

glafic (Masamune Oguri)

解説：大栗真宗（東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構）

URL：<http://www.slac.stanford.edu/~oguri/glafic/>

glaficは重力レンズ解析のためのソフトウェアである。仮定した質量モデルと背景ソース天体の位置に対して実際に観測される像の配置を計算したり、観測された像の形状や配置を基にそれらを再現する質量分布を制限するなど、(強い)重力レンズの研究・解析に必要な機能を一通り備えている。

筆者がこのソフトウェアを開発するに至った経緯は以下のとおりである。2006年夏にスタンフォード大学カブリ素粒子天文物理学・宇宙論研究所(KIPAC)に博士研究員として赴任した筆者は、そこでオフィスメイトとなるEdward (Ted) Baltzと出会った。彼は素粒子物理と宇宙物理の境界領域でさまざまな研究を行っており^{*1}、ダークマター研究の観点から重力レンズについても研究を行っていた。特に、重力レンズの高次カタストロフィーに重点をおいたGRAMROC^{*2}というソフトウェアを開発しており、筆者も重力レンズを研究していたことから昼食やその他の合間に自然と重力レンズの数値解法などを議論することとなり、そのような議論を繰り返すうちに自分でもこのようなソフトウェアを開発できるのではないか、開発してみたいと思うようになった。そこで毎日がエブリデイのポストクの特権を生かしてオリジナルの重力レンズソフトウェアの開発に一から着手し^{*3}、およそ1カ月で核となるアルゴ

リズムの部分を完成させた。その後さまざまな機能の追加やインターフェイスの整備を行い、2008年に最初のベータ版を完成させた。その後もいろいろな方に使っていただきつつ定期的に改良を重ね、2010年に公開を開始し、その後何回かのアップデートを経て現在(バージョン1.2)に至っている。

重力レンズ方程式は非線形かつ解との1対1対応が成り立たないため、方程式を数値的に解くには解の可能性のある領域をくまなく調べる必要がある。特に増光率が形式的に無限大となる臨界曲線(critical curve)付近では二つの隣接する解(=複数像)が出現することから、これらを分離する高い格子解像度が必要となる。ただこのような高解像度は臨界曲線の近傍でのみ必要となるため、臨界曲線の周りでのみ細かい格子を配置するいわゆる適合格子(adaptive grid)が非常に有用となる。glaficでも適合格子は取り入れられており(図1)、ソフトウェアの開発においてこの部分が一番の難所になると思われたが、案ずるより生むが易しとはよくいったものでやってみると案外すんなりとアルゴリズムを書くことができた。

強い重力レンズの計算や解析を行うソフトウェアはほかにもいくつかあり、広く知られているものとして例えばgravlens (Chuck Keeton)^{*4}やLenstool (Eric Jullo et al.)^{*5}がある。筆者のソフ

^{*1} 素粒子業界で有名なソフトウェアDarkSUSYの開発者の一人でもある。彼は優秀な研究者であったが、某有名大学の助教授のオファーを蹴ってGoogle(!)に就職してしまった。

^{*2} <http://kipac.stanford.edu/collab/research/lensing/gramroc>

^{*3} 使用したプログラム言語はC言語である。

^{*4} <http://redfive.physics.rutgers.edu/~keeton/gravlens/>

^{*5} <http://projets.oamp.fr/projects/lenstool/wiki>

トウェアはこれらに比べて後発ではあるが、すでに世界各国の研究者に使っていただいております。徐々に浸透しているとの実感を得ている。さまざまな重力レンズソフトウェアとその特性を網羅した最近のレビュー^{*6}もあり現状を把握するのに有用であろう。

ソフトウェアが公開されている URL では、ソフトウェアのバイナリ本体^{*7}に加えマニュアルやいくつかのサンプルファイルが公開されている。基本的に簡単なテキストインプットファイルを読み込ませるだけで必要な計算ができるようになっているため、ちょっとした重力レンズの計算をやりたい非専門家からディープな重力レンズ研究を行いたいマニアまで幅広いニーズに応えることができるであろう。一つの弱点は、ソフトウェアの名前に反して像の配置などを表示するグラフィカルなインターフェイスがないことである（出力はすべてテキストファイルか FITS ファイルである）が、出力した像の位置や臨界曲線の情報などのテキストファイルを読み込んで表示を行う SM^{*8}用のスクリプトを配布している。

この重力レンズソフトウェアの主要な応用の一つとして観測された重力レンズ像の配置などを基に質量分布を制限するいわゆる質量モデリングがあるが、これについても *glafic* はソース平面での最適化^{*9}やマルコフ連鎖モンテカルロなど効率的な質量モデリングに必要な多くの機能を備えている。また Navarro-Frenk-White (NFW) モデルや Singular Isothermal Sphere (SIS) モデル、また対応するそれらの楕円密度分布といった代表的な質量分布からさまざまな次数の摂動まで数多

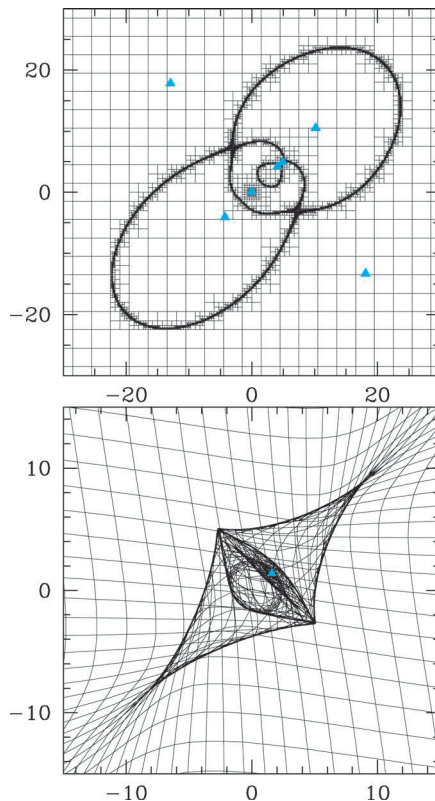


図1 *glafic*による重力レンズ方程式の求解の例。上が実際に観測されるイメージ平面で下が元々の天体の位置を表すソース平面。太線は増光率が形式的に無限大となるいわゆる臨界曲線 (critical curves) とそのソース平面での対応曲線 (caustics) である。青三角はソースの位置および対応する重力レンズ像の位置を表す。細線は重力レンズ方程式を解くのに使われた格子を示している。臨界曲線の近傍で細かい格子を使う適合格子が使われており、その結果この例では七つの複数像が正しく求められていることが見てとれる。

^{*6} Lefor A. T., et al., arXiv:1206.4382

^{*7} Numerical Recipes のルーチンを利用しているため、ソース自体の公開はできない (らしい)。筆者はソフトウェア公開直前にこの事実を知ることとなった。

^{*8} “SuperMongo” としても知られる。Robert Lupton と Patricia Monger により開発された、天文業界では (でのみ) 有名なグラフ作成ソフトウェア。http://www.astro.princeton.edu/~rhl/sm/

^{*9} ややテクニカルになるが、仮定した質量分布について観測された像の配置から対応するソースの位置をそれぞれ計算し、それを基に χ^2 を評価することで重力レンズ方程式を解くことなく質量モデリングが可能となる。

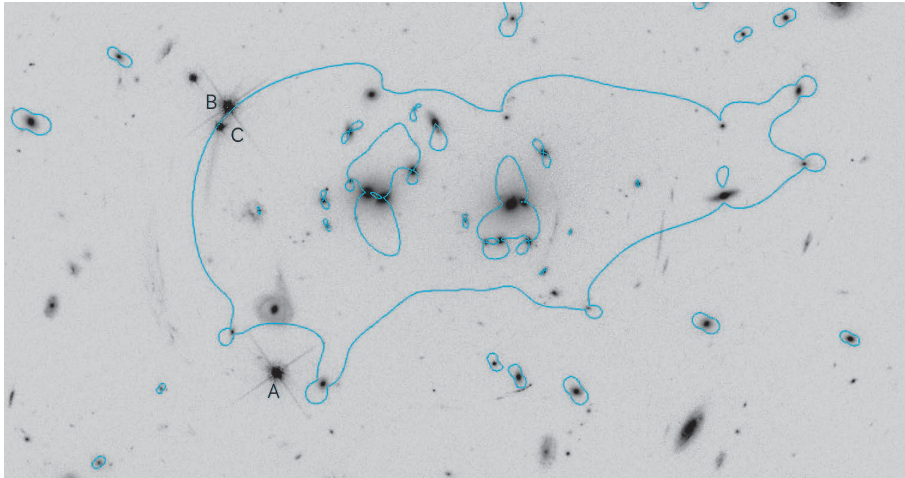


図2 大分離角重力レンズクエーサー SDSS J1029+2623の質量モデリング結果 (Oguri et al. 2013). ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された画像に対して三つのクエーサー像の位置をラベルA, B, Cで示しており, 青線が求めた質量分布から予測される臨界曲線を表している.

くのレンズモデルをサポートしており, 非常に多様な研究が可能となっている. 例えば筆者が大分離角重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112^{*10} やSDSS J1029+2623^{*11}を解析した論文を見れば, このソフトウェアでどこまで複雑な解析が可能かの感触が得られるのではないかと思う (図2). また重力レンズを受けた銀河の画像を生

成することもできるため, 弱い重力レンズ解析や重力レンズアーク探索アルゴリズム開発のための画像シミュレーションなどにも活用できる. 今後もさらに順次改訂を行っていく予定であり, 質問や要望があれば気軽に筆者までお知らせいただきたい.

^{*10} Oguri M., 2010, PASJ 62, 1017

^{*11} Oguri M., et al., 2013, MNRAS 429, 482