

天の川銀河中心の超巨大ブラックホールに2013年夏に 最接近し輝きを増すガス雲について

研究グループ

斎藤貴之(東京工業大学・特任准教授/ELSI Affiliated scientist)

牧野淳一郎(東京工業大学・教授/ELSI Principal Investigator/理化学研究所計算科学研究機構チームリーダー)

朝木義晴(ISAS/JAXA・助教)

馬場淳一(東京工業大学・特任助教)

小麦真也(国立天文台・助教/合同アルマ観測所・CSVサイエンティスト)

三好真(国立天文台・助教)

長尾透(京都大学・特定准教授)

高橋真聡(愛知教育大学・教授)

武田隆顕(国立天文台・特任助教)

坪井昌人(ISAS/JAXA・教授)

若松謙一(岐阜大学・名誉教授)

問い合わせ先

氏名：斎藤貴之

電話番号 : 03-5734-2243

F A X 番号 : 03-5734-3538

電子メールのアドレス : [saitoh\(-at-\)geo.titech.ac.jp](mailto:saitoh(-at-)geo.titech.ac.jp)

研究が掲載されているURL : <http://v1.jmlab.jp/~saitoh/G2/Press/>

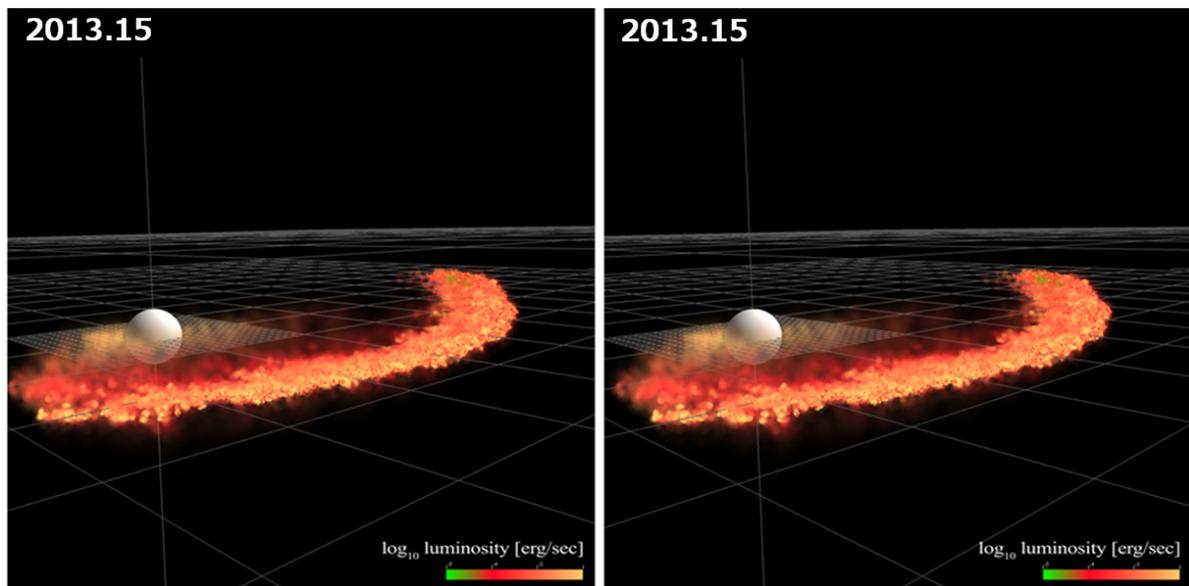
上記URLの掲載時期 : 3月10日頃からの予定

研究発表の概要

我々は、3次元高分解能コンピュータシミュレーションを用いて、天の川銀河の中心にある超巨大ブラックホール Sgr A* (サジタリウス エースター)に接近するガス雲「G2」の状態の変化を調べました。我々のシミュレーションによると、このガス雲はSgr A* の強力な重力の影響で、ガスの進行方向に延ばされるとともに、ガスの軌道平面に対して垂直方向に強力な圧縮を受けます。この圧縮によって加熱さ

れたガス雲が今年夏-秋を中心に一年間明るく輝く可能性があるということが明らかになりました。このような圧縮によるエネルギー解放メカニズムは、本研究が世界で初めて指摘しました。

現在、世界中の望遠鏡がこのガス雲「G2」に何が起きるか、そして Sgr A* にどのような変化が訪れるかを明らかにするために観測を続けています。シミュレーションと観測データをつきあわせることで今後 Sgr A* 周辺環境の理解が大幅に進むものと期待されます。



本研究で得られた主要な成果。ガス雲「G2」が超巨大ブラックホール Sgr A* の強力な重力の影響で引き伸ばされ薄く潰されながらその近傍を通過する。このときガス雲の輝きが急激に増す。この図はその様子を交差法による立体可視化可能にしたもの。詳細は以下で説明する。クレジット：斎藤貴之(シミュレーション)、武田隆顕(可視化)

背景

現在ほぼすべての銀河はその中心に銀河質量の0.1%程度の超巨大ブラックホールを持つと知られています。超巨大ブラックホールは一般に活発な活動を示し、銀河の形成と進化に重要な役割を果たしていると考えられています。我々の住む天の川銀河も例外ではなく、中心部に太陽のおよそ430万倍の質量を持つ Sgr A*(サジタリウス エースター) と呼ばれるが存在します。Sgr A* は過去の活動性の名残が報告されているものの、現在は不活性状態にあります。そのため、Sgr A* 周辺環境はどうなっているかについて多くの研究者が注目しています。

2012年1月、ドイツマックスプランク研究所の Gillessen らを中心とした研究グループが、Sgr A* に接近する地球の三倍の質量をもつガス雲「G2」の存在を報告しました(図1)。詳細な観測データを積み重ねることで、ガス雲「G2」が Sgr A* の周りを運動する軌道にあり、2013年夏(その後の更新で秋と報告された)に Sgr A* に最接近するということが明らかになりました(図2)。現在世界中の天文学者と望遠鏡がこの現象に注目しています。

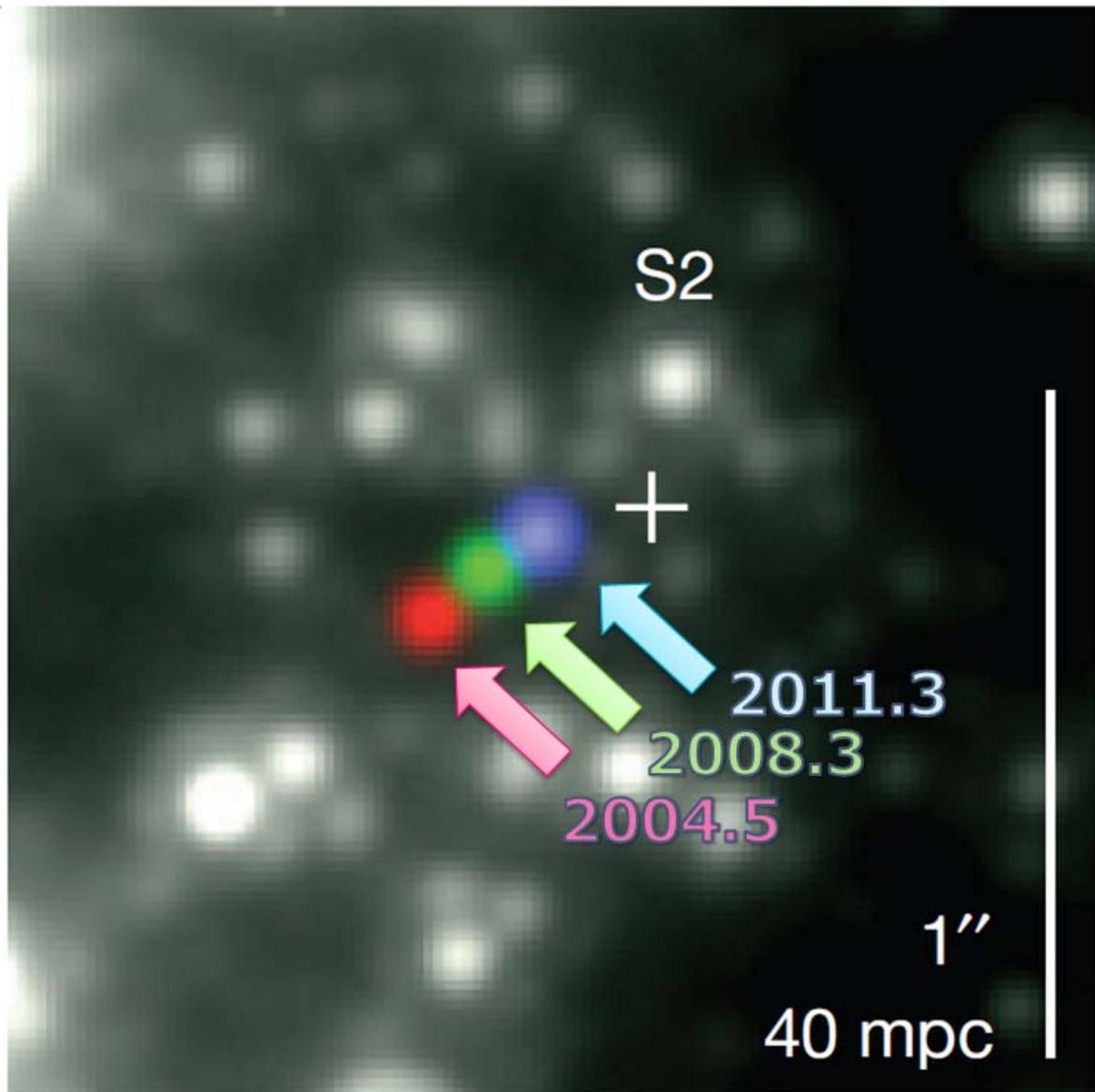


図1. Gillessen らによって報告されたガス雲「G2」の位置。三つの色はそれぞれ異なる時刻の位置を表している。白い+が天の川銀河の超巨大ブラックホール Sgr A* の位置を表している。S2 は Sgr A* の周りを運動している恒星。縦の白い棒はスケールを表しており、40 ミリパーセク(mpc)は、およそ 8000 天文単位(天文単位：地球と太陽の平均距離)。Gillessen et al. 2012 Nature 図1(c)より一部改変。

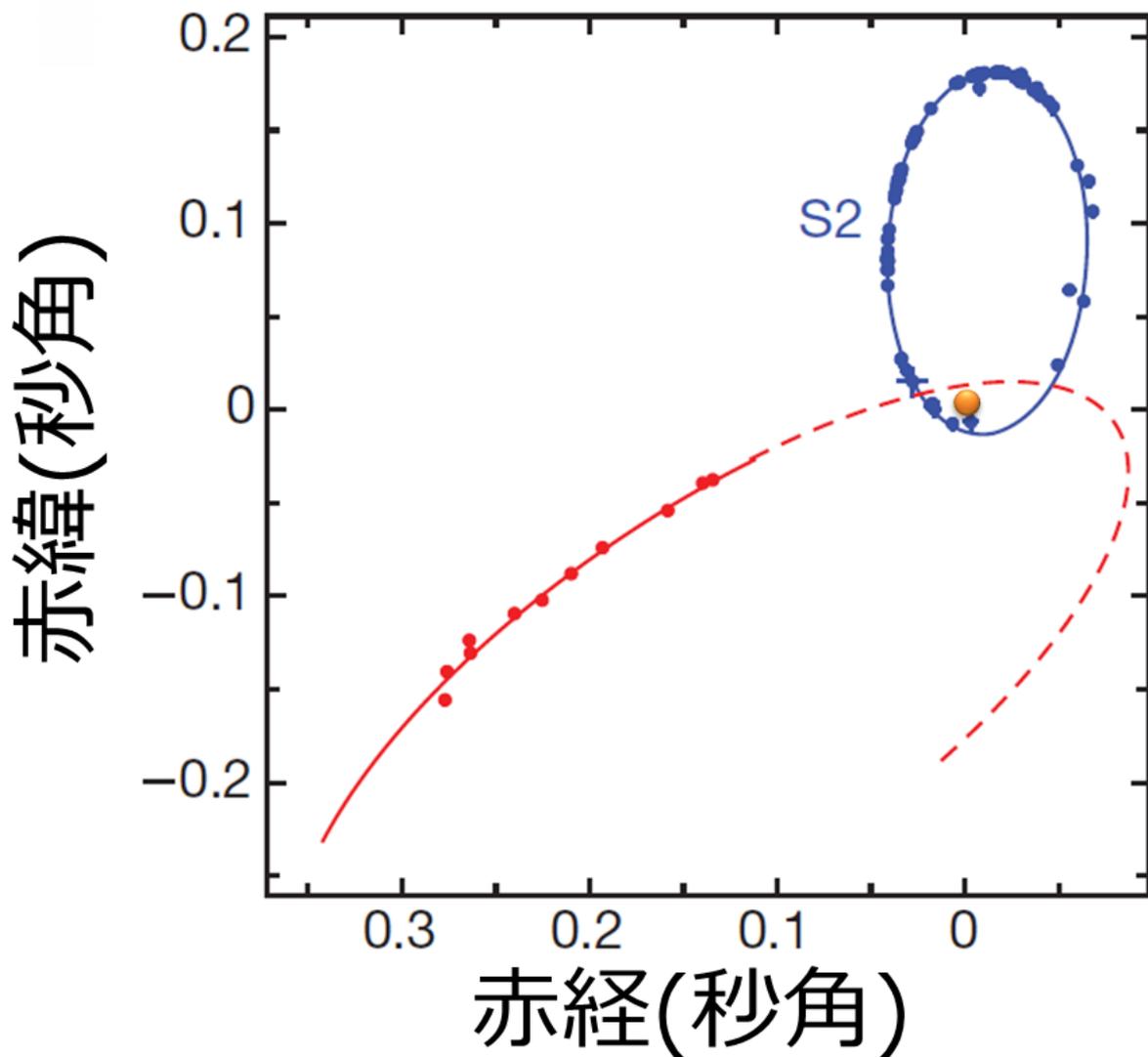


図2. ガス雲「G2」の観測された位置(赤丸)とそれから予想される軌道(赤実線、赤点線)。赤の点線は予測される今後の軌道を表している。青い点は Sgr A* の近くを運動している恒星(S2)の観測された位置(青点線)と軌道(青実線)。オレンジの点のところに Sgr A* が存在する。横軸、縦軸はそれぞれ赤経、赤緯を表している。Gillessen et al. 2012 Nature 図1(d)より、一部改変。

我々の研究

もしガス雲「G2」が十分な広がりを持っていれば、太陽の430万倍の質量を持つ超巨大ブラックホール Sgr A* の強力な重力下で運動の方向に引き延ばされる他に、運動面に垂直な方向に強力な圧縮を受けるはず。そうすると、このときの圧縮のエネルギーを解放することでガス雲が明るく輝くことが予想されます。我々は、世界で初めて3次元かつ現実的なガスの振る舞いを考慮したコンピュータシミュレーションを行い、このガス雲「G2」が2013年に Sgr A* の極近傍を通過するとき

に、その強い重力の影響で何が起こるかを予測しました(従来の研究との比較は補足資料3をご覧ください)。シミュレーションでは観測から得られた Sgr A* を回る軌道の上にガス雲を置いてその運動を解きます(図3を参照)。現時点では、ガス雲の形状についてははっきりとわかっていないため、ここでは地球の3倍の質量を持つガス雲が一様な密度を持っており、その半径が 125 天文単位であると仮定しました。観測データに従い、ガス雲は Sgr A* の周りを楕円軌道で運動するとします。また、これまでの観測事実からの示唆に従い Sgr A* の周りには高温で薄いガスが広がっているとしました。

このシミュレーションは、HCPI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」の研究の一環として東京工業大学の斎藤貴之(東京工業大学特任准教授/ELSI Affiliated scientist)が開発した宇宙流体シミュレーションコード ASURA を用いて行いました。非常に大きな天体シミュレーションを高速に、そして正確に実行するために、独自の計算手法が多数組み込まれています(詳細は用語集のところをご覧ください)。シミュレーションには国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのスーパーコンピュータ Cray XT4 を用いました。

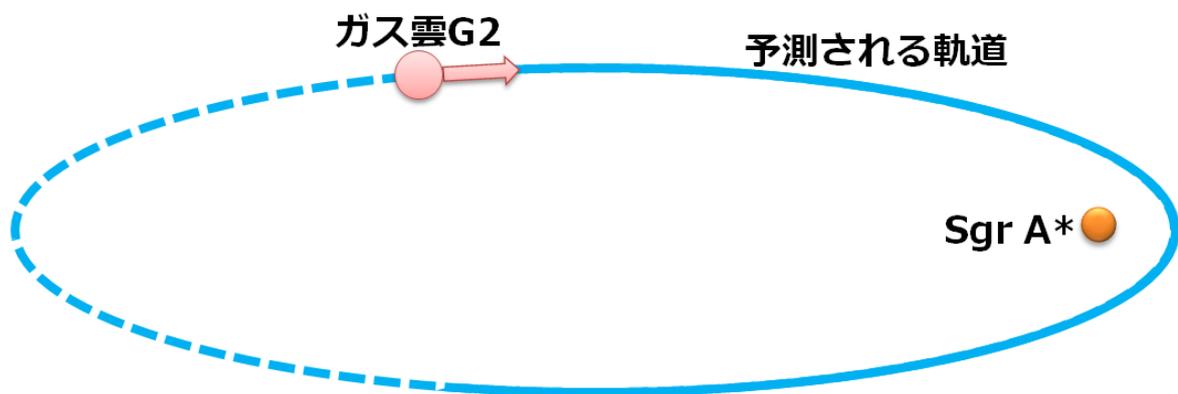


図3. 我々の計算セットアップ。ガス雲(ピンク)を観測によって得られた Sgr A* (オレンジ)を回る楕円軌道の上に置き、1995年からの状態の変化を追った。青実線が今回のシミュレーションで追った全期間に対応する。2013年夏-秋に Sgr A* に最接近する。クレジット：斎藤他 (2013)

結果

図4 はコンピュータシミュレーションで得られたガス雲の明るさの変化を表しています。この図より、ガス雲が Sgr A* の極周辺を通過するときに非常に明るく輝くことがわかります。また、この輝く期間はおよそ一年間になります。最も明るい時期の明るさは、太陽の絶対等級(本来の明るさ)の50倍程度です。Sgr A* の周りに

ある高温ガスの量が異なる場合でも増光は高温ガスの影響を受けません(参考資料1を参照のこと)。このような増光の可能性は、1)三次元で、2)非常に高い分解能のシミュレーションを達成することによって、我々が今回初めて指摘することができました。

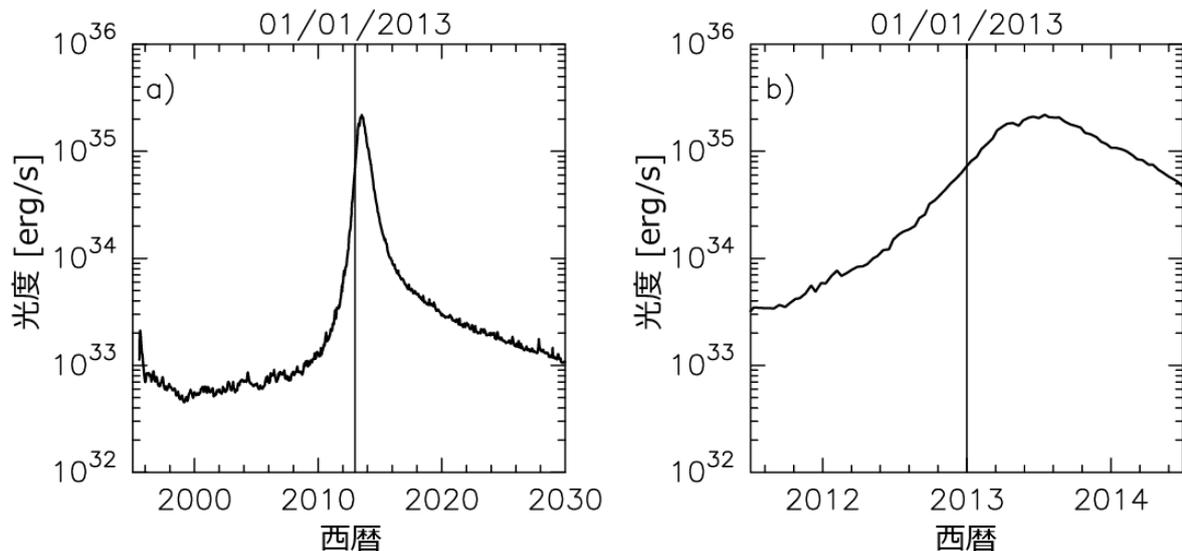


図4. ガス雲の明るさの変化。横軸は西暦を表し縦軸はガス雲から一秒間に放出されるエネルギー(=明るさ)を表す。黒い線がシミュレーションから得られた明るさの変化。左側のパネル(a)は1995年から2030年まで、右側のパネル(b)は2011年夏から2015年夏までの期間のガス雲から放出されるエネルギーの量を表している。なお、太陽光度は 4×10^{33} erg/s。クレジット：斎藤他 (2013)

国立天文台4D2Uプロジェクトの武田隆顕(国立天文台特任助教)が開発した可視化ソフト Zindaiji3 (詳細は以下の用語集のところを見てください)を用いて三次元的な様子を表したのが 図5 およびアニメーション (<http://v1.jmlab.jp/~saitoh/G2/Press/Saitoh+G2.avi>) です。ガスから出てくる光によって色をつけています。暗いところは緑色に、たくさん光が出てくる明るいところはオレンジ、そして白っぽくなっています。ガス雲が Sgr A* に近づくとつれて、その強力な重力の影響-潮汐力-により引き延ばされていることがわかります。このときガス雲は非常に薄くなります。特に Sgr A* の近傍通過時にはシミュレーション開始時の 1/100 以下になっています。この効果も Sgr A* の強力な重力による潮汐力の影響です。ガス雲がつぶされるにつれて、ガスの温度が上がりそのエネルギーを光で解放しているため、ガス雲が輝くようになります。図6では交差法をもちいることで、最接近のときのガス雲の姿を立体視することができます。補足資料2にはある時刻のガス雲の姿を異なる2方向からみた図があります。

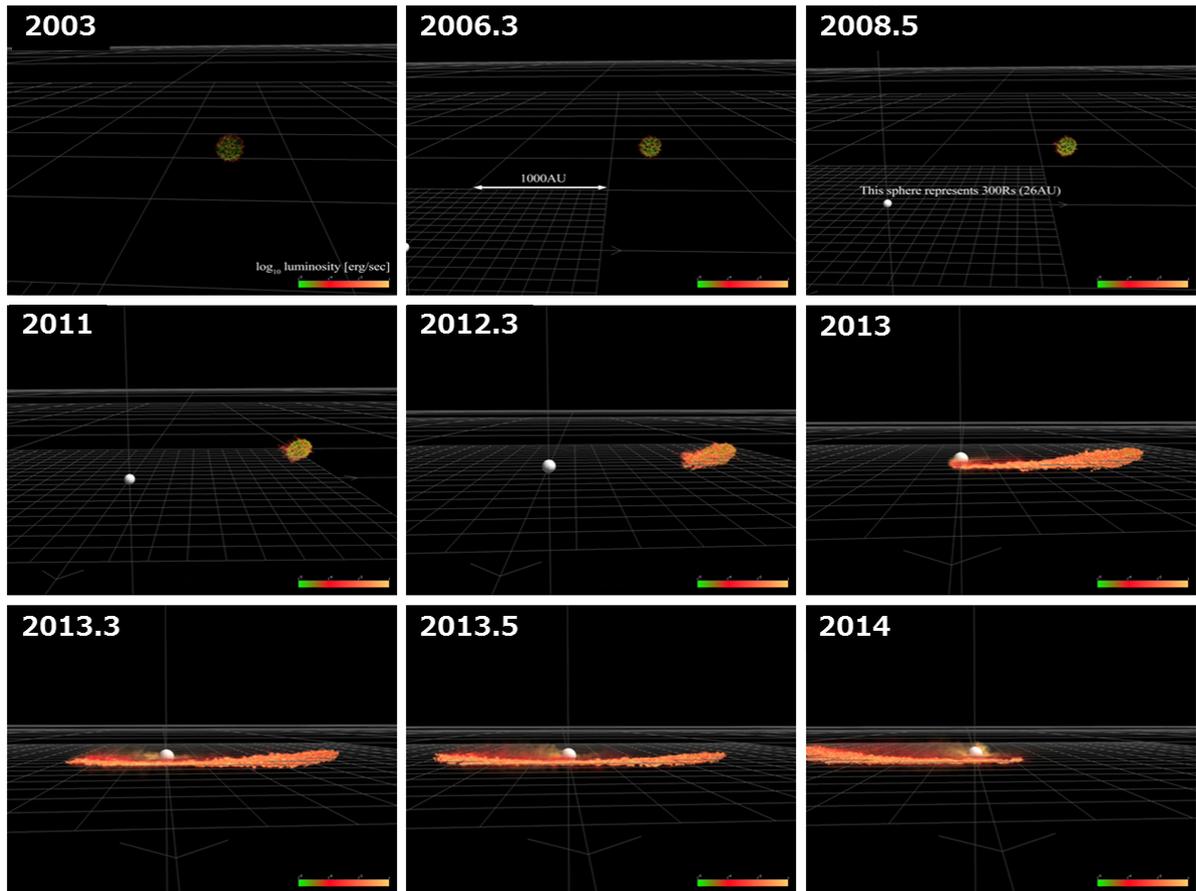


図5. アニメーションより抜粋。左上の数字が西暦を表している。ガス雲が Sgr A* (中心の白丸)に接近する過程で引き伸ばされ、そして薄くなっていることがわかる。白丸のサイズは 300 Rs、ここで Rs は Sgr A* の事象の地平面(シュバルツシルト半径)、と便宜上大きく取っており、本来の Sgr A* の事象の地平面よりずっと大きいことに注意。アニメーションは次の web ページよりダウンロードできる。
<http://v1.jmlab.jp/~saitoh/G2/Press/Saitoh+G2.avi> クレジット：斎藤貴之 (シミュレーション)、武田隆顕(可視化)

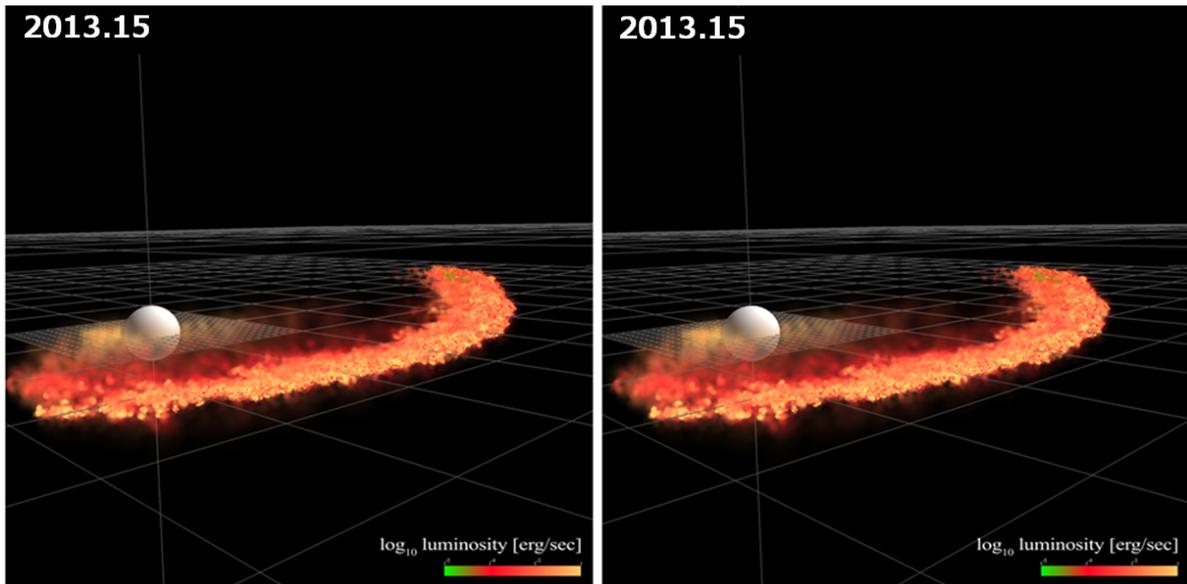


図6. ガス雲が Sgr A* を通過する時(2013年春)の姿。交差法による立体視が可能。交差法とは、右目と左目でそれぞれ左側のパネルと右側のパネルを見るようにすることで立体視する方法のこと。ガス雲が非常に薄くなって通過する様子がわかる。クレジット：斎藤貴之(シミュレーション)、武田隆顕(可視化)

まとめと今後

本研究では、天の川銀河の超巨大ブラックホール Sgr A* に接近しつつある三地球質量ガス雲「G2」の運動をコンピュータシミュレーションし、とくに最接近する2013年にガス雲「G2」に何が起きるかを調べました。我々の3次元シミュレーションによると、ガス雲「G2」は Sgr A* の強力な重力の影響で軌道面に伸ばされるとともに軌道面鉛直方向に圧縮され、その圧縮のエネルギーを光として放出するために明るく輝くことがわかりました。もちろんこれは現在までに知られているガス雲「G2」についての情報をもとに行われたシミュレーションであり、あくまで可能性です。現在、Sgr A* にガス雲「G2」が接近することでどのような変化が起きるかをとらえるために、すばる望遠鏡、ALMA望遠鏡、チャンドラ望遠鏡など地上と衛星軌道にある世界中の望遠鏡が Sgr A* 周辺に注目しています。今後の観測によりこのガス雲に実際に何が起きたかが明らかになり、本研究の確からしさも明らかになるものと思われれます。

ガス雲「G2」についての研究は、天文学の研究としては極めてまれな「答え合わせのできる研究」になっています。その意味でも非常に興味深い天体です。このガス雲の研究により、超巨大ブラックホール Sgr A* 周辺環境や、その活動性のメカニズムについての理解が進むものと期待されます。

補足資料1:Sgr A* 周りの高温ガスの影響

Sgr A* の周りにどの程度の高温ガスがどのように分布しているかは、実はまだはっきりしていません。そこで我々はその影響についても調べました。図7は、Sgr A* の周りを取り巻く高温ガスの量を変えたときのガス雲の光度の変化の様子を表しています。黒い線(Run 1)が図4に書かれていた線に対応します(高さが異なっていることに注意)。Run 2は高温ガスの質量を1/10にしたときの振る舞い、また、Run 3は高温ガスを無くしたときの振る舞いになっています。ガス雲がSgr A* に最接近したときの明るさは三つのモデルで大差がありません。したがって、圧縮による増光には、高温ガスはほとんど影響しないということがわかりました。我々の見積もりによると、むしろガス雲がどの程度の質量を持っているか、またどのぐらいの広がりを持っているかが鍵となります。

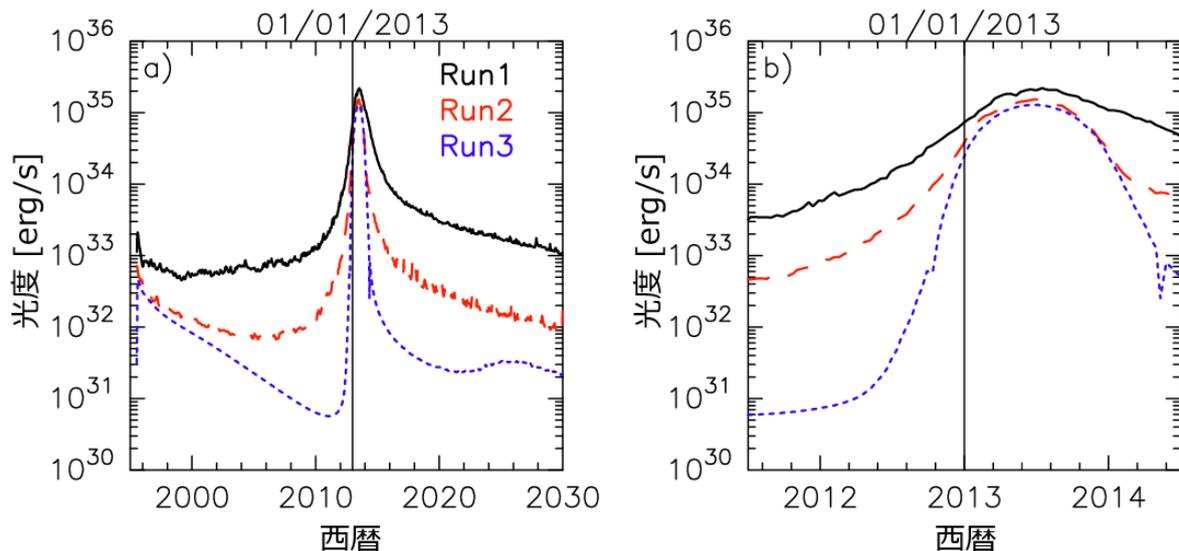


図7. Sgr A* の周りにある高温ガスの量を変えた場合の明るさの変化を表示。黒い線は図7と同じもの。赤い線はSgr A* の周りにある高温ガスの質量が1/10の場合の明るさの変化、青い線は高温ガスがない場合の明るさの変化。2013年の増光はどれも同程度。クレジット：斎藤他(2013)

補足資料2：ガス雲の変形、二つの方向から

図8は特に最接近する途中のガス雲の状態の変化の様子を表したものです。軌道面と軌道面垂直方向からみることで、実際のガス雲の立体構造が把握できます。パネル(a,b,c,d)は、軌道面でのガス雲の形状の時間変化を表しています。また、パネル(e)がそれぞれのパネルの軌道面上での位置を表しています。Sgr A* の強力な重力でよりガス雲が引き延ばされていることがわかります。パネル(a,b,c,d)にある白い線の方にガス雲をカットし、軌道面垂直方向の形状の変化を見たのがパネル

(a',b',c',d') です。パネル(a',b') と パネル (c',d') では倍率が4倍違うことに注意してください。これらのパネルを見るとガス雲は徐々に高さ方向に潰されて薄くなっていくことがわかります。これも Sgr A* から受ける潮汐力の効果です。特に Sgr A* の近傍を通過する際にはシミュレーション開始時の 1/100 以下程度まで薄くなります(パネル c', d')。

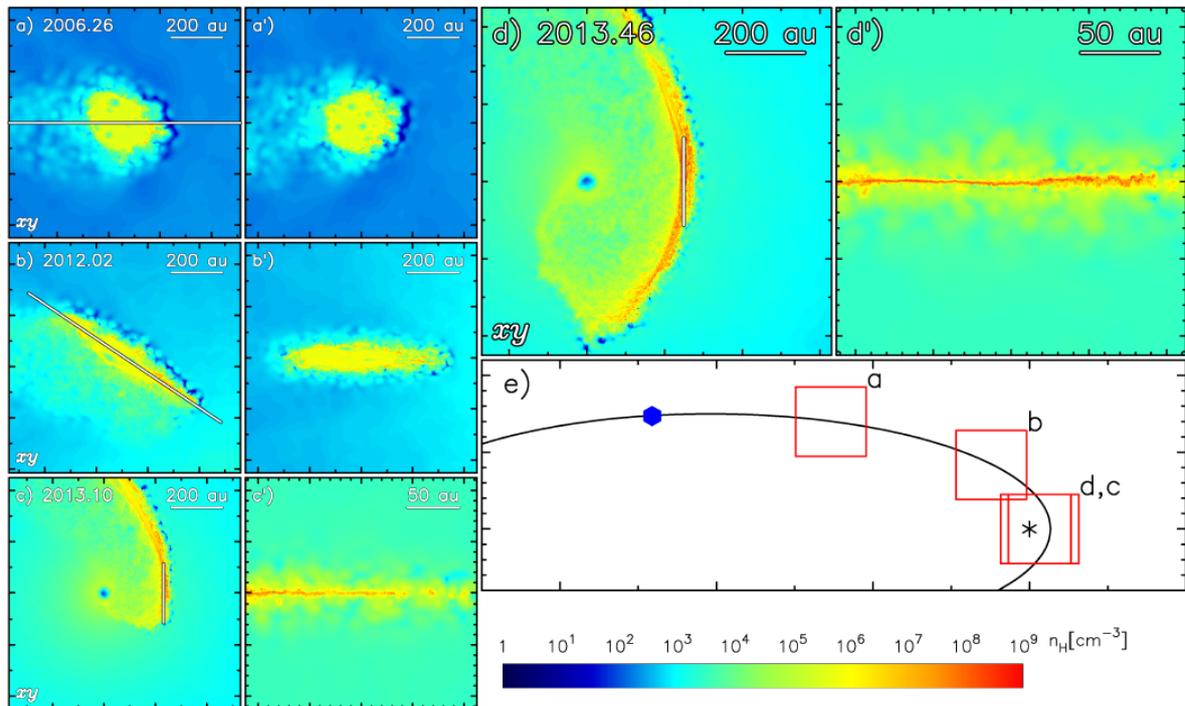


図 8. ガス雲の形状の変化の様子。特に Sgr A* に最接近する時期(2006年春-2013年夏)を表示。パネル (a,b,c,d) は軌道面上でのガス雲の形状。パネル (a',b',c',d') は、ガス雲を軌道面垂直方向にカットし、高さ方向の形状の変化を表示した。色はガスのおおのこの場所における密度に対応している。それぞれのパネルの左上に書かれている数字が時期(西暦)を表している。また、それぞれのパネルの右上に書かれている白い横棒はスケールを表している。単位は天文単位 (au)。パネル (e) には、ガス雲の軌道(黒い楕円)、ガス雲の初期位置(青六角形)、またパネル (a,b,c,d) に対応する領域(赤四角)が書かれている。アスタリスク(*) が Sgr A* の位置を表している。クレジット：斎藤他 (2013)

補足資料3：他のコンピュータシミュレーションによる研究との比較

ここでは、ガス雲「G2」について、これまでに行われてきたコンピュータシミュレーションによる計算結果と我々の結果の比較をします。最初にガス雲「G2」の状態の変化についてのシミュレーションを行ったのは、Schartmann et al. ApJ Vol.

755, Article id:155 (2012) です。彼らは、軌道面内だけに限定した2次元のガス雲のシミュレーションを多数行い、ガス雲の変形の様子を調べました。したがって、このシミュレーションでは、ガス雲が軌道面垂直方向に潰される過程がそもそも含まれていません。また、簡単のために放射冷却過程(ガスが持つエネルギーを電磁波で放出して失う過程)について扱っていないため、そもそもどの程度輝くかの予測ができないという問題があります。

3次元のシミュレーションを最初に行ったのは、Annios et al. ApJ Vol. 759, article id 132 (2012) でした。しかし、3次元になった分、シミュレーションの空間分解能が低く、最小でも4天文単位までしか表現できていません。また、彼らも放射冷却過程を解いていません。彼らのシミュレーションを見ると、ガスが十分につぶれることができていません。空間分解能が足りないこと、ガスのエネルギーが失われないうこと、この2つが今回我々が指摘した増光現象を示唆できなかった原因だと考えられます。

我々のシミュレーションでは、(1)3次元で非常に高い空間分解能(0.1天文単位まで分解)をもち、(2)ガスの放射冷却過程を考慮したことにより、超巨大ブラックホールの強力な重力の影響でガス雲「G2」が圧縮され、それにより明るく輝くという一連の変化を指摘することに成功しました。そしてこれは、従来のコンピュータシミュレーションでは表現できていなかった現象です。このような高い分解能を持ち放射冷却過程を考慮したシミュレーションは、計算量が増えるために非常に大きな困難を伴います。このシミュレーションの達成には、斎藤が開発した並列シミュレーションコード ASURA の高い性能が遺憾なく発揮されました。

我々は、コンピュータシミュレーションの他に数式を用いてこの増光がもっともらしい明るさになっているということを確認してあります(詳細割愛します)。

単位についてのまとめ

※詳しくは理科年表(丸善出版)などを参考にしてください。

太陽質量：およそ 2×10^{30} kg

地球質量：およそ 6×10^{24} kg

天文単位(au)：およそ 1.5×10^8 km

パーセク(pc)：およそ 3.1×10^{13} km

用語集

超巨大ブラックホール：恒星の質量を遙かに上回る巨大(大質量)なブラックホールのこと。典型的な質量は数100万太陽質量から1億太陽質量程度。

Sgr A* : 天の川銀河の中心部分に存在する、超巨大ブラックホール。天の川銀河中心部が天球面上で射手座の方角にあることからこの名をつけられた。A* なのは、まず銀河中心方向の明るい電波源を順に番号をつけたときに一番明るかったということで A がついたこと、そしてさらに高い分解能で見たときに点源のように見えたことから * をつけたことによる。現在、Sgr A* の周りを運動する星の詳細な軌道が調べられており、それより Sgr A* の質量がおよそ430万太陽質量であると推定されている。

潮汐力：潮汐力は、広がりを持った天体1に別な天体2からの重力が働いているときに生じる2次的な力である。天体1では、天体2がある方向に引き延ばされ、それ以外の方向には圧縮される力が働く(図8を参照のこと)。地球上では、月および太陽の重力の影響で潮の満ち引きを引き起こす。

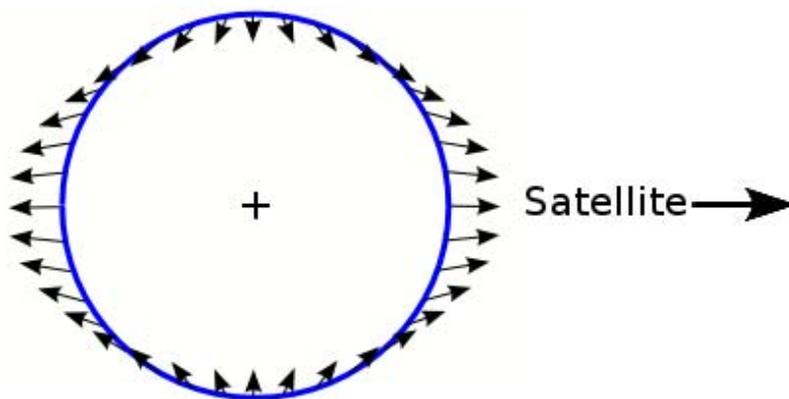


図 9. 潮汐力による引き延ばしと圧縮の効果。青丸で表現された天体1には、天体2(Stellite)によって引き起こされた潮汐力により、天体2がある方向に引き延ばされ、また、天体1-2を結ぶ線に対して垂直方向に圧縮を受ける。出典：wikipedia Tidal field より。 http://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_force

シミュレーションコード ASURA : 東京工業大学の斎藤貴之特任准教授/ELSI Affiliated scientist が開発した、銀河形成シミュレーションのための並列計算コード。N 体/SPH 法と呼ばれる計算法を採用している。N 体法は重力計算を質点の間に働くニュートン重力として計算する方法である。この重力計算は一般に非常に負荷が高い。ASURA では、GRAPE と呼ばれる重力計算専用機を使って重力計算できるように設計されている。本研究ではこの GRAPE のソフトウェアエミュレータである Phantom-GRAPE を用いている。SPH 法とは、流れを構成する要素(流体粒子)の重ね合わせで密度などの物理量を表現する流体計算法である。本研究で用

いた SPH 法は、斎藤と牧野が開発した、従来の SPH 法で指摘されていた問題点を克服した新しいタイプの SPH 法である。

可視化ソフト Zindaiji : 国立天文台 4D2U プロジェクトの武田隆顕特任助教が開発した、粒子系シミュレーション専用可視化ソフト。市販のソフトでは難しい大量の粒子情報を元に可視化を行うために独自開発された。立体視、ドーム投影用データを作成できる。これまで Zindaiji を用いて数多くの天文シミュレーションの可視化が行われており、その成果は国立天文台4D2Uプロジェクトのドームを代表に日本国内のプラネタリウムや、世界中のプラネタリウムプログラムにも利用されている。開発ページは

http://4d2u.nao.ac.jp/src_4d2u_dome/src/Zindaiji/index.html また、これまでの成果は、<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/index.php?id=movie> で見ることができる。なお、Zindaiji の命名は国立天文台のある三鷹市のそばにある深大寺にちなむ。

HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」：京コンピュータに代表される国内のスーパーコンピュータを高度利用して研究を進めるハイパフォーマンスコンピューティングインフラ(HPCI)の戦略プログラムの一つで、ビッグバンに始まる宇宙の歴史の中での素粒子から原子核、星・銀河形成に至る物質路宇宙の起源と構造を統一的に理解することを目指しています。関連 web ページ：

<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>

関連情報

Web 上の資料(デジタル画像ファイル、アニメーションファイル):

<http://v1.jmlab.jp/~saitoh/G2/Press/>

アーカイブサーバに登録されている論文原稿: <http://arxiv.org/abs/1212.0349>

関連webページ: http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/Project_Horizon/index.html

本学会における関連講演

企画セッション「超巨大ブラックホールの起源」：B07a "三地球質量ガス雲 G2 の近点通過によるフレア現象について" 斎藤貴之（東京工業大学）本研究

企画セッション「超巨大ブラックホールの起源」：B06a "銀河系中心SgrA*ブラックホールの周辺環境" 高橋真聡（愛知教育大学）

企画セッション「超巨大ブラックホールの起源」：B08a "短基線VLBIによる Sagittarius A*の2013年事象の観測" 坪井昌人（宇宙航空研究開発機構）