

---

# 物質と宇宙の 起源と構造

文部科学省HPCI戦略プログラム分野5成果集

---

# 物質と宇宙の起源と構造

文部科学省 H P C I 戦略プログラム分野5 成果集

本成果集は、文部科学省HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」（平成23年～27年度）で行われた研究成果・活動のうち、広報コンテンツとして5年間で製作してきたウェブマガジン『月刊JICFuS』全25記事、『JICFuSムービー』全8本をまとめたものです。

科学ライター・ディレクターらによって製作された記事、ムービーの魅力をそのまま伝えるため、製作当時のまま収録しています。戦略プログラム開始当初に記事化した研究はさらなる成果が積み上げられている一方、最終年度の記事やムービーでは最新の成果が取り上げられています。公開日を確認のうえ、お楽しみください。

月刊JICFuS製作協力：サイテック・コミュニケーションズ（青山聖子、池田亜希子、大石かおり、佐藤成美、山田久美、John Boyd）  
計算基礎科学連携拠点広報室

JICFuSムービー製作協力：樋口喜昭、南口雄一

月刊JICFuS <https://www.jicfus.jp/jp/category/mj/>

JICFuSムービー（YouTube）<https://www.youtube.com/user/monthlyjicfus>

計算基礎科学連携拠点  
<http://www.jicfus.jp/jp/>

# CONTENTS

## 月刊 JICFus

宇宙	超新星爆発のかぎをにぎるニュートリノ 国立天文台 国武 慶 助教	2
宇宙	星の最期を探る 国立天文台 滝脇 知也 専門研究職員	6
素粒子	誰もが使えるプログラムを書く ー量子色力学シミュレーションの標準化を推進 高エネルギー加速器研究機構 野秋 淳一 特任助教	10
原子核	発見から100年ー原子核の謎に第一原理計算を駆使して挑む 東京大学原子核科学研究センター 阿部 喬 特任助教	14
素粒子	標準模型を越える新たな素粒子理論を探る 高エネルギー加速器研究機構 伊藤 悦子 特任助教	18
宇宙	銀河形成シミュレーションは、銀河誕生の謎にどこまで迫れるか？ 東京工業大学 斎藤 貴之 特任准教授	22
素粒子	格子QCDで物質の究極を見る 高エネルギー加速器研究機構 COSSU, Guido 研究員	26
計算	「連立一次方程式」を高速に効率よく解くために 筑波大学計算科学研究センター 今倉 暁 研究員	30
素粒子	格子量子色力学によって、物質の性質に深く関わる核力・ハイペロン力を求める 筑波大学計算科学研究センター 石井 理修 准教授	34
原子核	原子核の正体を解き明かす 東京大学大学院理学系研究科 吉田 亨 特任助教	38
宇宙	宇宙空間のプラズマ粒子の“なぜ？”に迫る 千葉大学大学院理学研究科 松本 洋介 特任助教	41
原子核	$\alpha$ クラスター模型で原子核の構造を明らかに 理化学研究所仁科加速器研究センター 船木 靖郎 協力研究員	45
宇宙	アインシュタインが出した宿題を解く ーブラックホール研究の先にある物理 京都大学基礎物理学研究所 関口 雄一郎 特任助教	48
宇宙	太陽系惑星形成論が持ち越してきた問題に挑む 東京工業大学 小南 淳子 産学官連携研究員	51
素粒子	格子QCDで原子核を解明する ークォークとグルーオンから原子核を形成する力を導けるのか 名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 山崎 剛 特任助教	54
素粒子	目指すは究極の理論 ー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	57
宇宙	爆発するのか、しないのか ー超新星爆発の鍵を握る流体現象とは何か？ 京都大学基礎物理学研究所 岩上 わかな 研究員	61
原子核	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 順敏 特任助教	65
計算	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	69
宇宙	超大質量ブラックホールはいかにして作られたのか ー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	73
原子核	原子核の密度が10倍以上になる？ ー「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	77
素粒子	チャームクォークの未知に迫る ー格子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	80
宇宙	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	84
宇宙	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	88
原子核	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	92
JICFus ムービー		96
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	
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	
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	
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	
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	
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	
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	
素粒子	スパコンの中のクォークー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	

# 超新星爆発のかぎをにぎるニュートリノ

国立天文台 固武 慶 助教

## 爆発しない「超新星爆発」

「まだ爆発していません」そう笑顔で語るのは国立天文台の固武慶（こたけ・けい）助教です。爆発とはなにやら物騒ですが、何がどこで爆発するのでしょうか？

固武さんは、星の誕生から死に至るまでの進化の過程で現れる様々な現象の研究をしています。その中でも、とくに「超新星爆発」に注目しています。超新星（Supernova）は宇宙で最も明るい天体の一つです。昔、突然明るく輝きだした星を見た人々は、新しい星が生まれたと思い、超「新」星という名前を付けました。しかしその正体は、名前とは正反対で星が最期に爆発する姿だということがわかっています。

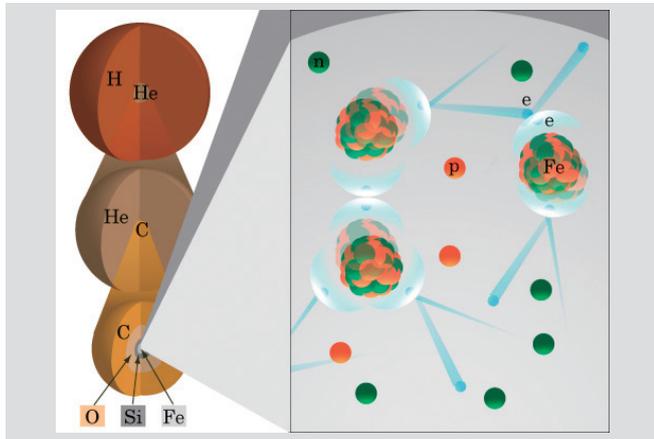
超新星の内部で何が起って爆発に至るのかを確かめるには、スーパーコンピュータによるシミュレーションが欠かせません。なぜなら、超新星爆発は実験ができず、観測するにしても私たちの近くの銀河で起こることは非常にまれな現象だからです。そこで数少ない超新星の観測などをもとに仮説を立て、それに基づいてシミュレーションをし、その結果を観測と照らし合わせることで、最初に立てた仮説の正しさを証明します。固武さんは、スーパーコンピュータの中で超新星を爆発させようとしているのです。

ところが、世界中の理論宇宙物理学者が40年以上研究しているにも関わらず、いまだにシミュレーションで爆発させることができていません。いったい、何が課題なのでしょう。まずは、現在考えられている超新星爆発のシナリオを紹介していきます。

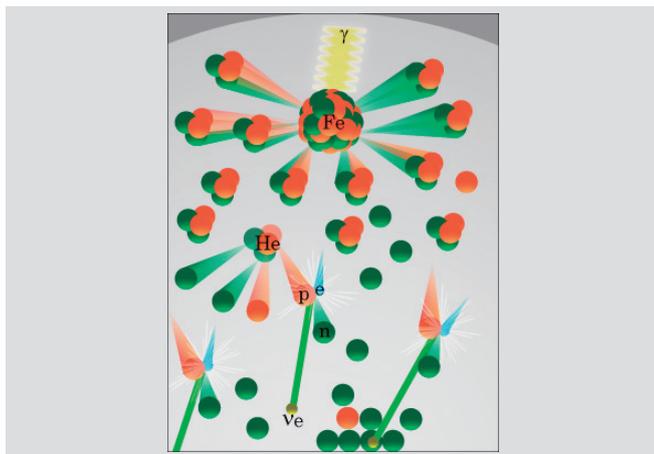


## 超新星爆発のシナリオ

シナリオは、おもに2種類あります。一つは「ニュートリノ型」で、これが基本となります。もう一つ、磁場が強い特殊な星の場合に「磁気駆動型<sup>\*</sup>」が考えられています。固武さんが研究しているのはニュートリノ型超新星爆発です。



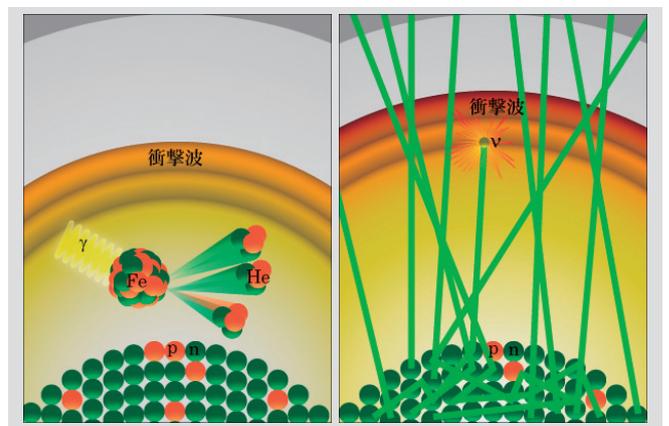
太陽のおよそ8倍以上の重さがある星が末期を迎えるとき、星の内部はタマネギのような層構造になっています。表面に近いほうから水素 (H) 層、炭素 (C) 層、酸素 (O) 層というように、中心に向かうほど重い元素の層が形成されています。そして中心部には、もっとも安定な鉄 (Fe) のコア (核) があります。そこは、自分の重力と外層の圧力で潰れそうな鉄のコアを電子 (e) の縮退圧が支えている、超高密度のおしくらまんじゅう状態です。縮退圧とは、電子のようなフェルミ粒子が持つ、あるエネルギー状態には1つの粒子しか存在できないという性質に由来する圧力です。



核融合が進んで鉄の量が増えていくと、縮退圧が重力を支えきれなくなる瞬間がやってきます。コアは縮み始め、さらに高密度・高温になります。この状態になると、鉄は光と熱を吸収して分解反応をおこし、最終的に陽子 (p) と

中性子 (n) まで分裂されます。これを光分解といいます。続いて縮退圧の源だった電子が陽子に捕らえられ、中性子と電子ニュートリノ ( $\nu_e$ ) になります。これを電子捕獲といいます。

電子が減ると縮退圧が抜けて、コアは原子核と同じ密度まで押し潰されます。半径 1000km が 1 秒以内に 50km まで一気に押し潰される破壊的な現象で、これを「爆縮」といいます。爆縮は、中心が原子核の密度 (中性子・陽子をパチンコ玉に例えるとそれがギチギチに詰まった状態) に到達すると止まり、それ以上収縮できないために跳ね返されます。これが強い衝撃波を生み出します。



この衝撃波がそのまま星の外部まで伝わって爆発させられれば都合がいいのですが、そううまくはいきません。衝撃波の通過と共に物質が急激に圧縮されるため、通過した後の物質は非常に高温になります。この高温領域に飲み込まれた鉄が光分解されることによって、衝撃波の熱は吸収されてしまうのです。そうすると衝撃波は冷えて弱まってしまい、爆発を引き起こせません。でも実際には超新星爆発が起きているわけですから、何かが冷えた衝撃波を温め直し、強めているはずですよ。

衝撃波が広がっていく間、コアでは様々な反応が起っていて、最終的に中性子とニュートリノが生成されます。ニュートリノは他の粒子とめったに反応しないので、99% は反応で発生する膨大な熱を星の外へすーっと持ち出すとします。残りの 1% が衝撃波と反応し、衝撃波を再加熱して強め、超新星爆発を引き起こすと考えられています。しかし、シミュレーションでは、ニュートリノによる衝撃波の再加熱を加味しても爆発しないのです。それはなぜなのでしょう？

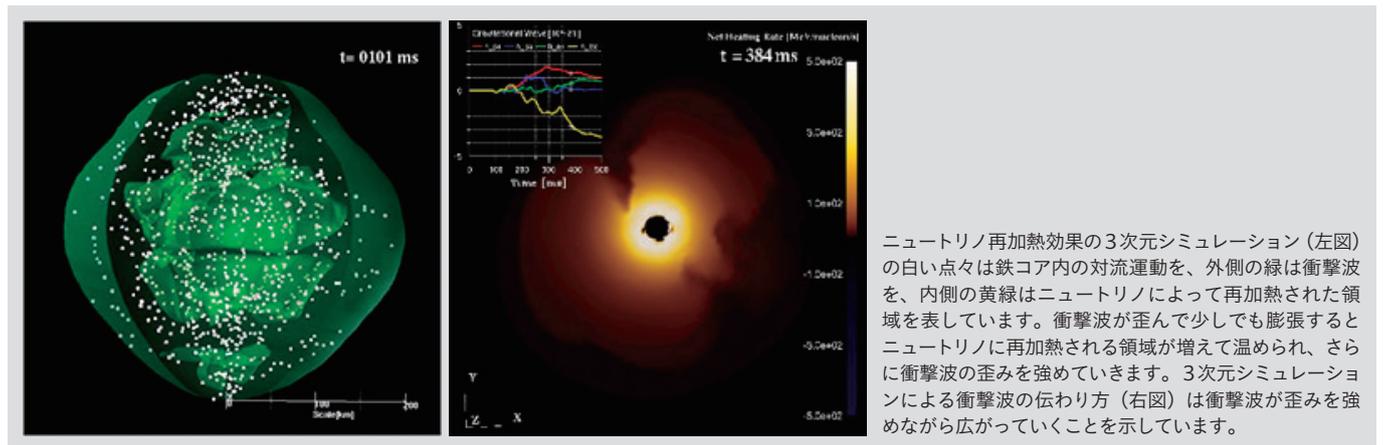
## 超新星爆発の課題

「実はこれまでおもに行ってきたのは1次元のシミュレーションで、それでは超新星は爆発しないことが明らかになりました」と固武さんは言います。1次元のシミュレーションでは、星の中心から外殻までひいた直線上のみを計算しています。つまり接線方向への対流や星の自転による不均一は加味されていません。固武さんは続けます。「最近の研究で、複雑な流体運動を2次元、さらに3次元でシミュレーションすることによって、歪んだ衝撃波がニュートリノの再加熱効果を高めることがわかってきました」。

その理由は、衝撃波がニュートリノ再加熱を受けやすい領域に漂える時間が増えるからと予想されています。でもその反面、衝撃波を押し力もいろいろな方向に散ってしまうと考えられています。流体運動は超新星爆発メカニズムの肝なので、正確なことを知るためにはやはり細かく計算するしかありません。しかし、流体運動の3次元シミュレーション

は大変複雑なものになります。力の働く向きも運動の向きも3次元になるので、計算量は膨大になってしまいます。

国立天文台にも26TFlops（テラフロップス／演算速度は毎秒2.6兆回）を誇るスーパーコンピュータがあるのですが、流体運動を精度よくシミュレーションするには長い時間がかかってしまいます。そこで固武さんの研究グループは、理論演算性能10PFlops（ペタフロップス／演算速度は毎秒1京回）を誇る、京速コンピュータ「京（けい）」で計算する予定です。「京なら流体運動や星の自転を取り入れた、かなり正確な3次元シミュレーションが可能で、今度こそ超新星を爆発させることができるかもしれません。そのためには「京」が絶対必要です」。固武さんは目を輝かせます。



ニュートリノ再加熱効果の3次元シミュレーション（左図）の白い点々は鉄コア内の対流運動を、外側の緑は衝撃波を、内側の黄緑はニュートリノによって再加熱された領域を表しています。衝撃波が歪んで少しでも膨張するとニュートリノに再加熱される領域が増えて温められ、さらに衝撃波の歪みを強めていきます。3次元シミュレーションによる衝撃波の伝わり方（右図）は衝撃波が歪みながら広がっていくことを示しています。



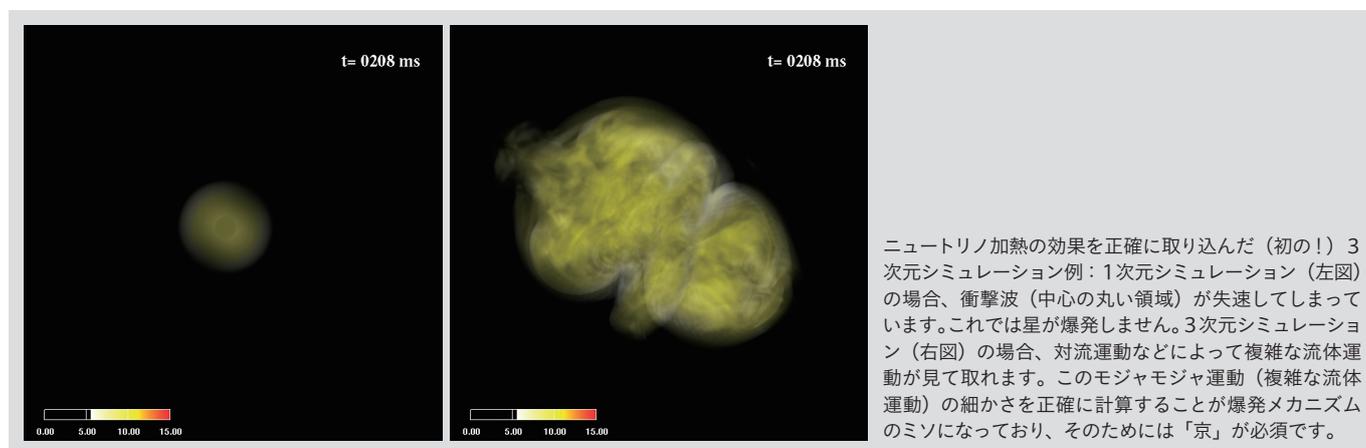
## 超新星爆発シミュレーションがもたらすもの

もし3次元シミュレーションで超新星爆発を引き起こせたら、ドイツやアメリカのライバルグループより一歩抜きん出た成果を得ることができます。

超新星爆発は強い力、弱い力、電磁力、重力の4つの相互作用が全て関与するまれな現象です。そのため、素粒子物理学、原子核物理学、流体力学、ニュートリノ天文学、重力波天文学、強い重力場が出現することから一般相対性理論など、物理学のさまざまな分野を総動員して研究が進められています。ですから、超新星爆発の研究成果が他分野にもたらす影響も大きなものになります。

たとえば大型低温重力波望遠鏡（LCGT）での重力波観測に役立つと考えられます。スーパーカミオカンデでのニュートリノ観測の精度を上げることもつながるでしょう。天体現象ではガンマ線バーストのメカニズムの解明、星の進化の理解、そして宇宙の歴史の解明へも繋がっていくことが期待されます。

超新星は「京」で爆発するのでしょうか？ その時を楽しみに待ちたいと思います。



### 用語解説

#### ※ 磁気駆動型超新星爆発

磁場が強く回転が速いと磁場が巻かれてバネのような力が働いて爆発します。次回、詳しく解説します。

### 素核宇宙融合レクチャー シリーズ第三回「高エネルギー天体物理の基礎」開催

6月13日加筆

素核宇宙融合レクチャー シリーズ第三回「高エネルギー天体物理の基礎」が6月8日（水）～9日（木）に東京大学理学部4号館3階1320号室にて開催され、43人が参加しました。

このレクチャーシリーズは素粒子、原子核、宇宙物理の分野間融合を目指す新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」が、それぞれの分野の研究内容を共有するために開いています。今回は宇宙物理でしたが、素粒子、原子核の研究者や学生も多く集まり、会場がいっぱいになりました。

講師を務めた固武さんは「普段の発表では余り想定しないような、それでいて本質的な質問・コメントを多く頂き、大変勉強になりました」と話していました。

# 星の最期を探る

国立天文台 滝脇 知也 専門研究職員

## 見上げてごらん、夜空の星を

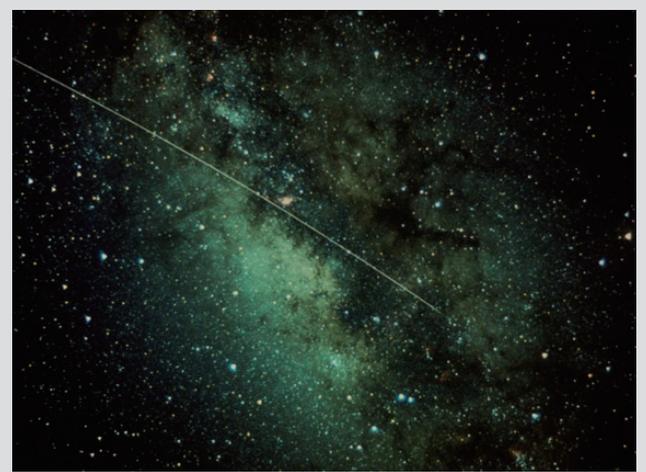
流れ星が消える前に願い事を3回唱えると願いがかなう、  
 という言い伝えを信じるなら、夏は願い事をかなえるのに  
 適した季節です。7月下旬にはみずがめ座流星群が、8月  
 中旬にはペルセウス座流星群がピークをむかえます。多く  
 の流れ星に願いをかけられることでしょう。

夜空に月明かりも人工の明かりもなければ、写真のように、  
 流れ星の背景に天の川を見ることができるとでしょう。天の  
 川は雲のように見える光の帯で、望遠鏡で観測すると、星々  
 の集まりであることがわかります。夏の夜、日本はちょうど、  
 星が密集している銀河の中心を向いているので、夏は天の  
 川を見るのに適した季節でもあるのです。

それにしても、天の川は星一つ一つからできているのです  
 から、天の川銀河を形作る星の多さに驚かされます。一  
 体全体、天の川の星々はどのように誕生したのでしょうか。  
 そしてどのような最期を遂げるのでしょうか？

どの星も星間ガスやちりが重力で集まることによって誕生  
 しますが、その最期は、星の質量によって異なる姿をみせ  
 ます。太陽質量の8倍以下の星の最期は、外層が膨張し  
 て周囲に広がった惑星状星雲となり、中心部は白色矮星と  
 いうヘリウム、炭素、酸素などでできた天体になることが  
 わかっています。

一方で、太陽質量の8倍以上の星は謎がいっぱいです。こ  
 のような星は最期に超新星爆発を引き起こすことが知られ  
 ていますが、どのようなメカニズムで爆発するのか、まだ  
 明らかにされていません。そして爆発後、中性子星やブラッ



天の川と流れ星

クホールなど、あまり性質がわかっていない天体になっ  
 たり、未解明の現象を引き起こしたりします。「ガンマ線パ  
 ースト」はその代表といえるでしょう。これは40年以上前  
 から知られており、1日に数回は観測されるほど一般的な  
 天体現象ですが、未だにその発生源やメカニズムはわかっ  
 ていません。これらの謎は、超新星爆発内部の物理的状  
 態の理解なしに解くことはできません。

しかし、望遠鏡で観測してわかるのは星のごく表層だけ  
 で、内部の情報まではわかりません。アンドロメダ銀河ま  
 での範囲（約230万光年以内）なら、超新星爆発の時に放  
 射されるニュートリノを観測することで、内部を探ることが  
 できるのですが、この程度の狭い範囲ではなかなか起こ  
 りません。

ほかに、超新星の内部を調べる良い方法はないのでし  
 ょうか。

## 計算すればわかる

国立天文台の研究者、滝脇知也（たきわき・ともや）さんは、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により、超新星爆発の研究をしています。



固武さん（左）と滝脇さん（右）

天体観測をするために観測装置を作る必要があるように、数値シミュレーションには「ソースコード」を書く作業が欠かせません。ソースコードはコンピュータが計算をするための手順書で、FORTRANのようなコンピュータ用の言語で記述します。超新星爆発では、2万行ものソースコードを書くそうです。

「学部生時代から、誰かに教えられることなく、ソースコードを書いてシミュレーションをしていました。それに2万行の内、先輩などから引き継ぐ部分もあります」。

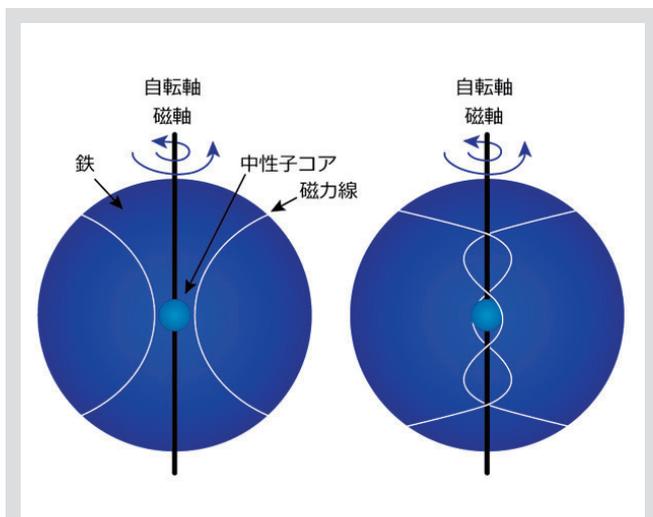
実は滝脇さんは前回ご紹介した国立天文台の固武慶（こたけ・けい）助教の大学の後輩で、実際に固武さんが学生のときに書いたソースコードを元に発展させ、博士論文のシミュレーションに使ったそうです。今では2人は同じ研究グループで超新星爆発の研究をしています。

## 超新星爆発とは？

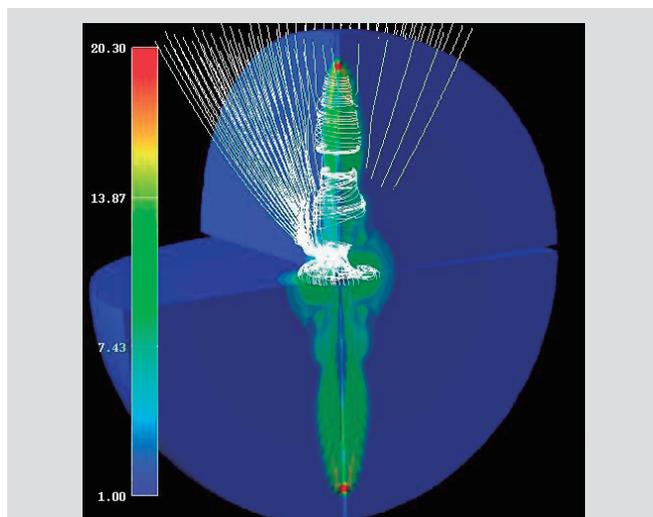
超新星爆発に至るシナリオは主に2つあると考えられています。一つは前回の固武さんの記事で登場した「ニュートリノ型」で、もう一つは「磁気駆動型」です。滝脇さんは主に磁気駆動型について研究を進めています。

超新星爆発を起こす直前の星の内部は、タマネギのような層構造になっています。表面に近いほうから水素、ヘリウム、炭素、酸素、ケイ素というように、中心に向かうほ

ど重い元素の層が核融合反応により形成されます。そして中心部には最も安定な鉄のコアがあります。鉄コアが太陽質量の1.4倍くらいまで増えると、自分の重力を支えきれずに潰れはじめます。それが引き金となり、鉄の原子核が中性子まで分解されて、中性子のコアができます。そこに分解されずに残った鉄がぶつかり、はじきかえされた結果、外に向かう衝撃波が発生します。



磁力線の巻かれ方



磁気駆動型超新星のシミュレーション。線は磁力線、カラーはエントロピーで爆発している部分が赤く表示される。この部分の熱運動が激しいことを表している。

「ニュートリノ型」では、鉄の内部を伝わる間に弱まってしまふ衝撃波と、中性子コアで生成されたニュートリノが反応することで、衝撃波を再加熱して強め、爆発を引き起こすと考えられています。

それに対して「磁気駆動型」は、磁場によって爆発が引き起こされると考えられています。

どんな星にも磁場があり、星を1本の棒磁石と見なすことができます。これを磁軸といいます。磁軸と自転軸がほぼ

同じで、鉄が磁力によってお互いに引き合い、磁力線に沿って並んでいるとしましょう。そうすると、外側の鉄よりも、内側の鉄の方が速く回転するので、磁力線が自転軸の周りにグルグル巻かれて密になります\*。それはバネが押し縮められているのと同じ状態です。星の磁場が強く、自転が速いとバネがどんどん押し縮められ、いずれ反発して自転軸方向に爆発することになります。

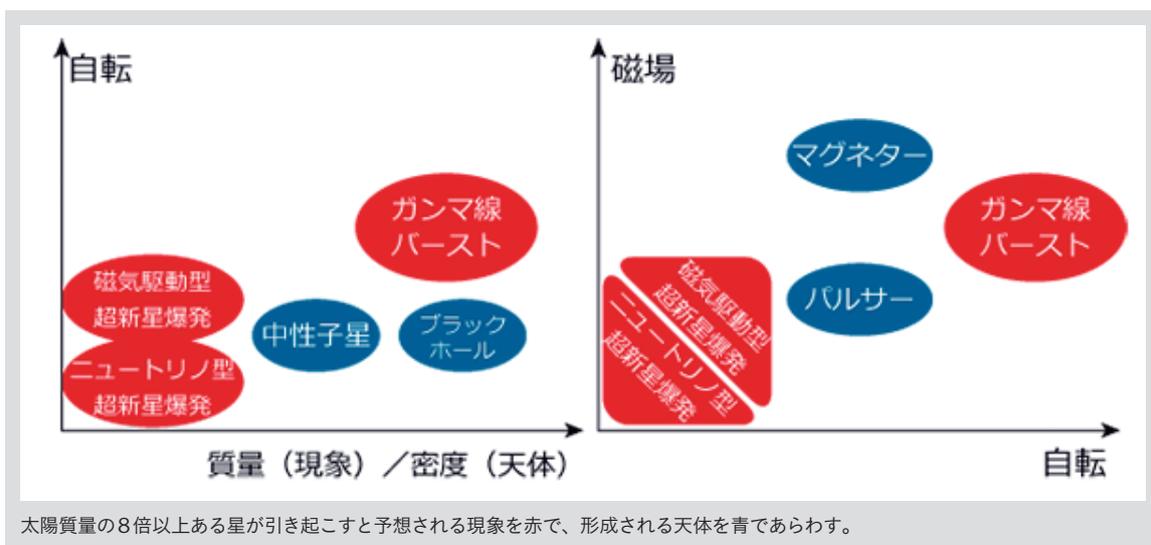
\*これとは別に「磁気回転不安定性」という流体现象で磁場が増幅されるという説もあります。

## ニュートリノ型と磁気駆動型の違いはどこに？

ニュートリノ型と磁気駆動型の爆発の規模は、親星（爆発前の星）のエネルギーが同じ場合、ほぼ同じになると考えられています。違いは爆発の方向に現れます。磁気駆動型は自転軸方向にジェットが噴き出して爆発しますが、ニュートリノ型はそこまで極端ではなく、比較的等方向に爆発すると考えられています。

ニュートリノ型と磁気駆動型の割合は、爆発の残骸から予想されています。ニュートリノ型では「中性子星」が残り、磁気駆動型では中性子星の一種で1000倍以上の磁場を持つ「マグネター」が残るのではないかと考えられています。その割合は観測からおおよそ9対1。ですから、ニュートリノ型と磁気駆動型の割合も9対1と考えられています。

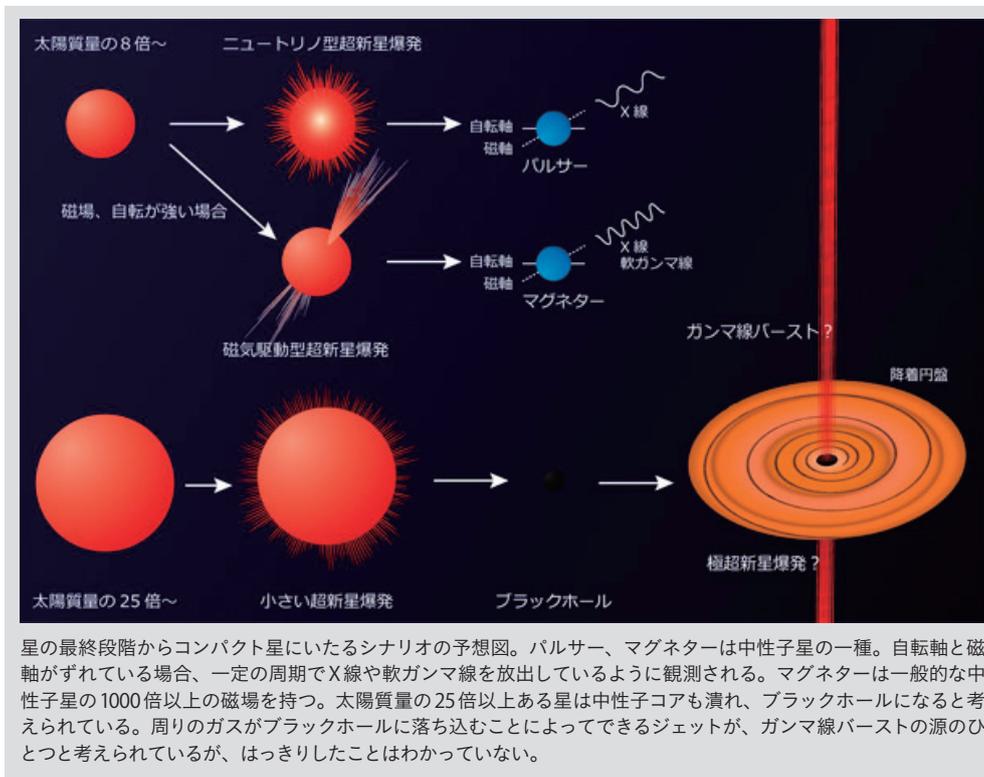
このように、ニュートリノ型と磁気駆動型では、爆発のメカニズムも、爆発後にできる天体も異なると考えられています。何が星の運命を決めているのでしょうか？ 磁気駆動型は磁力線が自転軸の周りに幾重にも巻かれることが重要です。そのため、親星の自転は速く、磁場は強くなくてはなりません。また、滝脇さんの研究により、中磁場でも、自転が早ければ磁力線が巻かれて磁場が強くなり、磁気駆動型の爆発を引き起こすことがわかりました。星が引き起こす天体現象や、それによって形成される天体は、星がもともと持っている磁場、自転、質量で決まってくると考えられています。



## 今後の研究でわかること

両タイプのシミュレーションを実行すると対称的な結果が表れます。「磁気駆動型」のシミュレーションはほぼ想定しているとおりに爆発しますが、「ニュートリノ型」は40年以上の研究にも関わらず、未だに爆発していません。これは計算機の性能に限界があり、星を球対称の1次元でしかシミュレーションできなかったことが原因だと考えられています。固武さんと滝脇さんは、来年本格稼働する京速コンピュータ「京(けい)」で超新星内部の流体運動をニュートリノによる再加熱と同時に3次元シミュレーションすることにより、ニュートリノ型の超新星をコンピュータ上で爆発させる予定です。これにより、超新星爆発そのものの理解が大きく前進し、超新星爆発によって誕生する中性子星の理解が深まることが期待されます。

滝脇さんは今、超新星爆発のソースコードをベースに、中性子星になる星と、ブラックホールになる星の違いを作っているメカニズムを解明するソースコードを書いている最中です。このソースコードによって、ブラックホールの形成過程や40年間謎とされるガンマ線バーストの中心源の誕生過程が解明されるかもしれません。「シミュレーションでないと研究できない超新星爆発の研究は、自分の適性に合っていたんです」。そう、はにかんで話す滝脇さん。流れ星には「研究がうまくいって超新星を爆発させられますように」と、お願いしたいそうです。その願いがかない、滝脇さんのソースコードが星の最期の謎を解き明かす日を、楽しみに待ちたいと思います。滝脇さんの今後の活躍にご期待ください！



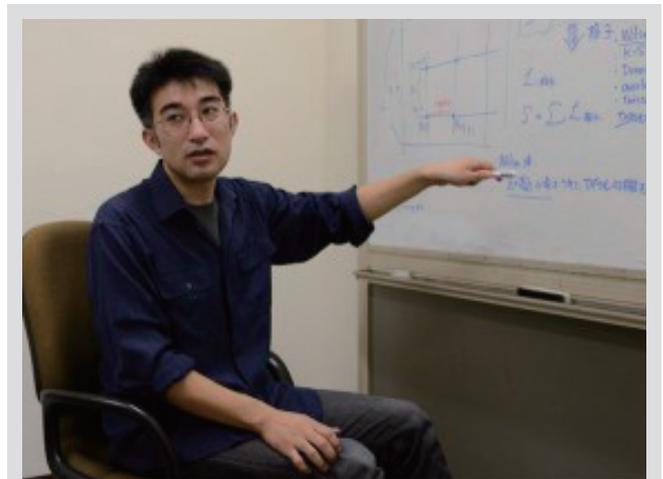
# 誰もが使えるプログラムを書く —量子色力学シミュレーションの標準化 を推進

高エネルギー加速器研究機構 野秋 淳一 特任助教

## 計算科学で迫る素粒子の世界

素粒子物理学と聞くと、大型加速器のような巨大な実験装置や、小林・益川理論などを思い浮かべます。でも、ここで紹介するのはそのどちらでもありません。スーパーコンピュータを使った計算科学で迫る、素粒子の世界です。HPCI戦略プログラム分野5でユーザー支援を担当する、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の野秋淳一 (のあき・じゅんいち) 特任助教に話を聞きました。

「いまの仕事を一言でいえば、格子QCDシミュレーションの共通コードを書くことです」と野秋さんは言います。さて、これは困りました。何のことかよくわかりません。どうやら今回は、言葉の理解から始めなければならないようです。



野秋 淳一 特任助教

## 「QCD」はクォークとグルーオンの力学

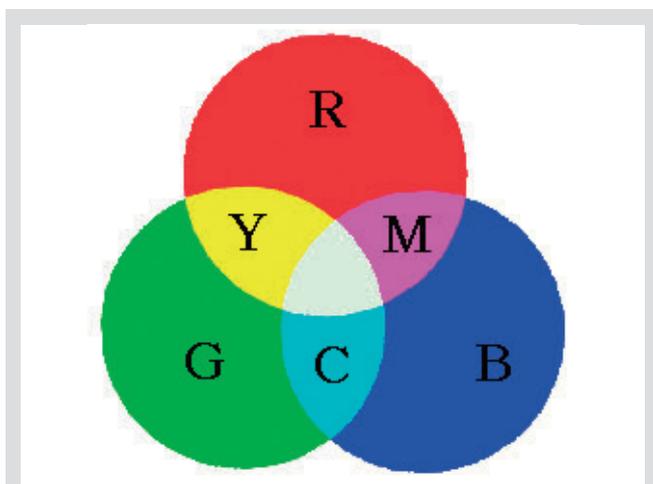


図1 光の3原色:R (赤) G (緑) B (青) とそれぞれの補色:C (シアン) M (マゼンタ) Y (イエロー)。R、G、Bの3つがそろるか、RとC、GとM、BとYの組み合わせで無色になります。

まず、格子QCDのうち「QCD」に注目します。これはQuantum ChromoDynamicsの略で、日本語では量子色力学(りょうしいろりきがく)と呼ばれます。この理論は、物質を構成する基本粒子である「クォーク\*1」と、クォーク同士を結びつけている「グルーオン\*2」のふるまいを説明します。現在のところ、QCDに基づいた予想と実験結果の間には矛盾がなく、最も有効な理論といえます。

クォークは6種類あり、それぞれが3つの状態をとります。これを区別しようと、光の3原色になぞらえて赤、緑、青と呼ぶことにしたため、量子“色”力学という名前がついています。

ところが、日常の世界ではクォークの色を感じることはできません。なぜなら、ちょうど無色になるクォークの組み合わせだけが物質を構成できるからです(図1)。たとえば、原子核の中にある陽子や中性子は3つのクォークでできて

いますが、これらは必ず3原色がそろっているため、全体として無色になります。クォーク同士の結びつきは非常に強く、“色”は物質の奥深くに閉じ込められているのです。この結合力のことを「強い力」といいます。

## QCDの本質に迫る

QCDについて少しイメージをつかめたでしょうか。しかし、大きな謎が2つあります。まず、どうして色の閉じ込めなどという現象が起こるのでしょうか。野秋さんは言います。「これはQCDの“漸近的自由性”に根ざしています」。近づくにつれて自由になるという意味ですが、どうも日常の感覚からはかけ離れています。

私たちが普段感じることができる力は、重力や電磁気力です。互いが近づくほど力は強く働き、遠ざかれば弱くなる。それがあたりまえです。しかし、クォークではそれと逆のことが起こっているというのです。もし陽子の中をのぞくことができたなら、自由に飛びまわるクォーク達を目にすることでしょう。

もうひとつ素朴な疑問があります。質量の問題です。陽子を構成するクォーク3つの質量をたしても、陽子の質量の100分の1程度にしかなりません。グルーオンの質量はゼロですから、やはり圧倒的に足りません。ということは、QCDには質量を生み出す何らかのメカニズムがあるに違いありません。それが「“カイラル対称性の自発的破れ”という性質」(野秋さん)です。

クォークとグルーオンの基礎理論であるQCDは、あらゆる素粒子の反応に関係します。漸近的自由性とカイラル対称性の自発的破れによって、バラエティー豊かな物理現象が起こります。これらの理解と解明に向けて、研究者は日夜格闘しているのです。

## 「格子QCD」の数値シミュレーション

「QCDの研究では、大型計算機による数値シミュレーションが決定的な役割を担っています。この研究手法を格子QCDといい、“紙と鉛筆”による計算では決してたどり着けない理論の本性に手が届くのです」と野秋さんは言います。

シミュレーションとは、ある特定の対象の振る舞いを仮想的に見ていくことです。大気の状態やお金の流れを研究したり、はたまた人生設計に役立てたりもできます。こんなことができるのは、余分な要素をそぎ落として単純化した「モデル」を扱っているからです。

「格子」とは、連続的な空間と時間とを格子状に区切ることを意味します(図2)。こうすることで方程式の数を有限にし、数値計算が可能になります。これがモデル化です。しかし、格子QCDの場合、モデル化しても単純化したことにはなりません。格子状に区切るという表現方法が、通常のQCDと比べて違うだけで、何もそぎ落としていないのです。格子QCDの際立った特徴です。

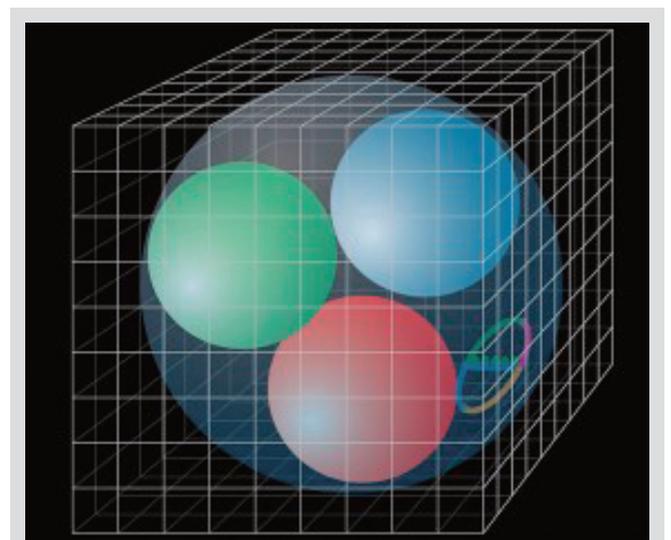


図2 空間と時間を格子状に区切って計算する「格子QCD」  
(画像提供: KEK)

計算結果の精度を高めるためには、格子のサイズを大きく、きめを細かくする必要があります。それにつれて計算量は莫大になるため、計算機の性能がものを言うのです。

日本の研究グループは、これまで世界をリードしてきたといえます。しかし、今後もトップを走り続けるためには、

京速コンピュータ「京」のような計算機資源を確保していくことが必要です。

## 誰もが使える「共通コード」をつくる

ただ、高性能の計算機があるだけでうまくいくほど、格子QCDの研究は甘くありません。その計算手法にはいくつもの選択肢があり、目的に応じて最良のものを選ばなくてはなりません。また、新しい方法を開拓することも重要です。これらの活動の中心は数値シミュレーションのプログラムを作ることにあります。「プログラム」よりも「コード」と呼ぶことが多いので、以下ではそれにならうことにしましょう。

コードは日常の言葉で書かれているわけではありません。計算機にわかるプログラミング言語で書かれています。格子QCDシミュレーションにかかる計算量は膨大です。ひとまとまりの大計算を最初から最後までやりぬくの数年間かかる、なんてこともあります。

研究者たちは計算の計画を立て、それに使うコードを開発し、いくつかのテストを経て本格計算し、最後には結果を論文としてまとめます。これまでは、研究グループとその計算計画の数だけコードが作られてきました。すでにあるコードを再利用しようとしても、目的に合わなかったり、作者以外には理解できないものだったり、結局自分で最初から書く羽目になるのです。

そこで近年、誰もが理解でき、拡張性・汎用性の高いコードを開発し、研究者のコミュニティで共有することで、研究の効率化を図ろうという動きが広まりつつあります。野秋さんが携わっている共通コード開発は、このような背景から、今後欠かせないテーマとなります（図3）。

野秋さんは言います。「コードは、ただ書くだけではダメなんです。研究者の誰が見ても理解できるよう、デザインされていないとはなりません。系統立った構造を表現するために、オブジェクト指向言語であるC++（シープラスプラス）を使っています」。

戦略分野5の使命のひとつは、計算科学分野の裾野を広げることです。そのためには、新たに加わる研究者・学生にとってのハードルをできるだけ下げることが第一です。さらには、この分野で培われたテクニックを継承していく手段としても活用できるよう、誰もがわかる「王道のデザイン」（野秋さん）が必要なのです。

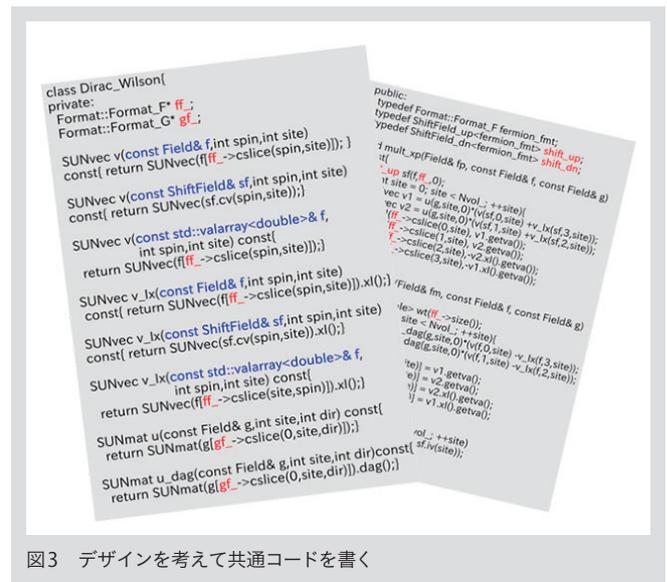


図3 デザインを考えて共通コードを書く

## 共通コードの完成度を高めつつ、物理に応用する

---

野秋さんは大学院生として、筑波大学と筑波大学計算物理学研究センター（計算科学研究センターの前身）で5年間を過ごしました。しかし、数値シミュレーションのコードとの関わりは比較的薄かったそうです。

むしろユーザーの立場で計算を遂行し、結果を解析して物理現象の理解と結びつけることに取り組んできたとのこと。その後5年間にわたるアメリカ、イギリスでの研究生生活の間も、またKEKに移ってからも、しばらくはそのスタイルで通してきました。

ところが2年くらい前から、研究情勢もあって徐々にコードや計算手法に携わることが増え、共通コード開発の計画が始まってからは全精力をそこに傾けています。

「KEKでは今年度、スーパーコンピュータの更新が行われます。9月から運用が始まるので、そのタイミングに合わせるべく、追い込みをかけています」と野秋さん。「運用後は改良点や不満点がおそらく見つかるでしょうし、様々な意見が寄せられると思います。これら一つひとつをクリアしていくことで、共通コードの完成度を高めていきたいと思っています」。

いずれは数値計算にも物理にも精通した“一人前”の研究者に成長したいという野秋さん。自らが中心となって開発した共通コードが研究者コミュニティに広まり、それを自らも利用して素粒子物理の発展に貢献していく。そんな野さんの姿が将来見られることでしょう。

### 用語解説

---

#### \*1 クォーク

物質を構成する基本要素で、6種類（アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップ）あります。

#### \*2 グルーオン

陽子や中性子などの内部でクォーク同士を結び付ける、強い力を伝える粒子。クォークと同様“色”を持ち、その違いによって8種類のグルーオンが存在します。

### 関連リンク

---

#### QCDコード

<http://www.jicfus.jp/field5/jp/promotion/qcdcode/>

# 発見から 100 年—原子核の謎に 第一原理計算を駆使して挑む

東京大学原子核科学研究センター 阿部 喬 特任助教

2011年は原子核研究にとって記念すべき年です。アーネスト・ラザフォード\*<sup>1</sup>が原子核を発見したのが1911年。それからちょうど100年が経ちました。この間、原子核をどこまで理解できたのでしょうか。東京大学原子核科学研究センター特任助教の阿部喬（あべ・たかし）さんに話を聞きました。

## 多様な原子核の世界

原子核は、原子の中心に位置する素粒子のかたまりです（図1）。原子の半径がおよそ0.1 nm（ナノメートル= $10^{-9}$ m）なのに対し、原子核の半径は10 fm（フェムトメートル= $10^{-15}$ m）程度と1万分の1の小ささ。にもかかわらず、原子の質量のほとんどを原子核が担っています。原子核は陽子や中性子といった「核子」により構成されていて、核子はアップクォークやダウンクォークなどの素粒子からできています。

また原子核には、陽子と中性子の数の違いによってさまざまな「核種」が存在します（図2）。代表的な核種として陽子2個と中性子2個によるヘリウム（ $^4\text{He}$ ）がありますが、陽子1個だけで中性子が無い水素（ $^1\text{H}$ ）のような特殊な例もあります。核種は、天然にあるものだけで288種、発見された原子核は約3000種あります。理論上は10000種あるとも言われています。この中には、安定に存在し続けるものや、不安定ですぐに崩壊してしまうものもあります。

このように多種多様な原子核の性質を統一的に理解することは可能なのか。原子核研究者の奮闘を紹介します。

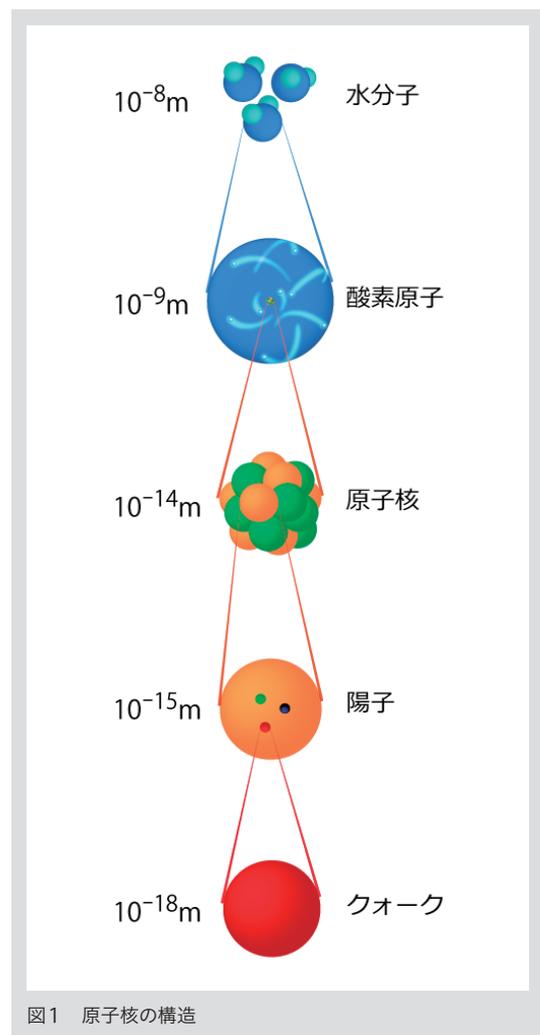
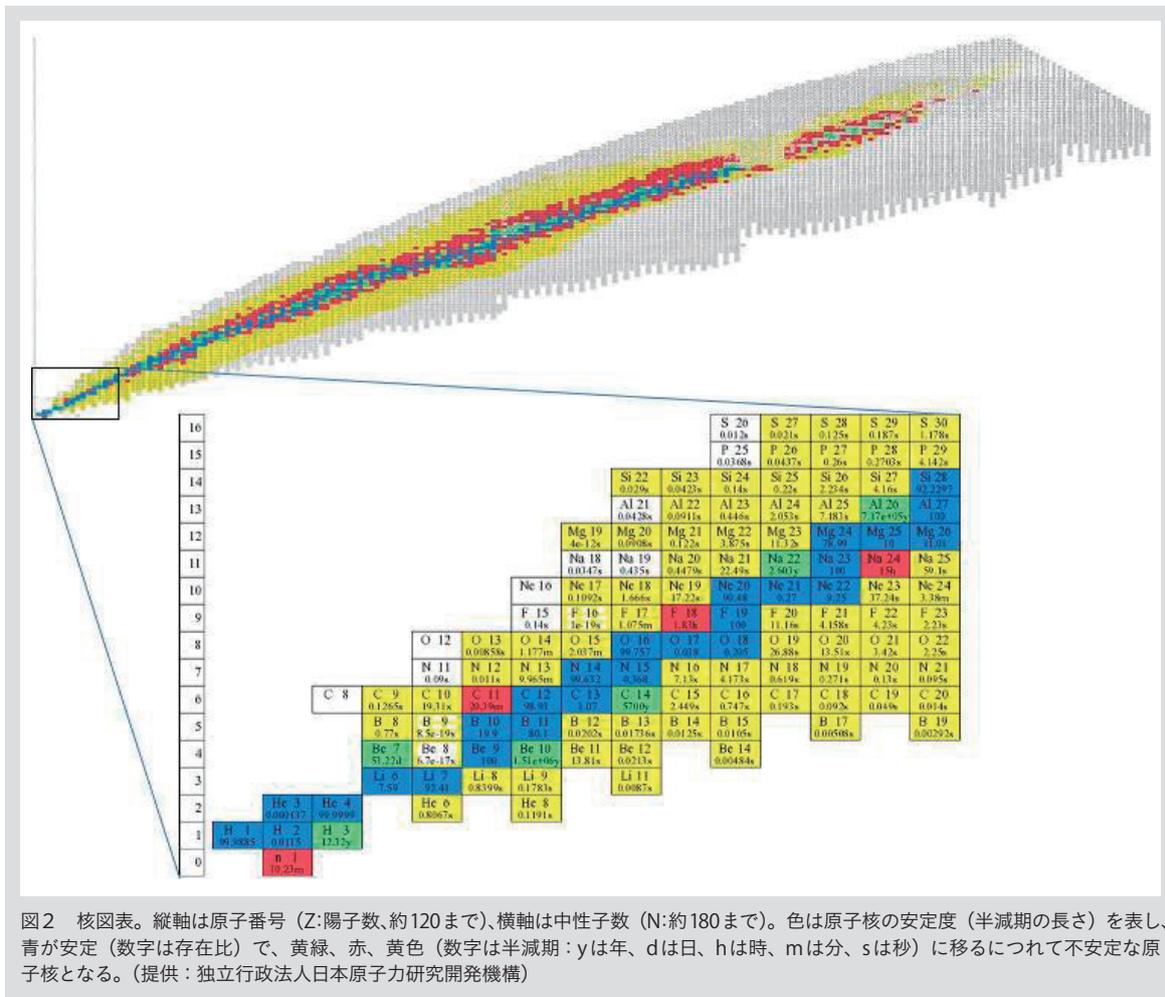


図1 原子核の構造



## 研究方法もさまざま

原子核の理論研究にはさまざまなアプローチの仕方があります。これには、原子核があまりに多様なため、1つの方法で解き明かすことが難しいという事情があります。アプローチの方法は大きく2つ、「第一原理」と「模型」です。

まず「模型」から説明します。模型では、研究対象とする原子核の特徴を取り出して近似をします。たとえば、数十個以上の核子からなる原子核では、個々の核子を扱うのではなく、全体をあたかも液体のように近似する液的模型があります。

一方の「第一原理」は、そのような近似を行わず、原子核を構成するすべての核子を個々に取り扱い、「核力」(核

子の間に働く力)を用いた計算をして、原子核の持つ性質を探ります。しかしこの方法は、核子の数が増えていくにつれて計算量が膨大になり、核子数が多い「重い」原子核では事実上計算ができないという弱点を抱えています。

さて、模型は近似的な解法なので、近似の仕方によっていくつもあることは想像がつきます。実際にその通りで、原子核研究に有効な模型は1つではありません。一方の第一原理はその名の通りたった1つなのですが、原子核を構成する核子をすべて取り扱い、それらの間に働く核力を使って計算するのに複数の解き方があるため、第一原理の計算は1つではありません。つまり、第一原理計算も模型も研究方法は1つではないのです。

## 注目するのは炭素原子核

ならば、いくつかの方法を試してみて最適なものを選べばいいと考えるわけですが、それぞれが難解で、1つの方法をマスターしてきちんと結果を出すのは容易ではありません。そのため、原子核という同じ分野で研究しているのに、核子数の違いなどによって異なる手法を用いることになり、それぞれの研究が孤立しがちでした。

このような状況の中で阿部さんは、複数の第一原理手法を扱ってきました。1つ1つの方法を深めると同時に、これらをつなぐことにも意識を振り分けています。阿部さんは学生時代、「有効場の理論」とよばれる第一原理計算で研究をしていました。この頃の研究対象は核物質（無限個の核子から構成される物質）で、たとえば「中性子物質の超流動<sup>\*2</sup>状態」をテーマにしていました。この研究は、のちに日本物理学会若手奨励賞（2011年 理論核物理領域）を獲得しています。

2007年に博士号を取得後、2009年頃からは「軽い原子核での第一原理計算」を研究テーマに加えました。軽い原子核とは炭素（ $^{12}\text{C}$ ）、酸素（ $^{16}\text{O}$ ）くらいまでを指します。阿部さんは「とくに注目しているのは、炭素のホイール（Hoyle）状態です」と言います。ホイール状態は、3つのヘリウム原子核から炭素原子核が生成する途中で現れる状態です（図3）。

天然に存在する340もの核種がどのように生成されたかは、宇宙の成り立ちに関わる重要な問題です。初期の宇宙

には、元素は水素とヘリウムしかありませんでした。それが恒星の内部で核融合することで、重い原子核が生まれていきます。その過程を細かく見ると、まず水素（ $^1\text{H}$ ）が4つ集まってヘリウム（ $^4\text{He}$ ）ができます。続いてヘリウムが2つ集まるとベリリウム（ $^8\text{Be}$ ）が生まれるのですが、非常に不安定なため10-16秒程度で崩壊してしまいます。ところが、崩壊する前にもう1つヘリウムが反応することで「炭素（ $^{12}\text{C}$ ）の励起状態」ができます。ただし、この炭素（ $^{12}\text{C}$ ）の励起状態はエネルギーを余分に持った不安定な原子核で、ガンマ線を放出することで、最も安定な「炭素（ $^{12}\text{C}$ ）の基底状態」に落ち着くのです。

この、不安定な炭素を、ホイール状態と言います。この状態を通過しないと炭素が作られないだけでなく、さらに重い原子核への反応につながらなくなるのですから、その性質を把握することが大切です。

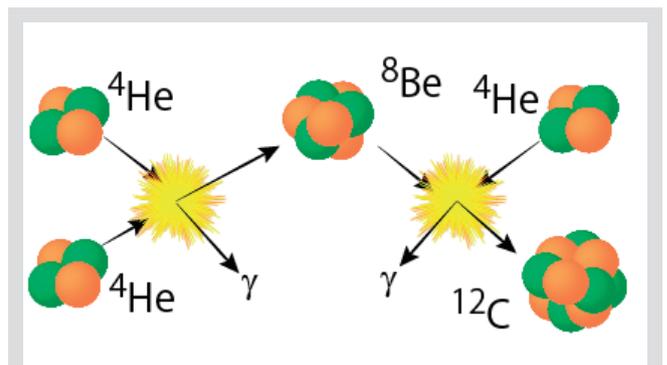


図3 炭素のホイール状態。ヘリウム（ $^4\text{He}$ ：図の左）からベリリウム（ $^8\text{Be}$ ）、炭素のホイール状態（右の衝突している部分）を経て、安定な炭素（ $^{12}\text{C}$ ：図の右下）が生成される。

## いろいろな方法でチャレンジ

とはいえ、炭素原子核の第一原理計算はそう簡単ではありません。そこで阿部さんは、炭素原子核のホイール状態を計算するために、最近、新たな第一原理手法を扱うようになりました。他の第一原理手法よりもホイール状態を計算しやすい可能性があるだけでなく、これまで独立に行われてきた模型計算を第一原理で検証しようという狙いもあります。

阿部さんが主に扱っているのは、「閉殻を仮定しないモンテカルロ殻模型」に基づいた第一原理計算手法です。後ろから順番に説明します。殻模型とは、核子がある軌道を

回っている殻構造をしていると考えるものです。モンテカルロ殻模型は対象とする原子核を再現するのに必要な部分を抜き出して計算する手法のことです。

「閉殻を仮定しない」とはまわりくどい言い方ですが、原子核を構成する核子をすべて使って計算することを指します。もともと歴史的に、「閉殻を仮定する」方法がありました。原子核の中心部にいる核子は、ある特定の数（魔法数<sup>\*3</sup>）だけ集まると非常に安定した閉殻構造を取ると仮定して、周りの余った核子だけを使って「模型」計算をし

ていたことによります。「閉殻を仮定しないモンテカルロ殻模型」が、第一原理手法でありながら模型という言葉が残ってしまっているのはそのためです。

第一原理ではない「模型」については、HPCI戦略プログラム分野5の原子核研究者に限っても、「閉殻を仮定したモンテカルロ殻模型」「クラスター模型」「密度汎関数法」など様々な手法を用いて研究が行われています。

## 「京」で到達する新たな原子核の姿

原子核は、陽子と中性子の数によって多様な表情を見せます。天然に安定に存在するものは陽子と中性子の数が近いという特徴があります。逆に両者の数に差があるものは不安定で崩壊が早いことがわかっています。また形状も、球形だけではなく回転楕円体やおにぎり型のようなものも存在する可能性があります。このように多様で豊かな原子核を、統一的な理論で語るのは簡単ではありません。だからこそ、さまざまな方法でチャレンジする必要があるのです。

阿部さんは近い将来の目標をこう定めます。「まず $^{12}\text{C}$ のホイル状態にチャレンジします。これには膨大な計算資源が必要なので、京速コンピュータ「京（けい）」が欠かせません。さらに、京を使えば核子数20か30くらいまでは可能だと思っています」。また、「第一原理計算がうまくいけば、いろいろな模型の有効性を調べたり、改



PC画面を通して原子核の世界に向き合う阿部喬さん

善に役立てたりできると考えています」。このような視点で研究を行う原子核研究者は、世界を見渡してもほとんどいません。はたして原子核の統一的な理解は可能なのか。阿部さんの研究成果に期待です。

### 用語解説

#### \*1 アーネスト・ラザフォード

1871年8月30日～1937年10月19日。ニュージーランド出身の物理学者、化学者。原子核以外にも、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線を発見している。1908年にノーベル化学賞を受賞。

#### \*2 超流動

液体ヘリウムを極低温におくと自然に容器の壁をのぼっていく現象として知られている。

#### \*3 魔法数

原子核が特に安定となる陽子および中性子の個数。現在、安定核付近で認められている魔法数は2, 8, 20, 28, 50, 82, 126などであり、ヘリウム4 ( $^4\text{He}$ )、酸素16 ( $^{16}\text{O}$ ) のような二重魔法数となる原子核は特に安定となる。

# 標準模型を越える新たな素粒子理論を 探る

高エネルギー加速器研究機構 伊藤 悦子 特任助教

万物に質量を与えるメカニズムに欠かせないとして、その発見の期待が高まるヒッグス粒子。でも、今回ご紹介する高エネルギー加速器研究機構(KEK) 特任助教の伊藤悦子(いとう・えつこ)さんは、「ヒッグスという素粒子は存在しないのかもしれない」と言います。これは衝撃的です。

ヒッグス粒子は、ビッグバンで生まれた宇宙が冷え、エネルギーが下がる過程で素粒子に質量が与えられるメカニズム構築のために考え出された理論上の素粒子です。欧州合同原子核研究機関(CERN)がスイス・ジュネーブ郊外で行っているLHC実験でこれを見つけようとしていることが何かと話題になっているので、耳にしたことのある方も多いはず。



伊藤悦子さん

## 素粒子標準模型とヒッグス粒子

素粒子は、物質を究極的に細かくしていったどりつく、最も基本的な構成要素です。原子の中心には原子核があります。最も小さい水素原子核でおよそ1兆分の1ミリメートルという極めて小さいスケールです。ところがこれで終わりではなく、さらに小さな構造があるのです。

原子核はクォークやグルーオンといった素粒子が、ある法則のもとで結合していることがわかっています。そんな途方もなくマイクロな世界は肉眼ではおろか、顕微鏡でさえ見ることはできません。ではなぜ「わかっている」と言えるのでしょうか？ 研究者は、目には見えなくとも、あらゆる実験データから読み取れる素粒子のふるまいを統一的

に説明できる理論体系を作ること、素粒子の世界を理解しようとしているのです。理論体系は「模型」と呼ぶこともあります。クォークと、電子・ニュートリノの仲間であるレプトンを分類し、それらの相互作用のメカニズムを解き明かした集積が「素粒子標準模型」としてまとめられています(図1)。

図1を見ると、クォークや電子、ニュートリノといった物質粒子はフェルミ粒子、ヒッグス粒子はボース粒子であることがわかります。ボース粒子はいくつでも同じ状態で同じ場所に入ることができますが、フェルミ粒子は、自分の縄張りに他の粒子を入れてくれません。複数のフェルミ粒

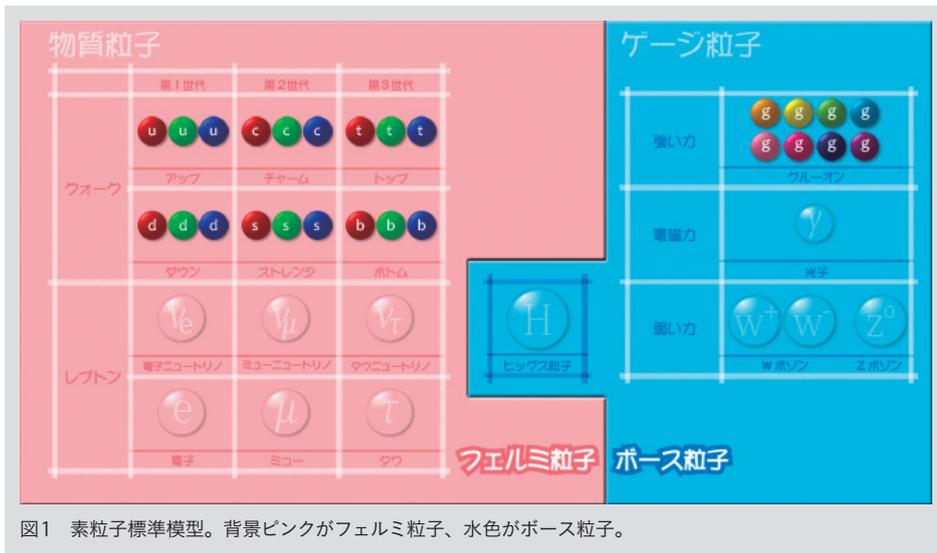


図1 素粒子標準模型。背景ピンクがフェルミ粒子、水色がボース粒子。

子によって作られる複合粒子はつぶれることがなく、物質の材料とされます。

フェルミ粒子と、その反物質である反フェルミ粒子が結合すると、一見、ボース粒子のようにふるまうことができます。たとえば中間子はクォークと反クォークの複合状態で、原子核を結び付けるボース粒子としてふるまいます (図2)。逆にボース粒子からフェルミ粒子をつくることはできません。その意味でフェルミ粒子の方がより根源的な存在であるといえます。

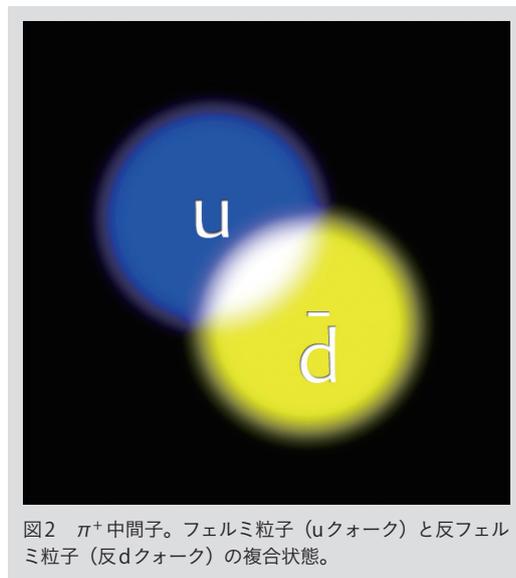


図2  $\pi^+$  中間子。フェルミ粒子 (uクォーク) と反フェルミ粒子 (反dクォーク) の複合状態。

## テクニカラー

「ヒッグス粒子も、より根源的なフェルミ粒子が結合してできていたら、美しいと思います。私は、ヒッグス粒子は中間子のような複合粒子で、テクニクォークと呼ばれるフェルミ粒子でできているのではないかと考えています」。伊藤さんはそう話します。

このような理論を「複合模型 (テクニカラー)」と呼んでいます。これは1979年に Susskindによって提唱された理論で、名前はクォーク・グルーオンの理論である量子色力学 (QCD) からのものじりだといわれています。さらに、このアイデアが実験結果と矛盾しないように拡張したウォーキング・テクニカラーという模型が、1985年頃に Holdom や Miransky、名古屋大学の山脇幸一教授によって提唱さ

れました。このテクニカラー理論は、QCDより1000倍ほど高いエネルギー領域で現れる理論です。スケールは1/1000になって、さらに極微の世界に入り込むことになります。

QCDでは、クォークと反クォークが強い力で凝縮することで質量が生み出されると考えられています。実際、KEKの研究グループが数値シミュレーションによってこれを確かめました。さらにマイクロな世界で全く同様なことが起こっていて、そこで生じた凝縮こそがヒッグス粒子の正体なのだというのがテクニカラーのアイデアのポイントです。スケールは違えど、同じことが起こっているというのはなかなか魅力的な考え方です。

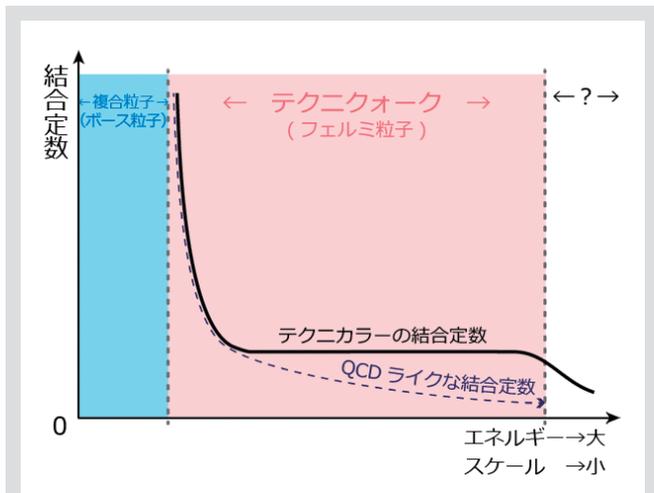


図3 テクニカラーの結合定数。

でも、これが現実的な理論といえるためには、対称性や実験結果との整合性など、クリアしなくてはならない条件がいくつもあります。理論の性質を調べて、実現の可能性を確認するためにうってつけなのが、格子場理論の数値シミュレーションです。時空を格子状に区切って数値計算する格子QCDと同じ手法です。

図3はクリアしなくてはならない条件を満たす場合に、テクニクォークとテクニグルーオン（テクニクォークと相互作用するゲージ粒子）との間に働く力の強さを表す「結合定数」のグラフです。結合「定数」と呼ばれてはいますが、エネルギーによって変動する値で、どのように変動するかは理論によって決まります。縦軸は結合定数の強さ、横軸はエネルギーです。素粒子を扱う場合、エネルギーが高い＝距離（スケール）が短い、ことになります。

「図3には、結合定数がエネルギーによらず成長しなくなる領域がありますよね。これが面白いと思うんです」伊藤さんは目を輝かせます。「エネルギーによらないということは、温度にもよらないということです。それって不思議だと思いませんか？」そのような世界では、生卵を鍋で何時間ゆでも、冷凍庫で何時間凍らせようとしても、生卵のままです。確かに不思議です。でも本当にそのような不思議な理論は成り立つのでしょうか？

テクニカラーが実現するためには、その理論に登場するテクニクォークとテクニグルーオンとの結合が特殊な振舞いをする必要があります。図3に示したように、高エネルギー領域では小さく、ある境目より低エネルギーの領域では極

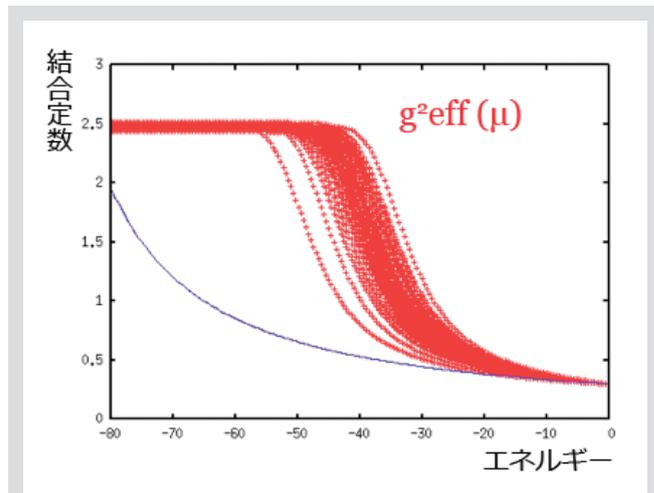


図4 それぞれの線は実際のシミュレーションデータサンプル。エネルギーが変化しても、結合定数が変化しなくなるのがわかる。結合定数の値が変化しない領域は固定点に十分近づいていると解釈できる。

めて大きく、その中間領域ではほとんど変化しないようになっていなければなりません。一方でこの理論では、テクニクォークやテクニグルーオンの種類や数が、今のところわかっていません。

標準模型では、クォークがアップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s)、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) の6種類あることがわかっています。これに相当する情報を図3のような結合定数の振舞いを実現しつつ探ることが、世界的に盛んに行われています。伊藤さんたちの研究グループでも着々と成果を上げつつあるところですよ。

図4に、伊藤さんと大阪大学などのグループによる成果を示します。確かに結合定数が成長しなくなる領域があります。ある境目より低エネルギーの領域で、結合定数が極めて大きくなるような理論は、比較的容易に組み立てることができます。ということは、本当にヒッグス粒子は素粒子ではなく、テクニクォークが結合した複合粒子なのでしょうか？

「それはまだわかりません。実はテクニカラー以外にも余剰次元模型や超対称な模型などの理論が世界中で盛んに研究されています。ヒッグス粒子、あるいはまた別のメカニズムかもしれませんが、そのあたりのより確かな情報は今後、LHCの実験で明らかにされるでしょう。どのような結果が出るか楽しみです」。

## 理論図を描く

小さいころから考えることが好きだったという伊藤さん。「趣味は囲碁です。囲碁にはきっと必勝法があると思うんですよ。それを追い求めるのがおもしろいんです」。囲碁と素粒子理論に共通点があるとしたら、「囲碁も理論もルールは単純なのに、奥深いところが似ています。どちらも完璧に理解したいです」と言います。理論を完璧に理解するにはどうすればよいのでしょうか。「たとえば、理論図を埋め尽くすことができれば、その理論について完璧に理解できたことになるのではないのでしょうか」。

図5に理論図を示します。結合定数はエネルギーに依存する値で、どのように依存するかは理論によります。逆に、質量、結合定数といった理論を決定づける値をプロットすると、その理論の全体像を知ることができます。図4で見たように、結合定数がエネルギーによらない点をその理論の固定点（図5の赤丸）といいます。

理論図を見ると、理論に流れがあり、固定点に理論が集約したり、固定点から理論が出て行ったりしています。伊藤さんはテクニカラーの候補となる理論の固定点を2011年に探し当てました。固定点上の理論は「共形場の理論」とよばれ、厳密に物理量を計算できる、つまり理論が解けることがあります。この共形場の理論の性質を調べることが、伊藤さんの研究テーマの1つです。「これからも、いろんな理論の理論図を描いていきたいです」。

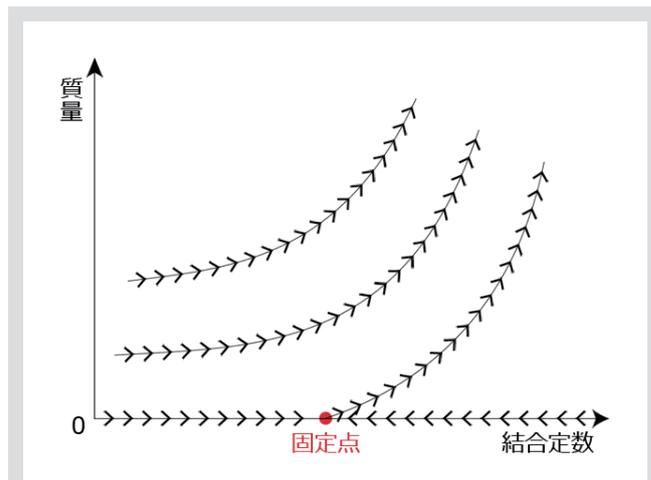


図5 理論図。結合定数が高エネルギー領域で発散する理論は右矢印(→)、低エネルギー領域で発散する理論は左矢印(←)で表す。

# 銀河形成シミュレーションは、 銀河誕生の謎にどこまで迫れるか？

東京工業大学 齋藤 貴之 特任准教授

「銀河がどのようにできるのかを知りたいのです」と話すのは、東京工業大学の齋藤貴之（さいとう・たかゆき）特任准教授。天文学の研究の中に、銀河ができる様子をコンピュータ上に再現して調べる「銀河形成シミュレーション」があります。齋藤さんは、従来よりもずっと精密な銀河形成シミュレーションによる、銀河形成過程の解明をめざして研究を続けてきました。ようやく銀河形成に必要な物理過程をすべて盛り込んだプログラムの完成にめどが立ち、今年中にはスーパーコンピュータ「京」を使った大規模シミュレーションに向けて、準備を始めたいと考えています。



齋藤貴之さん

## 銀河の誕生

数千億個の恒星からなる銀河（図1）。広い宇宙には、私たちの太陽がある“天の川銀河”をはじめ、観測可能なだけでも1000億個もの銀河が存在すると言われています。それらは形態から、渦巻銀河、楕円銀河、レンズ状銀河、不規則銀河などに分類されています。このようにさまざまな表情を見せる銀河は、いったいどのようにして生まれたのでしょうか？

観測的研究によって、宇宙における物質の分布や密度ゆらぎのパターンが明らかになっています。これらのデータから、現在もっとも一般的とされる銀河が形作られる過程（銀河形成モデル）は、先に銀河よりずっと小さな構造ができて、それらが合体しながら成長し、銀河を作るといえるものです。具体的には、まず重力の作用によってダークマター（暗黒物質）が集まります。ダークマターの集合体が十分に成長すると、その重力に引っ張られて、水素やヘリウムを主成分とするガスが集まってきます。ガスは冷えな

がエネルギーを失い密度を増します。このようにして低温で高密度になったガスは分子雲と呼ばれ、ここから恒星が生まれます。そして、恒星が集まって銀河が形成されるのです。

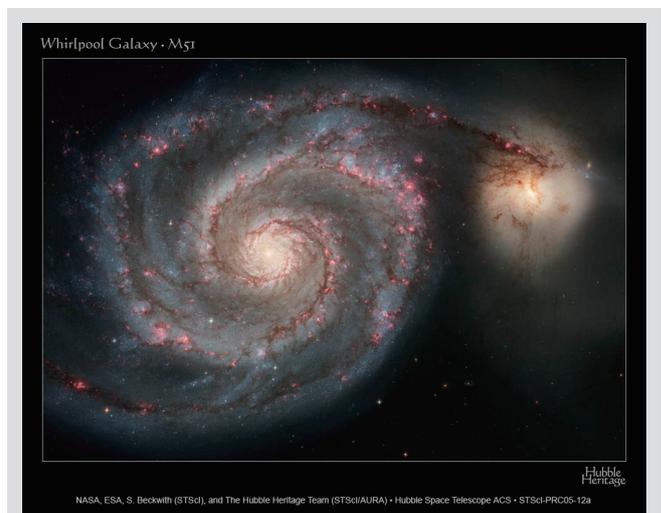


図1 実際の銀河M51。ハッブル宇宙望遠鏡による撮影（NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)）

## 銀河形成シミュレーション

「小学生の頃、先生が教室にもってきた科学雑誌『Newton』を読んで、宇宙研究に憧れるようになりました」と話す齋藤さんは、特に銀河ができる過程を詳しく知りたいと「銀河形成シミュレーション」という研究テーマを選びました。

銀河形成シミュレーションでは、何をシミュレーションのスタート地点にするかが重要です。宇宙誕生から約137億年が経ちましたが、宇宙空間には“背景放射”と呼ばれるビッグバンの名残の電波があります。その観察から私たちは、ビッグバンがおきてから約40万年後という、ごく初期の宇宙の姿を知ることができます(図2)。この情報に、現在の銀河や超新星爆発\*の観測から得られる情報を組み合わせて「宇宙モデル」をつくります。この宇宙モデルを使って、ビッグバンよりもう少し新しい時代の宇宙を予想し、これをスタート地点にします。

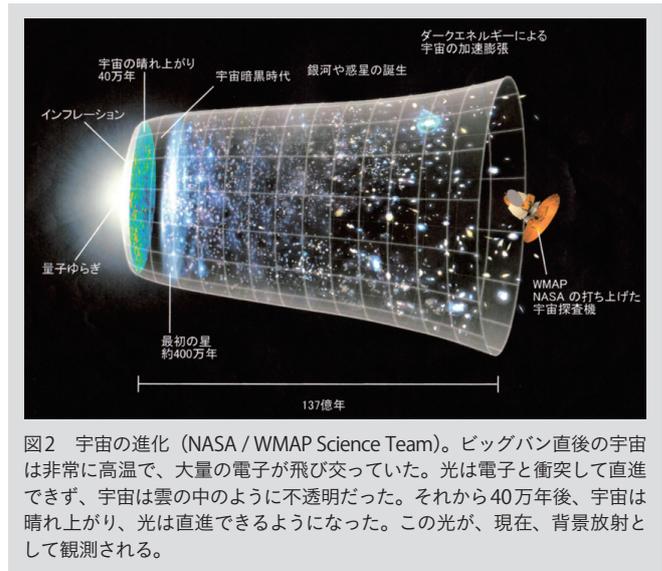
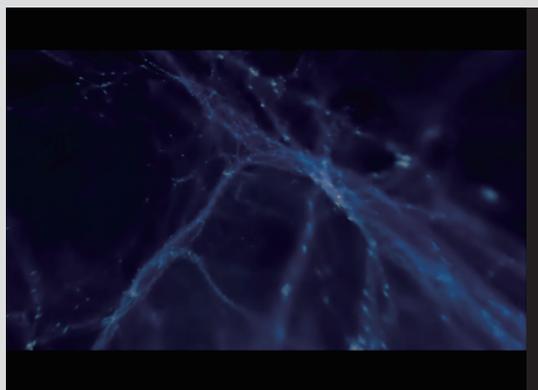
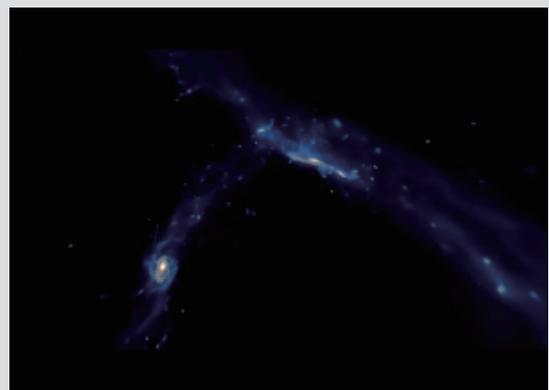


図2 宇宙の進化 (NASA / WMAP Science Team)。ビッグバン直後の宇宙は非常に高温で、大量の電子が飛び交っていた。光は電子と衝突して直進できず、宇宙は雲の中のように不透明だった。それから40万年後、宇宙は晴れ上がり、光は直進できるようになった。この光が、現在、背景放射として観測される。



(1) 初めはほとんど一様だった宇宙が、密度にわずかな揺らぎが存在したことによってダークマターが重力により集まる。その集まりによる重力に引かれて、水素やヘリウムといったガスが濃く集まった領域が形成される。



(2) 形成された「ガスの雲」の中の特に濃い部分で、小さな星の集団がいくつも生まれる。



(3) 早い段階で形成された星の集団の合体が次々と起こる。初期のガスの雲が持っていた角運動量(回転の勢い)は保存されるため、ガスが集まるほど回転速度が大きくなり、円盤状のガスの雲が形成される。



(4) 円盤状のガスの雲の中で星が生まれ、円盤状の銀河となる。銀河の近くを星の集団(矮小銀河)が通ると、その重力の影響で星の分布が波立ち、渦巻き状の構造が生まれる。

図3 渦巻銀河の形成 (シミュレーション: 齋藤貴之、可視化: 武田隆顕 (国立天文台))

2007年に齋藤さんが「国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト」に公開したシミュレーション映像「渦巻銀河の形成 ver.3」より抜粋。「銀河の星の数は1000億個ほどあるのに対して、このシミュレーションでは、暗黒物質とガス、それぞれ100万個の粒子を用いて行いました。一つのガス粒子の質量はなんとか1000太陽質量です。当時としては最も高い質量分解能を持つシミュレーションでした」と齋藤さん。

次に、どのような過程を経て銀河が形づくられてきたかをモデル化した、シミュレーションプログラムを用意します。このシミュレーションプログラムには、重力や流体の相互作用、ガスの放射冷却と加熱、近傍での星形成や超新星爆発の影響など、銀河形成に関係すると考えられる物理

過程が盛り込まれています。スタート地点に対してシミュレーションプログラムを動かせば、コンピュータ上に銀河をつくることのできるのです。そして、できた銀河を実際の銀河と比較検証します（図3）。

## 鍵は分解能の向上

このように、銀河形成シミュレーションは、たくさんの観測情報と物理過程が盛り込まれ、現実の銀河形成を忠実に再現しようと開発されてきました。しかし、斎藤さんは、現在の標準的なシミュレーションに満足していません。その理由を、「従来のシミュレーションでは質量分解能と空間分解能が圧倒的に不足しています。その結果、結構大胆な仮定が導入されているのです」と話します。

分解能が不足しているとは、十分小さな粒子を扱うことができないということです。現在、シミュレーションで扱うことのできる1つの粒子（星の集合体、ガスの集合体、ダークマターの集合体などをあらかずもので、これ以上小さな領域は扱えない）は、太陽数万～100万個分に相当する質量をもっています。しかも、シミュレーションで扱えるのは、数百万粒子がせいぜいです。これでは、銀河のなかの星形成領域や立体構造を詳細に表現できません。そこで、この不完全な部分を補うために、現状では大胆な仮定が導入されています。

一例を上げると、従来の分解能では平均的な密度の星間

ガスですら詳細に表現できません。当然、星が形成されると考えられている、密度の高い星間ガス（分子雲）を表現することはできないので、シミュレーションプログラム内のモデルでは、はるかに低い密度のガスから星が生まれるとされています。こうしたモデルでは、ガスが星になる割合をパラメータという値で決めます。これが、この場合の大胆な仮定です。パラメータは観測データと比較しながら経験的に選ばざるを得ない値なので、実際の銀河形成過程のさまざまな状況においてうまく機能するかどうか明らかでないことが問題になっています。

「このような問題は、究極的には無限に分解能を上げることで解決されるはずですが、シミュレーションを行う計算機の能力には限界があるので、どこまでも細かい構造を追跡できるわけではありません。それでも、星が生まれる分子雲が形成される様子を明らかにするためには、少なくとも1つの粒子の質量を100～1000太陽質量程度まで小さくする必要があります」。そこで斎藤さんは、より小質量の粒子をよりたくさん扱える銀河形成シミュレーションをめざして、ゼロからの開発を進めています。

## “独立時間刻み法”の問題点を解決

分解能の向上をめざして研究を進めると、従来の計算方法では対応できない問題が生じることがあります。こうした問題の解決も、斎藤さんの重要な仕事です。

銀河形成シミュレーションでは、少しずつ時計を進めながら宇宙の進化（変化）を追い、銀河の形成過程を再現します。このとき、1回ごとの時計の進む度合い（時間刻み幅）をシミュレーションが破綻しないように十分小さく、ただし無駄な計算をしないように可能な限り大きく取ります。すべての粒子の時間刻み幅を同じに取ると、計算中で最も

短い時間刻み幅を持っているものに合わせる必要がありますが、幅広い時間スケールをもつ天体のシミュレーションでは非効率です。そこで、粒子ごとに異なる時間刻み幅を与える「独立時間刻み法」が広く用いられています。実際、分子雲の中でも密度が高い場所は、星が次々に生まれる進化の速い場所ですが、密度の低い所は、それに比べて進化がゆっくりしているため、時間刻み幅を大きくとっても問題ありません。このように進化の速度によって時間幅を変えることで、効率の良い計算方法を実現しています。

「私たちは、従来の『独立時間刻み法』を発展させ、銀河形成シミュレーションの効率をよくなる方法を開発しました」と齋藤さん。現在の銀河形成シミュレーションで、もっとも進化の速度が速く短い時間刻みで計算されているのは、超新星爆発によって加熱された高温のガスです。この高温ガスの進化は、熱や運動エネルギーの影響を強く受けますが、重力の影響はそれほど大きくないことがわかっています。そこで、これらの影響の違いを考慮して、それぞれ異なる時間刻み幅で計算するように工夫しました。これにより必要のない重力に関する計算が減り、シミュレーションの効率化が図られたのです。

「シミュレーションをつくっていると、いろいろな壁にぶつかります。その都度、解決法を考えますが、ときには良いアイデアが浮かばず、何カ月も研究が進まないこともあります」。こうして編み出された新しい計算方法は、齋

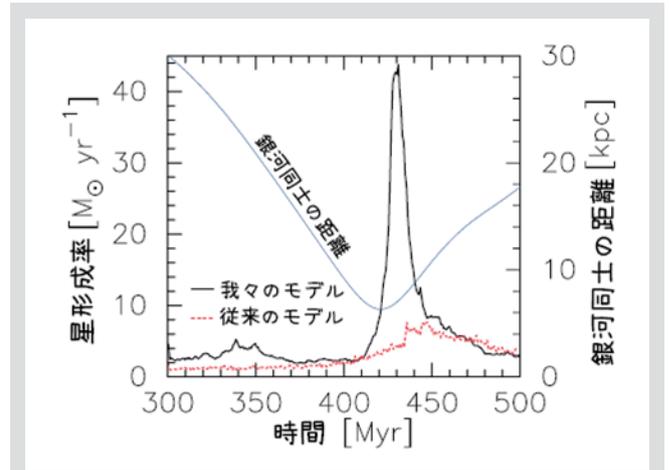


図4 銀河衝突における星形成率の時間変化とシミュレーション。画像高分解能の銀河衝突シミュレーションでは、銀河どうしの衝突の初期に、自然に星形成率が高くなる。観測データと同様の結果が出たことで、シミュレーションは成功したといえる。

藤さんの数万行にもおよぶシミュレーションプログラムに、次々に書き加えられているのです。

## 大規模シミュレーションにもチャレンジ予定

齋藤さんは銀河に関するさまざまなシミュレーションを用いて、分解能を上げたときの効果の検証を進めています。たとえば、銀河どうしの衝突のシミュレーションでは、衝突初期に爆発的な星形成がおこることを示しました(図4)。「このことは観測的には知られていましたが、従来のシミュレーションの星形成モデルでは再現できないことが知られていました。これに対して、分解能をあげたシミュレーションでは、自然とこの現象を表現できたのです」と、分解能を上げることによるご利益をすでに感じていると言います。

また、国立天文台の武田隆顕特任助教に依頼して、得られた各粒子の座標と速度のデータを画像化し、視覚的な検証も行っています。図3はその結果です。一般の人には、まるで現実の銀河のようにも見えるシミュレーション結果

ですが、齋藤さんにとってはまだ満足できるものではありません。ですから、今も分解能向上の研究を続けているのです。

それでもようやく1つの区切りを迎えられそうで、「京」を使った大規模シミュレーションも視野に入ってきています。「これまでバラバラに開発してきたものが、最近1つのプログラムとしてまとまりつつあります。スパコンを使えば、これまでの数百万粒子を大きく上回る、数億粒子を扱ったシミュレーションが可能になると考えています。よりダイナミックに、銀河形成過程を描き出せると期待しています」。準備は整いました。百億年かけて形成された銀河の詳細が明らかになる日も、そう遠くはないかもしれません。

## 用語解説

### 超新星爆発

星の一生の終わり方は、その大きさによって異なる。太陽より重い星の場合は、大きくふくらみ最後に大爆発をおこす。これを超新星爆発という。

# 格子 QCD で物質の究極を見る Getting to the Heart of Matter

Visiting Italian researcher is seeking to understand what keeps quarks in confinement

高エネルギー加速器研究機構 COSSU, Guido 研究員

物質の起源を辿っていくとクォークとグルーオンという素粒子に行き着きます。通常は単独で存在できないこれらの粒子は、超高温では自由に飛び回ることができるようになると考えられています。この究極の状態変化を、基礎理論である QCD に基づいて詳細に調べようとしているのが、イタリア出身の研究員コス・グイド (Cossu Guido) さんです。日本にやってきた経緯、彼の研究テーマとスーパーコンピュータを駆使した大規模数値シミュレーションとの密接な関係、そして日々の研究活動について、彼に語って頂きました。

Just one month after obtaining his PhD in quantum chromodynamics (QCD) from Pisa University in Italy, Guido Cossu was on his way to Japan to carry out post-doctoral work for a KEK Lattice QCD research group. That was three years ago. The program ended in April, only for Cossu to be immediately offered the opportunity to continue his research in a new five-year program helping a different support group connected with the High Performance Computing Infrastructure (HPCI) program that is investigating a number of fields in fundamental science. He readily agreed.



Guido Cossu Post-doc researcher at KEK, Tsukuba

"I was interested in Japan, its culture, before coming here," says Cossu. "Japan is also a leader in supercomputers, and the HPCI program means I can continue my post-doctoral work as a theoretical physicist in Lattice QCD using supercomputers like the K computer."

Before attempting to explain Lattice QCD, we first need to grasp what quantum chromodynamics is all about.

QCD is a field theory explaining the strong nuclear force: the interaction between quarks and the gluons that bind these fundamental particles together, and which in turn keep the nucleus of atoms intact. Historically, the

theory was used to describe ordinary matter: namely how protons and neutrons interact. Over time it has evolved and today it is used to describe the quark-gluon interactions that take place during high-energy experiments in accelerators, experiments that can weaken the binding forces enough that the interactions can be analyzed by applying the equations of QCD in their simplest form.

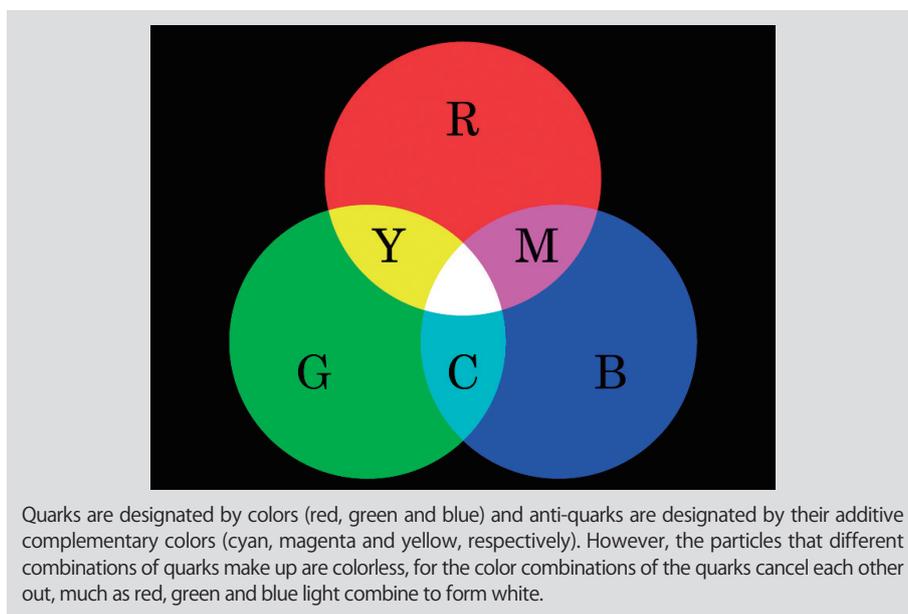
We can think of QCD as an expanded version of the simpler to understand quantum electrodynamics (QED): the quantum theory of the electromagnetic force. QED

is used to visualize the interaction between charged particles, two electrons, for instance, as an exchange of forces in the form of virtual photons—virtual because they appear briefly only during the exchange process and immediately decay into other particles.

In QED there is only one charge, with a value of positive or negative, charge or anticharge, to consider. But to explain the behavior of quarks in QCD theory, there needs to be three kinds of charges and their corresponding anticharges binding these particles together via gluons. These charges are whimsically designated by colors—red, green and blue—hence the name “chromo”, Greek for

color, though the charges have nothing to do with actual colors. The quarks interact with each other by exchanging gluons that carry the color charges. This is in contrast to the QED force carries, the photons, which are chargeless.

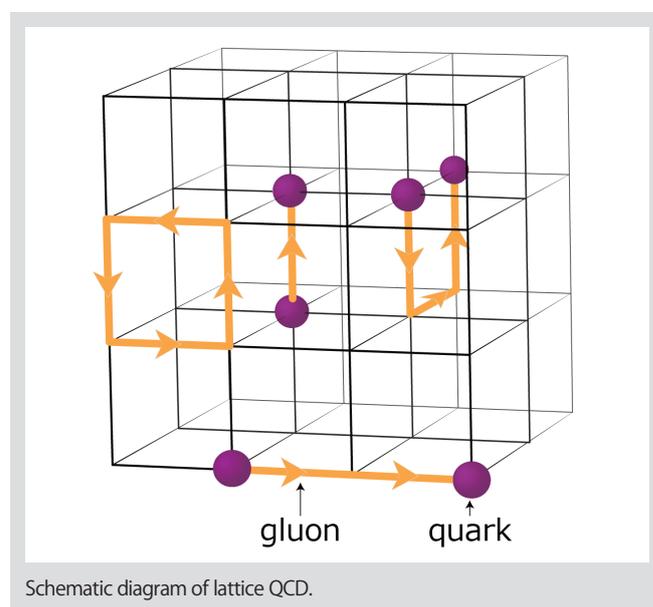
Quarks are designated by colors (red, green and blue) and anti-quarks are designated by their additive complementary colors (cyan, magenta and yellow, respectively). However, the particles that different combinations of quarks make up are colorless, for the color combinations of the quarks cancel each other out, much as red, green and blue light combine to form white.



Yet though QCD is applied to a number of interactions resulting from high-energy particle experiments in accelerators to make sense of the complexity of these interactions, “It is all but impossible to use QCD equations to do the same at low energies, where the couplings are tight, because there are just too many possibilities to consider calculating,” says Cossu.

So researches have turned to using computer simulations for help. They have replaced continuous space-time with a more manageable four-dimensional lattice or grid of equally spaced points connected by intersecting lines to represent the three dimensions of space and the dimension of time. Values for quarks are positioned on the crosspoints of the grid, while the lines between them represent the gluon fields. “In effect, we discretize our QCD equations by putting them onto a lattice,” says Cossu.

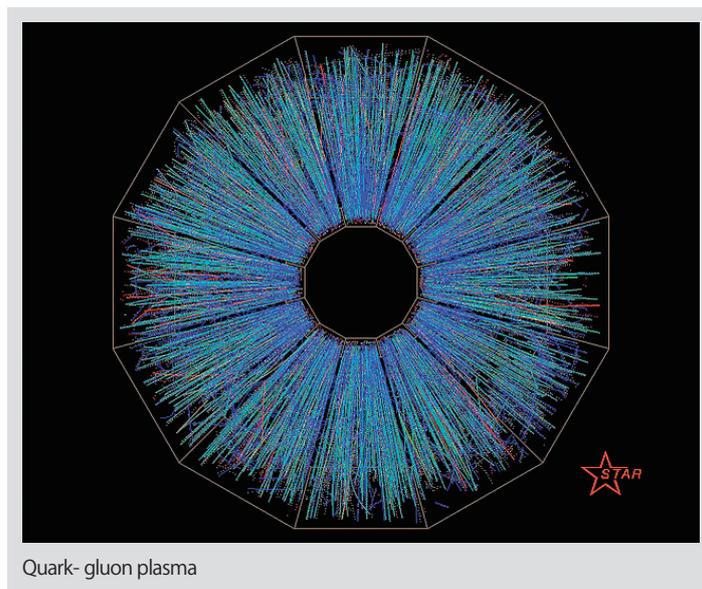
The computer then completes a series of snapshots of QCD fields, until statistically valid averages are produced of particle decay rates or particle masses.



This enables physicists to make predictions about the particle interactions, which can then be compared to measurements obtained in accelerator experiments. The number of calculations required to create such a simulation is enormous and can rise into the billions, for which supercomputers providing teraflops of processing power are required.

“Specifically, I’m using Lattice QCD to simulate what happens when you heat up particles inserted into a heat box,” says Cossu. By increasing the temperatures beyond

160- mega-electron volts (MeV) (an exceedingly hot temperature when you consider that room temperature is just one-fortieth of one electron volt) you break the normally tight quark-quark couplings known as confinement, and a phase transition into a new state of matter takes place. At this point, the quarks and gluons behave almost as though they are free in a sort of primordial quark-gluon plasma, such as was created at the time of the Big Bang, and before other types of particle came into being.

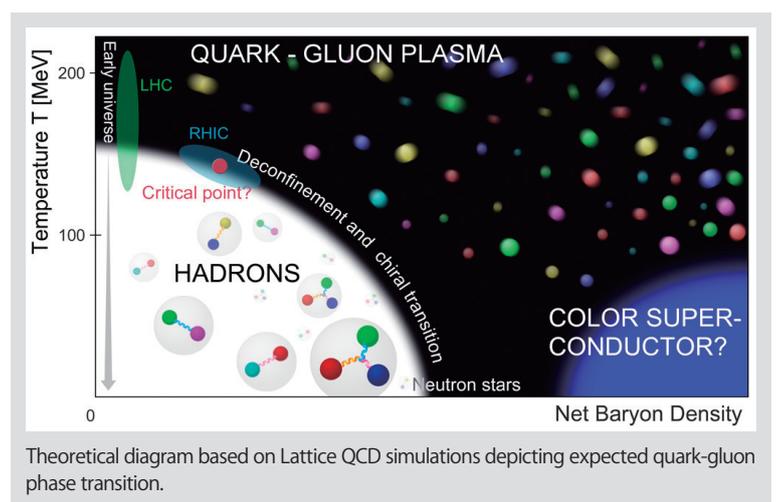


Quark- gluon plasma

“And this is exactly what Lattice QCD predicted would happen,” explains Cossu. “But what I’m investigating is why we have confinement at all. Although we have many theories describing the phenomenology of confinement, we can’t explain why quarks are confined.”

In search of the answer, Cossu is using Lattice QCD to study what actually changes during the transition phase—the changes of symmetries among different quarks for example, or the changes in the thermodynamical properties of the matter.

“This is really interesting because when you have changes in the state of matter, you can really see what is happening,” says Cossu. “Then you can trace these changes back, and this gives you an understanding of the properties of the matter in the two phases.”



Theoretical diagram based on Lattice QCD simulations depicting expected quark-gluon phase transition.

To carry out his calculations Cossu has been using the IBM Blue Gene/Q supercomputer at KEK, and now his research group has applied to use the more advanced K computer. Programming these high performance supercomputers is another important requirement of Cossu’s work. Because

they consist of massively parallel processing cores, they have to be optimized differently for different kinds of calculations. Cossu notes that it's almost always necessary to redesign previously used algorithms, because what can still work well on several cores, may not be good enough to work well across hundreds of cores. Similarly,

distributed memory arranged in a series of hierarchies is the order of the day for these systems, so to be able to make efficient use of supercomputer time, the workload has to be balanced across these hierarchies as equitably as possible.



“For the past six months,” says Cossu, “I’ve been doing this kind of optimization work and also collaborating with researchers at Tsukuba University and Nagoya University to write a common code for Lattice QCD that will be made available to everyone in the lattice community who wants to use it.”

The code they have been using to discretize the theory until now has been written in the Fortran programming language, but this is considered out-dated, so the collaborators have switched to C++. There are many ways to discretize the Lattice QCD theory and different researchers have different ways of working, so C++ will provide the flexibility to accommodate all these

requirements.

Also as part of his work for the research support group of the Joint Institute for Computational Fundamental Science (JICFuS) and HPCI Strategic Program (Field 5), Cossu recently published a report on simulating QCD at finite temperatures employing cost-effective graphics processing units. These GPUs are used in personal computers as graphical co-processors, and are the main processor used in video game consoles. Because they can work in parallel, they have proved an economical substitute in place of supercomputers among small groups of researchers.

#### Related Link:

Guido Cossu “Lo zen del bosone di Higgs”(Italian ed.), goWare (Sep.18, 2012)

<http://www.jicfus.jp/en/121011syuppan/>

# 「連立一次方程式」を高速に効率よく解くために

筑波大学計算科学研究センター 今倉 暁 研究員

宇宙現象などのシミュレーションには、膨大な量の計算が必要です。さらに近年では、問題のサイズがどんどん大規模になっています。そのため、扱っている問題を計算するにあたり最適なアルゴリズムや高速化の手法を見つけることが重要です。中でも、計算時間の大半を費やしている連立一次方程式の解を高速で効率よく求めることができれば、宇宙や原子核など様々な分野の研究の進展に役立ちます。

筑波大学計算科学研究センター研究員の今倉暁（いまくら・あきら）さんは「連立一次方程式と聞くと難しく思うかもしれませんが、小学校で習った「鶴亀算」と同じなのですよ」といいます。今倉さんは、超新星爆発シミュレーションにおける連立一次方程式を解くための手法を研究しています。



今倉暁さん

問) 鶴と亀が合わせて8匹います。足の合計は26本でした。鶴と亀はそれぞれ何匹いますか？

解き方) 鶴と亀合わせて8匹、足の数が全26本の場合、8匹すべてが亀だとすると足が6本多い。鶴は亀より足が2本少ないので、1匹亀を鶴に変えると2本足が減る。足を6本減らすには、亀を3匹鶴に変えればよい。すると鶴が3匹、亀が5匹で、足が26本になる。

答え) 鶴が3匹、亀が5匹

## 連立一次方程式は、行列とベクトルで記述される

「鶴と亀が合わせて8匹います。足の合計が26本でした。鶴と亀はそれぞれ何匹いますか？」この鶴亀算は、鶴の数を $x$ 、亀の数を $y$ と置くと、変数 $x$ 、 $y$ についての連立一次方程式

$$\begin{cases} 1x + 1y = 8 & \cdots \text{①: 頭の数についての式} \\ 2x + 4y = 26 & \cdots \text{②: 足の数についての式} \end{cases}$$

で表されます。鶴亀算は一般に「全て鶴だとすると…」もしくは「全て亀だとすると…」として解きますが、これは連立一次方程式の各式を変形し、変数を消去することに対応しています（図1）。

鶴亀算では変数は鶴の数 $x$ と亀の数 $y$ の2つでしたが、超新星爆発などの大規模なシミュレーションでは、変数の数

が1000万や1億もあるような非常に大規模な連立一次方程式が現れます。一般に、変数が $x_1, x_2, \dots, x_n$ のように $n$ 個ある連立一次方程式は、

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

のように表されます。この式は図2のように係数 $a_{11} \sim a_{nn}$ を $n$ 次行列、変数 $x$ 、定数 $b$ を $n$ 次元ベクトルとして、 $Ax=b$ のように表現することができます。連立一次方程式を解くということは、与えられた行列 $A$ とベクトル $b$ に対して、 $Ax=b$ を満たすベクトル $x$ を求めることなのです(図2)。このように、連立一次方程式を一般化して解き方を考えることで、変数の数や係数の値によらずどのような連立一次方程式に対しても、同様の方法で解くことができるようになります。

連立一次方程式の解を求める方法には、大きく分けると直接法と反復法があります。図1のように式の変形により変数を消去していく方法は代表的な直接法で、「ガウスの消去法」と呼ばれます。一方、反復法は、適当に選んだ初期値から計算を繰り返して反復的に近似解を求め、その解が十分に真の解に近づいたところで計算を打ち切り、解とする方法です。

直接法は、どんな問題でも原理的には厳密な解を求めることができるのですが、問題の規模が大きくなると、時間がかかりすぎてしまい、なかなか解にたどりつくことができません。そこで、大規模な計算では反復法を使います。中でも、よく使われる反復法は「クリロフ部分空間法」です。クリロフ部分空間とは $n$ 次行列と $n$ 次元ベクトルの積でつくられるベクトル空間をいいます。反復によってクリロフ部分空間をつくり、その中で連立一次方程式の近似解を求める方法です。初期値から反復により空間を広げながら近似解を更新します(図3)。

消去法による連立方程式での解き方	行列での解き方
$\begin{cases} 1x + 1y = 8 \cdots \textcircled{1}: \text{頭の数についての式} \\ 2x + 4y = 26 \cdots \textcircled{2}: \text{足の数についての式} \end{cases}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 \\ 26 \end{pmatrix}$
<p>①を4倍する</p> $\begin{cases} 4x + 4y = 32 \cdots \textcircled{3} \\ 2x + 4y = 26 \cdots \textcircled{2} \end{cases}$	<p>1行目を4倍する</p> $\begin{pmatrix} 4 & 4 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 32 \\ 26 \end{pmatrix}$
<p>③から②を引く</p> $\begin{cases} 2x = 6 \cdots \textcircled{4} \\ 2x + 4y = 26 \cdots \textcircled{2} \end{cases}$	<p>1行目から2行目を引く</p> $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 26 \end{pmatrix}$
<p>④から③を引く</p> $\begin{cases} 2x = 6 \cdots \textcircled{5} \\ 4y = 20 \cdots \textcircled{4} \end{cases}$	<p>2行目から1行目を引く</p> $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 20 \end{pmatrix}$
<p>④、⑤の変数<math>x, y</math>それぞれの係数を1にそろえる</p> $\begin{cases} x = 3 \cdots \textcircled{6} \rightarrow \text{鶴3匹} \\ y = 5 \cdots \textcircled{7} \rightarrow \text{亀5匹} \end{cases}$	<p>左の行列を単位行列にする</p> $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \end{pmatrix}$

図1 連立一次方程式(鶴亀算)の解き方

連立一次方程式

$$Ax = b$$

ここで、 $A$ : $n$ 次行列、 $x$ 、 $b$ : $n$ 次元ベクトル要素ごとに書くと

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

図2 連立一次方程式の行列とベクトルによる表現

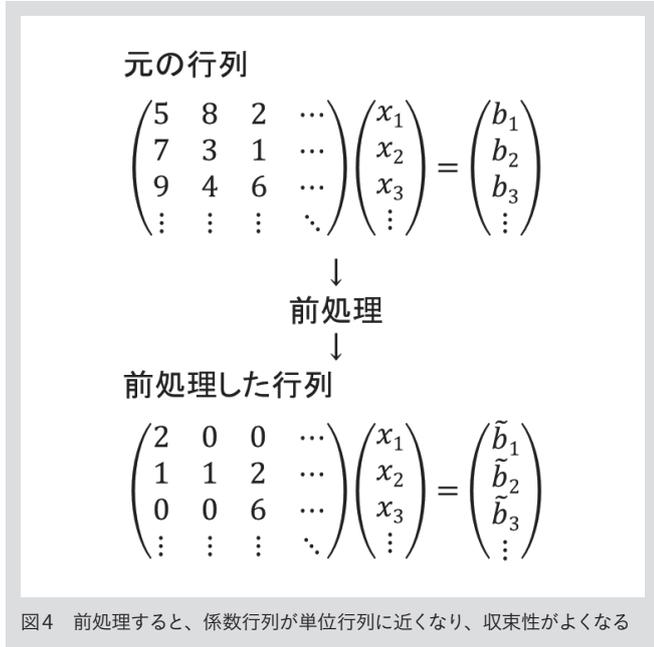
Krylov部分空間反復法の概念図

初期ベクトル  $x_0$  から、反復的に Krylov 部分空間を広げながら最適解  $x_k$  を探す。

図3 クリロフ部分空間法の概念のイメージ

## 前処理で収束性を改善

クリロフ部分空間法は、直接法と比べて少ない計算量で解けるのですが、計算の仕方によっては収束性が悪く、解ける問題に限られるのが難点でした。収束するとは、計算した値が解に向かって限りなく近づくことです。反復する



うちに値が収束するとはいえ、なかなか収束しなければ計算量は増え、精度も悪くなってしまいます。

クリロフ部分空間法には、係数行列Aが単位行列<sup>\*1</sup>に近い場合、少ない反復回数で収束するという特徴があります。そこで、単位行列に近くなるように係数行列を変形し、収束性を改善させることを考えます(図4)。これを「前処理」と呼びます。つまり、収束性は係数行列Aの固有値の分布に依存し、固有値が密集していれば高速に収束するので、元の係数行列によく似た前処理行列を使って固有値の分布を改善します。そして、前処理行列によって元の方程式を変換し、反復法で解を求めます。変形した連立一次方程式の係数行列の固有値が密集していれば、クリロフ部分空間法は高速に収束することが期待されます。

前処理にも不完全LU分解前処理、近似逆行列前処理、定常反復法前処理など様々な種類があり、それぞれにいろいろな手法があります。解きたい問題に適した前処理を行えば劇的に収束性がよくなり、反復回数や時間を短縮できます。

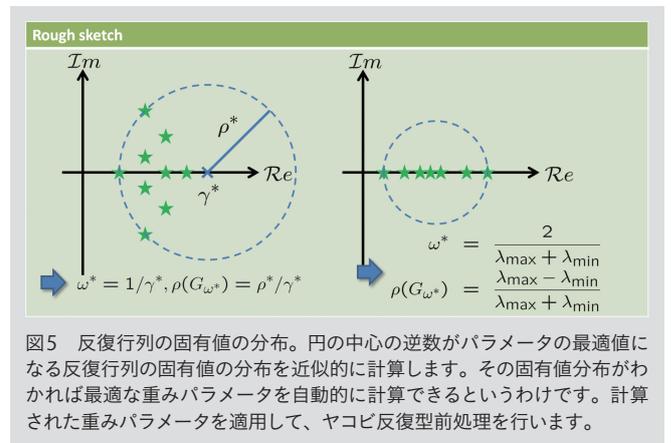
## 重みパラメータの最適化法を考案

今倉さんは、超新星爆発のシミュレーションに向け、反復法の一つ「ヤコビ法」を使った重み付きヤコビ反復型前処理に着目しました。ヤコビ法は古くから使われる反復法の一つですが、これをクリロフ部分空間法の前処理として使うというアイデアです。

「ヤコビ反復型前処理は、シミュレーションの大規模計算に必要な並列化に向くのですが、収束性がよくないのです。そこで、重みパラメータ(変数)を設定して計算し、収束を加速させようと思いました。そうすれば収束性もよくなり、計算も楽になると考えたのです」。

けれども、問題によって最適な重みパラメータは変わってしまいます。重みパラメータはユーザーが自身で決めるものですが、最適でないものを使えば収束性はよくなるどころか、悪くなってしまふ可能性もあります。そこで、今倉さんは、重みパラメータを問題ごとに自動的に最適化する方法を考案しました。収束性は、ヤコビ前処理の反復でできる反復行列の性質に依存します。これを利用して重み

パラメータと収束性の関係式を求めました。またその式から、反復行列の固有値<sup>\*2</sup>の分布がわかれば固有値を囲む円が求まり、円の中心の値の逆数がパラメータの最適値になることがわかりました(図5)。



## 超新星爆発の計算が10倍速く

新たに考案した前処理の技法がクリロフ部分空間法を解くのに有効であるかどうかは、数値実験から確認しました。少ない計算コストで重みパラメータを最適化でき、多くの問題に対して前処理の性能が向上したことがわかりました。「この前処理法により、超新星爆発の計算が従来の方法より10倍は速くなりました。今までなかなか解にたどりつけなかった問題も解けるようになりました」と今倉さん。これからはこの手法を実際の超新星爆発シミュレーションのための計算に応用していきます。実際に計算を行う共同研究者たちも、この結果に喜んでいるようです。

今倉さんは、2011年4月に名古屋大学から筑波大学計算科学研究センターに移ってきました。「今まで理論中心の基礎研究をしてきたので、シミュレーションなどの応用に向けた計算の研究はこれが初めてです。そのため、この研究は印象深いものとなりました」と感慨深げに話します。「筑波大学に来て、このような機会を得ることができました。研究の成果が新しい物理の発見などに貢献できると思います」。

こうした計算手法に対する研究が宇宙分野のみならず素粒子や原子核などの研究の発展につながるのです。今倉さんのこれからの活躍が期待されます。

### 用語解説

※1 単位行列：正方行列のうち、右下がりの対角線上にある成分がすべて1で、残りの成分がすべて0の行列。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

※2 固有値：線形空間で、あるベクトルを線形変換した結果が、そのベクトルの定数倍に等しくなる時のその定数(1個とは限らない)。

行列  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$  において、

$A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  ( $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ) をみたす実数  $\lambda$  が存在するとき、 $\lambda$  を行列  $A$  の固有値という。

$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$  の固有値は、

$x^2 - (a + d)x + (ad - bc) = 0$  の解で与えられる。

# 格子量子色力学によって、 物質の性質に深く関わる核力・ ハイペロン力を求める

筑波大学計算科学研究センター 石井 理修 准教授

筑波大学計算科学研究センターの青木慎也（あおき・しんや）教授、石井理修（いしい・のりよし）准教授と理化学研究所仁科加速器研究センターの初田哲男（はつだ・てつお）主任研究員のグループは、「格子量子色力学に基づく核力の導出」の業績によって2012年度仁科記念賞を受賞しました。この賞は、原子物理学とその応用に関して優れた研究業績をあげた研究者を表彰するものです。3人の中で最も若い石井さんは、原子核・ハドロン物理の専門家でありながら、格子量子色力学（格子QCD）の計算の経験もあったことから、グループ内で大きな役割を果たしました。今回は、受賞理由となった研究内容と、すでに動き出している新たなチャレンジについて話を聞きました。



図1 酸素原子の階層構造

## 湯川秀樹博士が現代の素粒子物理学に問いかけること

「私たちが求めた核力は、湯川秀樹（ゆかわ・ひでき）博士が提唱した中間子論に端を発しているのです」（石井さん）。日本人なら誰もが知っている物理学者の湯川秀樹博士。1935年に発表した「中間子論」によって、日本人として初めてノーベル物理学賞を受賞しました。石井さんたちの研究は、この「中間子論」と関係があるといいます。これはいったいどのような理論なのでしょう。物質を構成する原子は、中心にプラスの電荷をもつ原子核があり、その周りにマイナスの電荷をもつ電子が存在しています（図1）。原子核はさらに小さく分けることができ、プラスの電荷をもつ陽子と、電荷をもたない中性子からできています。この陽子と中性子は核子と呼ばれています。

さて、原子や原子核がバラバラにならず一つにまとまっているのは、構成要素が互いに引き合っているからです。たとえば、原子核と電子は、プラスの電荷とマイナスの電荷の間に働く電磁気力によって、互いに引き合っています。一方、原子核を構成する陽子と中性子は電磁気力で引き合っているわけではありません。プラスの電荷をもつ陽子同士は、電磁気力では互いに反発します。ところが、この反発力に打ち勝つだけの強さを持つ引力が存在するため、原子

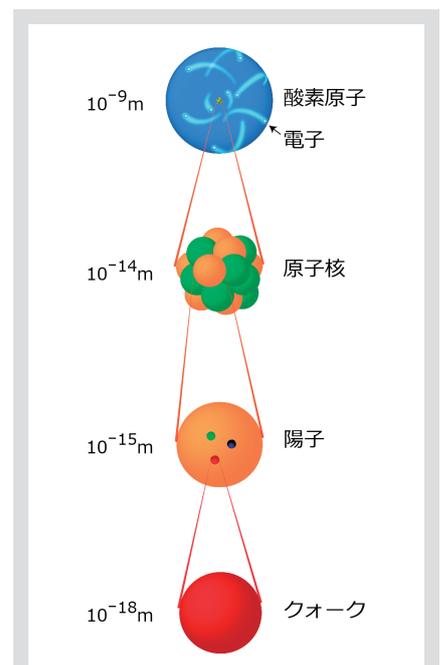


図1 酸素原子の階層構造

核という“かたまり”でいられるのです。それは、どのような力なのでしょう。

この問題に答えを提示したのが、湯川博士の「中間子論」でした。「中間子論」では、陽子や中性子は、 $\pi$ （パイ）中間子と呼ばれる粒子を交換することによって、互いに引き合っているというのです（図2）。この $\pi$ 中間子によって生まれる引き合う力は、“核子間の力”という意味で「核力」と呼ばれています。

核力は、原子核の性質を理解するための出発点となります。多くの実験が精力的に行われ、現在では核子・核子衝突の実験データを非常によく再現する精密な核力が、多くのパラメータを用い関数形を仮定することによって、現象論的に構築されています。その一方で、核力の理論的研究は単純化されたモデル計算を使ったものが主流でし

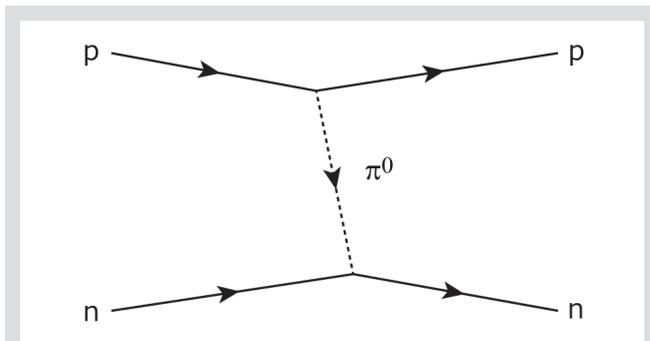


図2 中間子交換の描像  
pは陽子を、nは中性子を表し、その間を $\pi$ 中間子が飛び交っている。  
(H.Yukawa 1935)

た。この場合、おのずと適用範囲に制限がつき、不定性を抑えて結論を出すことが困難になります。これを避けるためには、よけいな仮定や近似はいっさい加えず、“第一原理”のみに基づいた研究が必要となります。しかしながら、そのような第一原理計算による核力の導出法は、決定的なものが知られていない状況でした。

## 多くの学者がめざす核力の算出法

「核力は、宇宙に存在する4つの基本的な力の一つである強い相互作用の一部です。強い相互作用を第一原理のみに基づいて研究することを可能にするのが“格子QCD”です。格子QCDを使った核力の研究は、従来、距離が固定された2つの核子のエネルギーを計算することで試みられていました。量子の世界では不確定性原理のため、本当は核子の位置を固定することは不可能です。しかし、それぞれの核子内の1つのクォークを人工的に非常に重いと仮定することで、この困難を回避します。

こうして得られた核力から現実の核力を推測するはずでしたが、なかなかうまくいっていませんでした。また、クォークを人工的に重いとすると仮定を始めとして、コントロールできない不定性を伴う危険があるため、私たちは“格子QCD”上の散乱理論を拡張して独自の方法を考えたのです。筑波大学の石塚成人（いしづか・なるひと）准教授たちの研究が参考になりました」と石井さん。核力を導き出すのに使われた“格子QCD”とはいったいどのような理論なのでしょう。

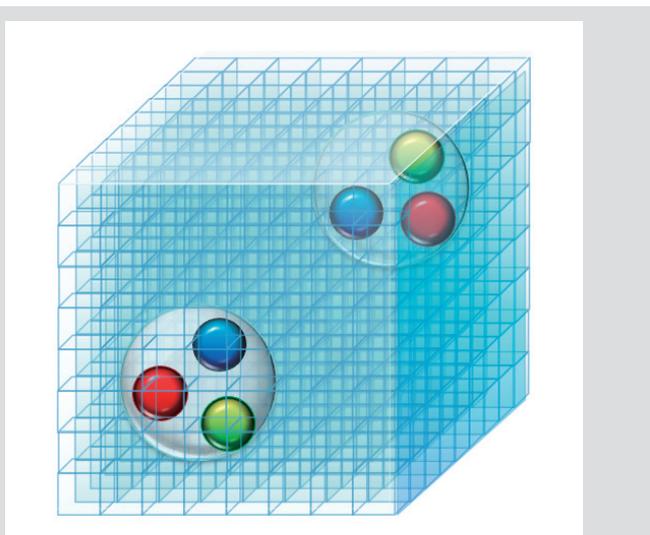
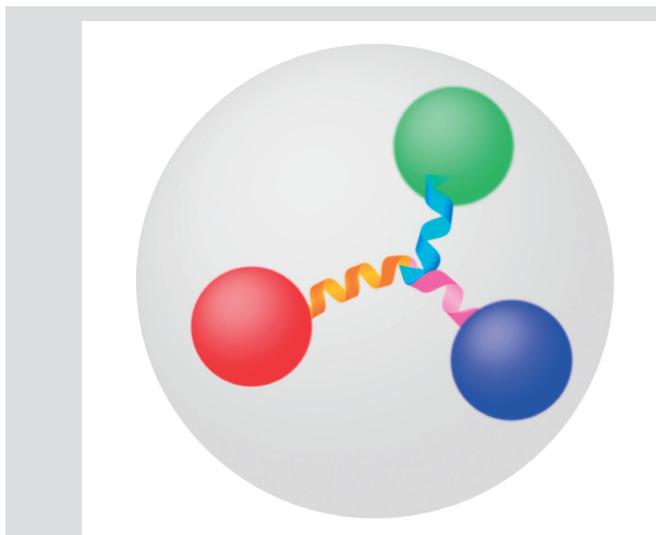


図3 陽子や中性子などの核子（左）と核力を求めるための格子QCDの概念図

核子は赤、青、緑の色荷をもつクォーク1個ずつからできている。核子間の核力を求めるには、核子が互いに力を及ぼしあうことのない十分な距離が取れるサイズの箱（空間）を用意し、それを格子に分割して計算する。核子の直径は、約1 fm ( $10^{-15}$ m)。2つの核子間の核力を求めるには、一辺が10 fmの箱を用意して、それを0.1 fmの格子に分けて計算したいところ。しかし、これまではスパコンの性能の限界もあり、一辺3 fm程度の箱が最大であった。

陽子や中性子は、それぞれクォークという素粒子が3つずつ集まってできています（図3）。そして、このクォーク同士をつなぎとめている力がグルーオンです。まるでグルー（糊）のようだということから名付けられました。

陽子や中性子がクォーク3つからできているのは、クォークが3つ集まると安定になるからです。このことを、光の3原色（赤、青、緑）がそろって無色（白色）になることになぞらえて、クォークが従う基本法則を「量子色力学（QCD：Quantum Chromodynamics）」と呼びます。QCDは強い相互作用に関連するすべての物理現象を記述する究極の理論として知られています。このQCDを用いると、クォークの性質から出発して、核子や $\pi$ 中間子の性質を理論的に求めることができます。さらに進めれば、核子間に作用する核力も導き出せるのです。

ところが、現実はそんなに甘くはありません。QCDは低エネルギー領域で相互作用がどんどん強くなります。このため、核力を始めとする低エネルギーの物理量を、連続空間上で直接計算する有効な方法は今でも知られていないのです。そこで多くの物理学者は、格子QCDに着目します。格子QCDでは、連続的な空間を格子点に分解し、そこにQCDを定義します（図3）。その際、格子点上にクォークが存在していて、格子点と格子点を結ぶ辺の上には相互作用を媒介するグルーオンが存在していると仮定します。こうして自由度が減った格子QCDは、スーパーコンピュー

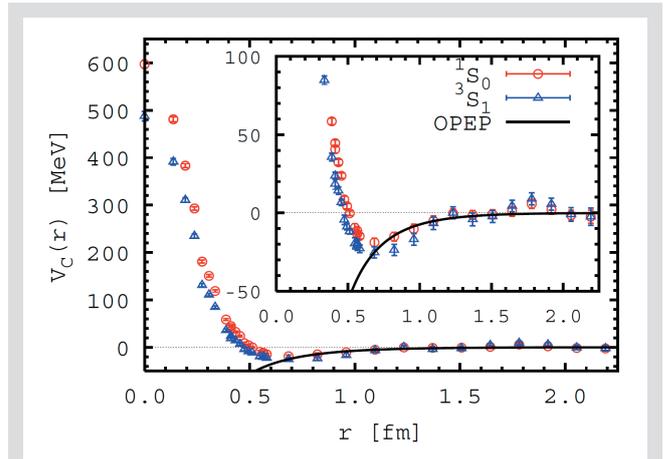


図4 格子QCDによって導出された核力  
核子間の距離が離れていけば引力が働く。これは、核子間の $\pi$ 中間子交換による引力に相当する。一方、距離が近いと斥力（反発力）が働く。この力によって、原子核はつぶれることなく一定の大きさを持つことができる。

タ上で取り扱うことができ、QCDの直接の予測を第一原理のみに基づいて引き出すことが可能となります。

近年、高性能なスーパーコンピュータによって、格子QCD上で核子・核子散乱を理論的に計算することが可能になってきました。その計算結果を先回りして直接再現するものとして、石井さんたちは核力を定義し、高エネルギー加速器研究機構のスーパーコンピュータ「Blue Gene/L」を用いて実際にそのような核力を計算しました。こうして2007年に、核子間の距離の変化にもなう核力の変化を導き出し（図4）、2012年、この成果が評価されて仁科記念賞を受賞したのです。

## 興味は中性子星を構成しているハイペロン力へ

しかし、石井さんたちはこの時の結果に満足しているわけではありません。「スパコン性能の限界から、実際よりも重いクォークを使って計算せざるを得なかった」と言います。現在は、一辺が9 fm（フェムトメートル： $10^{-15}$ m）という、これまでよりはるかに“大きな”空間を用意して、より現実的な状況（物理的クォーク質量を採用した計算）における核力を求める計画が進行中です。

さらに、石井さんたちはハイペロン力の計算にも格子QCDを応用しています。ハイペロン力とはハイペロンとハイペロン、またはハイペロンと核子の間に働く力のことです。ハイペロンとは、陽子や中性子の3つのクォークのうちいくつかをストレンジクォークに置き換わった

ものです。ストレンジクォークは、大型加速器を使った実験ではその存在が確認されていますが、寿命が非常に短いため地球上には普通には存在しないとされています。しかし、石井さんは、「宇宙には、巨大な質量を持つ中性子星がいくつも発見されています。その中心部は、想像を超える高密度状態です。そういった環境では、普通にハイペロンが存在する可能性が高いのです」と話し、中性子星の構造の解明にはまずハイペロン力を明らかにする必要があります（図5）。

ハイパー核（ハイペロンを含む原子核）の専門家である筑波大学の根村英克（ねむら・ひでかつ）准教授らを加えて、ハイペロン力の研究はすでいくつか成果が得られ、

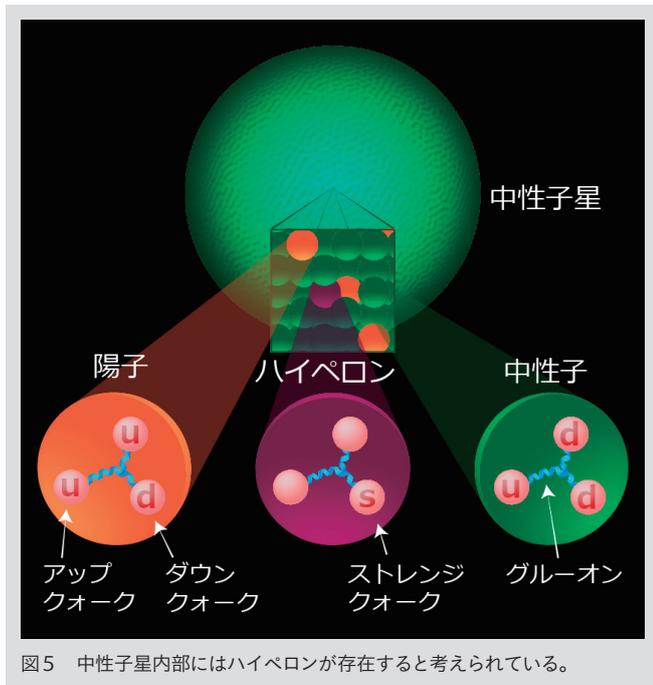


図5 中性子星内部にはハイペロンが存在すると考えられている。

ストレンジクォークを1つもつΛ（ラムダ粒子）ハイペロンと核子間の力や、ストレンジクォークが2つのΣ（グザイ）ハイペロンと核子間の力などの性質を明らかにしました。また、最近ではさらに複雑な、ハイペロン同士の結合などにも取り組んでいます。

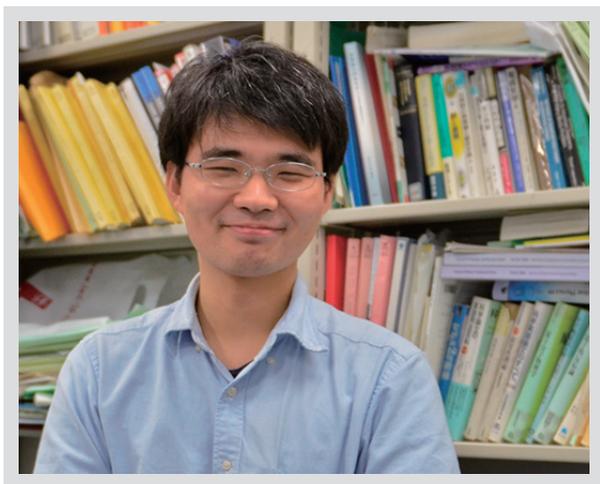
## 実験と理論が補い合う

こうして精力的に研究を進める石井さんですが、原子核・ハドロン物理学の世界に入るきっかけは、友人に誘われて何となく参加した学祭での原子核実験の出し物（常温核融合）でした。それが長い期間を経て、今では「巨大加速器を使った素粒子・原子核実験と、それがどうなるのかを説明する理論とは互いに補い合いながら、発展していくのが理想的です。これまで理論は一方的に負けていたわけですが、このような計算をきっかけに実験に追いつくことが可能になるかもしれない」と考えるようになりました。いまの石井さんの日常は、核力やハイペロン力を求めるた

めのアイデア（理論やアルゴリズム）を、スパコン上で動かせるようにコード（プログラム）にする作業から始まります。それが行き詰まると仲間の研究者に電話をかけて、意見交換したり雑談をしたり…。ときには、ちょっと“邪魔をする”こともあるそうですが、そうしてリフレッシュすると再びコード書きに向かいます。こうしてコツコツと作り上げたコードをスーパーコンピュータ「京」の上で動かし、これまで以上に大きな成果が得られるのを楽しみに待ちたいと思います。

# 原子核の正体を解き明かす

東京大学大学院理学系研究科 吉田 亨 特任助教



物理学の教科書にあった「原子核の形は楕円になる」という何気ない記述を学部生時代に見た、東京大学大学院理学系研究科特任助教の吉田亨（よしだ・とおる）さんは、「本当だろうか。どんな計算をしたら楕円だとわかるのかな」と疑問を抱いたそうです。それが、原子核研究の世界へと進むきっかけとなりました。

吉田さんの研究テーマは、原子核の様子を方程式で記述するのに必要な物理量を明らかにし、原子核を表す最適な理論を見出すこと。その進展はというと「うまく行き過ぎていて、“本当かな”と慎重になっているところです」。吉田さんの気持ちを高ぶらせる最近の研究成果についてうかがいました。

## 原子核の基本となる殻模型

原子核を構成する陽子と中性子の振る舞いを研究する場合、メイヤー・イェンゼンによる「殻模型（シェルモデル）」が基本の形と考えられてきました（図1）。殻模型とは、原子核の中心には塊があり、その周りを陽子や中性子がグルグルとまわっている、とするモデルです。宇宙になぜヘリウムや酸素、鉄が多く存在しているのかが示せる、大変説得力のあるモデルでした。

従来の殻模型は、エネルギーレベルが低く安定な状態や、丸い原子核の状態を表すのに都合が良いモデルです。ところが、宇宙にはさまざまな形をし、またエネルギーレベルも高い状態が存在しています。原子核を正確に表すためには、エネルギーレベルが低い状態だけでなく、高い状態をも表すモデルを考えなければなりません。

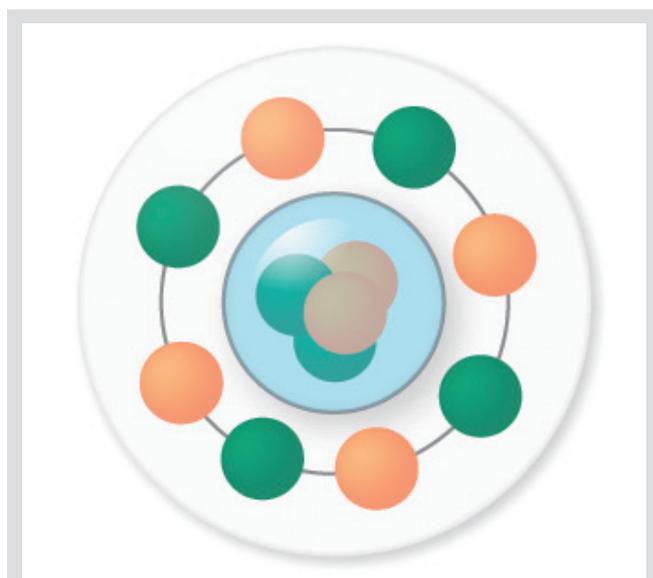


図1 殻模型。原子核の中心に陽子と中性子の塊（ピンク部分）があると仮定し、その周りを陽子（オレンジの球）や中性子（緑の球）といった核子がグルグルと運動しているモデル。原子核内を陽子や中性子が比較的自由に運動できることから、全体を液滴と近似することができる。

## アルファクラスターモデルを用いた原子核の解析

エネルギーレベルが高い原子核を考えると、「アルファクラスターモデル」を用いると多くの現象や実験結果を矛盾なく説明できる、という経験則があります。アルファクラスターモデルでは、陽子2個と中性子2個からなるヘリウム原子核（アルファ粒子）がぶどうの房（クラスター）のように集まって原子核を作っていると考えます。このモデルによれば、ベリリウム原子核（陽子4個、中性子4個）はアルファ粒子2つから構成され、炭素原子核（陽子6個、中性子6個）はアルファ粒子3つからなると考えられます（図2）。

吉田さんは1年前までは、このアルファクラスターモデルを用いて研究していました。吉田さんの一日は、朝一番にスーパーコンピュータを操作するターミナルやグラフィカルソフトを立ち上げる場所から始まります。原子核が持つエネルギーはどのような計算式で記述できるのかを理論立てて考え、計算を始めます。このような計算は莫大な量なので、スーパーコンピュータを使っても一日がかりの計算になることもあります。理論計算の結果から導き出されたエネルギーレベルの値が実験値<sup>\*1</sup>とどの程度一致

しているのかを確かめます。一致していれば、その日作成した計算式は「確からしい」ということになります。

吉田さんの研究成果、炭素12（陽子6個、中性子6個）の原子核について紹介します。図3上の実験と理論（吉田さんの計算結果）のグラフを比較すると、原子核のエネルギーレベルの高いところから低いところまで、よく一致しています。この理論は、アルファ粒子3個が近づいている状態だけでなく、距離的に離れた状態も考慮に入れた場合です（図3下）。アルファ粒子3個の距離をさまざまに仮定し、すべて考慮に入れることを、状態の「重ね合わせ」と言います。

この研究で吉田さんは、他の研究者が4～5種類の振動を重ね合わせていたのに対して、100にのぼる振動を重ね合わせて計算しました。エネルギーレベルの違いを一つひとつの特徴に特化しているような数学的な処理でなく、エネルギーレベルの違いのお互いの関係性をSU(3)やSp(2)代数という数学的手法を使って計算するように工夫したことが成功の秘訣でした。

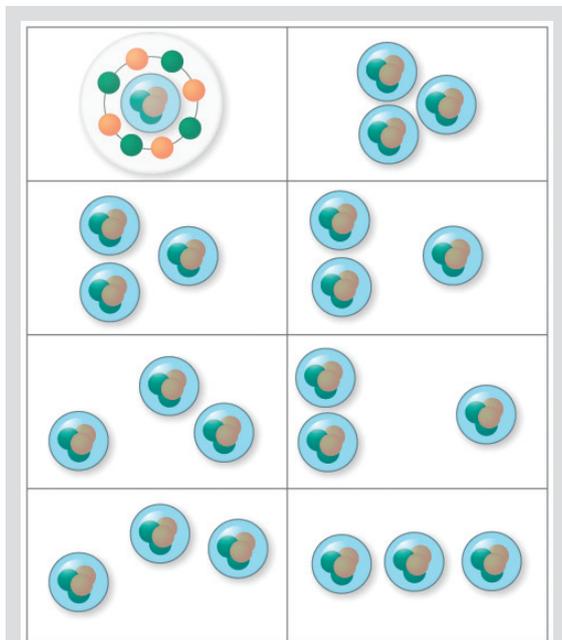


図2 炭素12原子核のアルファクラスターモデル。陽子2つと中性子2つからなるアルファ粒子（ヘリウム原子核）3つで炭素12の原子核が構成される。左上は殻模型と同じ状態。アルファ粒子3つが同じ場所で重なり合った特殊な形と考えられる。アルファクラスターモデルはシェルモデルにくらべると広がっており、密度が低い。殻模型が液滴に近似されるのに対して、アルファクラスターモデルは気体に近似できる。

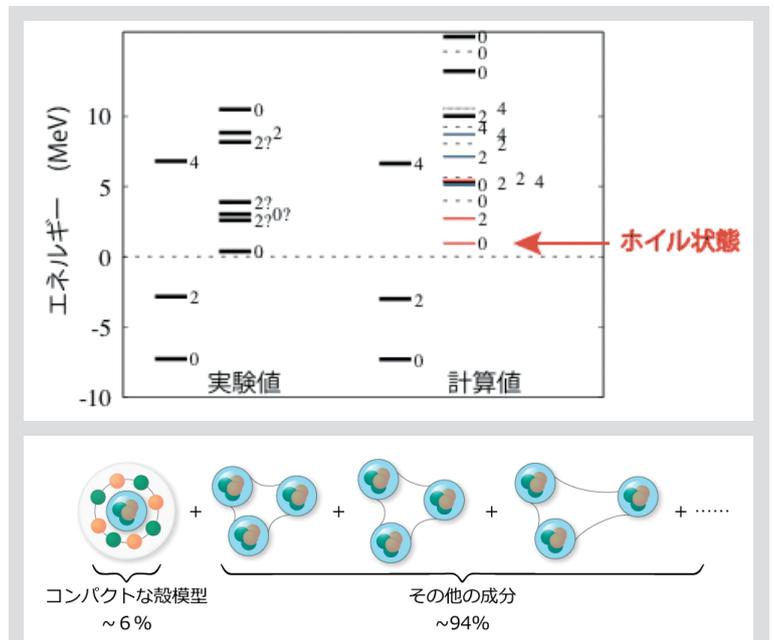
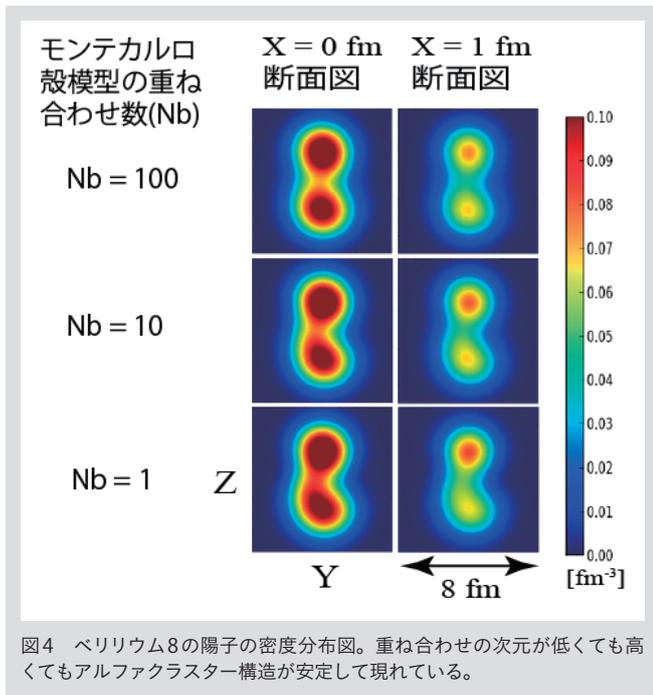


図3 アルファクラスターモデルによる炭素12原子核のクラスター構造の分析。アルファ粒子3つの距離が近づいた状態から離れた状態まで、さまざまな状態の重ね合わせで原子核のエネルギーを計算した（右側）。実験から得られたエネルギースペクトル（左側）とよく一致している。またホイル状態として知られている状態については、殻模型状態は6%程度の寄与と、距離的な広がりをもったその他の成分が94%程度寄与していることが分析できた。

吉田さんは、アルファクラスターモデルの欠点の一つは「パラメータが多い」ことだと言います。ある程度の根拠を持って設定する現象論的パラメータではあるのですが、エネルギーレベルがよく一致するようにパラメータによる合わせ込みをしている感も否めないとのこと。

原子核と核子をつなぐ途中にクラスターという階層を用意し、そこでおおよそを議論するというイメージです。この方法はうまくいくことも多いのですが、計算結果が一致していても、原子核全体を核子から理解したとはなかなか言えないのだそうです。

## モンテカルロ殻模型を用いた原子核の解析—第一原理計算を元に



原子核全体を理解するためには、陽子一つひとつ、中性子一つひとつの振る舞いを数学的に記述する「第一原理計算」に基づく研究をすべき。これが多くの物理学者の目標です。核子がもともと持っている性質を計算に反映させる方法で、パラメータによる合わせ込みをしないで良い手法なので、より説得力のある理論を導き出せると考えられるからです。ところが、それは非常に複雑な計算と膨大な計算時間が必要になってしまい、これまでは困難でした。ところがモンテカルロ殻模型と呼ばれる新たな手法が発達してきたことによりこの壁が打ち破られ始めています。

この状況の中で、吉田さんは密度分布などの基本的な量を計算するときに、多数の「重ね合わせ」でも数学的にうまく処理できる方法を見出しました。これなら、第一原理計算に基づく研究とクラスター構造の研究がつけられるのではないかと吉田さんは考えました。

吉田さんは、第一段階として計算が行えそうな陽子4つと中性子4つのベリリウム原子核について、第一原理計算に基づくモンテカルロ殻模型を用いた計算を行いました。原子核の形がどうなっているかを確認すると、みごとにクラスター構造を示していました(図4)。これが、「うまく行き過ぎて本当かな」と吉田さんを慎重にさせる研究結果です。

これは、アルファクラスターモデルでは「仮定」あるいは「前提」としていたアルファクラスター構造が、第一原理計算に基づく計算で検証されうることを示しています。

吉田さんは、ベリリウム8などの軽い核のより詳しい性質を調べ終えたら、もっと重い原子核や、もっとエネルギーレベルの高い状態まで考慮に入れた計算をすることに挑戦したいと言います。そのためにはスーパーコンピュータ「京(けい)」のような大規模計算機が必要です。これらの計算で、吉田さんの見出した計算式がどの程度、多くの現象を説明できる磐石な理論なのかを慎重に確かめ、発展させていきたいと考えています。

### 用語解説

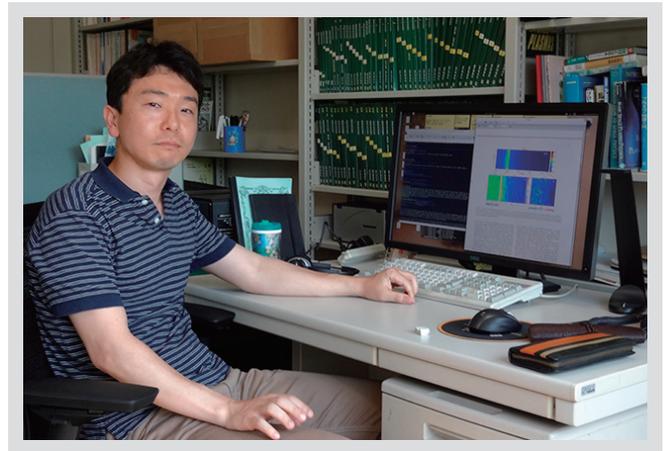
#### ※1 実験値

この場合、実験から導き出される原子核のエネルギーレベルを指す。たとえば、炭素12に電子や、ヘリウムイオンなどの別の原子核をぶついたりすると、ガンマ線が出てくる。そのガンマ線を測定することで、炭素12の原子核がとりうるエネルギーレベルを実験から求められる。

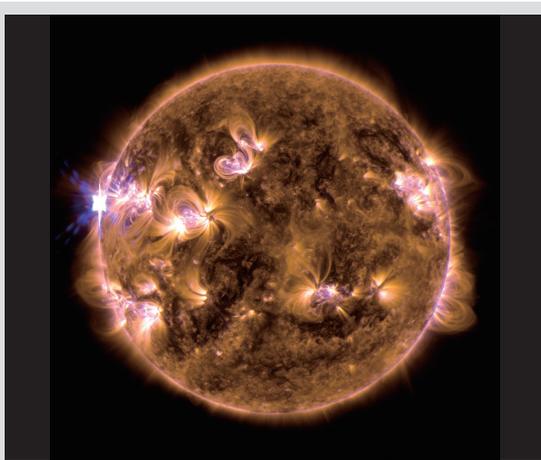
# 宇宙空間のプラズマ粒子の“なぜ？”に迫る

千葉大学大学院理学研究科 松本 洋介 特任助教

この世界には、未だに解明されていない現象がたくさんあります。例えば、宇宙空間には、光の速さの約90%というものすごいスピードで運動する電子がほんのわずかに存在していますが、これも未解明現象の一つです。電子のほか、陽子やイオンなど電荷をもつ粒子をプラズマ粒子と呼びます。宇宙空間のプラズマ粒子シミュレーションの専門家である、千葉大学大学院理学研究科の松本洋介（まつもと・ようすけ）特任助教は今、この電子加速の謎に迫ろうとしています。



## さまざまなプラズマ現象



画像提供：NASA

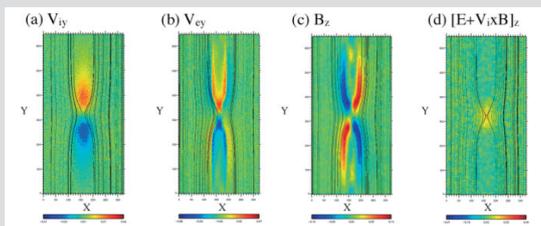


写真1：2013年5月13日～14日にかけて発生した巨大太陽フレア（上）と磁気リコネクション（下）  
高速で運動する電子が放射をするので、強い光を放つ。

「昨日、大きな太陽フレア（写真1）が観測されました。あの現象は、磁気リコネクションによる爆発だと考えられているんですよ」と松本さん。取材前日の2013年5月13日～14日にかけて、巨大な太陽フレアが発生し、ネット上のニュースなどでも取り上げられました。太陽フレアとは、太陽表面で磁場と磁場が接近し、磁力線がつなぎ換わる（磁気リコネクション）ときに起こる大爆発のことで、写真のような強い光が観測されます。この光は、磁気リコネクションの衝撃によって周辺の電磁波が増幅され、その電磁波によって加速された電子がシンクロトロン放射\*などを起こしたことによるものです。

ほかにも、超新星爆発が起こった際に、その衝撃波面が光って見えるのも、そこに高速の電子が存在しているからだともわかっています（写真2）。電子や陽子、イオンなど、電荷をもつ粒子をプラズマ粒子と呼ぶことから、これらの現象は“プラズマ現象”といわれています。

\* 相対論的な速度（光の速さに近い速度）で移動する電子が磁場によって曲げられたとき、軌道の接線方向に光子を放出する現象。

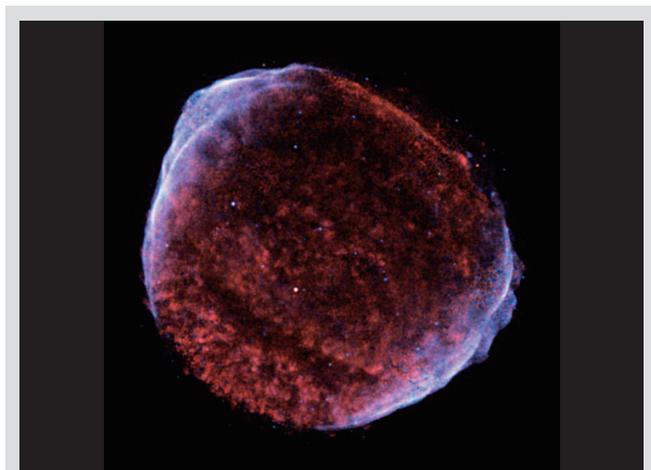


写真2：超新星爆発の衝撃波面  
 白く発光しているのは、太陽フレア同様、高速で運動する電子によるシンクロトロン放射が原因。

## プラズマ粒子の加速

「衝撃波においてプラズマ粒子が加速する現象については、標準理論『衝撃波統計加速（1次フェルミ加速）』が確立しています。しかし、この理論で電子を加速させようとすると、どうもうまくいかないのです」と松本さんは、電子加速を説明するのは簡単ではないといいます。一体どういふことなのでしょう。

プラズマ粒子の標準理論によると、プラズマ粒子は両側から対向して運動する強力な電磁波の壁に挟まれると、電磁波に交互にぶつかり跳ね返されながらエネルギーを獲得し加速するとされています（図1）。これをフェルミ加速といいます。実際、陽子やイオンなどのプラズマ粒子はこの理論に従って加速します。ところが、電子は強力な電磁波とぶつからずに、磁力線に巻きついてしまうというのです。その理由は、電子の質量が陽子の1840分の1ほどととても軽いからです。

しかし、超新星爆発の衝撃波面では、現実に関論的なエネルギーを持つ電子が観測されています。そこで、松本さんは、どうしたら電子が加速するのか、そのプロセスを明らかにしようとさまざまなシミュレーションを行っています。

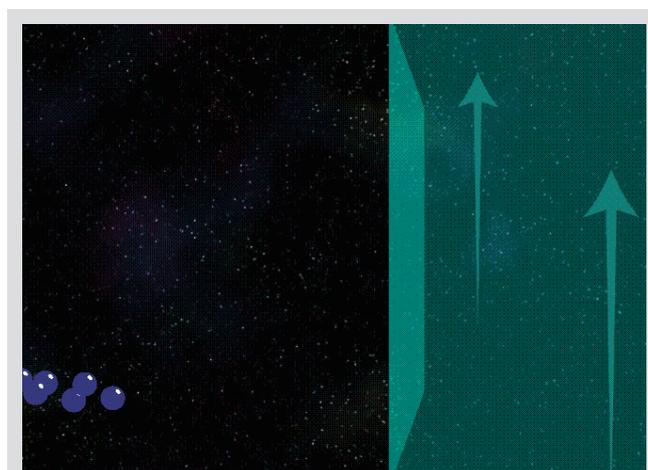


図1：プラズマ粒子の加速の標準理論  
 プラズマ粒子は、対向して運動する電磁波の壁にぶつかりながら加速する。しかし、電子のように軽いと電磁波の磁力線に巻きつき加速できない。

## 電子が加速する“偶然”を見つける

ここでポイントとなるのが、高速の電子は、宇宙空間に“ごくわずかしか存在しない”ということです（非熱的高エネルギーの電子）。つまりそれは、電子の主な運動状態ではないのです。松本さんも、「ある電子が加速されるかどうかは、その電子が電磁波とぶつかったときの状況で決まります。ただし、ほとんどの電子は加速されないので、加速

された電子はラッキーだったといえるかもしれません」と、ごくごく特殊な条件を偶然満たした電子だけが加速するのだといいます。一見同じように見える電子の中に、加速されるものとされないものが存在することについては、松本さんはすでにシミュレーションで確かめています（図2）。このシミュレーションが注目されている理由は、従来のシ

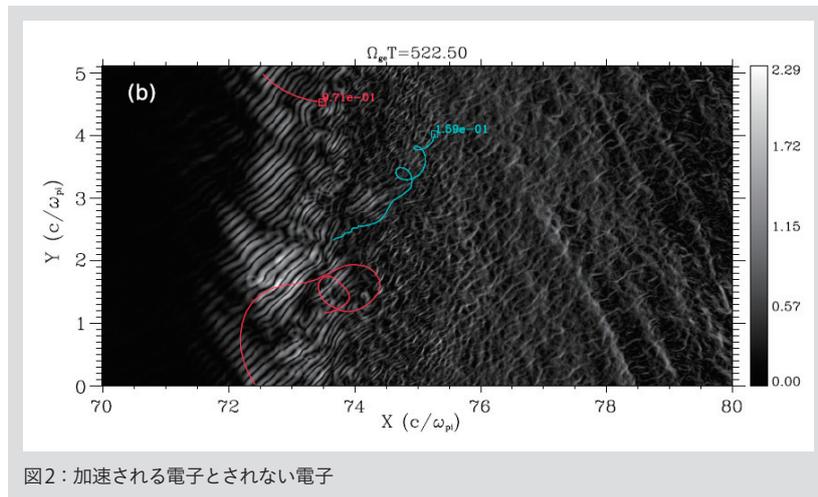


図2：加速される電子とされない電子

ミュレーションが一次元であったのに対して、より高次の“二次元”で行われたことと、そのほかの点でもより現実的な条件設定で行われたことによります。そして、磁力線に巻き付くことなく加速する電子は、超新星爆発によってできる強力な電磁波にぶつかる前に、ある程度加速されている（らしい）という興味深い結果が得られました。このシミュレーションによって、宇宙空間で電子が加速される条件の一端が見えてきました。しかし、これですべてが明らかになったわけではありません。そもそも、プラズマ粒子が加速する際に存在するという“電磁波の壁”が、どのようにして宇宙空間に現れるのかについても多くの謎が残っているのです。

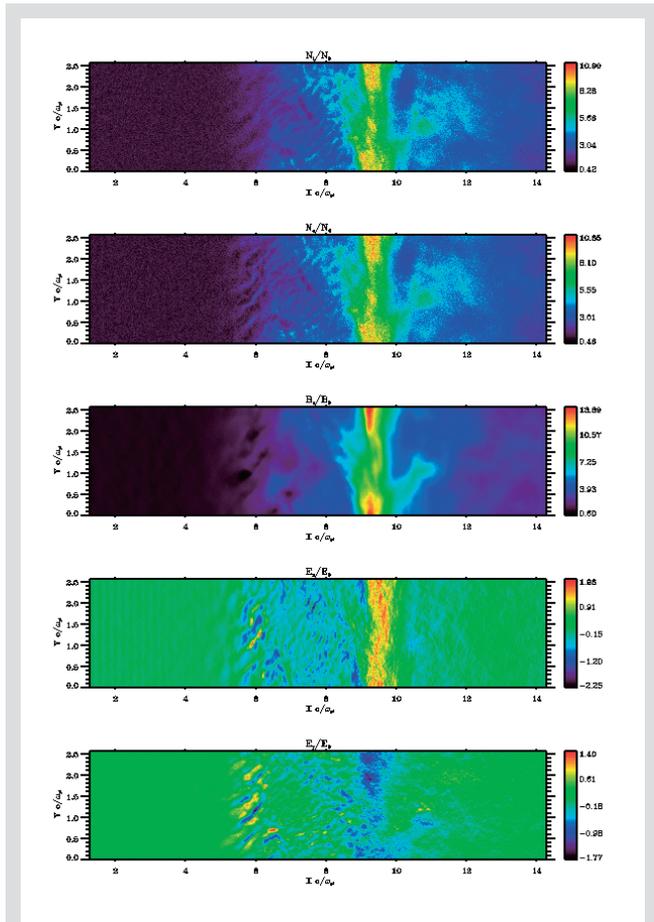
## 出発は、身近な宇宙を知ること

さまざまな宇宙研究がある中で、どうして松本さんはプラズマ粒子の研究をするようになったのでしょうか。「宇宙研究といっても、遠い宇宙ではなくて身近な宇宙を研究したいと思っていました」と話し、だから地球物理学を専攻したのだといいます。地球物理学分野では、地球の磁場が及ぶ宇宙空間“磁気圏”の研究が行われています。この磁気圏で起きている現象を説明するのに、プラズマ物理が欠かせません。例えば、太陽から地球に吹き付けるプラズマ粒子を太陽風と呼びますが、その挙動を説明するのにプラズマ物理が用いられます。松本さんはプラズマ粒子の挙動をシミュレーションするために、学生時代か

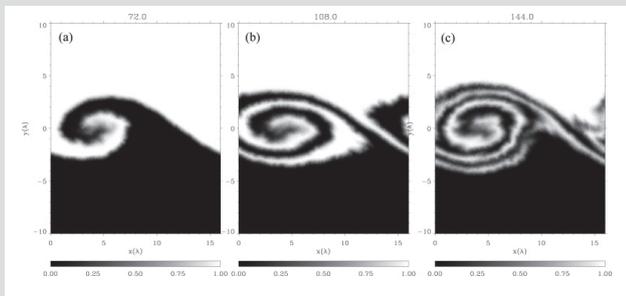
「電子加速の一連のプロセスを解明することは、この分野においてとてもチャレンジングなことで、私がこれまでに示したことは、そのほんの入口に過ぎないのです」と松本さん。その一方で、「最近、スーパーコンピュータ「京」を使ってシミュレーションを行っています。近いうちに、面白い結果を皆さんに発表できるかもしれません」とも話し、電子加速現象への理解が大きく一歩前進することを予感させます。この成果を受けて、電子加速に関する議論はまた新たな局面を迎えることになりそうです。

ら計算機を駆使していました。こうした経験が買われ、「京」を使ったプラズマシミュレーション研究に誘われたのです。そんな松本さんは、この研究の面白さについて、「プラズマ粒子の挙動は、非線形現象です。非線形現象が線形現象と違う点は、現象を表す方程式はわかっているのに実際にどういったことが起こっているかを想像することができない、多様性に満ちているところです。そこで、コンピュータを使うのですが、思いもよらない結果が得られたりするので」と話し、これからも「京」などの巨大計算機を使って、複雑な現象の解明に取り組んでいきたいといいます。

## プラズマシミュレーションをもっと活用するために



無衝突衝撃波



ケルビン・ヘルムホルツ不安定

図3：pCANSを使ったシミュレーション事例  
pCANSには、あらかじめ物理課題が用意されているので、パラメータを決めるだけで、簡単にシミュレーションを体験できる。

松本さんは自分の研究を進めながら、一方でこれまでに得た知識を後進に伝えることにも積極的です。シミュレーションの世界は、計算コード（プログラム）を使いこなさなくてはいい結果を得ることはできません。そこで学生が気軽にシミュレーションに触れられるように、さまざまなシミュレーション用コードが無償で提供されています。プラズマに関するものについていえば、例えば、CANS (Coordinated Astronomical Numeical Software) は、プラズマを流体として扱うことで、銀河や宇宙ジェットなど大きな構造のシミュレーションを可能にするコードをまとめたパッケージです。そこで松本さんは、自分の研究分野であるプラズマを粒子的に扱うシミュレーションのコードをパッケージ化し、CANSにちなんで「pCANS」と名づけて提供しています。この中にあるコードに、いろいろな条件を入れ込めば、衝撃波や磁気リコネクションなどプラズマ粒子が関わる現象のシミュレーションを行うことができます（図3）。さらにパッケージ内には、IDLという市販のデータ解析・可視化用のプログラム言語が入っており、計算結果の映像化もできます。「IDLは、宇宙分野で可視化が必要な現象ならだいたい映像化できるのでとても便利です。しかし、使いこなせるようになるのは結構大変です。だから、私が大学時代から蓄積してきた経験を、ほかの人にも活かしてほしいと思っています」。

まだまだ、謎が残されているプラズマ粒子。pCANSを使って学んだ学生が、次世代の研究者に育つ日が楽しみです。しかしその前に、松本さんが発表するシミュレーション結果から目が離せません。

## 関連リンク

宇宙磁気流体コード <http://www.jicfus.jp/field5/jp/promotion/fluidcode/>

# $\alpha$ クラスタモデルで原子核の構造を明らかに

理化学研究所仁科加速器研究センター 船木 靖郎 協力研究員

「人の体は星屑からできているといわれます。生命の誕生に不可欠な炭素や酸素などの元素は、恒星の中で生まれたということです。でも、その元素、つまり原子核の構造には謎が多く、それが持つエネルギーや環境によって様々な姿を変える“お化け”のような存在であることがわかってきました。私はこの、決して目に見えない原子核の状態を量子力学を駆使して探ることで、新たな物質の存在形態を知りたいのです」。そう語るのは、理化学研究所協力研究員の船木靖郎（ふなき・やすろう）さんです。船木さんは、 $\alpha$  クラスタモデルを使ったシミュレーションによって、原子核の構造を研究しています。



## 特異的な原子核の構造

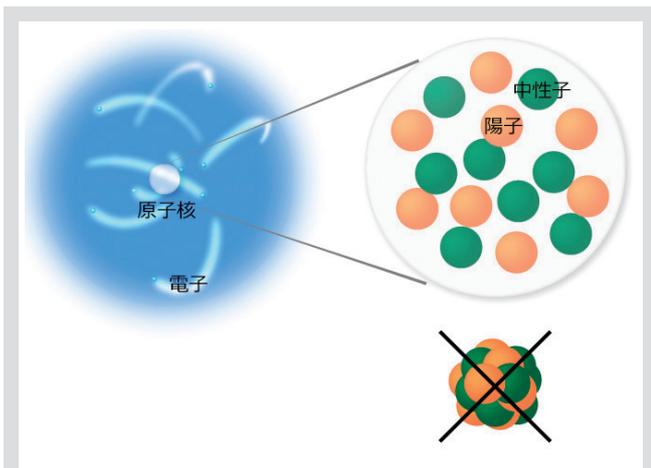


図1 原子核の構造  
原子核は陽子と中性子からできている。陽子や中性子はかたまっているのではなく、互いに力を及ぼしあいながらも自由に運動している。

原子核は、原子の中心にあって、陽子と中性子で構成されています。これらを「核子」といい、核子が核力で結び付いて原子核ができています。最も単純な原子核は陽子1個からできている水素 ( $^1\text{H}$ ) で、そこに中性子が加わると重水素 ( $^2\text{D}$ )、さらに陽子1個と中性子1個が加わるとヘリウム ( $^4\text{He}$ ) になります。ヘリウム原子核は $\alpha$ 粒子と呼ばれています。

「原子核は核子が集まったものですが、かたまってじっとしているわけではありません。核子同士が力を及ぼしあいながらも自由に運動する、ガスや液体のような状態と考えられています」と船木さんは説明します (図1)。

天然に存在する「核種」(原子核の種類) は300種ほどあると考えられており、それらの核種の誕生が宇宙のなりたちに関わるとされています。初期の宇宙には、水素とヘリウムしかなく、それらが重力によって集まって、ヘリウムより重い原子核が生まれました。

炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) より重い原子核をつくるためには、まず、ヘリウム原子核 ( $\alpha$ 粒子) が2個集まったベリリウム ( $^8\text{Be}$ ) 原子核に、さらに $\alpha$ 粒子が衝突して炭素の原子核をつくる必要があります。しかし、ベリリウムは非常に不安定で10～16秒程度しか存在できず、すぐに元の $\alpha$ 粒子2個に崩壊してしまいます。ところが、崩壊するまでにもう1つ $\alpha$ 粒子が反応すると、エネルギーレベルの高い励起状態の炭素になります。炭素原子核の励起状態は不安定で、高エネルギーのガンマ線を放出して、最もエネルギーレベルが低くて安定な炭素の基底状態に落ち着きます。

「この不安定な炭素原子核の励起状態をホイール状態と言います (図2)。この状態を通過しないと炭素原子核の合成が進みませんし、重い原子核への反応にもつながりません。私たちの体を作る炭素や酸素もできませんから、ホイール状

態がないと私たちの体も作られないこととなります」と船木さんは話します。ホイール状態がどんな構造をしているのかは不明な点が多く、実験と理論の両方から研究が続けられています。

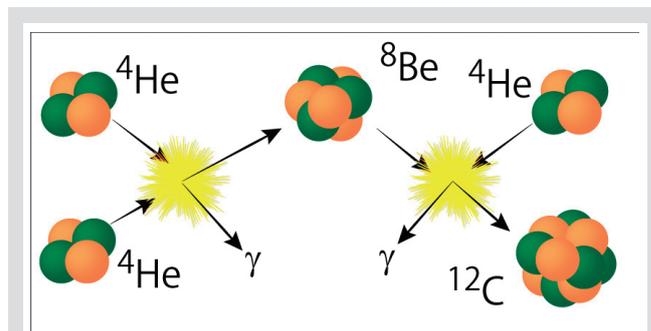


図2 炭素のホイール状態  
ヘリウム ( $^4\text{He}$ : 図の左) からベリリウム ( $^8\text{Be}$ )、炭素のホイール状態 (右の衝突している部分) を経て、安定な炭素 ( $^{12}\text{C}$ : 図の右下) が生成される。

## 原子核のふるまいを説明するための2つのモデル

原子核を研究するときは、「殻模型 (からもけい)」というモデルがよく使われます。殻模型とは、核子が原子核の中を比較的自由に運動しつつ、同時に「殻」のような構造をもつとして原子核を記述しようとするものです。ヘリウムなどの質量数の小さな軽い原子核から質量数の大きい重い原子核まで広範囲で適用でき、原子核の構造や運動を理解するうえで標準的なモデルです (図3左)。

「殻模型は、安定な基底状態や多くの励起状態を説明するのに大成功したモデルですが、特に軽い原子核のいくつかの励起状態に関しては、殻模型ではどうしても説明がつかないことが示されてきました。 $\alpha$ クラスター模型を用いると、そのような“不思議な状態”に関する多くの実験結果を矛盾なく説明できる場合が多いのです。そこでこのモデルで、殻模型で説明できないような励起状態の原子核を説明しようとしたのです」。

軽い原子核では、先にあげた $\alpha$ 粒子 ( $^4\text{He}$ 原子核) が大きな役割を果たしています。 $\alpha$ クラスター模型では、 $\alpha$ 粒子

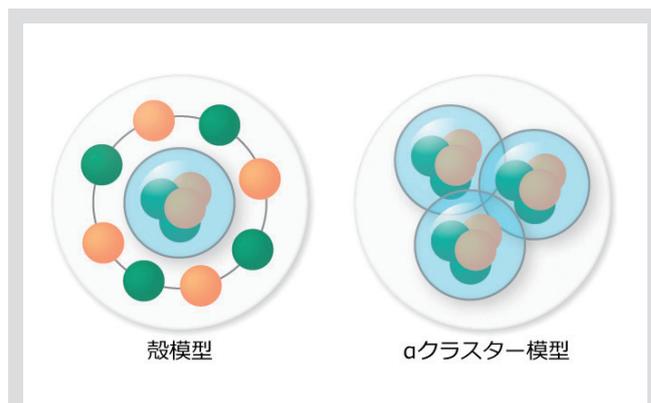


図3 殻模型 (左) と $\alpha$ クラスター模型 (右)  
殻模型は、原子核の中心にある陽子と中性子の塊の周りを陽子や中性子などの核子が回っているとするモデル。 $\alpha$ クラスター模型は、 $\alpha$ 粒子を基本的な構成単位とするモデル。炭素の原子核 (陽子6個、中性子6個) は $\alpha$ 粒子3つからなると考える。

を基本的な構成単位として、軽い原子核の構造や運動を考えます。この模型によれば、ベリリウム ( $^8\text{Be}$ ) 原子核は $\alpha$ 粒子2つから構成され、炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) 原子核は $\alpha$ 粒子3つからなると考えます (図3右)。

## 原子核の中の凝縮状態

船木さんらの研究グループは、まず炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) 原子核の中で $\alpha$ 粒子が相互作用するメカニズムを、 $\alpha$ クラスター模型による緻密な計算によって調べました。その結果、励起状態の炭素の原子核は $\alpha$ 粒子3個からなっており、核子の

密度が基底状態の4分の1になることが確認できました。「基底状態では核子は液体の分子のようにふるまっていますが、励起状態では希薄なガスのような状態にあると考えられました」と船木さんは説明します。

また、これらの $\alpha$ 粒子が「 $\alpha$ 凝縮」状態になっていることが示されました。 $\alpha$ 凝縮は、ボース・アインシュタイン凝縮に似た状態であることから名づけられました。ボース・アインシュタイン凝縮は、光子やヘリウム原子核に代表されるボース粒子に特有の現象で、多くの粒子が単一のエネルギー状態に存在する現象です。核子はボース粒子とは違う性質をもったフェルミ粒子であり、単一な状態に凝縮することができません。ところが、核子（フェルミ粒

子）が4つ集まった $\alpha$ 粒子はボース粒子としてふるまうため、 $\alpha$ 凝縮という現象が起こりうるのです。

このような、 $\alpha$ 粒子からなるガスのような状態は、炭素の原子核にとどまらず、酸素（ $^{16}\text{O}$ ）やネオン（ $^{20}\text{Ne}$ ）などの原子核でも存在する可能性があります。船木さんらは、炭素の原子核より $\alpha$ 粒子が1個多い、酸素の原子核でも調べてみたところ、予測通り励起状態に $\alpha$ 凝縮状態が存在していることが示されました。

## 不思議な世界を明らかにしたい

「ホイル状態を殻模型で考えると、どうしても理解できない不思議なエネルギー状態があるのですが、それを $\alpha$ クラスター模型で計算すると、原子核の状態がわかります。それが、びっくりするくらい実験結果と一致するのです」と船木さん。

2011年に、東北大学や大阪大学の研究グループらの実験によって、炭素原子核のホイル状態には、第二のエネルギー励起状態があることがわかりました。このようなエネルギー状態があるのではないかと、 $\alpha$ クラスター模型による計算では予言されていました。それが、実験でようやく確定したのです。

高温の恒星の中では、まず炭素の原子核ができ、次々に重い原子核がそれらの励起状態を経て作られていくと考えられています。実験だけではその状態を明らかにすることが難しく、 $\alpha$ クラスター模型の計算機シミュレーションによる研究成果が期待されています。

「 $\alpha$ クラスター模型により炭素や酸素の原子核の励起状態を説明することができました。続いて、これがどれだけ重い原子核まで通用するのかを調べています。原子核には、わからない状態がたくさんあります。この原子核の不思議な世界を明らかにしていきたいと思います」と船木さんは締めくくりました。

# アインシュタインが出した宿題を解く —ブラックホール研究の先にある物理

京都大学基礎物理学研究所 関口 雄一郎 特任助教

光さえも吸い込んでしまうため真っ暗に見えるブラックホール。「吸い込むだけでなく、ブラックホール誕生初期には、とてつもないものを出しているんです」と京都大学の関口雄一郎（せきぐち・ゆういちろう）特任助教は言います。ブラックホールができる過程をシミュレーションしている関口さんがその研究の先に見据えているのは、「およそ100年前にアインシュタインが出した宿題」とのこと。時空を超えた物理研究のお話を伺いました。

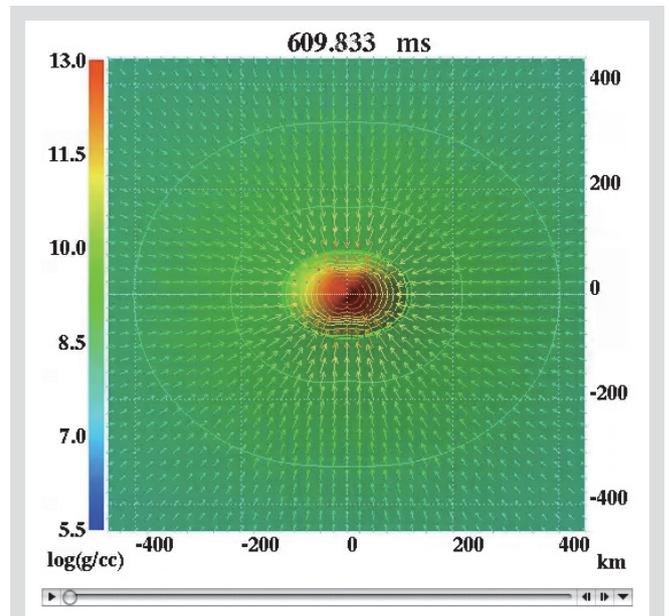


## ブラックホールを作る

関口さんは「私はブラックホールを作っています」と自身の研究を紹介します。いったい、どうやったらブラックホールを作ることができるのでしょうか。まずは、関口さんが2011年に作ったブラックホールをご覧ください。

動画は恒星が終末期に超新星爆発を起こし、その後、ブラックホールができる様子をシミュレーションしたものです。星の内部で対流が起こったり、降着円盤と呼ばれるディスク状の構造ができたり、星の表面からジェット状に物質が放出されるアウトフローが発生したりと、複雑な現象が連続して起こっているのがわかります。

2005年に関口さんがシミュレーションしたときには、これほど複雑な現象を示すブラックホールを作れず、ただ、星がつぶれて収縮するという計算結果でした。6年の研究の積み重ねで、ブラックホールを追跡するための数値的技法を開発できたことに加え、微視的物理学と呼ばれる複雑な過程を盛り込み、それを取り扱う数学的手法も発展してきた



オリジナル：MPGE (404MB)

[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/UM100\\_rig\\_medium.mpeg](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/UM100_rig_medium.mpeg)

簡易版：QuickTime (11MB)

[http://www.jicfus.jp/jp/wp-content/uploads/2013/11/UM100\\_rig\\_medium.mov](http://www.jicfus.jp/jp/wp-content/uploads/2013/11/UM100_rig_medium.mov)

ので、冒頭の動画のように複雑な現象を追えるようになりました。

宇宙空間で、物質に働く力は4種類。関口さんの研究では4つすべてを考慮にいられています。極限状態の超高密度物質に働く核力などの「強い力」、ニュートリノと物質の相互

作用などを記述する「弱い力」、電磁気力、重力をすべて考慮にいられた複雑な計算をしているのです。きちんと計算しようと思うと、4種のうちの一種類だけでもスーパーコンピュータが必要なほどの複雑さです。関口さんの計算プログラムではいくつかの簡略化を行っていますが、それでもその長さは10万行を軽く超えるそうです。

## ブラックホール研究の先にみすえている基礎物理

関口さんは「ブラックホールのシミュレーションは、アインシュタインが出した宿題を解くヒントを出せるはずだ」と考えています。

アインシュタインは、一般相対性理論のなかで重力波の存在を予言しました。しかし、まだ重力波を直接とらえてはいません。もし、この重力波を観測、実証できたらノーベル賞は間違いないといわれています。

現在、この重力波を捕らえるための実験装置KAGRA（かぐら）を岐阜県の神岡鉱山に建設中です。重力波は、たとえば連星中性子星が合体してブラックホールができるときに放出されます。しかし、重力波を観測するには、地球と太陽の距離がわずかに原子1個分だけ変動するような、極

微の空間のゆがみを検出しなくてはなりません。このようにわずかなゆがみをとらえるには、やってくると期待される重力波に関する予言を行い、その予言と実際のデータの整合性を確かめる形で観測しなければなりません。観測に際して、理論側が提供する狙いどころが重要となります。「この時間に連星中性子星が合体しました。そうすると、この方向から、このような波形の波が来ているはずなのです」という狙いどころをシミュレーション結果から出せるのです。

重力波という新しい観測手段によって、宇宙に関する理解は大きく進展すると期待されます。このようにブラックホール研究の先には、先人が発展させてきた基礎物理の真理をさらに追究するという壮大な夢が広がっているのです。

## ブラックホール研究の難しさ

関口さんは、「ブラックホールを扱う一般相対性理論のシミュレーションはとにかく複雑で大変なんです」と言います。

あまりにも複雑な物理を扱うため、シンプルな微分方程式では現象を表現できないところもあるのです。たとえば「強い力」は、実際にシミュレーション中に計算するにはあまりにも複雑なため、結果をあらかじめ「表」にまとめておきます。その上で、計算の途中でコンピュータにこの「表」を参照してもらい、「シミュレーションで得られた、こういう密度でこういうエネルギーでこういう熱力学状態を一番再現するのは「表」の中でどの状態にあたるのか」という探索を行い、その探索結果を反映して次の計算へ進むという過程もあります。

アインシュタイン方程式を解くにも注意が必要です。この

方程式はエネルギーと運動量がきちんと保存されるように解かないと、計算が破綻してしまうことが知られています。ですから、エネルギーと運動量が保存するように計算式を立てるといふばりのなかで計算を進めます。

また、ニュートン力学では、質量は重さと単純に考えることができます。しかし、相対性理論では「速く動くと重くなる」のです。ですから、質量を考えるときには、そこに「速さ」の情報も必要になります。そして、温度が高いことは相対論的には重いことを指します。結局、質量を考えるときには、速度と温度の情報も計算しなければなりません。

さらに難題が続きます。先ほど述べた「表」を探索するには、密度の情報が必要です。密度を求めるときには速度と温度による効果を補正する必要がありますが、この温度は

「表」を用いて初めて求まります。「表」を用いるためには密度の情報が必要ですが、その密度はいま求めようとしていたものです。つまり、「密度」が循環してしまうのです。解析的に書き下された方程式になっていれば、式を解けば答えは出てきますが、計算の途中には「表を参照」というステップが入ります。結局、非常に手間のかかる計算をしなければならないのです。

そして、関口さんの研究ではニュートリノが非常に重要になります。ニュートリノは「弱い力」で記述されます。「弱い力」といっても、「重力」よりは十分に強い相互作用です。

シミュレーション中に強さが大きく異なる複数の相互作用が入ってくる場合には注意が必要です。ブラックホール

形成を追跡するためには、「重力」で特徴づけられる「長い」時間のシミュレーションを継続する必要がありますから、時間経過の最小単位はそれに応じて長く設定されます。しかし、重力よりはるかに強い「弱い力」による相互作用は、「長い」時間経過では追跡することができません。そのため、単純な計算法では正しい結果が得られなかったり、計算中に「弱い力」による相互作用の部分が暴走的に大きくなったりして、計算自体が破綻してしまうこともあります。これら为了避免するため、一般的に「陰的スキーム」と呼ばれる手法を用いますが、すでに述べた相対性理論特有の難しさのため一筋縄ではいかず、ここでも計算は複雑にならざるを得ないのです。

## スーパーコンピュータへの期待

スーパーコンピュータ「京」は「(世界)最速」と表現されますが、関口さんは、「計算速度にもいろいろあるんです」と言います。

関口さんが求める「速い」コンピュータは、シンプルな計算をひたすら速く計算するタイプではなく、複雑な計算でも速く行うことができるもの。そのためには、計算機が条件分岐などの複雑なプログラム構造に対して強く、コンピュータ内部の「通信速度」が速い必要があるのだそうです。

京のようなコンピュータがあるからこそ、関口さんは複雑な計算式を用いて研究できるようになってきました。しかし、「京の計算能力の10%は必ず引き出してほしい」という使用条件は、関口さんの研究にとってはハードルが高いといえます。

計算能力を引き出すには、計算式を京が使いやすいように「チューニング」する必要があります。このチューニングは物理とは違ったコンピュータの知識が必要で、使用するスーパーコンピュータの個性をしっかりと理解したうえで、オーダーメイドのチューニングを行う必要があります。「今後、スーパーコンピュータの性能がもっと上がっても、チューニングの専門家や利用者への支援体制がもっと拡充されていかないと、せっかくのコンピュータを十分に使いこなせない事態を招くのではないか」と関口さんは心配顔です。

そんな関口さんが研究の喜びを感じるのは、「計算のバグをみつけられたとき」とのこと。軽く10万行を超える計算コードのなかから不具合をおこしている箇所を見つけるのは至難の業。この分野で世界をリードする関口さんですが、「自分とはまったく異なる発想をしてくれる仲間がほしい」と思いながら研究をしているそうです。

# 太陽系惑星形成論が持ち越してきた 問題に挑む

東京工業大学 小南 淳子 産学官連携研究員

太陽系の惑星（図1）はどのようにして現在の姿になったのかをシミュレーションする太陽系惑星形成論研究。「太陽系の惑星形成の研究はかなり進んでいます。ところが、現在知られている惑星形成のシナリオには、いくつかの問題点が残されています。最近の私の研究成果と、スーパーコンピュータ「京」の計算能力をあわせれば、その問題点を解消するようなシナリオがもしかしたらみえてくるかもしれません」と語るのは、東京工業大学地球生命研究所産学官連携研究員の小南淳子（こみなみ・じゅんこ）さん。最新の研究成果とこれから取り組む研究についてお話を伺いました。



図1：太陽系の惑星（出典：The International Astronomical Union/Martin Kormmesser）

## 太陽系惑星形成シナリオが抱える問題点

太陽系の惑星は、太陽系の形成初期にあった微惑星が衝突と合体を繰り返して、現在のサイズに成長したとされます（図2）。微惑星が火星サイズの原始惑星にまで成長し、さらに衝突合体を繰り返して地球のような惑星が形成されると考えられています。

しかし、このシナリオには問題点がいくつか残されているそうです。

第一に、微惑星が形成されるよりも前、ガス円盤内で微惑星が形成されていく過程ははまだ明らかになっていません。例えば、ガスの乱流を考慮に入れると、微惑星は形成されない可能性が出てきます。ですから現在は、微惑星ができることを前提としたシミュレーションで研究されています。

第二に、地球上に存在する水がなぜ0.02重量%なのか説明できていません。現在の惑星形成シナリオで計算すると、地球にはもっと多くの水が存在している計算結果が得られるのだそうです。

第三に、太陽系の外縁部に位置する海王星や天王星の形成過程は、実は明らかになっていません。外縁部に位置する惑星を現在の惑星の大きさまでその場で成長させようとすると、太陽系の年齢を超えてしまいます。海王星や天王

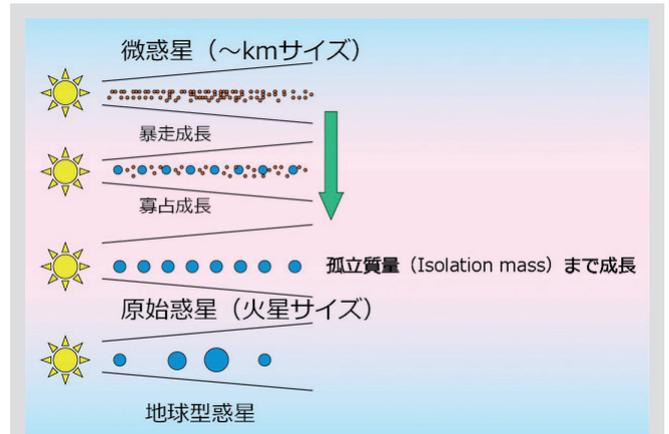


図2：太陽系の惑星が衝突合体を繰り返して成長する様子。「微惑星」が成長して火星サイズの「原始惑星」ができ、さらに衝突合体をして、現在の惑星の姿になったと考えられている。それぞれの過程で確からしいと認められるシミュレーションが確立している。(Greenberg et al. 1978, Wetherill and Stewart 1989, 1993, Kokubo and Ida 1996, 1998, 2000, 2002, Weidenschilling et al. 1997, Makino et al. 1998, Chambers and Wetherill 1998, Agnor et al. 1999, Inaba et al. 2001, Iwasaki et al. 2002, Kominami and Ida 2002)

星は太陽に近い所で形成されて外側に移動して現在の姿になった、などの特殊な惑星形成シナリオも考えられますが、定説となるものはまだありません。

そのほかにもいくつかの問題はありますが、小南さんは、この3つの問題点を解決する新たなシナリオを提案できるかもしれないと考えています。というのも、小南さんの最近の研究で、面白いシミュレーション結果が得られたからです。

## 新たにわかった太陽から遠い惑星の挙動

小南さんは海王星より遠い領域の惑星形成の仕方について研究をしてきました。

二つの物質に働く引力を考えると、太陽に近いと太陽に支配される割合が大きくなります。太陽から遠く離れると自分の引力が効く割合が大きくなります。つまり、太陽から遠く離れたほうが、近くに岩のような物質が来たときに捕獲しやすいことになります。

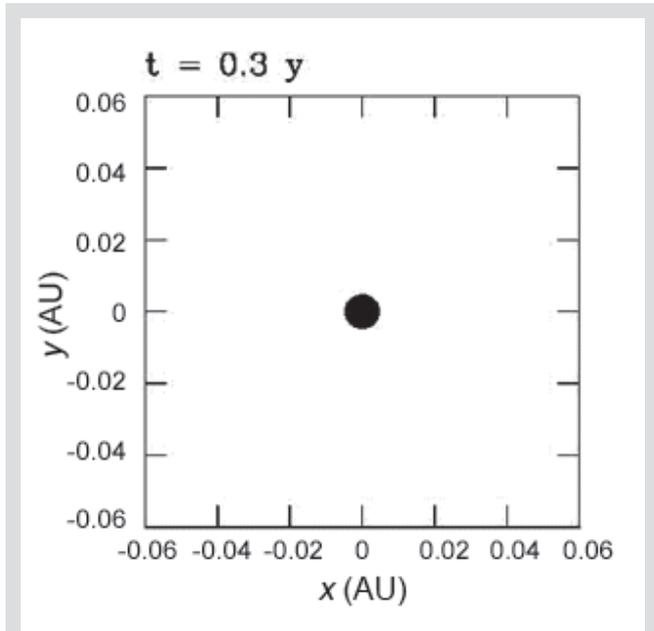
小南さんは、太陽から遠い領域にある3万体の物質に太陽からの重力、粒子間の相互重力といった力が働いた場合、どのように衝突合体が起きるかをスーパーコンピュータで

シミュレーションしました。すると、地球付近と海王星より遠い領域では、衝突合体の様子が違うことがわかりました。

海王星より遠い領域では、「連星ができてから衝突する」現象が起こります。それは全衝突の2割を占め、そのような衝突が起こらない地球付近に比べて違いは明らかです。「連星」とは、二つの物質がぐるぐると回りながら太陽の周りを公転しているものです（動画1）。実は準惑星の冥王星とその衛星カロンも連星系といわれており、どのように形成されたかの研究が行われています。2割という数値は、初期条件によって変動します。海王星の領域では、連星を

考慮しないと、惑星形成の時間が太陽系年齢以上の時間がかかってしまいます。しかし連星を考慮すると、形成時間はその数分の一から10分の一になり、太陽系年齢以内

で天王星や海王星が形成される可能性がでてくるのです。つまり、太陽から離れた領域では、今まで考えられていた時間より短い時間で惑星が成長できることになります(図3)。



動画1：連星系の形成。中央の黒い微惑星に青い微惑星が近づいてくるが、青い微惑星は黒い微惑星と連星にならずに去っていく。赤い微惑星が黒い微惑星の回りをクルクルと回る。この赤い微惑星と黒い微惑星が連星になる。AU（天文単位）は太陽と地球の平均距離を表し、約1.5億km。オリジナル：MPGE（76.5MB）  
<http://www.jicfus.jp/wp-content/uploads/2013/12/ANIM.mpg>

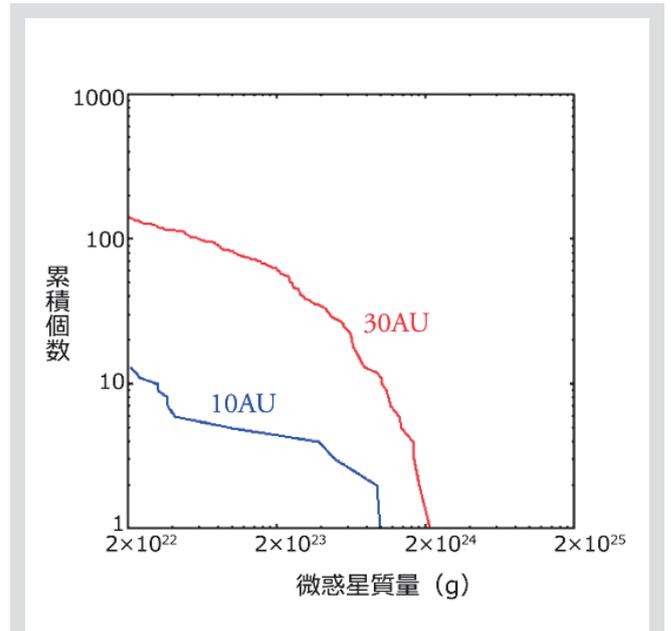


図3：太陽系外縁部の連星のできやすさ  
 赤い線は30AU（海王星の軌道付近）の1万年後の連星の累積分布。青い線は10AU（土星の軌道付近）の1万年後の連星の累積分布。縦軸は連星系の数、横軸は連星系の重さを表す。3AU、1AUでは、連星が1万年後にはなくなってしまう。

## ブレークスルーへの期待

太陽から遠い領域で新たな知見を得た小南さんは、太陽からの距離が近いところから遠いところまでトータルにシミュレーションすることに挑んでいます。現在の惑星形成のシミュレーションは「地球型惑星（水星、金星、地球、火星）」「小惑星帯」「ガス惑星（木星、土星）」「氷型惑星（天王星、海王星）」といった領域で個別に進められています。

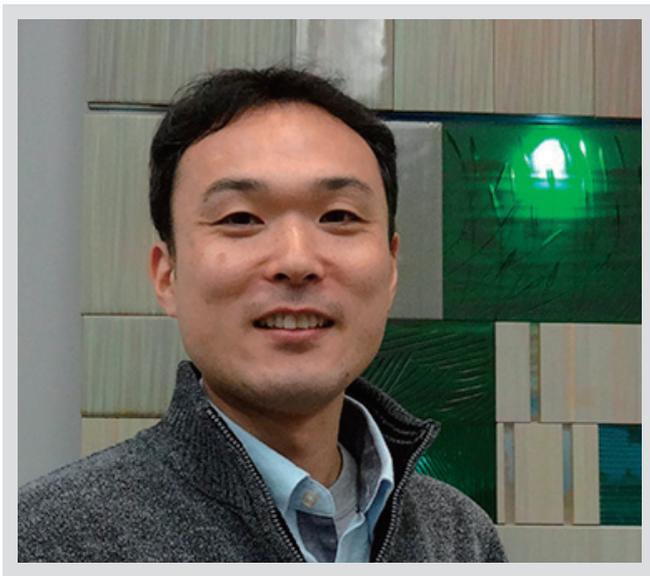
しかし、これでは領域間の相互作用は考慮に入りません。そこで小南さんは相互作用も考慮できるようにすべての領域にわたるシミュレーションをしようと考えています。実は、多くの粒子が衝突合体を繰り返す様子を研究する「N体研究」はこのところあまり活発に研究されていませんでした。なぜなら、コンピュータの性能が上がらないと、これ以上複雑なシミュレーションへと研究を発展させられなかったからです。

小南さんは「京ならば計算できる」と考えています。太陽に近いところから海王星以遠の領域まで1000万体の物質が衝突合体をしていく様子を計算する計画です。

現在、計算コードをスーパーコンピュータ「京」仕様にチューニングしている小南さん。研究をしていて一番楽しいのは、思いもよらない計算結果が出たとき。「計算コードは間違っていなかったよね。」と計算式を確認して「大丈夫。大丈夫。それで、..、何がおこっているんだろう?」と結果をじっくり吟味します。京の計算でどのような「思いもよらない」結果が出てくるのか今からとても楽しみなのだそう。

# 格子 QCD で原子核を解明する クォークとグルーオンから原子核を 形成する力を導けるのか

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 山崎 剛 特任助教



2つの陽子と2つの中性子—4つの核子からなるヘリウム原子核。名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構の山崎 剛(やまざき・たけし) 特任助教は、これを「多体核子」と表現します。核子が4つで「多体」とは少ないように思うかもしれませんが、核子ひとつひとつは、物質を構成する最小単位と考えられている素粒子、クォーク3つとグルーオンで構成されています。素粒子の振舞いから原子核の性質を計算する山崎さんにとって、ヘリウム原子核は4核子の集合体ではなく、その数倍の素粒子が複雑に影響を及ぼしあっている集団に見えているのです。2009年には、「こんな複雑な計算はまず無理」と考えられていました。それを可能にした山崎さんは、どのような工夫を重ねてきたのでしょうか。

## 素粒子からヘリウム原子核を計算する

山崎さんが挑んでいるのは、「格子QCDを使ってヘリウム原子核の束縛状態を計算で確かめる」という研究です。

格子QCD (Quantum Chromo Dynamics:量子色力学)とは、素粒子のうちクォークとグルーオンに働く「強い力」を計算可能にした理論です(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)。格子の交点にクォークを、点を結ぶ辺にグルーオンを配置することで、素粒子間に働く力の計算をしていきます(図1)。

束縛状態とは、原子核を作る素粒子がそれぞれ独立して散らばっているのではなく、原子核としてぎゅっとかたまりを形成している状態のこと。つまり、格子QCDで計算した核子のエネルギーとヘリウム原子核のエネルギーを比較して「束縛状態である」という結果になれば、計算に使った素粒子は原子核という集団として安定に存在すると考えられます。

なぜ、山崎さんは「格子QCDを使ってヘリウム原子核が束縛状態を形成するか」に興味を持ったのでしょうか。

ノーベル物理学賞を受賞した湯川秀樹博士は、陽子と中性子を強く束縛し、原子核を形成するための力のもととなるパイ中間子の存在を1935年に提案しました。後に、パイ中間子が確かに存在すると実験で確かめられました。

ところが、今は、クォークとグルーオンが陽子や中性子を作っていると考えられるようになりました(図2)。そこで、パイ中間子ではなく、素粒子に働く力から原子核を束縛している力を説明してみようと山崎さんは考えたのです。

ヘリウムは最も安定な原子核として知られています。安定とは、束縛のエネルギーが大きいということです。そのため山崎さんは、他の原子核よりも容易に束縛エネルギーが計算できるだろうと考えました。

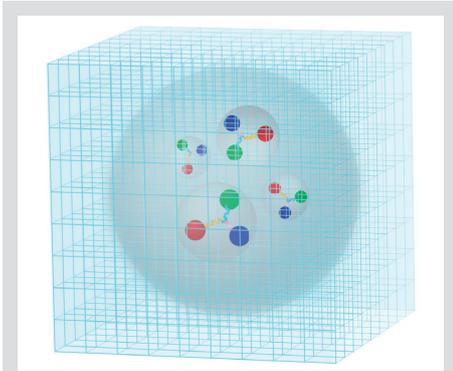


図1：格子QCDのイメージ図

計算の便宜上、クォークとグルーオンを格子状に配置する。格子のサイズを無限大にすると格子という型にはめ込んだ影響がなくなり、実際の状態に近づけることができる。素粒子に働く4つの力（重力、弱い力、電磁力、強い力）のうちの「強い力」について計算ができる。

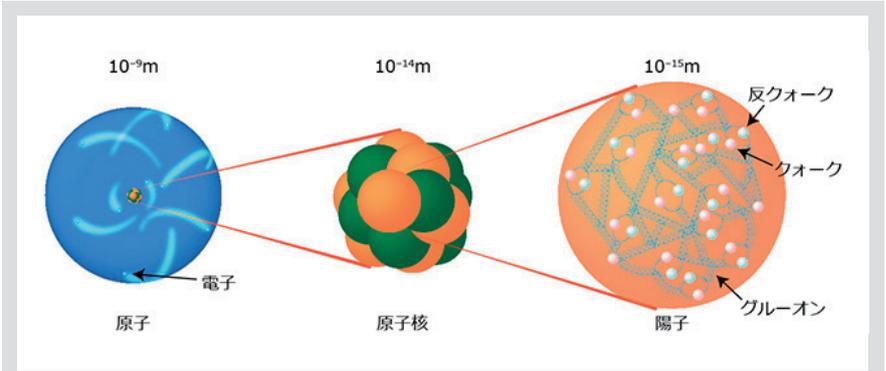


図2：クォークとグルーオンの模式図

原子核は陽子と中性子からできており、陽子はuudという二種類3個のクォークとその力を媒介するグルーオンからなる。中性子は、uddとグルーオンからなる。クォークとグルーオンは現在、物質を構成するもっとも小さい単位と考えられている。uはアップクォーク、dはダウンクォークを表す。

## 3つの難しさ

山崎さんがこの研究を始めた2009年当時、ヘリウム原子核について格子QCDで計算する研究者は誰もいませんでした。というのも、この研究には3つの課題があったからです。

第1は誤差の問題です。この研究で使う計算式に含まれる誤差は、核子数が増えると指数関数的に大きくなってしまいうというものでした。ヘリウム原子核の核子数は4つ。数値計算にとって「特別に悪い振る舞いをする」誤差だったのでした。

第2の問題は計算コスト（計算量）です。格子QCDで素粒子間に働く力を計算する場合、核子を構成単位とするときよりはるかに多くの粒子間相互作用を計算しなければなりません。計算量の指標となるクォーク縮約数<sup>※1</sup>は、核

子1つであれば2であるのに対し、核子が4つのヘリウム原子核 ( ${}^4_2\text{He}$ ) の場合は518,400と桁違い。Lattice2009国際会議<sup>※2</sup>の基調講演で「核子数が4の計算は膨大な計算時間のため実行不可能」と言及されるほど、当時としては大変な計算量だったのでした。

第3の問題は、有限体積上束縛状態識別です。格子QCDの方法では、計算量を抑えるために、「クォークは限定した体積のなかに存在する」という仮定を強いられます。現実とは異なる限られた体積の範囲での計算から「束縛状態にある」という結果が得られたとしても、それが有限体積にクォークを押し込めてしまったために起こっている束縛なのか、それとも本当に原子核をつくっている束縛状態なのかを判断できないのです。

## 問題を乗り越えたブレークスルー

2010年、山崎さんたちは3つの問題を乗り越える重要な発明をしました。計算量を減らす手立てを見出したのです。クォーク縮約の計算は、同じような計算を何回もしています。山崎さんらは、分別して同じ計算を省くようにしたのです。この工夫で、518,400だったクォーク縮約数は1107にまで減りました<sup>※3</sup>。これは、第2の問題を解決すると同時に、第1、第3の問題も解決してくれました。

第1の問題—統計誤差は、多くの測定点について計算をすることである程度減らすことができます。1つの計算にか

かるコストが減ることで、多くの測定点について計算することが可能になりました。また、誤差を減らすために現実より重いクォーク質量を計算に使う<sup>※4</sup>という方針も選択しました。

第3の問題—有限体積については、いくつかの体積についての計算を行い、無限体積へ外挿しました（図3）。その結果、無限体積での束縛状態を予測できるようになりました。1つの計算にかかるコストを減らすことができたために可能になった方法です。

このようにして山崎さんは、ヘリウム原子核の束縛状態を計算することに成功しました (図3)。山崎さんの計算からは、実験値に近い束縛エネルギーが算出されました。

ところが、山崎さんは「この結果は大喜びというわけにいかない」と言います。なぜなら、同じ手法で、現実には存在しないはずの陽子二つだけ、あるいは、中性子二つだけの場合を計算しても「束縛状態にある」という結果が出て

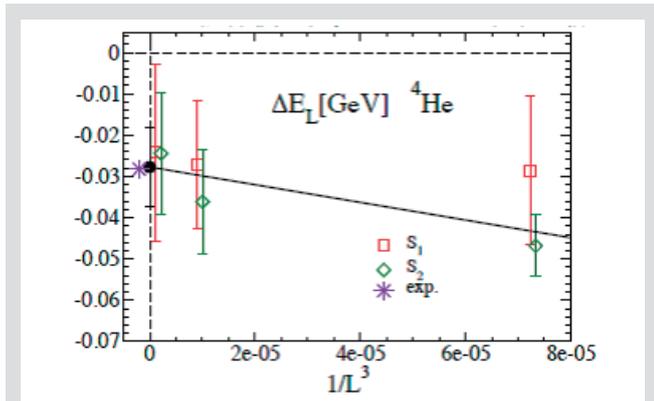


図3：ヘリウム原子核の束縛状態計算結果  
縦軸  $\Delta E$  が負の値をとると、原子核は束縛状態であることを示す。横軸は計算に使った体積の逆数。この図では、3つの異なる体積について計算して外挿直線を算出。外挿直線が縦軸と交わる点（体積が無限大での束縛エネルギー）を予測した。青星印は実測値を表す。S1とS2は2種の異なるパラメータを用いた計算で、これらが近い値となったことで、計算が確からしいということがわかった。

きてしまったからです (図4)。本来なら、現実には原子核として存在しない場合は、「束縛状態はない」という結果になるはずなのです。

これは、計算量を抑えるために、実際よりも非常に重いクォーク質量を使っているからだとして山崎さんは考えています。高い計算能力をもつスーパーコンピュータ「京」を使えば、現実のクォーク質量を使った計算も可能となります。山崎さんは2014年度からスーパーコンピュータ「京」を使った研究を始める予定です。

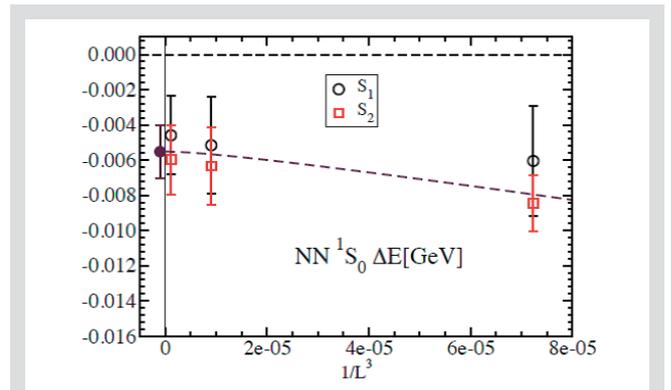


図4：現実には存在しない核子2つの束縛状態計算結果  
陽子と陽子、あるいは、中性子と中性子の束縛状態を計算した結果。現実には存在しない原子核なので原点を通るグラフになるはずが、横軸が0のときに負の値を示している。

## まだまだ欲しい計算資源

山崎さんは、これから研究してみたいことを語るのに、「いつになるかわかりませんが、」という前置きをします。というのも、山崎さんは計算を始めてから結果得るまでに数カ月はかかるという、とても時間のかかる計算をしているからです。図3のグラフ1つ仕上げるのに、ほぼ1年の月日を要しました。山崎さんは「リターンキーを押したら、瞬時に答えが出てくるコンピュータがあったら良いのに」とよく考えるそうです。

コンピュータの性能が上がれば、さまざまな研究が現実的な計算時間で可能になってきます。現在、アップクォークとダウンクォークの質量は同じと近似しているため、質量の違いを考慮した研究にも挑みたいそうです。また、不安定でなかなか現実には存在しないような原子核や、もっと大きな原子核についても計算してみたいそうです。

このように研究が進んでいくと、「もしもクォークの質量が現在と少し違っていたら、この世の中はどのような元素でつくられていたのか」という研究もできると山崎さんは考えています。

## 用語解説

- ※1 クォーク縮約数。クォークをつなげる操作の数。
- ※2 格子QCDに関する国際会議。Latticeは格子の意味。
- ※3 現在では、もっと少ないクォーク縮約数の計算方法が提案されている。

- ※4 格子QCDでは、クォーク質量をパラメータとして扱う。クォーク質量を重くすると計算量を減らすことができ、かつ統計誤差を減らすことができる。