

図1  
Chandra 衛星による銀河中心付近の硬X線イメージ(3-8keV)。左下斜めの黒い線が銀河面。銀河中心核(Sgr A\*) 付近に広がる高温プラズマと、中心から噴出するX線のジェット状構造(knot 1-3)が見える。(Senda, A. et al. 2004)

## 第4号の内容

### 1. 短報

我々の銀河系中心：超高エネルギー現象の謎と中心核ブラックホールの過去に迫る

### 2. 研究室紹介

基礎物理学研究所・素粒子グループ

### 3. COE ポスドク紹介

■発行■  
京都大学 21COE 物理学の多様性と普遍性の探求拠点編集委員会  
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学大学院理学研究科 物理学教室内  
TEL: 075-753-3758  
FAX: 075-753-3886  
e-mail: 21COE@scphys.kyoto-u.ac.jp

## 短報

# 我々の銀河系中心： 超高エネルギー現象の謎 と中心核ブラックホール の過去に迫る

真夏の夜ふと空を見上げると、満天の空を埋め尽くさんばかりの星が目飛び込んでくる。「天の川」といえば馴染み深いそれらの星々は、我々の住む太陽系と同じ銀河に属する星達だ。最近、この銀河系の真ん中が、我々の想像を絶する激しい現象に満ちていることを京都大学・宇宙線研究室の小山教授や千田さん達のグループが明らかにした。X線という高いエネルギーの電磁波を用いて、これまで判らなかった銀河系中心の活発な活動の痕跡を捉えることが出来るようになってきたのだ。「目には見えない意外性に富んだ現象を目の当たりにできるのが宇宙X線観測の面白いところですよ」と千田さんは言う。最近多くの成果を挙げ注目を集めている高エネルギー天文学。千田さん達の研究を通して、目では見えなかった遙か宇宙の彼方の現象を解き明かすことの出来る物理学の魅力を感じていただきたい。

図1からわかるように銀河の中心付近は硬いX線で明るく輝いている。図2aは、同じ領域を可視光で見たものである。可視光では銀河系の中心は銀河面に沿う星間吸収を受けて、真っ暗にしか見えないことがわかる。

「我々が銀河系中心を観測する為には、電波や赤外線といった低エネルギーの電磁波を用いるか、エネルギーの高い(硬い)X線(図1)やガンマ線といった電磁波を用いるかしかしかたがた、ガンマ線帯域ではまだ解像度の良いイメージの取得が技術的に非常に難しい。従って、少なくとも現時点では、高エネルギー現象が起こっている現場を直接押さえるには硬X線観測が最も有効な武器となるのです。」と千田さんが説明してくれた。

X線などの高エネルギーの電磁波は、ブラックホールや中性子星といった高密度天体へ周りの星などから物質が落ち込む際や、超新星爆発の衝撃波によってプラズマが加熱され

図1は米国X線天文衛星Chandraが撮影した、我々の銀河の中心領域(縦30光年×横20光年)のX線画像である。Sgr A\*(SgrはSagittarius「射手座」の略)と記されている位置が天の川銀河の運動学中心で、そこから吹き出すようなジェット状の構造が見えている(図1、knot1-3と記されている)。この銀河系の中心から噴出するジェットの観測などから銀河系中心のかつての活動の様子がわかるというから驚きだ。

我々の住む銀河系の形は、アンドロメダ銀河と同じように円盤状をしている。太陽系は、この銀河系の円盤状腕の真ん中からやや外側に位置する。

「可視光や紫外線は星間を漂うガスやちりによって吸収されやすい波長なのです。従って、銀河系中心から放射される可視光は地球まで届きません。」



図 2a  
可視光で見た銀河中心。サイズは縦  $17^\circ$  × 横  $20^\circ$  (約 8000 光年 × 10000 光年)。イメージ中央真横に走る黒い帯が銀河面。星間吸収を受けているため銀河面は黒く見え

た際に放射される。超新星爆発は、星が内部で作った重元素を星間空間に撒き散らし、これらは再び生まれる新たな星の源となる。一方、ブラックホールや中性子星といった高密度天体は、超新星爆発のあとに残されるいわば星の最期の姿である。また、多くの銀河の中心には大質量ブラックホールが存在することが知られている。このように、X線で観測できる天体現象は、星・銀河の進化や宇宙の元素組成と深く関わっている。つまり、銀河系中心をX線で観測することは、我々の銀河の歴史を知る有力な手段だと言える。

ところが、X線を使った宇宙観測には大きな壁が存在する。

「X線のほとんどは地球の厚い大気の吸収に阻まれて地上に達することが出来ないので。そこで、宇宙からやってくるX線を観測するためには、人工衛星によって検出器を大気圏外に打ち上げる必要があります。」

「X線天文学が始まったのは40年ほど前です。特に、1990年代に入ってから次々と打ち上

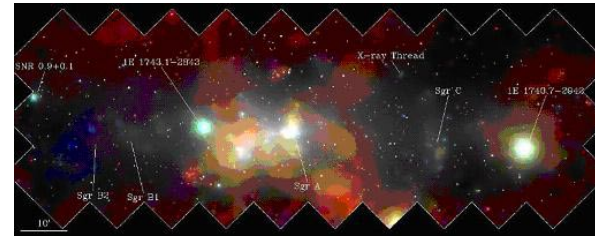


図 2b  
X線 (Chandra 衛星) で見た銀河系中心領域。サイズは縦  $0.7^\circ$  × 横  $1.8^\circ$  (約 300 光年 × 900 光年)。1-3keV の X線が赤色、3-5keV が緑色、5-8keV が青色で示されている。可視光とは対照的に、銀河中心付近に多様な天体が集中している様子がはっきりわかる。(Wang, Q. D. et al. 2002)

げられた高性能なX線天文衛星の活躍で、目覚ましい進歩を遂げているところなのです。X線天文学は、比較的若い学問分野といえるでしょう。」と千田さんは言う。

その発展には日本が打ち上げたX線天文衛星「あすか」の寄与が大きい。(図3左)「それまでの衛星では、エネルギーの高いX線のイメージングは困難で、2keV以下の軟X線しか撮像が出来ませんでした。ところが「あすか」はこの技術的困難を克服し、銀河系中心を観測するのに必要な2keV以上の硬X線のイメージとスペクトルを同時に測定することを可能にした世界初の衛星でした。」

こうして、10年ほど前から日本の「あすか」グループを中心としたX線による銀河系中心の探索が本格的にスタートした。

「「あすか」や「Chandra」などによるX線観測の結果、電波や赤外線での観測で判らなかった銀河系中心に関する多くの新しい発見がありました。これまでの電波や赤外線の観測結果から、銀河の運動学中心 (Sgr A\*) の位置には太陽の約300

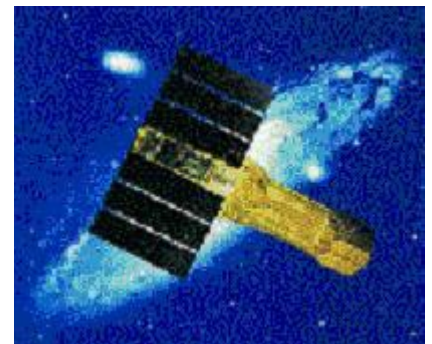


図 3  
日本の X線天文衛星「あすか」(1993-2001) と「Astro-E2」(2005年初旬打上げ予定)

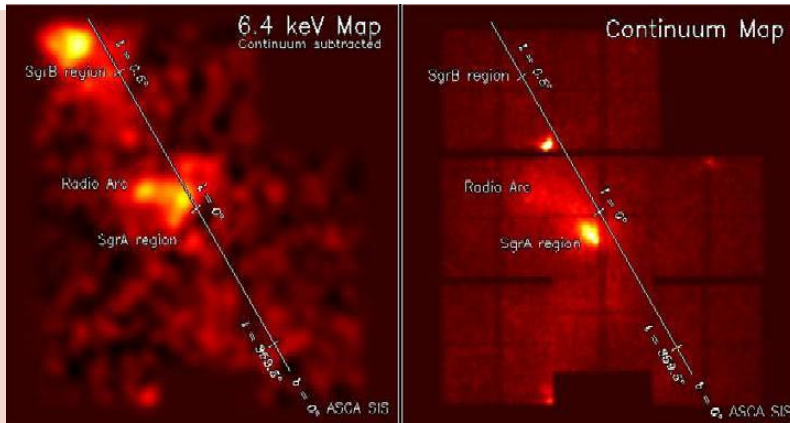


図4  
「あすか」で捉えた銀河系中心から放射される連続X線(左)と6.4 keV中性鉄輝線(右)のイメージ。サイズは約 $1^\circ \times 1^\circ$  (500光年四方)。連続成分はぼんやり全体に拡がって分布している一方、中性鉄輝線は局在している。局在している位置はそれぞれ低温分子雲の位置に一致している。(Koyama, K. et al. 1996)

万倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが存在する証拠が得られていたのですが、「あすか」の観測によって、この中心核ブラックホールを含めた銀河中心近傍には様々な不思議があることがわかってきたのです。」

謎は大きく分けて3つあるという。

「まず、Sgr A\*は中心核ブラックホールにしては非常に暗いということが挙げられます。我々の銀河系中心に存在するブラックホールの輝度は $L \sim 10^{33}$  erg/s から  $L \sim 10^{35}$  erg/s ほどで、通常の銀河中心核ブラックホール( $L > 10^{42}$  erg/s) に比べて7桁～9桁も暗いのです。」

「第二に、周囲には非常に高温(摂氏数千万～1億 $^\circ\text{C}$ くらい)のプラズマが分布していることが判りました(図4右)。そのプラズマの持つ熱エネルギーの総量は、超新星爆発1000発分のエネルギーに相当する莫大なものです。これ程高エネルギーのプラズマがどうやって生成されたのが全くの謎なのです。」

「第三に、過去の電波観測から銀河中心付近には低温の分子雲が多数存在していることがわかっていました。驚くべきことに6.4keV中性鉄輝線の観測から、低温分子雲の分布と6.4keV輝線の強い領域(図4左)とが重なることが判ったのです。X線という高エネルギーの電磁波が、絶対温度100Kにも満たない冷たい分子雲から放射されていることになるわけですから、常識的に考えればかなり変わった現象が起こっているといえます。」

これらの、一見奇妙に見える現象の数々が、最近の千田さん達の研究によってかなり理解

できるようになったという。

「まず我々は、銀河系中心周辺の分子雲が付近の強力なX線天体によって照射されているのだと考えました。しかし分子雲付近にはそのような明るいX線天体は見つかりませんでした。そこで次に、現在は暗い中心核ブラックホール(Sgr A\*)が、かつてはX線で明るく輝いていて、その時期に放射されたX線を分子雲が現在反射して輝いているのだと考えました。分子雲から放射されるX線の明るさと銀河系中心からの分子雲までの距離を考えて計算すると、銀河系中心は300年前には今よりも約6桁近く明るかった( $L \sim 10^{39}$  erg/s)と考えられます。」つまり、低温分子雲が中性鉄輝線で輝いているのは、何らかの理由で現在暗くなってしまった中心核ブラックホールがかつては明るく輝いていた証拠だということだ。

「その理由として、超新星爆発の衝撃波が降着に必要な物質を持ち去ってしまったからだというふうにも考えられます。銀河系中心近くには実際に、それを示す超新星爆発の残骸(SNR)が見つかっています。」

ブラックホールがX線で輝いて見えるのは、強大な重力エネルギーのため、そこに落ち込むガスが高温に熱せられ、X線として放射するからである。つまり、落ち込む物質が無くなってしまえばブラックホールは光らなくなるというわけである。今から約300年前には、巨大なブラックホールへは物質が落ち込んで(降着して)、銀河系中心は激しく活動し明るく輝いていた。ところが、約数千年前に銀河系のごく近傍で起きた超新星爆発の衝撃波がごく最近、中心核ブラックホールを通過したため、銀河系中心の周りの物質を吹き飛ばしてしまい、現在では落ち込む物質が無くなって一時的に暗くなってしまったと考えられるのだ。

これらの仮説を支持する新たな根拠となるのが、図1にある銀河系中心から直線状に噴出する3つのジェット状の構造だ。

系外銀河の中心核やクエーサーと呼ばれる遠方天体から噴出するジェットの観測例は多数あるが、その生成過程は未だ完全には理解されていない。高エネルギーの物質がブラックホールに落ち込む際、角運動量を保存する為に、降着円盤と垂直な方向に物質が噴出される。高速で飛び出した荷電

粒子が、強い磁場にまきついてシンクロトロン X 線を放射するなどと考えられている。「我々は最近の Chandra の観測によって、銀河系中心から一直線に伸びる 3 つの X 線ジェット状の構造を検出しました。2 年にわたる観測の結果と過去の電波による測定結果から、そのジェットの視線方向に垂直な運動速度を評価することに成功しました。その結果はジェットが光速の 3-5% 程度という物凄いスピードで銀河系中心から遠ざかっている可能性を示唆するものでした。銀河系中心核とそれぞれのジェットとの距離は 10-30 光年です。つまり、約 300 年前およびそれ以前には銀河系中心が今よりも活発に活動していて、この時期に断続的に噴出したジェットだと考えることが出来ます。このタイムスケールは、先ほどの低温分子雲の見積もりと見事に一致します。」

銀河の中心から勢いよく噴出すジェットの画像は、かつての銀河系中心の活動の激しさを想像させてくれる。

しかし、謎は全て解き明かされたわけではない。「何故、銀河系中心の周囲にこれ程高温のプラズマが存在するのかは未だはっきりわかりません。」

多くの超新星爆発、あるいはブラックホールの過去の爆発現象の痕跡だと考えれば説明できるかも知れないが、それをはっきりと裏付けるだけの証拠はまだないようだ。あるいは、全く別の非熱的な物理素過程で高温プラズマと似たスペクトルを再現できることが最近の研究から示されている。これらの議論の決着には、日本の最新鋭 X 線天文衛星による観測が決定打になるという。

「来年 2 月に打ち上げ予定の X 線天文衛星「Astro-E2」(図 3 右)にはこれまでの衛星よりも約 20 倍エネルギー分解能に優れる XRS 検出器が搭載されます。これは従来の回折格子ではなく、カロリメーターの原理を用いることにより、空間的に広がった天体の詳細分光観測を世界で初めて可能にするものです。XRS によって、銀河系中心高温プラズマが放射する鉄輝線スペクトルの詳細分解が可能になります。輝線の強度比・線幅・ドップラーシフトなどの情報から、プラズマの詳細な温度構造や熱運動の情報をこれまでになく精度で得ることが期待できます。さらに非熱的な素

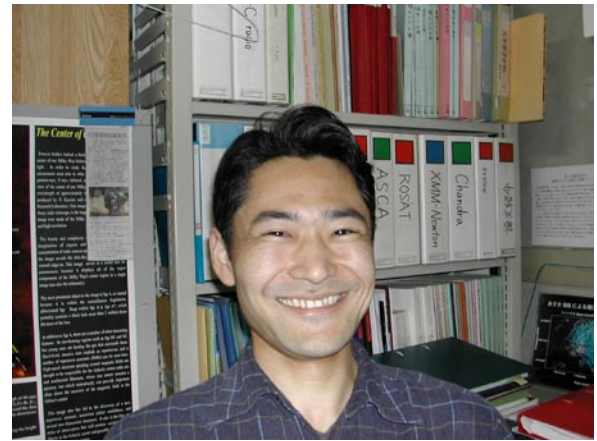


図 5 笑顔で取材に応じる千田さん

過程で放射されている輝線が存在するかどうかも判別可能となるでしょう。」

プラズマの温度や電離度、熱運動の情報がわかれば、銀河系中心に高温のプラズマがどのように形成されていったのかがわかるようになることだろう。そうすれば、なんらかの爆発現象の痕跡で説明できるのか、非熱的な物理過程が寄与しているかどうかもわかる。更に、銀河系中心のかつての姿を映す新たな証拠が見つかるかもしれない。

「これまでの X 線観測は、我々の銀河系の中心が多く謎に満ちていることを教えてくれました。そして我々の観測の結果、その謎の一部は解き明かされようとしています。しかし、未だ謎は多く残っています。我々の銀河の中心は、過去に一体何が起きて現在どうなっていて、さらにこの先どうなるのか、その来し方行く末を統一的に理解したいのです。」と千田さんは語ってくれた。

銀河系中心は可視光では決して見えない世界である。この見えない領域を異なるエネルギー領域の電磁波で観測し、物理的な考察を加えることで自然の不思議な現象を解き明かしていく。これはまさに物理学の持つ醍醐味である。これまでベールに包まれてきた銀河系中心のことが完全に理解される日が来るのもそう遠くはないだろう。

(物理学第一教室 毛利真一郎)

## 研究室紹介

# 基礎物理学研究所 素粒子論グループ

### スタッフ

教授 九後 太一、二宮 正夫、静谷 謙一

助教授 佐々木 隆、大野木 哲也、国友 浩、野尻 美保子、笹倉 直樹

助手 寺崎 邦彦、杉本 茂樹

### はじめに

基礎物理学研究所には、素粒子論、原子核理論、宇宙物理学、物性理論、などの理論物理学の全ての分野の研究グループがあります。今回はその中でも最も大きな素粒子論のグループがどのような研究をしているのかを紹介します。

本研究所でも最も多くのメンバーが研究し、世界的にも活発に研究されているのは「超弦理論」です。超弦理論は、この世界にどのような物質や力の場が存在するのか、ということから、それらの存在する時間空間のあり方までを決定する、究極理論と目されているものです。これは、いわばトップダウンのアプローチであり、超弦理論という一つの理論からこの世界の事柄の全てを導き出してこようという極めて野心的な、理論屋にとっては挑戦的な研究ですが、現在のところ幸か不幸か、この理論によって未だこの世の事柄を具体的に説明できたことはありません。

このようなトップダウン・アプローチの代わりに、もっと地道に、現在のあらゆる実験をうまく説明している標準理論から出発して、それを拡張してより統一的な理論を探してゆこう、というボトムアップ・アプローチがあります。SU(3) × SU(2) × U(1) 群にもとづくゲージ理論である標準理論の成功と確立は、同時に標準理論を超える「大統一理論」の存在を強く示唆しています。どうい大統一理論なのか、超対称性はあるのか、などを色々な実験的事実や予言のチェックを手がかりとして研究するアプローチで、「素粒子現象論」とも呼ばれています。

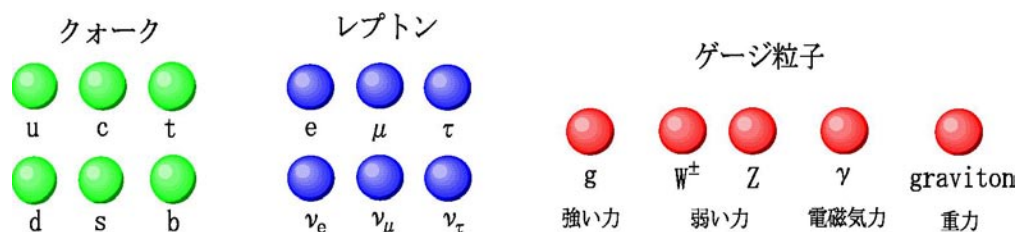
素粒子論や物性理論の基本的言葉である場の理論は、摂動論を超えたところでは余りよくわかっているとは言えません。「可解な場の理論」の研究は、高い対称性により厳密に解ける場の理論を見つけ解析することにより、場の理論の摂動論を超えた豊かな側面を教えてください。

一方、標準理論は素粒子論としては既に「わかった」理論ではありますが、実際に例えば、クォークの束縛状態としてメソンやバリオンを計算したり、その強い相互作用による散乱振幅や、弱い相互作用による崩壊幅、などを計算できる、訳では全くありません。これらは全て摂動論では計算できないものです。これを行うには現在のところ「格子ゲージ理論」の方法しかありません。

以下ではこれらのそれぞれについて、もう少し詳しい解説を与えます。

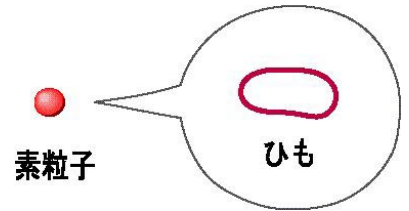
### 超弦理論

現在のところ、あらゆる物質はクォークやレプトンと呼ばれる素粒子から構成され、それらはゲージ粒子と呼ばれる素粒子の働きによって互いに相互作用をしていると考えられています。クォークにはアップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトムという名前と呼ばれる6種類があり、レプトンには電子、ミュー粒子、タウ粒子と3種類のニュートリノがあります。相互作用には強い力、弱い力、電磁気力、重力の4つの種類があることが知られており、それらの力を媒介するゲージ粒子としてグルーオン、W粒子、Z粒子、光子、重力子があります。



世の中に存在する膨大な種類の物質がすべてこれだけの素粒子によって成り立っているということはそれはそれで驚くべきことですが、なおもどうしてこれだけの種類の素粒子が存在するのかという素朴な疑問は未解決のまま残されています。一方、これらの素粒子の従う物理法則は素粒子の標準模型と呼ばれる理論でとてもうまく記述できることが分かっているのですが、この理論には重力が量子論として正しく含まれていないという明らかな欠陥があります。アインシュタインの重力理論をそのまま組み込もうとすると、量子論的な計算にどうしても取り除けない発散が生じてしまうのです。

こうした問題を一举に解決し、自然界に起こるあらゆる物理現象を原理的に説明しうる究極の理論の候補であるとも言われるのが弦理論です。弦理論というのは、素粒子が実は点粒子ではなく、良く見るとひも状になっているという仮説に基づく理論です。



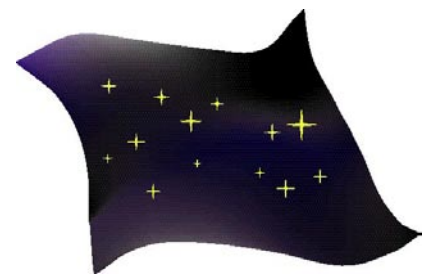
ひも状をしていると、その振動の仕方の違いで、様々な粒子を表すことができます。これによって、クォークもレプトンもゲージ粒子も全て一つのひもから生じることが可能となるわけです。特に、その中に重力子も含まれています。そして、その量子論的な計算に通常現れる発散が奇跡的に相殺して、矛盾のない量子重力理論を含むということが弦理論の著しい特徴です。

こうした弦理論にもいくつかの種類があるのですが、現実世界を記述しようと有望視されているものには超対称性と呼ばれる対称性があり、超弦理論と呼ばれています。この超対称性というのは粒子のスピンが整数であるボーズ粒子とスピンが半奇数であるフェルミ粒子を入れ換えるような不思議な対称性です。このような対称性があると、例えば電子のようなフェルミ粒子に対して、そのパートナーとなる未知のボーズ粒子が存在するはずであるということを予言します。このような粒子はまだ未発見なのですが、近い将来の実験でこの超対称性の証拠が見つかるのではないかと多くの研究者が期待しています。

さらに、超弦理論は時空の次元が10次元であることを予言します。私たちが日常感じることができる時空の次元は、時間が1次元と空間が3次元で、これらをあわせると4次元ですが、この他に6次元分の自由度が隠れているという驚くべき予言です。この6次元の方向は現在の観測技術では識別できないくらい小さく丸まっていると考えられています。この隠れた6次元空間がどのような形をしているかで、どのような素粒子が実現されるのかが決まります。その中に、現在のところ知られている素粒子を統一する理論と考えられている大統一理論が自然に含まれていることが1980年代の半ばに発見され、大きなインパクトを与えました。

1990年代の後半になって、再び超弦理論の激動の時代が訪れました。超弦理論の中にDブレーンと呼ばれる膜状の物体が存在することが発見されたことなどが契機になって、私たちが住んでいる宇宙が10次元時空の中の4次元の膜の上に実現されているのではないかというシナリオも生まれ、現在でも活発に研究されています。

また、このDブレーンはブラックホールを形成することがあります。これによって、超弦理論を用いてブラックホールを量子論的に解析することが可能になるなどの著しい発展がありました。我々のグループも、このような超弦理論の新たな発展を踏まえつつ、究極の理論の完成を夢見て日夜研究に取り組んでいます。



### 素粒子現象論

素粒子の性質を記述する素粒子標準模型にある疑問点を解決する可能性のある超対称模型を、将来行われる実験との関連を重視して研究しています。

素粒子標準模型は現在の実験データをほぼ正しく記述していますが、一方で、なぜ強さの異なるゲージ相互作用が3つあるか、電荷がなぜ量子化されているか、などの問題がありました。これを説明するために提唱された大統一理論は、複数のゲージ場の存在や、電荷の量子化を、より大きな対称性をもつゲージ相互作用に3つの力が統一される、という描像で説明します。しかし、この理論はゲージ対称性の統一

がおこるスケールに比べて、ゲージ対称性の破れのスケールが小さすぎることからくる「階層性の問題」を抱えています。

超対称標準模型とは、スピン1/2の粒子とスピン0の粒子といった、統計性の違う粒子との間に働く対称性です。この対称性で予言される粒子が存在すると理論の2次発散が緩和され、階層性の問題を説明する枠組みができます。また、超対称性があると、大統一理論の予言どおり、ゲージ結合が10の16乗 GeV というたいへん高いスケールで統一するということが明らかになっています。さらに、ストリング模型のような重力を含む統一理論は超対称性をもっており、超対称性が自然界にあると証明されることは、理論にとっても大きなインパクトを与えられます。

超対称性が理論的に発見されて30年以上たちますが、実験技術の発展によって、ついに具体的な検証を系統的におこなうことが可能となっています。CERNで2007年から始まるLHC実験では、超対称粒子を現状で探索できる質量上限の約5倍重い超対称粒子でも発見することが可能です。また超対称粒子の一つが暗黒物質となっている可能性も指摘されていますが、現在の100倍程度の感度を持ち、超対称粒子からなる暗黒物質を直接検証することも可能な実験が予定されています。

また、高いスケールでの相互作用は超対称模型の質量や相互作用に影響を与えることが知られています。このような相互作用に敏感なB中間子や、ミュオン希少崩壊モードの探索が予定されていて、高いスケールの物理を明らかにする上で重要であると考えられています。

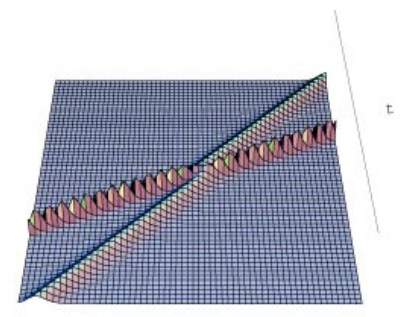
超対称粒子はLHCで生成されますが、すぐに崩壊して多数の粒子になるため、その性質を理解するためには多くの工夫が必要です。一方で、LHCではハドロンコライダーというバックグラウンドや、測定器の理解が重要で、理論的な研究だけでできることは限られます。このような研究は、理論と実験の研究者が共同で当たっており、理論と実験をつなぐ国際的なワークショップ、ワーキンググループのconviner等の活動を通じて、LHC実験で得られるデータ有効に活用できるよう研究をリードすることに努めています。過去2年ほどは、超重力模型等で興味深い性質が期待できる第三世代の超対称粒子の性質の研究等を行い、7件の研究を発表しています。一方、暗黒物質の物理、Bの物理や、ニュートリノの物理は模型構築を介してコライダー実験とつながっています。暗黒物質の性質や、B中間子やレプトンの性質に標準模型からのずれが現れた場合の超対称模型への制限の研究なども行っています。

## 可解な場の理論

ギリシャのデモクリトスを引き合いに出すまでもなく、太古の昔から人々は、「この世界は、そしてその中にあるいろいろの物はどのようにできているのだろう」と思いを巡らせてきました。より細かい、より基本的な構造を求めてミクロの階段を下りて、たどり着いた物質の究極的構成要素が「素粒子」です。よく知られていますように、これら素粒子の振る舞いを記述する理論（言葉）が場の量子論です。素粒子の振る舞いには、誕生（生成）、他の仲間（素粒子）とのつき合い（相互作用）、死（消滅）などが含まれます。

有限個（ $n$  個）の素粒子の振る舞いを記述する枠組みの中には、誕生と死とを組み入れると  $n \pm 1$  個も含まなければならず、この議論を繰り返して無限大自由度が必要なことが分かります。更に、非常に高いエネルギーを持つ粒子を扱うと、その速度がほとんど光速に近くなるので、特殊相対論的効果（たとえば、反粒子の存在や粒子・反粒子の対生成や対消滅など）が顕著になります。この相対論的不変性が理論に強い制限を与えます。最も成功したものは、時空の各点に一定の運動量とエネルギーを持つ素粒子を平面波的に作りだし・消す演算子を対応させ、それらを調和振動子の生成・消滅演算子と同様に扱うものです（摂動論的場の理論）。相互作用が強くなると、出発点の平面波の状態からの乖離が大きくなって収拾がつかなくなります。

そこで場の量子論の本質的部分を保持しかつ解ける性質を有した模型を作り、その種々の性質を具体的に研究することにより場の理論そのものを深く理解すること、特に摂動論を越えた場の理論の定



ソリトンの散乱

式化が「可解な場の理論」研究の目的です。多くの場合これらの「解ける場の理論」は、非常に高い対称性を持っており、「対称性 = 可解性」、それらはゲージ理論・弦理論に現れる無限次元対称性と密接に関係しています。強い相互作用を含んで、平面波でなく局在した物体（ソリトン）を基にした理論の構成がある程度の成功を納めており、その方法が（超対称）ゲージ理論・弦理論の多くの側面で顔を現し、新しい理論物理学の一分野を形作っています。

## 格子ゲージ理論

格子ゲージ理論は時空の格子近似によりゲージ理論を定義し、解析的数値的手法を用いて非摂動的に解くことを原理的に可能にするものです。

さて、素粒子論は(1) 実験や数学的手法をヒントに素粒子を支配する基礎理論を構築する。(2) その理論を深く研究し、検証や未知の現象の予言を行い、それをもとに新たな理論の探求へと更に進む。というステップで発展しています。この中で後者の観点から格子ゲージ理論という非摂動的手法が素粒子の基礎理論の探求と未知の現象の予言の両面において重要な役割を担うと期待されています。

具体例を挙げると、素粒子は3世代のクォークとレプトンのゲージ相互作用と湯川相互作用を表す「標準模型」によって記述されますが、世代構造や質量の起源が未解明の問題です。そのため現在ニュートリノ振動実験やB, D, K中間子崩壊実験での世代混合角、CP対称性を破る位相の精密測定が進行中です。しかし、閉じ込めという強い相互作用の非摂動効果のためクォークの情報を直接実験から引き出すことが困難です。また現象への応用的見地からは、宇宙初期や高密度性の内部での新しいクォークグルオン物質相の正体の問題があります。それを理解するために精密な観測や重イオン衝突実験が行われていますが、理想的な状況にコントロールできないため実験だけから情報を引き出すのは困難です。

これらの観点から、基礎物理学研究所の格子ゲージ理論の研究グループは以下の研究を精力的に行ってきました。

### 1) ハドロンの遷移行列の計算と基礎理論の検証の研究。

B中間子の崩壊定数とB中間子 - 反B中間子混合を表すバグ定数を2フレーバの動的フェルミオンを用いたQCDにおいて、計算し $|V_{td}|$ を決定した。また、B中間子の $\pi 1 \nu$ 準レプトニック崩壊の形状因子をもとめ $|V_{td}|$ を決定しました。また陽子崩壊の遷移行列を計算し、minimal SUSY SU(5) GUT に対してスーパーカミオカンデによる寿命の下限から厳しい制限がつくことを明らかにしました。

### 2) クォークグルオンプラズマ (QGP) 相でのハドロンの状態の研究。

有限温度でのチャーモニウムのスペクトル関数を計算し、臨界温度以上でもチャームクォーク間に強い相関があることが分かり、QGP相の実験的シグナルに関するそれまでの理解に変更が必要であることを指摘しました。

格子ゲージ理論の研究の面白さとは一体どういうものかについて述べます。単純に考えると作用を書いてコンピュータにいれればそれでおしまいのように思いますがそうではありません。「原理的になんでも計算できる」（がほとんど不可能）と「実際に計算できる」との間を埋め、理論の検証や予言まで到達することが研究の中で重要な位置をしめます。そのなかでも、格子理論や素粒子物理学の発展をみながら誰もが気が付かなかった問題に目をつけ新しいテーマを切り開く現象論的面白さ。対称性や場の理論など理論的アイデアを用いてとても解けない問題を解ける問題に置き換える理論的面白さ。計算方法を工夫して不可能と思われていた問題を可能にする（数値）実験的面白さ。そして時々、予想しなかった結果がでてそこから思わぬ発見をする物理的面白さ。などいろいろな側面があります。これらの色々な側面にわたって日夜研究に取り組んでいます。

これまで格子ゲージ理論を解く話でしたが、最後にひとこと格子理論の定義（定式化）についての研究テーマに触れます。実は素粒子論で重要なカイラルゲージ理論と超対称性はいまだに格子上では定義されていません。これは必ずしも格子理論の欠点ではなく、そもそもこれらの理論は発散が摂動論でコントロールできる場合以外は、実はきちんとした定義がないと言った方が正しいかもしれません。非摂動的なカイラルゲージ理論や超対称性理論の定式化はチャレンジングなテーマですが、単に技術的に新しいアイデアを必要とするだけでなく、もしかすると我々に概念の変更を迫る理論的な発見をもたらすかも知れないと期待しています。



終わりに

以上の研究以外にも場の理論の基礎的な問題から、その宇宙論や物性論への応用など、素粒子論という分野にとらわれない幅広い研究をしています。また構成メンバーもスタッフだけでなく、多くのポストドクや学生が研究に参加しグループの活動を支えています。

## COE ポスドク紹介

関 穰慶 所属：物理学第二教室

seki@gauge.scphys.kyoto-u.ac.jp

### 専門分野

素粒子論

### 研究内容

私は主に次の2つのテーマで研究を進めています。

1つは、超弦理論に関する研究です。超弦理論では、様々なモデルの間の双対関係 (duality) が考えられてきました。特に、最近では位相的弦理論を通して理解されるゲージ理論と行列模型の対応に注目して研究を行っています。位相的弦理論に関係する数学にも興味を持っています。

もう1つは、余剰次元の理論です。余剰次元を持った理論を考えることによって、ヒエラルキー問題や宇宙定数の問題について調べてきました。

### 略歴

1997年3月 京都大学理学部卒

2002年3月 京都大学大学院人間・環境学研究科修了

2002年7月～2003年5月 神戸大学理学部 学術研究員

2003年6月～2004年3月 理化学研究所理論物理学研究室 協力研究員

2004年4月～ 京都大学大学院理学研究科研究機関研究員 (21世紀COE研究員)



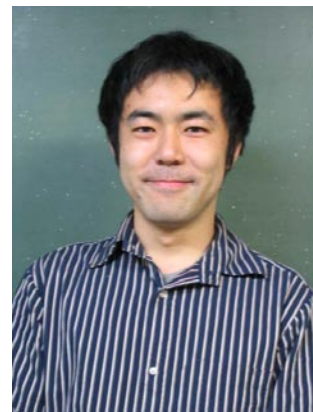
東條 賢 所属：物理学第一教室

tojo@scphys.kyoto-u.ac.jp

### 研究テーマ

これまで「原子」と「光」の相互作用について興味をもち、相互作用の見えやすい系のひとつ「近接場光」を使って研究をしてきました。原子は波動関数を解析的に表しやすいアルカリ原子を使い、遷移には外場の影響が大きな電気四重極遷移 (E2 遷移) を用いました。近接場は全反射によるエヴァネッセント光を利用して、反射スペクトル測定を行いました。近接場光中では波数ある程度自由に変化させることができますが、それによって原子の吸収が変化する (みかけの振動子強度が変化する) ことが実験および解析的にわかりました。またこの結果より、磁気双極子も含め多重極子遷移にも同様の可能性を示せました。

この4月からは量子光学研究室に所属しイッテルビウム原子の量子縮退に



ついて実験・研究を進めています。冷却原子や凝縮体では光と原子のさらに興味深い相互作用が期待できます。特に光会合を用いた分子の生成実験や、凝縮体の特性を決める重要なパラメータ「s波散乱長」の制御に興味を持っております。まだ私にとって新しいことだらけの毎日で、有意義な楽しい研究生活を送っております。さらに充実したものにすることも、少しでも早く皆様の厳しく楽しい議論に加われればと思っておりますので、どうぞ宜しくお願いいたします。

#### 趣味その他

趣味は音楽です。聴くのも演奏するのも好きです。特にFunkとJazzが私の脊髄の奥に響く感じで、非常にお気に入りです。実はなかなか分かってもらえる方が少なくて微妙なところですが、それがまた何とも言えないところでもあります。その他には、なぜか「のど飴」にはまっています。梅入りも好きですが、最近ではキシリトール入りが私の「のど飴指数」を上げてきています。このような私ですが、今後ともよろしくお願いいたします。

#### 略歴

1997年3月 京都工芸繊維大学 工芸学部 卒業  
1999年3月 京都大学大学院 工学研究科  
機械物理学専攻 修士課程修了  
2000年10月 京都大学大学院 工学研究科  
機械物理学専攻 博士課程編入学  
2003年9月 同大学院 修了 学位取得  
2004年10月 京都大学国際融合創造センター  
産学官連携研究員  
2004年4月 京都大学大学院理学研究科  
COE 研究員

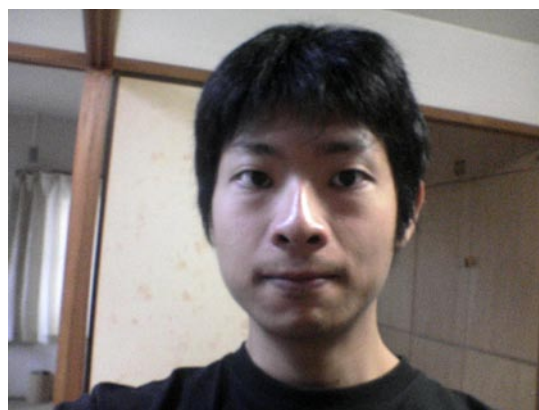
## 片桐 秀明

所属：物理学第二教室

katagiri@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

#### 自己紹介

2004年4月からCOE研究員として宇宙線研究室に配属しました片桐です。これまでは、千葉県柏市にある東京大学宇宙線研究所にいました。そこではCANGAROOというグループに所属していて、オーストラリアにある地上チェレンコフ望遠鏡を使ったTeVガンマ線の観測を行っていました。私の研究対象は、銀河内における宇宙線起源の有力候補と考えられている超新星残骸です。TeVガンマ線業界は、この10年で急速に成長し観測結果が得られています。超新星残骸についてもいくつかの天体からTeVガンマ線が



検出され、粒子加速の証拠が得られています。現在ステレオシステムの望遠鏡や、17mの大型反射鏡を備えた望遠鏡が建設されており、さらに加速度的に発展する様相を見せております。これらの観測機器がもしかすると私たちの想像しえない宇宙の姿を映し出すかもしれません。そのような環境・時代に仕事ができることを非常に幸運に思っております。

現在は、宇宙線研究室において引き続きCANGAROOでの研究を行うとともに $\mu$  PIC (Micro Pixel gas Chamber) という検出器を用いたX線偏光検出器を開発しています。私にとっては未知の領域であり、毎日いろいろなことを吸収しなければならぬ大変さがありますが、それがまた楽しくもあります。

休日には、京都を探索するのが日課となっております。平安神宮の枝垂桜は非常に優雅でした。研究以外の面でも京都は素晴らしい街だと感じます。

まだ日が浅く知り合いも少ないので、見かけてもし気が向いたら一言声をかけてください。ただし、おもしろい話が聞ける確証はありませんが。まだまだ若輩者ではありますがよろしくごお願い致します。

#### 略歴

1995年3月 茨城県立土浦第一高等学校卒業

1999年3月 東京大学理学部地球惑星物理学科卒業

2001年3月 東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻修士課程修了

2004年3月 東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻博士課程修了

2004年4月 京都大学理学系研究科 21世紀COE 研究員

## 出口 和彦

所属： 物理学第一教室

[deguchi@scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:deguchi@scphys.kyoto-u.ac.jp)

#### (自己紹介)

強相関電子系である層状ルテニウム酸化物、有機導体、重い電子系金属間化合物の超伝導状態において、その発現機構と深く関係している超伝導の秩序変数であるクーパー対の波動関数（超伝導ギャップ関数）の対称性を決定することにより、異方的超伝導の発現機構の理解を深めること、そして異方的超伝導に特有の新しい超伝導現象の発見をめざす研究を行っています。異方的超伝導は強相関電子系の酸化物、金属間化合物、有機導体など多様な物質で発現します。それらに普遍的な超伝導メカニズムの理解のために超伝導ギャップ構造の可視化がきわめて有効なアプローチになります。

上に挙げた強相関電子系の超伝導体を対象とし、極低温で超伝導状態における比熱の結晶軸に対する磁場方向依存性の測定を行っています。超伝導状態の磁場による準粒子励起の異方性の観測により、超伝導ギャップの構造の可視化、クーパー対の波動関数の対称性の決定することに現在は力を注いでいます。

#### (略歴)

1999/03 京都大学理学部卒業

2001/03 京都大学大学院理学研究科修士課程修了

2004/03 京都大学大学院理学研究科博士課程修了 理学博士

2004/04 ~ 京都大学大学院理学研究科 21世紀COE 研究員

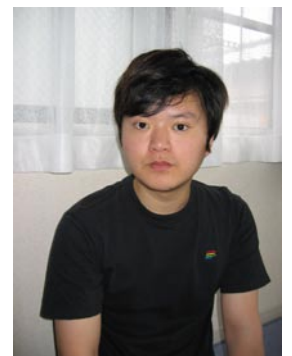


## 阿武木 啓朗

所属：基礎物理学研究所

[abuki@yukawa.kyoto-u.ac.jp](mailto:abuki@yukawa.kyoto-u.ac.jp)

阿武木です。専門は原子核・ハドロン分野です。これまで高密度においてQCD（量子色力学）の示す物性、熱力学に興味を持って研究を行ってきました。QCDは温度や密度などの外部条件によって極めて多種多様な物性を示すことが期待されています。特にカイラル臨界終点の存在や、高密度極限でのカラーフレーバー結合状態の存在などがここ数年の研究によって確信されるに至っています。今後は、中間的な密度領域における平均場を越えた揺らぎの効果、非閉じ込め臨界温度上におけるクォークグルオン物質の物性、原子核衝突実験における早期熱緩和の機構の解明、さらに急冷急膨張に伴うスピノダル分解（DCCなど）や核生成といった時間依



存の非平衡現象について研究を行っていきたいと思っています。

ぶらぶら散歩することが好きです。喫茶店で珈琲を飲みながらぼーっとすることも好きです。酒はウイスキー (Black Nikka) が好きです。あとはカラオケが好きです。よろしく。

#### 主要論文

1. STRUCTURAL CHANGE OF COOPER PAIRS AND MOMENTUM DEPENDENT GAP IN COLOR SUPERCONDUCTIVITY, Phys. Rev. D65, 074014, 2002.
2. COLOR SUPERCONDUCTIVITY IN SCHWINGER-DYSON APPROACH: STRANGE QUARK MASS AND COLOR FLAVOR UNLOCKING LINE, Progress of Theoretical Physics, 110, 937, 2003.

#### 略歴

1994年3月 私立浅野高校卒業(神奈川県)  
1998年3月 京都大学理学部卒業  
2000年3月 京都大学大学院理学研究科修士課程修了  
2003年3月 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了  
2003年4月～2004年3月  
京都大学基礎物理学研究所非常勤研究員  
2004年4月～  
京都大学基礎物理学研究所 21世紀 COE 研究員

#### 記者紹介

毛利 真一郎 (もうり しんいちろう) 物理学第一教室 D 1 専攻: 光物性

#### 編集後記

ニュースレターも、はや4号になりました。短報/探訪の記事は大学院生諸君のアルバイト取材・執筆によるものですが、毎回大変わかりやすい面白い記事に出来上がっているのに、いつも感心しています。担当の院生諸君の頑張りに、ここで改めて感謝したいと思います。わかりやすい文章になっているのは、院生諸君の努力もさることながら、違う分野の院生に取材してもらっている、というのも良いのでしょう。これは編集委員長のTさんの発案です。ナイスアイデアでしたね。ニュースレターの他の部分もなかなか読みごたえがあります。お忙しいところ研究室紹介の力作原稿を書いていただいたシニアの方々や、自己紹介執筆のCOE研究員の皆さんにも、感謝したいと思います。ニュースレターのおかげで、COEの各グループにどんな人がいてどんな研究をしているのか、だんだんとわかるようになってきました。特に、私のようにキャンパスから離れたところ(花山天文台)にいますと、キャンパスにどんな人がいるかすらも、なかなかわからないのですが、このニュースレターのおかげで次第に本COEグループの人々が身近に感じられるようになってきました。キャンパスや建物が離れていると、つい人は疎遠になりがちです。実際、これまでは、物理教室-宇宙物理教室-天文台のそれぞれの間に目に見えない障壁があるかのような印象でした。このような交流を通じて、そんな障壁が早くなくなれば良いと心から思います。先日もローレンツ祭に初めて参加しました。学生諸君やCOEの皆さんと色々話ができて、なかなか楽しかったですね。広報委員会としては、今後、こういう楽しい交流の機会もぜひ増やしていきたいと思っています。(編集委員 柴田一成)

■発行■  
京都大学 21COE 物理学の  
多様性と普遍性の探求拠点  
編集委員会  
〒606-8502 京都市左京区  
北白川追分町 京都大学  
大学院理学研究科 物理学  
教室内  
TEL: 075-753-3758  
FAX: 075-753-3886  
e-mail:  
21COE@scphys.kyoto-u.  
ac.jp

21COE 物理学の多様性と普遍性の探求拠点  
CDUP NEWS LETTER 編集委員会

柴田一成 shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp  
鶴剛 tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp  
国友浩 kunitomo@yukawa.kyoto-u.ac.jp  
田中耕一郎(編集長) kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp

第4号  
平成16年5月20日発行

CDUP News Letter  
No. 4