

宇宙物理理論研究室

ホームページ： <http://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp>

Eメール： hashimoto@phys.kyushu-u.ac.jp

yamaoka@phys.kyushu-u.ac.jp

mami@phys.kyushu-u.ac.jp

ono@phys.kyushu-u.ac.jp

指導教員： 橋本正章、 山岡 均、 町田真美、 小野勝臣

研究内容： 本研究室では星の構造と進化を中心に天体现象の理論的研究を進めているが、宇宙プラズマのシミュレーションや画像解析を中心とした観測的研究も行っている。関連する研究分野は恒星進化および高速回転星の構造、超新星爆発と元素の起源、コンパクト星の状態方程式と構造との関連、非標準ビッグバンモデル、宇宙項の時間依存性、宇宙初期の元素合成などである。前期は主にゼミ形式で宇宙物理学を中心とした基礎的な内容を日本語・英文のテキストを用いて学習する。テキストは数種類用意し、橋本、町田、小野、山岡が分担して担当する。後期は以下の研究テーマのどれかを選び卒業研究を行う。具体的にはコンピュータを使って理論的問題を調べたり、観測画像やアーカイブデータの解析を行う。研究室で毎週行っている院生の発表会には特研究生も参加する。原則として毎日研究室に来ることを希望する。先輩達の修士論文及び博士論文のタイトル一覧はホームページの[修士課程・博士課程の紹介](#)で見れます。

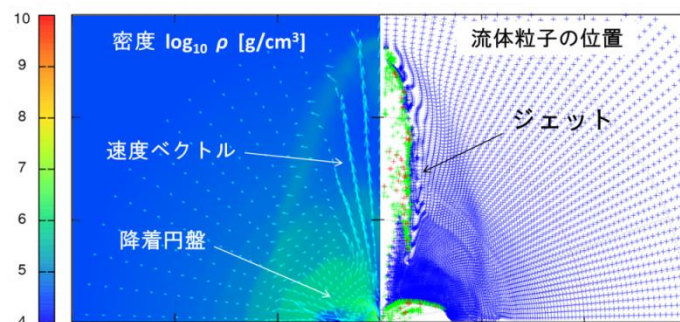
注意： 量子力学Iと統計力学Iの単位取得、一般相対性理論の履修を前提とする。

特別研究のテーマ

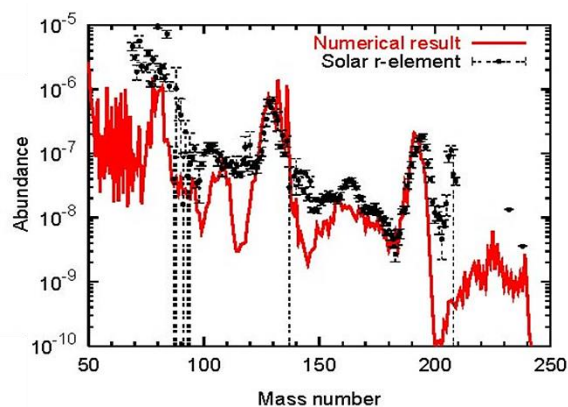
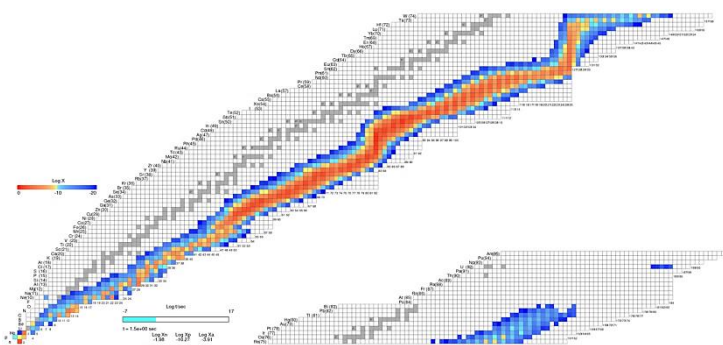
(1) 恒星進化理論、超新星爆発、そして元素の起源：

主系列星から超新星に到る星の進化過程と核融合過程を学ぶ。恒星の運命は恒星の生まれたときの質量によって劇的に変わる。このことが現在どのように理解されているか、どこに問題点が残っているかを理解する。特に恒星の磁場や自転などに注目すると、超新星爆発は、ジェット状の衝撃波になる（下図：爆発中のコア付近での密度分布）。このような非対称爆発モデルの構築と元素合成過程の研究も行っている。次ページの図は超新星爆発に伴う重元素合成の進行状況を核図表（原子核の存在しうる全ての領域）上に示したものである。青から赤色にかけて元素の組成比が元素の存在可能な領域の端（中性子ドリップ線）を通りながら増加していく。このようにして太陽系組成の炭素以上の重元素のほとんどが生成されていくと予想される。

次ページ2つ目の図は元素合成の結果をもとに、太陽系組成比（黒い点）と超新星爆



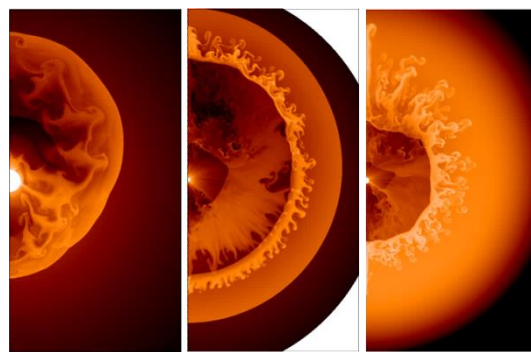
発で生成され放出された元素(赤)の比較である。特にr-元素と呼ばれる重元素は3つのピークを形成し、原子核そのものの研究にも関連が大きい。超新星爆発が有力な起源であるが爆発のメカニズムがはっきりしないため特定できない。この計算は太陽質量の1.3倍の星の重力崩壊とその後の衝撃波の発生と伝搬を数値シミュレーションにより追跡したものである。爆発後、中心部に原始中性子星と呼ばれる超高密度な星が残っているが、この星が(4)で述べる中性子星かブラックホールになるかはまだ分かっていない。



(2) 超新星爆発後の進化 — 物質混合、超新星残骸

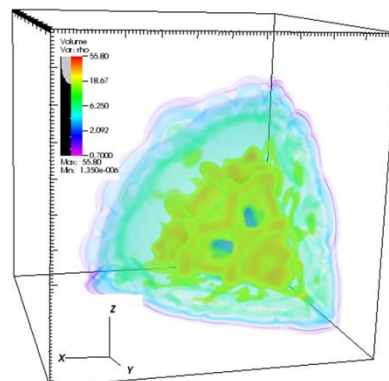
超新星爆発で起こる物質混合

超新星爆発のメカニズムは現在も解明されていない。近年、星の自転、磁場、ニュートリノに起因する対流や流体不安定性などの効果が爆発に本質的であると考えられている。このような非球対称爆発、あるいは超新星衝撃波が星の中を伝搬する過程で起こる流体不安定性は、爆発の元素合成過程で生成した元素分布を著しく変化させ、その後の観測に大きな影響を与える。実際、超新星由来のニュートリノを



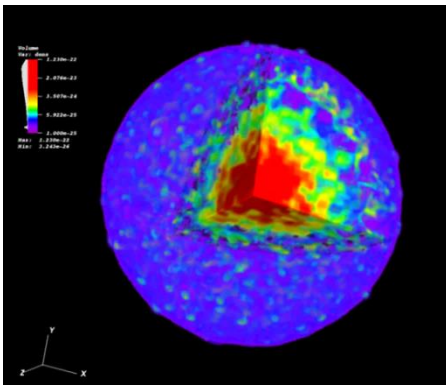
初めてカミオカンデで検出した超新星1987Aの観測から、物質混合の数々の証拠が得られている。しかし、まだ観測を上手く説明できない。この物質混合がどのようなメカニズムで起こるのか、理論の問題点などを、数値実験とその解析を通して理解する。

上図は物質混合の2次元流体計算の結果。右端から順に時間進化を表す。オレンジ色に近いほど密度が高い。フィンガーのような構造は、初期の小さな揺らぎがレイリー・テイラー不安定性により成長したものである。右図は3次元の物質混合の流体計算の結果である。



超新星残骸の進化と宇宙線の加速

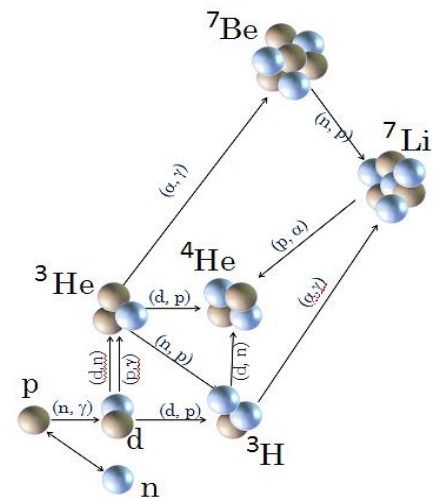
超新星爆発で生じた衝撃波は星間空間を伝搬していき、やがて電波、X線などさまざまな波長の電磁波で輝きだす。この天体は超新星残骸と呼ばれる。超新星残骸は地球に到達する高エネルギー宇宙線 ($\sim 10^{15}$ eV) の加速現場だとも考えられている。超新星残骸の観測から元素の空間分布などの様々な情報が得られる。直接は見る事ができない超新星爆発の手掛かりが得られるかもしれない。しかしながら、その進化には種々の物理過程が複雑に関わるため、観測を理論的に説明することは容易ではない。例えば、超新星爆発の非対称性や流体不安定性による元素分布の非一様性、衝撃波で起こる宇宙線の加速と磁場の増幅の非線形効果などが複雑に絡み合っていることが知られている。数値実験を通して、どのような物理過程が超新星残骸の進化や観測量に影響を与えるか理解する。また、観測を上手く説明する理論モデルの構築、2015年に打ち上げ予定のX線天文衛星ASTRO-Hで期待される観測の予言を試みる。



図は超新星残骸の3次元磁気流体シミュレーションの結果。色は密度。赤い部分で密度が高い。衝撃波の先端（図の球状の構造の端）付近で起こるレイリー・テイラー不安定性によって磁場が増幅されていることが分かった。宇宙線は衝撃波前後の乱れた磁場によって散乱されることで加速されると考えられている。従来考えられていたよりも、効率的な宇宙線の加速が起こっているかもしれない。

(3) 宇宙初期の元素合成

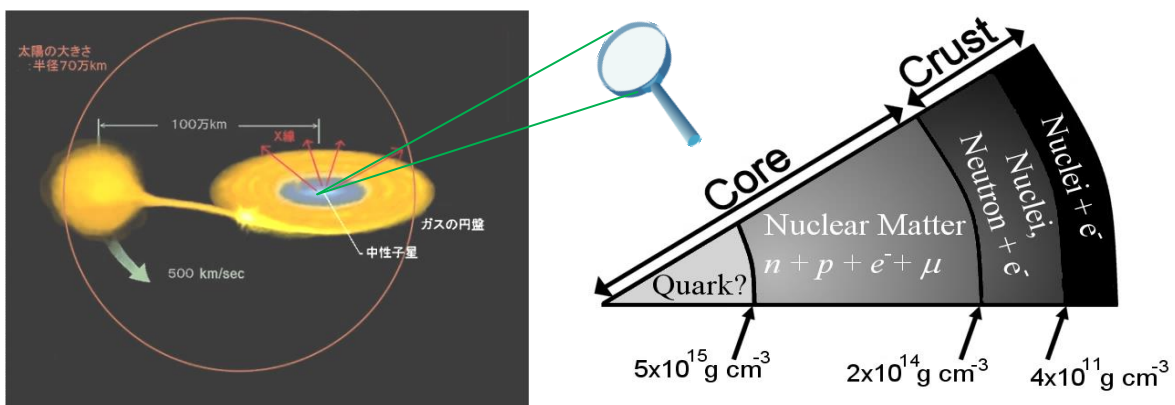
標準ビッグバン理論によれば“宇宙創世はじめの3分間”でH、He、D、Liなどの軽い元素ができ、炭素より重い元素は恒星内部の核融合によりつくられる。これがビッグバン宇宙の根拠の一つとなっている。このことを宇宙論、特に宇宙背景放射の勉強とコンピュータ実験で理解する。近年の観測から示唆されている「宇宙項」に関する研究も行っている。一般相対論を代表とする重力理論の中で、宇宙項を内包するモデルによる宇宙進化を調べ、それが前述のHe、D、Liの観測結果などを説明可能か調べる。最近、観測的に示唆されている軽元素や重元素の異常な値についても考察していく。



(4) 中性子星の構造

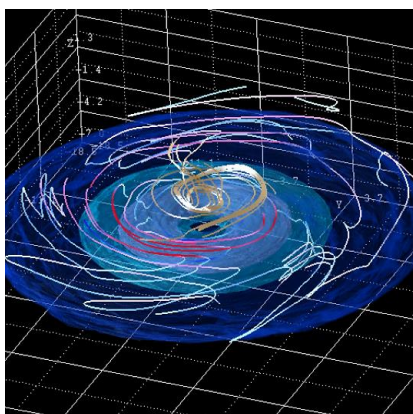
X線連星系の一方の星が高密度星で他方の星が普通の星であるような系をX線星という（次ページ左図はその想像図）。降着円盤は1千万から1億度の高温ガスであり、X線を発生している。特に、片方が中性子星の場合、星表面で核フラッシュという爆発的核

燃焼が起こり、X線を放射する。この現象はX線バーストと呼ばれX線強度が1秒ほどで10倍近く増大し、10秒程度で、元の強度に戻る。X線バーストのシミュレーションを行うことで中性子星の質量・半径を最もよく規定できる。X線の光度は太陽光度の3万倍に及び、ほぼ1時間の間隔で観測されている。一方、スーパーバーストというX線バーストが1時間以上続く現象も観測されているが原因は不明である。おそらく、中性子星内部の熱的性質と関連していると考えられている。下の右図は中性子星の断面図である。外殻はCrustと呼ばれエキゾチックな原子核と電子の存在する領域である。その内部は核子とレプトンからなる核(Core)であるが、ストレンジネスを持ったハイペロンなどの奇妙な素粒子が存在しているかもしれない。あるいは、クォークが中心部にある(hybrid星)かもしれない。



(5) 宇宙における回転プラズマの磁気流体シミュレーション

光さえも逃げ出せないブラックホールが輝くのは、その周りにある降着円盤がX線や電波など様々な光を放出しているためです。降着円盤はブラックホールの周りのみならず、中性子星や生まれたての星(原始星)、渦巻銀河など様々な所に存在する。この降着円盤はブラックホール連星や原始星で観測されるジェットやフレアなど様々な高エネルギー現象の起源であると考えられている。この他、星が生まれる素となる巨大分子雲の形成にも重要な役割を担っていると考えられている。宇宙における様々なフィールドで重要となる降着円盤の性質を理解するために磁気流体シミュレーションを行う。

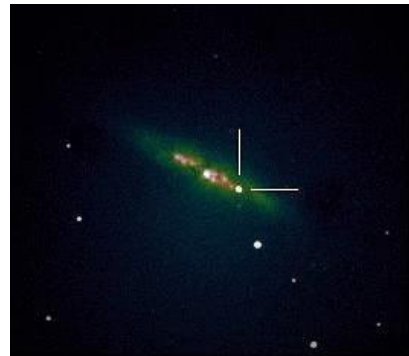


銀河ガス円盤の磁場分布

銀河ガス円盤は降着円盤同様、中心にガスが落ち込むと同時に鉛直方向外向きにジェットを噴出する。青面はガス密度、曲線は磁力線で、色は方位角方向磁場の向きを示し半径によって大局磁場の方向が変化する事を示している。この分布は銀河磁場観測で示唆される分布を再現している。銀河磁場分布を知る事によって、宇宙初期の磁場、銀河形成に与える影響などに迫る事も可能となる。

(6) 天体の観測：

測光・分光観測やアーカイブ資料を用いて、天体の観測方法やその天体の物理的特質について学ぶ。解析の多くはコンピュータ処理であるため、コンピュータの使い方についても理解する必要がある。大学内外の望遠鏡を用いた観測実習も可能。



大学構内で撮影した超新星2014J。

特別研究の概要

毎週1回研究室全体でおこなう発表会には特研究生も参加してもらいます。これにより、研究室の雰囲気、先輩たちの研究内容、研究に取り組む姿勢などが分かると思います。

前期：天文学・天体物理学に必要な知識を身に付けるため、前期は輪講形式で以下のテキストを用いたゼミを行う。

(町田担当)

"Theoretical Astrophysics Volume 1: Astrophysical Processes", T. Padmanabhan, Cambridge University Press, 2000

宇宙物理学で必要となる基本的な物理（相対性理論、電磁気学、統計力学等）の入門的なテキストです。

(山岡担当)

"Introduction to Astronomy and Cosmology", I. Morison, Wiley, 2008, ISBN 978-0-70-03334-0

天文学・天体物理学は非常に広範な対象・手法を持っており、天体の多様な側面を見ることでその天体の性質により迫ることができる。この前期セミナーでは、天体物理学に現われる概念や用語（英語・日本語とも）について総覧し、天文学・天体物理学の基礎知識を得ることを目的とする。このテキストは、美しい天体写真が散りばめられているが解説が不足しているような本からもう一歩進んで、天体現象の原理と概念を記述したものである。惑星等に関する記述部分以外を、担当を定めて輪講する。

後期：原則として毎日研究室に来て与えられた或いは、学生の選んだ研究テーマに取り組む。コンピュータ計算、計算機の運用、計算結果の可視化など適宜、学生のやる気に対応していく。理論的研究テーマ（橋本、町田、小野）としては、(1) - (5) の研究テーマの中から比較的単純な数値計算で行えるもの、数学的解析がしやすい課題などを選ぶ。また、以下に挙げる英文のテキストの中から選んで毎週ゼミを行う（ただし、学生の研究テーマによっては別のテキストに変えることもある）。

山岡担当分予定は、前期セミナーで学習した知識を活用するため実習を行なう。前期セミナーよりももう一步踏み込んだ実際的な知識のレクチャーと、画像解析の手法を学習する。前期の読み残しがあればセミナーも継続して行う。実習結果の発表会を行う予定。対象は、基本的に新星・超新星などの突発天体である。伊都地区にある望遠鏡を用いた卒業研究も可能。

前期・後期ゼミ（小野、橋本担当）

後期のゼミを以下に挙げたテキストの中から選んで行います。また、前期・後期を問わず、学生の希望があれば上記以外のゼミにも対応します。後者は積極的に希望して下さい。

英文のテキスト候補：

- "*Gravitation and Cosmology*", S. Weinberg, John Wiley & Sons, 1972
- "*Cosmology*", M. Rowan-Robinson, Oxford, 2004
- "*Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*", D. D. Clayton, University of Chicago Press, 1983
- "*Stellar Structure and Evolution*", R. Kippenhahn, A. Weigert, and A. Weiss, Springer, 2012
- "*Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars*", A. Maeder, Springer, 2009
- "*Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars - The Physics of Compact Objects*", S. Shapiro and S. A. Teukolsky, Wiley-VCH, 1983
- "*Compact Objects in Astrophysics - White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes*", M. Camenzind, Springer, 2007
- "*Radiative Processes in Astrophysics*", C. B. Rybicki and A. P. Lightman, Wiley-VCH, 2004
- "*Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics - A Practical Introduction*", E. F. Toro, Springer, 2009

日本語のテキスト候補、参考図書：

- 「宇宙流体力学」、坂下志郎、池内了 著、培風館
- 「流体力学の数値計算法」、藤井孝臧 著、東京大学出版会
- 「宇宙物理学」、小玉英雄、井岡邦仁、郡 和範 著、共立出版
- 「現代宇宙論 - 時空と物質の共進化」、松原隆彦 著、東京大学出版会
- 「相対論の世界」、橋本正章、荒井賢三 著、裳華房