

# HSCで探す強い重力レンズ

大栗 真宗

〈東京大学大学院理学系研究科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〉

e-mail: masamune.oguri@ipmu.jp



質の高いHSCサーベイ画像は強い重力レンズ現象の探索においても非常に強力です。実際、HSCサーベイの初期データを用いた探索でこれまでに発見されてこなかったユニークなものも含めた多数の強い重力レンズ系をすでに発見しています。本稿では、HSCサーベイデータを用いた強い重力レンズ探索を概観し、今後の展望を議論します\*1。

## 1. 強い重力レンズワーキンググループ

Hyper Suprime-Cam (HSC) サーベイのような広視野撮像サーベイはとても汎用性が高く、サーベイ本来の主目的以外の様々な研究に利用することができます。強い重力レンズもそのような研究の一つですが、その「おまけ感」は強い重力レンズワーキンググループの設立にも現れています。HSCサーベイでは、さまざまなサイエンスのテーマにあわせて近い興味をもつサーベイメンバーの議論や情報交換を促進するためのワーキンググループが用意されていますが、強い重力レンズワーキンググループはHSCサーベイ開始当初存在しませんでした。

筆者はこの状況を特に疑問には思っていなかったのですが\*2、東京大学カブリIPMUにポスドクとして来てHSCサーベイの強い重力レンズ探索を心待ちにしていたAnupreeta Moreは違いま

した。筆者は始めは消極的でしたが、彼女はなぜ強い重力レンズワーキンググループがないのか、ないのであれば作るべきだ、と主張し筆者もその熱意に押される形で関係者と掛け合い、メンバーリストはサーベイ開始約1年後の2015年2月に立ち上がりその後ほどなくしてワーキンググループの設立も正式に認められました。設立の経緯からワーキンググループの代表はAnupreeta More、副代表は筆者が務めることになりました\*3。

このようにして始まったHSCサーベイの強い重力レンズ探索ですが、こじんまりとしながらも活動的なグループでさまざまな面白い発見を成し遂げることができました。以下これまでに得られた成果を概観してみることになります。

## 2. ホルスの目

最初の重要な発見は偶然にもたらされました<sup>1)</sup>。2015年秋に国立天文台で大学生を対象に開催さ

\*1 本稿では敬称はすべて省略させていただきます、また本文中で紹介する方々の所属はその研究時のもので現在は異なる可能性があります。ご了承ください。

\*2 筆者が以前活動していたスローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) では強い重力レンズに特化したワーキンググループはなく、筆者らはクエーサーワーキンググループなどの他のワーキンググループの下で活動していました。したがってHSCサーベイでも同様の活動を想定していました。

\*3 現在はAnupreeta Moreと筆者は代表の座から退いていて、Kenneth WongとCristian Eduard Rusuが後を継いで活発にワーキンググループの活動を主導しています。

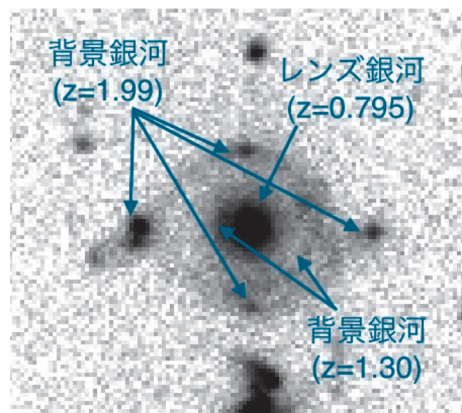


図1 二重ソース重力レンズ「ホルスの目」<sup>1)</sup>のiバンドHSC画像。一つのレンズ銀河(赤方偏移0.795)が異なる赤方偏移(1.30と1.99)の二つの銀河を同時に重力レンズ効果でゆがめています。

れた体験学習「すばらの学校」でHSCサーベイデータを用いた実習を行っていて、その中でHSCサーベイ画像を目で見て確認していた受講生の出塚杏沙が重力レンズとおぼしき天体を発見したのです。すばらの学校で講師を務めていた国立天文台の田中賢幸は、すぐにこれは重力レンズに違いないと確信し、強い重力レンズワーキンググループのメンバーに連絡しました。筆者らも画像を見て重力レンズであることはすぐわかりましたが、その解釈は一筋縄ではいきませんでした。というのも、重力レンズを受けた背景銀河が色の違う複数の成分からなるとても複雑な形状をしていたからです(図1)。ちょうどその日は強い重力レンズワーキンググループのメンバーが東京大学カブリIPMUに集まり議論をしていた日だったので、この複雑な形状の解釈について激論を交わしました。

議論の結果、この複雑な形状は赤方偏移の異なる二つの背景(ソース)銀河が同時に強い重力レンズを受ける二重ソース重力レンズではないか、という話になりました。田中賢幸の測光的赤方偏移の解析もその解釈を支持するものでした。強い重力レンズ自体がそもそも希な現象ですので、二重ソース重力レンズは希の2乗でさらに希な現象であり、これまで2個ほど候補があるが分光で確認されたものはない、という状態でした<sup>2), 3)</sup>。この仮説を確かめるべく、国立天文台のKenneth Wongとアリゾナ大学の江上英一はマゼラン望遠鏡の追観測の時間を取得し分光観測を行いました。重力レンズを受けた天体はそれほど明るい天体ではないので難しい解析でしたが、スペクトルを解析した結果この天体は赤方偏移0.795の銀河がその背後の赤方偏移1.30と1.99の異なる二つの銀河を同時にゆがめている二重ソース重力レンズであることが確認されたのです(図1)。

この天体の解釈を確実なものにするためには、重力レンズモデルで観測された複雑なゆがみが再現できることを示すことも重要です。前述のKenneth Wongと台湾中央研究院のSherry SuyuはGLEE<sup>4), \*4)</sup>と呼ばれる重力レンズソフトウェアを用い、またAnupreeta Moreと筆者はGLAFIC<sup>5), \*5)</sup>と呼ばれるソフトウェアを用いてそれぞれモデリングを行い、観測された複雑な形状をきれいに再現できることを示しました<sup>\*6)</sup>。ちなみに、この重力レンズ系は見た目が瞳のようにも見えることから、古代エジプトのシンボルに由来する「ホルスの目」(Eye of Horus)というニックネームがつけられました<sup>\*7)</sup>。

このような二重ソース重力レンズは、単なる稀

\*4 Gravitational Lens Efficient Explorerの略、ですが米国の某テレビドラマと関係があるかどうかはわかりません。

\*5 Gravitational Lens Adaptive-mesh Fitting Codeの略。開発の経緯が天文月報の記事<sup>6)</sup>となっています。

\*6 今回の二重ソース重力レンズのモデル化において、二つの背景銀河のうち手前にあるほうの銀河の重力場がその背後にある銀河の形状をさらにゆがめるという二重レンズ効果を正しく取り入れることが重要であることがわかりました。公開されているGLAFICソフトウェアは二重レンズ効果に対応していなかったため、筆者は二重レンズ効果に対応したコードを急遽書くことを余儀なくされました。

少性以上の価値はあるのでしょうか？ 重力レンズ像が出現する半径はアインシュタイン半径と呼ばれますが、この半径は重力レンズを引き起こす銀河の質量に加えて重力レンズを受ける天体の赤方偏移にも依存します。異なる赤方偏移の二つの銀河が同じ手前の銀河で重力レンズを受けた場合、それらのアインシュタイン半径の比をとると重力レンズを起こす銀河の質量の依存性はほぼキャンセルするため宇宙の幾何学（宇宙論パラメータ）で主に決まることがわかります。したがってこのような二重ソース重力レンズは少ない数でも有用な宇宙論的応用が見込めます<sup>11)</sup>。

ホルスの目はその貴重さから、さまざまな追観測が進行中です。Kenneth Wongがチームを主導し提案したアルマ望遠鏡観測とハッブル宇宙望遠鏡撮像観測は無事採択され画像も取得されました。またホルスの目のレンズ銀河の環境を調べるべく、首都大学東京の一戸悠人を中心に提案したXMM衛星のX線観測も採択され取得したデータの解析も進んでいます。これらの追観測データを組み合わせてホルスの目のさらに詳細な重力レンズモデルを構築する予定です。

### 3. クエーサーか銀河か？

重力レンズを受ける背景天体は銀河とは限りません。歴史的には非常に明るい活動銀河核であるクエーサーが手前の銀河で複数に分裂して観測されるクエーサー重力レンズの方が先に発見されました<sup>12)</sup>。クエーサーの大きな特徴は、その明るさが時間変動することで、この時間変動を利用することで複数像間の光の到達時間の遅れを観測する

ことができる点にあります。この時間の遅れの観測は、宇宙の大きさ（ハッブル定数）を直接測定できるという点で、最近特に注目を浴びています<sup>13)</sup>。また、クエーサー重力レンズは大半のものが複数像が二つないし四つですが、得られる情報の多さから後者の四重像クエーサー重力レンズがより有用だと考えられています。

つまり、四重像クエーサー重力レンズはとりわけ貴重で、かつこれまで30個程度しか見つかっていないということもあって、特に発見が待望されている重要な重力レンズです。例えば、台湾国立大学のJames ChanとSherry SuyuはCHITAH<sup>\*8</sup>という特に四重像クエーサー重力レンズを意識した重力レンズ探索アルゴリズムを開発して<sup>14)</sup>その探索をHSCデータで行っています。

そんな中、ある日Anupreeta Moreが筆者に新しい四重像クエーサー重力レンズを見つけたと知らせてくれました。HSCサーベイ画像のビューアであるhscMapを見ていて全く偶然発見したというのです。希少な四重像クエーサー重力レンズを偶然目で見て発見することがあるとはにわかには信じ難いのですが、画像を見ると確かにクエーサーっぽい色の天体が銀河の周りに四つあり重力レンズのように見えます（図2）。

ただ画像を注意深くみると、クエーサー像とみられるものは点源ではなく少し広がっているようにも見たので、筆者は「これは本当にクエーサーだろうか、ひょっとしたら銀河ではないか」といいました。画像データをダウンロードして注意深くフィッティングを行うと、確かに僅かですが広がっていることを支持する結果が得られまし

\*7 珍しい重力レンズにはしばしばニックネームがつけられます。例えば以前に発見されていた二重ソース重力レンズはJackpotと呼ばれています<sup>7)</sup>。ほかにもホルスの目と同様に瞳のような見た目からCosmic Eye<sup>8)</sup>、夜8時に発見されたので8 O'Clock Arc<sup>9)</sup>という冗談みたいなものもあります。筆者も以前SDSSで発見した珍しい三重像重力レンズクエーサーを黒澤映画にちなんでHidden Fortressと名づけてみたのですが<sup>10)</sup>全然反響がなく悲しい思いをしたこともあります。

\*8 中国語で重力和影像探奥號（Chung-li He In-hsiang Tan Ao Hao）を略したものだそうです、といっても中国語を知らないという意味不明かもしれませんが…。

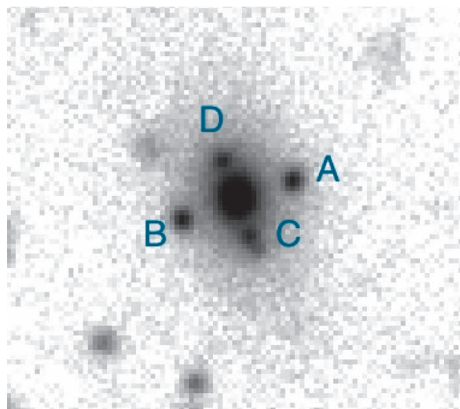


図2 新しく見つかった四重像クエーサー(?)重力レンズ<sup>15)</sup>のrバンドHSC画像. A-Dで示されたコンパクトな天体は赤方偏移3.76のクエーサーないし銀河で、それが中心の赤方偏移0.466の銀河の重力レンズ効果で四つに分裂して観測されています。

た。しかしややこしいのはこのことが直ちにクエーサーであることを否定するものではないことです。というのも、クエーサー(活動銀河核)には母銀河が付随しているので、重力レンズを受けてゆがんだ母銀河をみている可能性もあるからです。

いずれにせよ重力レンズであることは間違いなさそうなので解析を進めることにしました。国立天文台ハワイ観測所のChien-Hsiu Leeのジェミニ望遠鏡を用いたすばやい追観測と解析で、四つの像がどれも赤方偏移3.76に対応する波長にライマン $\alpha$ 輝線をもっていることを確認し、重力レンズであることは確定しました。上記の画像フィッティングの結果や分光観測で得られたスペクトルを解析し、また高赤方偏移銀河に詳しい東京大学宇宙線研究所の小野宜昭らとも相談してさまざまな角度から検討しましたが、なかなか決定打は得られないのでとりあえずよくわからないまま発見論文を書くことにしました<sup>15)</sup>。今後高解像度の画像がえられればどちらの解釈が正しいかはつき

りするものと思われます。

この系がクエーサー重力レンズであった場合もちろん重要ですが、銀河であった場合も高赤方偏移で非常にコンパクトな銀河が少なからず存在することを意味するので、いずれにせよ面白い発見です。最近のHSCサーベイデータの探索から似たような重力レンズ系がいくつかみつかってきていますので、このクエーサーか銀河かの悩みはサーベイが終わるまで続くのかもしれませんが。

#### 4. 系統的な探索へ

HSCサーベイデータは膨大ですので、あてずっぽうに探してもらちがあきません。効率的な探索方法を確立しそれをどんどん適用していく必要があります。この面で活躍したのが東京大学カブリIPMUのAlessandro Sonnenfeldです。彼は、銀河のHSC画像をチェックして重力レンズかどうかを自動的に判別するアルゴリズムYATTALENS<sup>\*9)</sup>を開発しました。もう少し具体的には、各銀河に対して画像フィッティングを行い重力レンズを受けた背景銀河を入れた場合と入れない場合でどのくらいフィッティングが改善するかを見ることで重力レンズ候補を選び出しています。

ただYATTALENSも完璧ではないので、やはり最終的には目で画像を見て判別します。具体的には、手始めにまずSDSSで分光されている比較的重い銀河43,000個ほどの銀河のHSC画像にYATTALENSを適用し1,500個の重力レンズ候補を選び、この候補のHSC画像を複数のチームメンバーで目で確認して良さそうな候補を選ぶ、という手順を経ることで約50個の可能性の高い重力レンズ候補リストを作成しました<sup>16)</sup>。例を図3に示します。これらはすべて重力レンズを受けた銀河(クエーサーではなく)の候補になります。このとおり、自動化したアルゴリズムとはいっても依然として人の目が重要な役割を果たしていま

\*9) 日本語の「やったー！」に由来します。



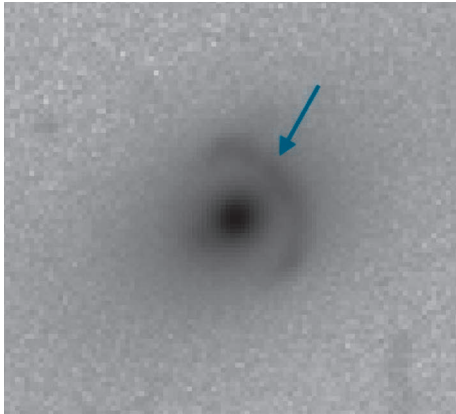


図3 YATTALENS<sup>16)</sup> で新しく発見された強い重力レンズの*i*バンド HSC画像の例. 矢印で示した銀河が、重力レンズ効果で大きく形状がゆがめられた背景銀河です.

す。これら重力レンズ候補については、順次超大型望遠鏡 (VLT) の X-shooter などを用いた追観測によって重力レンズであることを確定させると同時に赤方偏移を測定してその後の銀河進化や宇宙論の研究につなげていこうとしているところです。

これに加えて、ほかの手法を用いた重力レンズ探索も並行して行っています。例えば先に述べた CHITAH を用いた探索からも強い重力レンズが発見されています。クエーサー重力レンズを探すために京都産業大学の米原厚憲らの作成した測光データから選ばれたクエーサーサンプルを使った探索を試みたりもしています。ほかにも、SDSS の分光スペクトルから二つの異なる赤方偏移のスペクトルが混ざった可能性がある銀河を選び出しその画像を HSC でチェックするという手法も中国科学院国家天文台の Yiping Shu らの助けを借りて行いました。東京工科大学の加用一者らは SDSS

の分光クエーサーの HSC データをチェックすることで二重像クエーサー重力レンズの有力な候補を発見しました。

重力レンズを引き起こす天体は単体の銀河に限らず、銀河団の場合もあります。数の多い銀河と違って銀河団は比較的次数は少なく、例えば初年度データでは数千個程度です<sup>17), 18)</sup>。全部目視して重力レンズを探すのは頑張れば可能です。銀河団に対しても、複数のチームメンバーでこれら銀河団の HSC 画像をみて数十個の有力な強い重力レンズ候補を発見しました。この結果については東北大学の Anton Jaelani と Anupreeta More が中心となって結果をまとめているところです。

銀河団サンプルから見つかった新しい重力レンズのいくつかは、赤方偏移が 5 から 6 といった非常に高赤方偏移の銀河が重力レンズ効果を受けたものでした。そのうちのいくつかについては小野宜昭やカーネギー観測所の Michael Rauch らの協力で分光観測を行っています。強い重力レンズを利用することで高赤方偏移銀河の研究もさらに進むものと期待されます。

このように HSC サーベイデータから続々と強い重力レンズが発見されています。強い重力レンズワーキンググループでは、この HSC サーベイ内の一連の強い重力レンズ探索を SuGOHI<sup>\*10</sup> と呼ぶことにしました。SuGOHI サーベイからこれからも続々とすごい重力レンズが発見されることでしょう。

## 5. 今後の見通し

ここまで紹介した話はほとんどが強い重力レンズの発見、探索の話でそこから得られる知見の話はあまりありません。これは、強い重力レンズは

\*<sup>10</sup> Survey of Gravitationally-lensed Objects in HSC Imaging の略ですが、もちろん由来は日本語の「すごい!」です。SuGOI ではなく H が入っているのは google などの検索エンジンでヒットしやすいようにという配慮です。ここまで真面目に本稿を読み進めた方は、筆者らが発見した天体や開発したコードなどに好き勝手に名前をつけて遊んでいるように思うかもしれません。これは決して不真面目に研究しているわけではなく、真面目に研究するなかでのちょっとした息抜きということでご容赦いただければと思います。

通常は発見するだけで直ちにに重要なことがわかるというものでもなく、分光や高分解能撮像データを使った詳細な質量モデル構築などによってその重力レンズ系を詳しく解析することでいろんな情報が引き出せるからです。そのための追観測は上で述べたとおり鋭意進行中ですので、これら新しく発見された重力レンズを基に得られるいろいろな面白い結果を報告できるのもそう遠い先の話ではないかもしれません。たとえば上で少し述べた宇宙論的応用のほかに、銀河の星質量を重力レンズで測定することによって星の初期質量関数を調べたり、銀河群や銀河団の質量分布を測定して理論予測と比べることでダークマターモデルや構造形成モデルを検証するといった応用が期待できます。深いHSCサーベイによって、こういった研究をより高赤方偏移の宇宙で行うことができる点が特に重要です。

またこれまでの話から、画像を人間の目でチェックする過程が依然として重要な役割を果たしていることがわかつています。しかし私たちの研究時間も限られていますので、画像をひたすら目視していくのにも限界があります。この問題を克服する一つの面白い試みとして、一般市民のボランティアを募り膨大な数の画像を多数の市民の助けを借りてチェックしてもらおうという市民参加プロジェクトがあります。重力レンズに特化したこの市民参加プロジェクトとしてSpace Warps<sup>19)</sup>があり、以前カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡サーベイデータを使って探索を行った実績があります<sup>20), 21)</sup>、HSCサーベイデータを使った新しい探索もAnupreeta More, Alessandro Sonnenfeldらの尽力によってつい最近(2018年5月)始動し、すでに数十個の新しい重力レンズが市民の手によって発見されています。この試みは科学的意義に加えてアウトリーチの側面もあり一石二鳥といえるかもしれません。

しかしながら、HSCサーベイはまだ進行中のサーベイです。かつこれまでのHSCサーベイデー

タもすべて探索し尽くしたかというところと全くそんなことはありません。これから加速度的に増えていくHSCサーベイを含めた膨大な撮像サーベイ画像をすべて目でチェックするのはたとえ市民の助けを借りても今後ますます厳しくなっていくことが予想されますので、このような画像を目で確認する「古き良き」天文学の時代をはいずれ終わりを迎えるのかもしれませんが、実際に世界のいくつかのグループは深層学習(deep learning)を利用した強い重力レンズ探索を試みていて<sup>22)~24)</sup>、HSCサーベイ内でも東京大学の吉田直紀のグループと協力して深層学習の応用に向けた試みを始めているところです。ご存じのとおり深層学習は今爆発的に広まってきていて、特に画像認識において高い性能を発揮する強力なツールですので、うまくいけば強い重力レンズ探索においてもサーベイ画像を目で見る過程をほぼ完全に自動化できることが期待できます。

## 6. 最後 に

強い重力レンズワーキンググループでは情報交換や議論のために定期的に電話会議を開いています。その電話会議に出ていたあるとき、筆者はふとワーキンググループの主要メンバーがほぼ全員自分より年下であることに気づき愕然としました。SDSSで稲田直久や筆者らはMichael Strauss, Donald Schneider, Christopher Kochanek, 福來正孝といったシニアな方々に励まされながらある意味好き勝手に研究を進めていたのですが<sup>25), 26)</sup>、月日は流れていつの間にか励まされる側から励ます側に立場が変わっていたのです! しかしこれは見方をかえれば若い研究者がHSCサーベイを牽引していることの証左でもあります。

少し関連した話として、すばる望遠鏡の将来計画でどのくらいサーベイ観測に観測時間を割くかという議論があったときに、若い研究者の教育のためにこれまでのプロポーザル観測の時間も十分確保すべきである、という議論がなされていたの

ですが筆者はそれに少し違和感をもったのを憶えています。プロポーザル観測は、特にすばる望遠鏡のように人気の高い望遠鏡の場合すでに多くの実績のある研究者の寡占状態にあり、実績のない若い研究者が自分のアイデアで観測時間を確保して研究を行うのが難しい側面もあります。一方でサーベイデータの前では基本的に皆平等で<sup>\*11</sup>、アイデアと熱意次第で実績のない若い研究者であっても最先端の観測データを使って大きなインパクトのある研究成果を上げることができますので、その意味でサーベイ観測も（プロポーザル観測とは少し違った意味での）多大な教育的効果があるといつて良いのではないのでしょうか。

いずれにせよ、今後もさらに多くの若い研究者が参加し活発に研究成果を上げることを期待していますが、一方で筆者もまだまだ老け込む歳ではないのでHSCサーベイを使って何か世間をあっといわせることができないかアイデアを練っているところです。

## 謝 辞

PIの宮崎聡さんをはじめとしてHSCとHSCサーベイの実現に多大な努力をされたすべての方に感謝します。また強い重力レンズの研究ではHSCの画像ビューアhscMapが大活躍していますが、この素晴らしいビューアを開発した小池美知太郎さんに感謝します。HSC特集を企画しこの記事の執筆を勧めてくださった小宮山裕さんにも感謝します。

## 参考文献

- 1) Tanaka, M., et al., 2016, ApJ, 826, L19
- 2) Gavazzi, R., et al., 2008, ApJ, 677, 1046
- 3) Tu, H., et al., 2009, A&A, 501, 475

- 4) Suyu, S. H., & Halkola, A., 2010, A&A, 524, A94
- 5) Oguri, M., 2010, PASJ, 62, 1017
- 6) 大栗真宗, 2013, 天文月報, 106, 555
- 7) Sonnenfeld, A., et al., 2012, ApJ, 752, 163
- 8) Smail, I., et al., 2007, ApJ, 654, L33
- 9) Allam, S. S., et al. 2007, ApJ, 662, L51
- 10) Oguri, M., et al., 2013, MNRAS, 429, 482
- 11) Collett, T. E., et al., 2012, MNRAS, 424, 2864
- 12) Walsh, D., et al., 1979, Nature, 279, 381
- 13) Treu, T., & Marshall, P. J., 2016, A&AR, 24, 11
- 14) Chan, J. H. H., et al., 2015, ApJ, 807, 138
- 15) More, A., et al., 2017, MNRAS, 465, 2411
- 16) Sonnenfeld, A., et al., 2018, PASJ, 70, S29
- 17) Oguri, M., et al., 2018, PASJ, 70, S20
- 18) 岡部信広, 他, 2018, 天文月報, 174-185
- 19) <https://blog.spacewarps.org> (2018.12.19)
- 20) Marshall, P. J., et al. 2016, MNRAS, 455, 1171
- 21) More, A., et al. 2016, MNRAS, 455, 1191
- 22) Jacobs, C., et al., 2017, MNRAS, 471, 167
- 23) Schaefer, C., et al., 2018, A&A, 611, A2
- 24) Pourrahmani, M., et al., 2018, ApJ, 856, 68
- 25) 稲田直久, 大栗真宗, 2004, 天文月報, 97, 415
- 26) 稲田直久, 2009, 天文月報, 102, 747

## Searching for Strong Gravitational Lenses in the HSC Survey

Masamune OGURI

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Thanks to the exquisit quality of the HSC images, the HSC survey is an ideal survey to search for strong gravitational lenses. Indeed we have already discovered many strong lens systems from the HSC survey, including very unique and rare lens systems. In this article, I review the strong lens search in the HSC survey, and discuss its future prospect.

<sup>\*11</sup> これはすべてのサーベイ観測に当てはまらないかもしれないので注意が必要かもしれません。というのはサーベイによっては研究テーマがトップダウン的に決まり自分の思うように自由に研究できないかもしれないからです。一方でSDSSではボトムアップ式であり、あらかじめ宣言しチーム内で情報公開する限りにおいて自分の好きなテーマで自由に研究して良いというルールが定められていて、HSCサーベイも基本的にはこのSDSSのルールを踏襲しています。