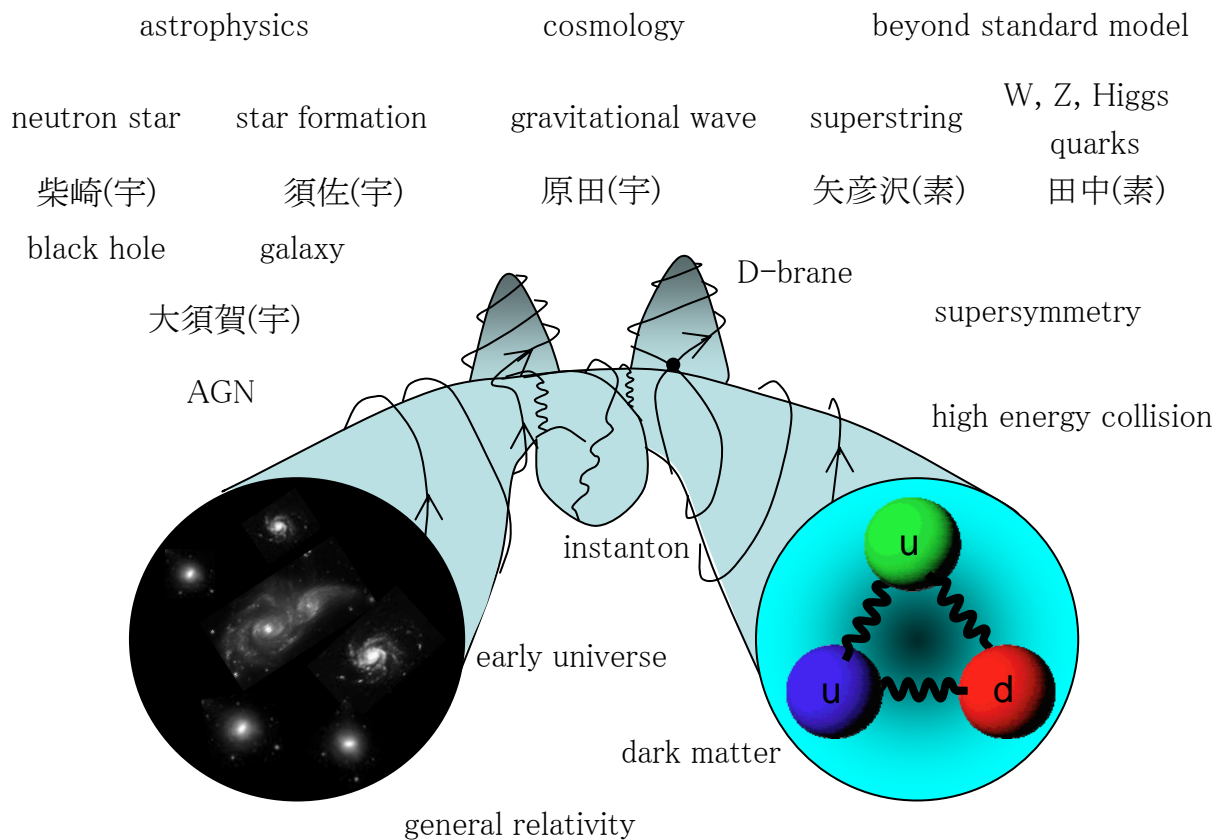


理論物理学研究室

素粒子物理と宇宙物理の理論、対象、テーマ、人。

いろいろと興味ある問題がたくさんあります。

いつでも、誰でも、質問・議論に来てください。



first star formation	牧(宇D3)	gauge/string duality	知崎(素D3)
galaxy formation	佐久間(宇M2)	de Sitter-black hole	関和(素D3)
galaxy formation	佐藤(宇M2)	grand unification	若林(素D3)
neutron stars	山下(宇M2)	QCD, proton	川嶋(素D3)
γ -ray bursts	小泉(宇M1)	QCD, proton	松田(素M2)
string theory	姜(素M1)	string theory	鈴木(素M2)
quantum field theory	笹川(素M1)	string theory	島野(素M1)
		string theory	三平(素M1)

【研究室の概要】

理論物理学研究室では、素粒子理論と宇宙物理学の理論的研究を行っています。物質のミクロな構造を探る素粒子論と広大な宇宙で起こる現象を取り扱う宇宙物理学の分野とは一見すると対極にあるように思えるかもしれませんが。しかし、現代物理学では、物質の由来を宇宙創生や星の誕生と終焉に求め、宇宙の成り立ちは物質構造の知識を抜きでは知りえないことを教えてくれます。つまり、自然界の成り立ちと構造を知るためには、この2つの分野は不可欠な役割を担っているのです。

当研究室には、6名のスタッフと15名の大学院生が所属しています。また、卒業研究で理論物理学を選択した4年次生も加わって研究活動を行っています。

スタッフと大学院生の研究分野は以下のページで詳しく説明されていますが、研究分野の概略のみを記すと以下のようになっています。

- 柴崎徳明 中性子星やブラックホールを対象とする高エネルギー天体物理学の理論的研究。
- 田中秀和 素粒子反応の理論的研究。特に、高エネルギー素粒子反応を通して物質構造を理論的に解明することを目指しています。
- 矢彦沢茂明 超弦理論・M理論の構築。
- 須佐 元 宇宙初期の天体形成および銀河形成の理論的研究。特に数値シミュレーションの手法を用いて研究を行っています。
- 原田知広 一般相対論の基礎的諸問題と宇宙論・宇宙物理学的应用に関する研究。
- 大須賀 健 活動銀河中心核の理論的研究。特に、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの形成および進化を解明することを目的としています。

素粒子反応の理論的研究

田中秀和

物質は何で出来ているのだろうかという古代からの素朴な疑問に対して、人類は現時点までに、「物質はクォークとレプトンで出来ており、それらの間の相互作用はゲージ粒子とよばれる粒子によって媒介されている」という物質像にまでたどり着いた。これは「素粒子の標準理論」とよばれているが、物質界や宇宙の現象を理解するための最も基礎的な理論体系の一つである。この標準理論の知識は、原子核物理学や宇宙物理学の基本的な知識でもあるので、更にその重要性が増してきている。

しかし、標準理論が物質の究極の姿を全て説明してくれるわけではなく、もっと深いレベルでの構造の反映であろうと考えられている。例えば、従来の標準理論では質量を持たない粒子として取り扱われていたニュートリノは、近年の研究から質量を持っているであろうと考えられるようになってきた。また、素粒子の質量の起源と考えられているヒッグス機構や素粒子の世代についても、多くの不明な点が残されている。

このような物質構造の研究は、理論的な研究と実験的な検証とによって進められている。理論的な研究としては、素粒子の標準理論が成立する起因をより深く理解するための統一理論の構築の試みなどと共に、複雑な素粒子反応がどこまで標準理論によって説明可能かを探る試みが挙げられる。素粒子の標準理論の枠組みは、学部4年次生でも（ちゃんと勉強すれば）理解できる体系であり、この分野は卒業研究で取り組むことも可能である。

以上の観点より、現在次のような研究を行っている。

(1) 標準理論の検証

ニュートリノの質量を考慮した素粒子の標準理論は、現在実験との比較に於いて非常に良い精度で成り立っていることが知られているが、どこまでの精度で成立しているかは明らかではない。これを調べるためには、素粒子反応の精密測定が必要であるが、その結果を評価するためには、標準理論の精密計算を行い測定結果と比較する必要がある。

しかし、素粒子反応の精密計算は計算量が膨大になるものが多く、手計算で行うには限界がある。そこで、現在、高エネルギー加速器研究機構や他大学と協力をして、素粒子反応過程の理論計算の自動計算化を行い、標準理論の精密計算を行っている。

(2) ハドロンの内部構造と高エネルギーハドロン散乱における強い相互作用の効果

原子核を構成する陽子や中性子などの強い相互作用をする粒子（ハドロン）は、クォークと強い相互作用を媒介するグルーオンの複合体と考えられているが、その内部構造は非常に複雑であり、未だに全貌は明らかではない。

例えば、陽子の持つスピンはクォークのスピンのみでは説明できないし、ハドロン間の相互作用はクォークやグルーオンのレベルで完全に理解できていないわけではない。このように、強い相互作用の基本法則は理解されつつあるが、その複合体であるハドロンや原子核を標準理論で理解するためには、更なる研究が必要である。

ハドロンの内部構造の探索は、主にハドロン散乱反応を用いて行われる。実験的には、終状態に多数のハドロンが生成される複雑な現象の解析が必要であり、理論的に厄介なことは、強い相互作用は単純な結合定数の有限次数での展開では不十分であることが知られている。

そこで、強い相互作用による多粒子生成機構の解明と、その知識を用いてハドロンの内部構造やハドロン散乱現象の理論的研究を行っている。

(3) 素粒子の標準理論を超える試み

素粒子の標準理論には、素粒子の質量、相互作用の強さ、相互作用を支配する対称性などの起源についての理論的に色々な疑問が内包されている。また、現在の標準理論の枠組みは、超高エネルギー領域では破綻をきたすことが示唆されており、現在実験が行われているエネルギーよりも高いエネルギー領域には新たな物理法則が存在していると考えられている。また、宇宙初期などを考える時には、素粒子の標準理論だけでは不十分であることが示唆されている。

これらの問題を解決するために様々な統一理論が提唱されているが、その中でも有望な超対称性を持つ統一理論についての研究を行うと共に、「次世代の超高エネルギー加速器では何が起こりそうか？」について理論的な研究を行っている。

最近の研究成果（指導学生を含む）

○ 超対称粒子の関与する散乱断面積の自動計算システムの研究・開発

素粒子の統一理論の枠組みとして有望視されている超対称性理論で予言される粒子の数は非常に多く、これらの粒子生成断面積を理論的に計算するのは多大な労力が必要である。そこで、先に開発した素粒子の標準理論に対する散乱断面積の自動計算システムを、超対称粒子の関与する散乱過程にも計算可能な形に拡張した。

[発表論文]

GRACE/SUSY Automatic Generation of Tree Amplitude in MSSM

J. Fujimoto, T. Ishikawa, M. Jimbo, T. Kaneko, K. Kato, S. Kawabata,
T. Kon, M. Kuroda, Y. Kurihara, Y. Shimizu and H. Tanaka
Comput. Phys. Commun. 153(2003), pp.106-134

○ ハドロン-ハドロン散乱における多粒子生成過程のモンテカルロ・アルゴリズムの研究

ハドロン-ハドロン散乱過程における量子色力学の効果は非常に複雑であり、これに対して理論的に整合性のあるシミュレーションを行うことが必要である。ここでは、散乱素過程に対する next-to-leading order の散乱振幅を考慮したモンテカルロジェネレータの研究・開発を行った。特に、始状態パートンに対するパートンシャワー生成との整合性を議論した。

[発表論文]

QCD event generators with next-to-leading order matrix-elements and parton showers

Y. Kurihara, J. Fujimoto, T. Ishikawa, K. Kato, S. Kawabata, T. Munehisa and H. Tanaka
Nucl. Phys. B654(2003), pp. 301-319

○ 始状態パートンに対する3体分岐関数の計算

強い相互作用の効果は、有限次数の摂動計算では精度良く評価できないことが知られている。この場合は、対数的な寄与を摂動の全次数について足しあげる必要があるが、このような効果の非包含過程に対する計算手法の研究が必要である。非包含過程に対して量子色力学の高次効果を加えるために、Jet Calculus の手法を用いて、これまでに求められていなかった始状態のパートンについて全ての分岐素過程に対する3体分岐関数の計算を行い、その性質を調べた。

[口頭発表]

「Space-Like Jet Calculus による3体グルーオン分岐関数の計算」

杉浦哲哉、田中秀和、宗久知男、加藤潔

(日本物理学会第56回年次大会、2001年3月27-30日、中央大学多摩キャンパス)

「Space-Like Jet Calculus による3体分岐関数の計算」

杉浦哲哉、田中秀和、宗久知男、加藤潔

(日本物理学会2001年秋季大会、2001年9月22-25日、沖縄国際大学)

[発表論文]

Three-Gluon Decay Function Using Space-Like Jet Calculus Beyond the Leading Order

H. Tanaka, T. Sugiura, T. Munehisa and K. Kato

Prog. Theor. Phys. Vol. 105, No.5 (2001) p.827-p.843

Space-Like Jet Calculus for Single Gluon Radiating Processes

H. Tanaka, T. Sugiura, T. Munehisa and K. Kato

Prog. Theor. Phys. 109(2003), pp.981-993

○ 始状態パートンに対する高次効果を含めたモンテカルロ・アルゴリズムの研究 (田中・若林)

散乱素過程に対して、next-to-leading order まで考慮する場合には、場の理論における摂動理論の整合性から、始状態パートンに対しては、next-to-leading-log(NLL) まで考慮する必要がある。ここでは、始状態パートンからの量子色力学効果による多粒子生成過程に対して、NLL 項までを考慮したモンテカルロ・アルゴリズムの研究・開発を行った。

[口頭発表]

「NLL 項を考慮した始状態パートンに対する QCD カスケード」

田中秀和 (日本物理学 2003 年秋季大会宮城ワールドコンベンションセンター・サミット、2003 年 9 月 9-12 日)

「NLL parton shower for initial state parton radiation」

H. Tanaka (Physics Simulation for LHC, 5-6 April 2004 at KEK, Tsukuba)

「NLL パートンシャワー模型における因子化法」

田中秀和、杉浦哲也、若林裕也

日本物理学会 2005 年秋季大会 (2005 年 9 月 12-15 日、大阪市立大学)

[発表論文]

Initial State Parton Evolution beyond the Leading Logarithmic Order of QCD

Prog. Theor. Phys. 110(2003), pp.963-973

H. Tanaka

Factorization Algorithm for Parton Showers beyond the Leading Logarithmic Order of QCD

H. Tanaka, T. Sugiura and Y. Wakabayashi

Prog. Theor. Phys. Vol.114, (2005), pp.477-486

○ 左右対称な中間対称性のある超対称 SO(10)統一模型の研究 (若林)

現在の素粒子物理学は標準模型というゲージ理論が基礎理論となっている。標準模型で解決されない問題を乗り越えるひとつの方法として SUSY SO(10) GUT があり、神岡で明らかにされたニュートリノが質量をもつ事実を理論的に説明可能なモデルの候補である。SO(10)対称性を標準模型のそれに破る最も簡単な方法は Higgs 機構を繰り返すことだが、その破り方は任意ではなく、GUT に課せられる境界条件を満たす解の有無を数値計算によって解析した。

[口頭発表]

「左右対称な中間対称性のある超対称 SO(10)統一理論の繰り込み群解析」

若林裕也 (日本物理学会 2004 年秋季大会、高知大学、2004 年 9 月 27-30 日)

研究指導

○ 博士課程後期課程 (博士論文題目)

- ・ 2002 年度

「Properties of Three-Body Decay Functions Derived with Time-Like Jet Calculus beyond Leading Order」

- ・ 2004 年度

「Atomic Schwinger-Dyson Method in Finite Systems」(藤崎晴男教授より指導引継ぎ)

○ 博士課程前期課程 (修士論文題目)

- ・ 1998 年度

「ニュートリノ質量と大統一理論」(浜満教授との共同指導)

- ・ 1999 年度

「始状態クォークの 3 体分岐関数の計算」

- ・ 2002 年度

「Two Higgs doublet model (type III) と lepton flavor violation」

- ・ 2003 年度

「深非弾性散乱における 2 ジェットのスピンの依存性」

「(non-)SUSY SO(10) GUT とその中間対称性」

- ・ 2004 年度

「Drell-Yan 過程に見る QCD の効果とその近似解法の妥当性」

(*) 1998 年度—2004 年度修了者 6 名 (博士後期課程進学者 3 名)

○ 卒業研究（卒業論文題目）

- 1998年度
「電弱理論における Higgs 粒子崩壊過程の現象論的考察」
- 1999年度
「電子-陽電子散乱における Higgs 粒子生成過程」
「Flavor mixing」
「Weinberg-Salam 理論における Z^0 ボソンの崩壊」
- 2000年度
「K 中間子を用いた CP 対称性の破れ」（2名による共同研究）
「高エネルギー電子-陽電子衝突におけるヒッグス粒子生成の検討」
- 2001年度
「陽子・反陽子衝突におけるヒッグス粒子生成過程」
「パートンモデルに基づく陽子の内部構造」
- 2002年度
「 $K^0\bar{K}^0$ 混合における CP 非保存」
「Electron-Proton 散乱と Proton の拡がり」
- 2003年度
「深非弾性散乱と構造関数」
- 2004年度
「ヒッグス粒子の生成・崩壊過程の理論的考察」（5名による共同研究）
- 2005年度
「有限温度における光子の self-energy」
「陽子の構造」

(*) 1998年度—2005年度卒研修了者 19名（博士前期課程進学者 13名）

超弦理論・M理論の構築

矢彦沢茂明

素粒子論とは物質を構成している基本粒子とその相互作用及び時空・宇宙の構造を研究する学問分野です。広い意味では、素粒子論は今までに知られた個々の自然法則や原理を、現在未解決な問題を手がかりにして、より簡潔な形で理解することを目指しています。ベータ崩壊に代表されるような弱い相互作用、ハドロンを構成しているクォークやグルーオンの強い相互作用、一般相対性理論によって記述される重力、そして電磁気力、これら四つの力とその力を感じる物質を量子論と矛盾なく統一的に記述する理論として、現在最も有望な理論が「超弦理論」です。この理論の素朴な見方は、まず振動している弦を考えて、その各振動モードを「素粒子」とみなし、次にそれが分裂したり結合したりする過程を考えることです。この見方からゲージ場や重力場の導出などの重要な性質が導けます。しかし、真空の構造や弦の多体問題等を調べるにはそのような素朴な摂動論的な描像だけでは不十分であり、非摂動論的な見方が必要になってきます。上で、「超弦理論」として「」を付けたのは、非摂動論的な見方及び定式化においては素朴に弦を基本要素とする見方を離れる必要があるかも知れないからです。弦という見方をしないで定式化され、ある極限をとると従来の超弦理論が再現されるといった可能性もあります。さらに、時空というものの捉え方自体が変わっていくこともあるでしょう。

近年、双対性、Dブレーン、行列模型、時空の非可換性等をキーワードとして少しずつ「超弦理論」に進展が見られ、私も非摂動論的な「超弦理論」の定式化に大いに興味をもって研究しています。また、時空に現れる宇宙初期の特異点やブラックホールの特異点の解消にも興味を持っています。なぜ「時空」は4次元なのか？ 宇宙項はなぜ小さいのか？ インフレーションはなぜ起こるのか？ ダークマターは何なのか？ なぜ電子の質量は約 $9 \times 10^{-31} \text{kg}$ なのか？ なぜ物質は3世代なのか？ といった問に答えられる日が来るかも知れません。

研究においては非常に柔軟な発想や思考が必要です。素粒子論を契機として、物性論、宇宙論、ブラックホールの物理、数理物理、統計物理、情報理論 ... 等にも興味を持っています。今までに、超弦理論以外にも、膜の理論、位相場の理論、超流体中の量子渦、宇宙紐のダイナミクス、Dインスタントン、時空の特異点、情報計量等々も研究してきましたが、それらはいずれも深いところで「超弦理論」と結びついています。

以下に、進展させている研究のうち特にインスタントンに注目して少々説明します。弦理論の別のテーマについては、D3の知崎君が博士号を目指して研究を行っています。また、卒研生、M1、M2は基本から最先端までを学習・考察しています。

(A) 行列模型とDインスタントン

ランダム行列の固有値の分布を調べることによって原子核のスペクトルなどの統計的分布を求めることは1950年代から行われていました。このような統計的観点とは違った幾何学的観点からランダム行列を捉え始めたのは1970年代からであり、その契機はトフフットのゲージ理論

と弦理論の対応関係の指摘でした。このゲージ場そのものを扱うことは難しいですが、座標依存性等を無視し、単なる普通の行列とするならば扱いは簡単になります。このような普通の行列を用いた模型は 1970 年代後半から調べられており、「古い」行列模型と呼ばれています。現在では範疇が広がり、超弦理論や M 理論を構成する「新しい」行列模型の提案がいくつかなされていますが、これらの本質的進展のための一つのヒントが「古い」行列模型の研究です。この単純な「古い」行列模型は非臨界弦理論との関係について多くのことが厳密にわかっており、また、二重スケーリング極限をとることによって摂動展開の全ての次数についての情報を得ることができます。しかしながら、これで全ての情報がわかっているわけではなく、重要なことは非摂動的な効果の扱いであります。そのポイントが D インスタントン効果です。福間と矢彦沢は行列模型における D インスタントン効果をボソン場表示及びフェルミオン表示を用いて構成し、具体的に計算を行いました。(ここまでの詳しい話は、立教 SFR 講究録 No.1 を参照してください。) それ以後、非臨界弦理論における境界効果と行列模型における D インスタントン効果との対応がさらに詳しく調べられ、双対性についての理解が大変深まってきました。「古い」行列模型はこれからの進展のヒントをいくつも内蔵しています。

(B) 情報の場の理論

統計的推論等で使われる情報幾何とは、確率分布のパラメータを座標とする多様体のリーマン幾何学であります。そして、情報幾何で重要な役割を果たすのがフィッシャー情報計量です。場の理論においては、古典的レベルでも、量子的レベルでも様々な確率分布関数が考えられます。統計物理学、物性物理学、素粒子物理学や弦理論などでよく登場する非線形シグマ模型のインスタントンの荷電密度を確率分布関数として採用すれば、インスタントンのモジュライ空間の計量が フィッシャー情報計量に対応します。従って、フィッシャー情報計量を計算することによって、インスタントンの統計的、あるいは確率的意味が幾何学的に見えてきます。逆に、インスタントンの性質からフィッシャー情報計量の対称性も見えてきます。実際、この場合のフィッシャー情報計量は反ド・ジッター計量となります。これは、超弦理論における AdS/CFT 対応と関連があり、大変深い意味合いを持っています。

弦理論に関する参考資料

超弦理論に関する以下の資料を参考にしてください。また、興味が湧いてきた方は気軽にお立ち寄りください。

- (1) 2002 年・2005 年に、立教大学太刀川記念会館で開催した「弦理論」研究会の講演内容は下記のホームページに公開されています。

<http://www.rikkyo.ne.jp/grp/itp/workshop/index.htm>

(2) 立教大学 SFR 自由プロジェクト研究「弦理論と重力理論の数学的構造解明に関する学際的研究」(代表: 矢彦沢茂明) において、以下の 8 冊の講究録を作成しました。

- 講究録 No.1 「弦理論・共形場理論と保形性」
- 講究録 No.2 「可解格子模型入門 I」
- 講究録 No.3 「モデル・ヴェイユ格子と弦理論、可積分系」
- 講究録 No.4 「弦理論の数学的構造」
- 講究録 No.5 「ゲージ理論・行列模型と非平衡統計物理学」
- 講究録 No.6 「可積分系をめぐる話題」
- 講究録 No.7 「多重ゼータ値および多重 L 値ノート」
- 講究録 No.8 「曲面の微分幾何学とソリトン方程式---可積分幾何入門---

(3) 最近 3 年程度の発表論文は別のページに記載されています。ここでは、弦理論に関するお勧めの過去論文を紹介します。

Modular invariance of one-loop N-point amplitudes in heterotic string theory,
S. Yahikozawa, Nuclear Physics B 291 (1987) 369

“Topological” formulation of effective vortex strings,
M. Sato and S. Yahikozawa, Nuclear Physics B 436 (1995) 100

Nonperturbative effects in noncritical strings with soliton backgrounds,
M. Fukuma and S. Yahikozawa, Physics Letters B 396 (1997) 97

Comments on D-instantons in $c < 1$ strings,
M. Fukuma and S. Yahikozawa, Physics Letters B 460 (1999) 71

高エネルギー天体物理学の理論的研究

柴崎徳明

研究対象は X 線や γ 線といった高エネルギーの光子を放射する天体現象である。具体的には、マグネター、パルサー、ガンマ線バースト、宇宙ジェットなどである。これらの天体現象においては、極限的な星である中性子星やブラックホールが重要な役割を演じていると考えられる。天体現象を理論的に調べることで、およびその結果をもとに中性子星やブラックホールの性質を明らかにすることが研究の目的である。最近では、次のような課題に取り組んでいる。

1. マグネター

X 線・ガンマ線を繰り返し爆発的に放射する天体である。中心星は 1000 兆ガウスという超強磁場をもつ中性子星である。X 線・ガンマ線のエネルギー源は磁場のエネルギーそのものと考えられる。しかし、爆発的なエネルギー解放のメカニズムはまだ分っていない。中性子星の内部にある量子化された磁束管が表面層にストレスを与え、星震を起こすためと考えられている。さらに、中性子星誕生の際、このような超強磁場が生じる原因についても研究を進める予定である。

2. マイクロクエーサー

大量の X 線を放射する X 線連星でブラックホールを含むものがある。相手の星から流れ出した物質がブラックホールに落ち込む際、その一部がジェット状に放出されることがある。これは活動銀河核の小型版でマイクロクエーサーとよばれている。電波、赤外線、X 線の放射を手がかりに、宇宙ジェットの放出メカニズムに迫りたいと考えている。

3. パルサーグリッチ

パルサーグリッチとは、電波パルサーでパルス周期が突然変化する現象である。中性子星外殻の回転速度が突然変化するのである。その原因は中性子星の内部にあるとする説が有力である。超高密度の内部は超流動、超伝導の状態にあると考えられる。そこで現在、超流動渦糸や量子化された磁束管の振る舞いを調べている。グリッチを通して中性子星内部の性質と構造を明らかにしたいと考えている。

4. パルサー風とパルサーネビュラ

Be 星と連星系を組んでいるパルサーがあり、この系から X 線や γ 線が観測されている。Be 星風とパルサー風の衝突による衝撃波の形成、衝撃波での粒子加速、相対論的な電子・陽電子によるシンクロトロン放射およびコンプトン散乱というシナリオで X 線・ γ 線の放射を調べ、パルサー風の性質について重要な知見を得ることができた。現在はこの研究を発展させ、ガンマ線バーストや活動銀河核にみられる宇宙ジェットの性質について研究している。

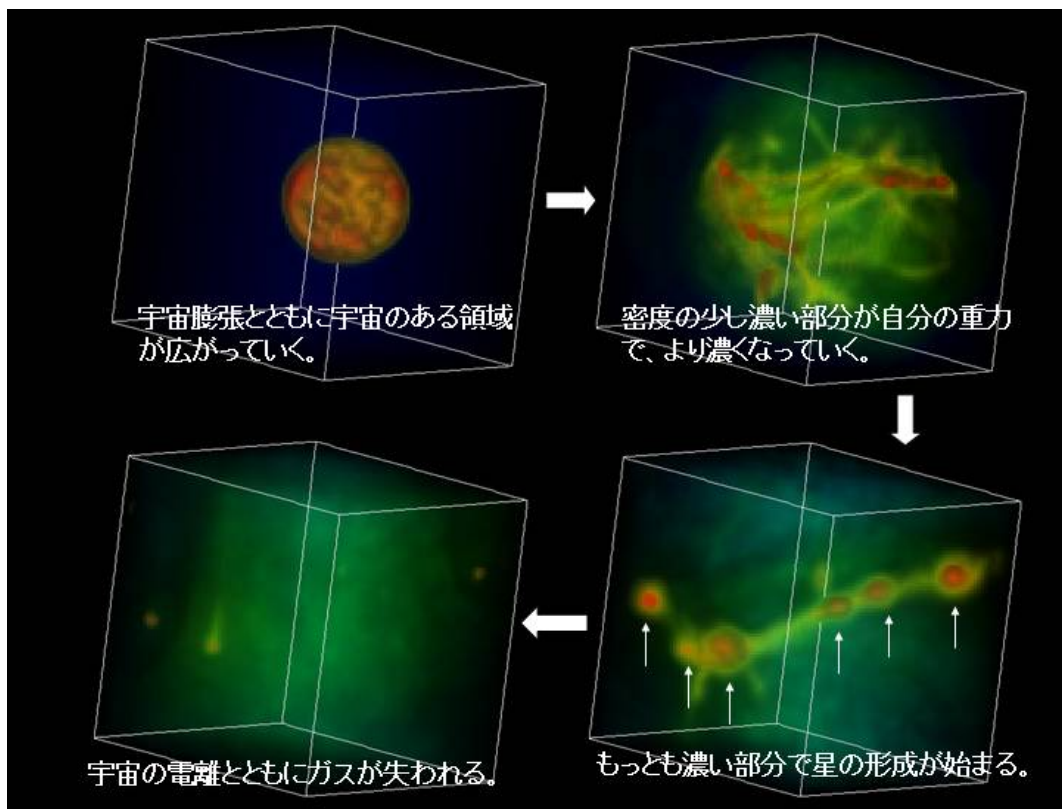
原始銀河形成の理論的研究

須佐 元

われわれの住む宇宙には非常にバラエティに富んだ銀河や星がたくさんあります。またわれわれ自身も、宇宙で誕生した存在であることを考えると現在の宇宙は本当にさまざまな構造を持っていることがわかります。一方、現代の宇宙論は、観測的にも理論的にも誕生直後の宇宙はきわめて一様でのっぺりしていることを明らかにしてきました。したがってわれわれの住む現代の宇宙はのっぺりした宇宙から何らかの物理過程によって進化し、現在のような賑やかな姿になったと考えられます。私たちの研究室ではこのプロセスについて研究し、数値シミュレーションの手法を用いて、コンピュータの中に、一様な宇宙からさまざまな銀河などの天体ができていく様子を再現しようとしています。

1. 銀河の形成と宇宙の再電離 (佐久間・須佐)

現在の宇宙論では構造の形成は、第ゼロ近似では小さな密度の揺らぎが自分の重力によって成長することによって起きると考えられています。また出来上がる天体の大きさについては、比較的小さなものから順に大きなものへと階層的に起こったと考えられており、第一世代の銀河はわれわれの住む銀河系の100万分の1程度の重さであったと信じられています。一方、このような天体の中で大質量の星が誕生し、その若い星々からの紫外線が宇宙全体を電離してしまう、という現象が起こります。これは宇宙の再電離とよばれ、現在



の宇宙論でもっともホットな話題のひとつです。またこのような若い星による宇宙の電離は、当然自分の親銀河や、近傍にある銀河にも多大な影響を与えます。特に第一世代の銀河は質量が小さいために自分の重力が弱く、再電離によって加熱されたガスを銀河のポテンシャル内にとどめておくことができません。したがって銀河からガスが失われ、「蒸発」してしまうことが知られています。われわれはこのような銀河形成にまつわるさまざまな現象を数値シミュレーションの手法によって定量的に詳しく調べています。上の図はその計算の一例で、形成中の銀河のガスの分布を表しています。進化とともに小さな構造が発達するが、宇宙の電離とともにガスが失われていることがわかります。

2. 宇宙最初の星の形成 (牧・須佐)

前述のように宇宙で最初にできる第一世代銀河の中では宇宙で最初の星が誕生します。これらの星は宇宙の歴史の中で非常に重要な役割に担っています。まずこれらの星は紫外線を放射することによって宇宙を再電離すると考えられています。第二にこれらの星は宇宙で始めてCやOなどの比較的重い元素を星の中の核融合反応で作ったと考えられています。われわれ人間の体は水や有機物でできていますから、その意味で宇宙の中で星がはじめて生まれた、というイベントは生命誕生に欠くべからざるものであったことがわかります。またこれらの重い元素は銀河や星を作るガスの熱的性質を大きく変えることが知られていますので、その後の星や銀河の形成の進み方にも多大な影響を及ぼす現象である、という見方もできます。したがって、これらの星がいつ、どの程度の量、またどのくらいの質量で生まれてくるかを正しく理論的に見積もることは現代宇宙物理学の中心的課題のひとつである、といっても過言ではありません。われわれはこの問題に対し、解析的、数値的な方法により迫っています。

3. 宇宙論的スケールにおける輻射流体数値シミュレーション (佐藤大・須佐)

実際の星や銀河の誕生の過程は複雑な化学反応や原子核反応、および放射の物理抜きには語ることはできません。しかしながら宇宙を構成する物質のうち普通の物質はおよそ7分の1程度でしかなく、残りはダークマターと呼ばれる奇妙な物質である、と考えられています。このダークマターは電磁相互作用をしないために、光ではまったく見ることができず、重力源としてのみ働きます。そして普通の物質でできた星やガスはダークマターの作る重力ポテンシャルの中に沈んで銀河を形づくると考えられています。したがって、銀河の形成自体は非常に複雑な現象ですが、その銀河をホストする「ダークマターハロー」の形成は基本的に重力のみで記述される現象とすることができます。われわれは、ダークマターハローの形成にまつわる諸問題 (サブストラクチャ問題、NFW プロファイルなど) に取り組むために特別推進研究「FIRST プロジェクト」に参画し、大規模な自己重力系の数値シミュレーションを行うとともに、輻射などの「普通の」物質に関するマイクロな過程も取り入れながら宇宙論的なスケールでの第一世代の天体形成の問題にアタックしています。

その他の情報

計算機設備：

理論物理学研究室には 24 ノードの Pentium4 が Gigabit でつながった PC クラスタがあり、宇宙物理学の計算に用いられています。PC クラスタとは複数の普通のコンピュータが高速のネットワークで連結されたもので、おのおのの PC を協調動作させながらひとつの計算を行うことができます。その他にも 4 ノードの PC クラスタや、単体の PC があり、数値計算に用いられています。下の図は理論研にある 24 ノードの PC クラスタです。



FIRST プロジェクト (<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/ccs/projects/index-j.html>)：

須佐は筑波大学で推進中の特別推進研究「融合型並列計算機による宇宙第一世代天体の起源の解明」に中心メンバーとして参加しています。FIRST プロジェクトは 256 ノード (512 プロセッサ) の PC クラスタのすべてのノードに小型の GRAPE (重力多体問題専用のボード) を装着し、超高精度計算によって第一世代天体、初代星の問題に迫ろうとするものです。実機は 2006 年度中の完成を目指しています。一部の大学院生もこの計画に参画し、研究を行っています。

須佐居室、HP アドレス：

居室は 4326

HP は <http://www.rikkyo.ac.jp/~susa>

卒業研究：

卒業研究は人数によりますが、毎年 2 テーマを選んで研究を行います。テーマは教員側からも提示しますが、それにとらわれず、基本的に 4 年生の希望に沿って決めています。以下に過去 4 年の卒研テーマを列挙しておきます。

「膨張宇宙のパラメータ決定」2002 年度

「第一世代天体形成の条件」2002 年度

「銀河形成の条件」2003 年度

「銀河中心の巨大ブラックホール形成」2003 年度

「QSO 吸収線系による宇宙再電離過程の解析」2004 年度

「重力多体系の Tree 法による数値計算」2004 年度

「宇宙最初の天体の質量」2005 年度

「Ia 型超新星の測定による宇宙論パラメータの計算」2005 年度

一般相対論の基礎的諸問題と宇宙物理学・宇宙論への応用

原田知広

一般相対論に代表される重力法則は、宇宙の誕生間際から現在そして未来への進化を記述し、原子核程度の高密度物質からなる中性子星の重力を記述し、光さえも出てこれないブラックホールの構造を記述し、さらに時空のゆがみの伝播としての重力波を記述します。一般相対論は、時空の曲率と物質場の関係式によって時空の動力学を与えます。一般相対論は、単に理論的に美しいだけでなく、重力法則をきわめて精密に記述することが実証されており、宇宙論・宇宙物理学の様々な極限的状况において非常におもしろい応用を持っています。最近の観測技術の進展は、宇宙が現在加速膨張していることを発見しましたし、近い将来には重力波の直接検出が可能となるでしょう。さらに、他の物理学（素粒子論・熱統計力学・量子力学・流体力学など）や数学（力学系の理論・偏微分方程式の理論など）と関連した幅広い研究がなされています。また、ワームホールやタイムマシンなど空想科学的対象を物理として扱うこともできます。そうした様々な研究が有機的に結びついた総体が、Einstein が提案した重力理論を踏まえつつそれを遙かに超えた、現代の「一般相対論」分野として認識されています。

以下、最近の主な研究内容とこれからの研究予定などを述べます。

1. 原始ブラックホール

原始ブラックホールは1971年に Hawking によって示唆された理論的な天体で、初期宇宙の密度揺らぎによって現れ、Hawking 輻射によってガンマ線・粒子線などを放射して蒸発します。原始ブラックホールは原理的に観測可能なので、現在の観測的制限からきわめて初期の宇宙の姿に関する情報を得ることができます。これまで私は、数値相対論や解析的手法によって、原始ブラックホールの最大質量や質量降着、さらに宇宙論的なホライズンより大きなブラックホールの構造に関する研究を行ってきました。今後さらに、加速膨張宇宙におけるブラックホールの進化を調べていく予定です。また、より一般的な文脈で、膨張宇宙におけるブラックホールに関する研究を行う予定です。

2. 数値相対論

ここ10年ほどの間に世界各国の重力波観測器の感度は飛躍的に向上しており、1918年の Einstein の予言以来初めての重力波直接検出が期待されています。検出技術の進歩とあいまって、重力波の理論研究が進んでいます。こうした中で、Einstein 方程式の数値的な解を求める数値相対論とよばれる方法が、日本の研究者などを中心にして大成功を収めつつあります。数値相対論は、重力波波形計算だけでなく、強い重力場の非線形現象の解明や宇宙現象のシミュレーションなどにも非常な威力を発揮しています。これまで私は、数値相対論を用いた重力波

波形計算や、ブラックホールの成長問題・重力崩壊シミュレーションなどを行ってきました。今後、数値相対論の数値技術的な研究やその応用的な研究などを行う予定です。

3. ブラックホール・自己相似解・臨界現象・時空特異点

1970年前後に完成した特異点定理によって、一般相対論が自らの適用限界点である時空特異点を予言することが明らかになりました。Penrose は、時空特異点はブラックホールの中に隠れていて見えないので無害だという仮説を立てましたが、この仮説が成り立たない例（裸の特異点）が発見されるなど、現在の状況は混沌としています。こうした中で、1993年、Choptuik は数値相対論によって臨界現象と呼ばれる現象を自己重力系において発見し、自己相似解が重力崩壊時空において本質的に重要な役割を果たすことを示しました。私はこれまで、裸の特異点の安定性に関する研究や、裸の特異点の量子論的な効果に関する研究、アトラクターとしての自己相似解の発見などの研究を行ってきました。今後、臨界現象の完全な解明に向けての研究を行っていきます。

活動銀河中心核および超巨大ブラックホールの形成・進化論

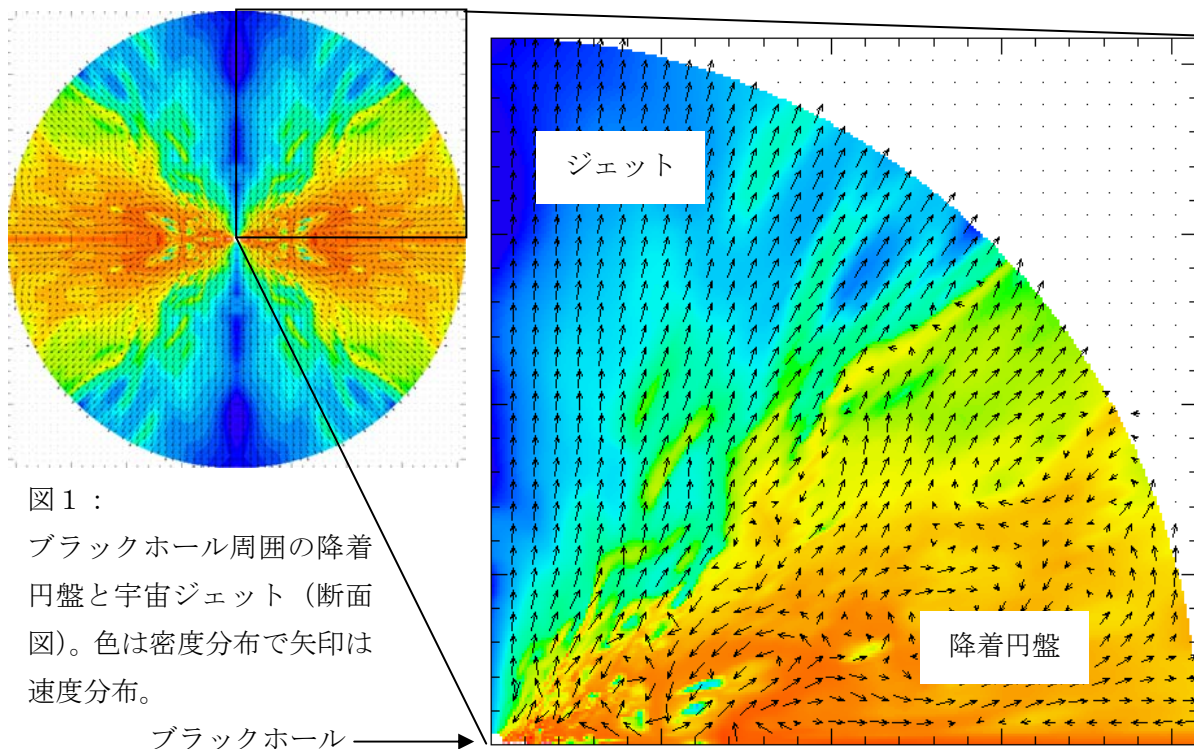
大須賀 健

1. 超巨大ブラックホールの成長・進化過程の理論的研究

銀河の中心部には太陽の100万倍から1億倍もの質量を持つ“超巨大ブラックホール”が存在することが分かってきました。しかし、この超巨大ブラックホールがいつ、どのように生まれたのか、これは現在の宇宙物理学において最大の謎の一つとされています。このブラックホールの形成・成長過程を解明するのがこの研究の目的です。

ブラックホールはその強力な重力で周囲の物質を吸い込みながら成長する(質量が増える)と考えられていますが、その際、ブラックホールの周囲には降着円盤と呼ばれるガス円盤が形成され、大量の光エネルギーが放出されると同時に宇宙ジェットと呼ばれる物質の高速流出が起こると考えられています。したがって、ブラックホールの成長過程を知るためには、ブラックホール周囲のガス降着円盤や宇宙ジェットに纏わる複雑な物理現象を調べなければなりません。

本研究ではコンピュータを用いた数値シミュレーションを用いてブラックホールの成長過程を調べています。計算には立教大学のPCクラスタ(24基のペンティアム4搭載)や他の研究機関の大型計算機を使用します。図1は数値シミュレーションの一例で、ブラックホールに物質が流れ込みつつ、宇宙ジェットが発生している様子を再現することに成功しました。



2. 成長末期のブラックホール降着円盤の理論的研究

ブラックホールは成長し続けることはなく、ある程度大きく（重く）なるとその成長が止まると考えられています。ブラックホールの成長停止はブラックホールの成長シナリオの最終章となっています。しかし、ブラックホールの成長過程と同じく、ブラックホールの成長を止めるメカニズムも未だ解明されていません。現在成長が止まっている超巨大ブラックホールを調べることでこの謎に迫ろうというのがこの研究の目的です。

現在成長が止まっている、もしくは成長率が非常に低くなっている超巨大ブラックホールの最も身近な例は、銀河系（我々の銀河）の中心にある超巨大ブラックホールです。銀河系の豊富な観測データとブラックホール周りの降着円盤の理論モデルを比較し、成長率の極めて低いブラックホールとその周囲の降着円盤の構造を調べます。

現在、このような成長率の極めて小さな降着円盤の理論モデルとして最有力と考えられているのが磁気降着円盤モデルと呼ばれるモデルです。このモデルでは重力に加えて電磁気的な力が重要とされています。本研究では磁気降着円盤モデルの予言する輻射スペクトル（波長ごとの光の強度分布）をコンピュータによる数値シミュレーションで求め、実際に望遠鏡で得られている銀河系中心の観測データとの比較を行っています。

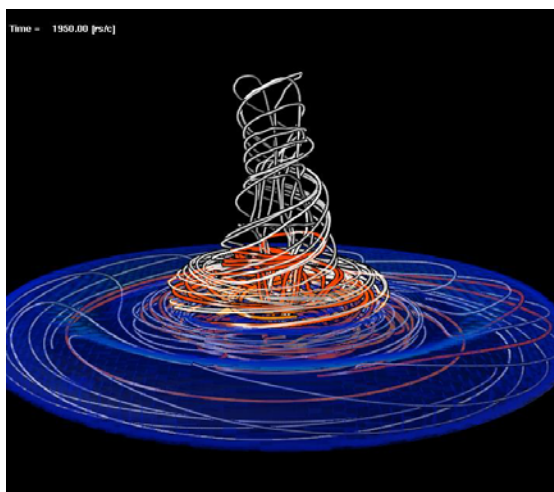
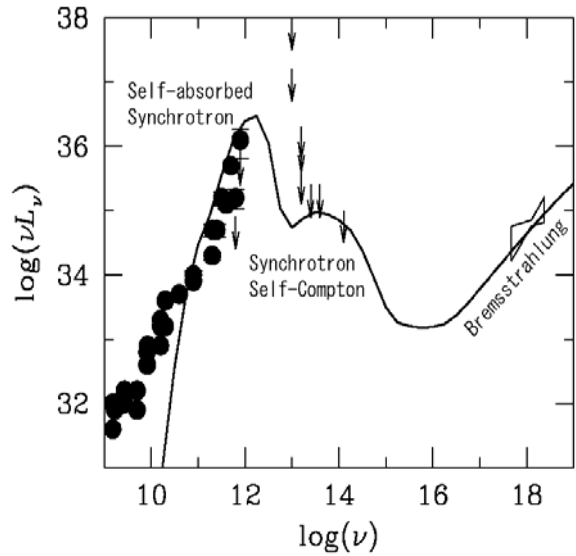


図 2 :
磁気降着円盤モデル。国立天文台のスーパーコンピュータによる数値シミュレーション[(C)Y.KATO]

図 3 :
磁気降着円盤モデル (実線) と銀河系中心の観測データ (黒丸、矢印、蝶印) の比較。



3. 活動銀河中心核の形成・進化論

銀河中心に存在する超巨大ブラックホールは、その成長過程において大量の光エネルギーを放射します。このときの銀河中心部は母銀河と同じかそれ以上の明るさで輝きます。このような極めて明るい銀河中心を“活動銀河中心核”と呼んでいます。活動銀河中心核は、その膨大なエネルギー放出を通じて星や銀河の形成率に大きな影響を与えてきたと考えられるため、宇宙の進化を知る上で重要な研究テーマとされています。

活動銀河中心核の形成・進化過程は超巨大ブラックホールの成長問題と密接に関係しており、上述の1および2の研究ではこのブラックホール自体の進化過程をターゲットとしていましたが、この研究では母銀河も含めた活動銀河中心核の全体構造の形成・進化過程を調べています。

活動銀河中心核が発する光が銀河内の物質に与える影響を、数値計算を用いてより正確に調べることで、新たな進化シナリオを得ることに成功しました。図4はその描像を図示したものです。今後はより研究を発展させるため、スーパーコンピュータを用いた計算を計画しています。

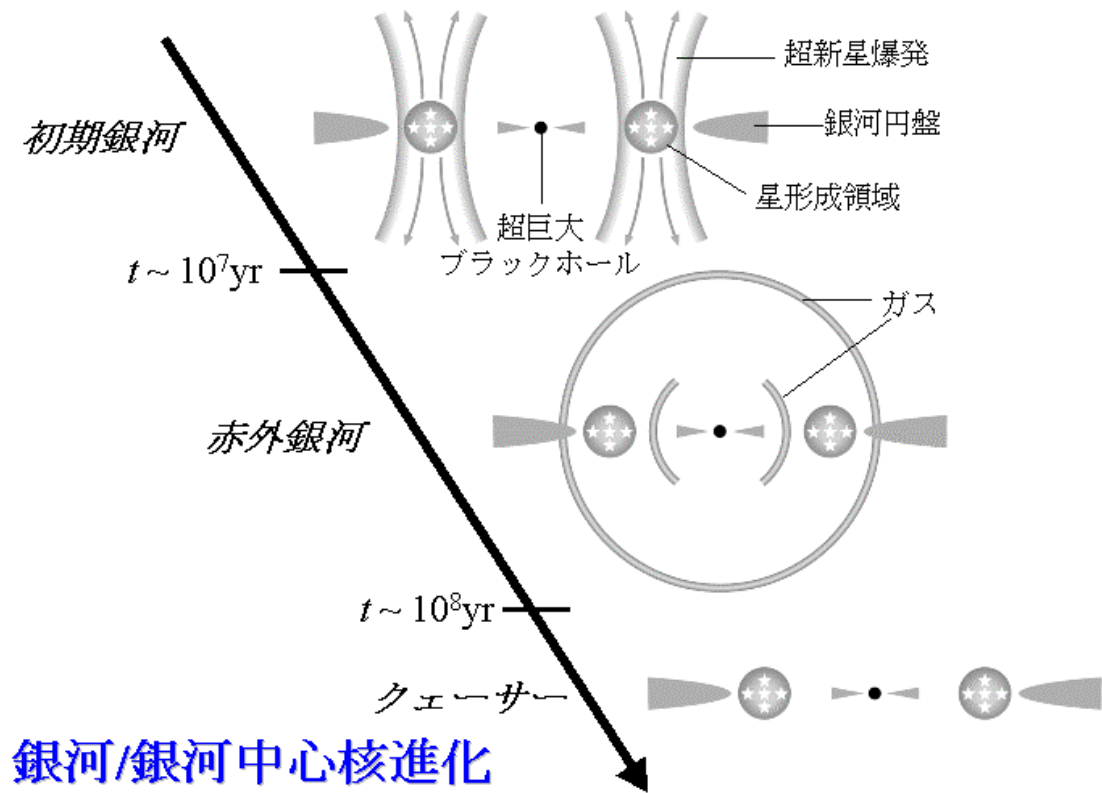


図4：銀河および銀河中心核の宇宙論的進化の概略図。