報, 86, 143
- [5] 天文学辞典 (日本天文学会)
- [6] 1924, FINDS SPIRAL NEBULAE ARE STELLAR SYSTEMS; Dr. Hubbell Confirms View That They Are 'Island Universes' Similar to Our Own, New York Times
- [7] Freedman, W. L., et al., 2001, ApJ, 553, 47
- [8] Bennett, C. L., et al., 2013, ApJ, Suppl, 208, 20
- [9] Murakami, Y. S., et al., 2023, JCAP, 11, 046
- [10] Aghanim, N., et al., 2020, A&A, 641, A6 ([Erratum: A&A, 652, C4 (2021)])
- [11] Verde, L., et al., 2024, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 62, 287
- [12] 大栗真宗, 2023, 日本物理学会誌, 78, 630
- [13] Vilardell, F., et al., 2010, A&A, 509, A70
- [14] 小平桂一, 2006, 宇宙の果てまで—すばる大望遠鏡プロジェクト20年の軌跡—(早川書房)

Measuring the Distance to Andromeda

Fumihiko NAOKAWA

Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: We were awarded 17 half-nights of Subaru HSC in semesters 24B and 25B for a consecutive monitoring survey of the Andromeda galaxy (M31), aimed at measuring its absolute and addressing the Hubble tension. I stayed in Hilo for a total of 30 days as a student PI, and I report here how fruitful this stay was.

*6 指導教員である横山順一さんが後日別件出張でハワイを訪れることになりました。その際に「お礼を伝えるべき現地の方のリストを作りなさい」と私に命じられたのですが、いざ作ろうとしてみると、あまりにも多く、フルリストの作成を断念したほどです。