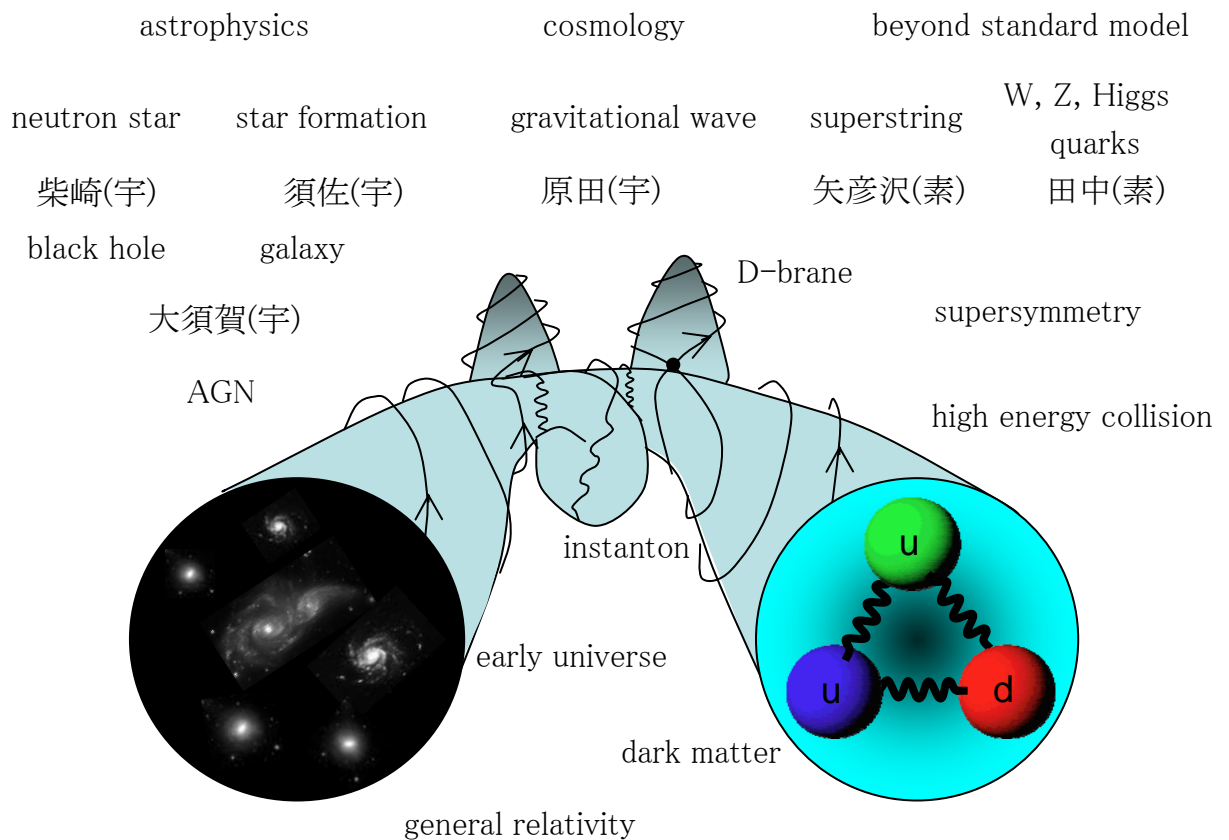


# 理論物理学研究室

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)
$\gamma$ -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  $\gamma$  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、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  $\gamma$  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・ $\gamma$  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。

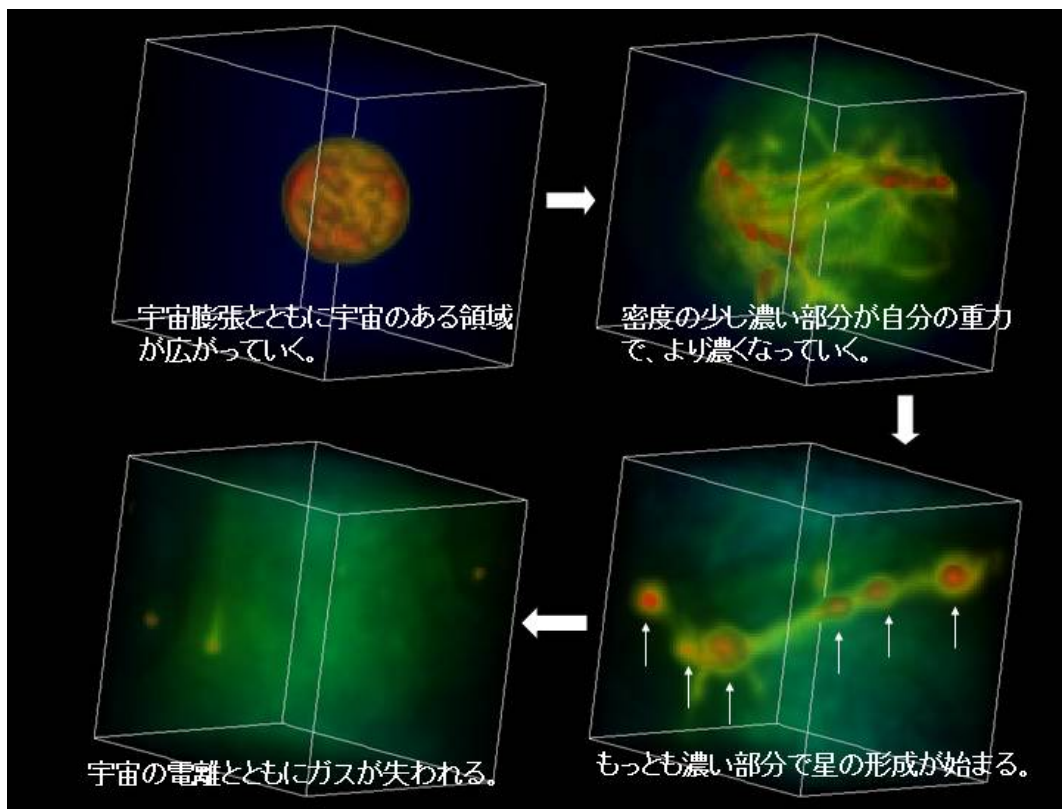
# 原始銀河形成の理論的研究

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

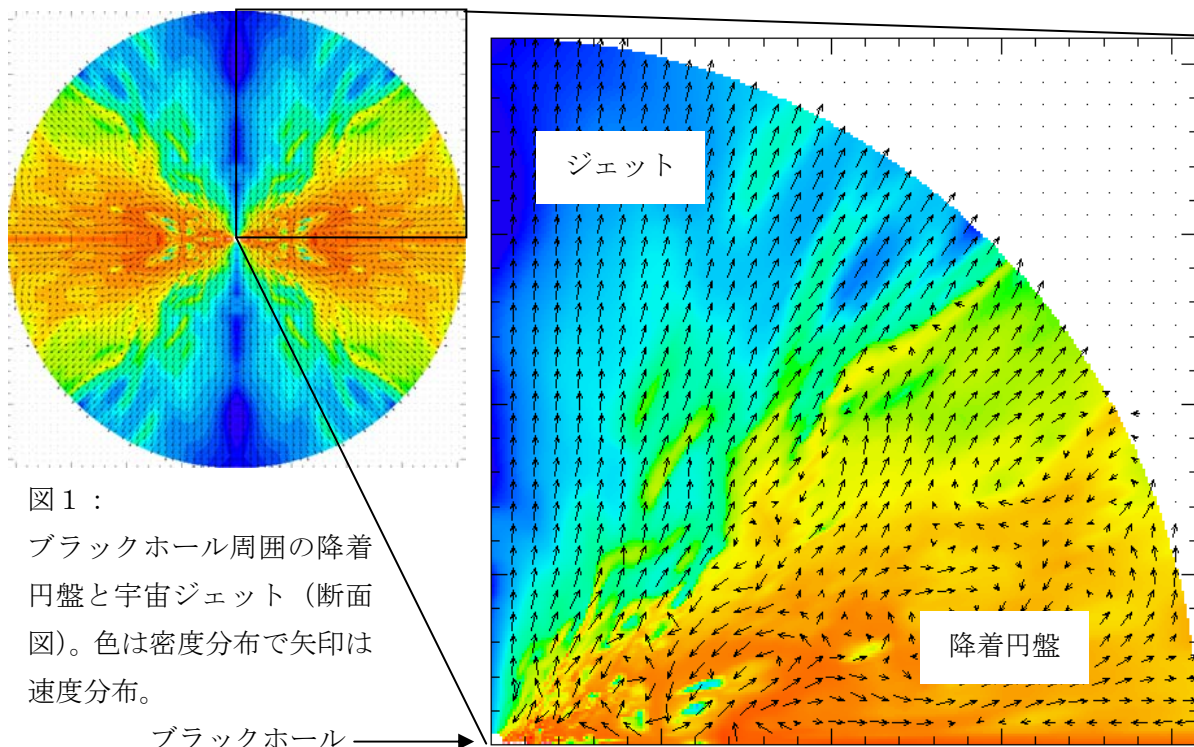
大須賀 健

## 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。

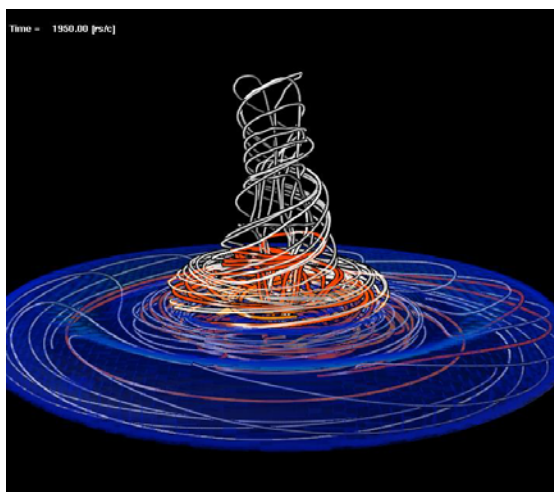
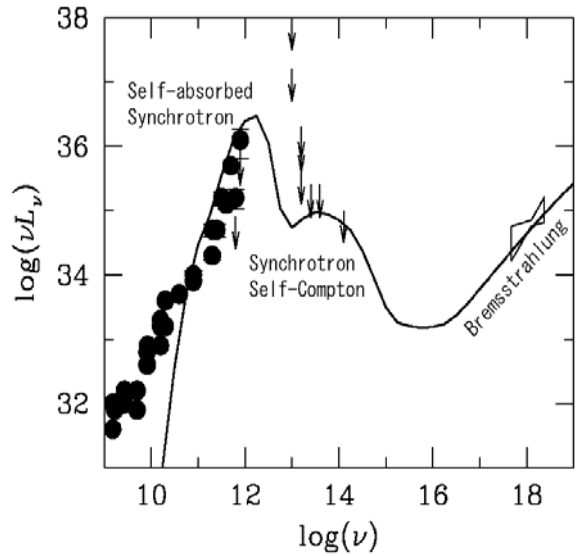


図 2 :  
磁気降着円盤モデル。国立天文台のスーパーコンピュータによる数値シミュレーション[(C)Y.KATO]

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。

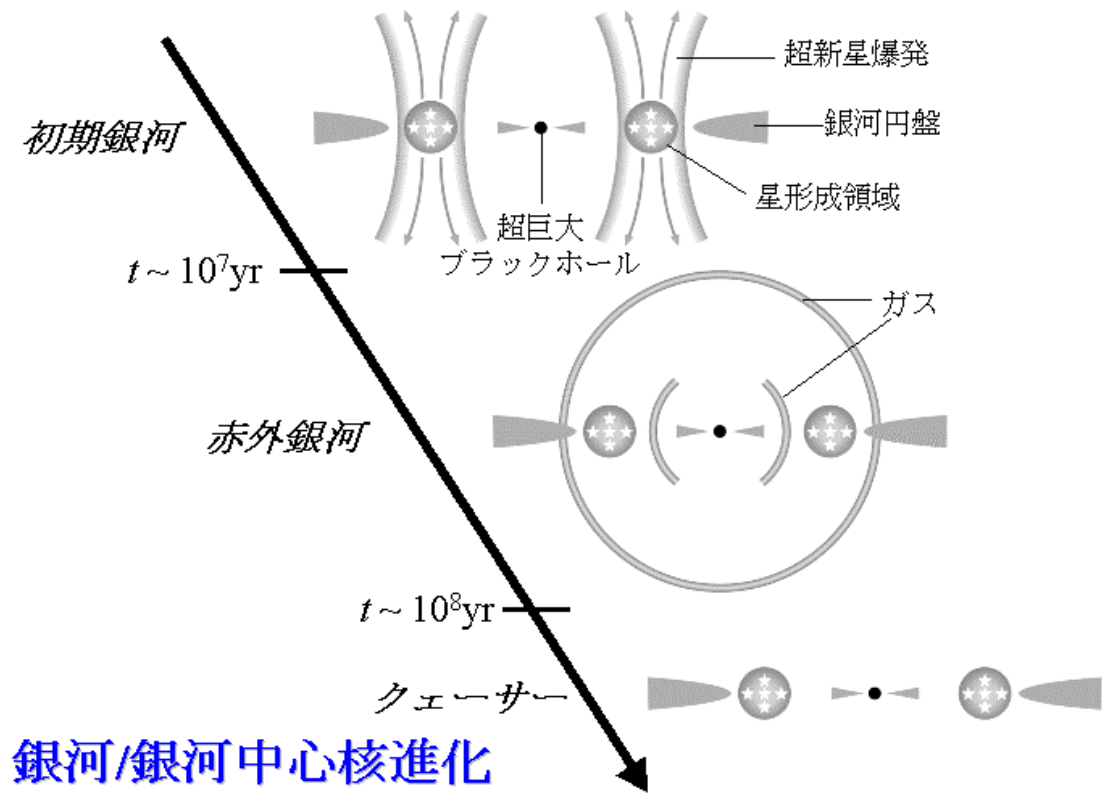


図 4 : 銀河および銀河中心核の宇宙論的進化の概略図。

## 原子核・放射線物理学研究室

### スタッフ

教授 家城和夫、小泉哲夫  
助教授 栗田和好、平山孝人、村田次郎  
客員教員 本林透（理化学研究所）、上野秀樹（理化学研究所）  
実験技術員 村上浩之、須賀一治

### 学生

博士後期課程 梅野泰宏  
博士前期課程 伊藤裕章、加藤春明、川村広和、窪寺隼人、藤田慎也、町田智大  
石井健一、川島基敬、堺 聡史、筒井亮丞、成田圭吾、橋本公瑛、谷内勇仁

### 【研究室の概要】

当研究室では、原子核から原子、クラスター、結晶にいたるマイクロな世界の物理を実験的に研究しています。放射線は原子核・原子の情報をになって放出されるため、その測定は有力な実験手段ですし、放射線そのものの研究も重要となります。大型の実験装置として、Cockcroft-Walton型加速器、重イオン衝突実験装置、微小反応断面積測定装置、ECR型多価イオン源などを備え、またGe(HP)γ線分析器など高性能な測定器も活用しています。

研究領域は、原子物理、原子核物理、放射線物理、放射線計測、表面物理などにまたがっており、各グループは独自の研究テーマをもちつつ協力しています。特に、放射線測定器、計測法、データ処理など共通性の高い課題については共同開発も行っています。また、毎週行っているコロキウムでは、全メンバー参加のもとで活発に討議をしています。これらの研究の遂行にあたっては、物理学科実験技術員の村上が電子回路の設計・製作で、須賀はCockcroft-Walton型加速器の維持管理で貢献をしています。

具体的な研究テーマは以下に詳しく述べますが、扱う現象のエネルギーはmeVから100GeVまでと大きく広がっていますし、α線、β線、γ線、中性子、イオンなど、あらゆる放射線を様々な測定器で測定します。また、高速なデータ処理の研究も行われ、それらを組み合わせた大がかりな実験も行われます。実験研究は、高エネルギー加速器研究機構、岡崎分子科学研究所、東大CNS、理化学研究所、放射線医学総合研究所などの学外の研究施設も利用して行い、近年では海外の研究所での研究もさかんになってきました。国内・外の研究者との共同実験も活発です。



## 不安定原子核の核反応

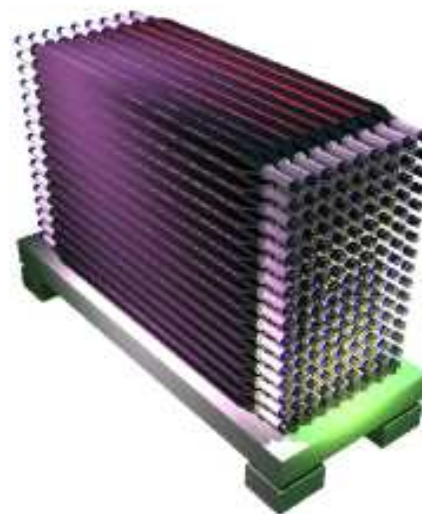
家城 和夫

物質の世界は分子－原子－原子核－核子－クォークという階層性をもっており、それぞれの階層に多様性があります。陽子と中性子の多体系としての原子核は現在では 6000～7000 種類あるとされていますが、そのうち安定なものは 250 種類ほどしかなく、大部分は  $\beta$  崩壊や  $\alpha$  崩壊ですぐに壊れてしまう不安定な原子核です。最近、加速器を用いて人工的に作り出した不安定原子核をビームの形で利用し、壊れるまでの短い時間に他の標的に照射して反応を起こさせその性質を調べるといった手法が確立しています。2006 年には不安定核研究のための強力な実験施設 (RIBF) が理化学研究所で完成の予定であり、原子核物理の一つのフロンティアとして大きな進展が期待されています。我々は不安定原子核ビームを用いたいくつかの実験研究を進めてきています。

### 中性子過剰核の構造

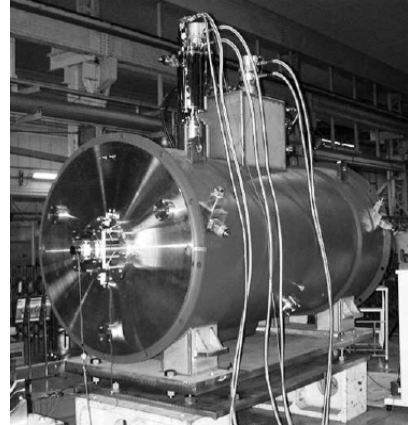
安定な軽い原子核では陽子数と中性子数はほぼ同じです。不安定核のなかには  $^{11}\text{Li}$  のように中性子数(8)が陽子数(3)の倍以上ある原子核があります。このような原子核では中性子が非常に弱く結合しているため中性子だけが核の外側に大きく広がったハロー構造をもつことが知られており、通常の原子核にはない運動状態をもつことが期待されます。それを調べるには原子番号の大きな他の原子核(鉛など)との衝突によりクーロン場で励起して分解させ、中性子(2 個)と残りの核( $^9\text{Li}$ )のエネルギーと方向を測定します。そこから励起状態や  $^{11}\text{Li}$  の構造についての情報が得られます。(これをクーロン分解反応法と呼びます。) 中性子を効率よく測定できる大面積の中性子検出器 (<http://www.nsl.msui.edu/tech/devices/neutronwalls/index.html>) をミシガン州立大(米国)やエトベシュ大(ハンガリー)らのグループと協力してミシガン州立大に建設し、これまでハロー核とされる  $^{11}\text{Li}$ 、 $^6\text{He}$ 、 $^8\text{He}$  などについて研究を行なって中性子 2 個が緩く束縛されている系の振動モードや崩壊様式についての情報を得ました。

2005 年度にはミシガン州立大で新たに建設された大型中性子検出器 MoNA(<http://www.nsl.msui.edu/tech/devices/mona/index.html>、右図)を用いて須合君らと  $^8\text{Li}$  のクーロン分解反応の実験を行い、入射エネルギーについての依存性を詳しく調べました。結果の一部は須合君の修士論文(2005 年度)にまとめられています。2006 年度からは理化学研究所でも東京工業大学のグループと協同して同種の実験を進める予定となっています。





原子核にも原子と同じように殻構造があります。つまり、希ガス原子が安定で不活性であるのと同じように、ある陽子数や中性子数の核ではまわりの核よりも安定性が高くなります。ところが、中性子数が 40 程度の中性子過剰核では安定核でみられる殻構造が変化していることが予想されています。しかし、このような重い中性子過剰核では反応後の粒子を精度よく識別することが難しく、粒子のエネルギー分解能を向上させる必要がありました。そのために連携大学院の青井



助教授や竹下さんらを中心に理化学研究所において TOF スペクトロメータという装置(写真)が開発され、飛行時間と Si 半導体検出器によって測定するエネルギーとを組み合わせることによって大きな立体角で高い質量分解能を得ることができるようになりました。 $^{64}\text{Cr}$  などの不安定核について陽子非弾性散乱の実験を行ない励起状態からの  $\gamma$  線を系統的に測定しました。その結果は竹下さんの博士論文としてまとめられる予定です。

#### ハロー核のアイソバリックアナログ状態

$^6\text{He}$  は中性子ハロー核の一つであり、 $^4\text{He}$  の周りに 2 つのハロー中性子があると考えられています。この核は  $^4\text{He}$  と中性子 1 つ、あるいは中性子同士では安定な結合状態ができないのに 3 体となる  $^4\text{He}$  と 2 つの中性子では結合するという面白い性質をもっています。そこで、ハローの中性子の一つを玉突きのように陽子によってたたきだして置きかえるとどうなるか、という実験を 2003 年度に千葉市の放射線医学総合研究所で行ないました。このような状態をアイソバリックアナログ状態といいます。統計精度が悪いためはまだ確定的な結果は得られていませんが、アイソバリックアナログ状態がある程度できていることがわかり、山口君の修士論文(2004 年度)にまとめました。

#### 元素合成過程

不安定核はそのほとんどが 1 秒以下で壊れてしましますが、宇宙の初期や超新星爆発の際には不安定核は中性子や陽子と反応を起こします。元素合成過程、即ち、現在ある安定な原子核がビッグバン以降にどのようにしてできてきたのかを理解するためにはこのような不安定核を含む核反応の情報が不可欠です。不安定核のクーロン分解反応を利用すると、逆反応を利用してこのような核の反応断面積を求めることができ、いくつかの測定が行われてきました。特に、中性子を吸収して元素合成の反応が起こる過程についてはこれまで実験データがほとんどありませんでしたが、ミシガン州立大学でこれまで  $^8\text{Li}$  や  $^{14}\text{C}$  などの  $(n,\gamma)$  反応について測定し断面積を求めてきました。

## 測定器・データ収集システムの開発

上にも述べたように、不安定核ビームの実験は安定核に比べて強度、純度等の点で不利であり、放出される中性子などのエネルギーや方向を精度よく、かつ効率よく測定する必要があります。これまでも位置検出ができ中性子/ $\gamma$ 線の識別が可能な大型の中性子検出器を作ってきましたが、さらに位置や時間精度の向上をめざしてシンチレーションファイバーを用いた新しいタイプの中性子検出器の開発を続けています。

また、このような検出器からは多数の信号を高速に処理して収集し、オンラインで実時間処理のモニターをすることが必要ですが、これをネットワークで分散処理できるようなシステムの開発なども卒業研究を通じて行なってきました。

# 究極の物質を求めて

栗田和好

## 1. 究極のQCDマシンRHICでの物理

ビッグバン直後の高エネルギー密度状態ではクォークとグルオンはハドロンの閉じ込めから放たれて自由に飛び交っているような状態(QGP)であったという。この新しい究極の物質状態を実験室で作ろうという試みが米国ニューヨーク州にあるブルックヘブン国立研究所のRHIC（リック）プロジェクトである。我々は PHENIX 実験に参加して QGP 生成の可否と陽子スピン構造の解明に力を注いでいる。その目的はハドロンとその間に働く強い相互作用の基礎理論である量子色力学（QCD）を通して宇宙の成り立ちを理解することである。大学院生には米国で生の英語と異文化に接しその中で科学をする態度を学ぶよいチャンスを提供できるものと信じる。

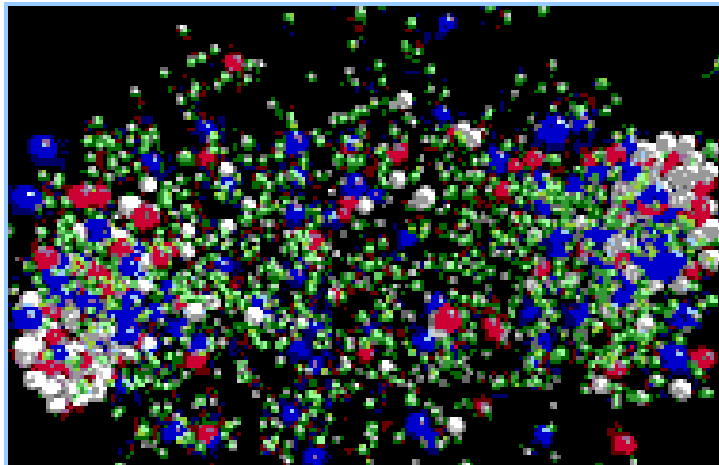


図1：核子あたり 100GeV の金原子核の正面衝突から生成されるおびただしい数の粒子群イメージ

## 2. 安定な原子核からかけ離れた中性子数を持つ不安定原子核の特性を探る RIBFでの物理国内プロジェクト

QGP が冷えていくとクォークとグルオンは多数のハドロンと呼ばれる強い相互作用をする粒子に崩壊していく。このハドロンのうち3つのクォークとそれらをつなぎとめるグルオンでできている粒子群はバリオンと呼ばれる。さらに、このバリオンの主要なメンバーである陽子と中性子が結合してさまざまな元素を形成し現在の宇宙が成り立っていると考えられている。しかし、現在の宇宙に分布する元素の存在比がどのようにして作り出されてきたのかは

完全に理解されてはいない。この元素合成のプロセスをより深く理解するには様々な原子核同士の反応断面積を正確に測定する必要がある。我々は連携大学院を結んでいる理化学研究所の本林グループとともに同研究所の不安定核ビームを用いた反応実験を行っている。理化学研究所は世界でも有数の不安定核ビームを用いた実験が可能な研究所である。これらの実験は世界をリードしておりその実験から数々の博士も誕生している。なお、理化学研究所の地理的な好条件から学部4年生の実験参加も可能である。

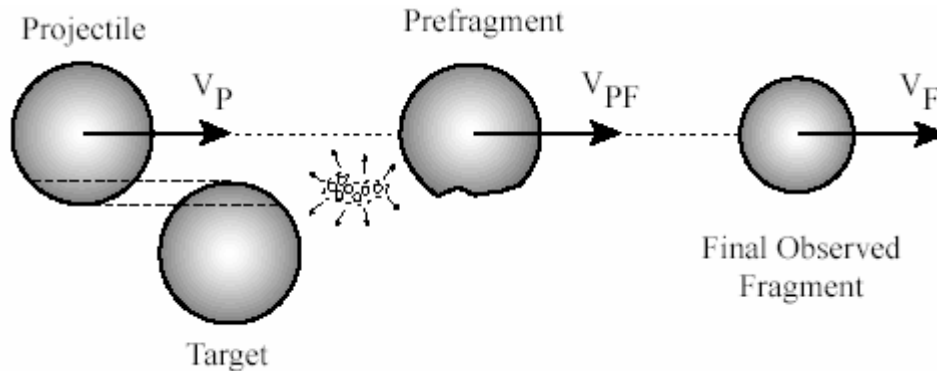


図2：原子核反応を用いて安定原子核からかけ離れた中性子数を持つ不安定原子核ビームを作るイメージ。

### 3. 不安定核の大きさを測る SCRIT 実験

原子核の大きさを知るには理論的な不確定性のない電子散乱を用いるのが常套手段であるが不安定核については固定標的を作ることができないために適用されたことは無い。そこで考えだされたのが電子蓄積リング中にイオンをトラップして浮遊固定ターゲットとして電子散乱を行うという手法 (**Self Confining Radioactive Ion Target**) である。そのプロトタイプはすでに製作され京都大学化学研究所の電子蓄積リング **KSR** に設置されている。2004年9月のテストですでにイオンがトラップされていることが確認され、現在は将来の電子散乱実験に必要な検出器の開発に重心が移っているところである。

理化学研究所の共同研究者たちは **SCRIT** と散乱電子の検出器を担当しているが、我々は電子の反対側にはじき出される非常に運動エネルギーの低い ( $50\text{keV} \sim 1\text{MeV}$ ) 反跳核検出器の開発を担当している。世界で初めて不安定核の電子散乱を測定する大きなチャンスであるが技術的な問題も山積している。若い皆さんのアイディアとパワーをぶつけるには絶好のテーマであろう。

#### 4. その他

現在日本の原子核分野では理化学研究所の RIBF 計画と K E K + 原研の統合計画である J-PARC の二つの大きな加速器（一台数百億円もする）が建設中である。 J-PARC での実験を見据えた準備ももうそろそろ始めようと考えている。 その一つの可能性が偏極ガスジェットターゲットである。

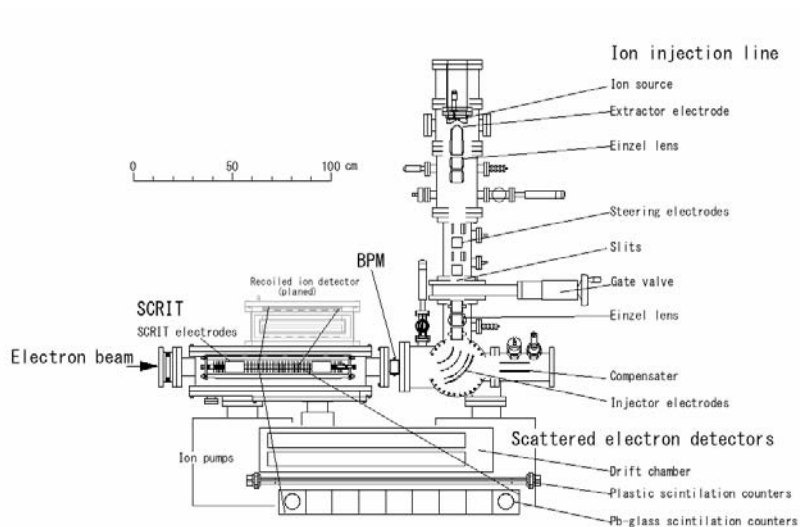


図 3 : KSR のテスト実験用セットアップ。図中の反跳核検出器は現在開発中。

教育面においては前期に物理計測論と原子核・放射線物理学講究 1、後期に物理入門ゼミナールを担当しており物理実験の根本となる物理的理解と実験にすぐに役立つ知識、測定器をブラックボックスではなく動作原理を理解して使えるようになることを目標に講義をしている。3年実験、特別実験では現在行っている実験研究に使用する検出器の開発を主たるテーマとしている。これらの開発は上述した世界第一線の実験に直接応用できるものを目指す。また、検出器性能の理解のためにコンピューターシミュレーションも行う。

## 大学生、大学院生へのメッセージ

物理学は自然の普遍的な真実を理解する学問であるためその進歩は実験を行いその結果とあわない理論を淘汰していくことによって正しい理論にたどり着くという過程を積み重ねていくことによってなされる。 よって、実験物理学者には実験の物理的な意義をよく理解することとそのような議論に足るだけの信頼できるデータを提供していける実験技術と伝達能力が要求される。 我々の研究室の基本的考えは学部時代には専門分野に移る前に物理の基礎をしっかりと学ぶこと。 大学院の前期課程では実験の原理の理解とその技術力を磨くこと。 博士課程後期課程では実際に実験を行いデータから普遍的な真実を引き出しそれを学術雑誌に投稿して正確に世界に伝えることを目標とする。

伝達の部分では全世界の科学者とのコミュニケーションが必須であり世界の共通言語としての役割を果たしている英語の習得は特に大切である。 語学の習得は若いうちほど効率がよいので早い時期から英語力をつける努力をすることを勧める。

# ベータ崩壊による標準模型の精密検証、近距離重力の実験研究

村田次郎

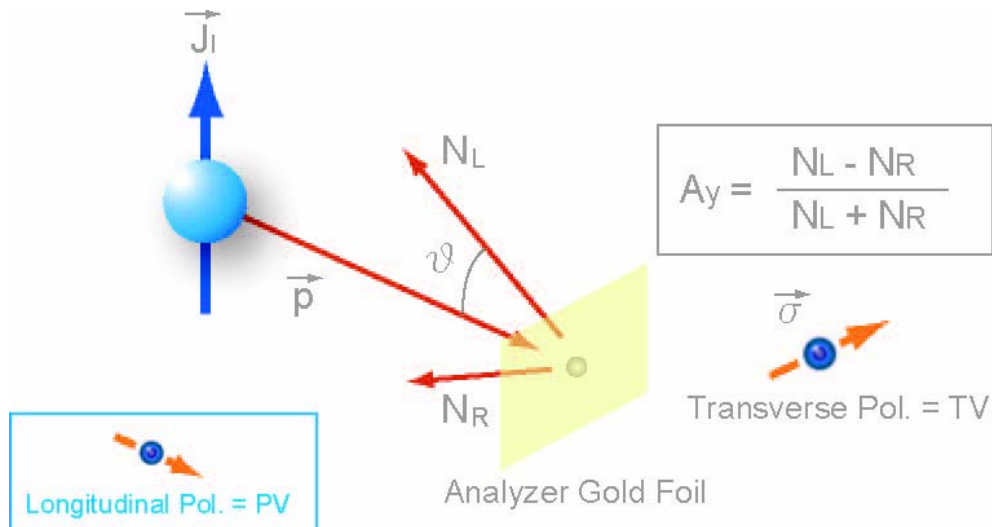
大学院生 M2 川村広和, M1 成田圭吾, 筒井亮丞

卒研究生 末廣徹, 豊田健司, 下山拓也, 佐藤俊昭, 矢澤和正

原子核崩壊を利用した低エネルギーでの超精密実験による素粒子の基本相互作用の研究を行っています。加速器で作り出した不安定な原子核のベータ崩壊の精密観測を通して、右巻きゲージボゾンや時間反転対称性の破れなどの素粒子標準理論を超える現象の発見を目指しています。また、ニュートンの万有引力の法則をミリメートル以下のスケールで精密検証する事で、我々の4次元時空を超える、高次元の世界の存在を検証しようという加速器を用いない実験研究も進めています。

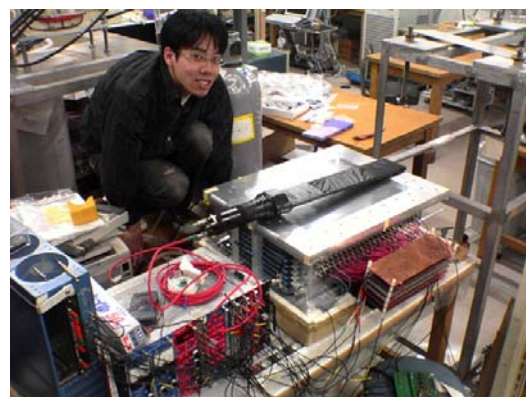
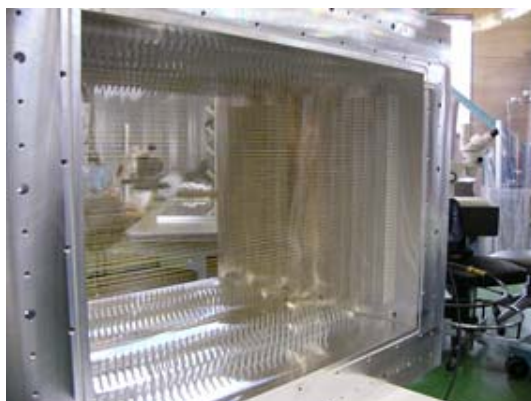
## 1. 弱い相互作用の精密観測実験（川村広和, 成田圭吾, 末廣徹, 豊田健司, 下山拓也）

素粒子標準理論の確立から20年以上の年月が経過しました。その後の大統一理論、超対称性理論や超弦理論など素粒子論の発展の一方で、実験は超巨大加速器を建設しその猛烈な攻撃にも関わらず今だ標準理論から先の物理を発見出来ずにいます。本研究室では比較的小規模実験を行う事で超標準理論物理の発見を目指しています。現在建設が進められているヨーロッパのLHCに代表される超高エネルギー衝突型加速器による巨大実験は正攻法と考えると、我々のアプローチはゲリラ戦法です。高エネルギー実験はエネルギーをより大きく与える事で「シグナル」を増幅する方法だと言えますが、シグナルを発見出来るか否かはバックグラウンド現象との区別が出来るかどうかだけにかかっています。そこで巨大加速器を用いずとも、わずかなシグナルを非常に精密な測定をする事でバックグラウンドから抽出しようと、中性子や原子核の崩壊の超精密観測を目指しています。



自然界に存在する原子核はその多くが安定ですが、加速器などで人工的に作り出した原子核はより安定な原子核に壊変します。その崩壊様式のうち、ベータ崩壊は標準理論の弱い相互作用で非常に精密に記述され、構造をもたない素粒子である電子を放出する為、精密な弱い相互作用の研究を行うのに適しています。例えば、標準理論では時間の向きを反転させても物理法則は変わらない、「時間反転対称性」がほぼ成立していますが、原子核のベータ崩壊を利用するとこの対称性を検証する事が出来ます。スピン偏極した原子核の崩壊を考えましょう。ベータ崩壊では電子とニュートリノ、及び壊変後の娘核が生成されます。偏極ベクトルと運動量ベクトルの外積と内積で組まれるある量は、時間反転を行うと符号を逆転させる事から、偏極核から放出される電子は横方向に偏極してはならない、というのが時間反転対称性の要求となります。この横方向偏極は実験で測定可能な量である為、例えば崩壊確率がこの量に依存するかどうかを調べる事で、時間反転対称性を検証する事が出来ます。

下図は、ベータ線の 3 次元飛跡検出器である、ドリフトチェンバーです。卒研究生が読み出し回路や飛跡再構成のプログラム開発を行いました。現在、M2 の川村君がこのドリフトチェンバーを世界で初めて、電子の横方向偏極度計として動作させるための開発を進めています。横方向偏極度を測定するには Mott 散乱を利用します。2006 年度は卒業研究としてこの Mott 散乱の研究自身も進めています。また、検出器の開発と平行して時間反転対称性の破れの実験を遂行する為、傾斜薄膜法という手法を用いて、偏極した  $^8\text{Li}$  核を大量に生成する装置を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の加速器施設に共同で開発するプロジェクトも進めていく予定です。





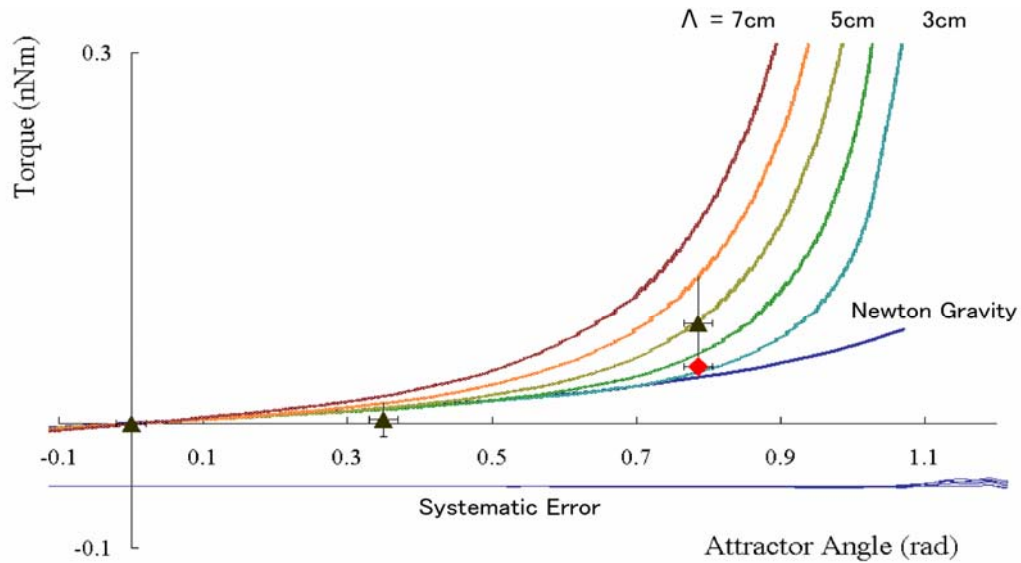
## 2. 近距離重力の実験的検証、我々の4次元を超える余剰次元の探索

(筒井亮丞, 佐藤俊昭, 矢澤和正, 大森健宏)

超対称性理論や超弦理論は世界が10次元や11次元であると预言しています。一方で素粒子の反応から熱力学まで、我々の知っている全ての現象は厳密に3次元空間を支持しています。しかし、盲点がありました。重力は他の3つの力に比べてあまりに弱く、素粒子のスケールはおろか実験室の大きさでもその基本である万有引力の法則は検証されていません。しかも重力だけは他の力と違って我々の4次元時空に束縛されずに自由に高次元時空全体を伝播する事が出来、その為に見かけの力の大きさが小さくなっているというシナリオがあり、万有引力の法則の検証により高次元の証拠が見つかる可能性が指摘されているのです。驚くべきことに、そのズレはミクロのスケールではなく、ミリメートル近辺で既に生じている可能性があります。

そこで、ミリメートルスケールでの重力の法則の検証をする、とてもわかりやすい実験を進めています。物体間の重力による、例えば振り子の変位を顕微鏡で観測する事で行います。簡単な顕微鏡を用いても、振り子のワイヤーの位置は特殊な統計画像処理を行う事でピコメータの精度で決めることが可能になる事が我々の研究でわかりました。この技術は特許を取得しています。我々は高精度の振り子の製作、統計的画像処理技術の開発により万有引力の法則を限界まで小さいスケールで検証する研究をゼロからスタートさせ、ノイズの中から重力によるシグナルを確認出来る所までこぎつけました。3年目にあたる2005年度には重力の逆2乗則の定量的な検証を行う事について成功しました。下図はその結果です。得られた結果は、もし余剰次元が存在するとしても、その方向の大きさは6cm以上ではありえない、という上限値をつける事に成功した事を示しています。

ある理論のモデルではNewtonの法則からのズレが1mmあたりから始まる可能性を指摘しており、今後はさらに高精度化を進めてより近距離での重力の逆二乗則の検証を進めて行く予定です。このプロジェクトは卒業研究としてスタートしましたが、2006年度からは大学院生の研究としても本格的に進めています。



以上の様なテーマを柱にして、活動しています。以下は、これまでの卒研のテーマです。

2003 年度 「実験室スケールでの万有引力の法則の検証」

「位置検出型低エネルギーイオン検出器の開発」

2004 年度 「ねじれ秤による近距離重力の検証」

「ドリフトチェンバーの3次元トラッキングシステムの構築」

2005 年度 「センチメートルスケールでの重力の検証」

「飛跡検出器等のための多チャンネル読み出しシステムの構築」

「面白いことは何でもやる」をキーワードに、いつも新しいアイデアを探しています。何かを実際に実験でやってやろう！という気構えの学生が、我々の部屋に入ってきて一緒に頑張ってくれることを期待しています。

研究室の URL: <http://www.rikkyo.ac.jp/~jiro/>

連絡先など: [jiro@rikkyo.ac.jp](mailto:jiro@rikkyo.ac.jp)



DoCoMo



au / vodafone

# 低エネルギー原子衝突実験

小泉哲夫

(M2 : 伊藤裕章、M1 : 橋本公瑛)

我々の世界は原子分子からできている。世の中で起こる様々な現象もミクロにみれば、原子や分子がお互いに接近してきて相互作用を起こすということの積み重ねである。この様な一つ一つの原子分子の”衝突”過程を素過程というが、原子衝突の研究とは素過程を通して世の中で起こっていることを理解しようとするものといえるだろう。原子衝突の研究で取り扱う衝突エネルギーは上は数MeVから、下は熱エネルギー領域までと非常に広い範囲にわたっている。対象となる粒子も、電子・光子・原子・分子・それらのイオンと多彩である。これらの粒子が衝突すると相手から電子を奪ってしまうとか、相手とくっついてしまうとか、実に様々な現象が起こる。これは我々の世界の多様性を反映しているのだが、この多様性が原子衝突研究の魅力の一つである。さらに原子衝突の研究成果は広い分野に応用されている。宇宙空間での分子形成、核融合プラズマ、レーザー発振、化学反応、生体への放射線作用などの分野で原子衝突のデータが必要とされている。我々はその中でも低エネルギー領域(数十meV~数keV)でのイオンと原子・分子・クラスターとの衝突過程に興味を持って実験を行っている。低エネルギー原子衝突の実験は比較的小型の装置で行えるものが多い。そのため、学部4年や修士課程の学生でも、実験の全体を把握でき、中心になって実験を進めることが可能である。研究に興味のある方の参加を期待している。以下に我々の研究室で行われている研究を紹介する。

## 1) イオンと原子・分子の衝突過程

### 1-1) 多価イオンと原子分子の衝突

中性原子から電子を多数取った多価イオンはクーロンエネルギーとして大きな内部エネルギーを持っている。そのため多価イオンが原子・分子に衝突すると、たとえ衝突エネルギーが低くても標的原子・分子に大きな影響をあたえる。我々はハイテクリサーチセンタープロジェクトで導入した多価イオンビームラインを用いて、多価イオンと原子・分子の衝突過程の実験を行っている。高い内部エネルギーの影響が顕著に出るとされる低エネルギー領域(数keV以下)での測定を中心とする。昨年度は多価イオンと分子が衝突したときに生成される分子多価イオンを研究するための測定装置の開発を行った。多価イオンと標的原子が

衝突すると、電荷移行や標的の電離がおこり標的原子が電離されるだけでなく、入射イオンの価数も変化する。衝突過程を詳細に理解するために、入射イオンが荷電変換したイオンと標的原子が電離してできた生成イオンを同時計測できる計測システムを開発し予備測定を行った。この装置では、イオンエネルギー損失分光法により、電子捕獲したイオンの電子状態を同定し、同時計測法により生成イオンも検出することで電荷移行反応機構の解明を目指している。

### 1-2) 二電子移行分光法

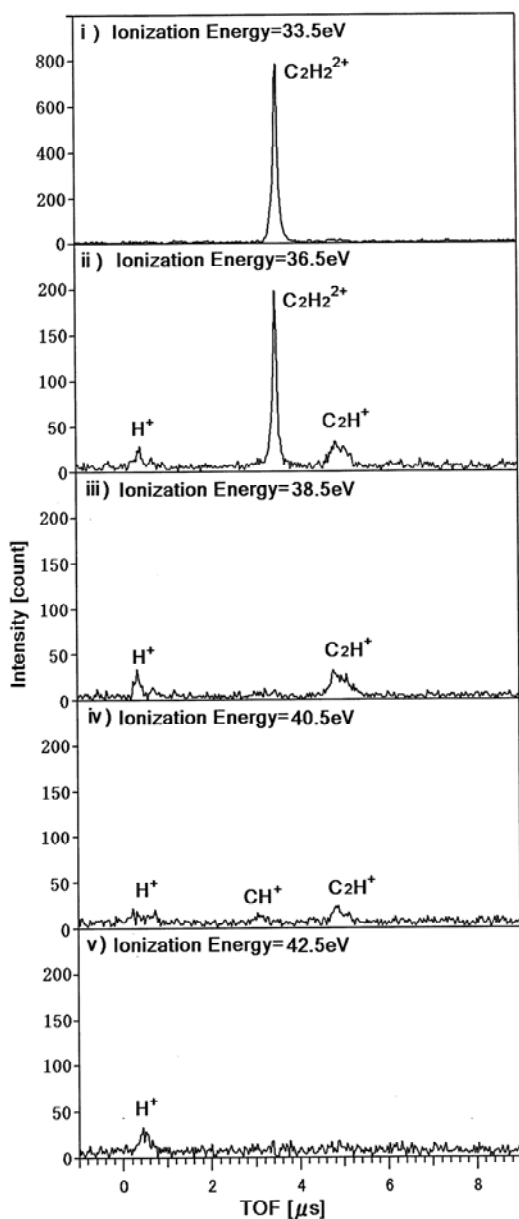
分子の2価イオンに関する情報をえるため二電子移行分光法を用いた測定を行っている。これは入射H<sup>+</sup>イオンを標的分子に衝突させ、2電子移

行で生成したH<sup>+</sup>イオンの運動エネルギーを精密に測定することによって2価分子イオンの電子状態を知ることができる。この方法を用いてNOやO<sub>2</sub>分子の2価イオンの電子状態について知見を得た。さらに装置を改良し分子2価イオンが解離してできるイオンとH-イオンとの同時計測を計画している。これにより分子2価イオンの始状態を指定した解離過程の解明が可能となる。

我々はアセチレン分子標的で同時計測を行い、アセチレン2価イオンの初期状態を指定した解離

図1. 同時計測による生成イオンスペクトル過程の解明に成功した。

測定結果を図1に示す。図中の“Ionization Energy”はアセチレン2価分子イオンの内部エネルギーに相当する。H<sup>+</sup>イオンのエネルギー分析によりこの状態を特定し、同時計測によりアセチレン分子からの生成イオンを分析したスペクトルである。図に見る通り初期アセチレン2価分子イオンの状態により解離過程が異なることが明瞭に示されている。



## 2) クラスタイオンの衝突過程

孤立原子分子が無数に集まって液体・固体になることはよく知られている。では何個ぐらいの原子分子が集まると孤立状態と違って液体・固体としての性質を示すようになるだろうか。これはたいへん面白い問題である。原子分子が数個から数百個結合してできる分子はクラスター分子と呼ばれ、孤立原子と液体・固体の中間の物質として注目を集めている。うまく条件を設定してやるとクラスター分子をたくさん作ることができる。このような条件では普通では結合しない希ガス原子でも結合しはじめ、He原子が10個も結合した分子などが見つかる。我々はクラスターイオンを大量に造るクラスターイオン源の開発を行い、クラスターイオンと原子分子との衝突解離過程を通してクラスターの性質を実験的に研究している。クラスターイオンの衝突解離断面積から、クラスターの構造、クラスターの反応機構などの解明を目指している。

## 3) 低エネルギー領域のイオン分子反応

最近、宇宙空間にかなり大きな分子が存在することが分かってきた。これらの分子の生成過程と

してイオン分子反応が重要だと言われている。また宇宙初期の星の形成過程においてもイオン分子反応断面積の知識が必要とされている、星間雲の温度は 10–100 K (1–10meV) と言われているから、このようなエネルギー領域でのイオン分子反応断面積の測定が重要になる。ところが低エネルギー領域の実験というのはそれほど簡単ではない。それは低エネルギービームには空間電荷効果という原理的制約があるため作るのが大変難しいためである。そのためいろいろな実験手法が工夫されている。移動管法はその一つで、冷却した気体の中にイオンを打ち込み気体分子との衝突で低エネルギーになったイオンを用いて実験を行う。我々は衝突エネルギー1eV 以下の領域（特に 10meV 程度の領域）でのイオン分子反応断面積をこの移動管法を用いて測定している。

移動管で断面積測定を行うには、同時にイオン移動度という物理量を測定しなくてはならない。イオン移動度は気体中でのイオンの動きやすさを表す量で、イオンと気体原子の相互作用ポテンシャルに敏感な物理量である。2005 年度の卒業研究では酸素原子イオンの励起状態の移動度の測定を行った。

現在はカイラル分子の鏡像異性体をイオンの移動度で識別することを目指し、装置を改造中である。カイラル分子の識別は生体反応などでは重要で、移動度を用いて行うのは我々独自のユニークな手法である。

#### **4) 光子を用いた原子分子の電離過程**

ある程度のエネルギーを持ったイオンや光子が原子分子と衝突すると相手の電子をはぎ取る電離がおこる。単色の光を入射粒子とした場合には、原子の特定の準位にある電子を選択的に電離でき

るので、電離機構解明には好都合である。このような測定は、シンクロトロン放射光を利用することによって可能となった。我々は、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーや姫路にある放射光施設 SPring-8 で、光子による原子分子の電離の研究を行っている。最近は、ほとんど測定例がない金属原子のK殻光吸収による原子の多重電離過程の研究を行っている。今年度導入予定のレーザープラズマ光源を用いれば立教大学においてこのような測定が可能となる。

#### **5) 放射線検出器の基礎的研究**

原子衝突実験や原子核実験を行うには高性能の検出器は必要不可欠なものである。我々の研究室ではその検出器の基礎的な性質の測定を行い、実験への応用や新しい検出器開発を目指している。

そのひとつとして低エネルギー粒子検出によく使用される二次電子増倍管の検出効率測定をおこなった。この測定は断面積の絶対値測定には不可欠なものである。もうひとつは日立化成工業との共同研究で「放射線検出器及び検出器素子に関する基礎的研究」を行っている（実験技術員村上氏との共同研究）。ここでは主に固体シンチレータの評価や物性に関する基礎的研究を行い、新しいシンチレータの開発を推進している。

# 希ガス固体および希ガスクラスタにおける 電子的励起および崩壊過程の実験的研究

平山孝人\*

## 1 はじめに

私は以前からさまざまな様態の「希ガス」を対象とした研究を行ってきた。希ガス原子は「不活性ガス」と呼ばれることが示す通り、それ自身単体で安定に存在する単原子分子である。希ガス原子中の電子は許されている全ての軌道を占めていて、他の原子などと結合するための余っている手（結合手）を持たず、原子や固体といった全く違う様態でもその電子的性質はかなり似通っている事が知られている。そのため、原子数が最小の極限である孤立した原子、および最大の極限である固体、またその中間であるクラスターという3つの状態を「電子的励起過程」という一つのキーワードで統一的に理解することが可能であると考えている。

私の研究室では、希ガスクラスタ・固体の二つの相について「電子的励起過程」がどのように起こるのか、また励起状態がどのように移り変わっていくのかを明らかにするための実験的研究を行っている。

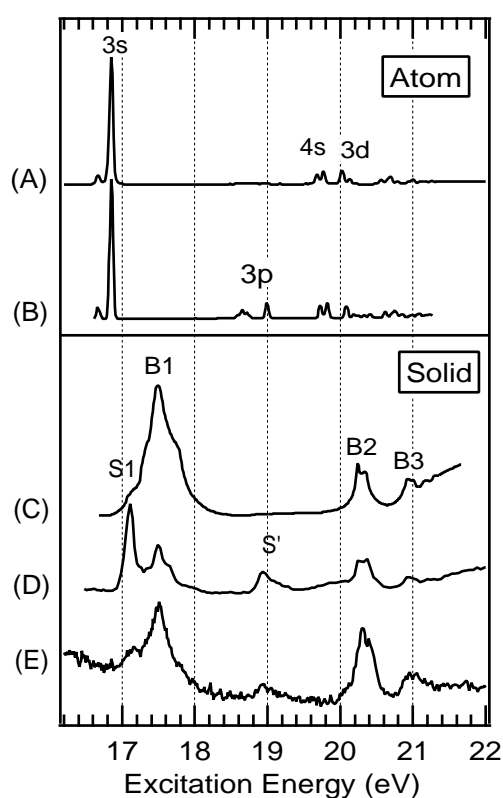


図 1: Ne を標的とした電子的励起状態の生成スペクトル。(A) Ne 原子の光励起。(B) Ne 原子の電子励起。(C) Ne 固体の光励起。(D) 光励起による Ne 固体表面からの励起原子脱離収率。(E) 光励起による Ne 固体表面からの全脱離収率。(D) と (E) の結果のみ私の研究結果である。

## 2 希ガス原子

希ガス原子に電子や光などを衝突させることにより、電子的な状態を変化させることができる。例として、Ne の場合の電子的励起状態の生成スペクトルを図 1 に示す。スペクトル (A) と (B) は Ne 原子を標的とした場合である。例えば 2p 軌道の電子を 3s 軌道に励起して  $2p^5 3s$  状態の原子を作るのに必要なエネルギーは、約 16.8eV であることがこの結果から解る。ま

\*hirayama@rikkyo.ac.jp, <http://www.rikkyo.ac.jp/~hirayama/>

た、ピークの高さがその励起状態の生成しやすさに対応する。光子で励起した場合 (A) と電子で励起した場合 (B) のスペクトルは良く似てはいるが、例えばスペクトル (B) で 18.6 – 19.0 eV に現れる  $2p^5 3p$  状態のピークは (A) には観測されていない。これは量子力学的な角運動量保存則である「選択規則」により、 $2p^5 3p$  状態は光衝撃では生成できないためである。

希ガス原子を標的とした実験は古くからいろいろな手法を用いて行われ、また理論的にも数多くの研究例があるため、原子の電子的励起状態はかなり良く解ってきている。後述する希ガス固体と希ガスクラスターの研究を行うにあたっては、原子で得られている情報が役に立つことが多い。

### 3 希ガス固体

前述した通り、希ガス原子は結合手を持たないために通常的环境下では他の原子と結合せず、結合エネルギーが非常に小さい。Ne, Ar, Kr, Xe 固体の結合エネルギーはそれぞれ 0.02eV, 0.08eV, 0.12eV, 0.17eV であり他の物質（例えば鉄：4.3 eV, 塩：7.9 eV）と比べて極端に小さいため、固体（氷）を作るためには極低温にする必要がある。固体を作るために必要な温度は、Ne の場合は 7K 程度以下、Xe の場合は 50K 程度である。

Ne 固体を標的とした場合の電子的励起状態の生成スペクトルを図 1(C) に示す。原子を標的とした場合とはピークの位置・太さが大きく異なっていることがわかる。しかし、その違いを詳しく調べてみると、原子の場合に観測されているピークが全て少しずつ高エネルギー側にずれ、かつ太さが太くなっていると考えようまく説明ができることが知られている。希ガス原子は安定であり周囲の粒子と反応を起こさないため、原子の場合でも固体の場合でも（多少の違いはあるが）電子的励起に関してはほぼ同様の過程が起きていると考えて良く、このことは、さまざまな状態の希ガスを研究するうえでの利点の一つとなっている。

Ne 固体中に Ne 原子の最外殻電子を一つ励起してできる  $1s^2 2s^2 2p^5 3s$  状態を生成した場合について考えてみる。この励起状態は約  $10^{-8}$  秒程度の寿命を持ち、その後光を放出して基底状態 ( $1s^2 2s^2 2p^6$ ) に落ちる。孤立した原子の場合にはその時間内に他の原子と出会う確率は非常に低いですが、固体のようにすぐそば（固体 Ne の場合は隣の原子との距離は 0.32nm）に原子が存在するような環境では、 $10^{-8}$  秒という時間でも相互作用を起こすには十分な時間である。 $1s^2 2s^2 2p^5 3s$  という励起状態は、 $1s^2 2s^2 2p^5$  という状態の正イオンの外側に電子が 1 個存在している状態であり、アルカリ金属である Na 原子（電子配置： $1s^2 2s^2 2p^6 3s$ ）と似た状態になる。また、電子を一つはぎ取った（電離した）場合（電子配置： $1s^2 2s^2 2p^5$ ）は、ハロゲン元素である F 原子と同じ電子配置である。アルカリ金属元素もハロゲン元素も非常に反応性が高いことが知られている。すなわち、基底状態では「おとなしい」希ガス原子も、励起状態やイオンになった途端に非常に反応性が高くなり、周囲の原子と様々な反応を起こす。孤立した原子を標的として実験を行った場合とは違い、固体を標的とした場合にはこのような励起原子と周囲との相互作用を効率的に観測することが可能となる。

図 1 のスペクトル (D) と (E) は、それぞれ固体 Ne を光で励起した時に脱離する励起原子と全原子の脱離強度の入射光エネルギー依存性である。固体中に生成した励起原子の量はスペクトル (C) のピークの高さで知ることができるが、「励起後の脱離」という現象を通してみると、たくさん励起させたからと言ってたくさん脱離するとは限らないことが解る。また、同じ「脱離」という現象を見ても、脱離する原子の種類によってその様子が全く違うことが (D) と (E) の比較から明らかである。これらの結果を解析することにより、固体を構成する原子が励起後に周囲の原子とどのような相互作用を起こすのかなど、原子レベルでの詳細な情報を得ることができる。

### 3.1 低エネルギー電子衝撃による希ガス固体からの脱離現象の観測

低エネルギー (10 eV ~ 50 eV) 電子衝撃による固体 Ne からの脱離励起原子の脱離収率・脱離エネルギー分布・脱離角度分布の試料温度依存性を測定している (試料温度範囲: 4.5 ~ 7 K)。固体表面の結晶構造が脱離角度分布に影響を及ぼすことが明らかになり, 現在, より詳細な測定および解析を行っている。

### 3.2 低速多価イオンと希ガス固体の相互作用

2001 年度にハイテクリサーチセンター整備事業により購入した電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型多価イオン源を使用して, 多価イオンと希ガス固体相互作用に関する実験を行っている (図 2)。多価イオンとは価数が 2 価以上のイオンのことで, それ自身の持つ内部 (静電) エネルギー (= イオン化エネルギーの総和) が大きいため, 多価イオンが固体表面に衝突した際には, 固体を構成する原子の電子状態やそれらの幾何学的構造に大きな影響を及ぼす。現在, 主に脱離粒子の観測を通して, 非常にもろい希ガス固体の表面および固体中で, 多価イオンの持つ巨大な静電エネルギーがどのように消費されるのかを定量的に明らかにすることを目的とする実験を行っている。

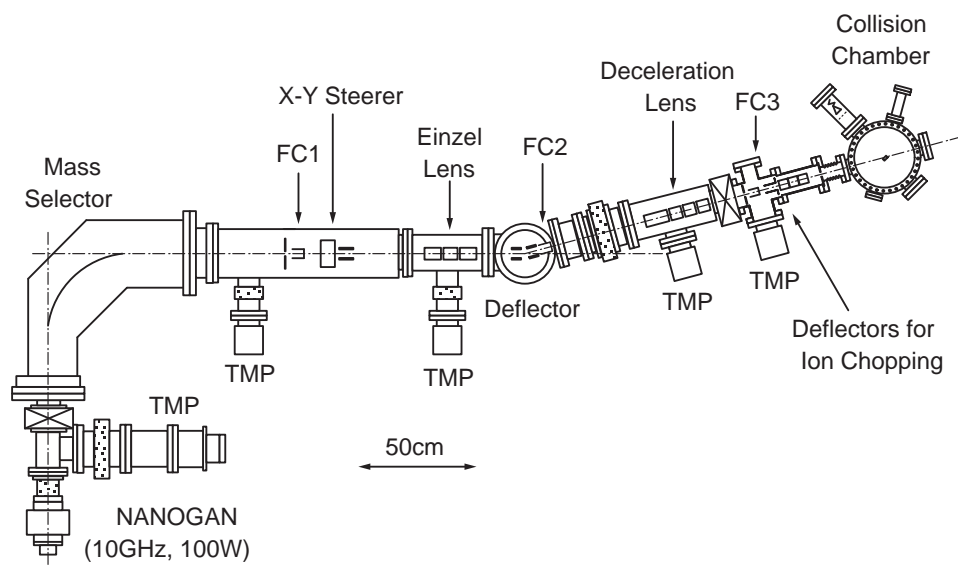


図 2: 希ガス固体 - 多価イオン衝突実験装置全体図。

2005 年度は主に 1 価, 2 価程度の低価数のイオン衝撃による希ガス固体からの脱離粒子の観測を行った。He<sup>+</sup> 衝撃により固体 Ne 表面から脱離するイオンの飛行時間スペクトルを図 3 に示す。入射イオンのエネルギーを高くすると, 大きなクラスターイオン (Ne<sub>n</sub><sup>+</sup>) の脱離が観測され, クラスターイオン脱離のしきい値は 100~150eV 程度であることがわかった。このエネルギーは全粒子の絶対脱離収率 (図 4) の急激な立ち上がりにはほぼ一致した。この結果は中性粒子 (主に原子) の脱離過程とクラスターイオンの脱離には密接な関係があることを示唆しており, 現在希ガス固体中でのイオンの運動学的効果を考慮に入れた解析を行っている。



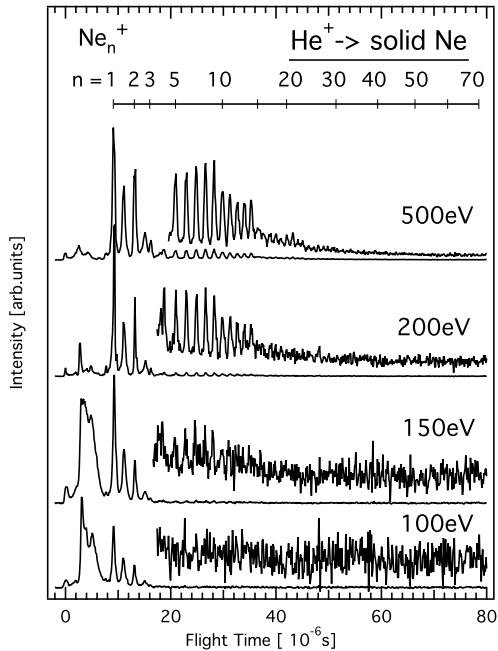


図 3: He<sup>+</sup> 衝撃による固体 Ne 表面からの脱離イオンの飛行時間スペクトル。入射 He<sup>+</sup> イオンのエネルギーは 100, 150, 200, 500eV。

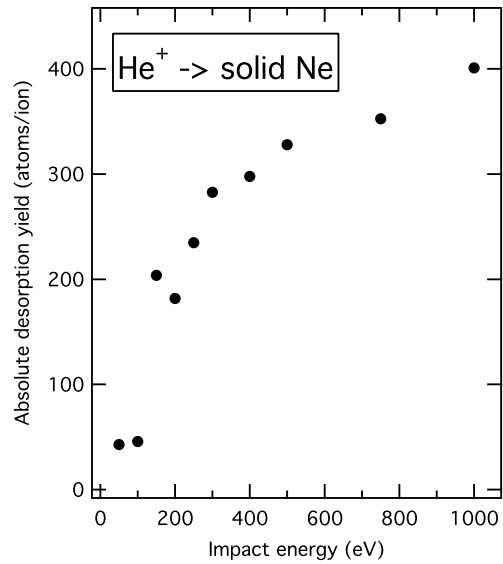


図 4: He<sup>+</sup> 衝撃による固体 Ne 表面からの絶対全脱離収率。

## 4 希ガスクラスター

クラスターとは原子が有限個集まったものである。実験的に生成可能なクラスターの大きさ（原子数）は、2～数百万個程度であるが、その大きさにより「物理」が変わってくる。原子数が10個程度以下では「原子」としての性質を強く示すが、例えば100万個（直径が原子数約100個分）程度になるとそれはほぼ「固体」としての物性を示す。その中間の状態を観測すると、物質の性質が「原子」から「固体」へどう変化していくのかを知ることができる。

### 4.1 電子エネルギー損失分光法を用いた希ガスクラスターの電子的励起過程の研究

この研究では、断熱膨張法を用いて希ガスクラスタービームを作り、そこに低エネルギー電子を衝突させることにより励起状態原子を生成し、その生成エネルギーおよび生成確率のクラスターサイズ依存性を広い範囲のサイズ（原子数数十～数十万）で測定する計画である。特に、電子的励起過程という観点から、どれくらいの数の原子が集まったときに「固体」としての性質を持つのか、という点に興味を持っている。また、クラスターはほぼ球形をしているので、固体と比べると表面を構成する原子数の割合が高い。そのために固体を標的とした場合には観測が難しい表面第1層目のみで起こる励起（表面励起子）を感度良く測定することが可能である。

この研究のために製作した電子エネルギー損失分光装置を図5に示す。標的とする希ガスクラスタービームは粒子密度が低いいため、観測される信号も非常に弱いことが予想される。この困難

を克服するために電子ビームとクラスタービームを合流して衝突させる，合流ビーム法を採用した。現在 Ar クラスターを標的とした電子エネルギー損失分光実験を行っている。

昨年度，クラスターサイズが数 100 個程度の Ar クラスターを標的として実験を行い，クラスター起源の信号の観測に成功した。現在統計精度を向上させた測定を行っている。

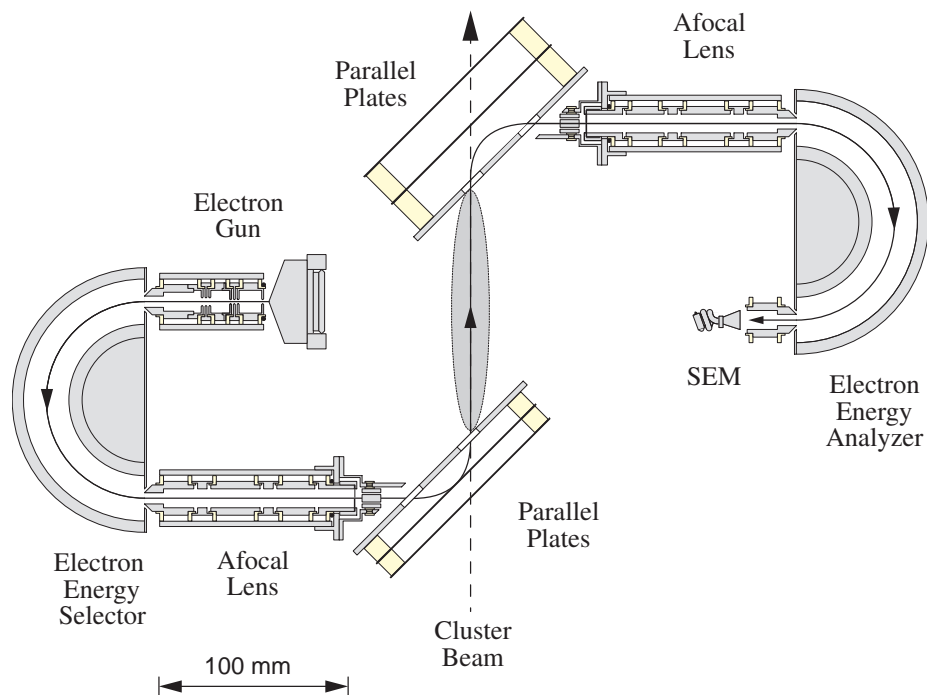


図 5: 合流ビーム法を用いた希ガスクラスターの電子エネルギー損失分光装置。実線は電子ビームの軌道，破線はクラスタービームの軌道を表わしている。

## 宇宙地球系物理学研究室

教職員	教授	吉森正人、山本博聖、北本俊二
	助教授	柳町朋樹、平原聖文
	実験技術員	村上浩之、関口宏之、須賀一治
研究員	PD	辻本匡弘
	大学院生	後期課程
	D1	須藤敬輔
	前期課程	
	M2	大久保洋輔、関口晶子
	M1	荻田喬行、齋藤恒介、武井大、古山亮、本間圭一

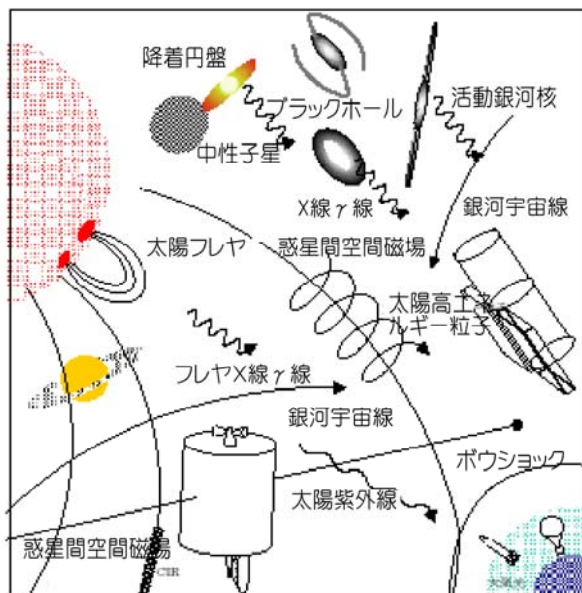
### 研究室概要

地球は広大な宇宙に浮かび、太陽の周りを巡る宇宙船に例えられる。この地球には、我が銀河系の内外を起源とする電波からガンマ線に及ぶ電磁波や宇宙線と呼ばれるエネルギーの高い粒子が、昼夜を問わず降り注いでいる。そして、太陽からは、電磁波の他に秒速数 100 km にも達する高速のプラズマ流（太陽風）が絶えず吹き付けている。また、時々太陽表面で起こる爆発現象（フレア）により、大量の紫外線やX線、粒子さらには磁気流体衝撃波が地球を襲い、様々な地球物理現象（磁気嵐やオーロラなど）が引き起こされ、人間活動にも影響を及ぼしている。

地球は厚い大気のパールに包まれており、また磁場を持っている為に、宇宙空間からやってくる宇宙線や太陽風さらには太陽面爆発からの強い放射線の大部分が、地球表面にまで侵入できず、我々人類の生命圏が守られている。地球表面には、大気が主役を務め地球環境に大きな関わりを持つ「大気圏」があり、その外側には、地球の大気・磁場と太陽風とが様々な現象を繰り広げる「電離圏」「磁気圏」がある。さらに地球から離れると太陽の勢力圏である「惑星間空間」や「太陽圏」が広がっており、その外には恒星の世界である「星間空間」、さらには無数の銀河が散在する「銀河間空間」が広がる。

そこには、太陽に代表されるような普通の星とともに、ブラックホールや中性子星のような特殊な天体等が多種多様な現象を引き起こし、宇宙や銀河の進化に重要な役割を演じている。

宇宙地球系物理学研究室では、ロケットや人工衛星を利用し宇宙空間から、あるいは地上からの様々な観測により、地球上層の大気



光、磁気圏プラズマ、太陽面爆発現象、太陽圏粒子・銀河宇宙線、及びブラックホールや中性子星をはじめとする様々な天体の研究を進めており、各研究分野の発展に大きく寄与している。また、これらの観測に利用される装置の開発も同時になされている。本研究室の観測の多くは、宇宙科学研究本部および関連国際協力プロジェクトに参加して行われており、国内外の共同研究として展開されている。

以下に本研究室で展開されている研究内容を分野別に紹介する。

#### [宇宙物理学]

我々の住む宇宙は、多種多様な環境が混ざり合っ存在しながら、開闢以来進化を続けている。観測が進むにつれて、宇宙の進化と形態は解き明かされていく。しかし、一方で新たに数々の疑問が生み出される。最新の観測を進めながら、最新の疑問に答えるべき宇宙の研究を進めている。

コンパクト星とその周辺の物理学：宇宙に存在する中性子星や白色矮星は、通常の星のように物質の熱運動によって自己重力を支えるのではなく、電子や核子の縮退圧で自己の重力を支え、形を保っている。ブラックホールは、自己重力を支えることができなくなった状態である。これら3種の天体をコンパクト星と呼ぶ。これら不思議な天体が実際にどのように存在しているのか。また、その周りでは、超強重力場、超高温、超高压、超強磁場等の極端な環境での実験室では到底実現できない物理現象が繰り広げられている。それら物理現象を解き明かし、そこからコンパクト星の性質を観測的に研究している。

星や星間空間の物理学：宇宙に広がる星と星の間の空間には、数百万度で $1\text{ cm}^3$ に原子1個程度という高温低密度空間から、冷たいガス雲である暗黒星雲に至るまで、いろいろな温度と、広範囲な真空度の環境が分布する。その中で星が形成されたり、衝撃波が伝わったり、実験室での物理学とは違った現象が繰り広げられている。さらには、暗黒星雲では星が形成される。そして生まれた星は光や物質の放出によって回りの空間に影響を及ぼす。これら星と星間空間を研究することで、星の進化、銀河の進化まで研究を進める。

銀河と銀河の間には、さらに低密度な空間がある。銀河が集まった銀河団と呼ばれる天体は宇宙で最も大きな重力で結びついた構造と考えられており、そこには高温ガスが充満してX線を放射している。これらの高温ガスを観測的に研究することで、現在宇宙を支配していると考えられている暗黒物質やさらには暗黒エネルギーについて、観測的に研究を進める。

#### [太陽地球系物理学]

太陽・惑星間空間・地球大気圏を一つの環境系としてとらえ、21世紀の宇宙時代における新しい視点から見た太陽と地球の関わりとその重要性について研究を行っている。

太陽物理学：宇宙の中でごく平凡な恒星である太陽が、どのようにして誕生し、そしてどのように進化するか、太陽エネルギーはいかにしてつくられるのか、太陽面での活動現象とは何か、

そして太陽の地球環境への影響についての研究を進めている。

惑星間空間物理学・宇宙線物理学：惑星間空間はプラズマと電磁場により支配されている。特に太陽コロナからは可視光や紫外線以外に太陽風プラズマと呼ばれる高速プラズマ流が太陽磁場と共に惑星間空間へと流出し、太陽系内の宇宙空間を支配している。ここは地上と比べれば限りなく真空に近く、それらが相互作用する相手も存在しないため、取り立てて物理の対象となるような領域ではないと思われるかも知れない。しかし、太陽活動に起因する乱れが伝わり成長することにより、極めて活動的な領域が生成される。また、太陽系外から流入する宇宙粒子線に、少なくない影響を及ぼす領域でもある。

惑星磁気圏・電離圏物理学：一方、太陽風は地球磁場や地球大気と複雑に相互作用しており、その結果、ジオスペースと呼ばれる宇宙環境を形成している。これら惑星間空間物理学では、プラズマと電磁場の物理過程を基礎とし、地球近傍の宇宙空間における自然現象について研究している。

地球超高層物理学：太陽からの様々な影響を受け地球大気は変動している。更に近年は人間活動も大気にとっては無視出来ない効果を及ぼしつつある。最も地表に近い対流圏、その上層に成層圏、中間圏、熱圏と温度構造を基に名称がつけられている。これらの大気構造や大気中で起こる物理・化学過程の研究が行われている。

# 高エネルギー太陽爆発現象と地球環境

吉森 正人

## 1. 研究のねらい

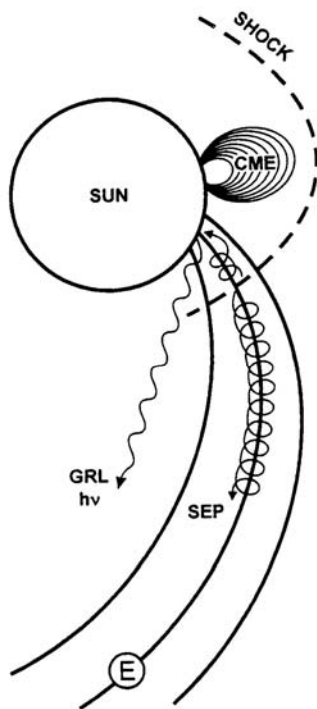
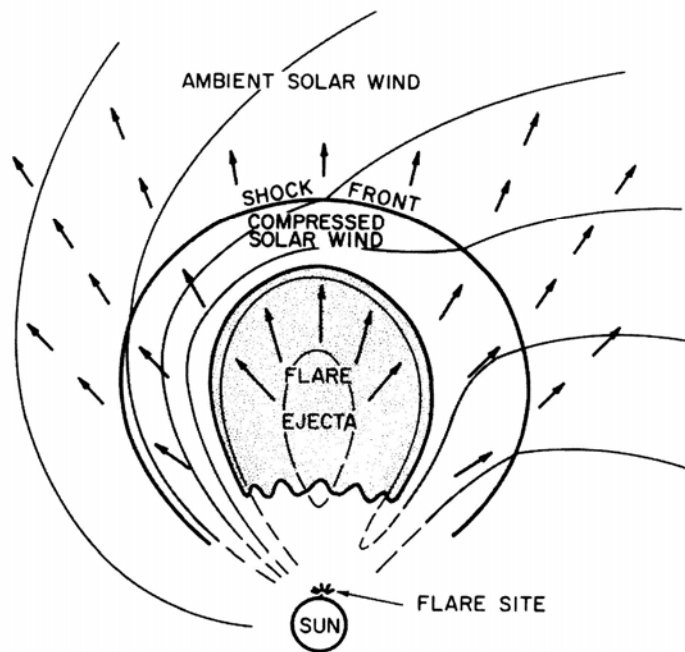
地球環境を決定している最も基本的なエネルギー源は太陽光であり、そのエネルギーフラックスは地球軌道では  $1.96 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$  のほぼ一定値であり、太陽定数と呼ばれている。しかしながらこの太陽定数が、太陽表面における活動度によって 0.1 % のオーダーで変動し、太陽活動度と相関関係を示すことが衛星観測からわかってきた。太陽表面で発生するフレアやコロナ質量放出といった大規模な爆発現象やプロミネンス等のさまざまな活動現象を支配しているのは、黒点の磁気エネルギーであるが、そもそも太陽活動は、どのようなメカニズムでおこり、そしてそれがどのようにして太陽光のエネルギーフラックスの変化を引き起こすのかを解明することは、太陽物理学の最も基本的な研究課題のひとつであり、地球環境への影響を考える原点でもある。

本研究の目的は、太陽活動の中で最も大規模なコロナの磁気プラズマの爆発現象(フレア)を、非熱的プロセスに重点を置き、コロナ中での高エネルギープラズマ粒子の生成過程を、人工衛星で観測された X 線、ガンマ線、粒子データの解析から明らかにしようとするものである。また太陽活動と関連して、地球大気に入射する銀河宇宙線および太陽高エネルギー粒子が、成層圏および対流圏で生成する放射性元素  $\text{Be-7}$  の量を地上で連続的に測定し、高層における複雑な大気の循環運動の時間変動を解析する。高層大気の運動は、地球環境の変化にも影響を与えるが、これまでの気象学では研究されていない部分も多くあり、放射性核種  $\text{Be-7}$  をトレーサーとして、太陽物理学、地球物理学そして環境科学の学際領域である地球環境の変動を太陽活動の観点から解明しようとするものである。

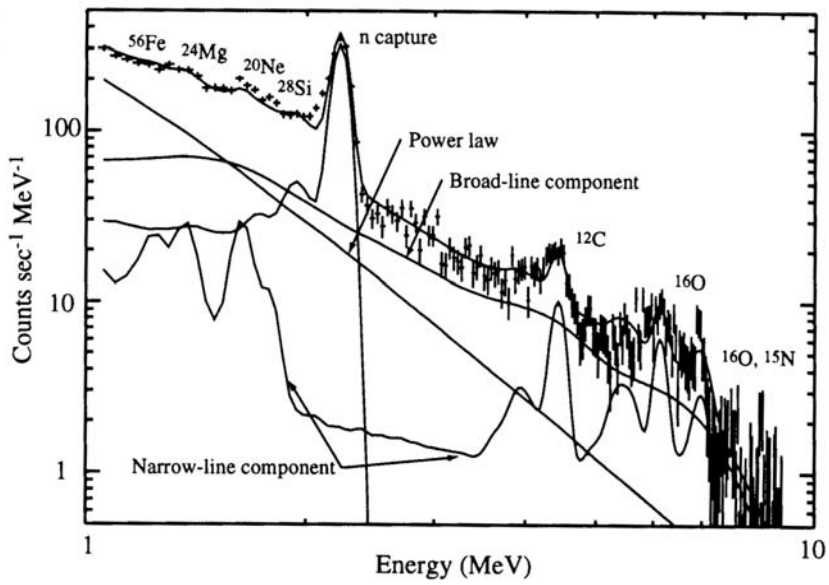
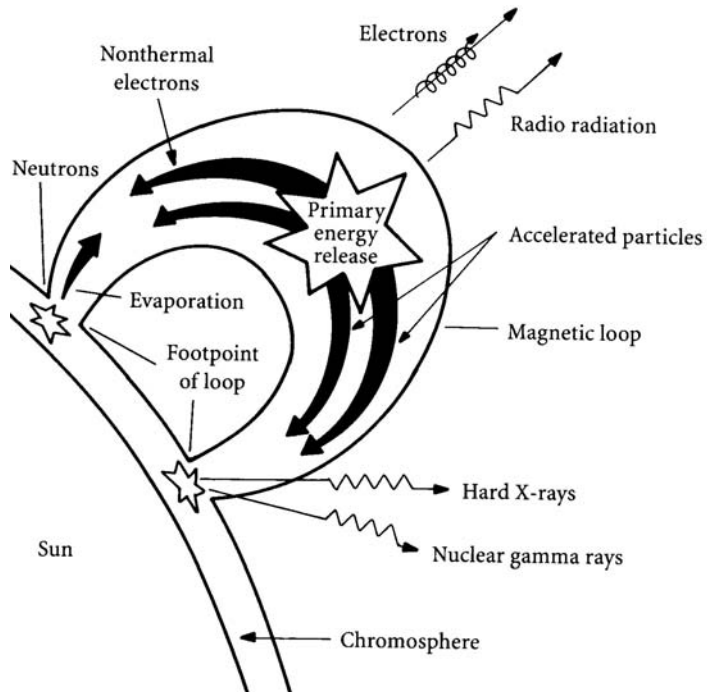
## 2. 研究成果

### (1) 太陽面爆発における高エネルギー現象

太陽フレアは、黒点磁場に蓄えられたエネルギーが、磁力線のつなぎかえにより短時間のうちに解放され、コロナのプラズマ粒子を数千万度の高温に加熱したり、 $100\text{MeV}$  以上の高エネルギー粒子をつくり出す爆発現象であり、地球環境にもさまざまな影響を及ぼすことが知られている。1991-2000 年に日本の太陽観測衛星「陽光」によって得られた多数の大型フレアから放射された X 線およびガンマ線ラインのデータを詳細に解析し、電子の制動放射ならびに陽子の原子核反応の過程を明らかにした。観測された  $100\text{keV}$  から  $100\text{MeV}$  におよぶ広帯域電磁放射スペクトルからコロナプラズマの加速メカニズム(プラズマ波動と粒子との統計加速)を推測し、また非熱的プラズマ粒子のエネルギー総量を求め、磁気エネルギーの 1-10% が粒子の加速に使われることを示した。



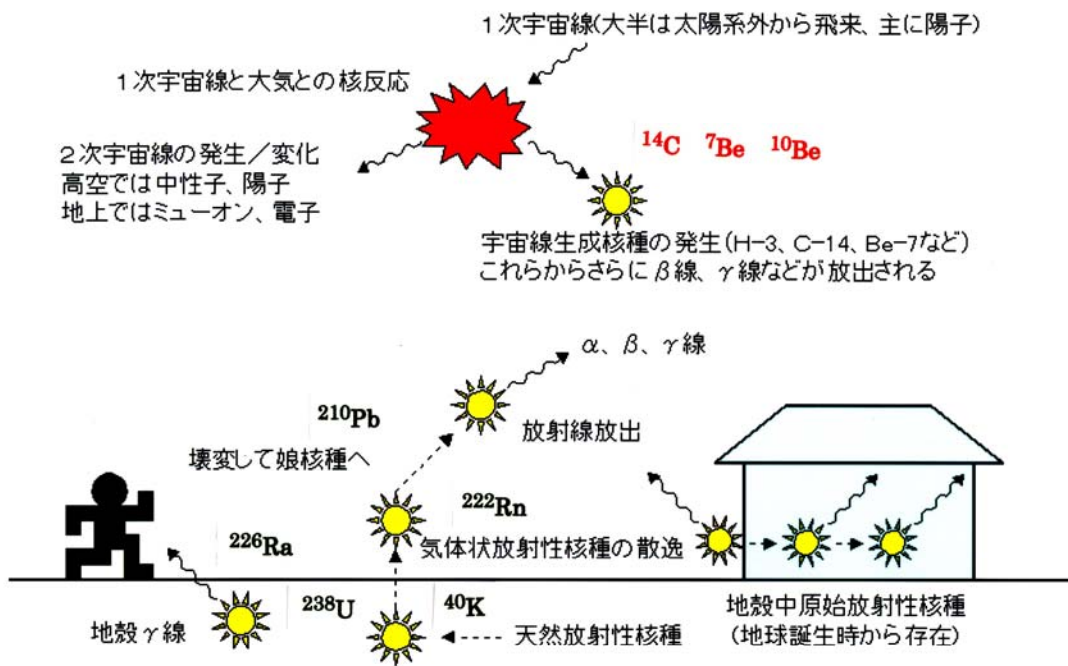
A canonical model of a solar flare



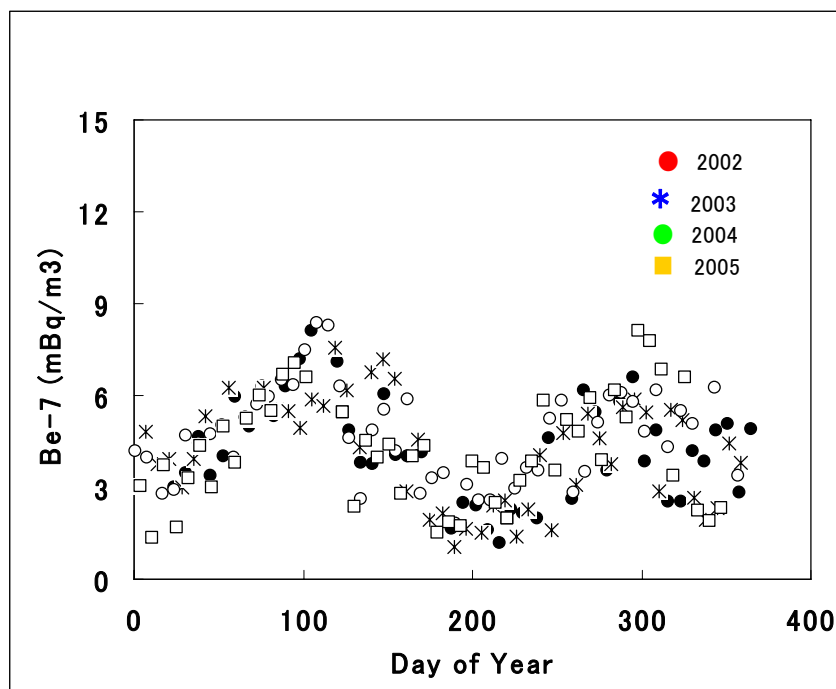


## (2) 放射性トレーサーBe-7 および Pb-210 を利用した高層大気運動の研究

地球大気中には銀河宇宙線や太陽高エネルギー粒子によって生成される宇宙起源の放射性核種 Be-7(半減期 53 日)や地球起源の Pb-210(半減期 22 年)などがエアロゾルに付着し、成層圏から対流圏の中を運動している。地表に降下する Be-7 および Pb-210 をダストサンプラーにより収集し、これらが放射するガンマ線のスペクトル分析から、地表へ降下する Be-7 および Pb-210 の量を決定した。2002 年からの連続測定からこれら 2 つの降下量は、春と秋に増加を示す明らかな季節変動が存在することがわかった。この結果は、成層圏および対流圏における大気運動に起因すると推定されるが、特に日本上空では春と秋に偏西風によって移動性高気圧と温帯低気圧が対になって周期的に発生するが、これに伴って高層大気に大きな大気循環が発生し、Be-7 および Pb-210 の地表への降下量が増加するプロセスを提案した。



## 自然放射線とその起源



### 3. 今後の課題

太陽フレアの研究は、日本の「陽光」衛星が 2000 年に観測を終了したために、2001 年 NASA が打ち上げた新しい太陽衛星「RHESSI」によって得られた X 線およびガンマ線のスペクトルとイメージの精密データを解析して、さらに詳細なフレアにともなう高エネルギー粒子生成のメカニズムを追及する。「RHESSI」衛星ではフレア時に 10MeV 以下のエネルギーで、いつ、どこでガンマ線が発生したかがわかるイメージデータが得られるので、粒子加速に関する新たな手がかりが得られるものと期待される。

また放射性核種を利用した高層大気運動の研究では、これまで太陽活動の影響がどの程度あるかが、理解されていない。この点を調べるためにさらに連続観測を継続すると同時にグローバルな観点から高層大気運動を調べるために、日本以外に高緯度地帯における Be-7 および Pb-210 の連続測定計画をロシア科学アカデミー極域研究所の協力を得て進めている。予備的測定の結果から、1月から2月初めの春先にかけて、Be-7 の降下量が増加が見られ、それが何に起因しているかを、今後解明していきたい。

## 超高層大気の研究

山本博聖、関口宏之

M1 古山亮、本間圭一

わたしたちは地球に空気があることをあまり認識することなく毎日の生活を送っている。高い山に登ったときに空気が薄い、あるいは天気予報で「冷たい空気が南下してきます」と聞くときにその存在に気づく。大気は惑星などがその星の周りに持つ気体と呼ぶときの名称で、地球の場合は特に空気と呼んでいる。地球大気は窒素分子 ( $N_2$ ) 78%と酸素分子 ( $O_2$ ) 21%そしてアルゴン (Ar) 1%を主成分としていて、窒素 4 酸素 1 の割合は高度 100km までほぼ一定である。これらの主成分と、雨を降らせる水蒸気 ( $H_2O$ )、温暖化と密接に関連している二酸化炭素 ( $CO_2$ ) や太陽から来る有害な紫外線を防いでいるオゾン ( $O_3$ ) などを微量成分として地球の大気は構成されている。気象現象に直接関与している大気は地表から 10km ほどまでで、飛行機が飛行している高度もほぼ 10km である。さらにずっとはるか上空のスペースシャトルが飛行する高度 (ほぼ 300km 上空) にもほんのわずかな (地表密度の 1 千億分の 1 程度) 大気がある。この高度付近まで地球引力の大きさは地表面とほぼ変わらない。日常、この領域付近からはるかかなたの深宇宙にわたる広大な領域をすべて「宇宙」と呼んでいる。スペースシャトル高度は、大気が極めて薄く、ほとんど真空と呼べる場所である。地球半径 6400km に比べれば地球表面からすぐそこである。その領域までに存在している大気がわれわれを守ってくれている。

地球大気の温度は地上から上空に行くに連れて少しずつ下がってゆき、高度 10km (地表と比べて気圧は 3 分の 1、密度は半分) では 220K 付近 (絶対温度表示、摂氏ではマイナス 50 度) にも達している。ここから上昇に転じ高度 50km 付近 (気圧 2000 分の 1、密度 1000 分の 1) で約 270K に達したあと、再び高度の上昇とともに下がり、高度約 90km から 100km 領域 (気圧 100 万分の 1 以下、密度 50 万分の 1 以下) では、最も低い温度 (180K から 220K) になる。さらに上空では太陽からの極端紫外線を吸収する効果で暖められ上昇する。温度構造をもとに、地上から 10km 付近 (緯度によってこの高度は 9km から 17km の幅がある) までを対流圏 (Troposphere), 50km 付近までを成層圏 (Stratosphere), 90km 付近までを中間圏 (Mesosphere)、その上空を熱圏 (Thermosphere) と呼ぶ。

わたしたちの日常の生活は対流圏の中に限られているが、太陽から来る有害な紫外線の大部分を防ぐ役目を果たしているオゾンの多くは成層圏に存在していることは、超高層の大気がわたしたちに密接な関連を持っている一つの例である。また、これ以外にも、航空機の飛行高度の 10km 付近では、中緯度地域 (日本やアメリカ、ヨーロッパ諸国などが位置している領域) においては、年間を通して西風が吹いている。このため日本からアメリカに向かう場合と帰国

の場合とでは飛行機は同じルートを行き来するのではなく、西風を利用したり避けたりの工夫がされている。近年の飛行機では飛行ルートや現在位置を地図の上で示してくれているので是非ルートの違いを確認して欲しい。

高度 10km から 100km 付近を中層大気 (Middle Atmosphere), さらに上層までを含めて超高層大気 (Upper Atmosphere) と呼ぶ。成層圏オゾン (Stratospheric Ozone) の役割や、南極領域で発見されたオゾンホール (Ozone Hole)、そして地球温暖化など地球大気はこの数年できわめて身近な存在であることが認識されてきている。

わたしたちは主として夜間大気光の地上観測ならびに地上に到達する太陽紫外線強度の観測を進めてきている。これらの観測結果からメソポーズ領域の温度を導出し、中間圏大気の物理化学過程の解明、そして紫外線結果から得られる大気オゾンの変動についての研究を行っている。現在取り組んでいる研究について以下に述べる。

## 1. メソポーズ領域の大気温度の観測

メソポーズ領域 (Mesopause Region) は高度 90km 付近を指し、大気温度が最も低温の領域である。ただし、最近最低温度領域は 100km 付近にあるとの研究結果も出され、メソポーズ領域の定義も変わることが考えられる状況にある。この領域でオゾンと水素原子の反応の結果生まれた水酸基 (OH) がかすかな光 (OH 大気光と呼ぶ) を出している。太陽光はもちろん月明かりでさえも OH 大気光よりはるかに明るい。このため月明かりの影響が少ない時期を選んで夜間に観測を行う。OH 大気光は可視域から赤外領域にわたり発光しているが、わたしたちは近赤外線領域で光る OH(3-1)帯発光を観測対象としている。これまでに夏季に低温、冬季に高温を持つ 1 年変動が観測されていて、地球規模の大きな大気の循環運動の結果であるとして理解されている。短い時間スケールでも変動し、これの原因は対流圏あたりでの小さなスケールの擾乱が上層へ伝播した結果であると解釈されている。

地上観測は池袋キャンパス 13 号館 (東経 139.7 度、北緯 35.7 度) ならびにブラジルのサンマルチャーニョ観測所 (西経 53.8 度、南緯 29.4 度) で行っている。ブラジルでの観測はブラジル宇宙科学研究所 (INPE) との協力で進めている。

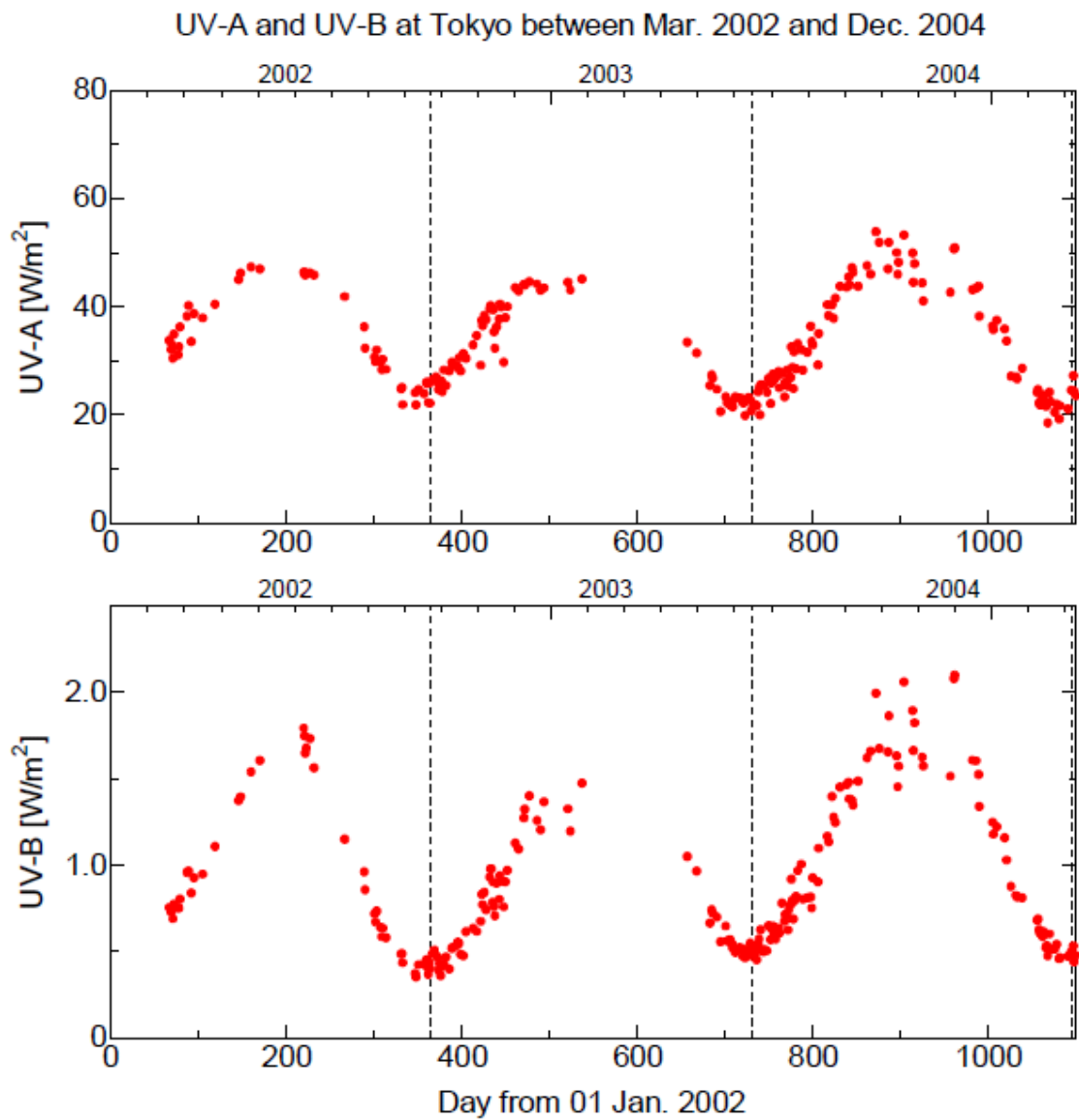
## 2. 太陽紫外線強度の地上観測

太陽紫外線は A 領域 (波長 315nm から 400nm)、B 領域 (280nm から 315nm) そして C 領域 (190nm から 280nm) と分類されている。成層圏オゾンにより UV-C は完全に大気中で吸収され、地表には届かない。一方 UV-A にはオゾン吸収はほとんど効かない。UV-B は太陽から放射される一部分が地表に到達し、人類を初めとする生物への影響が大きい。池袋とサンマルチャーニョの両地点で UV-A、UV-B そして 295nm から 400nm の紫外線分光測定を実施し

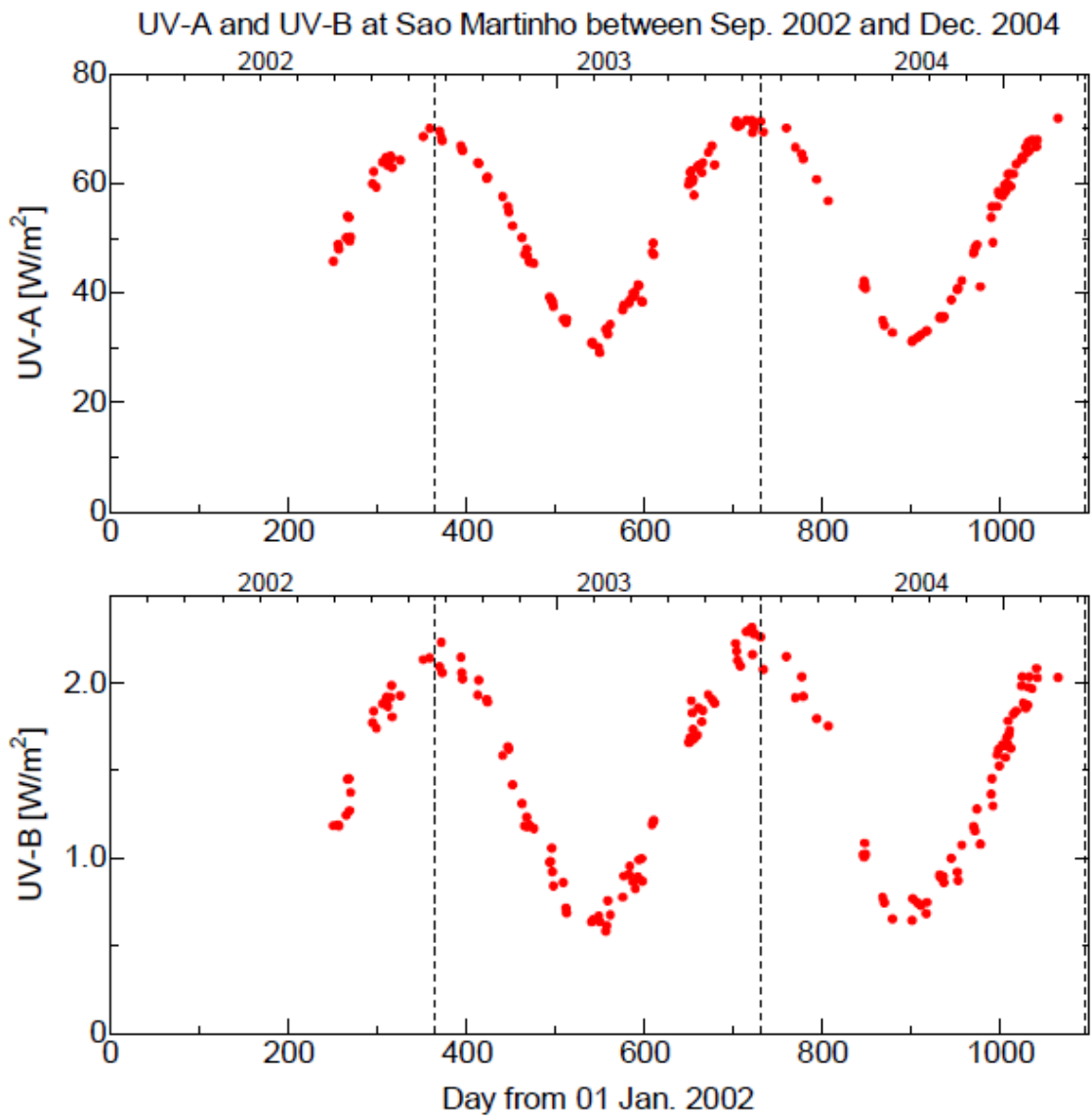
ている。太陽紫外線強度の長期変動を知り、UV-A と UV-B の強度比からオゾン全量が求められることを利用してオゾン全量の変動も求める。

### 3.大気温度観測装置の開発

従来から用いてきている観測装置にあわせて新たな装置の開発も進めている。2004年1月の鹿児島での観測では新たに開発した **Tilting Filter Photometer** を用いた。近赤外線領域でのこの種の観測装置はわたしたちの装置が始めての試みである。2005年度からは改良した装置による地上観測を実施している。



2002 年から 2004 年までの UVA(上)と UVB(下)の強度変動  
 a. 立教大学 13 号館屋上に設置した紫外線測定装置による結果



b. ブラジルサンマルチーニョに設置した紫外線測定装置による結果

南北両半球の結果から、6ヶ月のずれで同様の季節変動をしていることがわかる。また、2つの観測地点は、ほぼ同一緯度帯にあるが南半球での紫外線強度が強いこともわかる。

## X線天体の研究とX線観測装置の開発

教授 北本俊二

日本学術振興会特別研究員 (PD) 辻本匡弘

D1 須藤敬輔

M2 大久保洋輔、関口晶子

M1 荻田喬行、斉藤恒介、武井大

宇宙には地上では到底達成できないような、超強重力場、超強磁場、超高輻射場あるいは、超高温、超低温、超高密度、超高真空等のいろいろな極限的な環境が存在します。それら極限状態でどのような物理現象が繰り広げられているのか研究する事は、宇宙物理学の一つの大きな課題です。この研究室では、中性子星や、ブラックホールといった特殊な天体とその周りで起こっている現象、それから、星や星形成領域等の高温プラズマを研究しています。

X線による天体観測は主に人工衛星により行います。研究室では、人工衛星によって取得したデータを解析することにより、天体の研究を進めています。また、人工衛星に搭載することを目標として観測装置の開発も行っています。最高の研究をするためには、最高の観測装置で観測することが必要です。

### 1. ブラックホールや、中性子星の研究

中性子星は半径が10 km程度であるのに、質量は太陽と同程度である大変小さく重い星です。その中性子星に物質が降り積もると、大きな位置エネルギーが開放され、高温となりX線で明るく輝きます。中性子星には1兆ガウスもの磁場を持つものがあり、そこでは物質は磁場により磁極に集中して降り積もります。そのため、特に磁極がX線で明るく輝きます。中性子星が自転しており、地球のように自転軸と磁軸

がずれていれば、明るくX線で輝く磁極は見え隠れします。そのような中性子星を観測すると、X線強度が自転の周期で変動し

「X線パルサー」と呼ばれるものになります。磁場の弱い中性子星では、降り積もった物質が爆発的な核融合反応を起こすことがあります。それは「X線バースト」と呼ばれます。ブラックホールに物質が降ってゆくと、やはり位置エネルギーが開放されて、高温になりX線で明るく輝きます。

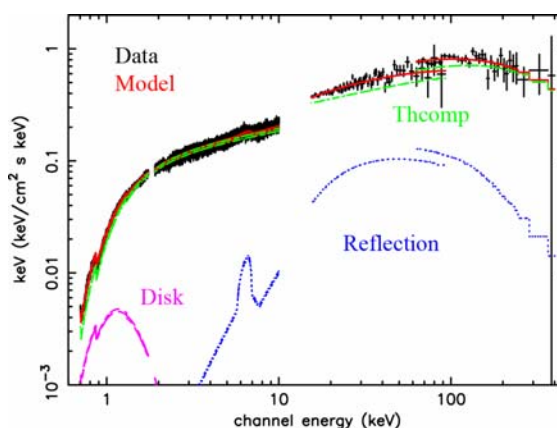


図 1. 「すざく」で観測したブラックホール候補星 GROJ1655-40 のエネルギースペクトル。0.5keV から 400keV 近くまで、3桁にわたるエネルギースペクトルを観測する。

(Takahashi, Sudoh, Kitamoto et al., 2006)



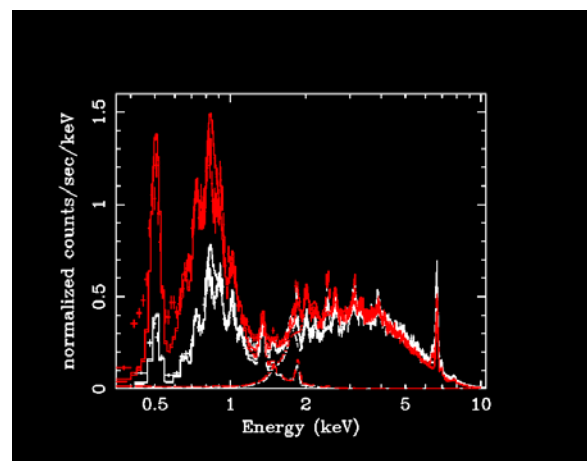
しかし、最終的には物質はブラックホールに吸い込まれてしまいます。あるいは、一部の物質は宇宙ジェットとして再び星間空間に吹き飛ばされこともあるかもしれません。このように、中心にブラックホールがある天体と中性子星がある天体を観測すればなんらかの違いがあるはずですが。その違いは X 線のエネルギースペクトルであり、X 線の時間変動に現れると期待します。研究室では、そのような考えでいろいろなブラックホール候補星と中性子星であると考えられる天体を X 線で観測し、極限環境でどのような物理現象が起こっているのか理解し、ブラックホールの証拠を掴もうと研究を続けています。

21 世紀になってブラックホールに流れ込む物質の振る舞いの研究は新しい時代に入ってきました。物質が中性子星やブラックホールに落ち込む時は一般に降着円盤と呼ばれる円盤を形成します。この降着円盤は、位置エネルギーを熱や放射のエネルギーに変換する役割を担うもので、その性質は直接観測と結びつき、多くの研究が進められてきました。観測的には、米国の「チャンドラ」「RXTE」、欧州の「XMM-ニュートン」等の衛星に加えて、日本の「すざく」衛星が活躍を始めました。研究室では、短時間変動を調べるため、昨年 GRSJ 1915+103 に加えて、X1630-47 のエネルギースペクトルと時間変動の両方の振る舞いを同時に説明できるようなモデルの研究を進めています。また、「すざく」衛星の 3 桁にもおよぶ広いエネルギー領域でエネルギースペクトルを観測できる能力で、さらに私たちの研究を進めようとしています。図 1 はブラックホール候補星 GROJ1655-52 の「すざく」によるエネルギースペクトルです。そのほか、超強磁場を持つ中性子星 A0535+26 でサイクロトロン共鳴構造を測定し、磁場の状態についても研究しています。

## 2. 大質量星と星形成領域の研究

普通の星も X 線を放射しています。特に早期型星と呼ばれる重く青白い星は、X 線が強いことが知られていますが、その X 線放射機構には決定的な説明はありません。私たちは早期型星の X 線放射機構の研究をしています。そのために、米国の「チャンドラ」衛星の回折格子による高分散のエネルギースペクトルの解析も進めています。その結果、早期型星で強い星風内で生じる自発的な衝撃波で説明できるものとそうでないものがあることがわかってきました

(Yamamoto et al. 2006)。さらに、「すざく」による大質量星りゅうこつ座  $\eta$  星の解析も進めています。りゅうこつ座  $\eta$  星は X 線で特別に明るい巨大な星です。なにか特別なことが起こっているに違いありません。さらに、散開星団をはじめとした星形成領域では、若い星がたくさんあります。その若い星からも X 線放射が発見



されており、その X 線放射機構の研究も大変面白い研究です。

### 3. 超高精度 X 線望遠鏡の開発研究

研究室では、将来はブラックホールを観測的に

「見てみたい」という夢があります。その夢に向かって、観測装置の開発研究を進めています。

その一つは、究極の X 線望遠鏡の開発研究です。

X 線は波長が短いので、小さい望遠鏡でも高角度分解能が達成できます。しかし、現在の X 線望遠鏡の角度分解能はどれも原理的な限界にはほど遠いものです。それは、X 線光学系の精度が不足していることが理由です。そこで、X 線光学系の精度を追求することにより、格段に優れた角度分解能を有する X 線望遠鏡を開発しようと考えています。私たちの研究室では、これを X-ray milli-arc-sec (X-mas) Project と呼んでいます。そのための光学実験と、X 線実験を織り交ぜて、試行錯誤を続けています。ここでは、X 線反射鏡の研究、X 線反射鏡を制御する研究と多種多様な研究が含まれています。図 3 に実験室にある、X 線望遠鏡の焦点面構造を示しました。X 線反射鏡は多層膜でコーティングした回転放物面鏡です。X 線は X 線用の CCD で検出します。基準に使う可視光を X 線用 CCD の極近くを通して波面センサーに導きます。波面センサーで検出した基準の波面を参照にして、最良の X 線像をとれるよう、副鏡として使用している可変形状鏡を操作します。4 m 離れたところに置いた間隔 500 ミクロン、線幅 50 ミクロンのメッシュ（網）の像を図 4 に示します。

図 2. すざく衛星が観測した大質量星、りゅうこつ座  $\eta$  星のエネルギースペクトル。たくさんの元素からの輝線が見えている (Sekiguchi et al.)。

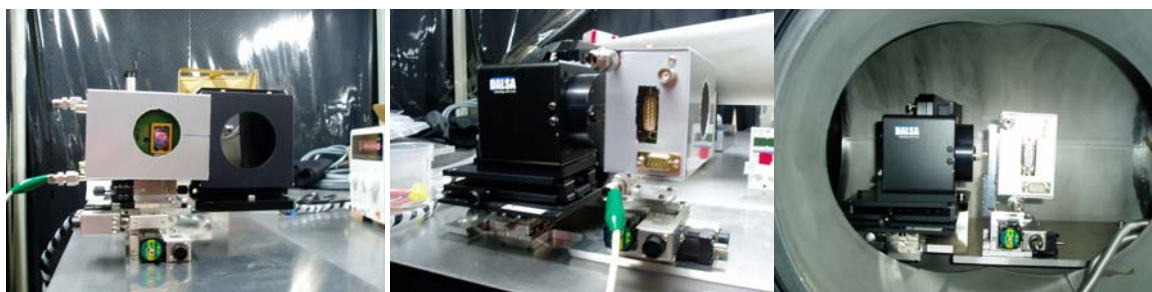


図 3. Xmas 計画で進めている X 線望遠鏡の焦点面に置く主鏡、CCD カメラ、波面センサー。

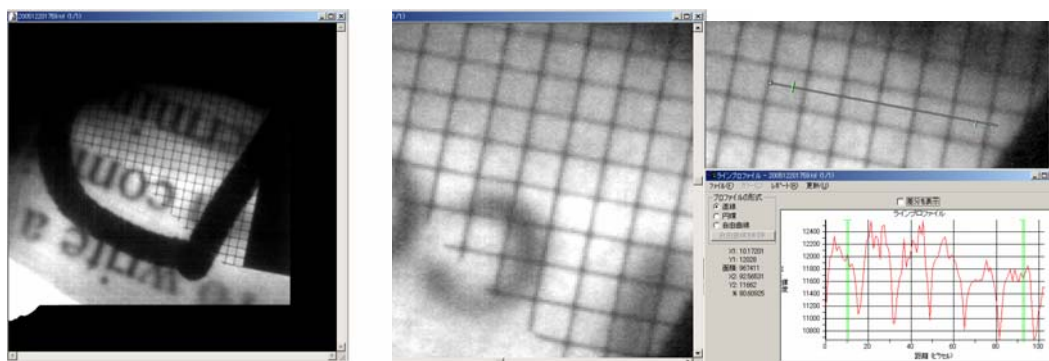


図 4. Xmas 計画の X 線望遠鏡で撮像した 500 ミクロン間隔、50 ミクロン線幅のメッシュの像。

#### 4. X線偏光検出器の開発研究

将来の X 線観測で、新しい領域を打ち開くと期待されているのが X 線の偏光観測です。X 線の偏光状態を知ると、X 線放射機構そのものの情報を引き出すことができます。また、X 線源の幾何学的な形状についての情報もわかると期待できます。しかしながら、今は、X 線での撮像観測、エネルギースペクトル観測、時間変動の観測が主であり、X 線の偏光状態はほとんど観測できていません。私たちは、グループとして得意な多層膜や CCD を応用して、X 線偏光計の試作を進めています。いろいろ試行錯誤の途中ですが、将来天体観測に使えるようなものを作るよう、研究を始めたところです。図 5 は、CCD の表面に多層膜を蒸着したものです。多層膜

図 4. Xmas 計画の X 線望遠鏡で撮像した 500 ミクロン間隔、50 ミクロン線幅のメッシュの像。

は人口結晶とも呼ばれるもので、ブラック反射と同じ性質を示し X 線を反射します。特に 45 度入射の X 線に対してブラック条件があう波長の X 線は、偏光方向により反射率が大きく異なります。同時に透過率も異なります。図 6 にシミュレーション計算で求めた X 線の透過率を示しました。反射面に対する、X 線の電場方向で P 波、S 波と区別して偏光状態を表します。P 波、S 波で透過率が大きく異なることがわかります。検証実験は高エネルギー加速器研究機構の放射光を用いて進めています。



図 5. 偏光計として多層膜を蒸着した CCD。

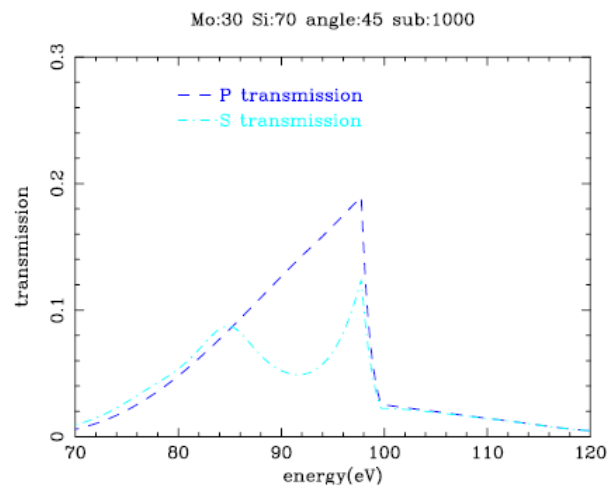


図 6. 45 度入射での X 線の反射率。

偏光の違う X 線を P 波、S 波と呼ぶ。

両者の反射率が大きく異なる。

## 宇宙粒子線による太陽系・銀河系の研究 柳町

宇宙空間を超高速で飛び回っている原子核——宇宙粒子線の化学組成、同位体およびエネルギー・スペクトルの測定は、その起源、元素合成プロセス、加速過程、伝播機構などを解明する上で非常に大きな鍵を握っている。

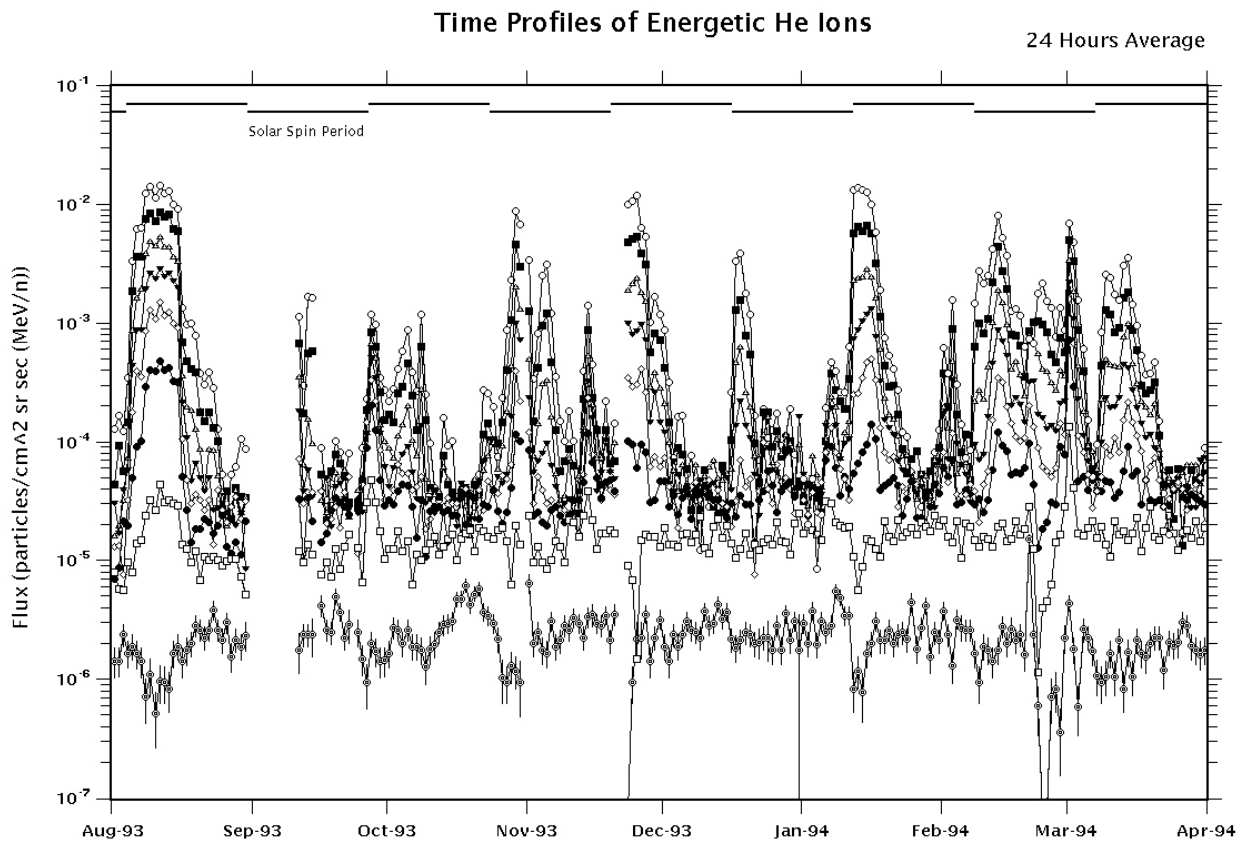
現在までに測定された宇宙線の最高エネルギーは、 $10^{20}$  エレクトロンボルト(eV)すなわち 10 ジュール(J)を越えている。このように高エネルギーの原子核が私たちに衝突すれば、甚大なダメージを与えないではないはずだが、そのために怪我をしたとか障害が発生した等ということがないのは、地球が幾重ものバリアーに守られているためである。運動する荷電粒子は磁場から力を受けて進路を曲げられるが、地球が存在する太陽圏には、太陽から吹き出す太陽風と呼ばれるプラズマの流れによって太陽表面から引き出された惑星間磁場が存在し、太陽圏の外側から侵入する比較的エネルギーの低い宇宙線は、進路を曲げられ地球が位置する太陽圏の中心付近まで達することができない。それでも地球の近くまで侵入してきた高エネルギーの宇宙線の多くは、地球自身が持つ磁場——地球磁場に妨げられて地表まで降り注いでくることはない。この第 2 のバリアーも突破できるようなよりエネルギーの高い宇宙線から最後に私たちを守ってくれるものは、地球の大気である。水に換算すると 10m もの厚さの大気中に突入した宇宙線は、大気を構成する原子核と衝突して破壊される。もちろん破壊された後の残存物の中には地表まで到達するものもあるが、それらは分厚い大気を通過することができたもの、言い換えれば大気中の物質との相互作用が極めて小さいものであるから、人体に及ぼす影響も小さい。

磁場を伴う 2 つのバリアー領域は、外から侵入してくる粒子を阻止する一方、その内部で運動する粒子に磁場の強さに応じた様々な影響を与えており、それぞれの領域特有の現象を出現している。地球磁場はそこに衝突してくる太陽風プラズマとの相互作用により、明確な境界が形成され地球磁気圏という領域を作り出している。この領域では、そこに取り込まれた太陽風プラズマ粒子やイオン化された地球大気を構成する原子が、磁気圏の磁場との相互作用によって運動エネルギーが  $10^3$  から  $10^5$  eV 程度まで加速される。

また、常に秒速 400~500km 程度の外向きの太陽風が吹いている太陽圏では、ときどき秒速 600~700km に達する高速の太陽風が吹き出して前面の低速太陽風を圧縮し、この圧縮が十分成長する太陽・地球間の 2~4 倍の距離のところ、低・高速太陽風の境界面で衝撃波が形成される。この領域では、やはり磁場との相互作用によってイオン化された原子が  $10^7$  eV 程度のエネルギーまで加速されている。低・高速太陽風が吹き出す太陽表面上の位置は、ある程度の期間固定されている。したがって、粒子加速が生じている衝撃波領域は、太陽の自転とともに約 27 日周期で太陽の周りを回転することになるため、この領域は共回転相互作用領域と呼ばれている。この領域で加速された粒子を地球を周回する人工衛星で観測すると、やはり 27 日周

期で高エネルギー粒子の増加が見られることになる。

下図は、1993年8月から8ヶ月間に渡って GEOTAIL 衛星で観測された He イオンの強度変化を示している(最下段の強度が大きく変化していないデータは酸素イオンである)。図中の上下に分かれた実線は、低・高速太陽風の境界面が地球を通過した1994年3月7日の10時を基点とした太陽自転周期を表している。多少ずれているところもあるが、線分の切れ目を始点として He イオン強度が増加していることがわかる。



星間空間と呼ばれる太陽圏の外に存在するイオン化されていない中性原子は、惑星間磁場に妨げられることなく太陽圏の奥深くまで入り込み、太陽の紫外線や太陽風プラズマ粒子との衝突によってイオン化され、10<sup>8</sup>eV 程度のエネルギーまで太陽圏内部で加速されて宇宙線異常性分として観測されている。

太陽圏の外側には星間空間と一言で呼ばれる空間が、銀河系の縁まで広がっている。星間空間の大部分は、1cm<sup>3</sup>あたり水素原子核が1個存在する程度の太陽圏よりも希薄な空間であるが、そこは超新星の爆発が起きたり、その名残りである大規模な磁場の擾乱が存在する大変活動的

な場でもある。このような領域でイオンは  $10^{10}$  数乗 eV のエネルギーまで加速され、およそ 1 千万年に渡って銀河系の大規模な磁場に閉じ込められている。

現在われわれは、1992 年に NASA の協力を得て打ち上げられた、宇宙科学研究所の人工衛星 GEOTAIL による観測データの解析に力を注いでいる。この衛星には他大学との共同研究により開発した 4 種類の検出器が搭載されており、地球磁気圏粒子から銀河宇宙線までの広いエネルギー範囲にわたる宇宙粒子線の観測を行っている。これらの観測データの解析から銀河宇宙線の伝播機構、宇宙線異常成分、太陽高エネルギー粒子の加速・伝播機構、磁気圏プラズマの振る舞い、太陽風や太陽高エネルギー粒子と地球磁場との相互作用等の研究が進行中である。

日本の宇宙科学研究所によって 2000 年に打ち上げられた火星探査衛星には、私たちが開発した検出器が搭載され、磁場が極めて弱い火星における太陽風と火星大気との相互作用を探る研究を期した。しかし、昨年 12 月に衛星を火星周回軌道へ投入することができなかったことは、非常に残念である。また、月周回衛星に宇宙粒子線検出器を搭載し、銀河宇宙線、太陽高エネルギー粒子あるいは太陽圏で加速された粒子の観測や、スペースシャトルを利用した通常の熱核融合反応では生成されない鉄より重い宇宙線の観測等の計画が進められている。

## 地球・惑星磁気圏と惑星間空間の飛翔体による直接探査

平原 聖文、浅村和史（訪問研究員）

我々の研究活動においては、2005 年後半から大きな展開があった。我々が 5 年に渡り開発してきた人工衛星搭載用オーロラカメラ・粒子センサーで取得されたデータを本格的に解析出来る環境が整備されつつあるのが大きな要因である。まず、これら、人工衛星搭載用オーロラカメラで取得された最新のオーロラ画像の例を以下に示す。

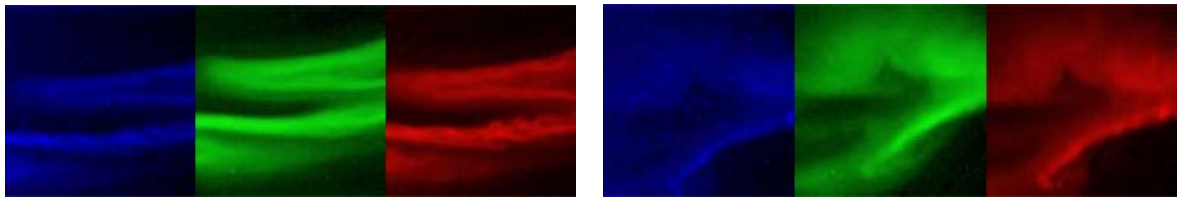


写真 1: 高度 630km を飛翔する最新の人工衛星に搭載されたカメラにより撮影されたオーロラ

白黒印刷の為、鮮明ではないが、3 枚が 1 組になっている画像は、それぞれ左から 428nm、558nm、670nm の波長でのオーロラ発光の 2 次元空間分布を示す。オーロラの発光層高度を 110km と仮定すると、写っている領域は約 100km 四方に対応する。これらの画像は 120msec 毎に動画として取得されていて、微細な構造の空間分布に加え、活発なオーロラ活動の時間的な変動を詳細に解析出来る。また、同様に高い空間・時間分解能を持つオーロラ粒子センサーによる観測も行われている。この様な高性能の観測器を搭載した人工衛星は我々が関わった INDEX（打ち上げ後、「れいめい」と名付けられた）衛星計画が初めてである。

さて、この様なオーロラ現象に代表される地球・惑星周辺の宇宙空間ではどのような現象が起こっているのかについて解説しながら、以下に研究紹介を行う。

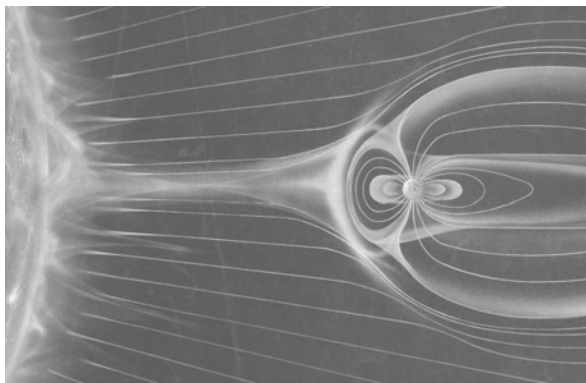


図 1: 地球近傍の宇宙空間プラズマの概念図  
太陽(左)から吹き出す太陽風と地球磁気圏(右)



写真 2: 幾重にも折り重なったオーロラの例  
(地上からの撮影)

太陽コロナから加速され流れ出す太陽風は地球にとっては超音速のプラズマ流である。その

平均速度は秒速 400km であり、1~10 個/cc 程度のプロトン・ $\alpha$  粒子・電子が主成分である。この太陽風が磁気(双極子型の地球固有磁場)の壁で守られた地球超高層大気領域(磁気圏・電離圏)に吹き付けた時、様々な電磁場・プラズマ現象が起こる(図 1)。これらの幾つかは、スペースシャトルや宇宙ステーションの乗組員だけでなく、地上にいる我々でも実際に体験したり、時には驚異・脅威となる場合がある。例えば、北極圏・南極圏ではオーロラ現象(写真 2)が見られたり、極地方の電離圏を流れるオーロラ電流により様々な地上設備に誘導電流が発生し、変電設備の故障、大停電や原油・天然ガスのパイプラインの破損・腐食、等が引き起こされる。地球近傍の宇宙空間で起こっている現象は実に興味深いものであり、また、宇宙の 99.9%以上を満たす宇宙プラズマの普遍的な素過程そのものである。例えば、超音速の流体(太陽風)中に障害物(地球磁場)があるのだから、地球を取り囲む様に衝撃波が生成される。衝撃波通過時に太陽風は減速され、流れの方向が地球磁気圏を避ける様になる。この時、減少した運動エネルギーは内部エネルギー(熱エネルギー)へと変換される。この辺りで起こっている現象は、磁化プラズマの天然の実験室として格好の研究対象であるが、まだ地球磁気圏外なので地上からはほとんど探知出来ないし影響もないので、人工衛星等を使った直接観測が主流である。宇宙プラズマ中の衝撃波の物理は、昨今の高エネルギー天文学でも重要視され広い分野で理論的・観測的研究が進んでいるが、プラズマダイナミクスを直接観測出来る地球・惑星近傍での我々の衛星観測計画は、極めて有効な手法といえる。

衝撃波を通過した太陽風の一部は地球磁気圏の外側境界層へと吹き付ける。しかし、太陽風は荷電粒子の集合体であるため地球磁場をたやすくは横切れない。ローレンツ力のため磁力線の周りには回りく回りと向きを変えられるからである。従って、磁気圏境界層では、吹き付ける太陽風の圧力(動圧)と地球磁場の磁気圧が「せめぎ合い」、それらがつり合う事で磁気圏の形がほぼ決定される。それら以外にも、太陽風プラズマは太陽面から延びる磁力線を運んでくるし、内部(熱)エネルギーもあるので、それらも境界層を変形させる圧力となる。また、地球磁気圏内にも太陽風ほど密度は高くないものの、より高温(数千万度)の磁気圏プラズマが存在し、地球磁場と共に太陽風からの圧力を支えている。

それでは、磁気圏境界層では太陽風と地球磁気圏との圧力が均衡し太陽風は跳ね返されるだけか、という点で磁場中での宇宙プラズマの振る舞いはそれほど単純ではない。太陽風が運ぶ惑星間空間磁場と地球固有磁場の関係を見てみよう(図 2)。それらは太陽風が境界層にぶつかる前はつながってはいない。しかし、境界面に押し寄せた後(図 2 の 1、1'),そこで太陽風磁場と地球磁場が「せめぎ合い」を続けるよりは、お互いの磁力線がつなぎ換わり、拮抗している領域から一緒になって押し出される方がプラズマや磁力管の輸送には都合がよい(図 2 の 2)。この状況は、お互いの磁場の方向がほぼ反対方向を向いている場合に起こりやすく、「磁力線の再結合(リコネクション)」と呼ばれている。最近では太陽フレアやより遠くの天文現象でも同じ原理が働いていると考えられる様になってきた。

この様に、地球磁気圏境界層で太陽風磁場と地球磁場がいったん再結合されてしまうと、太陽風はその磁力線に沿って地球磁気圏の昼間側から夜側の磁気圏尾部領域へと進入出来る様になる(図 2 の 5)。このプラズマの振る舞いは、小川に置かれた小石周辺の水の流れとよく似ている。その結果、太陽風プラズマは地球夜側の磁気圏へとため込まれる。この領域はプラズマ



シートと呼ばれ、熱いプラズマの貯蔵庫となっている。

プラズマシート中の高温プラズマはその後様々な過程・領域を経る。一部は地球双極子磁場の磁力線に沿って地球極域に降り込み、華麗なオーロラ発光現象(写真 2)を見せてくれる。他の一部は数 MeV 程度まで加速され、気象・放送・通信などの分野で使われる人工衛星の電子回路に悪影響を及ぼす。またあるものは地球磁気圏内に蓄積し切れなほど大きなエネルギーをもたらすので、磁気圏尾部で磁気圏磁場同士の再結合を起こし(図 2 の 6、6' )、熱いプラズマを含んだ磁力線を丸ごと太陽風領域へと放出する事で磁気圏全体のエネルギー収支のバランスを維持する。この際に地上ではオーロラが現れたり、電磁場が乱れるのが観測される。

マを含んだ磁力線を丸ごと太陽風領域へと放出する事で磁気圏全体のエネルギー収支のバランスを維持する。この際に地上ではオーロラが現れたり、電磁場が乱れるのが観測される。

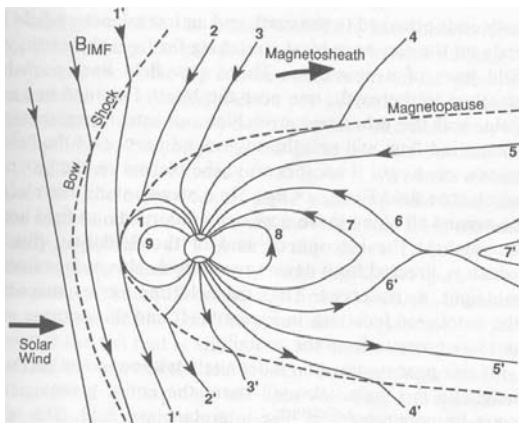


図 2:磁気圏前面(1)と尾部(6)での磁力線の再結合

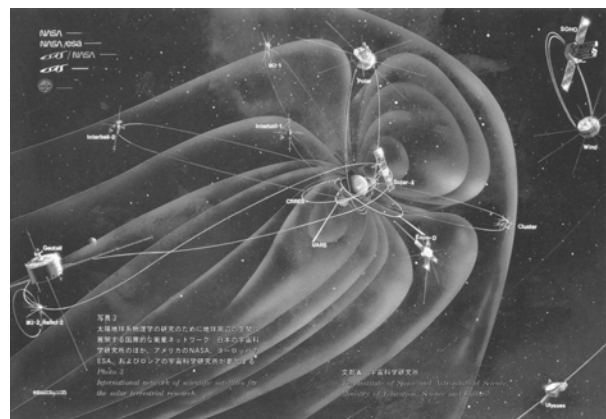


図 3: ISTP の科学探査人工衛星群

このようなダイナミックな太陽風・磁気圏プラズマの物理機構を調べるため、我々はプラズマ観測器を始め、高エネルギー粒子観測器、磁場・電場計測器、プラズマ波動観測器を開発し、1989年にEXOS-D(あけぼの)衛星を、1992年に日米共同プロジェクトとしてGeotail衛星を打ち上げ、観測を続けている。因みに、地球電離圏から上層の地球大気・磁場の勢力圏をexosphere(外圏)、地球夜側に伸びる細長い磁気圏をgeotail(地球の尾)と一般に呼んでいる。このような大規模な観測計画は、日本だけでなく米国・欧州・ロシア等と国際共同体制で行われており、International Solar-Terrestrial Physics Program(ISTP)による科学探査人工衛星群が打ち上げられ研究されている(図 3)。

次に、地球から見えるプラズマ現象として、極域でのオーロラを考えてみよう。オーロラ発光は、プラズマシートから地球向きに大規模な静電場で加速されて降り込んでくる電子が、高度 100km の電離圏下部に達するまでに地球大気原子・分子と衝突を繰り返し、それらを励起・発光させる事で説明される。ここで、電子が地球方向に静電場で加速されるなら、地球電離圏に豊富に存在する水素・酸素やヘリウムなどの正イオンは同じ電場により反対方向にプラズマシートへと加速され地球の重力圏を脱出している事が予想される。実際、地球大気は太陽光で

電離されイオンとなった後、極地方ではオーロラ電子と逆向きに地球から大量に逃げ出している事が、やはり衛星観測で明らかにされつつある。

さて、アラスカやカナダ北部、スカンジナビアで観光客の目を楽しませるオーロラとそれを光らせる電子の微細な空間分布・構造を解明するために、我々の研究グループでは小型の人工衛星を打ち上げ、様々な観測計画を遂行中である。冒頭に紹介した通り、この衛星はれいめい衛星と呼ばれ(図 4)、世界最初の人工衛星であるスプートニク 1 号や史上初の宇宙飛行士となったユーリ・ガガーリンが宇宙へと飛び立ったカザフスタン共和国のバイコヌール宇宙基地より、2005 年 8 月 24 日に打ち上げられた。理学観測機器開発の中心となっているのは、立教大学、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部、国立極地研究所、それに東北大学である。

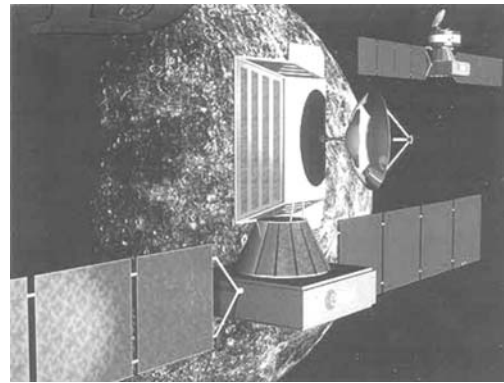
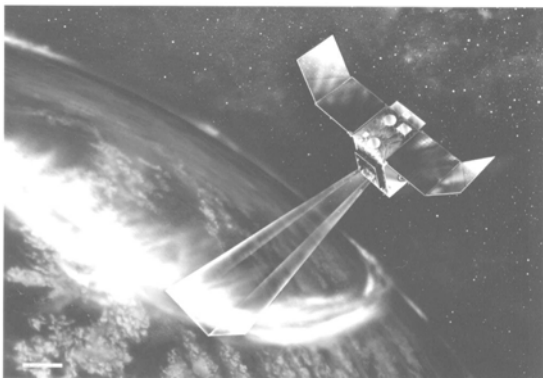


図 4: オーロラ観測中のれいめい衛星の想像図 図 5: 日欧共同の水星探査探査機の想像図

地球とは異なり、固有磁場を持たない、あるいは弱い固有磁場しか持たない惑星と太陽風との相互作用は一体どうなるのだろうか？また、固有磁場はあるが濃い大気がない惑星の場合はどうであろうか。これらはそれぞれ金星・火星の場合と水星の場合に当てはまる疑問である。現在、日本でも宇宙科学研究所が中心となって様々な惑星探査計画が進行中である。日本初の火星探査衛星 Planet-B(のぞみ)衛星は、1998 年に鹿児島県内之浦町の宇宙空間観測所から宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の M-V ロケットにより打ち上げられたが、残念ながら火星周回軌道に投入される事が出来なかった。しかし、太陽風と火星上層大気との相互作用を調べる宇宙プラズマ物理学、更には惑星大気進化の視点からも火星探査の継続は重要であり、現在、米国・欧州が精力的に探査計画を実施している。日本も今後の新しい火星探査の可能性を議論する必要があるだろう。その他に、以下の通り、将来の科学探査人工衛星計画も数多く計画され、他惑星や月へと研究対象を広げつつある。

1. ヨーロッパ宇宙機構 (ESA) の水星探査計画 (BepiColombo 計画: 図 6) への協力として、2013 年の打ち上げを目指し日本で計画中の水星磁気圏探査衛星 (Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO)
2. 2009 年に打ち上げ予定である日本独自の金星気候探査衛星 (Planet-C)
3. 2008 年に打ち上げ予定の月周回探査衛星 SELENE

我々の研究グループは、これまでの探査衛星計画での観測器開発・データ解析の経験を活かし、水星・金星や月、それに将来は木星などへも探査機を送り込む事を考えており、21世紀の科学研究のフロンティアを開拓しつつある。この様な国際的大規模プロジェクトに代表される我々の研究体制は立教大学、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部(神奈川県相模原市)や国立極地研究所(板橋区)、東京大学、京都大学、東北大学、九州大学、東京工業大学、名古屋大学、早稲田大学などと共同で行われており、その研究内容は、衛星計画の立案・観測機器の開発・データ解析・モデリング・数値シミュレーション等に代表される。特に宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部は、国立大学・私立大学を問わず一般の学部生・院生に広く門戸を開けており、立教大学からも衛星計画に参加出来る。宇宙科学に関連した卒業研究や修士・博士課程での研究に興味があり、「好奇心」と「体力」と「知力」、それに「やる気」を持った人が、衛星搭載用観測器の設計・試作・開発やデータ解析・モデリングに取り組むのを期待している。