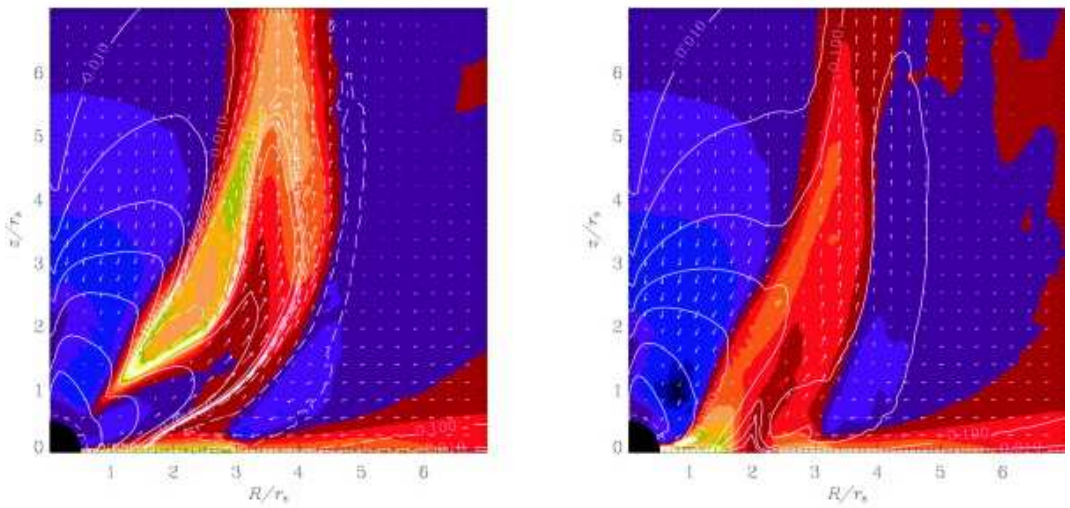
第３回 ブラックホール磁気圏 勉強会



２０１０年 3月1日(月)~3日(水)

大阪市立大学　杉本キャンパス 田中記念館　3F 会議室 A/B

プログラム

1 日目

13:00- 高橋 真聡 あいさつ
13:10- 中尾 憲一 LOC あいさつ
13:20- 高橋 真聡 ブラックホールへの定常降着流 ＜講義＞
14:30- 長倉 洋樹 大質量星崩壊に付随する Black Hole 形成と GRB

15:30- ーーー 休憩 ーーー

16:00- 高橋 労太 SgrA* モデルの現状
17:00- 三好 真 電波観測と赤外観測の現状と将来計画

2 日目

09:00- 斉田 浩見 輻射の非平衡物理 ＜講義＞
10:00- 大須賀 健 放射 MHD ＜講義＞
11:00- 高橋 博之 近似リーマン解法を用いた相対論的 Sweet-Parker 型
磁気リコネクションシミュレーション

12:00- ーーー 昼食 ーーー

13:30- 花輪 知幸 MHD 数値シミュレーションの基礎 ＜講義＞

15:30- ーーー 休憩 ーーー

16:00- 小出 眞路 GRMHD 数値計算の基礎 ＜講義＞
17:00- 松元 亮治 降着円盤の磁気流体シミュレーション

3 日目

09:00- 吉田 至順 磁場を持つ回転星の平衡解を求めるための
「GS 方程式の解法」 ＜講義＞
10:30- 藤澤 幸太郎 ニュートン重力での GS 方程式の解法
11:30- 孝森 洋介 フォースフリーブラックホール磁気圏
~ ブラックホール時空における GS 方程式の解析 ~

12:30- ーーー 昼食 ーーー

13:30- 早崎 公威 バイナリー巨大ブラックホール探査に向けて
14:30- 高橋 労太 ブラックホールの星空 ＜講義＞
15:30- 高橋 真聡 まとめ

ブラックホールへの定常降着流

高橋 真聡 (愛教大)

定常・軸対称ブラックホール磁気圏の基本方程式の概要を解説する。

これから「ブラックホール天体物理学」、とくに「ブラックホール磁気圏」の問題に取り組みたいと考えている若手研究者にむけて、一般相対論的な磁気流体についての基礎方程式から、磁気圏構造を解くための二つの方程式の導出し、それらの方程式の特徴について解説する。また、研究課題として残されているテーマについても紹介する。時間に余裕が生じた場合、衝撃波面での接続条件についても紹介し、定在衝撃波を伴うブラックホール降着流解についての最新の研究結果を紹介したい。

講義の基本構成は以下の通り、

1。流線 (= 磁力線) に沿った保存量
2。相対論的ベルヌーイ方程式 (ポロイダル方程式)
3。磁力線間の力の釣合の式： Grad–Shafranov (GS) 方程式
4。ポロイダル方程式の解
5。GS 方程式について
6。残されている課題 (理論として、観測に向けて、など)

大質量星崩壊に付随する Black Hole 形成と GRB

長倉 洋樹 （ 早稲田大 ）

近年、活動銀河核 (AGN) や星サイズ (太陽質量の数十倍程度) の Black Hole 候補天体が多く観測されている。これらのソースは、ほぼ " 定常的 " にブラックホールが存在し、その周りの降着円盤の活発な活動によって様々な興味のある現象が引き起こされていると考えられている (例えばジェットの形成や QPO など)。これらのソースからの電磁波の放射には Black Hole 近傍からの情報が含まれているため、一般相対論の検証にとって有力な天体である。これまでの、「ブラックホール磁気圏研究会」においても、これらのソースからどのように、そしてどこまで一般相対論の検証を行えるかを活発に議論してきた。

さて、本講演では少し違った視点から Black Hole の関わる現象に焦点をあてる。それは上記のように「定常的」に存在している Black Hole とは違い、Black Hole 自身を形成しそれが発展していく「動的」な振る舞いに関連した現象に注目する。以下で述べるように、この Black Hole の動的な性質は、大量の重力波を放出するため一般相対論の検証として意味があるのはもちろんのことであるが、ガンマー線バースト (通称 GRB) と呼ばれる超高エネルギー天体現象とも密接に関係している。

GRB とは宇宙論的距離 (大体 z が 1 程度) から突発的に大量のガンマー線が地球に降り注いでくる現象の事をいう。そのエネルギーは典型的には 10^{52}erg 程度にものぼり、またそのエネルギーの大部分は数十秒以内に放出される、宇宙で最も高エネルギーな突発天体現象である。このような短い time scale で、どのように大量なエネルギーを放出できるのか、そのメカニズムはよくわかっていないのであるが、Compact 星 (例えば中性子星) 同士の合体や大質量星の崩壊によって Black Hole を形成し、その後ニュートリノメカニズム、もしくは MHD メカニズムによって相対論的ジェットが Black Hole 近傍から放出され、これが GRB として観測されているのではないかという考えが、現在最も有力視されている理論モデルである。本講演では、特に大質量星の崩壊に付随する Black Hole 形成と GRB について紹介する。

大質量星 (おおよそ太陽質量の十倍以上重たい星を意味する) は、その生涯を終える時には超新星として大爆発を起こす事が知られている。実は、一部の GRB はこの超新星爆発と一緒に起こっているという観測的な証拠があるため、現在精力的に、これらの関連が調べられている。一般的に超新星爆発は、鉄コアの崩壊の結果生じる衝撃波が星中を伝わり、外層を吹き飛ばすことによって爆発していると考えられている。(但し、炭素爆燃型超新星爆発もあるが今回の講演とは関係がないので、ここでは述べない。) そして中心には Comact な天体 (原始中性子星) が残り、これが長い時間をかけて Cooling し、やがて我々が観測するパルサーといった中性子星になるとされている。しかし、爆発する前の星があまりに重すぎると、鉄コアの結果生じた衝撃波は外層にまで到達できず、外層の多くの部分が中心に降り積もり、その結果 Black Hole が形成されると考えられる。そしてこの Black Hole と周りの Disk システムから相対論的ジェットを形成するという、いわゆる「Collapsar」とよばれるモデルが大質量星の崩壊の結果、GRB を形成するモデルとして提案されている。

上記で述べてきたことを踏まえ、本講演では大質量星の崩壊及び Collapsar モデルにおける理論的研究の現状及び問題点を概観し、今後の研究の方向性について議論していきたいと考えている。また、現在私が行っている Collapsar からの相対論的なジェット伝搬の数値シミュレーションの結果についてもあわせて紹介する予定である。

本講演を行う目的は、聴衆の方々に Collapsar モデルについての現状及び問題点を知ってもらった上で、この分野への参入を促す事である。講演で述べるように、GRB の理論メカニズムをきちんと理解するには、まだまだ

解決すべき難題は多いのが現状である。そこで皆様に GRB について興味を持っていただき、たくさんのアイディアを出し合ってもらい、現状の問題点を打開できるような議論を行っていきたいと考えている。

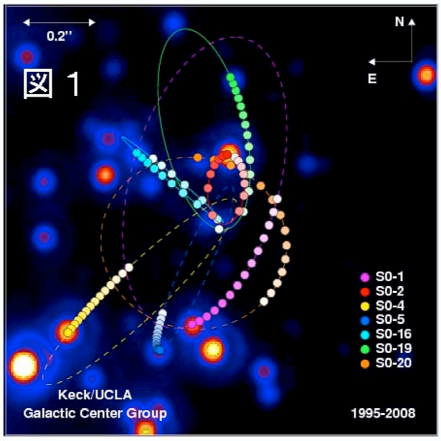
SgrA* モデルの現状

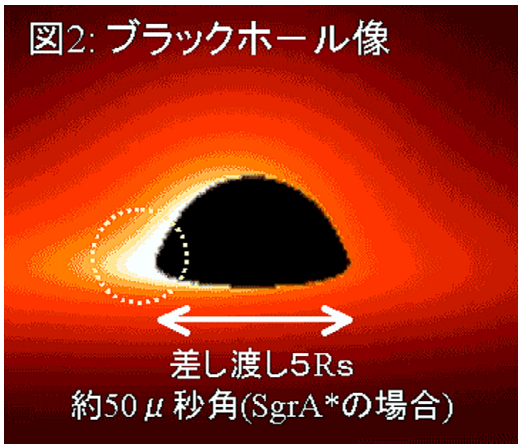
高橋 労太 （ 理研 ）

電波観測と赤外観測の現状と将来計画

三好 真 （国立天文台）

事象の地平面を含め、ブラックホール近傍の解像観測は技術的には既に可能である。銀河系中心ブラックホール SgrA*はその近傍の恒星の軌道運動観測から正確な質量が計測され（図 1 ）、約 400 万太陽質量の大質量ブラックホールであるとされる。銀河系中心距離はわずかに 8kpc（2 万 4 千光年）なのでその Schwarzschild 半径 ($1R_s$) は見かけ 10 μ 秒角となる。ブラックホール候補天体はいくつもあるが、見かけサイズ最大のブラックホールである。これをサブミリ波帯の VLBI（超長基線電波干渉計）で観測すればよい。　　事象の地平面を意味するブラックホール・シャドーは自己重力レンズ効果で直径約 5Rs になる。差し渡し 50 μ 秒角の黒い穴が降着円盤の中心に見えるはずだ（図 2 ；高橋労太による）。ブラックホール・シャドーの形状はメトリックが決めている。その形状の測定は新たなブラックホール時空の研究手法となる（Takahashi,R., PASJ, 57,273–277,2005 など）。画像として、ブラックホール近傍、事象の地平面などを捉えると、重力波検出に比肩する強重力場での一般相対論の実験場となる。





Doeleman ら（Nature, 455, 78–80, 2008）は SgrA*のサブミリ波帯 VLBI 実験観測の成功を報告した。降着円盤の高速回転によるドップラーブーストによる高輝度部分（図 2 、点線円部分）を検出したのではないかと思われる。ブラックホール・シャドー自体の検出には至らなかったが、既に技術的可能性を実証したことになる。

SgrA*は南天に位置するので、その「事象の地平面」観測に適した観測装置は南半球に置くのが良い。南米アンデス山脈を中心にサブミリ波帯・電波望遠鏡１０局を展開させ、約 8 千 km の広がりをもつ VLBI 網を作れば SgrA*の事象の地平面は確実に捉えることができる（Miyoshi ら, PNAOJ, 10, 15–23, 2007, astro-ph/ 0809.3548、Miyoshi ら, P.T.P.S, 155,186–189, 2004 ）。よい画像を得るには様々な空間フーリエ成分をサンプルする必要がある。現在、世界にあるサブミリ波対応の電波望遠鏡群では、短基線によるサンプルは不足しており、良い画像を得ることができない。ここに着目し、日本では、短基線を得る観測システムの構築を、銀河中心 SgrA*の観測に特化

することでコストダウンして、一般相対論 100 周年 (2016 年) までに「事象の地平面」の検出、一番乗りをめざしている。図 3 はその概念図である。固定球面鏡を利用し、安価な大口径望遠鏡 (早稲田大学那須パルサ観測所の先例あり) を 2 基程度作り、集光力を稼ぐ。球面鏡には焦点は無いが副鏡面の工夫で焦点は形成できる。主鏡が地面に固定であっても副鏡シフトによって数時間の天体追尾は可能である。また球面だと鏡面パネルはすべて同一の曲率でよく、コストダウンができる。主鏡は地面に固定しているので、観測仰角に依存する鏡面の自重変形からは自由になる。さらにコストの点から既にインフラがあり、サブミリ波受信に適した高地、例えばボリビア・チャカルタヤ宇宙線観測所 (標高 5300m) 、ペルー・ワンカヨ地球物理観測所 (標高 3300m) などに設置できると良い。一方、様々な基線ベクトルを確保するために、移動観測のできる、小口径アンテナを搭載したキャラバン型観測局を作る (NICT 鹿島に移動型 VLBI 装置の先例あり) 。干渉計の感度は両局のアンテナ口径の積に比例するので、片方が大口径であれば、もう片方は小さくともよい。球面鏡には 30m、キャラバン型局には 4 m の口径は欲しい。キャラバン局を移動させ空間フーリエ成分を多数サンプルして良い画像を作ることができる。「事象の地平面」の検出の一番乗りを単独で行えるだけの性能を持ちたい。チリには日欧米で建設した ALMA がある。共同観測し、さらに高感度観測することも想定できる。

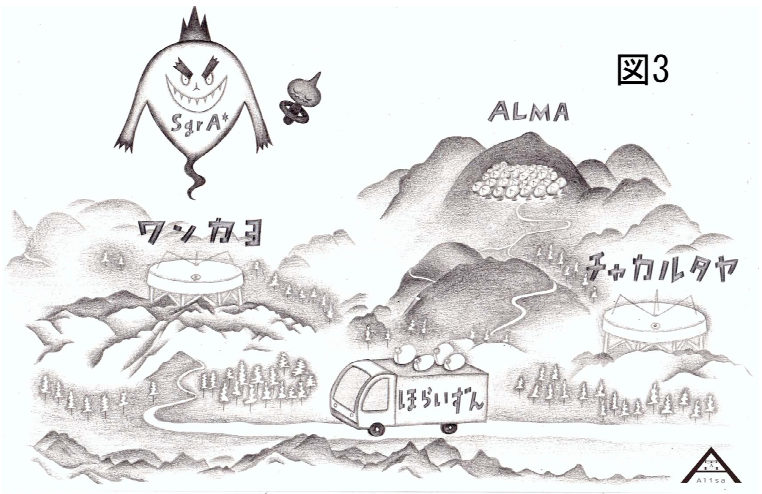


図3

輻射の非平衡物理

斉田 浩見 （ 大同大 ）

平衡から外れた輻射による輸送現象を議論したい。

非平衡な輻射を扱うアプローチとしてまず思いつくのは、イオンや電子と光子の散乱を考慮して、 ボルツマン方程式の解として光子の分布関数を得るという統計力学的な方法である。しかし、ボル ツマン方程式を解くのは難しい。出来れば避けたい。

一方、熱力学的にマクロな視点に立って、(非平衡状態の) 熱力学法則と状態方程式に基づいて輻 射輸送が扱えればお手軽である。ところが、輻射場 (光子ガス) のように、構成粒子同志が衝突を しないような無衝突ガス系の非平衡状態の扱いには問題がある。

通常の粒子衝突がある散逸的物質系の非平衡状態では、エントロピー生成率が『 Bilinear form 』とよばれる形式にまとめられることが既に知られている。(Navier-Stokes や Fourier 則など 輸送の現象論、そして Extended Irreversible Thermodynamics など既存の非平衡流体理論は、エ ントロピー生成率が Bilinear form の形式で書ける。) ところが、非平衡な輻射場のエントロピー生成率は Bilinear form で書けないことが分かっている。では輻射場の非平衡状態、つまり平衡とは言えないほど強い輻射輸送をどう扱ったらよいのか？ その確固たる答えは、いまのところ得られていない。

本講演では、散逸的物質系のエントロピー生成率の Bilinear form の解説、輻射場がそれを満たさないことに関する解説、それに対する一定の解答の解説、を行う。今後、非平衡な輻射場のエン トロピー生成率がどう表されるべきかを明らかにし、輻射輸送を伴う非平衡現象の理論 (輻射輸送 を入れた非平衡な磁気流体の理論？) を作ることを目指したい。

Ref[1]: Christopher Essex, *Radiation and the Violation of Bilinearity in the Therm odynamics of Irreversible Processes*, Planet. Space Sci. 32 (1984) 1035
Ref[2]: Christopher Essex, *Radiation and the Continuing Failure of the Bilinear Fo rmalism*, Advances in Thermodynamics 3 (1990) 435
Ref[3]: Hiromi Saida, *Two-Temperature Steady State Thermodynamics for a Radiation Field*, Physica A356 (2005) 481

放射 MHD

大須賀 健 (国立天文台)

近似リーマン解法を用いた相対論的 Sweet-Parker 型磁気リコネクションシミュレーション

高橋 博之 （ 国立天文台 ）

理想流体における相対論的磁気流体シミュレーションはブラックホールや中性子星磁気圏の物理、相対論的ジェットの加速機構など幅広い分野において適用され、数多くの成功をおさめてきた。しかし磁気圏のような磁気エネルギー優勢な状況下において、磁気エネルギーの熱・運動エネルギーへの変換機構を理解するためには磁気散逸過程を扱う必要がある。この磁気散逸過程を含めた相対論的磁気流体シミュレーション (Relativistic Resistive Magnetohydrodynamics、以下 RRMHD) は渡邊ら ('06) によって初めてなされた。彼らは異常抵抗モデルを用い、相対論的ペチェック型磁気リコネクションの数値実験を行った。その結果、slow shock 近傍で磁気張力によって磁気エネルギーが運動エネルギーに変換され、アウトフロー速度がアルヴェーン速度まで加速されることを確かめた。その後いくつかのグループによって RRMHD の定式化がなされシミュレーションコードに実装されてきた (Komissarov '07, Palenzuela et al. '09, Dumber '09)。しかし、これらのシミュレーションはいくつかのテスト問題を行うのみで現実的な磁気散逸過程のシミュレーションは渡邊らのシミュレーション以降なされていない。

そこで我々は現実的な磁気散逸過程の RRMHD シミュレーション、特に衝撃波を伴わない相対論的 Sweet-Parker 型磁気リコネクションにおけるエネルギー変換率を調べるべく、Komissarov('07) によって開発された近似リーマン解法に基づく RRMHD コードを実装した。本発表ではこの RRMHD コードの開発状況と幾つかの問題点に触れ、さらに RRMHD コードを用いて行った相対論的 Sweet-Parker 型磁気リコネクションシミュレーション結果について発表する。

MHD 数値シミュレーションの基礎

花輪 知幸 （ 千葉大 ）

GRMHD 数値計算の基礎

小出 眞路 （熊本大）

ブラックホール磁気圏プラズマの数値計算において一般相対論的電磁流体力学（ＧＲＭＨＤ）がしばしば使われるようになってきた。とくに，ブラックホールの回転エネルギーの引き抜き機構や相対論的ジェット形成の磁気モデルに関連して多くの興味深い結果が発表されている。この最近のＧＲＭＨＤ数値計算の急速な発展と浸透はその計算が非相対論的ＭＨＤの計算に帰着されるという認識に負うところが大きい。

本講義ではＧＲＭＨＤの数値計算をどのように非相対論的ＭＨＤの手法に帰着させるかについて説明する。また，ＧＲＭＨＤ数値計算のいくつかの例を通して非相対論的ＭＨＤと異なるＧＲＭＨＤ特有の現象を示しその醍醐味を紹介する。

降着円盤の磁気流体シミュレーション

松元 亮治 （ 千葉大 ）

磁場を持つ回転星の平衡解を求めるための「GS 方程式の解法」

吉田 至順 (東北大天文)

最近、マグネターとして知られる超強磁場を持つ中性子星の存在が確実視され、強い磁場を伴った星と関連した研究が盛んに行われています。しかし、長い歴史を持つ星の平衡解研究において、強い磁場を持つ星の力学平衡モデルの計算は 2005 年になって、富村＆江里口により初めて可能になりました。

本講演では、理想磁気流体力学とニュートン力学に基づいた磁場回転星の平衡状態の求め方について、基礎方程式の導出から数値計算法まで、非常に基本的なところから (基本的なところだけ？) 解説します。また、現存する方法の問題点、相対論的扱いへの拡張についても簡単に触れる予定です。

ニュートン重力での GS 方程式の解法

藤澤 幸太郎 (東大総合文化)

Tomimura & Eriguchi (2005) の定式化を用いて，ニュートン重力での GS 方程式 (Grad-Shafranov 方程式) の導出と計算，解法に関して述べます．Tomimura & Eriguchi (2005) の定式化では，運動方程式の積分可能条件から電流密度の形を決定し，GS 方程式をベクトルポテンシャルの φ 成分に関して解いています．その結果，GS 方程式を見通しよく解くことができ，また，poloidal 磁場の無限遠での境界条件を適切に取り入れることができます．実際にこの定式化と解法を用いて計算した結果に関しても，簡単に言及していく予定です．

フォースフリーブラックホール磁気圏 ~ ブラックホール時空における GS 方程式の解析 ~

孝洋 介森 (大阪市大)

ブラックホール周りの磁場はブラックホールから回転エネルギーをとりだしプラズマを加速させるものとして注目されています。そのためブラックホール周りの大域的な磁場構造を調べることは重要な研究です。プラズマの運動も取り入れ磁場構造を調べることは困難なので、ここではプラズマの慣性を無視したフォースフリー近似を考えることにします。このような近似で形成される磁気圏をフォースフリーブラックホール磁気圏とよびます。フォースフリーブラックホール磁気圏は Grad-Shafranov(GS) 方程式と呼ばれる準戦型楕円型の偏微分方程式によって記述されます。この方程式にはブラックホールホライズンと light surface の 2 つの特異面があります。light surface は磁場の回転速度が光速になるところとして理解されます。このような特異面があることで、GS 方程式をホライズンから遠方までグローバルな領域で解くことを困難にしています。本発表では、light surface での正則性をかしつつどのように GS 方程式を解くのか数値的な解析と解析的な解析両方について概観し最近の研究を紹介したいと思います。

バイナリー巨大ブラックホール探査に向けて

早崎 公威 （ 北大 ）

ブラックホール同士の距離が 1 パーセク以下の「近接」のバイナリーブラックホールの形成とその合体過程は、階層的構造形成シナリオのキープロセスである。しかしながら、そのような近接バイナリーブラックホールは今日まで同定されていない。

今回のトークでは、バイナリーブラックホールと周囲のガス (個々のブラックホール周囲の降着円盤とバイナリーを取り巻く外周円盤の三つのガス円盤) との相互作用のフレームワークで、バイナリーブラックホールを同定するための基本的な方法を示す。

内容は主に三つに分けられる。

1 . バイナリーブラックホールからの放射特性

2 . 近接バイナリーブラックホールの進化

3. 近傍活動銀河中心核におけるバイナリーブラックホールの質量関数

以上に基づいて、去年の 8 月にファーストライトに成功した全天 X 線監視装置 (MAXI) による近接バイナリーブラックホールの観測可能性が議論される。また、この分野の現状と将来に向けて理論的・観測的課題等も議論される。

ブラックホールの星空

高橋 労太 （ 理研 ）

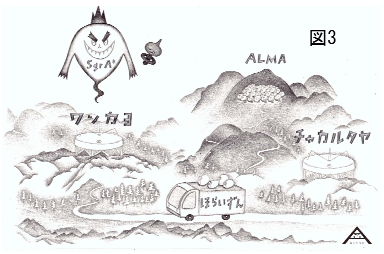


図3

世話人	高橋真聡	takahasi@phyas.aichi-edu.ac.jp
	小出眞路	koidesin@sci.kumamoto-u.ac.jp
	中尾憲一	knakao@sci.osaka-cu.ac.jp
	斉田浩見	saida@daido-it.ac.jp