

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00181

研究課題名(和文)高速CMOSカメラによる広視野天体撮像探査の新展開

研究課題名(英文)Wide Field Astronomical Survey by high Speed CMOS

研究代表者

宮崎 聡 (Miyazaki, Satoshi)

国立天文台・ハワイ観測所・教授

研究者番号：20290885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来のCCDに比べてCMOSは、電荷転送が不要なため、高速読み出しが可能であることが特徴である。一方、天体観測用には長波長側の感度が十分でない、受光面積が狭い、雑音が高いなどの問題があった。我々は本科学研究費の助成を受け、浜松ホトニクスと共同で、この問題点の解決に取り組んだ。その結果、総画素数2560 x 10,000 (7.5ミクロン角画素)で、最大量子効率90%に迫る素子の開発に成功した。また、これをカメラとして組み上げ、口径1.5 m望遠鏡に設置し観測を行い、CMOS素子の性能確認を行った。ラッキーイメージング等新しい観測手法の試験を行い、期待どおり像改善がみられることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来天体観測用検出器としては、CCDが用いられてきた。大望遠鏡の場合、全ての光学系が大型化するため、光検出器も大型化せざるを得ない。CCDは、その読み出し時に画素上を電荷を転送して順次読み出す方式のため、大型素子では読み出し時間が長くなるという欠点があった。実際、すばる望遠鏡等で用いられている素子はその読み出しに15秒ほどかかる。新たに開発に成功した大型CMOSは1/10秒で読み出しが完了し、画期的である。これまでは検出できなかった、光の放出量が高速で変動する天体の検出ができるようになる。また、読み出し時間の短縮は、とりわけ短時間露出を繰り返すような観測の場合、劇的に観測効率を向上できる。

研究成果の概要(英文)：CMOS detector drew our attention as a possibly new photon detector for astronomical observations. Compared with conventional CCD detector, CMOS has advantage in the short read out time because no charge transfer is necessary on the device. The existing commercial CMOS, however, has less sensitivity especially in longer wavelength, smaller format, and higher readout noise. Based on the support from this grant-in-aid, we developed large format low noise CMOS in collaboration with Hamamatsu Photonics by solving issues above. As a result, we have successfully developed 2560 x 10,000 pixels (7.5 micron square pixel) whose quantum efficiency is almost 90% maximum. We developed a camera with the CMOS and test it at 1.5 m telescope. We verified the expected performance and improvement of the image quality based on the newly implemented lucky imaging algorithm.

研究分野：天文学

キーワード：天文学 光検出器 CMOS

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

天文観測の検出器としては低速なCCDが使われていたため、時間変動天体の観測に限界があった。

2. 研究の目的

高速なCMOSを開発し、天体観測に導入する。これにより、新しいパラメータスペースを切り拓く。

3. 研究の方法

浜松ホトニクスとCMOS共同開発を行い、カメラを開発・製作し、試験観測でその性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 研究成果の概要

天文観測の新しい検出器として、我々はCMOS撮像素子に着目した。従来のCCDに比べてCMOSは、電荷転送が不要なため、高速読み出しが可能であることが特徴である。一方、天体観測用には受光面積が狭く、読み出し雑音が高いのが問題であった。我々は本科学研究費の助成を受け、科学計測センサーに実績がある「浜松ホトニクス」と共同で、この問題点の解決に取り組んだ。その結果、総画素数2,560 x 10,000 (7.5ミクロン角画素)で、最大量子効率が90%に迫る素子の開発に成功した。また、これをカメラとして組み上げ、広島大学の1.5 m望遠鏡に設置し観測を行い、CMOS素子の性能確認を行うとともに、これまでCCDでは不可能だった、ラッキーイメージング等新しい観測手法の試験を行い、期待通りの像改善がみられることを確認した。一方、高速読み出しが有効となる研究課題は幅広い分野にわたるが、それらについて予備的な観測を行い成果を得た。

(2) 開発したCMOS撮像素子 CMOSセンサーの開発

は浜松ホトニクス株式会社と共同で2017年度より開始した。受光エリアの画素数は2560x10000ピクセル(256x10000ピクセルx10チャンネル)、画素サイズは7.5ミクロン角画素の裏面照射型である。最終的にフレームレート10fps(全画素読出)で動作させる。

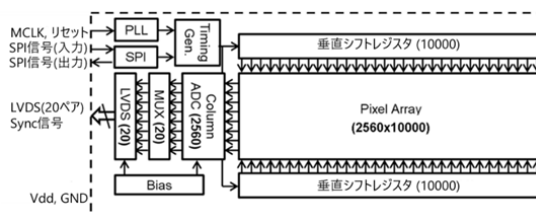


図1 CMOSセンサブロック図

図1にセンサーのブロック図を示す。受光エリア

(Pixel array)の両側に垂直シフトレジスタを配置し、列ごとにAD変換回路を内蔵、タイミング発生回路およびバイアス発生回路を内蔵する。SPI (Serial Peripheral Interface) を搭載し、20ペアのLVDS信号で出力する。試験観測に用いた素子の性能を示す。動作条件はデジタル周波数90MHz、フレームレート12bit 2fpsを使用した。

図2(a)は温度ごとの暗電流を表したものである。回路に近い部分は、回路の発熱により高い暗電流を示しているが、0°C付近から10e-/pixel/secで一定になる。回路から十分に遠い受光部では-5°C程度まで冷やすことで暗電流を1e-/pixel/sまで抑えることができる。しかし図2(b)に示すように-5°Cではホットピクセルが存在する。冷却することでそれを減らすことができるため、以後-45°C程度で動作させることにした。

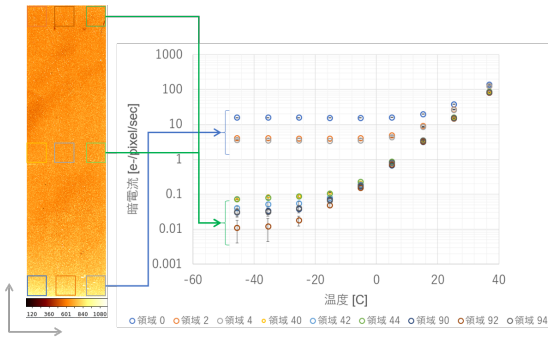


図2(a) 暗電流の温度依存性

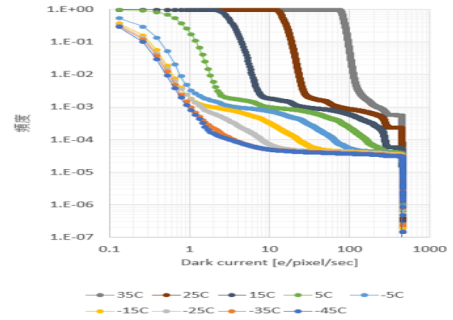


図2(b) ホットピクセルの割合

ゲイン・ノイズの測定は、X線源(Fe55)を用いて、Low gain, Middle gain, High gainで測定した。図3はHigh gainで測定した結果である。ノイズ: $2.56e^{-}$ 、FWHM: 158.2 eVを得た。図4は分光感度の測定結果である。400nmにおいて62%、800nmにおいて40%、540nmにおいて最大90%の感度を示した。

これまでの開発では、10fpsで駆動するときデジタルエラーやリニアリティ不良が発生した。また異常分散(蓄積時間により決まる特定の入射光を境に出力にオフセットがのる現象)があった。前者はマスクを改定することで改善したが、後者は「非蓄積期間にPDで蓄積された電荷量が閾値を超えると発生すること」、「異常分散が起きたときに上乗せされる電荷量は、酸化膜界面にトラップされる量で決まる」という発生メカニズムが分かり、動作タイミングの改訂とホトマスクの全層改定を行うことで解決する見込みがあった。2019年度までに製作したCMOSを使って受光部厚を変えた素子を試作し、感度および厚みと解像度(PSF)の相関を確認し、最終的な搭載用CMOSの受光部厚を確定した。さらに高速で読むことを見据え、2022年度は部分読み出しの機能を追加した。100行単位で読み出すことができ、最大フレームレートは1000fpsとなる。

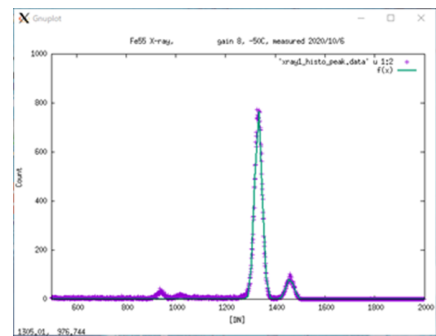


図3 X線イベント(High gain)

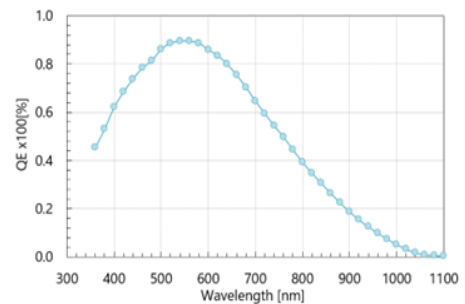


図4 量子効率

(3) カメラの開発と試験観測 実際にCMOSセンサーを用いた観測を行うためには、センサーや読み出し回路をまとめ、望遠鏡に搭載可能なインターフェースを持つカメラが必要になる。本研究では、焦点面に12個のCMOSセンサーを最小の隙間で並べ、すばる望遠鏡の主焦点広視野CCDカメラ(Suprime-Cam)の焦点面部に取り付けられているカメラを置き換えて使えるようなカメラの設計を行った。CMOSセンサーは冷却して使用するため、カメラ内部は真空が引けるようなデュワー構造をしており、スターリング冷凍機により焦点面のCMOSセンサーを -50°C に冷却することが可能である。また、CMOSセンサーは多数の信号線・電源線を接続しなくてはならないが、これらをデュワー内外で接続するためには真空部・常圧部をつなぐ効率よい接続方式が必要である。従来は、真空コネクタを用いてデュワー内外を接続していたが、今回設計したデュワーではPCB基板内に配線層を配置する新たな方式を採用

した。この方式は、PCB基板の内層に数層のレイヤーを設け各レイヤーに配線を配置し、基板を両面から0リングで押さえつけることによって、真空を保ちつつデュワー内外を基板一枚で電氣的に接続することが可能であるという画期的な方法である(図5 左)。また、CMOSセンサー読み出し回路を主焦点部にどのように配置するかを検討も進めた。2019年9月と2020年3月にはこのカメラを広島大学宇宙科学センターのかなた望遠鏡に取り付けて試験観測を行った(図5 右)。試験観測を進めるにあたっては、どのようにCMOSカメラを望遠鏡に設置するかについて広島大学の担当者と事前に綿密な打ち合わせを行い、設置方法の検討を行った。望遠鏡へ設置するためには、インターフェースとなる板にカメラを載せて、その板の位置を調整することにより望遠鏡とのアライメントをとるように工夫した。1回目の観測時は天候には恵まれなかったが、2回目の観測では、二重星や木星の短時間積分画像を繰り返し取得し、シーイングの影響をモニターする実験、長時間使用時にCMOSセンサーがどのような温度変化をするかなど様々な基礎的データを取得することができた。また、この観測時には国立天文台・総研大で実施したサマースチューデントプログラムに採用された学部学生2名も参加し、望遠鏡の操作や観測の基礎などを学ぶという教育活動も同時に行うことができた。

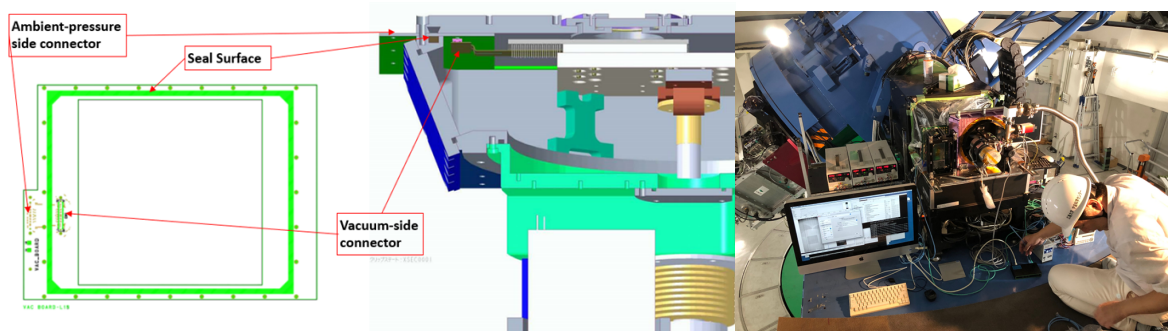


図5：(左) CMOSカメラの3Dモデル。デュワー断面図と真空部・常圧部をつなぐPCB基板の模式図を並べて掲載した。(右) かなた望遠鏡での試験観測の様子。

(4) ラッキーイメージング 短時間積分・高速読み出しの効果で『良い』画像だけを選択して使用する Lucky Imaging が可能になる。画像の空間周波数成分を解析して、高周波成分の振幅が大きいものを選択することで『良い』画像を抽出することができる。画像の重心を合わせることで大局的な位相は揃えられる。画像内の空間位相ずれ(大気ゆらぎによる歪みに相当する)を効率的に合わせる手法の検討が目下の課題である。画像内に目標点が多い場合には分割画像の解析と結合とで歪みの補正できる可能性がある。ごく狭い領域に限った場合、ピーク位置を合わせることで回折限界に近い分解能を得られる。これが有効な範囲は isoplanatic angle 程度に限られるが効果は大きい。試験観測の結果、以下の図6, 7に示すように、期待通りの像改善が確認された。

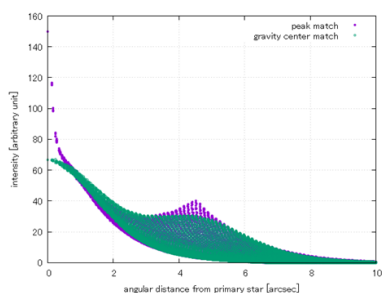


図6 位相合わせ方法による像質改善の差。ピーク位置合わせ(紫)は重心位置合わせに比べて主星の近傍で非常に効果が高い。伴星の位置でもある程度の効果が見込める。

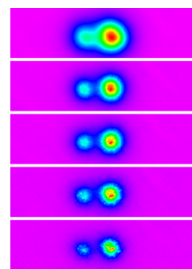


図7: 二重星α-Gemに対するLucky Imagingの効果。上から順に1000枚中1000,100,50,20,10枚の良いデータを使用した場合。良いものに絞るほど解像度が上昇していることがわかる。

(5) 高速読み出しが有効な天体観測 CMOSを用いて達成される高時間分解能観測で狙うサイエンス検討の研究も、大きな成果が得られた。当初主要な目標の一つであった、ラッキーイメージングを利用した弱重力レンズの高精度ダークマター分布再構築については、観測との比較に必要な現実的な密度分布に対する重力レンズ計算を2桁以上高速化する新しいアルゴリズムの提唱 (PASP 133(2021)074504) や、銀河の測光的赤方偏移の情報を組み込んだ高精度三次元ダークマター分布再構築の、スパースモデリングと呼ばれる手法を用いた新しい手法の開発 (ApJ 916(2021)67) など、多くの理論面での成果が得られた。またすばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC) イメージング観測の弱重力レンズ解析で再構築された質量マップの解析を行い、質量マップピークからダークマターが大量に付随した天体である銀河団を選択する手法を改良することで発見される銀河団の数を2倍以上増やすことができることを示した (PASJ 73(2021)817)。

当初の主要な目標の一つである、銀河団観測による変動天体観測を用いたダークマター探索についても、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた予備研究で大きな成果が得られた。単独の星が何千倍と大幅に増光される現象である焦線通過マイクロ重力レンズについて、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測によりこれまでの最遠方記録を大幅に更新する赤方偏移6.2の焦線通過マイクロ重力レンズ現象を発見した (Nature 603(2022)815)。また重力レンズ効果により複数に分裂して観測される重力レンズ超新星についても、ハッブル宇宙望遠鏡アーカイブデータの再解析によって、貴重な爆発初期の様子を捉えた三重重力レンズ超新星を発見した (Nature 611(2022)256)。また時間の遅れが測定された最初の例である重力レンズ超新星レフスダールの詳細解析によりハッブル定数の有用な制限が得られた (Science 380(2023)abh1322)。これらの研究は、銀河団で増光され観測される時間変動現象が普遍的に存在することを意味し、CMOSを用いたサーベイ観測の有効性を強く支持する研究成果である。またこれらの変動天体観測から具体的にどのようにダークマターモデルを制限するかについての理論研究も並行して行い、重要な成果の一つとして、アクシオン様粒子などの非常に軽いダークマターの量子干渉効果による重力レンズ天体中の小スケールゆらぎパワースペクトルの解析的な表式を導いた (ApJ 925(2022)61)。我々の表式は非常に一般的であり、焦線通過マイクロ重力レンズの発生位置の摂動などに適用することができる。

また、CMOSを用いたダークマター研究の新しいアプローチについてもいくつか重要な成果が得られた。例えば、小分離角強重力レンズは質量の小さい矮小銀河により引き起こされるため、小スケール密度ゆらぎに敏感であり従ってダークマター研究の新しいツールとなりうが、観測的にそのような小分離角強重力レンズを発見することが空間分解能の制約から難しいという困難があった。我々は一連の研究によって位置天文観測衛星ガイアの全天観測データを利用することで小分離角強重力レンズの候補を効率的に選び出すことができることを見出した (Nature Astronomy 5(2021)569; MNRAS 520(2023)3305)。この新手法はCMOS観測のラッキーイメージングの絶好のターゲットを提供する。また他の新しいアプローチとして、重力波伝搬の波動光学効果に基づく重力波波形のゆがみから小スケールダークマター分布を直接測定する手法を提案した (ApJ 901(2021)58; Phys. Rev. D 106(2022)04352)。通常の重力波天体に対しては波形のゆがみは非常に小さくその観測的検出は容易ではないが、我々は重力レンズによって増光された天体に対してはそのような波形のゆがみが大幅に増幅され、容易に検出されうることを明らかにした。将来の重力波観測によって重力レンズ重力波候補天体を同定し、CMOS高速観測を活用した電磁波対応天体の観測などによって重力レンズであることを確定できれば、我々が提唱する手法によってパーセクスケールの非常に小さな長さスケールのダークマター分布を測定することができるだろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Oguri Masamune, Miyazaki Satoshi, Li Xiangchong, Luo Wentao, Mitsuishi Ikuyuki, Miyatake Hironao, More Surhud, Nishizawa Atsushi J, Okabe Nobuhiro, Ota Naomi, Plazas Malagon Andres A, Utsumi Yousuke	4. 巻 73
2. 論文標題 Hundreds of weak lensing shear-selected clusters from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S19A data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 817 ~ 829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shirasaki Masato, Egami Eiichi, Okabe Nobuhiro, Miyazaki Satoshi, 、 、	4. 巻 506
2. 論文標題 Stacked phase-space density of galaxies around massive clusters: comparison of dynamical and lensing masses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3385 ~ 3405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1961	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Roberts Ian D, Parker Laura C, Gwyn Stephen, 、 、 Miyazaki Satoshi, Oguri Masamune, 、 、	4. 巻 509
2. 論文標題 Ram pressure candidates in UNIONS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1342 ~ 1357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab3101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Akino Daichi, Eckert Dominique, Okabe Nobuhiro, Sereno Mauro, Umetsu Keiichi, Oguri Masamune, Gastaldello Fabio, Chiu I-Non, Etori Stefano, Evrard August E, Farahi Arya, Maughan Ben, Pierre Marguerite, Ricci Marina, Valtchanov Ivan, McCarthy Ian, McGee Sean, Miyazaki Satoshi, Nishizawa Atsushi J, Tanaka Masayuki	4. 巻 74
2. 論文標題 HSC-XXL: Baryon budget of the 136 XXL groups and clusters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 175 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuoka Yoshiki, Iwasawa Kazushi, Onoue Masafusa, Izumi, Komiyama Yutaka, 、 、 Miyazaki Satoshi, 、 、 Oguri Masamune, 、 、	4. 巻 259
2. 論文標題 Subaru High-z Exploration of Low-luminosity Quasars (SHELLQs). XVI. 69 New Quasars at $5.8 < z < 7.0$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 18 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac3d31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hamana Takashi, Shirasaki Masato, Miyazaki Satoshi, Hikage Chiaki, Oguri Masamune, 、 、 Komiyama Yutaka, 、 、 、	4. 巻 72
2. 論文標題 Cosmological constraints from cosmic shear two-point correlation functions with HSC survey first-year data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Okabe Nobuhiro, 、 、 r, Miyazaki Satoshi, 、 、 Oguri Masamune, 、 、	4. 巻 501
2. 論文標題 Active gas features in three HSC-SSP CAMIRA clusters revealed by high angular resolution analysis of MUSTANG-2 SZE and XXL X-ray observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1701 ~ 1732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2330	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ozaki Shinobu, Hattori Takashi, Aoki Kentaro, Lee Chien-Hsiu, Fukushima Mitsuhiro, Iwashita Hikaru, Mitsui Kenji, Tanaka Yoko, Tsuzuki Toshihiro, Okada Norio, Obuchi Yoshiyuki, Miyazaki Satoshi, Yamashita Takuya	4. 巻 11447
2. 論文標題 Performances of an integral field unit for FOCAS on the Subaru telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560602	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Utsumi Yousuke, Geller Margaret J., Zahid Harus J, Sohn Jubee, Dell'Antonio Ian P., Kawanomoto Satoshi, Komiyama Yutaka, Koshida Shintaro, Miyazaki Satoshi	4. 巻 900
2. 論文標題 Velocity Dispersions of Massive Quiescent Galaxies from Weak Lensing and Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba61c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Oguri Masamune Takahashi Ryuichi	4. 巻 901
2. 論文標題 Probing Dark Low-mass Halos and Primordial Black Holes with Frequency-dependent Gravitational Lensing Dispersions of Gravitational Waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abafab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Oguri Masamune	4. 巻 133
2. 論文標題 Fast Calculation of Gravitational Lensing Properties of Elliptical Navarro-Frenk-White and Hernquist Density Profiles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of the Pacific	6. 最初と最後の頁 074504 ~ 074504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1538-3873/ac12db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Li Xiangchong, Yoshida Naoki, Oguri Masamune, Ikeda Shiro, Luo Wentao	4. 巻 916
2. 論文標題 Three-dimensional Reconstruction of Weak-lensing Mass Maps with a Sparsity Prior. I. Cluster Detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 67 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0625	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Welch Brian,,, Oguri Masamune ,,,	4. 巻 603
2. 論文標題 A highly magnified star at redshift 6.2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 815 ~ 818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04449-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Chen Wenlei, Kelly Patrick L., Oguri Masamune, Broadhurst Thomas J., Diego Jose M., Emami Najmeh, Filippenko Alexei V., Treu Tommaso L., Zitrin Adi	4. 巻 611
2. 論文標題 Shock cooling of a red-supergiant supernova at redshift 3 in lensed images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 256 ~ 259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-05252-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kelly Patrick L.,, Oguri Masamune ,,,	4. 巻 380
2. 論文標題 Constraints on the Hubble constant from supernova Refsdal ' s reappearance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abh1322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawai Hiroki, Oguri Masamune, Amruth Alfred, Broadhurst Tom, Lim Jeremy	4. 巻 925
2. 論文標題 An Analytic Model for the Subgalactic Matter Power Spectrum in Fuzzy Dark Matter Halos	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 61 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac39a2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shen Yue, Chen Yu-Ching, Hwang Hsiang-Chih, Liu Xin, Zakamska Nadia, Oguri Masamune, Li Jennifer I-Hsiu, Lazio Joseph, Breiding Peter	4. 巻 5
2. 論文標題 A hidden population of high-redshift double quasars unveiled by astrometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 569 ~ 574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01323-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Oguri Masamune, Takahashi Ryuichi	4. 巻 106
2. 論文標題 Amplitude and phase fluctuations of gravitational waves magnified by strong gravitational lensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.043532	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Satoshi Miyazaki
2. 発表標題 Japanese (Subaru) Perspectives of Ground-Space Cooperation
3. 学会等名 2021 ISSI Forum: Ground and Space Astronomy Challenges & Synergies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Miyazaki
2. 発表標題 HSC Survey Update
3. 学会等名 German eROSITA Virtual Consortium Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤田 裕 (Fujita Yutaka) (10332165)	東京都立大学・理学研究科・教授 (22604)	
研究分担者	鎌田 有紀子 (Kamata Yukiko) (10413973)	国立天文台・先端技術センター・技師 (62616)	
研究分担者	小宮山 裕 (Komiya Yutaka) (20370108)	法政大学・理工学部・教授 (32675)	
研究分担者	大栗 真宗 (Oguri Masamune) (60598572)	千葉大学・先進科学センター・教授 (12501)	
研究分担者	川野元 聡 (Kawanomoto Satoshi) (90727398)	国立天文台・ハワイ観測所・特任研究員 (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------