

目指すは究極の理論 —スパコンを使って超弦理論と ゲージ理論の等価性を検証する

京都大学基礎物理学研究所 伊敷 吾郎 特任助教

ブラックホールでは何が起こっているのか

2014年4月、米科学誌Scienceに掲載された論文「量子ブラックホールのホログラム的記述の数値的検証」※¹が世界の注目を集めています。その著者の一人、京都大学基礎物理学研究所の伊敷吾郎（いしき・ごろう）特任助教は超弦（ちょうげん）理論の研究者です。

建築を学んでいた伊敷さんは、学部3年生のときに、その後の人生を決める1冊の本に出会いました。「その本には『宇宙現象のすべてを記述できる究極の理論—超弦理論が完成間近である。その理論を完成すべく、世界中の研究者が英知を結集している』と書いてあったように記憶しています。超弦理論というのはそんなにすごい理論なのか。勉強してみたい、と思いました」と伊敷さんは当時の衝撃を振り返ります。

今では、超弦理論の完成を目指す一人となった伊敷さん。「超弦理論は、まだまだわからないことが多い。まるで暗闇のなかで手探りをしているようだ」と感じるそうです。

世界中の研究者が挑みながらもいまだに性質がつかみきれない「量子ブラックホール」。世界に先駆けて取り組んだ「量子重力効果」を考慮にいたれたブラックホールに関する研究についてお話を伺いました。



一般相対論の限界

銀河や恒星、惑星の運動など宇宙で起こる現象は、アインシュタインの一般相対性理論でほとんど説明できます。ところが、一般相対論は、重力が非常に強く極度に曲がった時空では破綻してしまいます。たとえば、半径が非常に小さいブラックホールの中心付近や、まだ体積が非常に小さかった初期の宇宙などです。目に見えないようなミクロな世界は、一般相対論では説明できないのです。

曲がりの大きな時空で起こる現象を説明するには、ミクロな世界を支配する量子力学的な考えを入れる必要があります。「ある物理量になる確率がこのくらい、また違う物理量になる確率はこのくらい」という考え方をする「量子重力効果」を使います。すると、時空そのものが不確定性を持って揺らいでいる状態を数式で表せるようになります。

超弦理論の可能性

「量子重力効果」を扱える理論として有望視されているのが、1980年代に生まれた超弦理論です。これは力を粒子が媒介し、その粒子は非常に小さな「ひも（弦）」のようなふるまいをすると考えられる理論です。0次元の点ではなく、1次元のひもで考えると他の理論と決定的に違います。超弦理論を使えば、自然界で働く4つの力（重力、電磁力、強い力、弱い力）を統一的に扱えるのではないかと期待されています。

超弦理論はとても複雑な理論で、未知の部分が多く残されています。私たちは、「宇宙は4次元時空」と捉えています。

ます。ところが、超弦理論では、「宇宙は10（あるいは11）次元である」としないと矛盾が生じてしまいます。私たちが認識している4次元+私たちが認識できていない6（あるいは7）次元で説明するというのです。

ところが、いまのところ超弦理論で定式化（方程式で書き表すこと）ができていないのは、10次元の平坦な時空上の場合と、あるわずかに曲がった時空の場合だけです。あらゆる曲がった時空の上で定式化できるという段階まで研究が進んでいないというのが実情です。

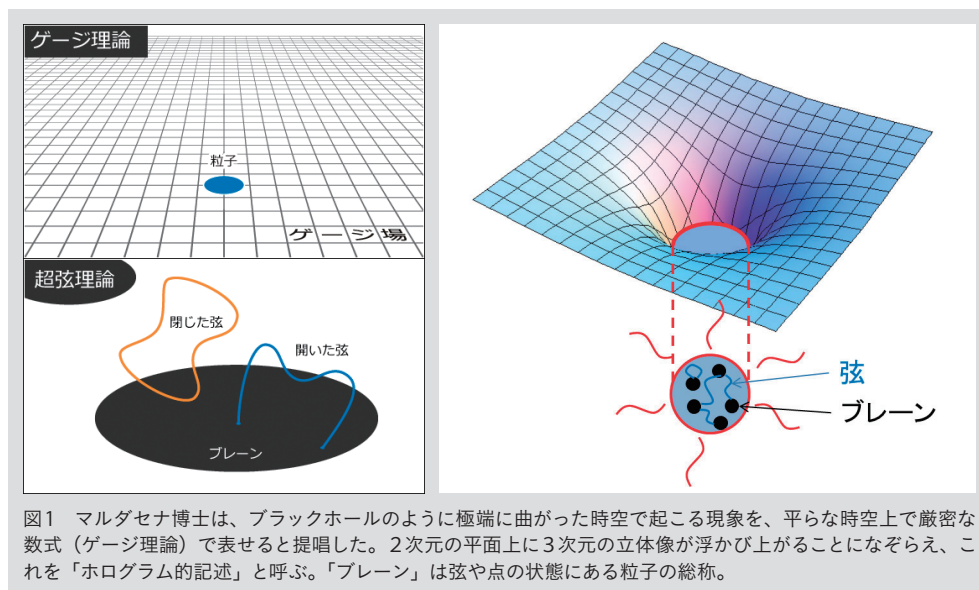
物理学者マルダセナの仮説は正しいのか

超弦理論でなくてもブラックホールを理解できるのではないかという画期的な考えを1997年にアルゼンチン出身のマルダセナ博士が発表しました※2。「ゲージ理論を使ってブラックホールを記述できる」という仮説です。

「ゲージ理論と超弦理論は等価性を持つ」ことを意味するこの仮説は、にわかには信じがたい側面を持っていました。なぜなら、ゲージ理論と超弦理論は多くの点で異なる理論だったからです。超弦理論が4つの力すべてを記述できるのに対して、ゲージ理論は重力を記述できません。また、超弦理論が10（あるいは11次元）なのに対し、ゲージ理論は1～4次元で記述されます。

一方で、この仮説に物理学者たちは大きな期待を寄せました。というのも、ゲージ理論は超弦理論よりはるかに理解が進んでいる理論だからです。もしこの仮説が本当ならば、ブラックホールなどの曲がった時空の理解が一気に進む可能性があります。

世界中でこの仮説を検証する研究が始まっています。いまのところ「この仮説は正しくない」という事例は見つかっていません。ただし、これまでの研究は比較的大きなブラックホール、つまり量子重力効果が無視できる領域の研究ばかりです。量子重力効果を含めると、超弦理論もゲージ理論も計算が非常に複雑になるため、多くの研究者が敬遠していたのです。



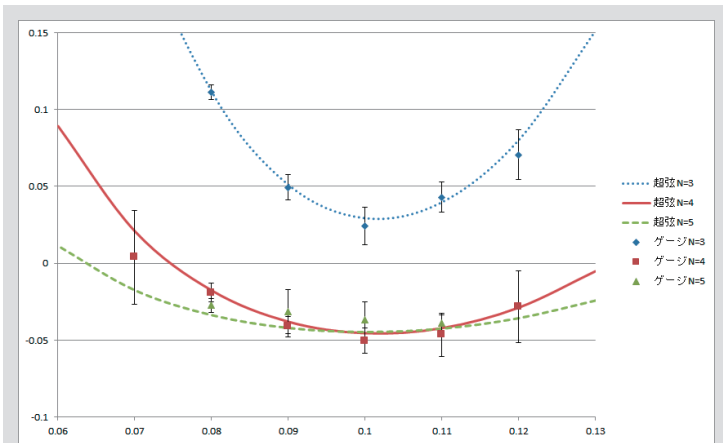


図2 温度とブラックホール質量の関係^{※3}。縦軸はブラックホールの質量、横軸は温度を表している。Nは計算に使用したブラックホールの構成要素の数。これまでの研究はN=17といった構成要素数の多いブラックホール（量子重力効果を無視できるほどの影響力しかもたないブラックホール）の研究のみだった。ゲージ理論を使った計算結果は、○△□で示される。3本の曲線は超弦理論を使った計算結果。○△□と曲線が良く一致していることが、ゲージ理論と超弦理論の等価性を裏付ける実証結果となった。N=3のような量子重力効果が非常に大きなパラメータでもよく一致している。超弦理論の計算をしたのは茨城大学の百武慶文准教授。伊敷さんは、京都大学の花田政範特定准教授とともにゲージ理論を使った数値解析を担当した。（図はHanada, Hyakutake, Ishiki, Nishimura 2014を元に作成）

伊敷さんらは、「量子重力効果も考慮に入れなければ、マルダセナの仮説を本当の意味で裏づけたことにはならない」と考え、複雑な計算にコンピュータを駆使して挑戦しました。図2を見ると、ゲージ理論を使って計算したブラックホールの温度と時間の関係（グラフ中の15個のスポット）と、超弦理論から計算した3本の曲線がよく一致しています。これは、量子重力効果を含めた場合でもマルダセナの仮説が成立することを裏付ける証拠の第一号となりました。実際、Nature.comに掲載されたコラムで、マルダセナ博士が「どうやら彼らの計算結果は正しいそうだ」とコメントしています^{※2}。

ゲージ理論の数値計算を可能にした「箱」

コンピュータを使って計算するところに特徴があったこの研究。どのような数値計算をコンピュータにさせればよいかというプログラムはありましたが、結果が出るまでに3～4年の時間を費やしました。

図2のグラフを書くのに必要な数値計算は、合計で半年もの時間がかかりました。それに加えて研究初期の数値計算の方法では、計算を進めていくうちに、対象とする粒子が束縛状態でなくなってしまう不具合が起きたのです。ブラックホールは、狭い領域に閉じ込められているのが特徴です。しかし、構成する粒子がどこかへ飛び出していってしまうとブラックホールが崩壊し、それ以上計算が続けられなくなってしまうのです。

そこで伊敷さんは、計算対象の粒子を「箱」に入れた状態で計算することを思いつきました。といっても普通の箱ではありません。「箱」の壁が粒子を自然界ではありえないほどに跳ね返したり、粒子の束縛を不自然に手伝ったりするようでは、ブラックホールの真の姿を表したことになります。あくまでも“自然な”壁を持つ「箱」を用意したのです。

「箱」は、束縛状態を長く保つのにとても役立ちました。伊敷さんはさらに、「箱」の大きさを計算結果が影響を受けるかどうかを確認しました。大きさを計算結果が変わらないことを確認できたことで、「箱」の導入が正解だったと結論づけたのです。



普遍性を検証していきたい

今回の研究では「ゲージ理論と超弦理論は等価性を持つ」ことの一例を示すことができました。しかし、伊敷さんは「ゲージ理論と超弦理論は等価性を持つと結論づけるためには、まだまだ多くの研究が必要です」と言います。他のパラメータや他のゲージ理論を用いた計算など多くの事例で対応していることを検証しなければ、「一般的な」理論とすることはできないのです。

伊敷さんは、ゲージ理論の次元を上げていきたいと考えています。今回検証したのは、1次元のゲージ理論と10次元の超弦理論との対応です。もともとマルダセナ博士が提唱したのは、4次元のゲージ理論と10次元の超弦理論との対応でした。伊敷さんは、ゲージ理論の次元を4次元まで上げようと計画しています。4次元の数値解析は1次元とは比べものにならないほど複雑になります。多くの研究者が

チームを組み、幾多のコンピュータやスーパーコンピュータを使用し、計算時間を短縮する工夫も必要になってくるでしょう。

これまで、伊敷さんらをはじめとする少数のグループが、この研究領域を切り開いてきました。伊敷さんは「もっと多くの研究グループが参入し、より大きな研究分野に育ってほしい」と考えています。そうしてこの研究分野が活気づいてくれば、ゲージ理論と超弦理論の対応は普遍だということが明らかになっていくでしょう。

曲がった空間についての研究が進めば、ブラックホールだけでなく、ビッグバンが起こる前の初期宇宙についてのなぞが解ける日もくるかもしれません。

用語解説

※1 「量子ブラックホールのホログラム的記述の数値的検証」

M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura,
“Holographic Description of a Quantum Black Hole on a
Computer”, Science Online, Apr 17, 2014
<http://www.sciencemag.org/content/344/6186/882.full>

※2 超弦理論でなくてもブラックホールを理解できるのではないかという画期的な考えを1997年にアルゼンチン出身のマルダセナ博士が発表しました

マルダセナ博士のコメント “It seems to be a correct
computation”. Nature.com
<http://www.nature.com/news/simulations-back-up-theory-that-universe-is-a-hologram-1.14328>

※3 温度とブラックホール質量の関係

物理学者ホーキングは、1974年にホーキング輻射という仮説を発表した。ブラックホールがあたかも温度をもった物体として振る舞い、粒子を放出して次第に蒸発していくという考えである。ブラックホールの周囲では、エネルギーを持った真空から粒子と反粒子が対生成している。生成した粒子と反粒子がぶつкаると対消滅が起こるが、まれに反粒子がブラックホールに吸い込まれ、粒子がブラックホールの外に放出されることがある。

伊敷さんらは本研究において、温度と内部エネルギーの関係を調べた。内部エネルギーはADM質量と呼ばれ、これはブラックホールに対して定義される質量と等価の指標である。つまり、温度によって質量がどう変化するかというブラックホールの熱力学的な性質を調べることにつながる。

関連リンク

ブラックホールを記述する新理論をコンピュータで検証（KEK プレスリリース）

<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20140423140000/>

爆発するのか、しないのか —超新星爆発の鍵を握る流体现象とは何か？

京都大学基礎物理学研究所 岩上 わかな 研究員

「超新星」といわれるひとときわ明るい星が、空に突然現れることがあります。これは、太陽よりも大きな質量の星が、その最期に起こす大爆発の姿だと考えられています。しかし、2011年6月の月刊JICFuS（2ページ）で、国立天文台の固武慶（こたけ・けい）助教（当時）は計算機の中では「超新星はまだ爆発していません」と語っていました。それは、様々な物理現象を取り入れた1次元コンピュータシミュレーションでは、この現象を再現できないということでした。しかし、計算機性能の向上に伴い、徐々に現実的な3次元計算による爆発の再現の可能性が見えてきました。そんな中、対流、定在降着衝撃波不安定性（SASI）、乱流といった流体现象が爆発に影響を与えるのではないかと注目されています。京都大学基礎物理学研究所の岩上 わかな（いわかみ・わかな）研究員に、その理由を聞きました。



写真1：1987年に観測された超新星爆発
写真右下に突然、明るい超新星が現れました。

超新星爆発のメカニズム

「超新星爆発（写真1）にはいくつか種類があって、どのような最期を迎えるかは、星の重さや成分によって決まります」と岩上さん。超新星爆発には、大きく分けて重力崩壊型と炭素爆燃型の2種類があり、岩上さんは主に重力崩壊型について研究しています。重力崩壊型超新星爆発とは、太陽の8倍以上という重たい星が最期を迎える時に起こる爆発で、その名の通り、自らの重さ（重力）に耐えられなくなって起こる爆発現象です。

今もっとも有力とされている超新星爆発のメカニズムは「ニュートリノ加熱説」です。そのプロセスは次のように考えられています（図1）。(a) 星の中では、水素を燃料に核融合反応が起こっています。そこで作られたヘリウムを燃料にさらなる核融合反応が起こって、炭素や酸素など重

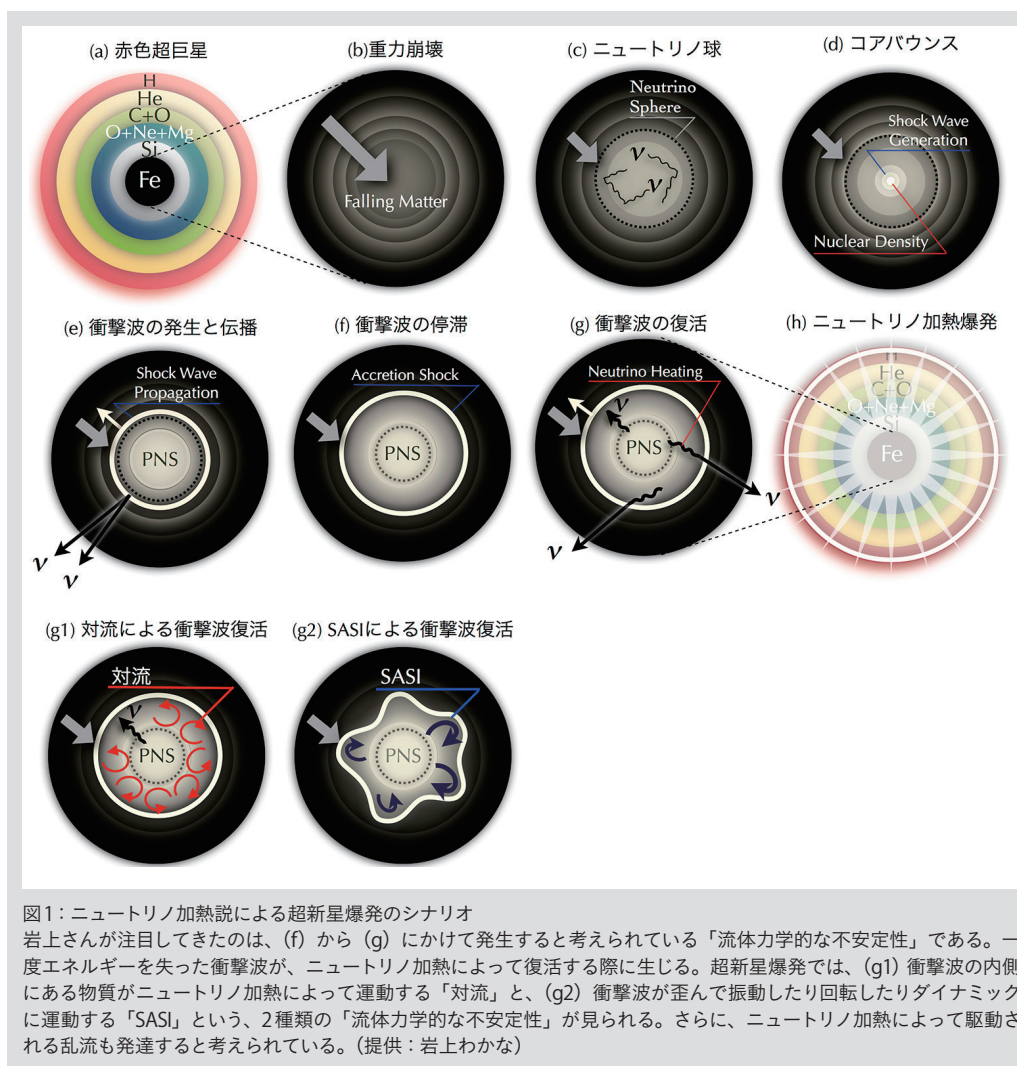
たい元素がつくられていきますが、安定な鉄元素ができると、これ以上核融合反応は進まなくなります。(b) 鉄コアの中心部は非常に高温・高密度になっているので、鉄は熱さに耐えられず分解を始め、鉄原子核由来の陽子が電子を吸収して、中性子とニュートリノという素粒子になる反応が起こります。その結果、星を支える圧力が低下し、星は自らの重みに耐えられなくなりつぶれます（重力崩壊）。(c) 重力崩壊が進むにつれて、星の中心部にニュートリノが閉じ込められて少しずつしか逃げ出すことができない領域（ニュートリノ球）が作られます。(d) さらに、重くて硬い原始中性子星（PNS）ができます。この原始中性子星に周囲から降ってくる鉄がぶつかると、衝撃波が発生します。(e) 衝撃波は外側へ向かって進もうとしますが、(f) 途中でエネルギーを奪われてしまい、爆発には至りませ

ん。(g) しかし、勢いを失った衝撃波は、ニュートリノ球から少しずつ放出されるニュートリノが中性子と反応する際に発する熱によって再加熱され、復活します。(h) こうして復活した衝撃波が星の外縁部に達すると、星は爆発し、地上で超新星が観測されるのです。

一方、炭素爆燃型は、白色矮星が起こす爆発です。白色矮星は、重力崩壊型超新星を起こす星よりも軽い星から作られます。軽い星の内部でも核融合は起こっていますが、鉄ほど大きな元素をつくることはありません。そのため中

性子星にはならず、代わりに炭素と酸素からなる白色矮星になります。この白色矮星の近くに別の星があると、その星から白色矮星に向けてガスが降り注ぎ、最終的に爆発するのです。

＊いろいろな星の最期については、2011.07.21「星の最期を探る」(6ページ)を、ニュートリノ加熱説については、2011.06.01「超新星爆発のかぎをにぎるニュートリノ」(2ページ)をご覧ください。



非球対称性が爆発の鍵

コンピュータの発展に伴い、世界中でニュートリノ加熱説に基づいたシミュレーションが行われるようになりました。ところが、計算が正確になればなるほど、超新星は爆発しなくなっていく。「超新星爆発で起きているさまざまな現象を、可能な限り精密に計算しているにもかかわらず

ず“爆発が起こらない”と、多くの研究者が頭を悩ませていたようです」と岩上さん。原因は、超新星爆発という現象には、衝撃波にエネルギーを与え爆発へと向かわせる過程のほかに、エネルギーを奪って衝撃波を弱める過程が含まれていることでした。

それがここ十年ほどで、星を完全な球と想定する1次元から、回転楕円体だとする2次元や実際の形状を表現できる3次元での計算が可能になったことで、2次元や3次元の効果が爆発を起こしやすくなるということがわかってきたのです。岩上さんは、「2次元や3次元での計算が1次元と

異なる点は、星の回転、磁場の効果、そして対流などの流動現象をシミュレーションに取り入れられるようになったことです」と説明します。ニュートリノによる再加熱によって対流が起こります。この対流によるかき混ぜ効果が、再加熱の効率を上げ、爆発を起こしやすくしているのです。

定在降着衝撃波不安定性（SASI）という流体现象

「対流のような流体力学的な不安定性の発達が、爆発するか爆発しないかを決定している要因の一つらしいことがわかってきました。そして、計算機性能の向上に伴い発見された不安定性が、定在降着衝撃波不安定性（SASI：Standing Accretion Shock Instability）です」と岩上さん。

SASIは以下のような現象です。停滞している衝撃波に向かって、速度や密度に“乱れ”がある物質が降ってきます（図1fと図2）。この乱れをきっかけに衝撃波は少しだけ歪み、同時に渦が作られます。渦は流され、原始中性子星付近で歪められると、その周辺で音波が発生します。発生した音波は衝撃波に到達して衝撃波をさらに歪ませ、より大きな渦を作り出します。この繰り返しにより、歪みが徐々に成長し、衝撃波はダイナミックに運動するようになります。

SASIには2つのモードがあります。対称性を維持したまま衝撃波が上下に振動するスロッシングモード、対称性が破れて衝撃波が回転するスパイラルモードです（図3）。岩

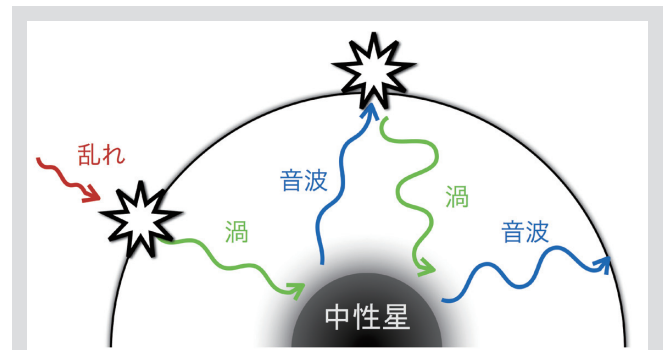


図2：SASIの成長メカニズム
渦と音波が衝撃波と原始中性子星の間を行き来することで、衝撃波が歪んでいく。（提供：岩上わかな）

上さんは、「SASIは対流よりもダイナミックな動きをするところが興味深いと思っています。重力波やニュートリノの観測で特徴的な波形が観測されるかもしれない」と、特にSASIに注目しています。

実は、ごく最近まで、超新星爆発の不安定性の研究は混同としていました。対流とSASIの区別が明確でなかったためです。超新星爆発を研究する世界中のグループが

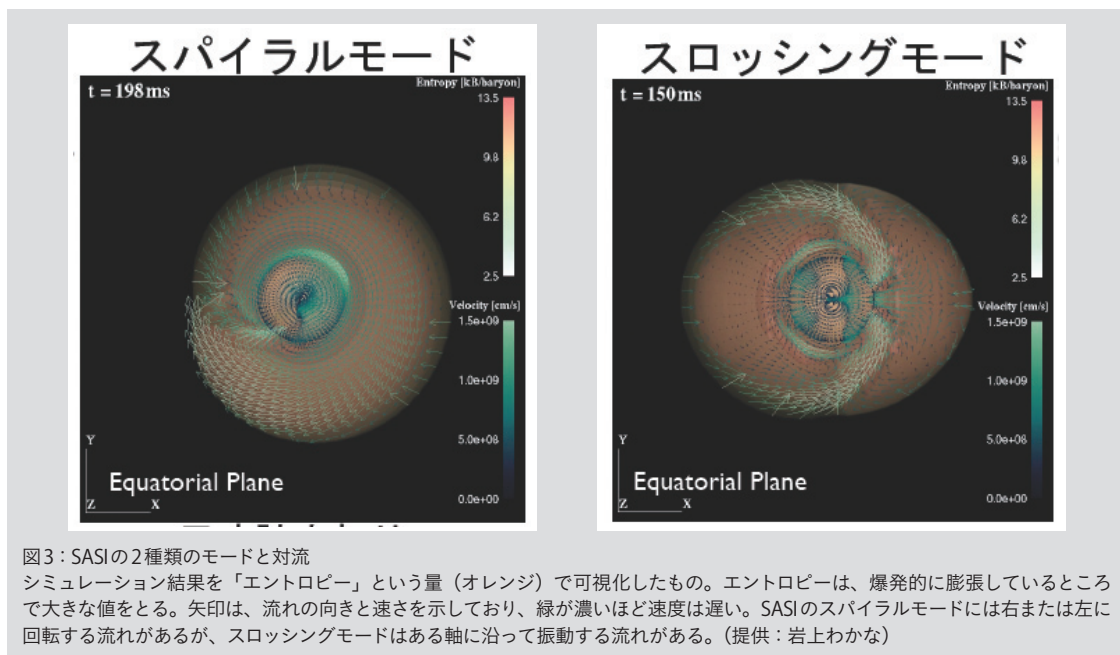
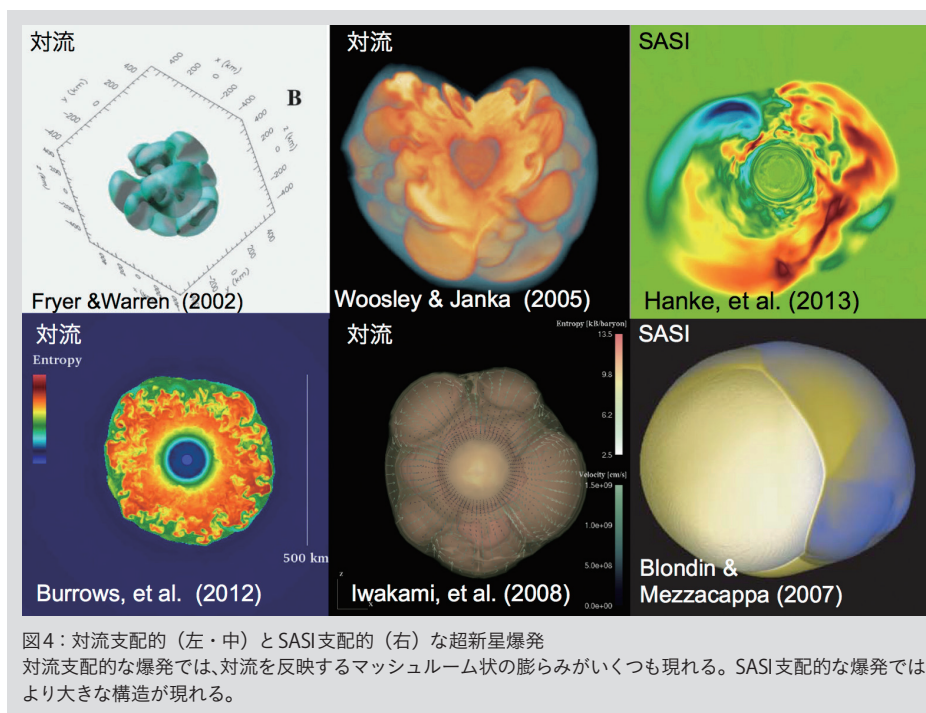


図3：SASIの2種類のモードと対流
シミュレーション結果を「エンタルピー」という量（オレンジ）で可視化したもの。エンタルピーは、爆発的に膨張しているところで大きな値をとる。矢印は、流れの向きと速さを示しており、緑が濃いほど速度は遅い。SASIのスパイラルモードには右または左に回転する流れがあるが、スロッシングモードはある軸に沿って振動する流れがある。（提供：岩上わかな）

シミュレーション結果を発表していますが、実に多様です。それらの違いは、対流支配的な場合とSASI支配的な場合があるために起こるのではないかと考えられています（図

4）。さらに、「ニュートリノ加熱によって対流が発達すると、SASIが成長しなくなってしまうことがあるのです」と岩上さんは話し、対流やSASIが発達する条件を探っています。



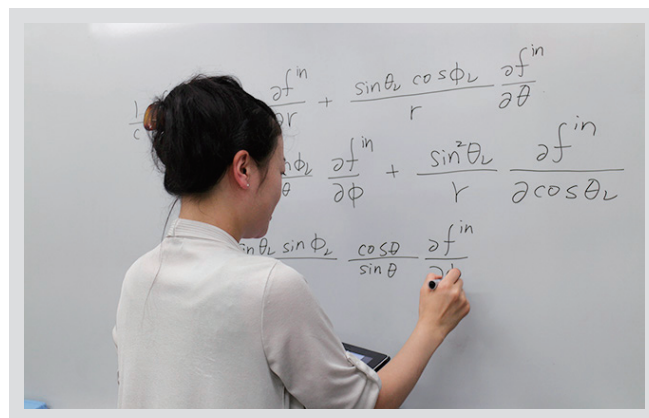
爆発メカニズムの真実に迫る

流体力学的な不安定性が、超新星が爆発するかしないかの鍵を握っているかもしれないということで、爆発直前の流体现象の解明が進められてきました。「2次元や3次元計算によると、対流支配的な場合やSASI支配的な場合、あるいは両方が混ざったような状況も起こりうるということがわかっています。しかし、現実的な計算でどの場合がどういった割合で発生するかはわかりません。今のところ、爆発時には対流支配になるケースが多いようだという印象はあります。星の進化計算から得られる爆発直前の星のモデルを用い、乱流を捉えられるほどの高解像度計算を行い、さらにニュートリノの輸送をより精密に計算して加熱量を正確に見積もることができるになれば、いずれ明らかになると思います。そのためには、スーパーコンピュータ「京」が必要不可欠です。」と岩上さん。爆発メカニズムを解明するまでにはまだ多くのステップを踏まなければならないようです。

現在、京都大学の長倉洋樹（ながくら・ひろき）研究員、早稲田大学の山田章一（やまだ・しょういち）教授、沼津工業高等専門学校の住吉光介（すみよし・こうすけ）教授、高エネルギー加速器研究機構の松古栄夫（まつふる・ひでお）助教ら、それぞれ得意分野をもつメンバーとともに

6次元ボルツマン方程式によるニュートリノ輻射輸送流体計算コードの開発と高速化を進めており、2015年にはスーパーコンピュータ「京」で本格的なシミュレーションを開始します。

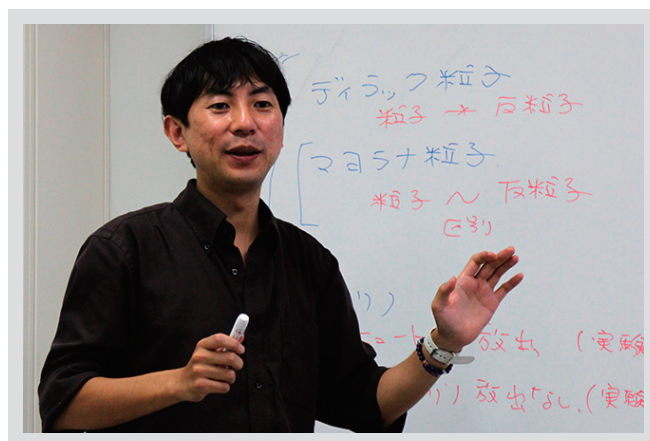
1次元シミュレーションで超新星が爆発しない時代は終わりました。今後は、より現実に近い爆発を再現させるために、対流やSASIをはじめ、より細かな現象の解明が求められることでしょう。どこまで超新星爆発の真の姿に迫ることができるのか？「京」によるシミュレーションが新たな発見をもたらすかもしれません。超新星爆発の研究は新たなステージに入る予感がします。



大規模殻模型計算でニュートリノの謎に迫る

東京大学原子核科学研究センター 岩田 順敬 特任助教

ニュートリノの性質を明らかにすることは、宇宙や星の成り立ちの解明につながります。「究極の目標は、われわれの世界はどうできているのかを明らかにすること」と話すのは東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター特任助教の岩田順敬（いわた・よりたか）さんです。岩田さんは、殻模型※¹という原子核の構造を記述するモデルを使って、ニュートリノの謎を解く鍵となる「原子核の二重ベータ崩壊」の過程を計算で明らかにしようとしています。



宇宙と物質の謎を解く

ニュートリノは電荷を持たず、質量が非常に小さい素粒子です。他の物質とほとんど反応せず、検出が難しいため、その性質には多くの謎が残されています。中でも重要なのは、質量の値と、ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかの2つです。

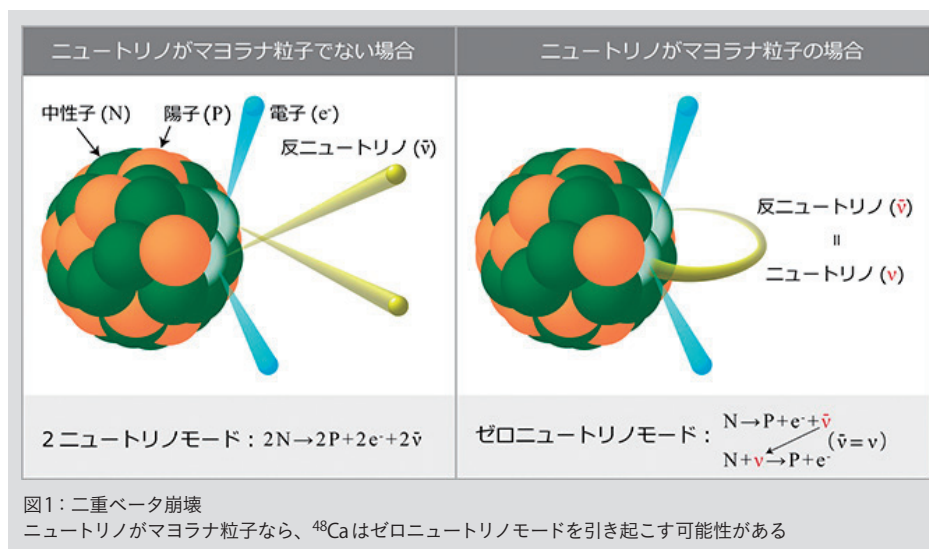
1つめのニュートリノの質量は、はじめはゼロと考えられていました。1998年にスーパーカミオカンデの実験によって質量が“ある”ことが発見されましたが、その値がまだわかっていません。

2つ目のマヨラナ粒子※²は、粒子と反粒子が同じという性質を持った理論上の物質です。通常は、陽子（+）と反陽子（-）のように電荷が異なるため、粒子と反粒子は異なります。マヨラナ粒子はいまだに発見されておらず、その

有力候補とされるのがニュートリノなのです。

ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかを明らかにすることは、宇宙の物質生成の解明につながります。現在の宇宙には反粒子が存在しません。その理由は、宇宙が誕生したころには粒子と反粒子が大量に存在していたものの、粒子が反粒子より100億分の1だけ多かったため、同数の粒子と反粒子が対消滅して光（エネルギー）に変わった後に、粒子だけが残ったからだと考えられています。この100億分の1の違いを、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、自然に説明できるのです。

質量はいくらなのか、マヨラナ粒子か否か。「ニュートリノの謎を解くために、私たちは二重ベータ崩壊過程を計算で明らかにしようとしています」と岩田さんは話します。



ベータ崩壊とは、原子核中の中性子が陽子に変化し、弱い相互作用によって電子や反ニュートリノが放出される現象です。ベータ崩壊が同時に起こる二重ベータ崩壊には2つのモードがあります(図1)。2個のニュートリノが放出される2ニュートリノモード(2ニュートリノ二重ベータ崩壊)と、ニュートリノが放出されないゼロニュートリノモード(ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊)です。

ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊が見つければ、ニュートリノはマヨラナ粒子であることを証明できます。マヨラナ粒子ならばニュートリノと反ニュートリノが同一であるた

め、ニュートリノが現れないゼロニュートリノ二重ベータ崩壊が起きるからです。さらに、その半減期からニュートリノの質量を求めることができます(図2上)。

今、世界中でゼロニュートリノ二重ベータ崩壊を明らかにしようと実験が行われています。しかし、半減期からニュートリノの質量を求めるために必要な核行列要素は、実験から直接求めることができません。また、核行列要素はゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の起こりやすさの指標ともなります。そのため、核行列要素を高い精度で計算する必要がありますのです。

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

$$[T_{1/2}^{2\nu}]^{-1} = G^{2\nu} |M^{2\nu}|^2$$

図2: ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の崩壊率(上)と2ニュートリノ二重ベータ崩壊の崩壊率(下)を表す公式。

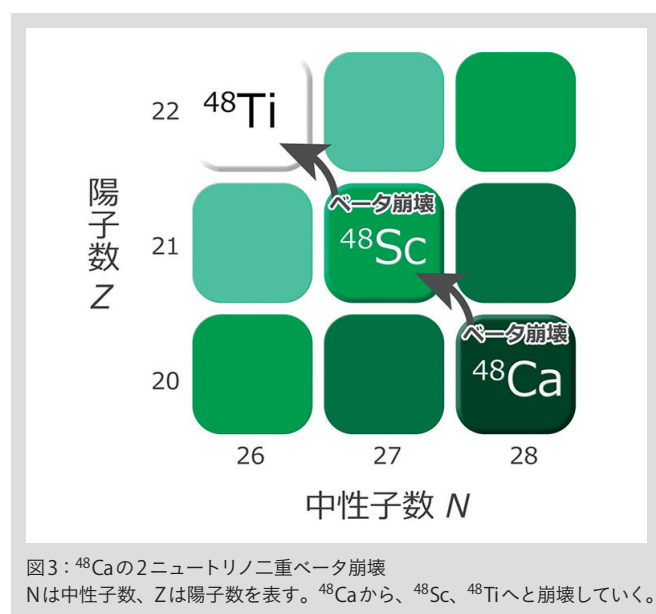
$T_{1/2}$ は半減期、 M は核行列要素、 $m_{\beta\beta}$ はニュートリノの有効質量。また、 G は位相空間因子。

二重ベータ崩壊の核行列要素を求める

岩田さんたちは、ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の核行列要素を求めることを目指しています。まずは実験により崩壊寿命が知られている⁴⁸Ca(カルシウム)の2ニュートリノ二重ベータ崩壊の核行列要素を求めることにしました(図2下)。これまで、10種類ほどの原子核で2ニュートリ

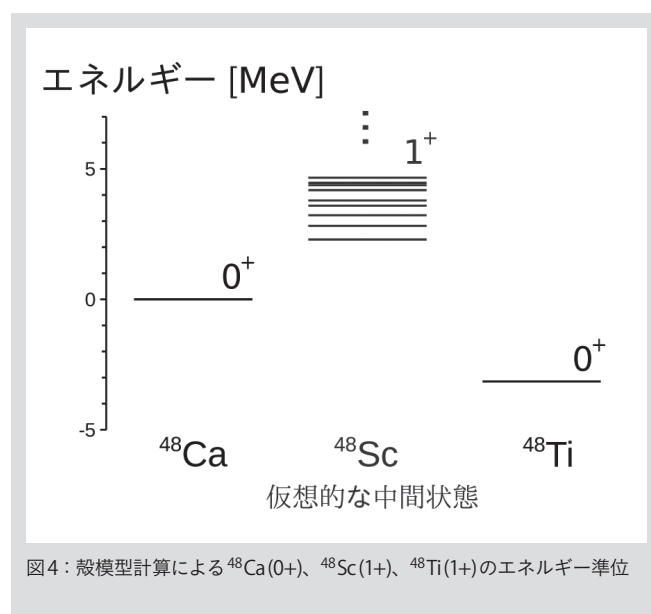
ノ二重ベータ崩壊が実験的に観測されています。それらの原子核のうち、⁴⁸Caは最も軽い原子核で、半減期が一番短いことや放出エネルギーが大きいことから、ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の探索の有力な候補です。

二重ベータ崩壊では、原子核内の2つの中性子がほぼ同時に陽子になりますが、原子核が2回連続してベータ崩壊すると仮定すると、 ^{48}Ca は仮想的な中間状態である ^{48}Sc （スカンジウム）を経て、 ^{48}Ti （チタン）になります（図3）。このとき、ガモフ・テラー遷移とよばれる遷移が起こります。 ^{48}Ca の基底状態（ 0^+ ）は、 ^{48}Sc の 1^+ 状態よりもエネルギー的に安定です（図4）。そのため、 ^{48}Ca が ^{48}Sc にベータ崩壊することはありません。二重ベータ崩壊を考える際には、 ^{48}Sc の 1^+ 状態は仮想的な中間状態として扱われ、すべての 1^+ 状態を考慮に入れる必要があります。中間状



態を精密に記述するためには、より大きな模型空間を考えて、陽子や中性子の相互作用を扱わなければならないのです。

「ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊では、強い相互作用と弱い相互作用が密接にはたらいっています。2ニュートリノ二重ベータ崩壊の核行列要素を大きな模型空間で計算して実験結果と比較することで、ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊の研究には欠かせない、より正確な波動関数と強い相互作用を得たいと考えています」と岩田さん。



殻模型の模型空間を広げる

これまで行われてきた計算では、 ^{48}Sc の高エネルギー状態へのガモフ・テラー遷移強度が十分に再現されていませんでした。そこで岩田さんたちは、大規模な殻模型計算により核行列要素を求めることにしました。

原子核の中で陽子や中性子は、お互いに引っばったり反発したりしながらいろいろな軌道を動き回っています。殻模型計算では、陽子数または中性子数が特定の数であるときに閉殻が形成されるという殻構造を仮定したうえで、相互作用する陽子や中性子の運動を計算します。

これまで行われてきた計算では、殻模型の模型空間を1つ（1主殻）とったものでした。しかし、1主殻の ^{48}Ca の計

算では陽子が動かず、異なる主殻をまたいで起こる核子励起を無視してしまうことになり、高励起状態を記述できないなどの問題がありました。そこで岩田さんたちは、模型空間を2主殻に増やし計算することにしました。模型空間を広げると自由に動くことができる粒子の数が増え、粒子の動きやエネルギー準位をより詳細にとらえることができます。しかし、模型空間を増やすと計算はきわめて困難となり、莫大な計算量になります。計算には行列の対角化が必要ですが、対角化しなければならない行列の次元が100億を超えます。これはスーパーコンピュータ「京」を使ってもぎりぎり計算できるかどうかです。

大規模殻模型計算ではモンテカルロ法（乱数を用いた手

法)が使われることもあります。48Caの場合、核内での妥当な相互作用がわかっていないので、たくさんの条件が必要なモンテカルロ法は適していません。そこで、岩田さんたちは、ランチョス法による厳密対角化を使いました。

ランチョス法は、出てきた行列を直接対角化する方法です。初期状態や終状態、中間状態を計算する際に可能な励起に制限を設けることで、行列の次元を100億から7億ほどに減らすことができました。

計算機の進歩が殻模型の可能性を広げた

実験では、48Caの第二0+状態には陽子励起を含んでいると指摘されていますが、これまでの1主殻の計算ではその状態を含むことはできませんでした。今回は、2つの殻の相互作用を検討し、励起エネルギー状態を再現するよう相互作用をつくりました。この相互作用を用いて計算すれば、48Caや48Tiの基底状態にも、陽子や中性子などの励起成分が混ざります。そうして得られた核行列要素を、これまでの1主殻計算や実験値と比較しました。2主殻計算では、エネルギー遷移状態をうまく記述することができました。

「2主殻の殻模型を使って、精度の高い計算ができるようになったのも、計算機の技術が進歩のおかげです」と岩田

さん。これまでの殻模型計算では計算できる模型空間が限られていて、信頼性の高い結果を得ることが難しかったのです。近年の計算機の日覚ましい発展により、殻模型の計算空間は広がりました。今後、殻模型計算はあらゆる原子核に応用できると期待されています。

岩田さんたちは、2主殻での計算によって、ニュートリノの謎の解明に迫っています。「より精度の高い核行列要素を求めることは、計算でしかできません。そのためには殻模型計算は重要なツールです。大規模殻模型計算によって、ゼロニュートリノ二重ベータ崩壊のプロセスを解明したいです」。

用語解説

※1 殻模型

殻とは、原子核内が『殻』のような構造をもっているのではなく、陽子や中性子の数が特定の数(2、8、20、28、…)をとったときに全体として特に安定になることを意味する。たとえば48Ti(陽子22、中性子26)の場合、陽子20個、中性子20個で極めて安定な“閉殻”ができると考える。閉殻は安定なため動かないものとし、残りの陽子2個、中性子6個を扱った8体問題を完全に解くのが殻模型計算の考え方である。1主核計算は陽子20個、中性子20個を閉殻に取り、2主殻計算は陽子8個、中性子8個を閉殻に取

ることを指す。2主殻計算では32体問題を考えることになる。

※2 マヨナラ粒子

素粒子は、電荷の正負のほか、スピンの半整数(1/2)か整数(0)かによって性質が大きく異なる。スピン半整数をフェルミ粒子、スピン整数をボース粒子と呼び、フェルミ粒子のうち電荷をもつものをディラック粒子、電荷をもたないものをマヨナラ粒子と呼ぶ。マヨナラ粒子はいまだに発見されておらず、電荷を持たないニュートリノはマヨナラ粒子の有力候補とされる。

シミュレーション手法の共通化で クォークの謎の解明に貢献

高エネルギー加速器研究機構 上田 悟 研究員

宇宙の成り立ち解明の鍵を握るクォーク

宇宙の歴史は約138億年前のビッグバンに始まり、その約100万分の1秒後には、それまで自由に飛び回っていたクォークが集まり、陽子や中性子が作られたと考えられています。さらに宇宙誕生から3分後、陽子と中性子が結合して、原子核が生成されました（図1）。

クォークは物質の最小単位である素粒子です。原子核を構成する陽子や中性子は総称して核子と呼ばれ、核子は3つのクォークからできています。クォークは単体では存在できず、核子の中から取り出せません。これは「クォーク

の閉じ込め」と呼ばれるものです。

また、陽子はプラスの電荷を持ち、中性子は電荷を持っていないにもかかわらず、両者は引き合い、原子核を構成しています。そのため、電磁気力よりも強い力で結び付いていると考えられています。その力を核力と呼んでいます。

クォークや核子には、他の粒子に見られない不思議な性質が数多く発見されています。しかし、そのほとんどが謎のベールに包まれています。そして、その謎の解明は、宇宙の成り立ちの解明に直結します。

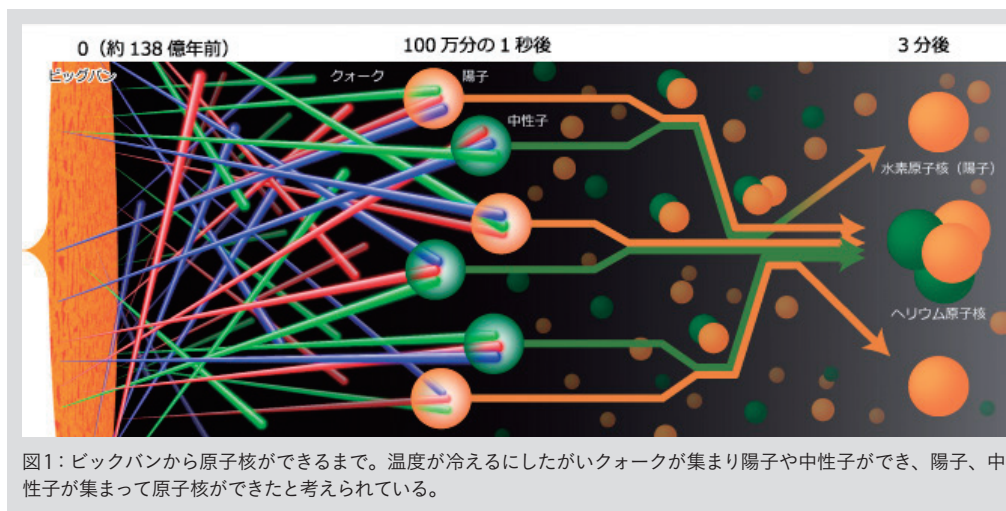
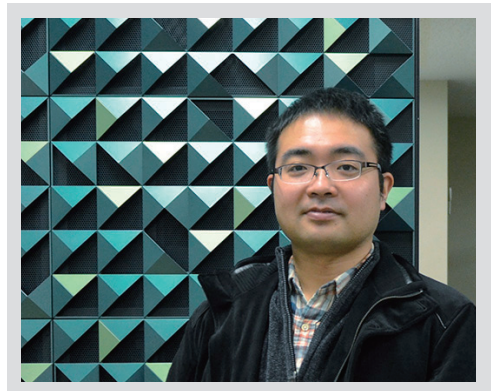


図1: ビッグバンから原子核ができるまで。温度が冷えるにしたがいクォークが集まり陽子や中性子ができ、陽子、中性子が集まって原子核ができたと考えられている。

HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」では、「格子QCD」のコンピュータシミュレーションによる研究によって、その謎に迫ろうとしています。格子QCDシミュレーションを駆使することで、クォークから核子、原子核に至るまでの統一的な理解が可能となることが期待されています。「例えば、陽子や中性子の質量やスピンの状態は数値計算や実験、観測により明らかになっていますが、これらを構成するクォークとの関連性はよくわかりません。こうしたクォークと核子に関するあらゆる謎を解明したいというのが、我々の究極の目標です」。こう語るのは、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の上田悟（うえだ・さとる）研究員です。



コンピュータシミュレーションが必要な理由

格子QCDのQCDとは、「量子色力学（Quantum Chromodynamics）」のことです。クォーク同士は「強い力※¹」で結び付いており、これらは、量子色力学と呼ばれる理論で説明することができます。

量子色力学では、クォークは、赤・緑・青の3つの仮想的な「色」を持っていて、常に白色になる組み合わせ、つまり「3色が揃った状態でしか観測できない」としています。また、クォーク同士は、3つの色をお互いに交換することで相互作用しており、その交換を媒介しているのが、グルーオンと呼ばれる粒子です（図2）。

クォークに働く「強い力」は量子色力学で説明できるにもかかわらず、クォークの不思議なふるまいの謎を解明できないのは、一体なぜなのでしょう。それは、クォーク同士やクォークとグルーオンの間に働く力（「結合定数」と言います）が大きいため、方程式を解く形で答えを導き出すことができないからです。

例えば、原子核と電子を結び付けている電磁気力の場合、結合定数が小さいため、結合定数を無視したときの結果に“補正”を1次、2次と少しずつ加えていくという手法で、現象を説明することができます。ところが、結合定数が大

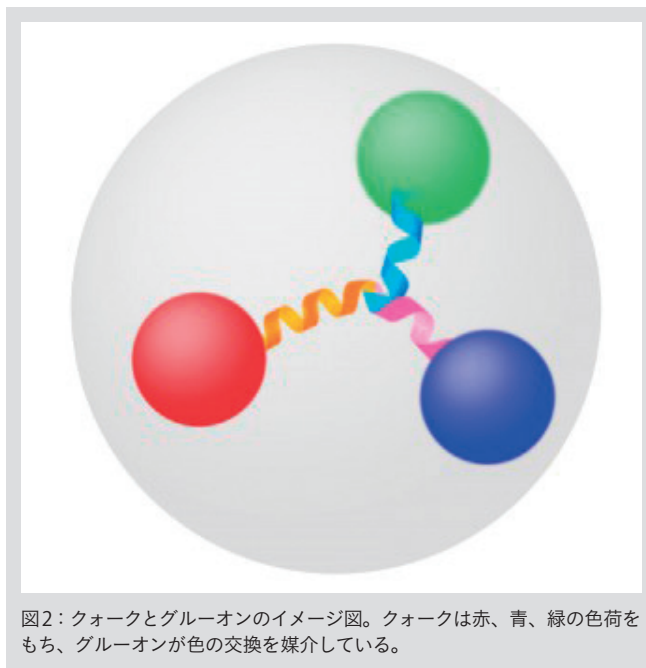


図2：クォークとグルーオンのイメージ図。クォークは赤、青、緑の色荷をもち、グルーオンが色の交換を媒介している。

きいと、補正を加えていってもその効果がある値に収束していかないため、この手法を使うことができないのです。そこで登場するのが、コンピュータシミュレーションというわけです。世界中の研究者たちはシミュレーションを駆使することで、この純粋な理論計算では解くことができないクォークの謎の解明に尽力しているのです。

共通コードの整備と公開で、研究員の負担を低減

格子QCDシミュレーションによる研究は、日本だけでなく、米国や欧州など世界各国で行われていますが、「既存のプログラムを利用しようと思っても、管理者や窓口が明確になっていないため、使い方がわからない」「コード（プログラム）の読み方がわからない」「バグがある」といった問題が浮上していました。

そこで2008年、筑波大学計算科学研究センターの青木慎也教授（HPCI戦略プログラム分野5統括責任者）が、格子QCDに関する「共通コード」を整備して、誰でも利用できるようにしようと提案しました。そして2009年、この提案を受け、共通コード「Bridge++」プロジェクトが開始されました。

現在、「Bridge++」プロジェクトの中心的役割を担っている上田さんは、その有用性をこう語ります。「これまで、格子QCDの研究を始めようと考えている大学院生や、格子QCDに関する新たな理論を構築しようとしている研究者がシミュレーションを行おうとすると、一からコードを

書く必要がありました。しかし、コードは何万行にも及ぶため、すべてを書くのは大変です。非常に無駄な作業もあります。そこで我々は、共通するコードに関しては、誰でも使えるように整備し公開することで、研究者の負担を減らしたいと考えました。

青木教授らが設定した共通コード「Bridge++」の目標は、以下の4つです。

- (1) 初心者でも簡単に読めて使ってもらえる「可読性」
- (2) ノートPCからサーバー、スーパーコンピュータまで幅広いコンピュータに対応可能な「可搬性」
- (3) 複数ある既存の「フェルミオン演算子」やアルゴリズムに対応し、簡単に拡張できる「拡張性」
- (4) 実践で使用しても問題ない「高性能」

(3) のフェルミオン演算子とは、コンピュータ上で、クォークの運動を表す演算式です。連続的な関数をコンピュータで計算するとき現れる離散化誤差を減らすため、これ

まで世界各国でさまざまな演算子が考案され、計算に使われてきました。フェルミオン演算子として最初に考案されたのは「ウィルソン演算子」です。その後、離散化誤差を緩和するため、世界各国でさまざまな演算子が考案

されてきました。主なものに「クローバー演算子」「ドメイン・ウォール演算子」「オーバーラップ演算子」などがあります。

スーパーコンピュータで超難問を解決できる

そもそも格子QCDによるコンピュータシミュレーションとは、どのような計算手法なのでしょう。

量子色力学は、素粒子同士の強い相互作用を記述する「場の量子論」です。そこで、時間と空間をとびとびに取った格子を作り、各格子上に、クォークやグルーオンを1つずつ乗せていきます。いろいろな色を持つクォークやグルーオンを乗せていくと、ルービックキューブのようなカラフルな格子ができ上ります（図3）。

そして、格子の色を量子色力学の理論に従ってランダムに変えていけば、クォークとグルーオンのさまざまな状態を作っていくことができます。このひとつひとつの状態のことを「配位」と言います。最後に、それぞれの配位の上で物理量を計算し、平均値を取ることで、必要とするクォークの物理量を得ることができます。

しかしながら、格子QCDシミュレーションは膨大な計算量を要します。格子のある1つの点の色について、「次は何色にするか」を決める際には、量子色力学に基づき、その点以外のすべての格子点の情報が必要になるからです。そのため、早い段階からスーパーコンピュータを用いた研究が行われ、HPCI戦略プログラム分野5においても、スーパーコンピュータ「京」やKEKにある2つのスパコンを使っ

て、格子QCDの計算を行っています。

実際に、スーパーコンピュータを使った格子QCDシミュレーションによって解かれた問題に「ヤン-ミルズ（理論）の存在と質量ギャップ問題」があります。これは、2000年に米国のクレイ数学研究所が発表した7つの「ミレニアム問題」のうちの1つです。いずれも1問につき100万ドルの懸賞金が懸けられた超難問で、すでに解かれているものに「ポアンカレ予想」があります。

ヤン-ミルズ（理論）の存在と質量ギャップ問題とは、仮にクォーク1つの質量を1とした場合、3つ集まって形成された1つの核子の質量は3となりそうなものですが、計測すると約1000になってしまう物理現象です。

「研究者達が、格子QCDシミュレーションで計算してみたところ、実際に約1000倍になることが判明しました。そ

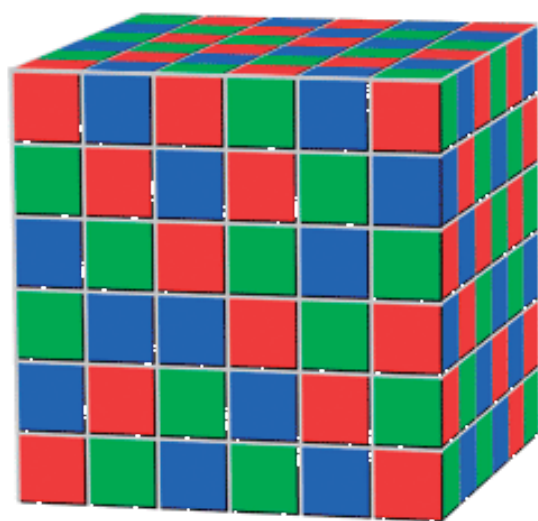


図3：格子QCDの計算では、時間と空間を細かく分けて、それぞれの場所でのグルーオンの状態「配位」を作る。（画像提供：KEK）



KEK システムA: 日立 SR16000 モデル M1（写真提供：KEK）



KEK システムB: IBM Blue Gene/Q

の理由はわかりませんが、実験による観測結果とスパコンによる計算結果がピタリと一致したのです。ただ、ミ

レニアム問題は手計算が前提のため、残念ながら懸賞金を受け取った方はいませんでした。」と上田さんは語ります。

「Bridge++」で配位の再利用

さて、上田さんたちが整備した共通コード「Bridge++」は、2012年にバージョン1.0を公開。その後、改良を加えていき、2014年10月に公開されたバージョン1.2が最新となっています。

「当初の4つの目標は達成したと考えています。格子QCDシミュレーション初心者の修士の学生からは『ドキュメントが整備されているので、すぐに使えるようになりました』といった声を多く聞いており、評判は上々です」と上田さんは語ります。

また、本プロジェクトにおける大きな成果の1つとして、上田さんは「配位生成」を挙げます。

従来、クォークの運動をシミュレーションするには時間が

かかるため、膨大な計算コストがかかっていました。しかし、すでに生成されている配位を利用することができれば、より多くの時間を本来のクォークの謎を解く目的のために使うことができます。そこで、世界的な動きとして、生成した配位を公開し、格子QCD研究者の間で共有するデータグリッド活動「ILDG (International Lattice Data Grid)」が進められてきました。

それに対応するように、「Bridge++」の中で、ILDGフォーマットの配位を読み込めるようにし、誰でも簡単に利用できるようにしたのです。その結果、より低コストかつ短時間で、シミュレーションができるようになりました。

演算子の高速処理化でクォーク研究に貢献したい

そもそも上田さんが「Bridge++」の整備に関わることになったのは、2010年12月のことでした。「大学院では物理学で博士号を取得しましたが、元々理論研究よりもコンピュータを扱う計算科学の方が好きでした。博士課程修了後は筑波大学で研究をしていましたが、2010年12月にKEKに移ったときにHPCI戦略プログラムの一員となり、『Bridge++』を担当することになったのです」。

一方で、上田さんは、オーバーラップ演算子の計算速度の高速化に取り組んでいます。「ウィルソン演算子を改良したものがクローバー演算子です。しかし、両者は、クォークに関する非常に重要な物理の1つである『カイラル対称性』を持っていません。そこで、カイラル対称性に関する研究を行いたい研究者が開発したのが、ドメイン・ウォール演算子と、その改良版のオーバーラップ演算子です」

と上田さん。

量子色力学におけるカイラル対称性とは、1つのクォークが空間を飛んでいるときに、進行方向に向かって右巻きと左巻きのスピンを独立に扱えることを意味します。それに対し、オーバーラップ演算子は、カイラル対称性を含めたクォークの物理量を、より高精度に計算できるという特徴を持っています。しかし、そのために、ウィルソン演算子に比べて約100倍、ドメイン・ウォール演算子に比べて約10倍の計算コストがかかるという課題も抱えているのです。それに対し、上田さんはこう意気込みを語ります。「計算手法を工夫することで、計算速度を今の10分の1に短縮できないかと考えています。がんばって2016年3月のプロジェクト終了までには実現したいですね。それにより、クォークの謎の解明に貢献したいです」。

用語解説

※1 強い力

素粒子は大きく2種類に分かれます。物質を形づくる物質粒子と、その間で力を伝えるゲージ粒子です。グルーオンはゲージ粒の一種です。また、世界には「4つの力」が存在しています。「重力」「電磁気力」「強い力」「弱い力」です。その中で、クォーク同士を結び付け、陽子や中性子を形づくと同時に、原子核の中で陽子や中性子を結び付けている力が「強い力」です。

超大質量ブラックホールはいかにして作られたのか一定説を覆す急成長の謎にせまる

国立天文台 高橋 博之 特任助教

小学校に入る前から、図鑑を見ては「宇宙はどうなっているのだろう」と思いをめぐらせてきた国立天文台特任助教の高橋博之（たかはし・ひろゆき）さん。ブラックホールの研究をしないかと誘われた高橋さんは「ぜひやらせて下さい」と二つ返事で現在の研究チームに入りました。

高橋さんが取り組むのは、これまでの定説では理解できないほど急激に成長するブラックホールの様子。高橋さんが研究で明らかにしたブラックホールとはいったいどのようなものなのでしょう。



観測研究から見てきた超大質量ブラックホールの存在

ブラックホールは恒星の最後の姿のひとつです。太陽の約8倍以上の質量の星は、進化の最後に超新星爆発を起こします。そのうち、太陽の約30倍以上の星の爆発後に残る残骸の一種にブラックホールがあります。重力が非常に強く、光をも吸い込んでしまうということでブラックホール（黒い穴）と呼ばれるようになりました。

ブラックホールには、恒星程度のものから太陽の数億倍までさまざまな質量のものがいます。ここ10年くらいの観測研究で、宇宙にはものすごく明るく輝く、とても質量の大きいブラックホールがあることがわかってきました。普通のブラックホールの質量は太陽の10倍～100倍くらいですが、遠くの銀河には太陽質量の10億倍もある超大質量ブラックホールが見つかっています。

遠い銀河からの光を観測することは、その光が放たれてから私たちのところへ届くまでにかかった時間の分だけ昔

の状態を見ていることになります。これまで観測により見つかった最も遠い超大質量ブラックホールは、地球から130億光年前後の距離にあります。つまり、138億年前のビッグバンから10億年程度で、すでに太陽質量の10億倍以上の超大質量ブラックホールができあがっていたことになります。

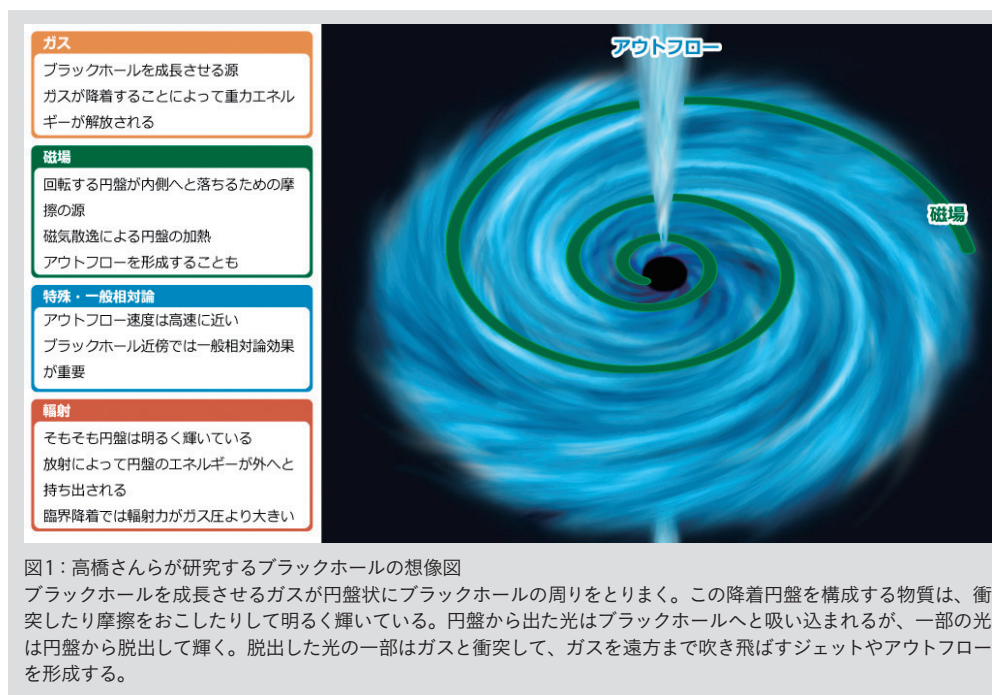
ブラックホールは、あらゆる物質を吸い込んで質量が増えていくことで「成長」します。これは、長い年月をかければ、どんな超大質量のブラックホールにも成長できることを意味します。しかし、最初期の低質量ブラックホールは宇宙の誕生後、数億年で生まれています。超大質量までわずか数億年でブラックホールが急成長するというのは、発見以前に考えられてきたブラックホール成長メカニズムでは説明が付きません。常識を覆すようなブラックホールの成長の仕方に関する研究が始まりました。

超大質量ブラックホールはどのように作られたのか

ブラックホールが急激に成長する方法は2つ考えられます。1つは、ブラックホール同士が衝突合体して成長していく方法。もう1つは、ガス降着という方法です。ガス降着とは、ブラックホールにガスが落ちていって成長する方法です。周辺にあるガスだけでなく、ブラックホールの潮汐力

により破壊された星なども吸い込まれてきます。

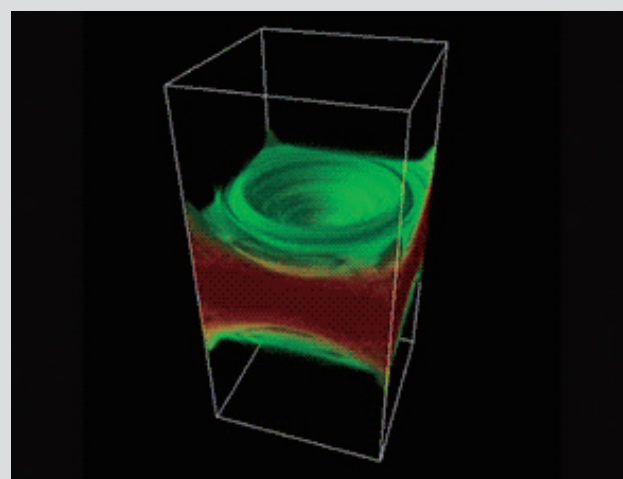
どちらも正しい可能性がありますが、高橋さんたちは、ガス降着でブラックホールの急成長が可能かどうかについて研究をしています（図1）。



臨界を超える成長速度

まず、これまで考えられてきたブラックホールの成長速度について説明しましょう。ブラックホールにガスが吸い込まれる（降着する）ときに、吸い込まれるのを邪魔する方向に光が出てきます※1。この光が持つエネルギーのせいで、ブラックホールにガスが降着する単位時間当たりの総量（成長速度）には限界があると考えられてきました。この成長速度の限界のことを「臨界降着率」と呼びます。臨界降着率でブラックホールが成長した場合、つまり、もっとも速く成長した場合でも、1億太陽質量のブラックホールは1年間で太陽1個分の重さしか成長できません。これでは、近年発見された遠い銀河にある超大質量ブラックホールはできない計算になります。つまり、「臨界降着率」を超える「超臨界降着」が起こっているはずなのです。

高橋さんの共同研究者でもある国立天文台の大須賀健助教らは、「超臨界降着は可能」ということを研究で明らかにしました※2（動画1）。ガスが落ちてくる方向と異なる方向にも光は逃げると考えれば、ブラックホールから出てく



動画1：非相対論的輻射磁気流体シミュレーション
左は光のエネルギー密度、右はガスの質量密度を表す。以前は「光は等方（全方向）に放射され、ガス降着を邪魔する」と考えられていた。国立天文台の大須賀さんたちは円盤から外へ逃げる光のエネルギー密度は等方でなく、光が勢い良く外へ逃げていく方向（右の青色部分）とそうではない方向がある考えた。すると、以前より効率の良いガス降着が起こることがわかり、臨界降着率を超えたブラックホールの成長が可能だとわかった。（提供：大須賀 健氏）

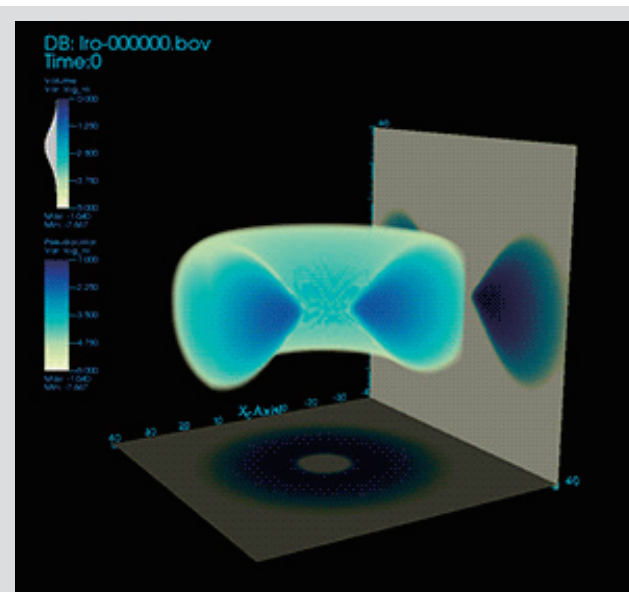
る光による邪魔が少なくなり、臨界降着率を超えられるとわかったのです。

では、いったいガス降着の速度は臨界降着率の何倍くらいなのでしょう。

高橋さんは、スーパーコンピュータ「京」を使って、シミュレーションを行いました。「何倍」という数値を求めるために、過去の研究よりも精確にするための工夫がいくつも盛り込まれた計算です。たとえば、高橋さんは、これまでの研究では考慮されていなかった相対論的効果を取り入れています。光速に近い現象を扱うブラックホール近傍での定量的研究には、相対論的効果も考慮することが重要なのです。複雑な方程式を解くことになるため計算量が膨大になりますが、「京」の登場で計算が可能になりました。また、成長の原料であるガスがブラックホールに供給される速度を初期条件として設定できるようにもしました。過去の研究では、大量のガスがブラックホールの近傍にあるという計算方法でした。しかし、この方法ではガスがブラックホールに吸い込まれて残りのガスが減ってくると、ブラックホールの成長速度が遅くなってしまうのです。高橋さんの計算方法なら、扱うブラックホールごとに近傍のガス供給量を設定できます。

計算の結果、臨界降着率の少なくとも7000倍は速く、ブラックホールが成長できることがわかりました（動画2、図2）。これなら、遠くの銀河で見つかった超大質量ブラックホールに成長するまでの時間は100万年ほどという計算になります。

高橋さんの計算では、ブラックホールから出てくる「アウトフロー」の速度も求まりました(図2 緑△)。この計算では、光の伝播をこれまでの研究より精確に計算できる式を用いています。アウトフロー速度は、光速の30～40%という計算結果でした。この速度は、超臨界降着が起きていると考えられる天体である超高光度X線源（ULX：Ultra Luminous X-ray Sources）SS433からのアウトフロー速度が光速の30%であるという観測結果^{*3}とよく一致しており、計算結果の信頼性の高さがうかがえます。



動画2：高橋さんによるシミュレーション動画
色の濃淡は、ガス密度（対数）を表す。色が濃いほどガス密度が高い。中心にあるブラックホールに向けてガスが吸い込まれ、吸い込まれる方向とは異なる方向にアウトフローが出て行く様子がわかる。（提供：高橋博之氏）

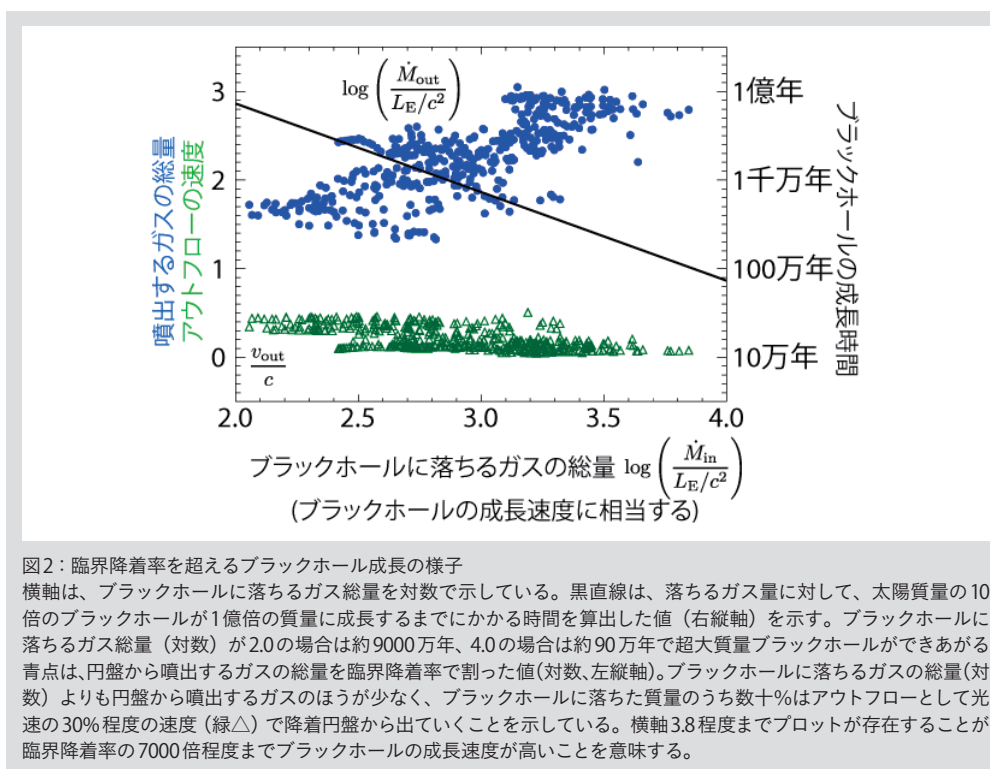


図2：臨界降着率を超えるブラックホール成長の様子

横軸は、ブラックホールに落ちるガス総量を対数で示している。黒直線は、落ちるガス量に対して、太陽質量の10倍のブラックホールが1億倍の質量に成長するまでにかかる時間を算出した値（右縦軸）を示す。ブラックホールに落ちるガス総量（対数）が2.0の場合は約9000万年、4.0の場合は約90万年で超大質量ブラックホールができあがる。青点は、円盤から噴出するガスの総量を臨界降着率で割った値（対数、左縦軸）。ブラックホールに落ちるガスの総量（対数）よりも円盤から噴出するガスのほうが少なく、ブラックホールに落ちた質量のうち数十%はアウトフローとして光速の30%程度の速度（緑△）で降着円盤から出ていくことを示している。横軸3.8程度までプロットが存在することが、臨界降着率の7000倍程度までブラックホールの成長速度が高いことを意味する。

究極の目標

謎をひとつ解き明かした高橋さんは、「まだまだ明らかにしたいことがある」と言います。

たとえば、現在は近似を使っていますが、光子1つ1つが持つエネルギー分布を考慮にいれたボルツマン方程式を解くような計算をしたいそうです。これでより真実に近づくことができます。光が飛んでいく方向についても近似を使わない計算が考えられます。

これらを実現するためには、より速いスーパーコンピュータが必要です。2020年に運用開始予定の次世代スーパーコンピュータ「ポスト京」であれば、計算ができるはずだと高橋さんはその完成を楽しみにしています。

そして究極の目標は「ブラックホールの本当の姿を明らかにすること」と高橋さんは考えています。

注釈

※1 ガスはブラックホールの重力によって吸い込まれ、その際、自身が持つ位置エネルギーは解放される。そのエネルギーが光に変わって放出されるので、ブラックホール近傍から光がでてくる。ただし、円盤の内側で発生した光は円盤ガスと衝突を繰り返して結局はブラックホールに吸い込まれる。円盤表面で発生して運よく逃れ出た光のみが、明るく輝いたり、アウトフローを作ったりする。

※2 Hiroyuki R. Takahashi & Ken Ohsuga '15, accepted for publication in Publications of the Astronomical Society of Japan. The online version is now available.

<http://pasj.oxfordjournals.org/content/early/2015/02/19/pasj.psu145.abstract?keytype=ref&ijkey=oakbBrxzIHkypn>

※3 Marshall, Herman L., Canizares, Claude R., & Schulz, Norbert S., 2002, ApJ, 564, 941

原子核の密度が 10 倍以上になる？ — 「反 K 中間子原子核」の研究

理化学研究所仁科加速器研究センター 池田 陽一 特別研究員

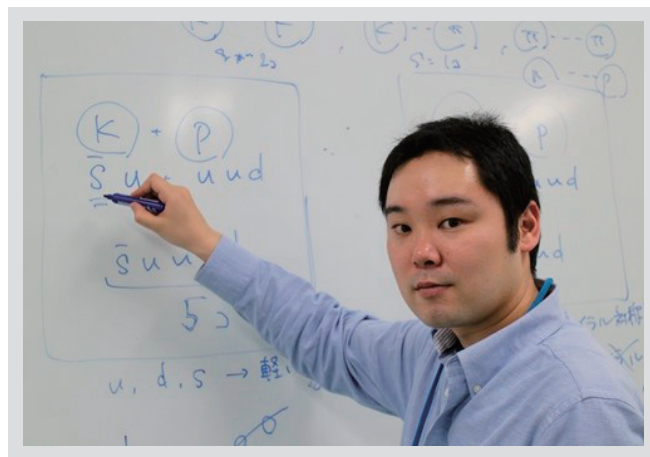
従来の鉄則を覆す超高密度な天体の存在

宇宙には、中性子星^{*1}など「コンパクト星」と呼ばれる天体が存在していることがわかっています。これは、通常の恒星に比べて密度が異常に高く、同じ質量で比べた場合、非常に小さくコンパクトな天体のことです。例えば、中性子星の密度は太陽の 10^{14} （100兆）倍以上とされています。通常、物質を構成する要素である原子核の密度は一定で、これ以上圧縮することはできないというのが原子核物理学の鉄則です。それに対し、コンパクト星はこの鉄則を打ち破るものとして、発見以来、研究者の間で高い関心を集めています。現在のところ、コンパクト星がなぜ超高密度なのか、詳細なメカニズムはわかりません。メカニズムが解明されれば、宇宙の起源の解明に大きく寄与する可能性があるため、期待が高まっています。

このような中、1999年に、東京大学名誉教授の山崎敏光氏と、当時高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所の教授だった赤石義紀氏（現・日本大学理工学部客員教授）が、原子核に「K中間子」と呼ばれる中間子が入ると、原子核が超高密度化することを、理論的に示唆しました。原子核内の陽子、中性子同士を結びつけている核力から導かれる密度の10倍以上になることを、

理論的に予想したのです。

発表当初、この理論は研究者の間で大きな反響を呼び、その正否をめぐる議論が巻き起こりました。現在もお、結論は出ておらず、理論と実験の両面から、議論が活発化しています。そこで、議論の決着を図るべく、原子核にK中間子が入った「K中間子原子核」の理論研究を進めているのが、HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」のメンバーで、理化学研究所仁科加速器研究センターの池田陽一特別研究員です。



原子核の超高密度化に関与すると予想される「ストレンジクォーク」

地球上では、物質を構成する原子核は、陽子と中性子でできています。この2つはいずれも、最も基本的な素粒子であるクォーク3つで構成されており、「バリオン」と呼ばれています。

陽子はプラスの電荷、中性子は電荷を持たないにもかかわらず、両者は引き合い、原子核を構成しているため、電磁気力よりも強い力で結びついていると考えられています。その力を核力と呼びます。

一方で、原子核の中には、中間子と呼ばれる粒子も存在します。中間子は、クォークと反クォークの2つで構成されており、「メソン」とも呼ばれます。中間子の一種で、湯川秀樹氏が1935年に提唱したパイ中間子は、陽子、中性子間で核力を伝達する粒子として働いています。そして、今回の主役であるK中間子もまた、これら中間子の一種なのです。

しかし、K中間子と、陽子や中性子、パイ中間子との間には決定的な違いがあります。陽子や中性子、パイ中間子が、アップクォークとダウンクォークの2種類のクォークで構成されているのに対し、K中間子は、アップクォークとストレンジクォークの2種類で構成されているのです。そして、このストレンジクォークが、原子核の超高密度化に深く関与しているというのが、山崎氏、赤石氏が発表した論文の内容です。

「正確に言えば、K中間子はアップクォークと反ストレンジクォークで構成されていて、その反粒子であり、反アップクォークとストレンジクォークで構成された『反K中

間子』が原子核に入ると、超高密度化が起こるということが、山崎氏と赤石氏により予想されています。私は、修士課程だった2005年に、KEKで行われた赤石氏の講演を聞き、この手でぜひメカニズムを解明したいと考え、この研究テーマを選びました」と池田さんは話します。

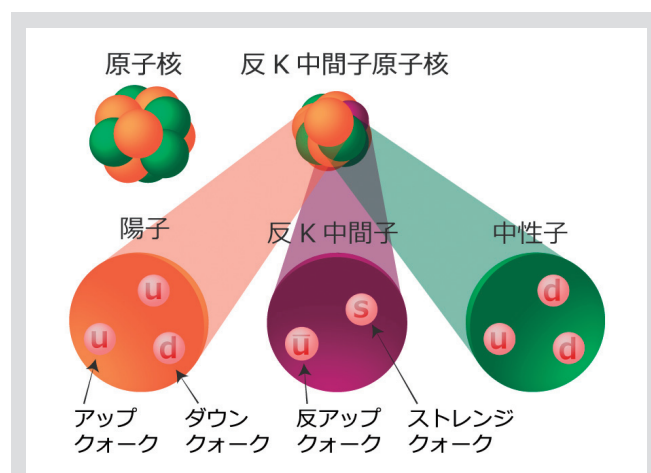


図1：中性子星内部と原子核

中性子星はほぼ中性子からできており、わずかに陽子があると考えられている。その中に、ハイペロンとよばれる粒子が含まれている可能性がある。ハイペロンはストレンジクォークを含むバリオンで、これを含む原子核の一種、ハイパー核には特殊な性質があるとされる。反K中間子原子核は、ストレンジクォークが含まれるハイパー核である。

原子核の核力をクォークレベルからアプローチ

通常、自然科学の研究は、「理論」「実験」「数値計算」の3本柱で進められます。しかしながら、反K中間子は地球上には安定的には存在せず、反K中間子を原子核に入れた反K中間子原子核を実験によって生成することは、容易なことではありません。大量の電力や莫大な費用もかかります。そのため、これまでにKEKなど国内外で実験が実施され、K中間子原子核の存在を示唆するデータも報告されてはいるものの、決定的なものはなく、確実な知見はまだ得られていません。

一方、数値計算に関しても、現在は、通常の原子核の核力の計算を進めている段階です。反K中間子原子核の計算はさらに複雑で、膨大な計算能力が必要です。そのため、「スーパーコンピュータ「京」の次の世代のスーパーコンピュータまで待つ必要があるとみています」池田さんは話します。そこで、池田さんは、現在、「有効理論」を用いた研究を進めており、近い将来、実験データが十分に集まり、数値計算ができるようになった時点で、実験結果や数値計算の結果とのすり合わせを行い、理論の確立を目

指したいと考えています。

では、具体的にはどのような方法で、理論研究を進めているのでしょうか。池田さんがまず注目したのが、「量子色力学（QCD）」です。QCDでは、原子核の核力をクォークレベルからアプローチし、矛盾なく説明することに成功しています。それを成功させたのが、現在、京都大学の青木慎也教授、大阪大学の石井理修准教授、そして理化学研究所の初田哲男主任研究員です。

「私はこの3名が書かれた論文を読んだときに、『これだ！』と思いました。そして、クォークで考える原子核物理を、反K中間子原子核にも適用しようと思い立ち、博士課程修了後、青木さんが領域代表を務めていた新学術領域研究『素核宇宙連携による計算基礎科学に基づいた重層的物質構造の解明』（2008～2012年度）に参画したのです。そして、このプロジェクトがHPCI戦略プログラム分野5にも引き継がれたため、私はここのメンバーの一員になったというわけです」と池田さん。

理論研究として「カイラル有効理論」に着目

残念ながら、反K中間子原子核を、QCDを使って直接計算することは、現在のところできていません。直接計算から解を得るには、計算コストがかかりすぎるからです。そこで、池田さんが着目したのが、「カイラル有効理論」でした。クォークは全部で6種類あり、そのうちアップクォーク、ダウンクォーク、ストレンジクォークの3種類だけを取り出した理論は、カイラル対称性^{※2}に従うと考えられています。カイラル有効理論とは、「カイラル対称性の破れ」といった現象を前面に押し出した理論です。この有効理論はQCDの中で、3種類の軽いクォークからなる低エネルギー領域についての有効場の理論として、広く利用されているものです。

カイラル有効理論を使えば、陽子、中性子、K中間子と、それらを構成するクォークとの間をつなげて統一的に記述できるのではないかと考えられてきました。そこで、池田さんは現在、この理論を使って、反K中間子原子核の束縛エネルギーを算出するための理論研究に取り組んでいるところです。

「実は、反K中間子と核子の複合系を、直接QCDを扱う数値計算で行うのは難度が高いため、現在はK中間子をベースに理論研究を進めています。反K中間子が原子核の超高密度化に関与するか否か、未だに議論が大きく2つに分かれるのは、反K中間子原子核を記述する場合、カイラル有効理論を用いることが本当に適切なかがわからないからです。とはいえ、現時点で、QCDを扱う数値計算でK中間子と核子の複合系を計算した結果を見る限り、反K中間子原子核を説明する上で、カイラル有効理論が有用であるという手応えを大いに感じています」と池田さん。こ

のカイラル有効理論を用いた反K中間子原子核の構造計算により、池田さんは2015年日本物理学会論文賞を受賞しました。

しかしながら、カイラル有効理論には、まだ決定できないパラメータもあります。理論の中に含まれてしまう不定性については、今後確定させていく必要があるのです。

それに対し、現在、山崎氏や赤石氏もメンバーとして加わっている理化学研究所仁科加速器研究センターの岩崎雅彦先端中間子研究室では、茨城県東海村にあるJ-PARC（大強度陽子加速器施設）で、反K中間子原子核の探索を進めています。今後、実験データがそろってくれば、不定性の部分を確定できるようになるため、池田さんは、実験の成功に期待しています。

「反K中間子原子核という、地球上では形成しえないものを実験室で再現できるかも知れないことは、私にとって、とてもワクワクすることです。一方で、スーパーコンピュータによる数値計算ができるようになるまでには、まだまだ時間がかかりそうです。また、仮に計算結果が出たとしても、それを裏付ける理論がなければ、その背後に存在する物理を理解することはできません。ですから、私はそのときのためにも、反K中間子原子核の構造に関する理論の研究を1歩でも前に進めておくことが重要であると考えています」と池田さん。

コンパクト星の構造の解明につながると考えられている反K中間子原子核。その解明に向け、池田さんは日々研究にまい進しています。

用語解説

※1 中性子星

大質量星の晩年に超新星爆発が起こり、その中心核から作られる。原子核を構成する中性子を主成分とする天体。

※2 カイラル対称性

量子色力学（QCD）において、クォークに右巻きのスピン成分と左巻きのスピン成分の2つがあり、これらは鏡に対して対称な関係にあるため、同一と見なすことができないこと。南部陽一郎氏がノーベル物理学賞を受賞した「自発的対称性の破れ」の“対称性”とは、このカイラル対称性のことを指す。南部氏の業績により、カイラル対称性を持った系がエネルギー的に安定な真空中に落ち着くことで、クォーク・反クォーク対が凝縮し、自発的対称性の破れが発生することが明らかになった。

チャームクォークの未知に迫る —格子 QCD 大規模シミュレーション

筑波大学計算科学研究センター 滑川 裕介 研究員

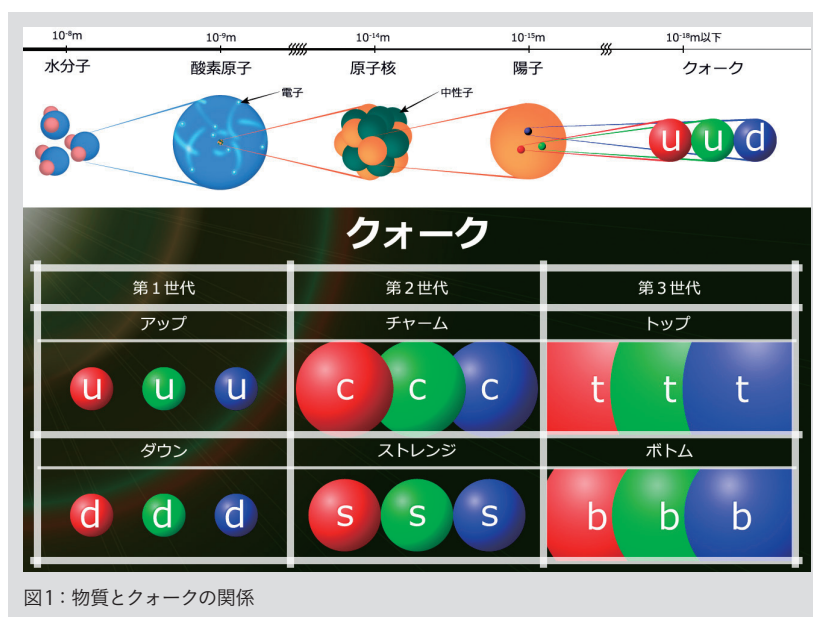
たった1枚のグラフを描くために、スーパーコンピュータをもってしても1年かかる。そんな大変な研究を行う筑波大学計算科学研究センター研究員の滑川裕介（なめかわ・ゆうすけ）さん。「複雑な計算はしているけれど、素粒子の基本法則はシンプルです。論理的にたどっていけば、式は1つ。そこが面白いところです」と語ります。素粒子の一つである「チャームクォーク」に関する知られざる性質を明らかにしようと、日夜シミュレーション研究にいそしんでいます。



未知がいっぱいのチャームクォーク

私たちの身の回りの物質は、原子が組み合わさってできています。その原子は、陽子と中性子からなる原子核と、電子からできています。陽子や中性子はさらに小さな「クォーク」の集合体です。いまのところ、クォークが物質の最も小さな構成要素です。クォークも何かからできている可能

性はありますが、クォークより小さい成分はまだ見つかっていません。クォークには6種類あり、質量が小さいほうから順に、アップ・ダウン・ストレンジ・チャーム・ボトム・トップとなります（図1）。



「登山家が『そこに山があるから登る』と言うように、私は、『そこに未知があるから研究する』のです。チャームクォークには未知がいっぱい残されています」と山登りが趣味の滑川さん。未知がたくさん残されている理由は、チャームクォークの質量が中途半端だからです。質量が小さくもなく大きくもないというのは、非常に研究がしにくいのです。軽いアップ・ダウンや重いボトム・トップに対しては近似

計算法が有効なので、基本的に紙と鉛筆で計算できます。ところが、中途半端な質量のストレンジとチャームに対しては、近似計算法がうまく機能しません。一方、スーパーコンピュータを使ったシミュレーションは万能です。計算コストはかかりますが、ストレンジやチャームでも計算可能です。

真か偽か—実験結果をシミュレーションで検証する

滑川さんがシミュレーションで明らかにしたバリオンの質量について紹介しましょう。バリオンとは、クォークが3つ集まった粒子です。6種類のクォークの中から、どのクォークを組み合わせるかによって、多種多様なバリオン※¹になります。

滑川さんは、チャームクォークを含むバリオンの質量をコンピュータシミュレーションで計算しました（図2）。ピンクの星印は実験で観測されたバリオンの質量、赤丸が滑川さんのシミュレーション結果です。赤丸のみが示されているバリオンは、まだ実験で観測できていない、未知のバリオンです。滑川さんはシミュレーションで、「この質量を持ったバリオンがこの世の中には存在するだろう」という予測をしました。現在、世界中の実験研究をするチームが、これらのバリオンを検出しようとしのぎを削っています。

実は図2は、論争になっているある実験データに1つの「ダメ出し」証拠を突きつけてもいます。チャームクォーク2つを含むバリオンの観測は、世界でただ1チームだけが成

功したとして報告しています。それが図2に示したダブルチャームグザイバリオン（ Ξ_{cc} ）の星印です。他にも世界で3チームが観測に挑戦していますが、まだ成功していません。これら3チームは「この観測値は間違っているのではないか」と主張しています。

滑川さんのシミュレーション結果は、真か偽かという問いに「偽」という判断材料を提供しています。そして、「もう少し大きい質量を狙って観測すれば見つかるはずだ」というメッセージも提供しています。

図3は、滑川さんのシミュレーションから算出した質量を、実験結果で割った値を示しています。シミュレーション結果と観測結果が一致していれば、ちょうど1になります。論争になっているデータは黒矢印をつけた Ξ_{cc} です。他のバリオンは誤差範囲を考慮すれば1に近いのに、 Ξ_{cc} だけが、誤差範囲の約4倍も1から外れてしまっています。どうも実験結果が間違っている可能性が高そうです。シミュレーションは、より大きな Ξ_{cc} の質量値を示しています。

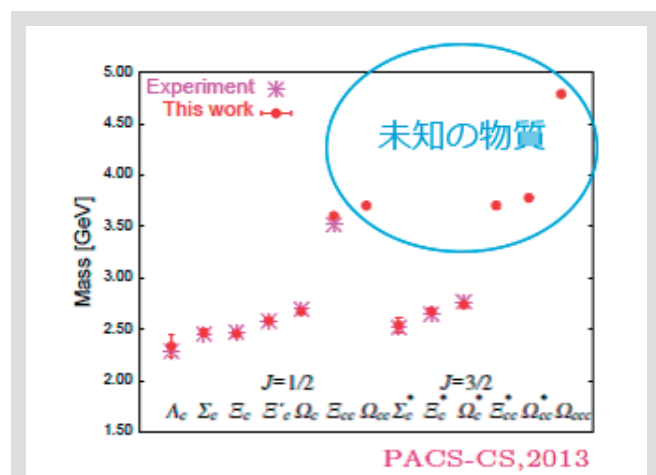


図2：バリオン質量のシミュレーション結果

滑川さんが筑波大学計算科学研究センターのスーパーコンピュータ「PACS-CS」を使用して、合計1年もの時間をかけて計算した。シミュレーションを行えば、まだ実験では捕らえられていないチャームクォーク2つや3つのバリオンの存在も予測できる。出典：Y. Namekawa et al. (PACS-CS Collab.), Physical Review D87, 094512 (2013)

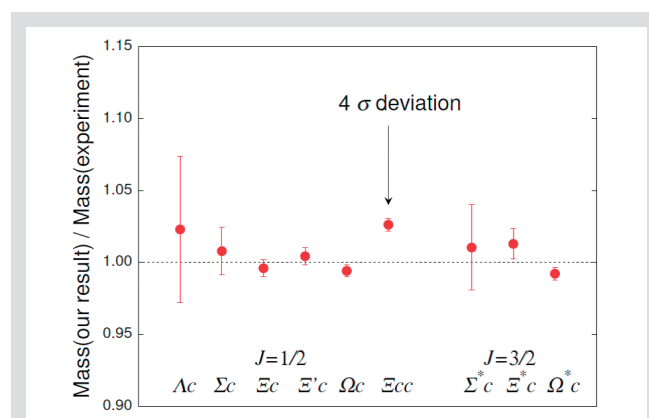


図3：バリオン質量シミュレーション結果を実験結果で割った値

赤丸の上下に伸びる赤い棒は誤差範囲。滑川さんが行うシミュレーションでは、計算を始めて2〜3カ月の頃は誤差範囲が広く、実験結果が正しいかどうかはわからなかった。データを積算していくうちに、誤差範囲がだんだん狭まっていく。1年近く積算した結果、他のバリオンは実験結果に近いのに、 Ξ_{cc} だけが実験結果から外れていく様子をみた滑川さんは「まず我が目を疑い、次に自分のプログラムに間違いが無いのか疑い、胃が痛くなりそうになりながら計算に不備がないか何度も確認しました。しかし、問題は見つからず。最終的に、この実験結果は正しくない可能性が高いと判断しました」。

直接実験できないときこそ、シミュレーションの出番

素粒子の世界には、実験ではどうしても観測できない値があります。それを求めるのもシミュレーションが得意とするところです。たとえば、チャームクォークの質量（図4）が挙げられます。クォークは単独で存在できず、その質量を実験観測で決定することは物理的に不可能です。しかし、シミュレーションを駆使すれば、クォーク質量などの直接観測できない量すら決定できます。

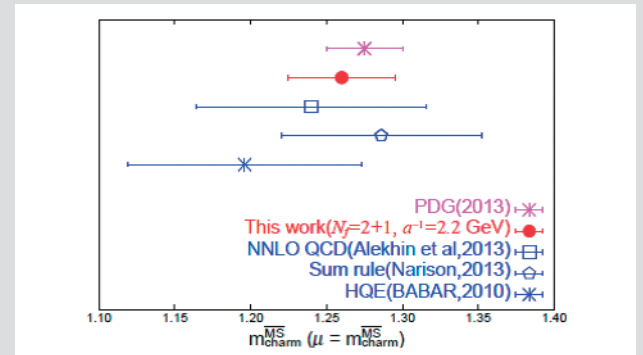


図4：チャームクォーク質量値の比較
様々な研究グループが算出したチャームクォークの質量値。PDGは世界中の結果から毎年割り出される世界標準値。赤丸が滑川さんのシミュレーション結果。出典：Y. Namekawa et al. (PACS-CS Collab.), Phys. Rev. D84, 074505 (2011)

シミュレーションの工夫と努力

「チャームクォークのシミュレーションは、アップ・ダウン・ストレンジクォークの場合と違い、一筋縄ではいきません」と滑川さんは言います。そんな中でも、「私たちの研究は精確な値になるよう工夫しています」と滑川さんは自信をのぞかせます。いったい、どのような工夫をしたのでしょうか。

滑川さんは「格子量子色力学（こうしりょうしいろりがく）」という手法を使っています。クォーク及びクォークの間に生じる強い力の理論である量子色力学（QCD、Quantum ChromoDynamicsの略）を格子上で定式化し、シミュレーションを可能にした計算方法です（図5および10ページ2段落目「QCD」はクォークとグルーオンの力学を参照）。

この格子が粗い（格子間隔 a が大きい）と非連続の世界となり、現実から遠のいて（離散化誤差が入って）しまいます。ですから、格子間隔 a をなるべく小さく設定したいのです

が、そうすると計算量は莫大になってしまいます。そこで滑川さんは、計算式の中で格子は粗くとりながらも、離散化誤差が小さくなる工夫をしています（図6）。

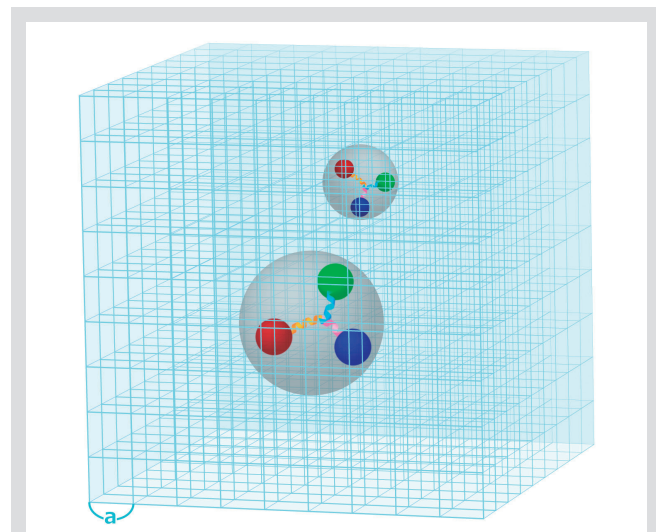


図5：格子QCDのイメージ図
4次元時空を格子間隔 a で分割（離散化）することで、シミュレーションが可能になる。

$$A_{\text{lattice}}(a) = A_{\text{continuum}} + O((a\Lambda_{\text{QCD}})^2) + \dots + O(am) + O((am)(a\Lambda_{\text{QCD}})) + O((am)(a\Lambda_{\text{QCD}})^2) + \dots$$

図6：格子QCDでの計算の工夫

$A_{\text{lattice}}(a)$ は格子QCDで求めた物理量、 $A_{\text{continuum}}$ は物理量の真の値、 $O(\quad)$ は離散化誤差を表す。誤差の値が大きくなる青斜線を付した項が消えるように計算の工夫をしている。 a は格子間隔で、 Λ_{QCD} は定数。通常、 $(a\Lambda_{\text{QCD}})$ は1より小さい値。 a が1乗で効く $O(a\Lambda_{\text{QCD}})$ は大きな誤差となる。 $O(am)$ と $O((am)(a\Lambda_{\text{QCD}}))$ にはチャームクォークの質量 m が入る。チャームクォークのシミュレーションでは m が大きい値となるので、この項も大きな誤差として結果に悪影響を及ぼしてしまう。これらの誤差を消す工夫をすることで、ある程度大きな格子間隔 a を使っても誤差が小さい計算となり、比較的少ない計算量でも精確なシミュレーションができるようになった。

この工夫で、100倍から1000倍効率の良い計算ができるようになりました。これは、100年～1000年かかる計算が1年に短縮できたことを意味します。

計算機への指令書ともいうべき計算コード※²は実に8万行。

うまく計算が動くようになるまでに悪戦苦闘がありました。どこが原因で動かないのかを根を詰めて考えていると、“夢のお告げ”があったことも。夢から覚めてコンピュータに向かうと、本当にお告げの箇所にエラーを発見したという経験が何度もあるそうです。

未知はたくさん残っている

クォークに働く「強い力」のみを考慮した研究を中心に紹介してきましたが、滑川さんは、残り3つの相互作用「電磁気力」「弱い力」「重力」も計算に取り入れたいと考えています。強い力に加え上記3つの力を含めることで、本当の意味で現実世界をシミュレートできるためです。すで

に、電磁気力を取り入れたより現実的なシミュレーションを行っています。ただ、弱い力や重力は、どうやって格子上の計算式にすればよいのかすらわかっていないのが現状だそうです。研究すべき未知はたくさん残っています。

用語解説

※1 多種多様なバリオン

たとえば、アップ・ダウン・チャームの各クォークが1つずつ組み合わせるとチャームラムダバリオン (Λ_c)、アップクォーク1つとチャームクォーク2つが組み合わせるとダブルチャームグザイバリオン (Ξ_{cc++}) となる。

※2 計算コード

使用するコードはBridge++。滑川さんも Bridge++ の中心開発メンバーの一人である。くわしくは、月刊 JICFuS 「シミュレーション手法の共通化でクォークの謎の解明に貢献」(69ページ) を参照。

太陽物理学最古の謎 「黒点の11年周期変動」の答えを探して

千葉大学大学院理学研究科 堀田 英之 特任助教

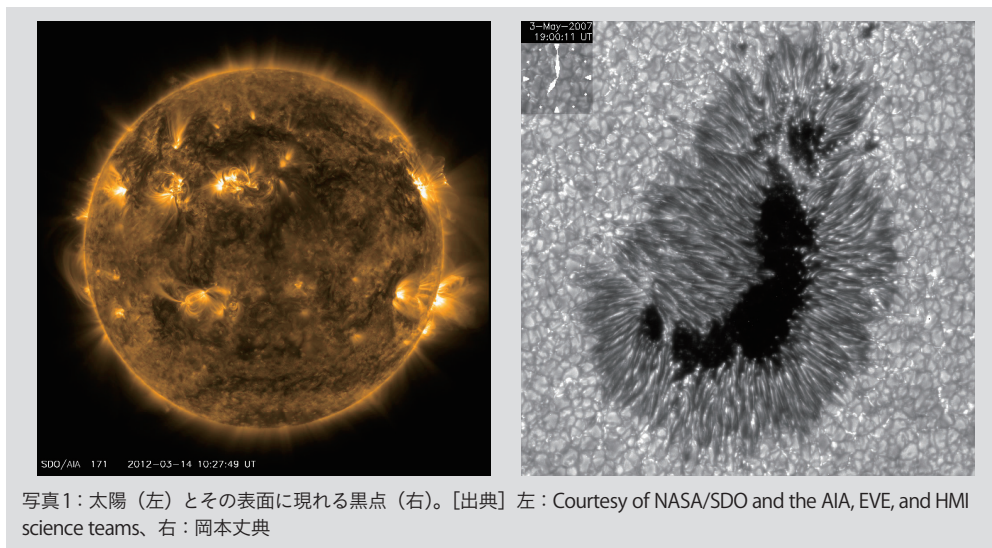
太陽表面に現れる「黒点」。周りより温度が低く、強い磁場に満たされた場所です。黒点の数は太陽の活動状況によって増えたり減ったりしており、それは11年の周期で繰り返されています。太陽の観測・研究が始まってすでに400年経ちますが、「どうして“11年”なのか」についてはわかっていません。千葉大学大学院理学研究科の堀田英之（ほった・ひでゆき）特任助教は、この問題に独自のアイデアで挑み、スーパーコンピュータ「京」を使ったシミュレーションで新たな成果を上げています。



最近、太陽が少し変?!

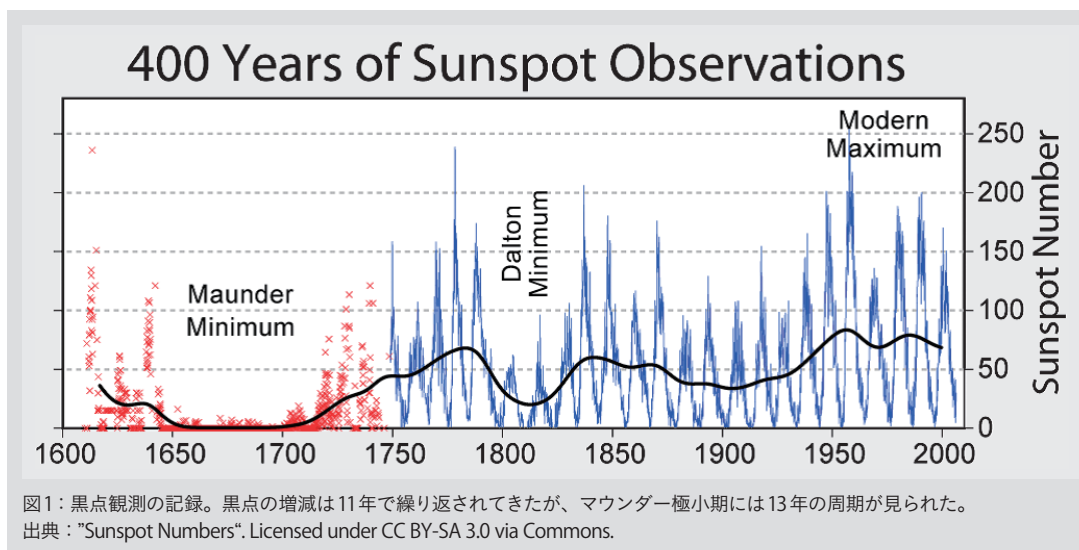
「1600年代の初め、ガリレオ・ガリレイが自分でつくった望遠鏡を使って、太陽を観測していました。以来、観測が続けられてきましたが、今、太陽の活動がちょっと変なんです」と最近の太陽について話す堀田さん。大学院生の頃からずっと、太陽の黒点について研究しています。

黒点とは太陽表面にある黒い点のことです（写真1）。太陽表面は普通、温度6000℃、磁場30ガウスほどですが、黒点の部分は4000℃、3000ガウスと低温で強い磁場をもった場所です。黒く見えるのは、周りより温度が低いからです。また点といわれますが、その大きさは幅3万 km、地球3個が入ってしまうほどです。



黒点は現れたり消えたりするので、太陽表面の黒点の数は常に変わります。その周期は11年になっています（図1）。ところが、前回の周期はその長さが13年に伸びていたというのです。これは、ガリレオが太陽の観測を始めてから数十年後の状況とよく似ています。当時の太陽は黒点の数が

極端に少なかったことから「マウンダー極小期」などと呼ばれており、その影響からか地球は今より寒かったという説もあります。そのため太陽の研究者の中には、「太陽は今、約400年ぶりにマウンダー極小期を迎え、地球環境も大きく変わるのではないか」と考えている人がいるのです。



黒点はどうのようにしてできるのか？

最近の黒点の異常な周期を気にかける堀田さんですが、黒点の研究では、やっとそのでき方がわかり始めたばかりだといいます。それほど、黒点研究は難しいようです。太陽内部では水素の核融合反応によって、膨大なエネルギーが作り出されています。このエネルギーは、太陽の中心から順に放射層、対流層を通して外へと放出されます（図2）。エネルギーは放射層では光として運ばれ、対流層ではプラズマの熱対流によって伝えられています。プラズマは電気を帯びているので、その流れは磁場を発生させます。磁場が特に強い場所では、この磁場がプラズマの対流を妨げ熱エネルギーの流れを遮るので、周りよりも温度が低くなります。こうして温度が低くて、磁場が強い「黒点」が出現するのです。

「実際のプラズマは、図2のようにキレイに対流しているわけではありません。粘性がとても小さいこと、そして太陽の自転や磁場などの影響を受けて、グチャグチャなんです。黒点はこのグチャグチャの乱流から発生するのに、11年周期やバタフライダイアグラムなどキレイな法則に従います。不思議ですよ（図3）」と堀田さん。黒点の謎を解くには、まずプラズマの乱流をちゃんと理解することだと考え、研究を進めています。

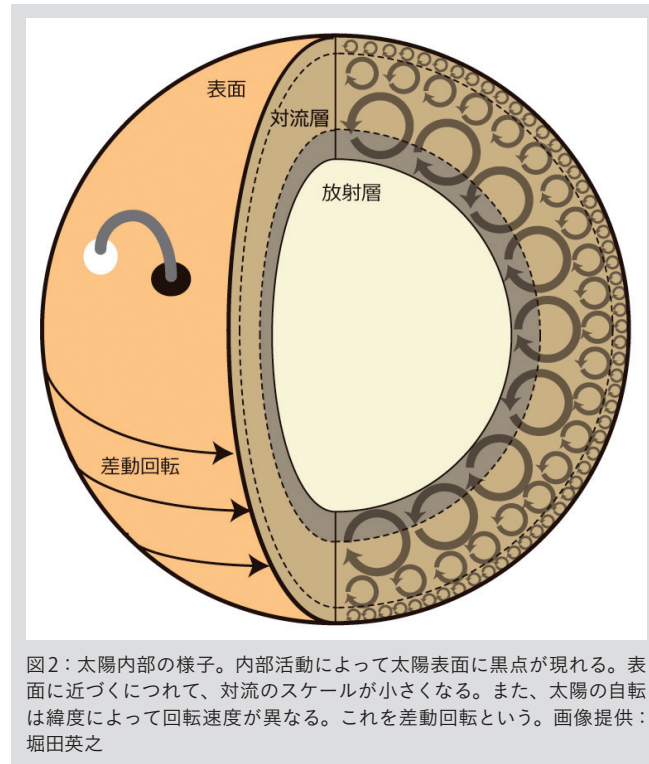
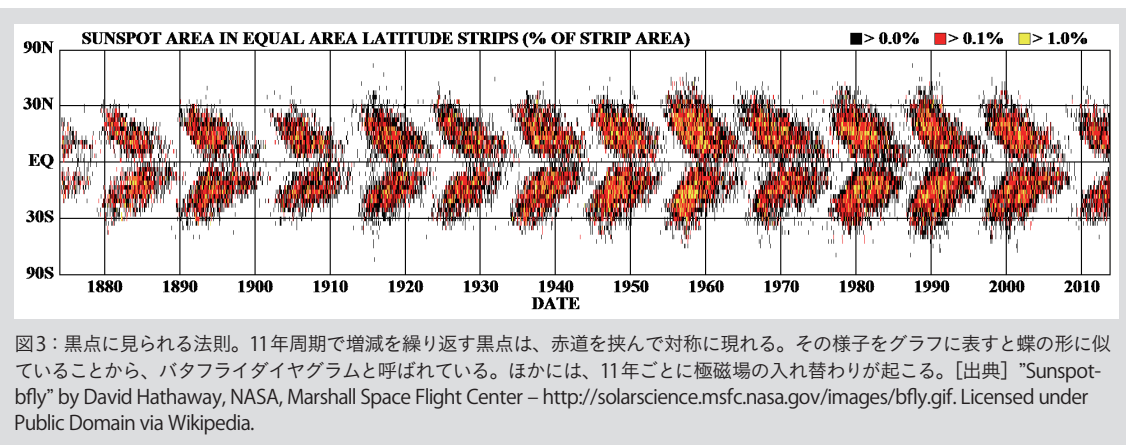


図2：太陽内部の様子。内部活動によって太陽表面に黒点が見れる。表面に近づくにつれて、対流のスケールが小さくなる。また、太陽の自転は緯度によって回転速度が異なる。これを差動回転という。画像提供：堀田英之



新たなアイデア「音速抑制法」で世界と勝負

黒点の研究といえば、アメリカ大気研究センター（NCAR）の高高度観測所（HAO）に最大のグループがあり、多くの研究成果を上げています。堀田さんは学部4年のとき、このグループが発表した太陽表面のシミュレーション動画を見て、自分もこうした研究をやりたいと、HAOのマティアス・レンペル博士のところを訪れました。そのときから堀田さんは、アメリカと日本を行き来しながら研究することになりました。ところが、トップ研究者の中にいるうちに「先人たちはすごいけれど、同じことをやっていては進まない。何か新しいアイデアを考えなくては」と思うようになったといいます。大学院生の頃のことでした。

太陽表面に黒点ができる様子をシミュレーションで再現するには、対流層におけるプラズマの乱流を詳細に計算しなければなりません。計算には音波の影響が含まれていて、これがどうしても計算の邪魔になってしまいます。HAOのグループは、音波が無限大の速さだと仮定することで、音波を計算する必要をなくし邪魔を取り除いていました。こ

のアンエラスティック近似といわれる方法はなかなか優れていて、太陽の中心から98%のところまでのプラズマの乱流の計算を可能にしました（図4左）。太陽半径の2%は、およそ地球の直径と同じ長さです。

ところがこの方法には、「京」などCPUの多いスパコンを使って計算をしようとした場合に、計算負荷が大きくなり過ぎて、スパコンの能力を生かせないという問題がありました。そこで堀田さんは、音波の速さを逆に抑えてしまう「音速抑制法」を考えました。「音速を無限大と仮定していいということは、この計算では音波は重要ではないのかもしれないと思いました。だったら、音速を抑制してもいいのではないかと発想したのです」。音速抑制法はさまざまな検証を経て、その妥当性が確かめられ、太陽表面を再現するシミュレーションに使われるようになりました。「京」を使って計算できると決まったらからは、さらに改良が加えられました。

表面到達まで、あと1%

図4右は、「京」で音速抑制法を行った結果得られた太陽表面のシミュレーション動画です。従来のもの（図4左）に比べて、明らかに細かな乱流を表現できているのがわかります。より細かいスケールで表現できるということは、より正確にプラズマの乱流を理解できるということです。これは、音速抑制法によって多くのCPUを効率的に使って細かい乱流まで計算できるようになったため、中心から99%のところまで数値計算できるようになったからだだと堀田さんはいます。従来法の98%からたった1%しか表面

に近づいていませんが、98%の地点より温度は下がり、それに伴って渦巻く乱流のスケールもずっと小さくなります。その様子は、98%地点とはまったく違うのです。それを再現したことは、音速抑制法の大きな成果です。

この1%の前進は、これまで不可能だった「太陽の表面勾配層」も再現しました（図5）。表面勾配層とは、太陽表面にある「流れの速度が急激に変化する部分」のことで、黒点の運動に影響していることが知られています。最新のシ

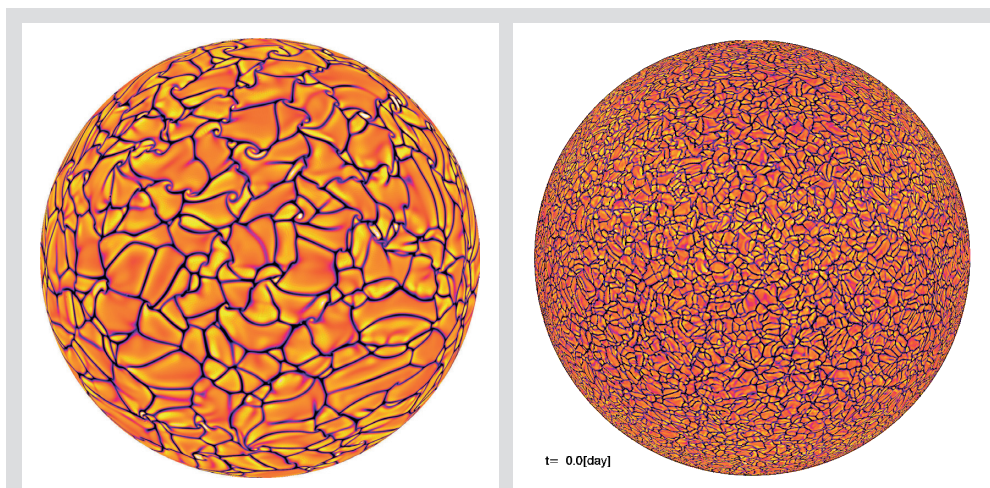


図4: HAOのグループがアナラストティック近似で計算した太陽（左）と、堀田さんが音速抑制法で再現した太陽（右）。スケールの細かさは一目瞭然だ。右ムービー：QuickTime（15.8MB）QuickTimeムービーを見るにはQuickTime Playerが必要です。QuickTime Playerダウンロード 【出典】左：Mark Miesch、右：Hotta et al., ApJ, 2015

ミュレーションでは、黒点らしきものが現れるようになりました。

一方で、まだ再現できないこともあります。それが、残された表層1%です。堀田さんのシミュレーションを見ると、外側に白抜きの部分として描かれています。「表面まであと1%。もう少しだという印象かもしれませんが、この1%を明らかにするのはかなり難しいと思います。もしかしたら30年かかるかもしれません」。堀田さんは自身の研究者人生をかけて研究する覚悟です。

太陽の黒点は堀田さんをどうしてそこまで夢中にさせるのでしょうか。黒点の謎に迫りたいといのはもちろんですが、その先に流体への深い理解があるからだといいます。というのも、太陽は地球に一番近い恒星としてとてもよく研究され、多くのことがわかっています。堀田さんがプラズマの乱流について考えたことは、太陽の実物に照らし合わせてみれば、正しいのか間違っているのかがすぐにわかります。間違っていれば、何がいけないのかすぐに考えられる。こうして黒点の謎に迫りながら、同時に流体の不偏の物理を追い求めてもいるのです。

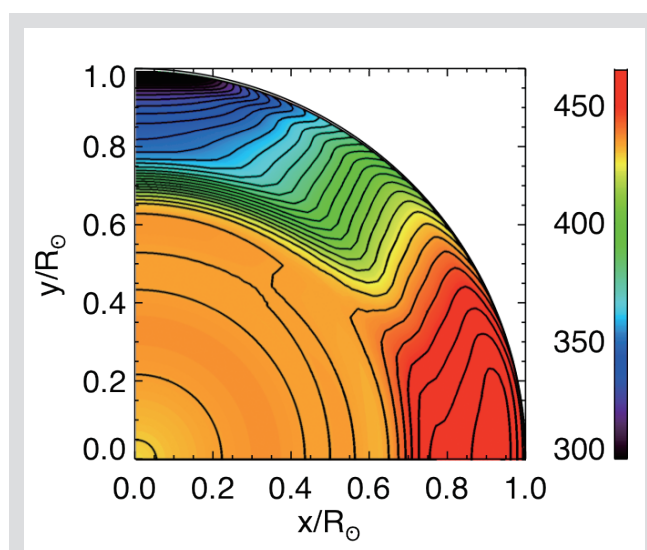
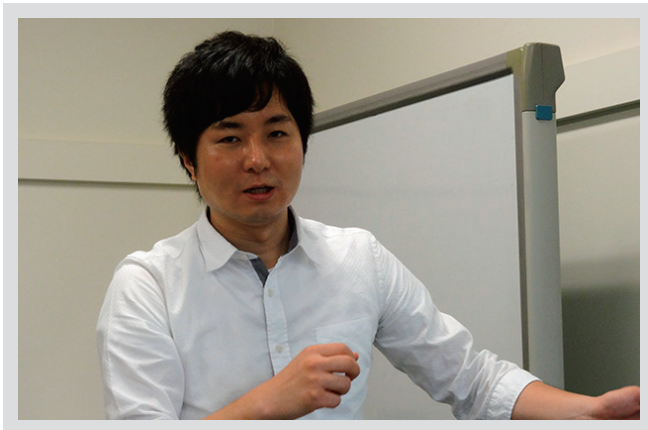


図5：表面勾配層（太陽半径の約95%より上の層）。乱流の速度が急激に大きくなる部分で、太陽観測によってその存在は確認されているが、これまでの数値計算では再現できていなかった。

宇宙の成り立ちの解明につながる ブラックホールの謎に迫る

国立天文台 川島 朋尚 特任研究員

1916年、ドイツの天体物理学者カール・シュバルツシルトは、アインシュタインの一般相対性理論の方程式から、世界で初めて「ブラックホール」という天体の存在を導き出しました。



その後、電波や赤外線、可視光線、X線などさまざまな波長の光を使って宇宙を観測できるようになったことで、ほとんどすべての銀河の中心には、非常に強い重力であらゆるものを吸い込みながら成長するブラックホールが実在することが示されています。

「ブラックホールを理解することは、銀河、ひいては宇宙の成り立ちを理解することにつながります。そのため、数多くの天文学者がブラックホールに注目しているのです。ブラックホールというと、子どもの頃は得体の知れないものと思っていましたが、学生時代、ブラックホールを間接的にはあっても実際に観測できることを知り、この道に進むことを決めました」と話すのは国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの川島朋尚特任研究員です。

観測が進むブラックホール

ブラックホールとはどのような天体なのでしょう。ここでは恒星程度の質量のブラックホールに焦点をあててみましょう。

あらゆる恒星には、我々と同様に寿命があります。その一生は数千万～数百億年と言われており、一生を終えると恒星はより小さく密度の高い天体に生まれ変わります。密度は元の恒星の質量によって決まります。太陽くらいの質量の恒星は、1 cm角の体積の質量が約1 tになる「白色矮星」に、太陽の8～30倍の質量の恒星は、1 cm角の体積の質量が約5億tになる「中性子星」になります。それより重い恒星は、1 cm角の体積の質量が200億t以上に及ぶブラックホールになるのです。

時空は天体の重力によって歪むことが、アインシュタインによって初めて提唱されました。冒頭で紹介したカール・シュバルツシルトは、アインシュタイン方程式を解くこと

で、実際の宇宙でどのような様にして生まれるかはさておき、ブラックホールの解が存在することを示しました。その後の研究により、恒星の最期に引き起こされる超新星爆発の際に、あまりに密度が高くなった天体は自分自身の重力を支えきれず中心に向かって収縮し続けることで時空を大きく歪め、ついには時空に穴を開けてしまうことがわかりました。その天体がブラックホールというわけです。

ブラックホールは重力が非常に強いため、一旦ブラックホールに吸い込まれてしまうと、光すら脱出することができません。光や物質が脱出できなくなる境界は「事象の地平面」と呼ばれています。

事象の地平面より内側からは光さえも脱出できないため、ブラックホールの直接的な観測はできません。しかし、ブラックホールの周囲にある物質を観測することで、間接

的な観測ができるのです。ブラックホールの近くにある天体や天体から流れ出る物質は、角運動量をもっているの
でまっすぐにブラックホールに吸い込まれるわけではなく、
ブラックホールの周囲を渦巻きながら、徐々に落ちていく
ことがわかっています。この渦巻きは「降着円盤」と呼ば
れます。

また、ブラックホールに落ち切らなかった物質の一部は
ジェットとなって、降着円盤の面に垂直に、勢いよく噴
出します。ジェットとは、細く絞られた高温のガスの流れ
のことで、それは光の速度の99%近くに及びます（図1）。
加えて、ブラックホールの周囲からはウインドと呼ばれる
ジェットより遅い噴出流も確認されています。降着円盤や



図1：ブラックホールの降着円盤とジェットのイメージ
中心の黒い丸がブラックホール（NASA/ JPL-Caltech提供）

ジェット、ウインドからは様々な波長の光が放出されてお
り、電波や可視光線、紫外線、X線、ガンマ線などで観測
されています。

ブラックホールが銀河に影響を及ぼす

光を放出したりジェットやウインドを噴出させたりするに
は、莫大なエネルギー源が必要です。このエネルギーの
もとがブラックホールの重力エネルギーであり、それを熱
などのエネルギーに変換しているのが降着円盤です。降
着円盤の内側と外側では、物質の回転速度が異なります。
重力は内側へ行くほど強いので内側の方が速く回転し、回
転速度の差によって円盤内に摩擦熱が生じます。この熱
が光となって出てくるわけです。また、このとき生まれた
光の圧力（輻射圧）や磁場がジェットを加速させていると
考えられています。

これらが周囲の銀河に対して強い影響を与えていることは、
想像に難くありません。しかし、どの程度、銀河の形成や

進化に影響を与えるかについてはほとんどわかっていま
せん。その原因は、エネルギー源である降着円盤やジェッ
トのメカニズムが複雑で、計算式を解くのが大変だからで
す。どの程度のエネルギーがどの方向に光やジェットそし
てウインドとして放出されるかは未解明なのです。

そこで、川島さんはブラックホール周囲のプラズマ（降
着円盤やジェット、ウインド）の観測結果と比較しながら、
スーパーコンピュータを使って数値シミュレーションを行
うことで、降着円盤の理解を通じてブラックホールそのも
のと、ブラックホールと銀河の関係について解き明かさ
うとしています。

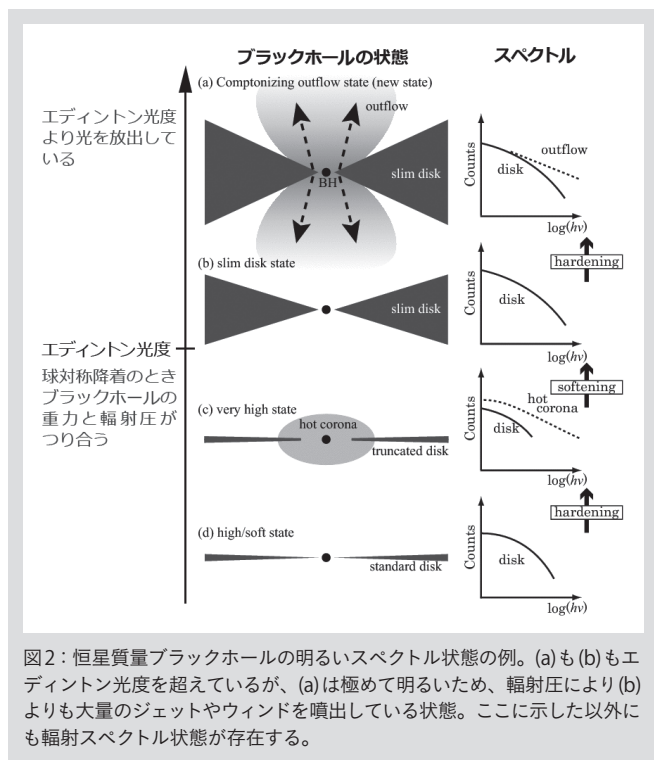
限界を超えた明るいブラックホール降着円盤と謎のX線源

観測されるブラックホールは降着円盤から放射している光
のスペクトルの特徴から、様々な放射（輻射）スペクトル
状態に分類されていて、対応する降着円盤の理論モデル
が提唱されています（図2）。図2（d）は「標準円盤」と
呼ばれる状態のブラックホール降着円盤です。放射冷却
が効率よく働くことで円盤ガスは低温になるため、降着円
盤は幾何学的に薄くなっています。ジェットは噴き出して
いないか、あるいは噴き出していたとしても観測できない
ほど少量と考えられています。ブラックホール降着円盤の
研究としては最も早い1960年代から理論研究が始まりま
した。

ここで重要になってくるのが、(a) (b) と (c) (d) の間に
ある「エディントン光度」です。ブラックホールに向かっ

て物質が吸い込まれていく際、同時に莫大な量の光が発
生します。物質を吸い寄せているのはブラックホールの重
力、一方で外へと押しやるのは光の圧力である輻射圧で
す。この2つの力が釣り合っている状態の光度が、エディ
ントン光度、もしくはエディントン限界と呼ばれるもので
す。エディントン光度はブラックホールの質量に比例する
ことがわかっています。

「1990年代までは、エディントン光度を超えて、物質がブ
ラックホールに吸い込まれることは難しいと考えられてい
ました。正確には1988年に提唱されたスリム円盤モデル
（図2 b）では、エディントン限界を超えられることが示
されていましたが、多次元効果が考慮されていないこと、そ



して輻射輸送が正確に解かれていないことが問題となっていて、本当にエディントン限界を超えられるかどうかは長いあいだ未解決問題となっていました。しかし2000年代に入り、図2 (a) や (b) のような降着円盤の上から光が抜け出ていくことで本当にエディントン光度を超えられることが、多次元シミュレーション研究によりわかってきたのです。これを『超臨界降着』と言います」と川島さん。つまり、ブラックホールに吸い込まれる物質の量にも、吸い込まれることなく放出される物質や光の量にも上限がないことが明らかになったのです。以前はエディントン限界に基づいて明るい天体にはそれ相応に重いブラックホールが存在すると考えられてきました。しかし、エディントン限界を超えられることで、明るい天体にも軽いブラック

ホールが存在し得ることが判明しました。

現在、ブラックホールは、質量の違いによって3種類に分けられます。まず、太陽の約10倍の質量の「恒星質量ブラックホール」。次に、太陽の100～1万倍の質量の「中間質量ブラックホール」。そして、太陽の100万～100億倍の質量の「超大質量ブラックホール」です。

これらは、でき方が異なっていると考えられています。恒星質量ブラックホールは、冒頭でふれたように恒星が寿命を迎えた際に超新星爆発によってできると考えられています。しかし、超大質量ブラックホールのでき方はほとんどわかっていません。現在のところ、大きく分けて、ブラックホール同士の合体と超臨界降着の2つのシナリオが考えられています。

一方、中間質量ブラックホールに関してはさまざまな議論がされています。「現在、超高輝度X線源と呼ばれる非常に明るい天体が500個以上も観測されており、その中心に中間質量ブラックホールがある可能性が示されています。というのも、エディントン光度はブラックホールの質量に比例するので、質量が十分に大きければ、エディントン光度を超えなくても、非常に明るく光ることができるからです。中間質量ブラックホールの合体や中間質量ブラックホールへの質量降着は超大質量ブラックホール形成シナリオの1つとして考えられています。しかし、超高輝度X線源の中心にあるブラックホールが超臨界降着により輝いているとするとすれば、超高輝度X線源の正体は恒星質量ブラックホールとなり、新たなシナリオを考えなければいけません。そのため、現在、超高輝度X線源はブラックホールの成長を考える上で、重要な要素の1つとなっているのです」と川島さんは語ります。

コンピュータシミュレーションでブラックホール降着円盤の新たな輻射スペクトル状態に迫る

現在のところ、超臨界降着のブラックホールの輻射スペクトルの観測結果は少なく、理論研究もあまり進んでいません。そこで、川島さんが進めているのが、コンピュータシミュレーションによる超臨界降着ブラックホールの輻射スペクトルの計算です。

「これまでにわかった重要なことの1つは、超臨界降着には『コンプトン散乱』および『逆コンプトン散乱』が深く関与しているということです。シミュレーションにコンプトン散乱と逆コンプトン散乱の計算式を入れると観測結果と非常に合致するのに対し、入れないと、観測結果とまったく異なる結果が得られます」と川島さん。

コンプトン散乱とは、光が電子と衝突し、光の周波数が元の周波数よりも小さくなる現象のことで、光から電子へエネルギーを受け渡します。電子温度が光の温度よりも高い領域では、逆に電子から光へのエネルギーの受け渡しである逆コンプトン散乱が起きます。つまり、超臨界降着においては、光と電子の間のエネルギーの受け渡しが重要な要素となっていることが判明したのです。この計算によって、ブラックホール降着円盤の新しい輻射スペクトル状態の存在が示されました。

さらに川島さんは、一般相対性理論や磁場の効果を含め

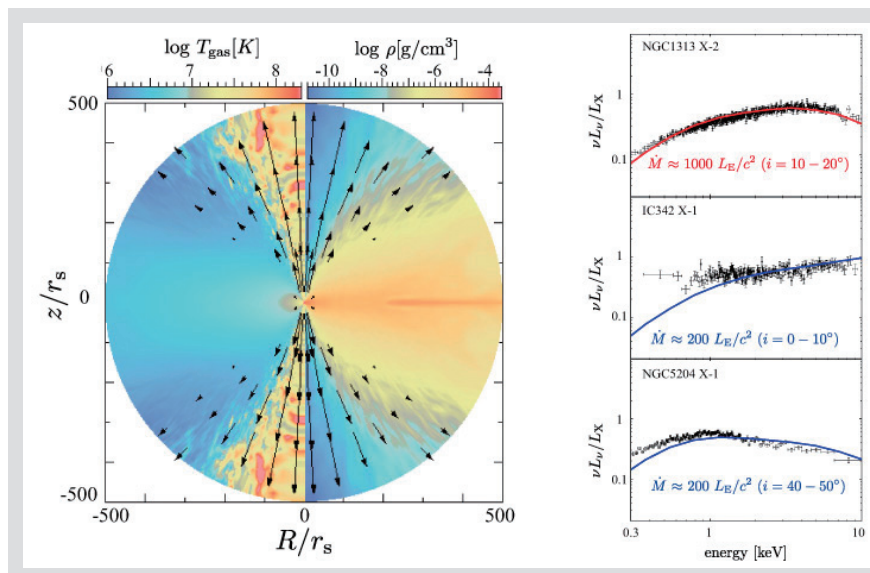


図3：超臨界降着ブラックホールとその輻射スペクトル
輻射流体シミュレーションの結果得られた超臨界降着
ブラックホール（左）。ブラックホールは原点に位置し
ており、上下にジェットを噴出している。矢印はガス
の速度の大きい部分だけを表示。左側は電子温度を、右
側はガスの質量密度を表している。ジェット部分の温
度が高く、降着円盤部分の密度が他と比べて高いこと
がわかる。

右の図は輻射スペクトル計算結果。赤と青の線がシミュ
レーションにより得られた輻射スペクトル、黒い点は
XMMニュートン衛星による観測データ。超臨界降着
する恒星質量ブラックホールからの輻射スペクトルが、超
高輝度X線源のX線スペクトルをよく再現することがわ
かった。

たシミュレーションによる輻射スペクトル計算にも着手し
ています。「さきほどの光（輻射）と物質の流れを扱う『輻
射流体シミュレーション』によって超臨界降着する恒星質
量ブラックホールをシミュレートし輻射スペクトルを計算
することで、超高輝度X線源のX線スペクトルを初めて再
現できました（図3）。最近では、世界的に超臨界降着へ
の関心が高まり、目覚ましい進展があります。今回の私の
計算では近似モデルでしかとり扱っていなかった一般相

対性理論と磁場の効果も、同時に解く『一般相対論的輻
射磁気流体シミュレーション』が行われ始めており、超臨
界降着におけるジェットの噴出のメカニズムや高温プラズ
マの形成メカニズムが徐々にわかってきました」。

今後は、一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションに
よるブラックホール降着円盤の輻射スペクトル計算にも挑
戦することで、ブラックホールに関する理解を深め、銀河、
そして、宇宙の成り立ちの謎に迫っていく計画です。

我々の銀河のブラックホールにガス雲が接近！？

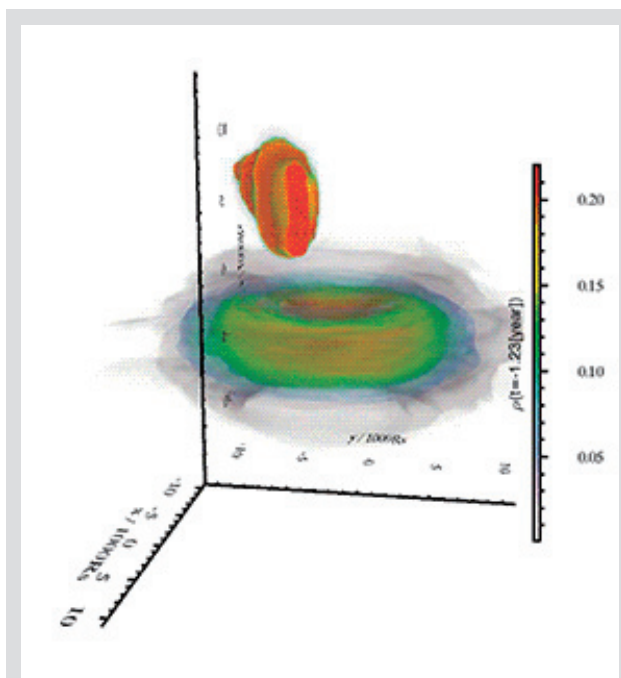


図4：ガス雲と衝突する銀河中心ブラックホール降着円盤のシミュレ
ーション
ガス雲（赤色）が斜め上から現れ、降着円盤と激しく衝突します。衝突
後5～10年後に磁場が増幅することが予測されます。

2012年、我々がいる銀河の中心のブラックホールに、
地球の約3倍の質量をもつガス雲が非常に接近してい
ることが観測されました。ガス雲がブラックホールに近
づけば、その重力によって吸い寄せられ、ブラックホー
ルの周囲が明るく光り出すはずですが。その瞬間を見よう
と、世界中の研究者が沸き立ちました。しかし残念ながら、
現在のところ、そのような現象は観測されていま
せん。その原因を探るため、川島さんたちはHPCI戦略
プログラム分野5のサポートを受けて開発されている
高精度な宇宙磁気流体コードCANS+を用いて3次元磁
気流体シミュレーションを試みました。

「わかったことは、5～10年の歳月をかけてブラック
ホールの周囲の磁場が強まっていくということです。で
すから、今後ブラックホールの周囲が光る可能性は十
分高いと考えられます。そのため、日本と韓国による
観測プロジェクトが発足しています。ガス雲がブラック
ホールに吸い寄せられ、明るく光り出す瞬間を見ること
を楽しみに待ちたいと思います」。

大規模シミュレーションで核変換反応を明らかにする

東京大学大学院理学系研究科 富樫 智章 特任助教

核変換とは、原子核を別種の原子核に変えることです。核変換には放射性廃棄物処理を始めとして、様々な応用が考えられますが、核変換をどのような方法で実現できるかは研究途上です。

研究を進めるには、まず核変換を起こす反応を理解することが重要で、そのためには反応前後の原子核の量子状態を明らかにする必要があります。東京大学大学院理学系研究科特任助教の富樫智章さんは、モンテカルロ殻模型という方法によって、まだだれもやったことのない、核変換前後の原子核の量子構造を大規模シミュレーションで解明する研究に挑んでいます。



注目される核変換反応

陽子と中性子（あわせて核子という）からなる原子核は、核子の間にはたらく核力によって一つの塊になっています

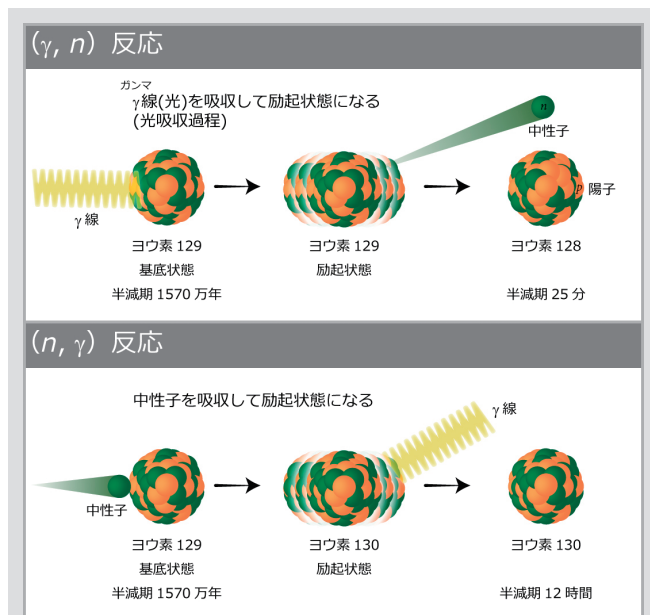


図1：核変換反応

上の (γ, n) 反応は原子核にγ線を当て、下の (n, γ) 反応は中性子を原子核に当てて、それぞれ半減期の短い原子核にする。

が、内部の構造や性質には不明な点が多く、さまざまな研究が進められています。中でも注目されているのは核変換反応です。

原子炉で核分裂反応を行うと、人工的な核種が生じます。その中には、半減期（寿命）が数十万～数百万年と非常に長いものがあり、長寿命核分裂生成物と呼ばれています。これは、数十万～数百万年ものあいだ放射線を出し続ける危険な核種であることを意味します。もし、長寿命核分裂生成物を核変換反応によって寿命の短い核種に変えることであれば、高レベル放射性廃棄物の低減化や資源化につながる可能性があります。そこで今、核変換反応の実現に向けた議論が盛んに行われ、そのための基礎研究が始められました。

核変換反応には、2つの方法があります。ひとつは、γ線(光)を長寿命原子核に当てて不安定な状態にすることです。γ線によって与えられたエネルギーがあるレベルを超えると、不安定な原子核は中性子を放出し、安定な別の原子核に

なります。この反応を (γ, n) 反応といいます。もうひとつは、 (n, γ) 反応といい、原子核に中性子を吸収させて別の原子核にする方法です。原子核が中性子を吸収すると不安定な状態になり、安定な状態に戻るときに光を出します。ヨウ素129の半減期は1570万年ですが、 γ 線を当てる (γ, n)

反応の結果、半減期が25分のヨウ素128になり、中性子を吸収させる (n, γ) 反応では、半減期が12時間のヨウ素130になります(図1)。このような (n, γ) 反応や (γ, n) 反応は、恒星の内部などで元素が合成される過程で起こると考えられています。

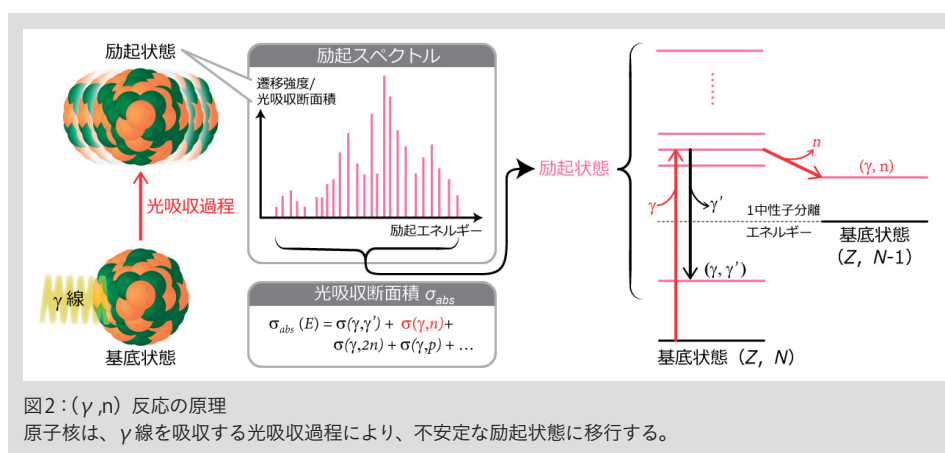
光を吸収する (γ, n) 反応

原子核に光を当てる (γ, n) 反応では、原子核が光を吸収する過程で、不安定な励起状態(安定な基底状態よりエネルギーが高い状態)に移行します。そのとき得られた励起スペクトルから、この励起が起こる原因や、どのエネルギーでどれだけの反応が起こるかがわかります(図2)。

「この励起スペクトルは、原子核の構造に依存しています。

原子核の構造を見る点でも励起スペクトルはとても興味深いものです」と富樫さんは話します。

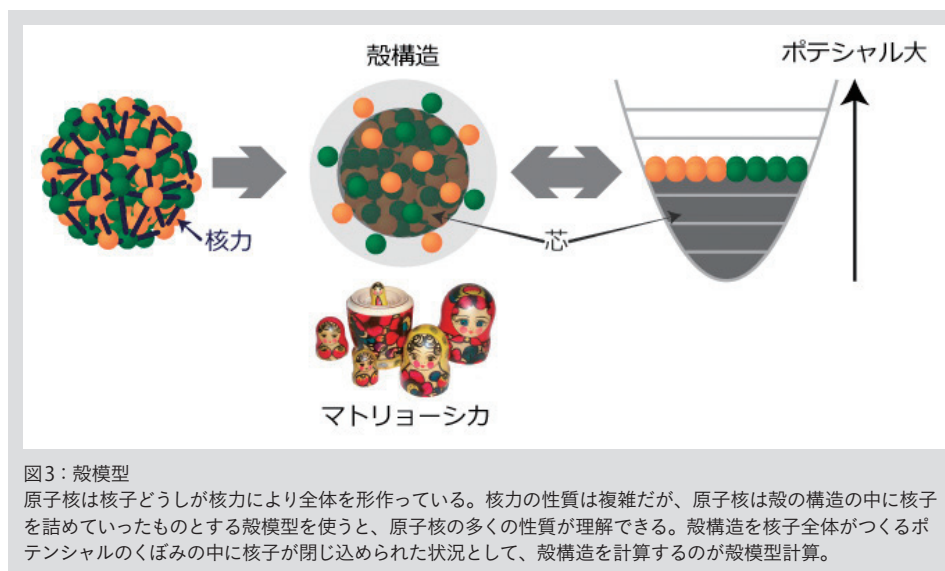
また、励起スペクトルから、光吸収断面積が求められます。光吸収断面積とは、どのエネルギーでどれだけの反応が起こるか、つまり反応の起こりやすさを示しています。この光吸収断面積は、原子核における核変換反応の起こりやすさの尺度となる重要なデータです。



不可能な計算を可能にするモンテカルロ殻模型

そこで、富樫さんは理論計算によって、長寿命核分裂生成物が光を吸収して励起する過程を記述するとともに、光吸収断面積を求めようとしています。「励起エネルギーは

シュレディンガー方程式を解けばわかるのですが、そのときの原子核の量子状態を計算するには、殻模型計算を使うのが有効です」と富樫さんは話します。



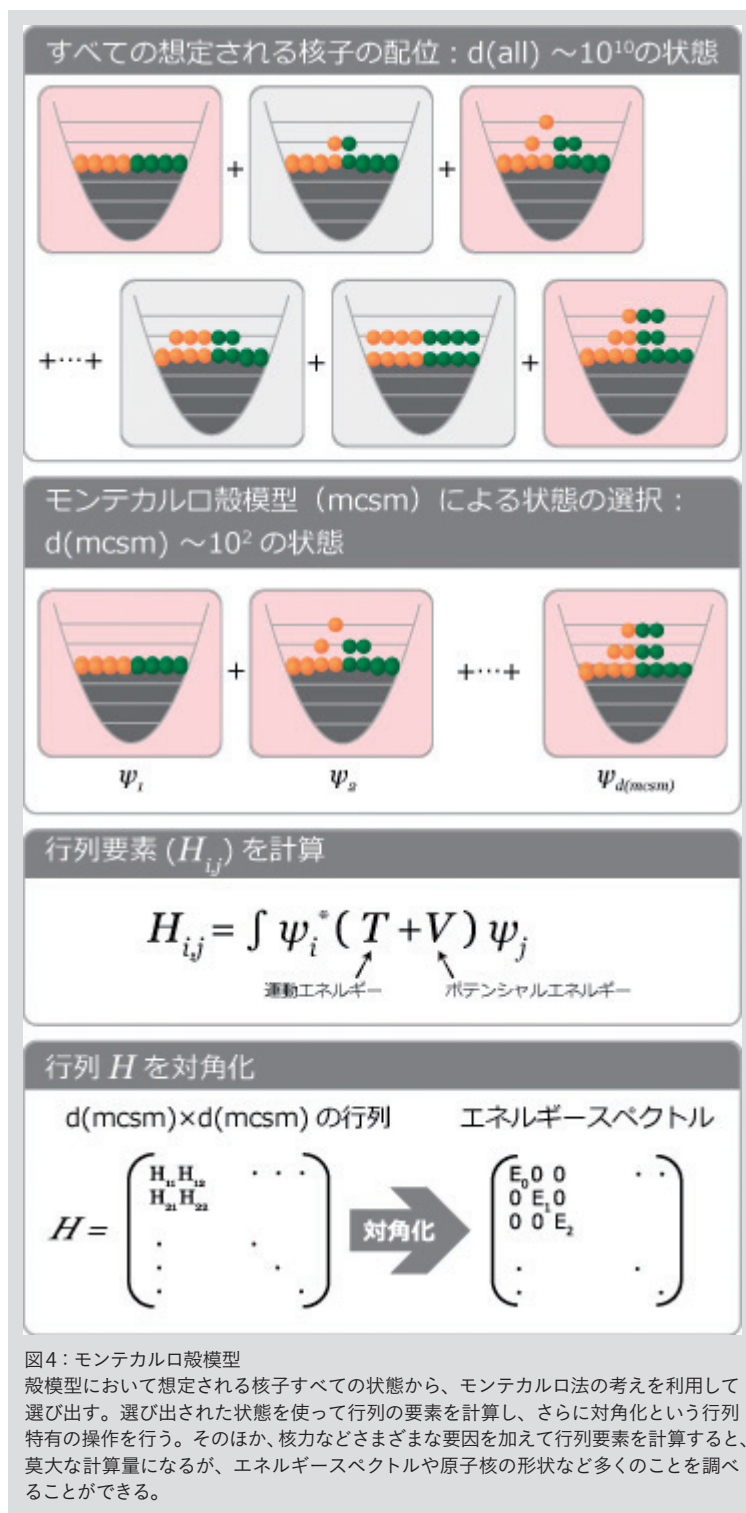
モンテカルロ殻模型（からもけい）とは、原子核の構造を記述するモデルのひとつです。原子核は中性子と陽子が互いに核力を及ぼしあって、全体を形作っています。原子核の中では、陽子や中性子はある軌道を回っており、その起動はマトリョーシカのように入れ子になって、中心から殻を作っているというのが、殻模型です。このモデルを使うと、原子核は殻の中に陽子や中性子をつめたものと理解できます（図3）。

原子核の安定性は、陽子、中性子の数と深く関わっており、原子核を安定にさせる特定の数（魔法数）が存在すると考えられています。そこで、殻模型計算では、陽子数または中性子数が特定のであるときに殻が閉じて安定化するという殻構造を仮定したうえで、相互作用する陽子や中性子の運動を計算します。

実際に殻模型計算を行うときは、軌道上の中性子や陽子の配置、つまり殻の中に陽子や中性子をどう詰めていくかという配置をすべての組み合わせについて考えます。すると、質量が100を超えるような大きな原子核を扱う場合、使う状態の数は 10^{10} を超え、計算量は爆発的に増えてしまうので、いくらスパコンを使っても計算することは不可能です。

そこで、確率的なモンテカルロ法を用いて、計算に必要な配置の組み合わせを選び出します。そうすれば、 10^{10} あった状態の数が100～1000に抑えられます（図4）。

「ふつうならあきらめる計算を、物理的に必要な範囲を選び出すことによって計算が可能になります」と富樫さん。それでも計算量は多いので、スーパーコンピューター「京」を使わないと計算できません。そのための、ノウハウも必要です。「実際に計算するには、核子の運動エネルギーや核子の相互作用によるエネルギーを計算しなくてはなりません。核力などの期待値を計算するのが大変でした」。



教科書を書き換えるような研究をめざす

富樫さんがまず行ったのは、実験から求めた既存のデータを計算で再現し、新たに始めた計算法の妥当性を確認することです。「計算には核子どうしの相互作用がとても重要です。また、実験値を再現するためには、なるべく実験値に近づくように計算のパラメータを調整しなければなりません。核子がどの軌道にあったときにどういう相互作用があるかを考えながらパラメータを決めます。決めるまでは試行錯誤が続き、何度も計算を繰り返さなければならぬのでとても時間がかかります」。

富樫さんの行う計算は、「京」1000ノード（全体の1%強）を使って1日かかります。同じ計算を大学などにあるスパコンを使えば10日はかかります。これを何度も繰り返すのですから、かなり大規模な計算であることがわかります。現在、富樫さんが計算しているのはストロンチウムの原子核です。実験データを前提にストロンチウム88を計算し、ほぼ実験を再現するデータが得られています。この計算をブラッシュアップしつつ、次は実験データのないスト

ロンチウム90に取り組んでいます。富樫さんは「奇数の原子核ジルコニウム93やセレン79の計算も進めています。ゆくゆくはセシウムやヨウ素をやりたいです」と話します。似たような計算を行うには、平均場近似による方法がありますが、核子の数が偶数の核にしか使えません。長寿命核分裂生成物では奇数核が多いので、殻模型計算が向いているのです。さらに大規模な計算を必要とするので、モンテカルロ殻模型でなければ、長寿命核分裂生成物の計算には挑戦できないでしょう。

「原子核は未知なことが多いので、教科書を書き換えることのできる分野だと大学時代に先生から言われたのが、原子核の分野に進んだきっかけです」と話す富樫さん。核変換反応を実現するために、富樫さんの研究成果はおおいに期待されています。2020年度から始まる、さらに大型のスパコンを使ったポスト「京」重点課題にも選ばれ、研究も一層加速することでしょう。富樫さんの研究成果が教科書に加わる日が来るに違いありません。

JICFuS ムービー

宇宙 世界最大のシミュレーションでダークマターの正体にせまる
筑波大学計算科学研究センター 石山智明 研究員



2013.04.17

原子核 多体計算の世界 独自の計算法で原子核の謎に迫る
理化学研究所仁科加速器研究センター 肥山 詠美子 准主任研究員



2013.10.01

宇宙 連星中性子星合体シミュレーションの世界
京都大学基礎物理学研究所 木内 建太 特任助教



2014.03.30

素粒子 格子QCDシミュレーションで核力の謎に迫る
理化学研究所仁科加速器研究センター 土井琢身 研究員



2014.09.02

宇宙 輻射流体シミュレーションで宇宙の歴史を解く
名古屋大学大学院理学研究科 宇宙論研究室 〈C研〉 長谷川賢二 助教



2015.01.04

宇宙 超新星爆発シミュレーションの世界
理化学研究所仁科加速器研究センター 滝脇知也 研究員



2015.03.29

宇宙 太陽系惑星形成の謎にN体計算でせまる
東京工業大学地球生命研究所 小南淳子 研究員

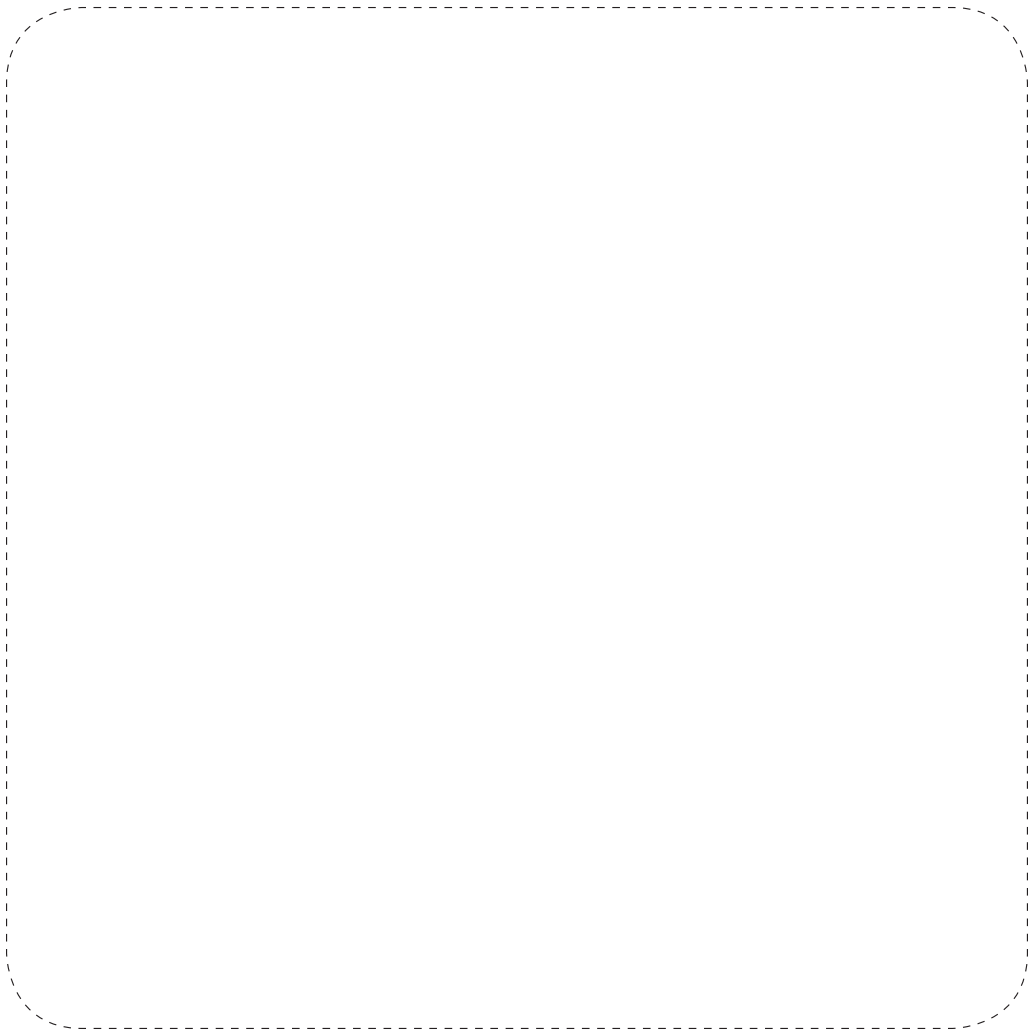


2015.07.12

素粒子 スパコンの中のクォーク素粒子から原子核をつくる
京都大学基礎物理学研究所 青木慎也 教授



2015.11.11





画像提供：理化学研究所計算科学研究機構