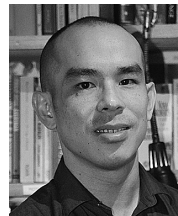


# 重力レンズクエーサーを用いた ハッブル定数の測定

**Kenneth C. Wong**

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉



訳：大栗真宗

〈千葉大学先進科学センター 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

e-mail: <sup>1</sup>kcwong19@gmail.com, <sup>2</sup>masamune.oguri@chiba-u.jp

重力レンズクエーサーの複数像には観測可能な到達時間の遅れが存在し、これを用いて宇宙の膨張率を決めるハッブル定数 ( $H_0$ ) を決定することができます。近年の測定において  $H_0$  の測定値が初期宇宙と後期宇宙で異なることが判明し、宇宙論に課題をもたらしました。本稿では、重力レンズクエーサーを用いて  $H_0$  を独立に測定した私の研究を紹介します。

## 1. 強い重力レンズ

重力レンズは「ソース」と呼ばれる遠方の天体から発せられた光の経路が、観測者に到達する前に「レンズ」と呼ばれる途中の重たい天体によって曲げられる現象です。もしレンズとソースが十分に一直線上近くに揃っていると、重力レンズによって増光されたソースの複数像が形成されます(図1 (708ページ))。この現象は強い重力レンズと呼ばれます。

強い重力レンズは多様な研究に応用される、強力なツールです。観測される重力レンズ効果はレンズ天体のバリオンとダークマターを含む全質量分布で主に決まるので、観測された複数像の配置を再現するようにレンズの質量分布モデルを決定することで、レンズ天体の質量分布を知ることができます。従って重力レンズは、銀河や銀河団内のダークマター分布を測定する有力な手法で、場

合によってはダークマターのサブ構造も測定できるかもしれません<sup>\*1</sup>。重力レンズはソースの見かけの明るさを増やした見かけの大きさを拡大するため、ソース天体の研究にも助けとなり、重力レンズなしでは不可能であったような詳細な内部構造を調べることができるようになります。

宇宙論パラメータはソースからレンズ、観測者までの距離に影響しますので、重力レンズ効果は宇宙論パラメータにも依存します。本稿では、強い重力レンズを用いた宇宙の膨張速度の測定に関する私の研究と、それが最近出現した宇宙論の「緊張」(tension) にどのように関わるかを解説します。

## 2. ハッブル緊張と時間の遅れコスモグラフィ

私たちの標準宇宙論モデルは「平坦な宇宙項入り冷たいダークマターモデル(平坦 $\Lambda$ CDM)」で、

<sup>\*1</sup> 重力レンズは全質量分布を測定しますが、観測されたレンズ天体の輝度分布から星質量分布が推定できるので、それを差し引くことでダークマター分布が得られます。

このモデルは多くの観測と無矛盾であることが知られています。平坦 $\Lambda$ CDMは六つのパラメータを持つモデルで、宇宙の曲率が平坦、ダークエネルギーの状態方程式が $w=-1$ （すなわち宇宙項）、かつ冷たい（非相対論的な）ダークマターを仮定するモデルです。

平坦 $\Lambda$ CDMの重要なモデルパラメータの一つが「ハッブル定数」 $H_0$ で、現在の宇宙の膨張率を表します。ハッブル定数は宇宙論的距離にある天体の後退速度（ $v$ ）と距離（ $d$ ）を関係づける、いわゆるハッブル-ルメートルの法則 [1],  $v=H_0d$ の比例定数です。宇宙膨張の発見以降、このパラメータをより精密に測定する多くの研究が行われてきました。そして近年、初期宇宙と後期宇宙のハッブル定数 $H_0$ の測定の矛盾の可能性が浮上してきました [2]。

## 2.1 初期宇宙と後期宇宙の $H_0$ 測定の緊張

宇宙背景放射（CMB）はビッグバン後の宇宙再結合の時代からの放射です。赤方偏移のためにマイクロ波で観測されるこの放射には初期宇宙の物理状態に関する重要な情報が含まれています。CMBのわずかな温度のゆらぎを観測することでプランク衛星は多くの宇宙論パラメータを精密に決定することができました。CMB観測は直接 $H_0$ を測定しませんが、宇宙論モデルを仮定することで $H_0$ を推定することができます。平坦 $\Lambda$ CDMの仮定に基づき、プランク衛星は $H_0$ の値を $67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ と非常に精度よく決定しました [3]。

一方で、宇宙論的距離にある天体の後退速度と距離を決め、ハッブル-ルメートルの法則を $H_0$ について解くことで、近傍宇宙で $H_0$ の値を直接測定することもできます。後退速度については分光観測により赤方偏移を測定することで一般的に容易に決定できます。一方で距離の測定については、天の川銀河や局所銀河群よりも遠方の天体に対してはとても難しいのです。典型的には、近傍の幾何的な距離測定（視差、分離食変光星 [4]、

メガメーザー [5, 6]）によって「標準光源」と呼ばれる一定のあるいは一定に補正可能な明るさを持つ天体の光度を較正します。この標準光源を用いることで遠方天体までの距離を測り $H_0$ を推定する、またはより明るい標準光源を較正し、より遠方の天体までの距離測定を行います。この手法は「距離はしご」として知られています [7-11]。

SH0ES (The Supernovae,  $H_0$ , for the Equation of State of Dark Energy) チームはこの距離はしごの手法を用いて $H_0$ を精密に測定しました。チームは幾何的距離を用いてセファイド変光星を標準光源として較正し、またセファイド変光星をより明るいIa型超新星の較正に使い宇宙論的距離までの距離測定を行いました。この手法を用いて、SH0ESは $H_0$ を $74.0 \pm 1.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ と決定しました [10]。この後期宇宙の測定はプランク衛星の平坦 $\Lambda$ CDMを仮定したCMB観測による測定と $4\sigma$ 以上の食い違いを示しています。

現在では「ハッブル緊張」として知られているこの矛盾の原因は不明です。これらの距離測定は何度も再解析され、また系統誤差の調査もなされてきましたが、どちらかあるいは両方の距離測定法にまだ考慮されていない系統誤差が潜んでいるのかもしれませんが、あるいは、平坦 $\Lambda$ CDMの仮定が間違っているのかもしれませんが、その場合は矛盾を説明する何か新しい物理が必要なことを示唆しているのかもしれませんが、何が原因であれ、系統誤差の可能性を確認しハッブル緊張の真の原因に迫るためには、上記と独立な手法で $H_0$ を測定することが重要になります。

## 2.2 時間の遅れコスモグラフィ

強い重力レンズは、「時間の遅れコスモグラフィ (time delay cosmography)」と呼ばれる手法で $H_0$ を測定することができます（例えばレビュー論文 [12]）。ソースから同時に放射された光は、どの経路を通ってきたかに応じて異なる時刻に観測者に到達します。この複数像間の「時間の遅れ」は、観測者、レンズ、ソース間の距離の



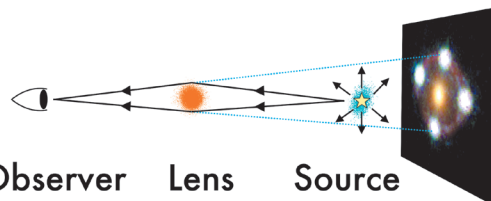


図1 重力レンズの配置を示した模式図. 光はソース (Source) からすべての方向に放射されますが, その中でレンズ (Lens) の十分近くを通過した光は経路が曲げられて観測者 (Observer) に到達します. その結果, 増光されたソースの複数像が観測されます.

能となり, 母銀河の輝度分布をレンズ質量分布のさらなる制限に使うことができます. 以前の研究ではクエーサー像の位置のみが制限に使われましたが, H0LiCOWは何百もの輝度分布のピクセルを制限に使うことでずっと正確な質量分布モデルを得ることができます. 私たちはGLEE [24, 25] とLENSTRONOMY [26, 27] の二つのレンズ質量モデリングコードをこの目的のために使っています. 最近私たちはこの二つのコードの無矛盾性の確認のためのブラインド解析も行い, 系統誤差のチェックを行いました [28].

速度分散を測定するためにレンズ銀河の高波長分解能分光観測を行うことも重要です. この運動学的制限は異なる質量分布モデル間の縮退を緩和するのに役立ちます. 質量分布モデルとして, 私たちは物理的な背景に基づいて楕円異方性のある幕分布または星とダークマターからなる複合モデルのどちらかを仮定し, これらの仮定の違いに起因する誤差も最終的に考慮しています.

### 3.3 視線方向の質量

レンズ質量分布モデルには, 視線方向に重なり天球面上でレンズ天体の近くにある, 摂動を引き起こす重たい天体も考慮する必要があります. H0LiCOWではレンズ天体近くの視線方向の銀河の深い分光観測を行い, それら摂動を引き起こす銀河の赤方偏移と速度分散を決定しています. また銀河群や銀河団がある場合もそれらを同定し,

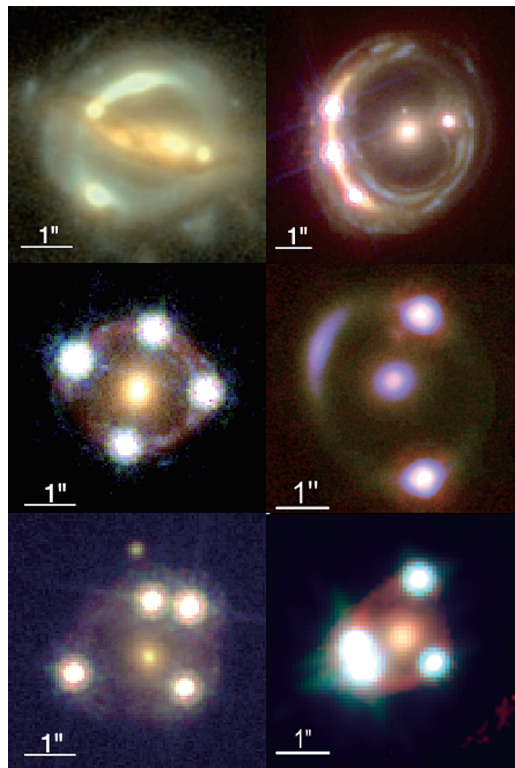


図2. H0LiCOWチームの解析で使われた六つの重力レンズクエーサーの多色画像. これらの画像はハッブル宇宙望遠鏡あるいは地上望遠鏡の補償光学撮像データから得られた可視と近赤外の二つまたは三つの波長の画像を合成して得られました. 左から右, 上から下の順番に, これらはB1608+656, RXJ1131 - 1231, HE0435 - 1223, SDSS1206+4332, WFI2033 - 4723, およびPG 1115+080の画像です.

その性質を調べています [29, 30].

これら重要な摂動を引き起こす銀河以外にも, 他の視線方向のすべての銀河の寄与を足し合わせて  $\kappa_{\text{ext}}$  が決まるため, それらの銀河の影響も考慮しなくてはなりません. 私たちは重み付け銀河計数法と数値シミュレーションを組み合わせてこの効果を補正しています [31-34]. 私たちはある決まった半径内のある等級より明るい視線方向の銀河の数をすべて数え, またCFHTLensサーベイの様々なランダムな視線方向の銀河の数を計算することで宇宙の平均的な視線方向の銀河の数を求

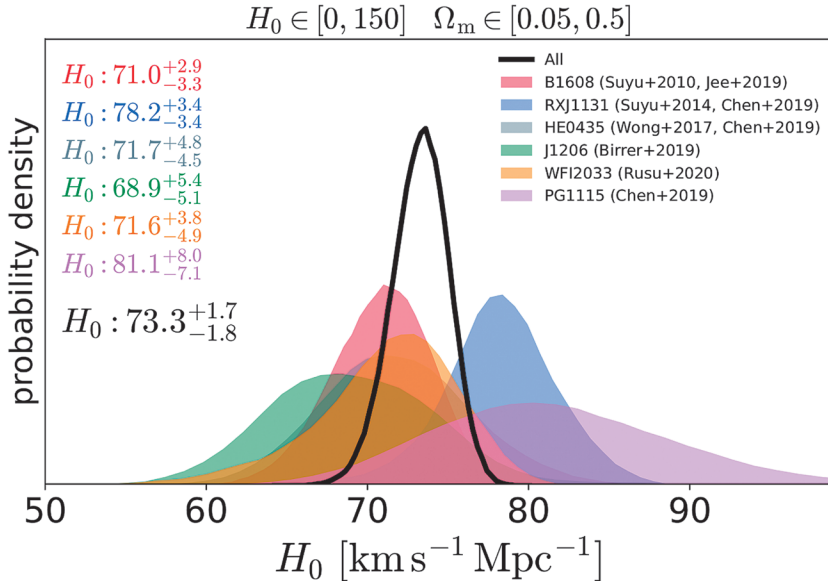


図3. 平坦ΛCDMにおける、一様な事前分布の元での $H_0$ の事後分布. それぞれのレンズ系の $H_0$ の事後分布（影付き曲線）と六つの重力レンズクエーサーを組み合わせた結果（実線）. 中央値と16%, 84%パーセンタイルが凡例に示されています.

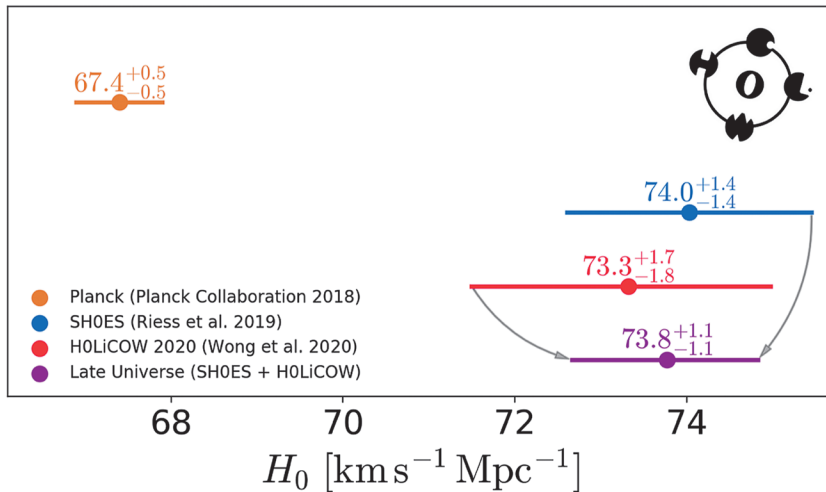


図4. 平坦ΛCDMにおける $H_0$ 制限の比較. 初期宇宙の測定はプランク衛星によるもの（オレンジ; [3]). 後期宇宙の測定はSH0ES（青; [10])とH0LiCOW（赤; [40]). 二つの後期宇宙の測定結果を組み合わせた結果（紫）、プランク衛星と $5.3\sigma$ の矛盾を示していることがわかりました.

めました. さらにミレニアムシミュレーション [35] で同様の銀河密度の超過を示す視線方向を取り出し, その視線方向の光線追跡シミュレーションの結果 [36] から $\kappa_{\text{ext}}$ を得ました. この手法により推定された $\kappa_{\text{ext}}$ の値の分布が得られ, 私

ちはこの分布を $H_0$ の推定に取り入れました.

### 3.4 ブラインド解析

私たちの解析は $H_0$ やそれに関連した値についてブラインド的に行われました. 実際にはプロットや表を確認するときに, 分布から中央値を差し

引いたものを使い解析を行いました。このブラインド解析は、系統誤差の解析が最終結果が「正しく」見えた時点で終了する傾向がある、いわゆる確証バイアスを避けるために行われました。解析を通して結果をブラインドすることで、私たちの系統誤差の確認が十分慎重かつ自分たちの解析に十分に自信を持つ必要があります。

あるレンズ系の解析が完了したら、結果を開示する前にすべての主要な著者が同意する必要があります。またチーム全体としても、得られた $H_0$ の値が最終的にどのような値であっても結果を修正することなくそのまま出版することに同意していました。

## 4. 結 果

六つの重力レンズクエーサーの解析結果 [24, 32, 34, 37-39] を組み合わせて、私たちは平坦 $\Lambda$ CDMにおいて $H_0=73.3^{+1.4}_{-1.3}$  km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>という測定結果を得ました (図3) [40]。この結果はSH0ESの距離はしごの結果と無矛盾ですがプランク衛星のCMBの測定結果とは $3\sigma$ 以上のずれがありました。H0LiCOWとSH0ESの結果はいずれも後期宇宙の $H_0$ の統計的に独立な測定結果なので、これらの測定を組み合わせるとプランク衛星の初期宇宙の結果と比較することができます (図4)。H0LiCOWとSH0ESを組み合わせると統計誤差を向上させた結果、プランク衛星のCMBの測定結果と $5.3\sigma$ の矛盾を示していることがわかり、ハッブル緊張をさらに悪化させる結果となったのです。

H0LiCOWのマイルストーン論文[40]の出版以降、七番目のレンズ系が解析され[41]、その結果プランク衛星とTDCOSMOのハッブル緊張は $4\sigma$ 以上でした。最新のSH0ESの結果 [11] と合わせ、TDCOSMOとSH0ESの結果はプランク衛星と $6\sigma$ 以上の矛盾を示しています。他のいくつかの手法も同様に、初期宇宙から得られる $H_0$ は低い値を好み後期宇宙から得られる $H_0$ は高い値を

好む結果を示し始めました [2]。このハッブル緊張はさらに堅固となり、宇宙論コミュニティは平坦 $\Lambda$ CDMの代替案を探す必要に迫られています。これは宇宙論の大きな転換点で、すべての観測を矛盾なく説明する新しい物理が必要なのかもしれません。

## 5. 将来の展望

時間の遅れコスモグラフィーを用いたより精密な $H_0$ の測定を行うためには、私たちは解析の不定性を十分に理解し、また重力レンズクエーサーサンプルを増やす必要があります。私たちの解析に考慮されていない系統誤差がまだ潜んでいることを示す統計的な証拠はありませんが [23]、バイアスを引き起こしかねない系統誤差を慎重に調査する必要があります [28, 42, 43]。系統誤差の一つの可能性は、冪分布ないし複合モデルという質量分布モデルの仮定に由来する系統誤差です [44-46]。私たちの質量分布モデルの仮定は物理的な背景に基づいてはいますが、この仮定を弱めると得られる $H_0$ の精度が悪化することもわかっています [47]。将来のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の面分光観測で得られる銀河の速度分布の二次元構造から質量分布に独立な強い制限が得られるため、この問題に対処し質量分布モデルを精密に決定できるでしょう [48, 49]。

重力レンズクエーサーは希少な天体ですので、時間の遅れコスモグラフィーに使えるそのような系を発見するために新しいサーベイデータを利用する予定です。私はすばるHSC戦略枠サーベイデータを用いたすべてのスケールの重力レンズ探査を行っています。すばるHSC (Hyper Suprime-Cam) 戦略枠サーベイ強い重力レンズワーキンググループの共同議長として、私はSuGOHI (Survey of Gravitationally Lensed Objects in HSC Imaging) と呼ばれる重力レンズ探査に参加しています。SuGOHIはいくつもの重力レンズ探査手法を用いて何百個もの新しい重力レンズを発見しました [50-

55]. 将来のルービン天文台とユークリッド衛星のサーベイによって、現在よりも桁も多くの重力レンズが発見されるでしょう [56]. 将来の大量のデータの到来に備えて、現行のサーベイで効率的に重力レンズを探索し解析する手法を確立することがとても重要です.

## 6. 結 論

私たちはH0LiCOWサンプルの六つの（最新のTDCOSMOでは七つの）重力レンズクエーサーを解析し、時間の遅れコスモグラフィーを用いたこれまでで最も高精度の $H_0$ の測定を行いました. 平坦 $\Lambda$ CDMにおける私たちの $H_0$ の測定値、 $73.3^{+1.8}_{-1.8} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ はSH0ESの距離はしごで較正されたIa型超新星の結果と無矛盾ですが、プランク衛星のCMB測定に基づく測定と $3\sigma$ 以上の食い違いがありました. 私たちの測定はSH0ESとプランク衛星のいずれの測定とも全く独立ですので、重要な系統誤差のチェックとなります. 組み合わせると、SH0ESとH0LiCOWの後期宇宙の測定はプランク衛星による初期宇宙の測定と $5\sigma$ 以上の矛盾を示しています.

多様な手法で系統誤差を調査する努力にもかかわらず、初期宇宙と後期宇宙の $H_0$ 測定の緊張は悪化する一方です. もし解決されなければ、この緊張は平坦 $\Lambda$ CDMを棄却し、私たちの宇宙の理解を根本から変える新しい物理に繋がるかもしれません.

私たちは系統誤差に対処し、また重力レンズサンプルを増やすことで時間の遅れコスモグラフィーから得られる制限を改善し続けます. ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の面分光観測によってレンズ質量分布モデルを改善することで、これまでの質量分布モデルの仮定を緩和してより複雑な質量分布モデルを考えることもできるでしょう. 将来はすばるHSC戦略枠サーベイのような大型撮像サーベイの観測データから多くの新しい重力レンズクエーサーが発見され、これによ

り近い将来 $\sim 1\%$ の精度で $H_0$ を制限することができるかと期待しています.

## 謝 辞

H0LiCOW/TDCOSMOチームに引き入れてもらい、また私の経歴において有力なメンターであり続けたSherry Suyu氏に感謝します. この研究はTDCOSMOチームの他のメンバーの貢献なしでは成し得ませんでした. また日本で働いた際のすべての共同研究者、とりわけ受け入れ研究者ないしメンターであった浜名崇氏、大栗真宗氏、鈴木尚孝氏、田中賢幸氏に感謝します. 図1の作成を手伝った森万由子氏に感謝します.

## 参考文献

- [1] Hubble, E., 1929, Proc. Nat. Acad. Science, U.S.A., 15, 168
- [2] Verde, L., et al., 2019, Nat. Astron., 3, 891
- [3] Planck Collaboration, et al., 2020, A&A, 641, A6
- [4] Pietrzyński, G., et al., 2019, Nature, 567, 200
- [5] Reid, M. J., et al., 2019, ApJ, 886, L27
- [6] Pesce, D. W., et al., 2020, ApJ, 891, L1
- [7] Sandage, A., et al., 2006, ApJ, 653, 843
- [8] Freedman, W. L., et al., 2012, ApJ, 758, 24
- [9] Riess, A. G., et al., 2016, ApJ, 826, 56
- [10] Riess, A. G., et al., 2019, ApJ, 876, 85
- [11] Riess, A. G., et al., 2022, ApJ, 934, L7
- [12] Treu, T., & Marshall, P. J., 2016, A&A Rev., 24, 11
- [13] Refsdal, S., 1964, MNRAS, 128, 307
- [14] Keeton, C. R., 2003, ApJ, 584, 664
- [15] McCully, C., et al., 2014, MNRAS, 443, 3631
- [16] Suyu, S. H., et al., 2017, MNRAS, 468, 2590
- [17] Courbin, F., et al., 2005, IAU Symposium, 225, 297
- [18] Eigenbrod, A., et al., 2005, A&A, 436, 25
- [19] Bonvin, V., et al., 2019, A&A, 629, A97
- [20] Fassnacht, C. D., et al., 2002, ApJ, 581, 823
- [21] Tewes, M., et al., 2013, A&A, 553, A120
- [22] Courbin, F., et al., 2018, A&A, 609, A71
- [23] Millon, M., et al., 2020, A&A, 642, A193
- [24] Suyu, S. H., et al., 2010, ApJ, 711, 201
- [25] Suyu, S. H., et al., 2012, ApJ, 750, 10
- [26] Birrer, S., et al., 2015, ApJ, 813, 102
- [27] Birrer, S., & Amara, A., 2018, Phys. Dark Universe, 22, 189
- [28] Shajib, A. J., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2202.11101
- [29] Sluse, D., et al., 2017, MNRAS, 470, 4838
- [30] Sluse, D., et al., 2019, MNRAS, 490, 613

- [31] Greene, Z. S., et al., 2013, ApJ, 768, 39  
[32] Suyu, S. H., et al., 2013, ApJ, 766, 70  
[33] Rusu, C. E., et al., 2017, MNRAS, 467, 4220  
[34] Rusu, C. E., et al., 2020, MNRAS, 498, 1440  
[35] Springel, V., et al., 2005, Nature, 435, 629  
[36] Hilbert, S., et al., 2009, A&A, 499, 31  
[37] Wong, K. C., et al., 2017, MNRAS, 465, 4895  
[38] Birrer, S., et al., 2019, MNRAS, 484, 4726  
[39] Chen, G. C. F., et al., 2019, MNRAS, 490, 1743  
[40] Wong, K. C., et al., 2020, MNRAS, 498, 1420  
[41] Shajib, A. J., et al., 2020, MNRAS, 494, 6072  
[42] Gilman, D., et al., 2020, A&A, 642, A194  
[43] Van de Vyvere, L., et al., 2022, A&A, 659, A127  
[44] Blum, K., et al., 2020, ApJ, 892, L27  
[45] Kochanek, C. S., 2020, MNRAS, 493, 1725  
[46] Kochanek, C. S., 2021, MNRAS, 501, 5021  
[47] Birrer, S., et al., 2020, A&A, 643, A165  
[48] Yıldırım, A., et al., 2020, MNRAS, 493, 4783  
[49] Yıldırım, A., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2109.14615  
[50] Sonnenfeld, A., et al., 2018, PASJ, 70, S29  
[51] Wong, K. C., et al., 2018, ApJ, 867, 107  
[52] Chan, J. H. H., et al., 2020, A&A, 636, A87  
[53] Jaelani, A. T., et al., 2020, MNRAS, 495, 1291  
[54] Sonnenfeld, A., et al., 2020, A&A, 642, A148  
[55] Wong, K. C., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2203.12805  
[56] Oguri, M., & Marshall, P. J., 2010, MNRAS, 405, 2579

## Measurement of the Hubble Constant from Lensed Quasars

**Kenneth C. WONG**

*National Astronomical Observatory of Japan,  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Gravitationally-lensed quasars have an observable time delay between the multiple images that can be used to determine the Hubble constant ( $H_0$ ), which sets the expansion rate of the Universe. Recent observations have revealed a tension between measurements of  $H_0$  from the early and late-Universe, presenting a challenge for cosmology. In this article, I will discuss my research that uses lensed quasars to precisely measure  $H_0$  in an independent way.